AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
http://ageconsearch.umn.edu
aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

THÜNEN

Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

Horst Gömann, Andrea Bender, Andreas Bolte, Walter Dirksmeyer, Hermann Englert, Jan-Henning Feil, Cathleen Frühauf, Marlen Hauschild, Sandra Krengel, Holger Lilienthal, Franz-Josef Löpmeier, Jürgen Müller, Oliver Mußhoff, Marco Natkhin, Frank Offermann, Petra Seidel, Matthias Schmidt, Björn Seintsch, Jörg Steidl, Kathrin Strohm, Yelto Zimmer

Thünen Report 30

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.ti.bund.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.ti.bund.de

Zitationsvorschlag – *Suggested source citation:*
Gömann H, Bender A, Bolte A, Dirksmeyer W, Englert H, Feil J-H, Frühauf C, Hauschild M, Krengel S, Lilienthal H, Löpmeier F-J, Müller J, Mußhoff O, Natkhin M, Offermann F, Seidel P, Schmidt M, Seintsch B, Steidl J, Strohm K, Zimmer Y (2015) Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen : Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30, doi:10.3220/REP1434012425000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.

THÜNEN

Thünen Report 30

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-report@ti.bund.de
www.ti.bund.de

ISSN 2196-2324
ISBN 978-3-86576-136-1
DOI:10.3220/REP1434012425000
urn:nbn:de:gbv:253-201506-dn055248-2

Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

Horst Gömann, Andrea Bender, Andreas Bolte, Walter Dirksmeyer, Hermann Englert, Jan-Henning Feil, Cathleen Frühauf, Marlen Hauschild, Sandra Krengel, Holger Lilienthal, Franz-Josef Löpmeier, Jürgen Müller, Oliver Mußhoff, Marco Natkhin, Frank Offermann, Petra Seidel, Matthias Schmidt, Björn Seintsch, Jörg Steidl, Kathrin Strohm, Yelto Zimmer

Thünen Report 30

Horst Gömann und Marlen Hauschild
Thünen-Institut für Ländliche Räume

Andreas Bolte, Jürgen Müller und Marco Natkhin
Thünen-Institut für Waldökosysteme

Walter Dirksmeyer, Frank Offermann, Kathrin Strohm und Yelto Zimmer
Thünen-Institut für Betriebswirtschaft

Hermann Englert und Björn Seintsch
Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie

Sandra Krengel und Petra Seidel
Julius Kühn-Institut für Strategien und Folgenabschätzung

Holger Lilienthal
Julius Kühn-Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

Cathleen Frühauf und Franz-Josef Löpmeier
Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung

Sandra Krengel
Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (Neustadt/Weinstraße)

Jan-Henning Feil und Oliver Mußhoff
Georg-August-Universität Göttingen,
Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung

Matthias Schmidt
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Jörg Steidl
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung,
Institut für Landschaftswasserhaushalt

Andrea Bender
Humboldt-Universität Berlin

Thünen Report 30

Braunschweig/Germany, Juni 2015

Verbundforschungsvorhaben „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen“

Verzeichnis der unterstützenden Entscheidungs-Hilfe Vorhaben

Titel: **Definition von Extremwetterlagen bei Sonderkulturen des Wein- Obst-, Hopfen- und Gemüseanbaus sowie die Abschätzung von Ursache-Wirkungsbeziehungen bei diesen Kulturen**
Förderkennzeichen: 2813HS002
Laufzeit: 01.10.2013 - 31.03.2015
Bearbeitung: Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz,
Abteilung Phytomedizin, Bereich Gartenbau
Leitung: Dr. Hermann-Josef Krauthausen, Dr. Friedrich Louis
Projektbearbeiterin: Dr. Sandra Krengel
inkl. der Einbindung der drei Kooperationspartner:
- Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB), Bavendorf: Julia Wimmer
- Obstbauversuchsanstalt Jork: Julia Bahlo
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) - Hopfenzentrum Hüll/Wolnzach: Marina Jereb

Titel: **Ableitung von Absterbewahrscheinlichkeiten der Baumartenverjüngung bei Buchen und Fichten durch Trockenheit im Zusammenhang mit dem Auftreten von Extremwetterereignissen in Deutschland**
Förderkennzeichen: 2813HS003
Laufzeit: 1.7.2013 - 31.12.2013
Bearbeitung: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE), Fachbereich Wald und Umwelt:
Dr. Thomasz Czajkowski, Prof. Dr. Harald Schill (Leitung)

Titel: **Analyse und Projektion der Sturmschadensempfindlichkeit von Wäldern**
Förderkennzeichen: 2813HS004
Laufzeit: 01.12.2013 - 30.06.2014
Bearbeitung: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Abteilung Waldwachstum:
Dr. Matthias Schmidt, Prof. Dr. Hermann Spellmann (Leitung)

Titel: **Abwendung bzw. Reduzierung wirtschaftlicher Folgen von Extremwetterverhältnissen für die Landwirtschaft in Deutschland – Bewertung von Versicherungslösungen und anderen Instrumenten des Risikomanagements**
Förderkennzeichen: 2813HS006
Laufzeit: 01.10.2013 - 31.10.2014
Bearbeitung: Georg-August-Universität Göttingen, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung,
Abteilung landwirtschaftliche Betriebslehre:
Dr. Jan-Henning Feil, Prof. Dr. Oliver Mußhoff (Leitung)

Titel: **Möglichkeiten des regionalen und überregionalen Wassermanagements für die Landwirtschaft in Deutschland im Zusammenhang mit dem Auftreten von Extremwetterereignissen - Hydrologische und wasserbauliche Untersuchungen.**
Förderkennzeichen: 2813HS007
Laufzeit: 01.01.2014 - 31.12.2014
Bearbeitung: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt:
Undine Schubert, Dr. Johannes Schuler, Dr. Jörg Steidl (Leitung), Dr. Peter Zander

Zusammenfassung

Das Verbundforschungsvorhaben untersuchte regional differenzierte Änderungen agrarrelevanter Extremwetterlagen in Deutschland und deren Auswirkungen auf die Landwirtschaft einschließlich Sonderkulturen und Forstwirtschaft. Auswertungen der Stationsdaten von 1961 bis 2013 des Deutschen Wetterdienstes sowie Daten aus 21 Klimamodellläufen bis zum Jahr 2100 zeigten unter anderem einen Anstieg extremer Hitzetage, die auch in Zukunft häufiger werden sollen. Ferner wurde in den letzten 20 Jahren eine Zunahme der Tage ohne Niederschlag im März und April sowie eine Zunahme extrem trockener Tage im Sommer beobachtet, wobei letztere zukünftig weiter zunehmen sollen. Zunehmende Hitze und Trockenheit beeinträchtigen vor allem die Ertragsbildung bei einigen Ackerkulturen, wie z.B. beim Weizen. Im Wald ist die Verjüngungsfähigkeit vor allem unter Fichte und Kiefer gefährdet. Bei einigen Extremwetterlagen, die insbesondere im Acker- und Sonderkulturanbau hohe Schäden verursachen, wie z. B. Hagel, Starkniederschläge und Spätfröste, besteht wegen fehlender Beobachtungsdaten bzw. nicht eindeutiger Wechselwirkungen weiterer Forschungsbedarf. Nach den Ergebnissen besteht angesichts vielfältiger Anpassungsoptionen in der Land- und Forstwirtschaft keine unmittelbare Notwendigkeit, Risikomanagementsysteme staatlich verstärkt zu unterstützen.

JEL: O13, Q12, Q15, Q18, Q54

Schlüsselwörter: Extremwetterlagen, Klimaanpassung, Risikomanagement, GAP

Summary

The collaborative project analysed regional differentiated changes of extreme weather events in Germany and their impacts on agriculture including specialised crops and forestry. Analyses of weather station data from 1961 to 2013 of the German Weather Service as well as results of 21 climate model runs until 2100 show i. a. an increase of days with extreme heat which are expected to become more frequent in the future. Furthermore, an increase of days without precipitation in March and April as well as an increase of days with extreme drought in summer were observed. The latter are expected to increase in the future. Increasing heat and drought adversely affect in particular growth and crop harvest of arable cultures e. g. winter wheat. Extreme drought impairs especially the regeneration capacity in spruce and pine forests. For some extreme weather events that cause severe damages in particular in arable and specialised crops such as hail, extreme precipitation and late frosts further research need was identified due to missing observation data or unclear interactions between weather and vegetation. According to the results and in the light of various adaptation options there is currently no further necessity for governmental support of risk management systems.

JEL: O13, Q12, Q15, Q18, Q54

Keywords: extreme weather events, climate adaptation, risk management, CAP

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I

Summary I

Inhaltsverzeichnis III

Abbildungsverzeichnis VII

Tabellenverzeichnis XIV

Abkürzungsverzeichnis XVII

1 Einleitung 1

1.1 Hintergrund und Problemstellung 1

1.2 Vorgehensweise 2

1.2.1 Definitionen und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes 2

1.2.2 Ablauf und Methodik 4

2 Überblick über beobachtete und erwartete Entwicklungen agrarrelevanter Extremwetterlagen 7

2.1 Datengrundlagen 7

2.2 Methodische Vorgehensweise 8

2.3 Ergebnisse 10

2.3.1 Überblick über klimatische Entwicklungen 10

2.3.2 Frosttage nach dem 1. Februar 14

2.3.3 Extremer Winter- und Kahlfrost 15

2.3.4 Wechselfrost 19

2.3.5 Spätfrost 21

2.3.6 Frühfrost 24

2.3.7 Nässe 26

2.3.8 Dauer- und Starkregen 30

2.3.9 Wind und Sturm 36

2.3.10 Tage ohne Niederschlag 40

2.3.11 Trockenheit 42

2.3.12 Hitze 45

2.3.13 Strahlung 47

2.3.14 Weitere Extremwetterlagen 49

2.4 Vergleichende Beurteilung beobachteter und modellierter Extremwetterlagen 50

3 Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten 55

3.1 Systematik und Überblick von Anpassungsmöglichkeiten 55

3.1.1 Innerbetriebliche Risikomanagementinstrumente 55

3.1.2 Außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente 56

3.2 Ackerbau 60

3.2.1 Entwicklung des Anbaus und regionale Bedeutung 60

3.2.2 Ertragsentwicklungen und regionale Unterschiede 64

3.2.3 Wirkungsanalyse von Extremwetterlagen 68

3.2.3.1 Literaturrecherche und Expertengespräche 68

3.2.3.2 Rückschauende statistische Analyse 71

3.2.3.3 Abschätzung von Schäden ausgewählter Extremwetterlagen 84

3.2.3.4 Diskussion der Ergebnisse 88

3.2.4 Anpassungsoptionen 91

3.2.4.1 Agronomische Maßnahmen 91

3.2.4.2 Wassermanagement 91

3.2.4.3 Abwendung negativer wirtschaftlicher Folgen 95

3.3 Sonderkulturen 98

3.3.1 Überblick über die Vorgehensweise 98

3.3.2 Regionale Bedeutung des Anbaus (Sensitivität) 100

3.3.3 Literaturrecherche zu den Wirkungen von Extremwetterlagen 102

3.3.3.1 Hagel 102

3.3.3.2 Spätfrost 105

3.3.3.3 Trockenheit und extreme Dürre 107

3.3.3.4 Überschwemmung und Staunässe 111

3.3.3.5 Dauerregen und Starkregen 113

3.3.3.6 Hitze 117

3.3.3.7 Sonstige Extremwetterlagen 119

3.3.4 Literaturrecherche zu den biotischen Gefahrenpotenzialen 122

3.3.5 Expertengespräche zur Relevanz von Extremwetterereignissen 124

3.3.6 Auswertung vorhandener Daten 127

3.3.7 Anpassungsoptionen 138

3.3.8 Ökonomische Bewertung 152

3.4 Extremwetterlagen im Wald 171

3.4.1 Regionale Bedeutung des Waldes 171

3.4.2 Auswirkungen 172

3.4.2.1 Literaturrecherche zur Wirkung von Extremwetterlagen auf Wälder 172

3.4.2.2 Trockenheitswirkung auf die Waldverjüngung 175

3.4.2.3 Sturmschäden 191

3.4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 204

3.4.3 Anpassungsoptionen 206

3.4.3.1 Waldumbau zur Erhaltung der Verjüngungsfähigkeit 206

3.4.3.2 Verkürzung der Zieldurchmesser für Fichte und Douglasie 207

3.4.3.3 Mischwaldbegründung 207

3.5 Exkurs: Hochwasser 209

3.5.1 Überblick zur Entwicklung der Häufigkeit von Hochwassern 209

3.5.2 Definition von Hochwasser 212

3.5.3 Entstehung von Hochwasser 212

3.5.4 Förderung der Hochwasserentstehung durch menschlichen Eingriff 214

3.5.5 Regionale Einordnung der Flusshochwasser in Deutschland im Jahresverlauf 215

3.5.6 Hochwasserbedingte Schäden auf landwirtschaftlichen Flächen 215

3.5.7 Flächenanalyse von Hochwasser betroffenen Landwirtschaftsflächen 218

3.5.7.1 Datengrundlage 218

3.5.7.2 Ergebnisse 219

3.5.8 Hochwassermanagement landwirtschaftlicher Flächen 222

4 Beurteilung agrarpolitischer Maßnahmen zur Unterstützung von Anpassungen an Extremwetterlagen 225

4.1 Argumente und Instrumente für staatliches Handeln im Extremwetterrisikomanagement 225

4.2 Erfahrungen mit staatlichen Maßnahmen in Deutschland und ausgewählten anderen Ländern 226

4.3 (Neu-)Bewertung von Argumenten und Instrumenten für staatliches Handeln im Extremwetterrisikomanagement für Deutschland 230

4.3.1 Informationsunterstützung 230

4.3.2 Förderung agronomischer, technischer Lösungen 231
4.3.3 Steuerliche Förderung einer Risikoausgleichsrücklage 231
4.3.4 Förderung von Versicherungslösungen und Ad-hoc-Hilfen 232
4.3.4.1 Einordnung von Versicherungslösungen und Ad-hoc-Hilfen 232
4.3.4.2 Förderung von Versicherungslösungen mit dem Hauptziel Risikomanagement 233
4.3.5 Ad-hoc Hilfen vs. Förderung von Versicherungslösungen für katastrophale Ereignisse 236
4.4 Fazit 238

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 241
5.1 Entwicklung von Extremwetterlagen 241
5.2 Ackerbau 242
5.3 Sonderkulturen 243
5.4 Wald 244
5.5 Wassermanagement 246
5.6 Agrarpolitische Maßnahmen 247

6 Zusammenfassung 249
6.1 Klimadatenauswertung 250
6.2 Ackerbau 251
6.3 Sonderkulturen 253
6.4 Wald 256
6.5 Wassermanagement 258
6.6 Beurteilung agrarpolitischer Maßnahmen 260

7 Literatur 263

8 Anhang 277
8.1 Ackerkulturen 277
8.2 Sonderkulturen 282
8.3 Wald 289

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Struktur und Ablaufplan des Verbundforschungsvorhabens 5

Abbildung 2.1: Entwicklung des Jahresmittels der Lufttemperatur 1881 bis 2100 für Deutschland 12

Abbildung 2.2: Verlauf des berechneten Vegetationsbeginns von 1961 bis 2100 13

Abbildung 2.3: Regionale Unterschiede beim berechneten Vegetationsbeginn und dessen Entwicklung 13

Abbildung 2.4: Anzahl der Tage mit Frost (Minimumtemperatur < 0°C) in den Monaten Februar und März; links: Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Messungen und der Klimaprojektionen für 30-Jahreszeiträume; rechts: Deutschlandkarte für den Zeitraum 1981-2010 14

Abbildung 2.5: Anzahl der Tage im Jahr mit Minimumtemperaturen < -10°C, < -15°C bzw. < -20°C, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 16

Abbildung 2.6: Beobachtete und erwartete mittelfristige Entwicklung der Anzahl der Tage mit Minimumtemperaturen < -10°C 17

Abbildung 2.7: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Minimumtemperaturen < -10°C, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1981-2010 und beobachtete Änderung 18

Abbildung 2.8: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Minimumtemperaturen < -10°C, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 18

Abbildung 2.9: Anzahl der Tage mit Wechselfrost im Zeitraum 1.1.-30.4., Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 19

Abbildung 2.10: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost im Zeitraum 1.1.-30.4., 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1981-2010 und beobachtete Änderung 20

Abbildung 2.11: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost im Zeitraum 1.1.-30.4., Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 21

Abbildung 2.12: Anzahl der Tage für den Zeitraum 1.4.-31.5. an denen die Minimumtemperatur 0°C, -2°C und -4°C unterschreitet, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 22

Abbildung 2.13: Anzahl der Tage pro Dekade mit Minimumtemperatur < 0°C, April: Dekade 10-12, Mai: Dekade 13-15, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 23

Abbildung 2.14: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Spätfrost (Tmin < 0°C) im Zeitraum 1.4.-31.5., 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 23

Abbildung 2.15: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Spätfrost (Tmin < 0°C) im Zeitraum 1.4.-31.5., Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 24

Abbildung 2.16: Anzahl der Tage an denen die Minimumtemperatur 0°C unterschreitet, Monate September und Oktober, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 25

Abbildung 2.17: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Frühfrost (Tmin <0 °C) im Monat Oktober, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 25

Abbildung 2.18: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Frühfrost im Monat Oktober, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 26

Abbildung 2.19: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten > 100 %nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden, Schicht: 0-60 cm) pro Monat, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 27

Abbildung 2.20: Beobachtete und erwartete mittelfristige Entwicklung des Deutschlandmittels der Bodenfeuchte unter Wintergetreide (leichter Boden, Schicht: 0-60 cm) für den Monat April 28

Abbildung 2.21: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten > 100 %nFK (Kultur Wintergetreide, schwerer Boden, Schicht: 0-60 cm), in den Jahreszeiten Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) (30-jährige Mittelwerte 1981-2010) 29

Abbildung 2.22: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten > 100 % nFK (Kultur Wintergetreide, schwerer Boden, Schicht: 0-60 cm) in den Jahreszeiten Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON), Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 (50. Perzentil) 29

Abbildung 2.23: Anzahl der Tage mit Dauerregen (RR > 5 mm) für die Monate Juni bis November, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 30

Abbildung 2.24: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Dauerregen (RR > 5mm) in den Monaten Juni bis August, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 31

Abbildung 2.25: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Dauerregen (RR > 5 mm) in den Monaten Juni bis August, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 32

Abbildung 2.26: Anzahl der Tage mit Starkregen (RR > 20 mm), Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 33

Abbildung 2.27: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Starkregen (RR > 20 mm) in den Monaten Juli bis Oktober, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 34

Abbildung 2.28: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Starkregen (RR > 20 mm) in den Monaten Juli bis Oktober, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 34

Abbildung 2.29: Häufigkeit des Auftretens einer Niederschlagssumme von mehr als 50 mm innerhalb von 3 Tagen im Jahr, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 35

Abbildung 2.30: Erwartete regionale Entwicklung der Häufigkeit des Auftretens einer Niederschlagssumme von mehr als 50 mm innerhalb von 3 Tagen im Jahr, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 36

Abbildung 2.31: Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 5 m/s, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 37

Abbildung 2.32: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 5 m/s in den Monaten März bis Juni, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 38

Abbildung 2.33: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 5 m/s im März bis Juni, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 38

Abbildung 2.34: Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 10 m/s, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 39

Abbildung 2.35: Anzahl der Tage ohne Niederschlag (RR < 0,1 mm) in den Monaten März bis Mai, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 40

Abbildung 2.36: Regionales Auftreten der Tage ohne Niederschlag (RR < 0,1 mm) im Zeitraum 15. März bis 15. Mai, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 41

Abbildung 2.37: Erwartete regionale Entwicklung der Tage ohne Niederschlag (RR < 0,1 mm) im Zeitraum 15. März bis 15. Mai, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 42

Abbildung 2.38: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden), monatlich, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 43

Abbildung 2.39: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 44

Abbildung 2.40: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 44

Abbildung 2.41: Anzahl der Tage mit Maximumtemperaturen > 30°C in den Monaten Mai, Juni, Juli und August, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 45

Abbildung 2.42: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Maximumtemperaturen > 30°C im Zeitraum Juni bis August, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 46

Abbildung 2.43: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Maximumtemperaturen > 30°C im Zeitraum Juni bis August, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 47

Abbildung 2.44: Anzahl der Tage mit Globalstrahlungswerten > 2500 J/(m²d) in den Monaten April bis Juli, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft 48

Abbildung 2.45: Regionales Auftreten und Entwicklung der Tage mit Globalstrahlungswerten > 2500 J/(m²d) im Zeitraum 1.4.-30.6., 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 48

Abbildung 2.46: Erwartete regionale Entwicklung der Tage mit Globalstrahlungswerten > 2500 J/(m² d) im Zeitraum 1.4.-30.6., Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 49

Abbildung 2.47: Zusammenstellung der Änderungssignale des Niederschlags 54

Abbildung 3.1: Regionale Bodengüte und Ackerflächen 2010 und deren Änderungen 2010 zu 1999 61

Abbildung 3.2: Entwicklung des Anbaus von Ackerkulturen 62

Abbildung 3.3: Entwicklung des regionalen Weizenanbaus (1999, 2010; % der LF) 63

Abbildung 3.4: Entwicklung des regionalen Maisanbaus (1999, 2010; % der LF) 63

Abbildung 3.5: Entwicklung der Erträge ausgewählter Ackerkulturen (dt/ha; 1950 bis 2014) 65

Abbildung 3.6: Regionale durchschnittliche Weizenerträge und Standardabweichungen (1995-2013, dt/ha) sowie Beziehung zwischen regionalen Standardabweichungen und Anbauänderungen (1999 zu 2010; %-Punkte der LF) 67

Abbildung 3.7: Variabilität der regionalen Weizenerträge (1995-2013) 68

Abbildung 3.8: Durchschnittliche betriebliche Weizenerträge in den Gemeinden (1995-2013) und jährliche Schwanken betrieblicher Erträge in den Regionen Hannover-Hildesheim und Mitte-Osten 72

Abbildung 3.9: Höhe (in m über NN), Nutzbare Feldkapazität in der Wurzelzone (60 cm), Bodenzahl 73

Abbildung 3.10: Zusammengefasste Bodenklimaräume (BKR) 74

Abbildung 3.11: Tage mit Nässe zur Saatzeit sowie regionale Verteilung und Variabilität von Niederschlägen zur Saatzeit von Weizen (1.10.-15.11.) 75

Abbildung 3.12: Regionale Verteilung und Wiederkehr von Kahlfrösten (1981 bis 2013) 76

Abbildung 3.13: Tage ohne Niederschlag im Regionscluster Mitte-Osten sowie regionale Verteilung und Variabilität der Niederschläge (1981-2013) jeweils 30tägige Periode um den Vegetationsbeginn 78

Abbildung 3.14: Regionale Verteilung und Variabilität des Niederschlags (21. Tag nach Vegetationsbeginn bis zur Ernte; 1981-2013) 79

Abbildung 3.15: Regionale Verteilung und Variabilität der Hitzetage zur Weizenblüte (1981-2013) 80

Abbildung 3.16: Regionale Verteilung und Variabilität der Tage mit Nässe zur Ernte 81

Abbildung 3.17: Regionale monetäre Verluste durch mindestens 5 Tage Kahlfrost bei Winterweizen (mittlere jährliche Erlösverluste und Kosten für die Neuansaat) 86

Abbildung 3.18: Regionale Auswirkungen einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden hohen Anzahl an Tagen ohne Niederschlag 10 Tage vor bis 20 Tage nach Vegetationsbeginn auf die Weizenerträge 87

Abbildung 3.19: Regional spezifische Auswirkungen einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden Trockenheit bzw. Hitzephase in der Vegetationsperiode auf die Weizenerträge 88

Abbildung 3.20: Regionale Bedeutung von Freilandgemüse, Obst- und Rebflächen (% der LF, 2010) 100

Abbildung 3.21: a, b Gesamtanzahl (a) und mittlere Anzahl pro Jahr (b) der Extremwetterereignisse an der „Niederelbe“ in den Jahren 1983 bis 2013 128

Abbildung 3.22: Ertragsverluste (in % vom Mittelwert der Jahre ohne Spätfrost) durch Spätfrost bei der Apfelsorte „Elstar“ im Anbaugebiet „Niederelbe“ in Abhängigkeit von der Spätfrostgefährdung des Standortes (Whisker=mittlere Standardabweichung in Jahren ohne Spätfrost/Alternanz) 129

Abbildung 3.23: a, b Vergleich der mittleren Erträge (kg/ha) der weißen (a) und roten (b) Rebsorten im Spätfrostjahr 2011 mit den mittleren Erträgen der Jahre 2010, 2012, 2013 (ohne Spätfrost) 132

Abbildung 3.24: a, b Vergleich der mittleren Mostgewichte (°Oe) der weißen (a) und roten (b) Rebsorten im Spätfrostjahr 2011 mit den mittleren Mostgewichten der Jahre 2010, 2012, 2013 (ohne Spätfrost) 133

Abbildung 3.25: Einfluss des Austriebzeitpunktes und des Spätfrostrisikos der Lagen auf das Ausmaß der Ertragseinbußen durch Spätfrost im April 2011 in weißen Rebsorten 134

Abbildung 3.26: Einfluss des Austriebzeitpunktes und des Spätfrostrisikos der Lagen auf das Ausmaß der Ertragseinbußen durch Spätfrost im April 2011 in roten Rebsorten 135

Abbildung 3.27: Erträge (dt/ha) der Hopfensorten „Hallertauer Magnum“, „Hallertauer Tradition“, „Perle“ und „Hallertauer Mittelfrüh“ in den Jahren 2006 bis 2013 in den 14 Herkunftsbezirken des Anbaugebietes „Hallertau“ 136

Abbildung 3.28: Höhe bzw. Änderung des Deckungsbeitrags von Speisezwiebeln je nach Szenario 156

Abbildung 3.29: Höhe bzw. Änderung des Deckungsbeitrags von Weißkohl (Industrieware) je nach Szenario 158

Abbildung 3.30: Höhe bzw. Änderung des Deckungsbeitrags von Karotten (Industrieware) je nach Szenario 160

Abbildung 3.31: Nettobarwerte der Deckungsbeiträge in Euro/ha mit und ohne Anpassungsoptionen für verschiedene Szenarien für Winzer in Rheinhessen 169

Abbildung 3.32: Nettobarwerte der Deckungsbeiträge in Euro/ha mit und ohne Anpassungsoptionen für verschiedene Szenarien für Winzer in Franken 170

Abbildung 3.33: Lage der untersuchten Herkünfte; neun Buchen- und eine Fichtenherkunft 176

Abbildung 3.34: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns 178

Abbildung 3.35: Zusammenhang zwischen Länge der Trockenheit und dem relativen Bodenwassergehalt (Bezug: nutzbare Feldkapazität, nFK) 178

Abbildung 3.36: Kritische Grenzen des relativen Bodenwasservorrats für Buche und Fichte 180

Abbildung 3.37: Waldanteil an der Landkreisfläche (links) und Flächenanteil der modellierten Böden an den Waldböden (rechts) 183

Abbildung 3.38: Anzahl der Tage < nFK 20 % Bodentiefe 0–50 cm (dnfk5020) in Vegetationsperiode 184

Abbildung 3.39: Empirisches Wiederkehrintervall von kritischer Trockenheit (dnfk5020 > 150 Tage) 186

Abbildung 3.40: Vergleich der Zahlungsströme zwischen einem trockengeschädigten Bestand und einem Bestand ohne Trockenheitsschaden 188

Abbildung 3.41: Jährliche, rechnerische Gefährdungsflächen (links) und Schadenssummen (rechts) für kritische Trockenheit (Bestandes-Szenarien Fichte, Kiefer und Buche-Altbestände) 190

Abbildung 3.42: Ablaufdiagramm der Gesamtkonzeption zur Prognose potenzieller Vulnerabilitäten des Waldes in Deutschland durch Winterstürme 192

Abbildung 3.43: Durch die geographische Lage und die Einzelbaumhöhe bedingte Unterschiede der prognostizierten Schadwahrscheinlichkeit; (95% Prognoseintervall) 193

Abbildung 3.44: Flächenverteilungen des Waldes in Deutschland differenziert nach Vulnerabilitätsstufen gegenüber Winterstürmen für unterschiedliche Normbestockungen bei einem einheitlichen BHD von 55 cm 194

Abbildung 3.45: Vulnerabilität nach BHD-Stufen und Risikogebietsklassen für die Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche 195

Abbildung 3.46: Schematische Darstellung des Bewertungsansatzes zur Ermittlung der baumarten- und zielstärkenspezifischen Erwartungswertdifferenzen bei prognostizierten Vulnerabilitäten 197

Abbildung 3.47: Entwicklung der Erwartungswertdifferenzen eines Fichtenbestandes mit BHD 20 cm differenziert nach Risikogebietsklassen 203

Abbildung 3.48: Darstellung der landwirtschaftlichen Flächen Ackerland, Grünland und Sonderkulturen, die laut der Überflutungsflächen eines HQ 20, HQ 100 oder HQ 200 von Überflutung betroffen sind 221

Abbildung 4.1: Entwicklung der staatlichen Ausgaben für ex-ante und ex-post Risikomanagementinstrumente in der EU-27 228

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Schwellenwerte für landwirtschaftliche Kulturen und Entwicklungstendenzen	51
Tabelle 3.1:	Vorteile (+) und Nachteile (–) verschiedener außerbetrieblicher Managementinstrumente für Wetterrisiken	58
Tabelle 3.2:	Prozentuale Ertragsabweichungen verschiedener Kulturen vom langjährigen Mittel (1999-2013) in Deutschland (Datenbasis: Regionale Ertragsdaten 1999-2013)	66
Tabelle 3.3:	Schätzergebnisse zu den Auswirkungen von Extremwetterlagen auf Weizenerträge	83
Tabelle 3.4:	Hedgingeffektivität von Betriebs- und Regionsertragsversicherung mit unterschiedlichen Selbstbehalten	97
Tabelle 3.5:	Zehn wichtigste Gemüsearten Deutschlands 2014	101
Tabelle 3.6:	Grenzwerte für Spätfrost bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Spätfrost	105
Tabelle 3.7:	Grenzwerte für Trockenheit bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Trockenheit	108
Tabelle 3.8:	Grenzwerte für Dauer- und Starkregen bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Dauer- und Starkregen	114
Tabelle 3.9:	Grenzwerte für Hitze bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Hitze	117
Tabelle 3.10:	Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Apfelanbau	124
Tabelle 3.11:	Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Weinbau	125
Tabelle 3.12:	Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Hopfenbau	126
Tabelle 3.13:	Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Gemüsebau	127
Tabelle 3.14:	Überblick zu Extremwetterschäden und Schadausmaß im Weinanbaugebiet „Pfalz“ für den Zeitraum 2004 bis 2013	130
Tabelle 3.15:	Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterlagen im Dauerkulturanbau	140
Tabelle 3.16:	Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterlagen im Gemüseanbau	150

Tabelle 3.17: Getroffene Annahmen bzgl. Extremwetter-Szenarien und praxistauglicher Anpassungsoptionen im Weinbau 163

Tabelle 3.18: Ökonomische Folgen der Extremwetter-Szenarien auf den typischen Betrieb in Rheinhessen 165

Tabelle 3.19: Vergleich der Hagel-Szenarien in Rheinhessen mit und ohne Hagelversicherung 166

Tabelle 3.20: Vergleich der Hagel-Szenarien in Rheinhessen mit dem Produktionssystem MSS 167

Tabelle 3.21: Vergleich von Spätfrostszenarien für Winzer in Rheinhessen mit und ohne Windmaschine 168

Tabelle 3.22: Schwellenwerte für die Wirkung von Temperaturextremen auf Wälder (inkl. Zusatzwirkungen), grau: geringe Bedeutung, gelb: mäßige Bedeutung, rot: hohe Bedeutung 173

Tabelle 3.23: Schwellenwerte für die Wirkung von Wassermangel und -überschuss auf Wälder, grau: geringe Bedeutung, gelb: mäßige Bedeutung, rot: hohe Bedeutung 174

Tabelle 3.24: Schwellenwerte für die Wirkung von mechanischen Belastungen auf Wälder, grau: geringe Bedeutung, gelb: mäßige Bedeutung, rot: hohe Bedeutung 175

Tabelle 3.25: Lage und Klimaparameter der untersuchten Herkünfte 177

Tabelle 3.26: Kennwerte der Altbestände für die Modellierung 182

Tabelle 3.27: Liste der vorhandenen Indikatoren, bilanziert wird die Vegetationsperiode (Monate April bis September) 182

Tabelle 3.28: Anzahl der Tage mit kritischer Trockenheit während der Vegetationsperiode (Unterschreitung nFK 20 %, Bodentiefe 0–50 cm) 185

Tabelle 3.29: Empirisches Wiederkehrintervall von kritischen Trockenheitsperioden (dnfk5020 > 150 Tage), Flächenanteile in Prozent 187

Tabelle 3.30: Unterstellte Walderneuerungs- bzw. Wiederaufforstungskosten 187

Tabelle 3.31: Erwartungswerte des Referenz- und des Trockenheitsszenario und deren Differenz 189

Tabelle 3.32: Mittlere rechnerische Gefährdungsfläche (Verjüngung) pro Jahr bezogen auf das mittlere Wiederkehrintervall für kritische Trockenheit 190

Tabelle 3.33: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Fichte 199

Tabelle 3.34: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Kiefer 199

Tabelle 3.35: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Douglasie 200

Tabelle 3.36: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Buche 200

Tabelle 3.37: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Eiche 201

Tabelle 3.38: Schadensbeträge durch Überflutung in €/ha der landwirtschaftlichen Flächen Ackerland, Grünland und Gartenland (zugehörig zu den Sonderkulturen) 218

Tabelle 3.39: Flächen in den bei Hochwassern der Kategorie HQ-20, HQ-100 und HQ-200 gefährdeten Gebieten (in Tsd. ha) 220

Tabelle 4.1: Internationale Beispiele der Unterstützung für Wetterversicherungssysteme 229

Abkürzungsverzeichnis

A1B	IPCC-Klimaemissionsszenario
AF	Ackerfläche
AFP	Agrarinvestitionsförderprogramm
Akh	Arbeitskraftstunde
AL	Ackerland
AMBER	Softwarepaket AgrarMeteorologische BERatung
AMI	Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH
ATKIS	Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem
BaySL	Sonderprogramm der Landwirtschaft finanziert aus Landesmitteln von Bayern
BB	Brandenburg
BE	Berlin
BHD	Brusthöhendurchmesser
BKR	Boden-Klima-Räume der Bundesrepublik Deutschland
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BÜK	Bodenübersichtskarte
BW	Baden-Württemberg
BWI	Bundeswaldinventur
BY	Bayern
Ca	Calcium
CCM	Corn-Cob-Mix
CLM	Climate Local Model (Klimamodell)
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DB	Deckungsbeitrag
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DLR	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz
DüngeVO	Düngeverordnung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EH	Entscheidungshilfe-Vorhaben
ELER	Programm des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EO	Erzeugerorganisationen für Obst und Gemüse
EU	Europäische Union
GAK	Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GIS	Geoinformationssystem
GL	Grünland
GMO	Gemeinsame Marktorganisation für landwirtschaftliche Erzeugnisse
HB	Bremen
HE	Hessen
HH	Hamburg

HNEE	Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde
HQ 100	Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall ≥ 100 Jahren
HQ 20	Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall ≥ 20 Jahren
HQ 200	Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall ≥ 200 Jahren
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der EU
IPCC	Intergovermental Panel on Climate change
JKI	Julius-Kühn Institut
KOB	Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee
LF	landwirtschaftlich genutzten Fläche
MK	Mortalitätsrate
MLU	Sachsen-Anhalt Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt
MSS	Produktionssystem auf Minimalschnitt im Spalier
MV	Mecklenburg-Vorpommern
N_2	Stickstoff
N_2O	Lachgas
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFk_{we}	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
NI	Niedersachsen
NN	Normal Null
NW	Nordrhein-Westfalen
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OVR	Obstversuchsring in Jork
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
R^2	Bestimmtheitsmaß
RCP	Repräsentative Konzentrations-Pfade
REMO	Regional Modell (Klimamodell)
Rg	global solar Radiation (Globalstrahlung)
RMI	Risikomanagementinstrumente
RP	Rheinland-Pfalz
RR	Rain Rate
SD	Standardabweichung
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
STAR	Statistisches Regionalisierungsmodell
TH	Thüringen
TKG	Tausendkorngewicht
Tmax	maximale Tagestemperatur
Tmin	minimale Tagestemperatur
Tmit	mittlere Tagestemperatur
UTA	Untypische Alterungsnote
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WTO	Welthandelsorganisation
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Die Land- und Forstwirtschaft hängt wie kaum ein anderer Sektor von Klima, Witterung und Wetter ab. Während sich das Wetter mehrmals täglich ändern kann, wird bei der Witterung der vorherrschende Charakter des Wetters an einem Ort über einen Zeitraum mehrerer Tage oder Wochen betrachtet und dabei vor allem durch die fühlbaren Wetterelemente wie Niederschlag, Temperatur, Wind und Luftfeuchtigkeit gekennzeichnet. Das Klima ist die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort über eine genügend lange Periode (30 Jahre) beschreibt mit Mittelwerten, Streuung und Extremwerten. An die erwarteten Trends der Temperatur- und Niederschlagsmittel dürfte sich die Land- und Forstwirtschaft wie bisher anpassen, zumal für die hiesigen Produktionsbedingungen zumindest bis zur Mitte des Jahrhunderts nur moderate und teilweise sogar begünstigende Effekte durch den Klimawandel projiziert werden.

Häufig wird die Auffassung vertreten, der Klimawandel führe nicht nur zu Änderungen der mittleren Temperatur und Niederschlagsmengen, sondern auch zu Änderungen von Witterungs- und Wetterextremen (IPCC, 2012, Gerstengarbe et al., 2007). Extremwetterlagen wie Dürre, Hagel, Stark- und Dauerregen, extreme Fröste und Stürme können der Land- und Forstwirtschaft binnen Stunden, Tagen oder Wochen extremen Schaden zufügen und vor große Herausforderungen stellen. Dabei ist nach den bisherigen Erfahrungen davon auszugehen, dass die Intensität solcher Schadereignisse kleinräumig stark variieren kann und im Einzelfall nicht konkret vorhersehbar ist.

Im Gegensatz zu den allgemeinen Klimatrends liegen zur künftigen Entwicklung von agrarrelevanten[1] Extremwetterlagen, zu ihren Auswirkungen und zu möglichen Anpassungsstrategien bisher kaum belastbare Erkenntnisse vor.[2] Eine bessere Kenntnis dieser Zusammenhänge wäre für die einzelbetriebliche Planung sowie für das private und öffentliche Risikomanagement von großem Wert. Es ist zu erwarten, dass auch die praktische Agrarpolitik verstärkt mit der Frage konfrontiert wird, wie sie die Anpassung an den Klimawandel (einschließlich Extremwetterlagen) in ihrem Instrumenten-Mix berücksichtigt. In der Gemeinsamen Agrarpolitik nach 2013 wurde der Klimawandel als neue Herausforderung angesprochen und Möglichkeiten zur Förderung von Maßnahmen des Risikomanagements verankert (Amtsblatt EU, 2013c).

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse eines Verbundforschungsvorhabens im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zusammen, das vom Thünen-

---

[1] Agrarrelevante Extremwetterlagen umfassen auch die für den Forstbereich wichtigen Extremwetterlagen.

[2] Ein Netzwerk von Bundesoberbehörden (http://www.netzwerk-vulnerabilitaet.de) hat jüngst Ergebnisse einer sektorübergreifenden Vulnerabilitätsanalyse vorgestellt, die zeigen, wie verwundbar (vulnerabel) Deutschland gegenüber dem Klimawandel ist. Der Schwerpunkt der Analysen, die bei Redaktionsschluss des vorliegenden Abschlussberichtes nicht veröffentlicht waren, lag auf langfristigen klimatischen Änderungen.

Institut und Julius-Kühn Institut (JKI) in enger Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bearbeitet wurde. Darüber hinaus förderte das BMEL sogenannte Entscheidungshilfe-Vorhaben, die spezifische Aspekte ergänzend untersuchten. Die EH-Vorhaben wurden von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) als Projektträger betreut und unterstützt.[3] Das Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz (DLR, Neustadt/Weinstraße) bearbeitete federführend den Bereich Sonderkulturen und wurde vom Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee in Bavendorf, dem Obstbauzentrum" Esteburg" in Jork und der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Hüll unterstützt. Die Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) untersuchte die Anfälligkeit der Naturverjüngung unterschiedlicher Baumarten bei extremer Trockenheit. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) entwickelte ein Modell zur Abschätzung von Sturm auf unterschiedliche Risikogebiete. Das Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) analysierte den Ist-Zustand und Perspektiven des Wassermanagements und die Universität Göttingen die Möglichkeiten des Risikomanagements in landwirtschaftlichen Betrieben. Im Rahmen der Charta für Landwirtschaft und Verbraucher adressiert das Forschungsprojekt den Bereich „Prioritärer Forschung und Wissenstransfer".

Ziel des Forschungsvorhabens war es, das künftige Auftreten von Extremwetterlagen und ihre Auswirkungen auf die deutsche Land- und Forstwirtschaft abzuschätzen (Relevanzabschätzung) und Anpassungsmaßnahmen für die Wirtschaftsbetriebe und für die Politik zu untersuchen und vergleichend zu bewerten. Im Einzelnen waren folgende Fragen zu beantworten:

- Wie haben sich die relevanten Extremwetterlagen bisher entwickelt, und wie werden sie sich künftig entwickeln?
- Welche regionalen Unterschiede gibt es?
- Welche Schäden werden differenziert nach Kulturarten durch die Extremwetterlagen verursacht (bisher und künftig)?
- Wie kann sich der Agrar- und Forstsektor anpassen, und welche Aufgaben ergeben sich daraus für die Wirtschaft und für die Politik?

1.2 Vorgehensweise

1.2.1 Definitionen und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Das Forschungsvorhaben fokussierte auf Witterungs- und Wetterereignisse, die in wenigen Stunden, Tagen oder Wochen zu einer außergewöhnlichen Belastung der land- und forstwirtschaftli-

[3] Ein ganz besonderer Dank gilt Frau Ulrike Neumann (BLE) für ihre kompetente und tatkräftige Unterstützung der EH-Vorhaben sowie des gesamten Verbundforschungsvorhabens, der in dieser Konstellation ebenfalls ein Pilotprojekt der BMEL-Forschungsförderung darstellte.

chen Produktion führen. Dabei wurde das Auftreten eines Wertes einer Wettervariablen über einem für Pflanzen schädigenden und wirtschaftlich relevanten Schwellenwert oder die starke Abweichung von der Normalsituation als ein extremes Wetter- oder Witterungsereignis bezeichnet. Als Normalsituation wurden die langjährigen klimatischen Bedingungen beispielsweise 30-jährige Mittel der Niederschläge bzw. Temperaturen betrachtet. Darüber hinaus wurden auch unter produktionstechnischen Aspekten relevante extreme Wetterlagen untersucht, die z. B. vorliegen, wenn infolge von Dauerregen im Sommer nicht geerntet oder im Herbst nicht gesät werden kann.

Einige Wetterextreme wie Dürre oder Flut können das Ergebnis einer Akkumulation von Wetterereignissen sein, die jedes für sich genommen noch keine extreme Ausprägungen im statistischen Sinn darstellt, in ihrer Summe jedoch eine Extremwetterlage ergibt (IPCC, 2012 S.111). Beispielsweise gingen der Elbeflut im Juni 2013 hohe Bodenfeuchten voraus (Löpmeier, 2013), so dass zwar überdurchschnittlich hohe jedoch keine extremen Niederschlagsmengen vom Boden nicht mehr aufgenommen werden konnten. Wetter- und Witterungsereignisse können, selbst wenn sie im statistischen Sinn nicht als Extremereignisse gelten, dennoch zu extremen Auswirkungen führen, weil sie entweder einen kritischen Grenzwert im sozialen, ökologischen oder physischen System überschreiten, oder weil sie simultan mit anderen Ereignissen auftreten. So kann ein Sturm zusammen mit Starkregen und Bodendurchfeuchtung extreme Windwürfe auslösen, selbst wenn er im Vergleich zu anderen Stürmen nicht extrem ist. Umgekehrt können günstige Begleitumstände die Auswirkungen eines Wetterereignisses, welches bei singulärer Betrachtung als Extremereignis eingestuft wird, abmildern.

Die Ausführungen verdeutlichen die Schwierigkeiten, agrarrelevante Extremwetterlagen einzugrenzen. In dieser Studie wurde davon Abstand genommen, Witterungs- und Wetterkonstellationen zu untersuchen, die erst in ihrer Kombination zu einem extremen Wetterereignis führen oder die Auswirkungen eines eingetretenen extremen Wetterereignisses weitgehend kompensieren. Zum einen wäre eine unüberschaubare Anzahl von Witterungs- und Wetterkombinationen zu analysieren gewesen. Zum anderen lassen sich aus den vorliegenden Klimaprojektionen keine belastbaren Aussagen zu den erwarteten Änderungen der Häufigkeit des Auftretens spezifischer Witterungs- und Wetterkombinationen ableiten.

Sekundäre Schädigungen durch biotische Schaderreger (Insekten, Pilze, Bakterien und Viren), die geschwächte Pflanzen befallen, sind häufig von größerer Bedeutung als die Extremwetterlagen selbst. Ein Beispiel hierfür sind Borkenkäferschäden in Fichtenbeständen nach Dürreperioden und Windwürfen mit hohem Totholzanfall. In diesem bisher wenig bearbeiteten Forschungsfeld ist der Stand des Wissens von Interesse.

In der Studie wurden die Auswirkungen agrarrelevanter Extremwetterlagen in Deutschland untersucht. Es wurde davon ausgegangen, dass lokal in Deutschland auftretende Extremwetterlagen angesichts der Integration der deutschen Agrarwirtschaft in die internationalen Agrarmärkte nur sehr begrenzte Auswirkungen auf die globalen Agrarpreise sowie Nahrungsmittelpreise ha-

ben. Entwicklung von Extremwetterlagen im globalen Maßstab und deren Rückwirkungen über Veränderungen der Preisvolatilität auf die deutschen Agrar- und Holzmärkte waren nicht Gegenstand der Analysen. Die mittelfristigen Preisschwankungen auf dem EU-Binnenmarkt haben im Zuge des kontinuierlichen Abbaus der EU-Marktregulierungen seit der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU im Jahr 1992 zugenommen.

In der Studie wurden Spät-, Früh-, Kahl- und Wechselfröste, Nässe, Dauer- und Starkregen, Wind und Sturm, Tage ohne Niederschlag, Trockenheit, Hitze und Strahlung untersucht. Zum wichtigen Extremereignis Hagel konnten aufgrund fehlender beobachteter als auch projizierter Entwicklungen sowohl von Hagel an sich als auch Proxi-Indikatoren wie Gewitter keine Analysen durchgeführt werden. Die methodisch schwierige Abbildung des Hochwasserrisikos mit Überschwemmungen konnte im Rahmen der Studie nur eingeschränkt betrachtet werden. Für Nassschnee ist derzeit kein meteorologischer Indikator verfügbar.

In die Untersuchung wurden alle wesentlichen Branchen der Land- und Forstwirtschaft einbezogen. Eine vollständige Abdeckung des gesamten Kulturartenspektrums war nicht sinnvoll und wäre auch nicht zu leisten gewesen. Daher fokussiert die Studie auf Leitkulturen in den Bereichen:

- Ackerbau: Weizen, Gerste, Raps, Mais, Zuckerrüben und Grünland/Futterbau
- Sonderkulturen: Wein, Obst (Apfel), Gemüse (Spargel, Möhren, Weiß- und Rotkohl), Hopfen
- Forstwirtschaft: Fichte, Kiefer, Buche, Eiche sowie Douglasie

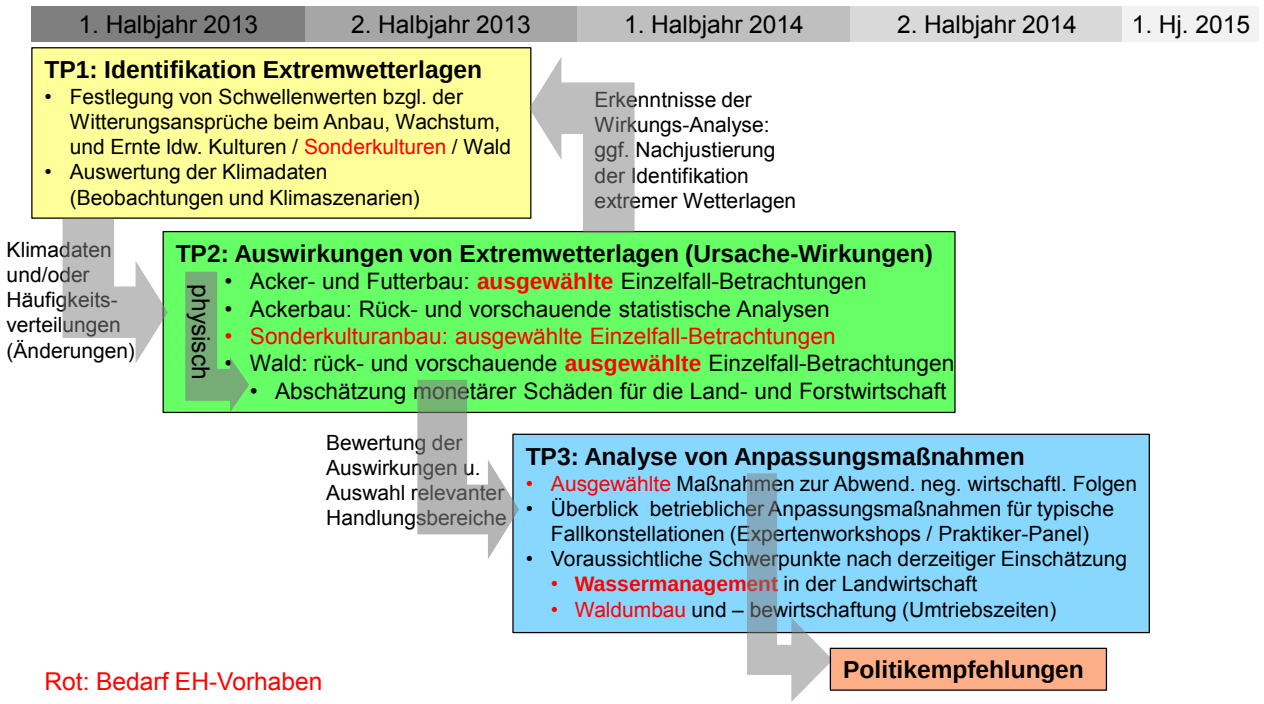
1.2.2 Ablauf und Methodik

Das Vorhaben wurde in drei teilweise iterativen Teilschritten durchgeführt (vgl. Abbildung 1.1). Im ersten Schritt (TP 1) wurde im Rahmen von Experteninterviews und -workshops eine umfassende Liste agrarrelevanter Extremwetterlagen erstellt. Für die identifizierten Extremwetterlagen wurden auf der Grundlage einer Literaturrecherche und Expertenangaben Schwellenwerte für Wettervariable festgelegt. Dabei wurden kulturartspezifische Besonderheiten berücksichtigt, weil bestimmte Wetterkonstellationen (z. B. Dürre) in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Kultur, der Jahreszeit sowie den regionalen Standortbedingungen eine unterschiedliche Bedeutung haben. So wirken sich Dürren im Frühjahr oder Spätsommer vollkommen unterschiedlich auf Wintergetreide bzw. Mais aus. Während Mais im frühen Frühjahr noch nicht gesät ist, ist Wintergetreide im Spätsommer in der Regel bereits geerntet. Bei Bäumen wirkt sich eine Frühjahrsdürre meist zuwachsmindernd im laufenden Jahr aus; dagegen senkt eine Spätsommertrockenheit häufig den Zuwachs erst im Folgejahr.

Auf diese Weise entstand eine detaillierte, kulturartspezifische Matrix an Schwellenwerten, die agrarrelevante Extremwetterlagen definieren, die u.a. im Rahmen des Projektstatusseminars am 13.5.2014 zur Diskussion gestellt wurde. Anhand der Schwellenwertmatrix wurden die beim DWD

vorliegenden Klimadaten, sowohl Stationsdaten als auch Klimaprojektionen, mit Blick auf bereits beobachte bzw. erwartete Änderungssignale der betrachteten Extremwetterlagen ausgewertet.

Abbildung 1.1: Struktur und Ablaufplan des Verbundforschungsvorhabens



Quelle: Eigene Darstellung.

Im zweiten Schritt (TP 2) wurden die Auswirkungen vor allem derjenigen Extremwetterlagen detailliert untersucht, die als besonders relevant erachtet wurden. Ein Kriterium für die Auswahl von Extremwetterlagen war die im ersten Schritt ermittelte Häufigkeit ihres Auftretens, insbesondere bei einer beobachteten bzw. erwarteten Zunahme. Ein weiteres Kriterium war die von befragten Experten eingeschätzte Relevanz der Extremwetterlagen. Oft limitierte jedoch die mangelnde Verfügbarkeit belastbarer Informationen und Daten eine eingehendere Wirkungsanalyse. Während für Ackerkulturen, z. B. Marktfrüchte, eine vergleichsweise gute Datengrundlage vorlag, gilt dies nur sehr bedingt für Sonderkulturen. Für den Wald wären die Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur sehr hilfreich gewesen. Diese lagen jedoch bis zum Projektabschluss nicht vor. Grundlagen zu den Auswirkungen extremer Dürren auf die Naturverjüngung, das heißt das Absterben von Jungbäumen, sowie die Abschätzung von Sturmschäden wurden innerhalb der Projektlaufzeit durch die oben erwähnten Entscheidungshilfe-Vorhaben erarbeitet.

Im dritten Schritt (TP 3) wurden mögliche Anpassungsmaßnahmen untersucht. Auch in diesem Bereich mussten aufgrund der Vielfalt an Möglichkeiten Schwerpunkte gesetzt werden. Eine zentrale Rolle spielen die Möglichkeiten des Risikomanagements, um schwere negative wirtschaftliche Folgen von Extremwetterlagen für die Betriebe abzuwenden. Ein weiterer wichtiger Bereich für die Landwirtschaft ist das Wassermanagement, da zahlreiche Extremwetterlagen oft

auf zu wenig oder zu viel Niederschlag zurückzuführen sind. Im Wald wurden vorrangig die Anpassungsoptionen durch Waldumbau untersucht.

Der vorliegende Abschlussbericht orientiert sich an den Teilschritten des Projektes. In Kapitel 2 wird ein Überblick über die beobachtete und erwartete Veränderung von Extremwetterlagen gegeben. Um wesentliche Entwicklungen und Trends herauszuarbeiten, die für viele Kulturarten gelten, werden jeweils ähnliche kulturartspezifische Zeiträume und Schwellenwerte zu einer kulturartübergreifenden Auswertung zusammengefasst. Im Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Analysen zu den Auswirkungen ausgewählter Extremwetterlagen für die betrachteten Kulturbereiche dargestellt. Dazu wird zunächst jeweils die regionale Sensitivität, d. h., die Hauptanbauregionen der betrachteten Kultur, mit der regionalen Häufigkeit des Auftretens von Extremwetter verschnitten. Anschließend werden die Ergebnisse einer umfassenden Literaturrecherche und Expertenbefragungen zur Bedeutung, zu den Wirkungen der Extremwetterlagen und zu Anpassungsoptionen präsentiert. Im Kapitel 4 werden agrarpolitische Maßnahmen zur Anpassung an Extremwetterlagen zusammenfassend beurteilt. Im Kapitel 5 werden Schlussfolgerungen aus den Analysen in Bezug auf den Umgang mit Extremwetterlagen gezogen und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2 Überblick über beobachtete und erwartete Entwicklungen agrarrelevanter Extremwetterlagen

Federführung: Dr. Cathleen Frühauf (Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung, DWD)

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Entwicklungen agrarrelevanter Extremwetterlagen hinsichtlich ihrer Häufigkeit und Intensität ihres Auftretens. Dazu werden zunächst kulturartübergreifende Zeiträume und Schwellenwerte betrachtet. Eine kulturartspezifische Betrachtung und Wertung der Bedeutung der einzelnen Extremwetterlage erfolgt in Kapitel 3 im Kontext der regionalen Anbauflächen sowie deren Auswirkungen.

2.1 Datengrundlagen

Die Analyse von Veränderungen der Häufigkeit und Intensität von Extremwettern, die per Definition seltene Phänomene sind, erfordert besonders lange Datenzeitreihen (Deutschländer und Dalelane, 2012). Für die Auswertung beobachteter Extremwetterlagen lagen die seit 1961 an bundesweit 132 Stationen des Deutschen Wetterdienstes täglich gemessen meteorologischen Größen vor. Klimaprojektionsrechnungen wurden verwendet um Aussagen über die Zukunft treffen zu können. Anhand der Tageswerte für die minimale, mittlere und maximale Temperatur, den Niederschlag, die mittlere Windgeschwindigkeit, die Bodenfeuchte sowie die Strahlung wurden die kulturabhängigen Extremwetterlagen definiert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Ergebnisse für Extremwetterereignisse, die auf dem Niederschlag, wie beispielsweise Starkregen basieren, mit besonderer Vorsicht zu interpretieren sind. Auf der einen Seite handelt es sich hierbei in der Regel um sehr lokal auftretende Ereignisse und auf der anderen Seite sind sie im Vergleich zur Temperatur mit einer deutlich größeren Messfehlerbelastung und weitaus geringeren räumlichen Repräsentanz (relativ große Unterschiede von Station zu Station) behaftet.

Für die Ermittlung der zukünftig zu erwartenden Änderungen von Extremwetterlagen standen Ergebnisse von 21 verschiedenen regionalen Klimamodellen (19 numerische Modelle und 2 statistische Modelle) zur Verfügung. Die Datensätze der einzelnen Modelle beinhalteten modellierte Klimawerte ab 1961, reichten aber nicht immer vollständig bis 2100, sondern brachen bereits kurz vorher ab. Für ein vollständiges Ensemble waren daher nur Auswertungen bis 2098 möglich.

Die Basis für die ausgewerteten Klimamodelldaten bildete das Emissionsszenario[4] A1B. Dieses Szenario beschreibt eine zukünftige Welt mit einem sehr raschen Wirtschaftswachstum und einer ausgewogenen Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen. Neue und effizientere Technologien werden schnell eingesetzt. Die Weltbevölkerung nimmt bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zu und danach wieder leicht ab. Da man dieses Szenario als besonders realistisch angesehen hat, wurden die meisten Klimaprojektionsrechnungen hierfür durchgeführt.

Die Klimadaten der neuen RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) lagen für die Untersuchung noch nicht vollständig vor. Eine von Jakob et al. (2014) durchgeführte vergleichenden Auswertung der neuen RCP-Klimaprojektion mit Klimamodellläufen auf Basis des A1B-Szenarios ergab jedoch eine hohe Korrelation bezüglich der langfristigen Trends für Temperaturen und Niederschläge als auch extremer Ereignisse wie Starkregen, Dürren und Hitzewellen. Es ist zu erwarten, dass die Verwendung von RCP-Szenarien für die hier vorgenommene Analyse agrarrelevanter Extremwetterlagen zu vergleichbaren Ergebnissen kommt.

Um aus den Stationsdaten (Beobachtungen) sowie Daten für Gitterpunkte (Klimaprojektionen) flächenhafte Darstellungen zu bekommen, erfolgte eine Interpolation (Janssen, 2009a). Bei den Karten für die Vergangenheit führte das Interpolationsverfahren bei einzelnen agrarmeteorologischen Parametern zu Ungenauigkeiten in den Gebirgen. Darüber hinaus wurden die auf ein 1x1 km^2 interpolierten Stationsdaten für Analysen der Auswirkungen von Extremwetterlagen bereitgestellt.

2.2 Methodische Vorgehensweise

Die Auswertung der Klimadaten mit Blick auf agrarrelevante Extremwetterlagen erfolgte mit Hilfe des Softwarepakets AMBER (AgrarMeteorologische BERatung), ein in der Praxis bewährtes Endprodukt der agrarmeteorologischen Forschungs- und Entwicklungstätigkeit des Deutschen Wetterdienstes. AMBER gestattet das Verrechnen langer Daten-Zeitreihen und dient daher auch der agrarklimatologischen Charakterisierung verschiedener Standorte. Klimatologische Aussagen zur

[4] Die Konzentration der Treibhausgase gehört zu den Einflussgrößen, die unser Klima bestimmen. Sie steigt, hauptsächlich als Folge menschlicher Aktivitäten, immer weiter an. Wie sich unser Klima in der Zukunft tatsächlich ändern wird, hängt somit in hohem Maße davon ab, wie sich die menschlichen Aktivitäten in der Zukunft auswirken werden. Aus dem breiten Spektrum dieser denkbaren Entwicklungen wurden einige mögliche Szenarien entwickelt. Diese Emissionsszenarien beschreiben unterschiedliche Randbedingungen, die unser zukünftiges Klima prägen könnten. Wegweisend waren bisher die sechs Emissionsszenarien ("SRES-Szenarien"), die das Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC in einem Sonderbericht im Jahr 2001 beschrieben hat.

Für jedes Emissionsszenario berechnen globale Klimamodelle das Klima für die gesamte Erde. Regionale Klimamodelle verfeinern die Rechenergebnisse für einzelne Gebiete. Im Rahmen des EU-Projektes ENSEMBLES wurden auf Basis der Ergebnisse mehrerer globaler Klimamodelle mehr als 20 regionale Klimaprojektionen mit einer horizontalen Auflösung von 25 km erzeugt. Aus anderen Quellen stehen weitere Klimaprojektionen zur Verfügung. Die Daten liegen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag vor.

Anbauwürdigkeit verschiedener Kulturen, zu Ernterisiken und anderen agrarmeteorologischen Fragestellungen sind auf der Grundlage der Rechenergebnisse von AMBER möglich.

Der Kern des Programmpakets besteht aus einer Verzahnung agrarmeteorologischer Unterprogramme mit bodenphysikalischen, bestandsklimatologischen, phytopathologischen sowie weiteren land- und forstwirtschaftlichen Inhalten. Eingangsdaten sind meteorologische Mess- und Vorhersagedaten wie die oben erläuterten Stations- und Projektionsdaten, phänologische Daten und Bestandsdaten. Insgesamt erfolgt die Berechnung von über 200 agrarmeteorologischen Parametern. Somit konnten auch komplexere agrarrelevante Extremwetterlagen, die beispielsweise die Berechnung der täglichen Bodenfeuchte für unterschiedliche Kulturarten erforderte, im Rahmen dieses Vorhabens untersucht werden.

Die Häufigkeit des Auftretens einer Über- bzw. Unterschreitung der kulturspezifischen Schwellenwerte wird direkt aus den Klimadaten (Temperatur, Niederschlag, Wind, Strahlung) oder aus Modellberechnungen (Bodenfeuchte) mit den Klimadaten als Eingangswerte bestimmt. Aus den so erhaltenen Daten für die einzelnen Stationen werden durch Interpolation Deutschlandkarten erzeugt. Gleichzeitig wird auch ein Deutschlandmittel berechnet, das Grundlage für die Häufigkeitsverteilungen ist.

Die identifizierten agrarrelevanten Extremwetterlagen sind in der Regel durch das Über- oder Unterschreiten bestimmter Schwellenwerte von Klimavariablen oder abgeleiteter agrarmeteorologischer Parameter definiert. Das macht eine statistische Analyse kompliziert, da extreme Tageswerte oft nicht normalverteilt sind (Schönwiese, 2007) und der Niederschlag eine asymmetrische Häufigkeitsverteilung aufweist (Deutschländer und Dalelane, 2012). Darüber hinaus waren sowohl Stationsdaten als auch Klimamodelldaten miteinander zu vergleichen. Da jede Klimaprojektion durch eine eigene Häufigkeitsverteilung gekennzeichnet war, deren Mittelwert mehr oder weniger deutlich vom Mittelwert der beobachteten Stationswerte abwich, wurden die Klimaprojektionsdaten korrigiert. Dazu wurde das Deutschlandmittel für jedes einzelne Klimamodell für die Normalperiode 1961-1990 auf das Deutschlandmittel der Messungen für diesen Zeitraum normiert. Für die Häufigkeitsverteilungen wurden die Ergebnisse über alle Modelle und über den Zeitraum von jeweils 30 Jahren gemittelt. Diese Vorgehensweise wird exemplarisch am Extremereignis „Frosttage nach dem 1. Februar“ (Kapitel 2.3.2) verdeutlicht.

Um festzustellen, ob bereits seit 1961 eine Änderung der Häufigkeit agrarrelevanter Extremereignisse zu beobachten war, wurden die Mittelwerte der drei 30-jährigen Zeiträume 1961-1990, 1971-2000 sowie 1981-2010 vergleichend betrachtet. Für die Klimaprojektionsdaten wurden sieben weitere 30-jährige Zeiträume erzeugt (2011-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051-2080, 2061-2090, 2071-2098). Wichtig war hierbei zu klären, ob sich ein Trend in den beobachteten Daten, vor allem der Mittelwerte in der Zukunft weiter fortsetzt oder ob sich ein anderes Verhalten zeigt. Angesichts der sehr unterschiedlichen statistischen Verteilungsfunktionen wurde auf eine detaillierte und aufwändige Analyse von Änderungen in den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Stationsdaten und Klimamodelldaten verzichtet.

Das Ensemble der Klimamodelldaten wies auch nach der Normierung der jeweiligen Deutschlandmittelwerte auf das Deutschlandmittel der Beobachtungsdaten für die Normalperiode 1961-1990 eine beträchtliche Streuung auf. Zur Darstellung der Spannweite der Klimaprojektionsergebnisse wurden für jeden einzelnen Gitterpunkt Werte für das 15., 50. und 85. Perzentil bestimmt und als Deutschlandkarte visualisiert. Die Perzentile stellen die Streuung der projizierten Klimaentwicklung bzw. in diesem Fall der untersuchten agrarrelevanten Extremwetterlagen dar. Dabei ist das 50. Perzentil der Wert, für den jeweils die Hälfte der Modellergebnisse höhere bzw. niedrigere Änderungen zeigen. Er repräsentiert somit innerhalb des Ensembles ein mittleres Änderungssignal. Das 15. und 85. Perzentil dient dazu die Spannweite der Modellergebnisse zu verdeutlichen, ohne dass einzelne besonders extreme Ergebnisse diesen Eindruck verfälschen (DWD, 2015). So haben 15 % der Modelle Werte, die noch unterhalb des 15. Perzentil liegen. Die Werte von weiteren 15 % der Modelle liegen oberhalb des 85. Perzentil. Die Spannweite zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil gibt somit 70 % der Modellergebnisse wieder. Die Zuordnung zu den einzelnen Perzentilen erfolgt streng mathematisch. Um mögliche langfristige Änderungstendenzen darzustellen, werden die Ergebnisse für die Perzentile für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zur Normalperiode 1961-1990 dargestellt.

Für jede Extremwetterlage und jede einzelne Kultur werden die von den Experten identifizierten sensiblen Zeiträume untersucht (vgl. Anhang 8). Diese Zeiträume werden entweder als Ganzes ausgewertet oder in einzelnen Teilabschnitten (Dekaden, Monate) untersucht. Da die phänologische Entwicklung in den verschiedenen Jahren sehr unterschiedlich verlaufen kann (z. B. 2013 lag die Entwicklung im Weizen im Frühjahr rund 3 Wochen zurück), und die Aussaatzeiten regional sehr unterschiedlich ausfallen, können für die potenziellen Extremwetterlagen nur Zeitspannen angegeben werden.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Überblick über klimatische Entwicklungen

Im europäischen Raum prägen wandernde Hoch- und Tiefdruckgebiete, die entlang der Luftmassengrenze zwischen kalter Polarluft und warmer Subtropenluft entstehen, das Wetter und Klima (DWD, 2012). Durch Tiefdruckgebiete werden Fronten mit Warm- oder Kaltluftvorstößen verlagert. Hochdruckgebiete sind durch absinkende und blockierende Luftbewegungen gekennzeichnet. In der Regel sind an die geographische Position dieser Wetter bestimmenden Hoch- und Tiefdruckgebiete typische Witterungsverhältnisse gebunden. In Mitteleuropa herrschen Westwinde vor, die meist feuchte, maritime Luftmassen vom Nordatlantik nach Deutschland bewegen und zu milden, regnerischen Wintern und relativ kühlen, regenreichen Sommern führen. Demgegenüber kommt es durch ein vermehrtes Auftreten von Ostwetterlagen zu kontinental geprägten, trockenen, kalten Wintern oder in den Sommermonaten zu trockenem und heißem Wetter (DWD, 2012).

Der Einfluss markanter Wetterlagen auf die monatliche Witterung kann sehr verschiedenartig sein. Häufig spielt die Andauer einer Wetterlage oder ein verstärktes Auftreten oder die geographische Ausdehnung der Hochs und Tiefs eine enorme Rolle für die Entwicklung meteorologischer Phänomene (wie der Hitze- und Kältewellen oder Trocken- und Nassperioden) (DWD, 2012). Durch den Klimawandel bedingt, werden die derzeit bemerkbaren Änderungen mit einer polwärts orientierten Verlagerung der Hauptwind- und -drucksysteme beschrieben (Reichler, 2009 zitiert in DWD, 2012). In den mittleren Breiten ist die Westwindzone Teil dieser polwärtigen Verlagerung. Diese Trends der sich verändernden Häufigkeiten relevanter Wetterlagen werden sowohl in Beobachtungsdaten als auch in Klimamodellen abgebildet.

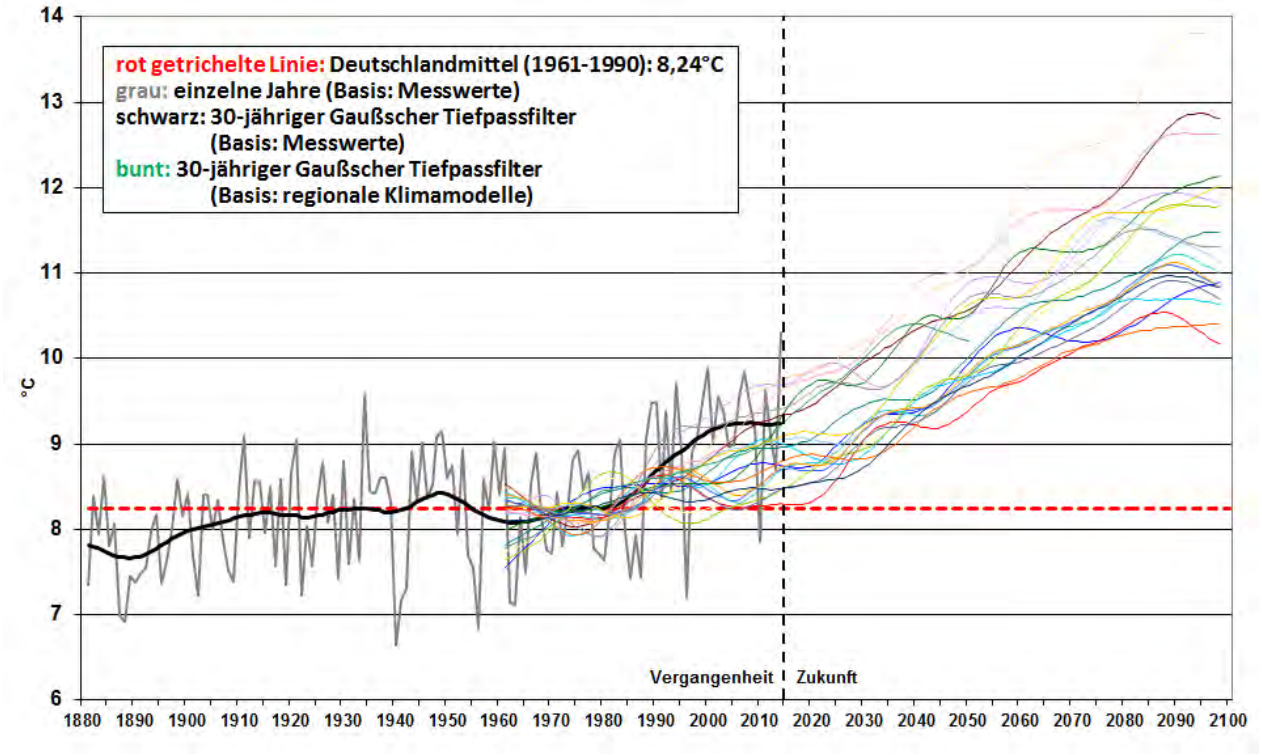
Die Auswirkungen sind eine verstärkte Häufigkeit der Westströmung und eine Abnahme der östlichen Windrichtungen. Teilweise sind auch nördliche und südliche Windkomponenten betroffen. Infolge der polwärtigen Verlagerung der Nord-Atlantik Windzonen haben die Winterniederschläge im nördlichen Europa zugenommen, während sie in Südeuropa wegen der Abschwächung der mediterranen Windzone abgenommen haben. Niederschlagsereignisse mit hohen Regenmengen treten häufiger auf, gleichzeitig nehmen Ereignisse mit geringen und mittleren Niederschlagsmengen ab (Hov Ø et al., 2013). Seit den 1950er Jahren wurde eine zunehmende Sommertrockenheit in Mittel- und Südeuropa beobachtet. Meteorologische und klimatologische Messungen zeigen, dass die Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen zugenommen haben und dabei ein komplexes nicht einheitliches räumliches Muster aufweisen (Hov Ø et al., 2013).

In Deutschland hat die durchschnittliche Temperatur nach Gerstengarbe und Werner (2007) im letzten Jahrhundert um rund 1,2 °C zugenommen und liegt damit über dem globalen Durchschnitt. Die Niederschläge variieren entsprechend der Orographie regional sehr deutlich und weisen erhebliche mittel- bis langfristige Schwankungen auf. Aufgrund dieser Schwankungen konnten im letzten Jahrhundert regionale Verschiebungen von Klimatypen in den Übergangsgebieten zwischen Klimazonen nachgewiesen werden.

Aus den langfristigen klimatischen Veränderungen, wie den beobachteten und projizierten Temperatur- oder Niederschlagsänderungen, lassen sich Rückschlüsse für die Tendenzen bei vielen Extremwetterlagen ziehen. Beispielsweise ist bei dem in Abbildung 2.1 dargestellten beobachteten und erwarteten Anstieg der durchschnittlichen Temperatur einerseits mit einem tendenziellen Rückgang von Extremfrosttagen und andererseits mit einer Zunahme extremer Hitzetage zu rechnen. Die in diesem Kapitel dargestellte Auswertung von Stationsdaten seit 1961 scheint diese erwartete Entwicklung zu bestätigen.

Für die Referenzperiode 1961-1990 liegt das Deutschlandmittel der Jahresmitteltemperatur bei 8,24°C (rot gestrichelte Linie in Abbildung 2.1). Seit etwa 1910 bewegt sich das gleitende Mittel (schwarze Linie) in diesem Bereich. Ab 1988 sind die Temperaturen deutlich angestiegen. Nur in zwei Jahren (1996, 2010) lag das Deutschlandmittel unter dem langjährigen Mittelwert. Spitzenreiter ist das Jahr 2014 mit einer Temperatur von 10,3°C. Seit etwa dem Jahr 2000 stagniert das gleitende Mittel der Jahresmitteltemperatur auf hohem Niveau.

Abbildung 2.1: Entwicklung des Jahresmittels der Lufttemperatur 1881 bis 2100 für Deutschland

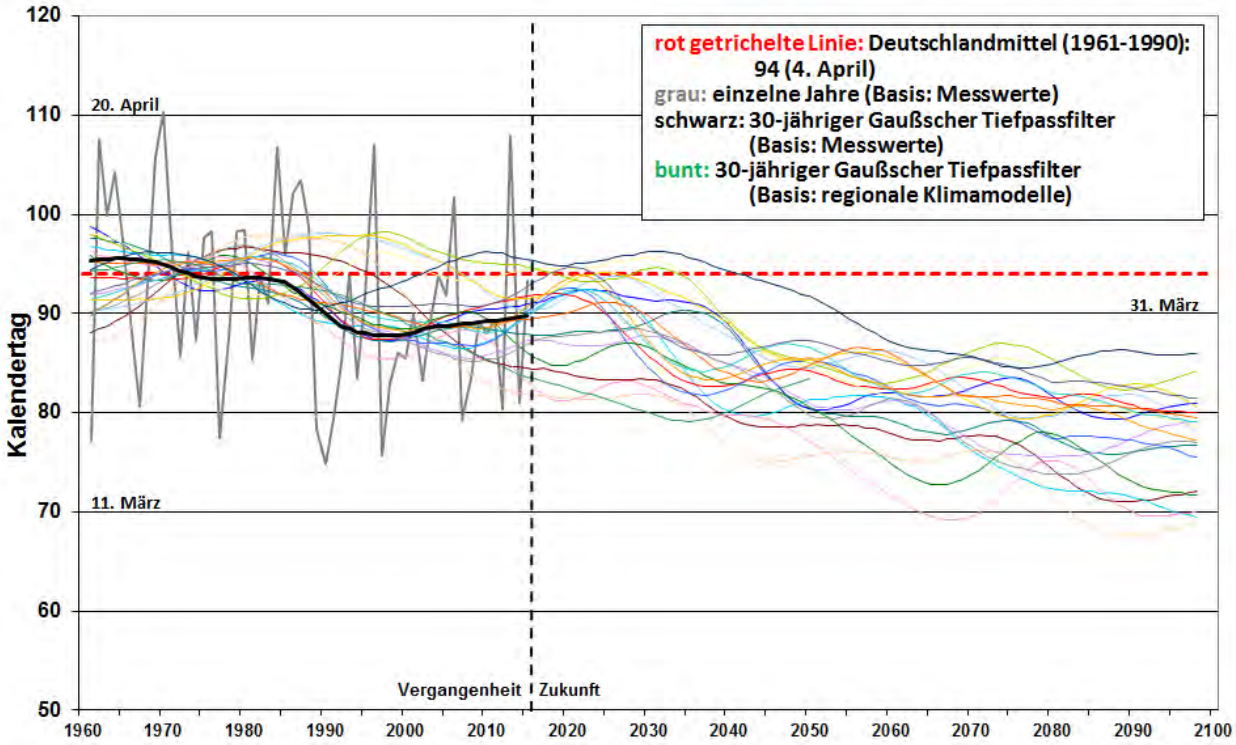


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Die Temperatur ist für das Pflanzenwachstum eine zentrale Klimagröße und steuert u.a. den Vegetationsbeginn. Der Vegetationsbeginn spielt wiederum für einige für die Landwirtschaft relevante Extremwetterlagen eine wichtige Rolle. So kann beispielsweise ein zunehmend früher einsetzendes Pflanzenwachstum zu einem höheren Risiko für Spätfröste führen. Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf des nach der Methode von Janssen (2009b) berechneten Vegetationsbeginns. Ausgehend von phänologischen Beobachtungen wurde eine spezielle Temperatursumme entwickelt, um mit Hilfe der Klimaprojektionsdaten Aussagen zu zukünftigen Änderungen machen zu können. Begann im Zeitraum 1961-1990 der berechnete Vegetationsbeginn im Mittel am 4. April, startete die Vegetation im Zeitraum 1981-2010 bereits rund eine Woche früher. Laut den Klimaprojektionen setzt sich diese Tendenz weiter fort.

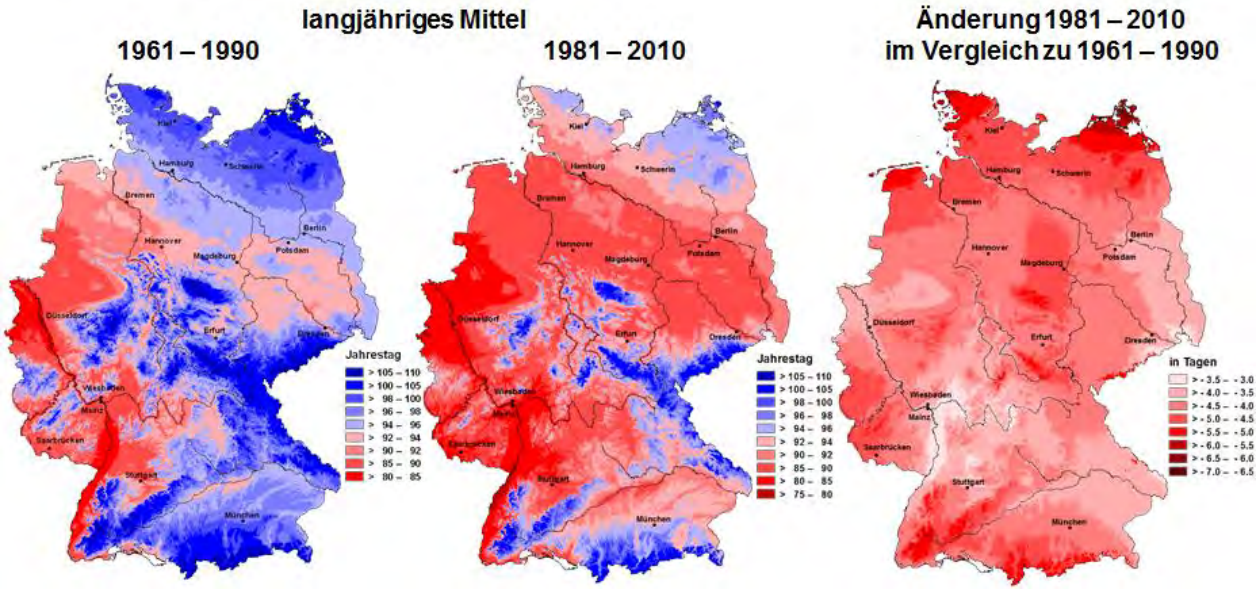
Innerhalb Deutschlands gibt es deutliche regionale Unterschiede bezüglich des ermittelten Vegetationsbeginns (vgl. Abbildung 2.3). Entlang des Rheins startet die Vegetation rechnerisch im Mittel bereits vor dem 25. März (Tag 84), in den Mittelgebirgen erst nach dem 6. April (Tag 96), teilweise sogar nach dem 20. April. Je nach Region ergibt sich für den Zeitraum 1981-2010 im Vergleich zu 1961-1990 eine Verfrühung um 2 bis 6 Tage. Vergleichsweise am stärksten fiel diese Entwicklung in den Küsten- und Bergregionen sowie in Sachsen-Anhalt aus.

Abbildung 2.2: Verlauf des berechneten Vegetationsbeginns von 1961 bis 2100



Quelle: DWD-Klimaatlas nach Janssen (2009b).

Abbildung 2.3: Regionale Unterschiede beim berechneten Vegetationsbeginn und dessen Entwicklung



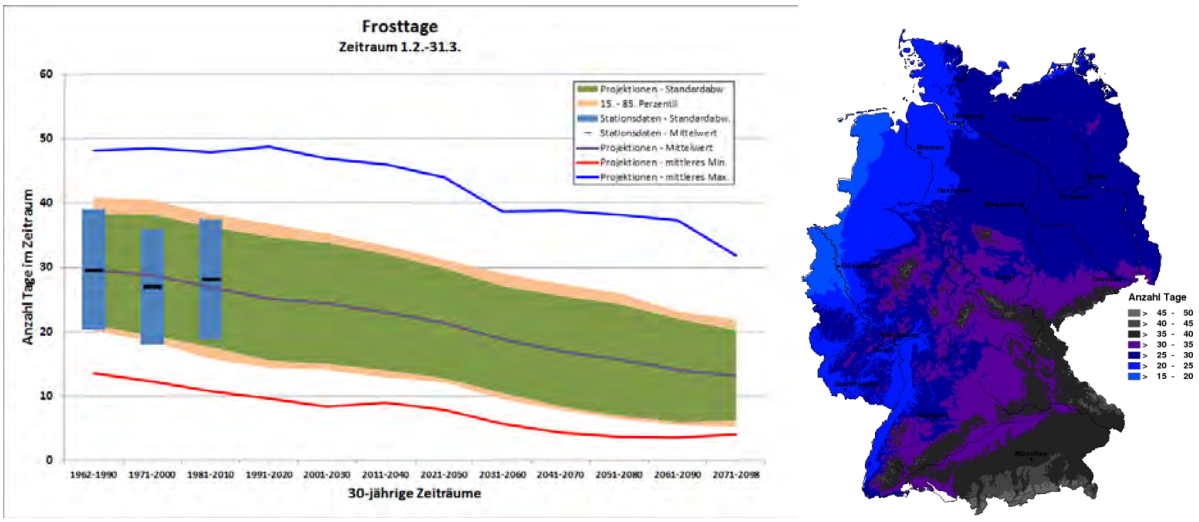
Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.2 Frosttage nach dem 1. Februar

Nach der Düngeverordnung ist das Ausbringen von Wirtschaftsdünger nach der Kernsperrfrist bis zum 31. Januar (DüngeVO §4 Abs.5) auch dann untersagt, wenn der Boden und die Pflanzen aufgrund von Bodenfrost nicht in der Lage sind, Dünger aufzunehmen (DüngeVO §3 Abs.5). Da die Bodentemperatur in den Klimaprojektionen nicht abgebildet ist, wird das Bodenfrostrisiko nach dem 1. Februar anhand der Anzahl der Tage mit einer minimalen Lufttemperatur unter 0°C im Zeitraum 1. Februar bis 31. März dargestellt (vgl. Abbildung 2.4).

Die Anzahl der Tage, an denen viehhaltende Betriebe damit rechnen müssen, dass sie wegen Frost nach dem 1. Februar keine Gülle ausbringen dürfen, hat tendenziell abgenommen. Die durchschnittliche Anzahl der an Wetterstationen im Februar/März gemessenen Frosttage nahm im Mittel der Jahre 1961-1990 bis 1981-2010 um rund zwei Tage ab. Regional ist die Häufigkeit von Frosttagen sehr unterschiedlich. Allein im Norddeutschen Flachland waren im Zeitraum von 1981-2010 im Westen rund 10 Frosttage weniger zu verzeichnen als im Osten. Die Mittelgebirgslagen und der Südosten weisen die höchsten Frosttage auf (vgl. Abbildung 2.4, Karte).

Abbildung 2.4: Anzahl der Tage mit Frost (Minimumtemperatur < 0°C) in den Monaten Februar und März; links: Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Messungen und der Klimaprojektionen für 30-Jahreszeiträume; rechts: Deutschlandkarte für den Zeitraum 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Obwohl die mittlere Anzahl an Frosttagen abnimmt, muss das nicht bedeuten, dass Lagerkapazitäten eingespart werden können. Die Güllelagerkapazitäten müssen sich an den längeren Frostperioden orientieren. Aus diesem Grund ist die Entwicklung der Variabilität der Frosttage von Bedeutung. Wenn diese steigt, könnten trotz rückläufiger Mittelwerte die längeren Frostperioden unverändert bleiben oder gar steigen. Ein Maß für die Variabilität ist die Standardabweichung. Die Variabilität der Frosttage hat sich gemessen an der Standardabweichung seit 1961 nicht ver-

ändert. Sie betrug für die Perioden 1961-1990, 1971-2000 und 1981-2010 jeweils rund 9 Tage, d. h. in 20 von 30 Jahren lag die Anzahl der Frosttage im Februar/März zwischen etwa 19 bis 37 Tagen. In etwa jedem sechsten Jahr wurden mehr als 37 Frosttage gemessen.

Die Auswertung der Klimaprojektionsdaten deutet darauf hin, dass die mittlere Anzahl der Frosttage im Februar/März aufgrund des erwarteten Temperaturanstiegs zukünftig weiter abnimmt, beispielsweise um weitere vier Tage in der Periode 2011-2040 im Vergleich zu 1981-2010. Die Projektionen weisen allerdings einen erheblichen Streuungsbereich sowohl der Mittelwerte als auch der Standardabweichungen auf. Der Streuungsbereich wird anhand des mittleren Maximums bzw. Minimums aller 21 Klimamodelldaten (Projektionen) deutlich. Für die Auswertungen wurden die Mittelwerte der Klimamodelldaten für den Zeitraum 1961-1990, wie in Kapitel 2.2 erläutert, auf die Mittelwerte der beobachteten Stationsdaten des Zeitraums 1961-1990 normiert. Dies wird in Abbildung 2.4 (links) daran deutlich, dass der Mittelwert der Stationsdaten (schwarzer Strich) für den Zeitraum 1961-1990 dem Mittelwert der Projektionen (graue Linie) entspricht. Die grüne Fläche stellt den Mittelwert der Standardabweichungen aller 21 Klimamodelldaten dar, der um den auf 1961-1990 normierten Mittelwert gelegt wurde. Diese mittlere Standardabweichung aller Klimaprojektionen nimmt tendenziell ab.

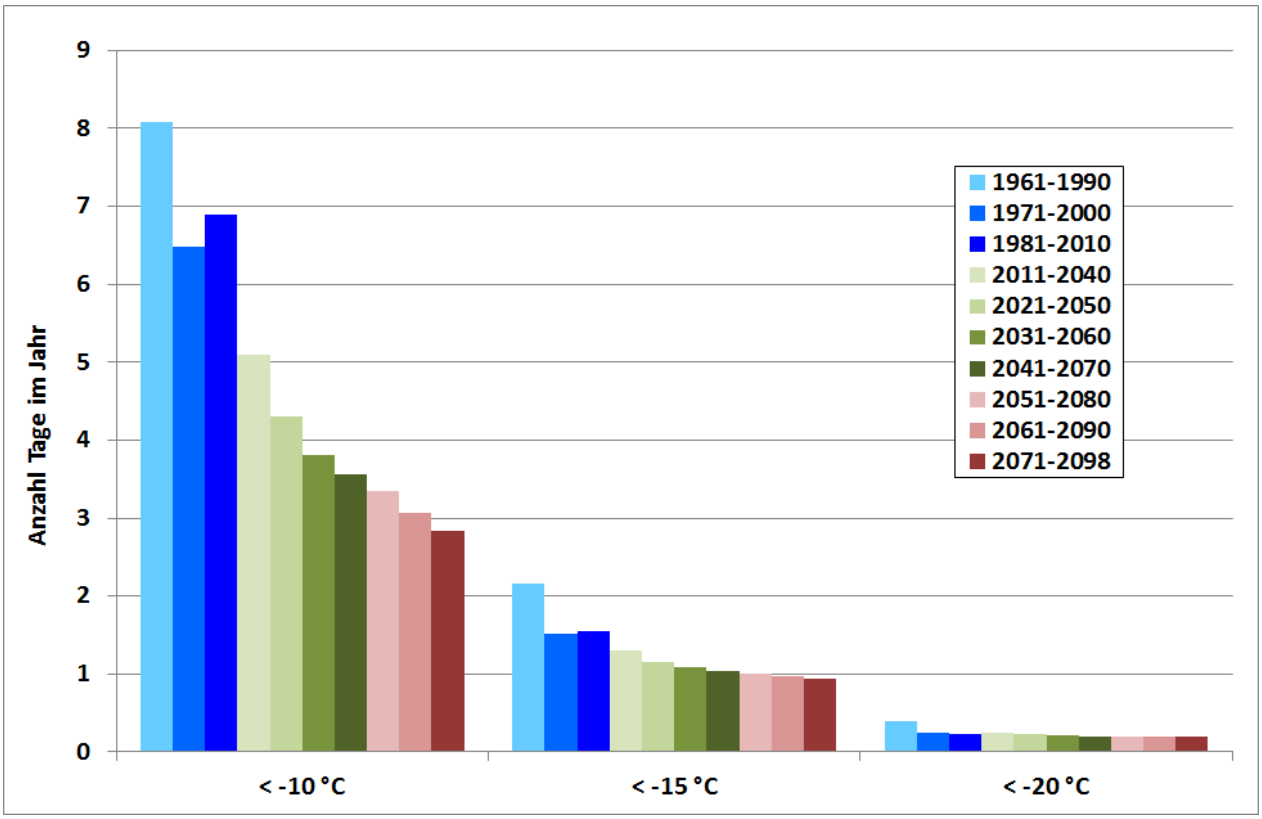
2.3.3 Extremer Winter- und Kahlfrost

Extreme Winterfröste mit Temperaturen unter -15°C können aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen Holz und Umgebungsluft zu Rissen in Holz und Rinde führen. Es können Schädigungen durch Eisbildung in Zellen, Zellwänden oder Interzellularen und mechanische Beschädigungen durch Eiskristalle entstehen. Die Folge sind Ertragsausfälle. Bäume und Dauerkulturen wie Äpfel und Weinreben werden geschädigt und können absterben. Ein sekundärer Befall durch Schädlinge (ungleicher Holzbohrer) oder Bakterien (Pseudomonaden) ist möglich.

Fehlt bei extremen, langandauernden Winterfrösten eine dämmende Schneedecke, spricht man von Kahlfrösten. In diesem Fall sind überwinternde Ackerkulturen wie Winterweizen, Wintergerste, Roggen und Winterraps bereits ab Temperaturen von unter -10°C betroffen. Kahlfröste beeinträchtigen zum einen die Membranfunktionen des Pflanzengewebes und zum anderen wird das Pflanzengewebe durch das Auswachsen von Eiskristallen zerstört. Die Folgen sind ein lückenhafter Bestand, der mit Ertragsverlusten einhergeht. In diesem Fall spricht man von Auswinterung. Auf Kahlfröste wird in Kapitel 3.2.3.2 näher eingegangen.

Einen Überblick über die beobachtete und zu erwartende Entwicklung extremer Frosttage gibt Abbildung 2.5. Das Vorhandensein einer schützenden Schneedecke blieb dabei unberücksichtigt, da das Auftreten extremen Frosts ein potenzielles Risiko auch für Kahlfröste beinhaltet. Ob den Kälteperioden tatsächlich Schneefall vorausgegangen ist, kann nur aus Wetterdaten rekonstruiert werden. Für die Klimaprojektionen lässt sich diesbezüglich kein belastbarer Zusammenhang darstellen.

Abbildung 2.5: Anzahl der Tage im Jahr mit Minimumtemperaturen < -10°C, < -15°C bzw. < -20°C, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft

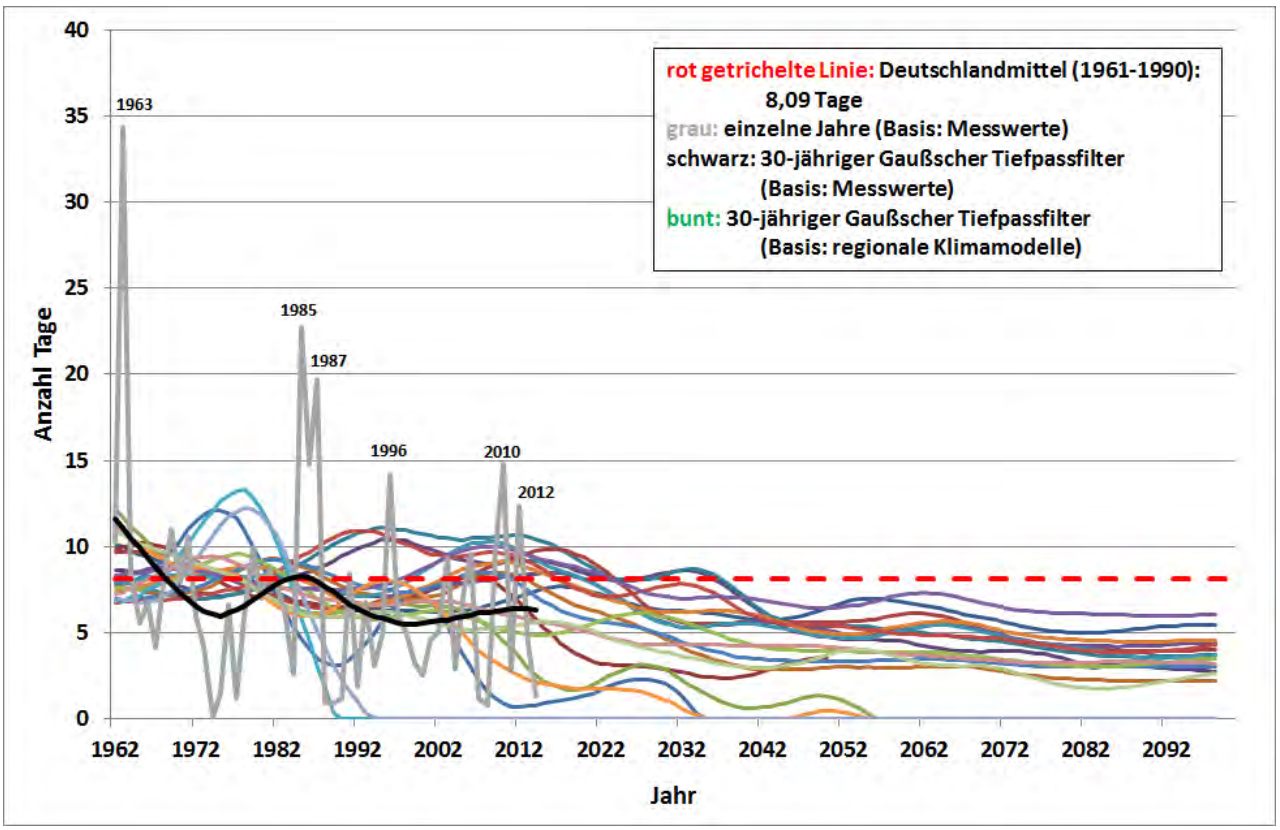


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Da die Kulturen unterschiedlich frostempfindlich sind, wurden verschiedene Minimumtemperaturen betrachtet. In den letzten 50 Jahren hat die mittlere Anzahl der Tage mit extremen Winterfrösten tendenziell abgenommen. In der Periode 1981-2010 waren durchschnittlich etwa sieben Tage mit Temperaturen von unter -10 C zu verzeichnen; rund ein Tag weniger im Vergleich zur Periode 1961-1990. Frosttage mit Minimumtemperaturen unter -15 C treten deutlich seltener auf. Ihre Anzahl nahm von durchschnittlich rund zwei Tagen (1961-1990) auf 1,5 Tage (1981-2010) ab.

Einzelne Jahre prägen die Entwicklung extremer Frosttage. Hervorzuheben ist das Jahr 1963, in dem das Thermometer an 34 Tagen weniger als -10 °C anzeigte. Aber auch kalte Winter Mitte der 1980er Jahre sowie 1996, 2010 und 2012 stechen hervor. Aus diesem Grund vermittelt die Abbildung 2.6 ergänzend zu den 30-jährigen Mittelwerten einen Eindruck über die mittel- und langfristigen Schwankungen. Der Einfluss der extremen Jahre schlägt sich auch im 30-jährigen gleitenden Mittel nieder, das tendenziell einen Rückgang des Auftretens extremer Winterfrosttage aufweist.

Abbildung 2.6: Beobachtete und erwartete mittelfristige Entwicklung der Anzahl der Tage mit Minimumtemperaturen < -10°C

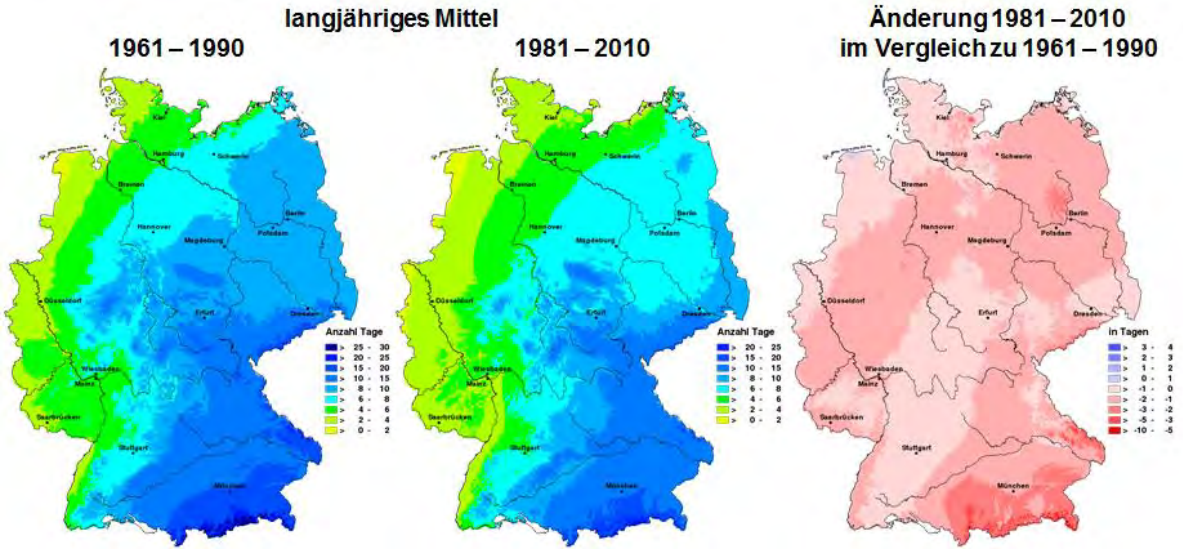


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Der von West nach Ost kontinentalere Einfluss prägt die regionale Häufigkeit extremer Winterfröste unter -10°C in Deutschland (vgl. Abbildung 2.7). Der ozeanische Einfluss, der von Nordwest nach Südost abnimmt, sorgt für relativ milde Winter. Durch die topographische Struktur des Landes mit seinen Mittelgebirgen, die verschiedene flache Landschaften einschließen, wird das Klima stark strukturiert. Für die Temperatur ist neben der Abhängigkeit von der Geländehöhe der Abstand vom Meer von entscheidender Bedeutung. Extreme Fröste traten kaum im Emsland (Nordwestdeutschland), entlang des Rheins, der Köln-Aachener Bucht sowie im Nord-Westen Schleswig-Holsteins auf. Lange Phasen von mehr als 10 Tagen mit extremen Frösten sind für die Mittelgebirge sowie südlich der Donau nicht ungewöhnlich. In letzteren Regionen liegt jedoch in der Regel eine schützende Schneeschicht über den überwinternden Ackerkulturen. Fast flächendeckend haben die Tage mit einer Minimumtemperatur unter -10°C für den Zeitraum 1981-2010 im Vergleich zu 1961-1990 um ein bis zwei Tage abgenommen.

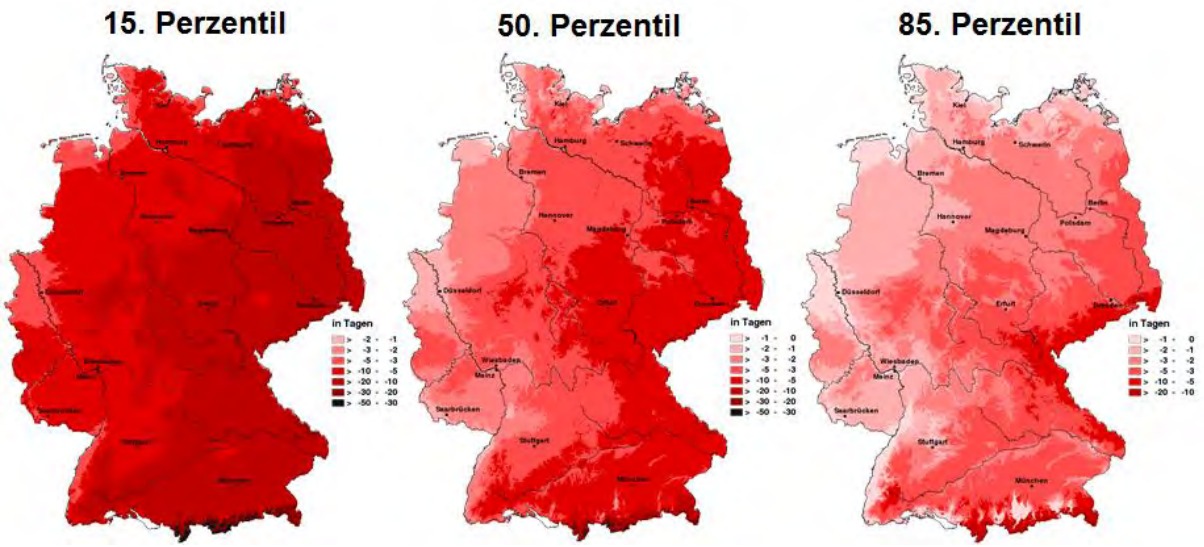
Der projizierte Rückgang der Anzahl extremer Frosttage wirkt sich vorwiegend in den beschriebenen kontinentaleren östlichen und südlichen Regionen sowie in den Mittelgebirgen aus (vgl. Abbildung 2.8). Allerdings weist die projizierte Abnahme der Frosttage ein sehr weites Spektrum für das Ausmaß des Rückgangs auf. Die Spanne reicht von einem Rückgang in den meisten Regionen von 2 bis 5 Tagen (85. Perzentil) bis zu 5 bis 20 Tagen (15. Perzentil).

Abbildung 2.7: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Minimumtemperaturen < -10°C, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1981-2010 und beobachtete Änderung



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.8: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Minimumtemperaturen < -10°C, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



Quelle: DWD-Klimaatlas.

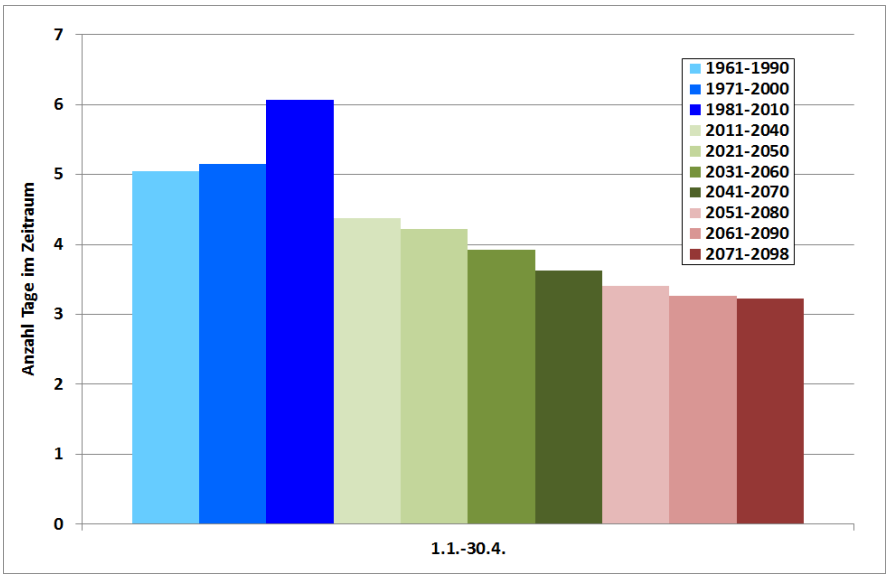
2.3.4 Wechselfrost

Wechselnde Perioden von Frost, z. B. nachts, und Temperaturen deutlich über 0°C tagsüber können zu einem Abreißen von Wurzeln und zu Schädigungen des Wurzelwerkes führen. Wenn die Pflanzen bei höheren Temperaturen tagsüber zu verdunsten beginnen und bei noch gefrorenem Boden und Wurzelwerk kein Wasser aufnehmen können, besteht die Gefahr, dass sie austrocknen. Betroffen sind hierbei vor allem überwinternde Ackerkulturen wie Wintergetreide und Raps aber auch Sonderkulturen wie Winterzwiebeln.

Der für Wechselfröste relevante Zeitraum ist der 1. Januar bis 30. April. Als Wechselfrosttage wurden diejenigen gezählt, die eine Minimumtemperatur von unter -3°C und Tageshöchsttemperaturen von über 3°C aufwiesen. Die Anzahl der Wechselfrosttage ist im 30-jährigen Mittel von 1981-2010 gegenüber 1961-1990 um einen Tag gestiegen (vgl. Abbildung 2.9). Demnach hat in den letzten 50 Jahren die Gefahr für Wechselfrostschäden leicht zugenommen. Nach den Klimaprojektionen wird ein kontinuierlicher Rückgang um bis zu drei Tagen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet.

Dies ist im ersten Moment überraschend, aber dieses Phänomen lässt sich einfach erklären. Unter kälteren Bedingungen treten sogenannte Eistage auf. D. h., das Maximum der Lufttemperatur liegt unter 0°C und die Kriterien für den Wechselfrost sind nicht erfüllt. Mit steigenden Temperaturen wird der Temperaturbereich erreicht, in dem die Bedingungen für den Wechselfrost erfüllt werden und die Tage mit Wechselfrost nehmen zu. Steigt die Temperatur weiter an, erfüllen die Temperaturen nicht mehr die Bedingungen, da die Minimumtemperatur zu hoch ist und es kommt zu einer Abnahme der Tage mit Wechselfrost.

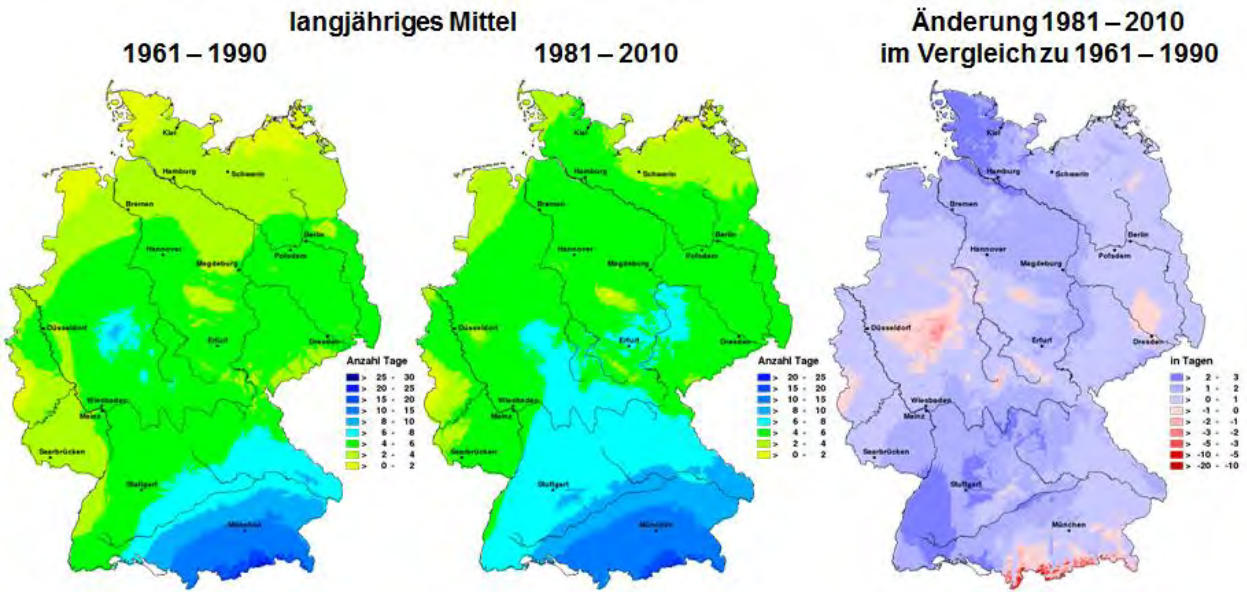
Abbildung 2.9: Anzahl der Tage mit Wechselfrost im Zeitraum 1.1.-30.4., Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Das regionale Auftreten von Wechselfrost ähnelt dem von extremen Frösten. Auch hier macht sich der kontinentalere Einfluss im Osten Deutschlands und südlich der Donau bemerkbar. Während Wechselforst in Süddeutschland aufgrund der häufigeren Schneedecke die Pflanzen in der Regel weniger schädigt, führen sie in den Ackerbaugebieten von der Köln-Aachener Bucht über die norddeutsche Tiefebene bis Sachsen häufiger zu Problemen (vgl. Abbildung 2.10).

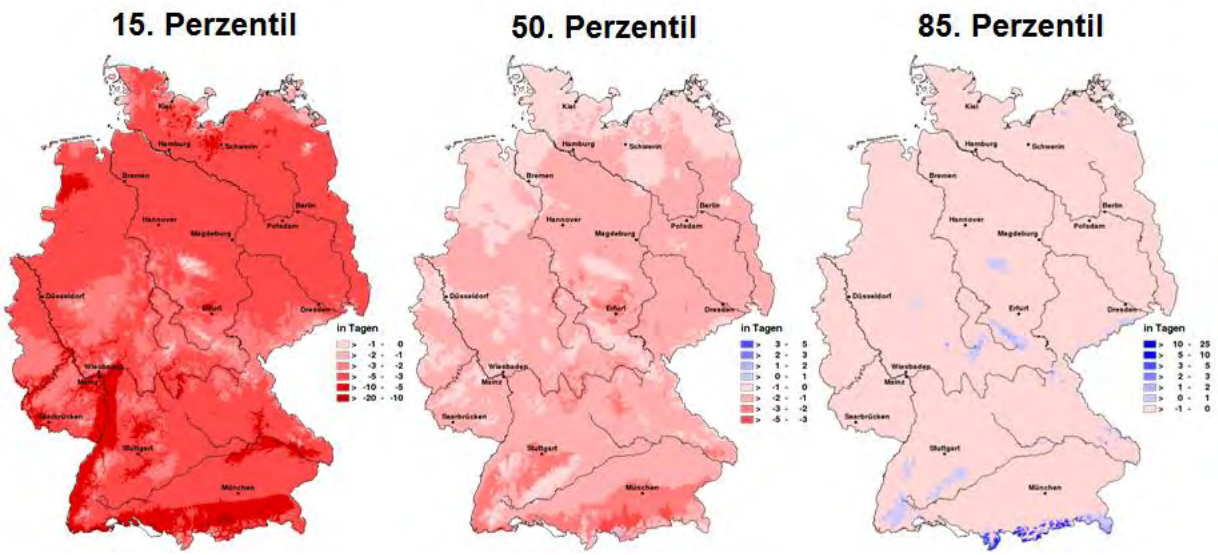
Abbildung 2.10: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost im Zeitraum 1.1.-30.4., 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1981-2010 und beobachtete Änderung



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Der projizierte Rückgang der Wechselfrostereignisse (vgl. Abbildung 2.11) reicht von flächendeckend weitgehend keine Änderung (85. Perzentil) bis hin zu einem nahezu vollständigem Nicht-Mehr-Auftreten (15. Perzentil).

Abbildung 2.11: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Wechselfrost im Zeitraum 1.1.-30.4., Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



Quelle: DWD-Klimaatlas.

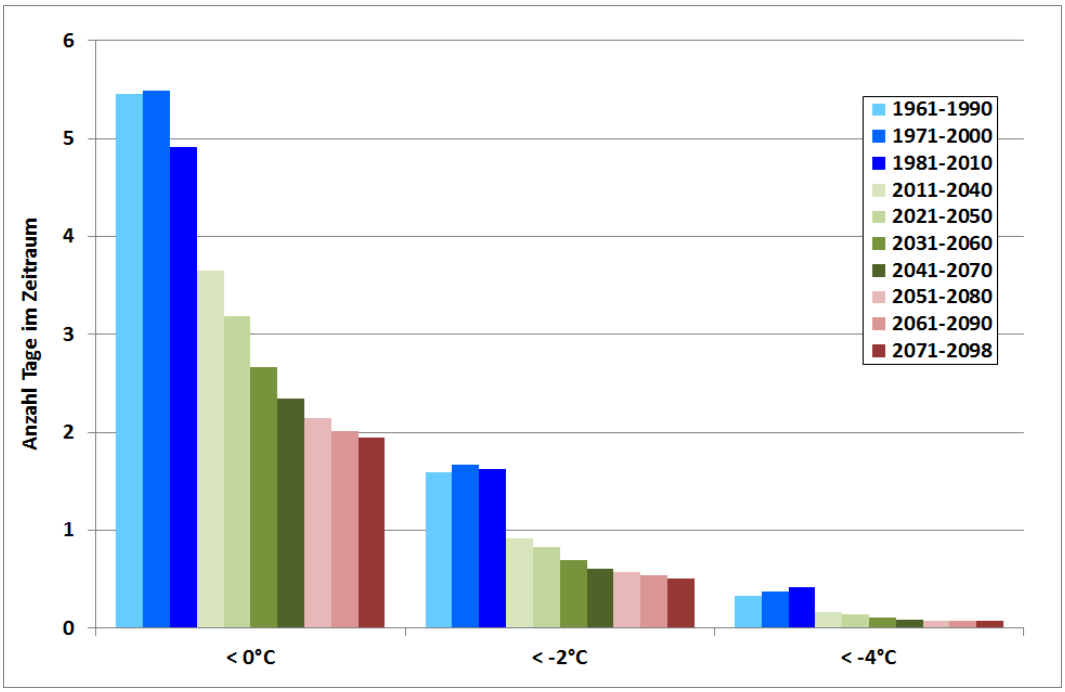
2.3.5 Spätfrost

Frost nach Beginn der Vegetationsperiode (Spätfrost) führt zu Schädigungen der Pflanzen und kann grundsätzlich alle Kulturen betreffen, die aber unterschiedliche Spätfrosttoleranzen aufweisen. So sind Speisezwiebeln und Zuckerrüben unempfindlicher als z. B. Mais und Weizen. Besonders sensitiv reagieren Reben, bei denen nach dem Austrieb die ersten Blätter von Spätfrösten in Mitleidenschaft gezogen werden, sowie Obst während der Blütezeit.

Aufgrund der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Kulturen gegenüber Spätfrost wurden die Klimadaten für verschiedene Minimumtemperaturen ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.12 dargestellt. In den letzten 50 Jahren traten Spätfröste in den Monaten April bis Mai mit Temperaturen unter 0 °C an fünf bis sechs Tagen auf. Während zwischen 1961-1990 und 1971-2000 kaum eine Änderung erfolgte, ist für den Zeitraum 1981-2010 ein leichter Rückgang zu beobachten.

Temperaturen unter -2 °C bzw. -4 °C waren deutlich weniger zu verzeichnen. Für die Vergangenheit ist kein einheitlicher Trend zu sehen. Zwischen einem leichten Rückgang (0°C), nur geringen Änderungen (-2°C) und einer leichten Zunahme (-4°C) ist alles vertreten. Die Klimamodelle gehen für die Zukunft für alle Schwellenwerte von einem deutlichen Rückgang des Auftretens von Spätfrost aus.

Abbildung 2.12: Anzahl der Tage für den Zeitraum 1.4.-31.5. an denen die Minimumtemperatur 0°C, -2°C und -4°C unterschreitet, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft

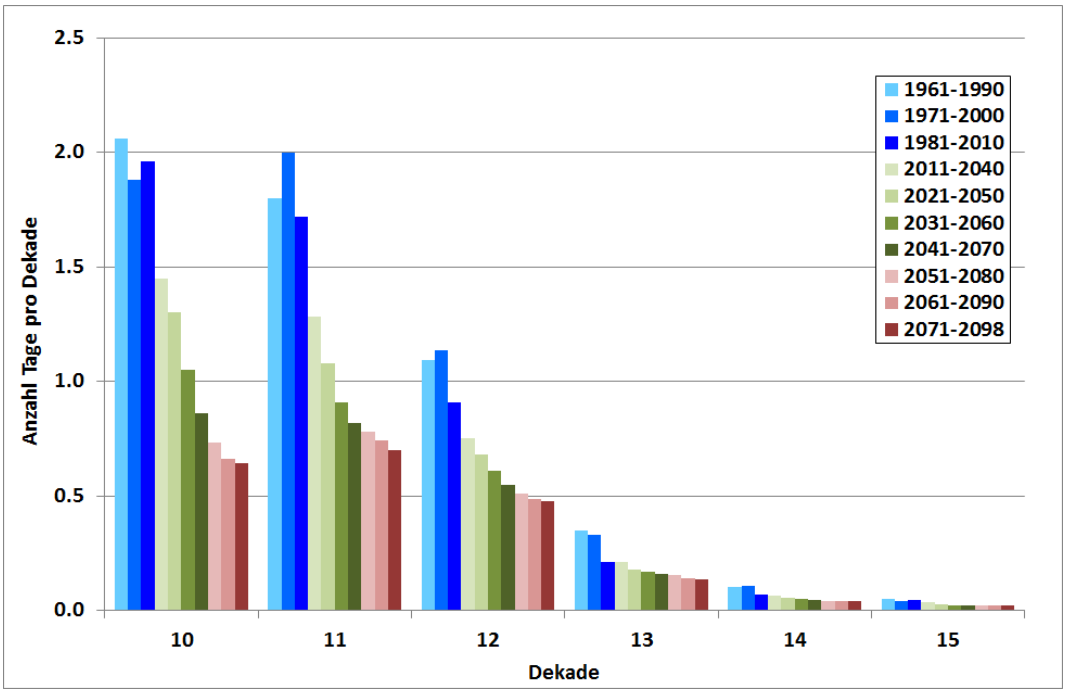


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Zusätzlich wurden alle Dekaden der beiden Monate April/Mai einzeln untersucht (vgl. Abbildung 2.13). Für jede Dekade ist der bereits angesprochene Rückgang der Spätfrostgefährdung zu sehen. Durch die steigenden Temperaturen kommt es zu einer Verfrühung der phänologischen Entwicklung (vgl. Kap. 2.3.1). So treten frostempfindliche Phasen früher im Jahr auf. Durch die Darstellung der Dekaden entsteht die Möglichkeit die Spätfrostgefährdung durch den sich verfrühenden Vegetationsbeginn besser abzuschätzen. Trat z. B. eine frostempfindliche Entwicklungsphase in der Vergangenheit in der 13. Dekade auf, so kann sie, durch den früheren Vegetationsbeginn, in Zukunft vielleicht bereits in der 12. Dekade beobachtet werden. Trotz der in jeder Dekade abnehmenden Spätfrostgefährdung, würde in diesem Fall die Spätfrostgefährdung für die Kultur zunehmen.

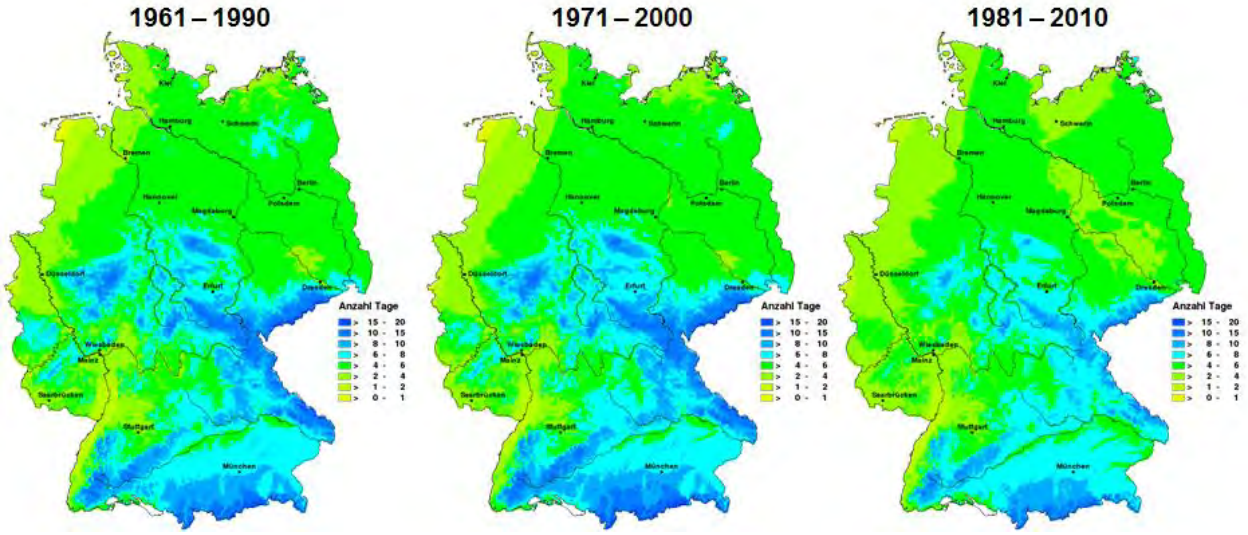
Die Karten zeigen die erwartete regionale Verteilung, mit einer geringeren Spätfrostgefährdung an der Küste und in den klimatisch begünstigten Gebieten und einer Zunahme der Frostgefährdung mit der Höhe (vgl. Abbildung 2.14). Für den Zeitraum 1981-2010 konnte ein deutlicher Rückgang der Frostgefährdung in einzelnen Regionen im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 beobachtet werden.

Abbildung 2.13: Anzahl der Tage pro Dekade mit Minimumtemperatur < 0°C, April: Dekade 10-12, Mai: Dekade 13-15, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



Quelle: DWD-Klimaatlas.

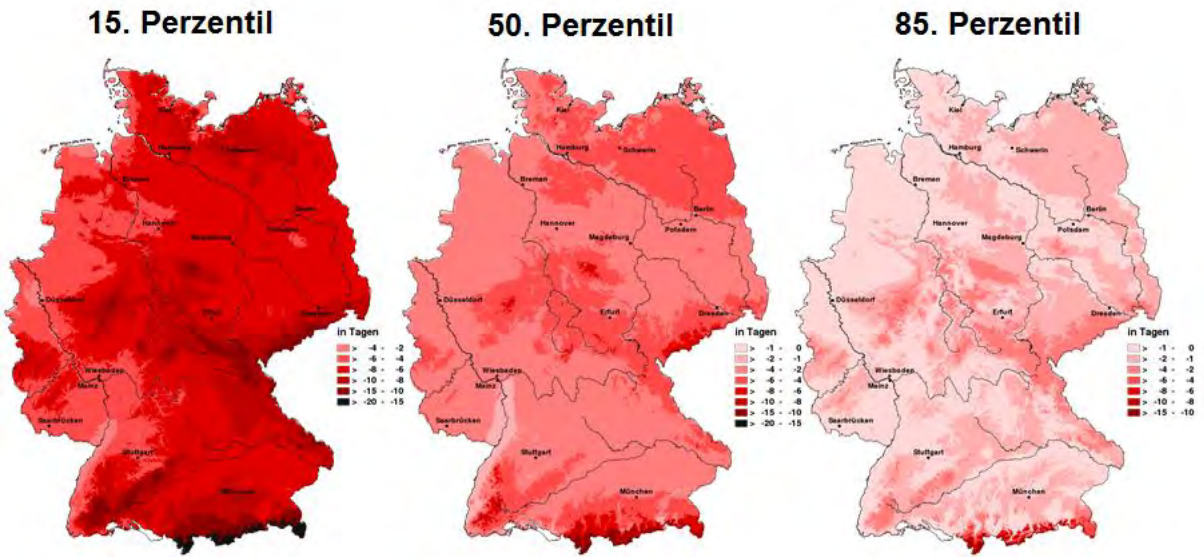
Abbildung 2.14: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Spätfrost (Tmin < 0°C) im Zeitraum 1.4.-31.5., 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Das Änderungssignal für die Zukunft prognostiziert einen Rückgang der Spätfrostgefährdung (Tmin < 0°C) von 2 bis 10 Tagen (vgl. Abbildung 2.15). Nur in höher gelegenen Gebieten sind stärkere Abnahmen möglich.

Abbildung 2.15: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Spätfrost (Tmin < 0°C) im Zeitraum 1.4.-31.5., Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



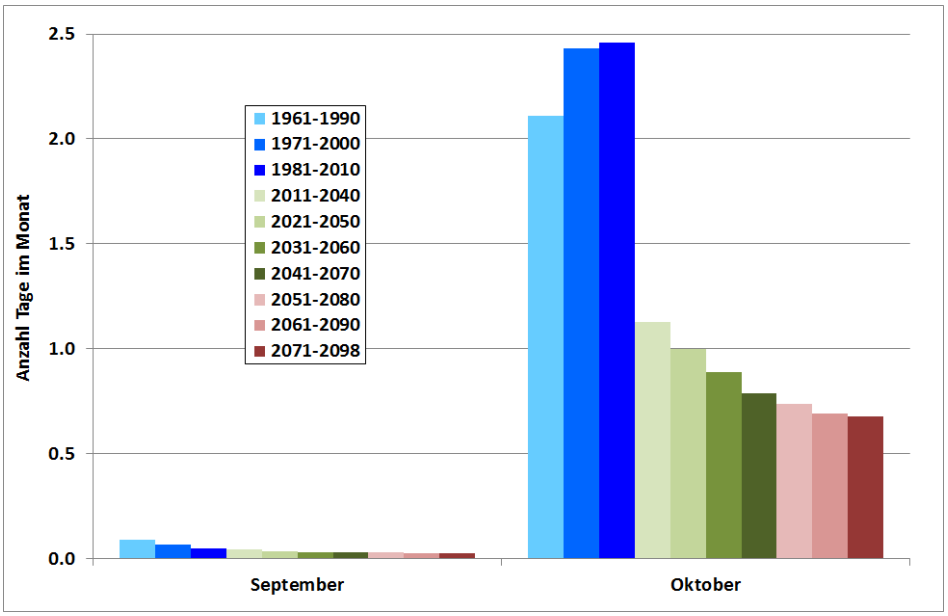
Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.6 Frühfrost

Frost vor der Ernte im September und Oktober bezeichnet man als Frühfrost. Betroffen sind vor allem Wein und Obst. Eisbildung in Zellen, Zellwänden oder Interzellularen führt zu mechanischen Beschädigungen durch Eiskristalle. Beim Wein können grüne Rebteile erfrieren. Blätter verfärben sich rötlich-braun, rollen sich ein und sterben frühzeitig ab, wodurch die Photosynthese unterbunden und eine weitere Mostgewichtszunahme erschwert wird. Bei sehr niedrigen Temperaturen können die Früchte gefrieren. Tritt dieser Fall ein, können die Winzer den sehr begehrten Eiswein erzeugen. Hierzu sind aber Temperaturen unter -7°C an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen notwendig.

Das Risiko für Frühfröste wird anhand der Anzahl der Tage im Zeitraum September bis Oktober mit Minimumtemperaturen unter 0°C dargestellt (vgl. Abbildung 2.16). Ist die Frühfrostgefährdung im September noch gering, steigt sie im Oktober schon deutlich an. Der Trend in der Vergangenheit zeigt eine Abnahme im September und eine Zunahme im Oktober. Auf der Grundlage der Klimaprojektionen wird in beiden Monaten eine Abnahme der Frühfrostgefährdung erwartet, dies widerspricht der beobachteten Entwicklung für den Monat Oktober. Auffällig ist die im ersten Projektionszeitraum (2011-2040) bereits deutlich niedrigere Anzahl an Frühfrosttagen.

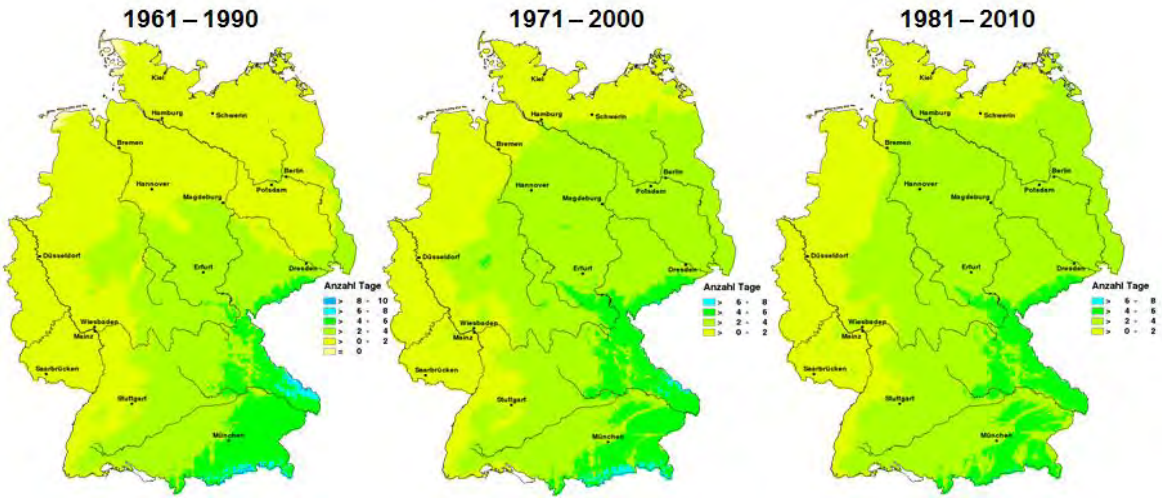
Abbildung 2.16: Anzahl der Tage an denen die Minimumtemperatur 0°C unterschreitet, Monate September und Oktober, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Der erste Frühfrost setzt, wie zu erwarten, zuerst in den Höhenlagen ein (vgl. Abbildung 2.17). In Küstennähe und in klimatisch begünstigten Gebieten besteht ein geringeres Risiko. Auffällig ist, dass vor allem im Osten und in der Mitte Deutschlands das Frühfrostrisiko in der Vergangenheit angestiegen ist.

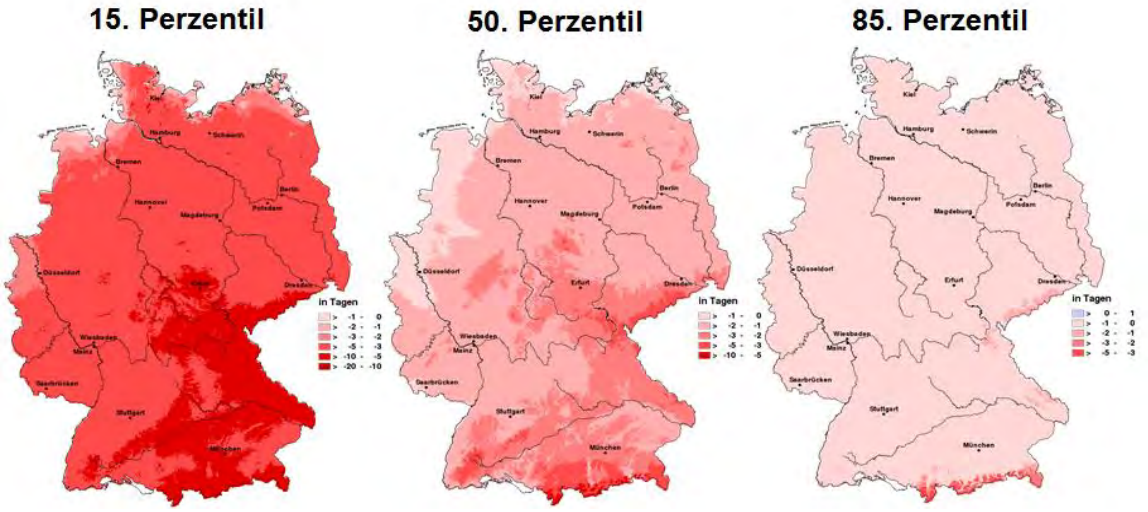
Abbildung 2.17: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Frühfrost (Tmin <0 °C) im Monat Oktober, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Für Deutschland wird flächendeckend ein Rückgang der Spätfrostgefährdung prognostiziert (vgl. Abbildung 2.18).

Abbildung 2.18: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Frühfrost im Monat Oktober, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



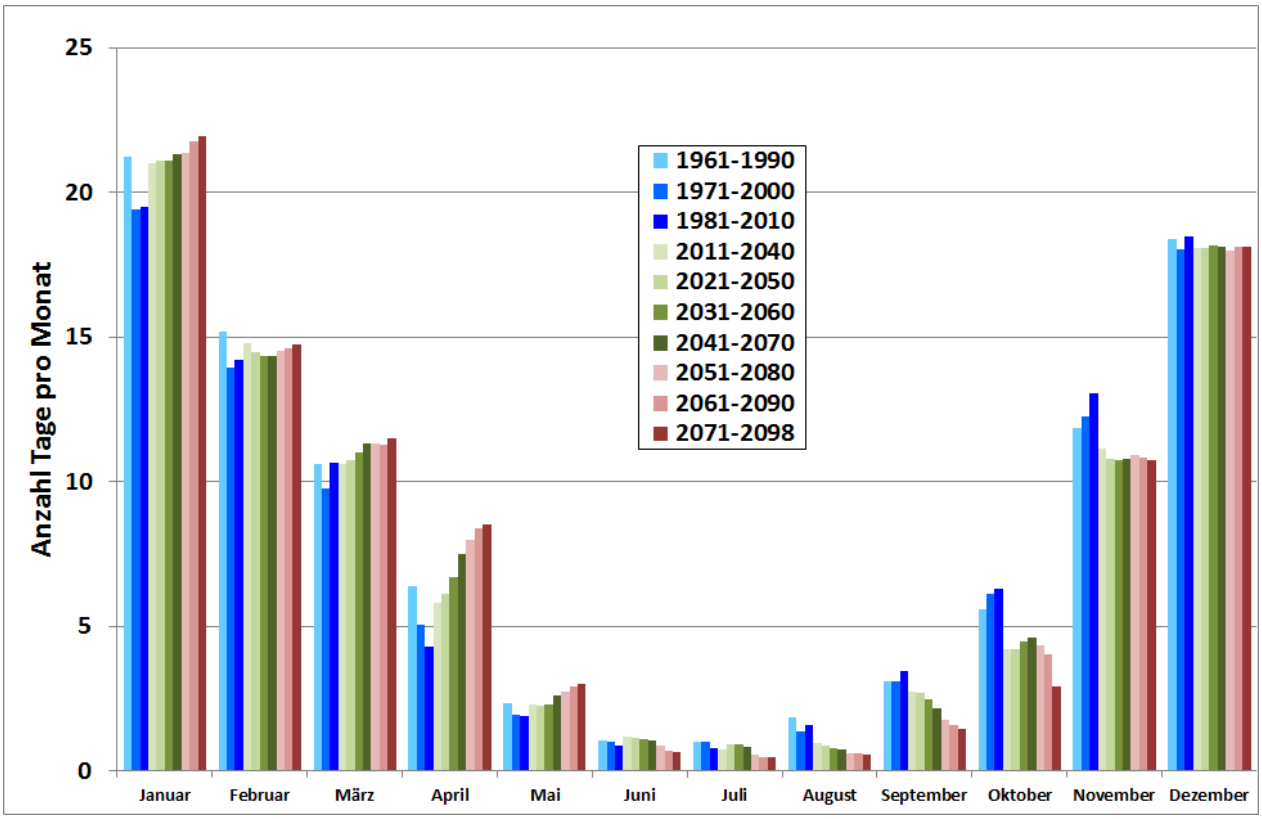
Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.7 Nässe

Ausgedehnte Nässeperioden mit einem wassergesättigten Boden stellen für die Landwirtschaft in zweierlei Hinsicht eine extreme Wetterlage dar. Zum einen leiden die Pflanzen unter Sauerstoffmangel, so dass es beispielsweise zu Auswinterungsschäden kommen kann. Zum anderen ist der Boden so nass, dass ein Befahren mit Landmaschinen beispielsweise zur Saatzeit, um Pflanzenbehandlungsmaßnahmen durchzuführen, oder zur Ernte ohne Schäden nicht möglich ist. Auf die kulturartspezifisch sehr unterschiedlichen sensitiven Zeiträume wird in Kapitel 3 eingegangen.

Extreme Nässe liegt vor, wenn die nutzbare Feldkapazität (nFK) bis zu 60 cm Tiefe mehr als 100 % beträgt und weiterer Niederschlag zu Versickerung führt. Diese Situation gilt gleichermaßen für Sauerstoffmangel als auch für die Befahrbarkeit der Flächen. Aufgrund der unterschiedlichen Wachstums- bzw. Erntezeiten überlappen sich je nach Kultur die Gefahr des Sauerstoffmangels einerseits und die schlechte Befahrbarkeit für Landmaschinen andererseits. Deswegen muss Nässe saisonal differenziert betrachtet werden. Die Anzahl der jeweils monatlich auftretenden Tage mit Nässe ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Bezüglich der kulturartspezifischen Verdunstung wurde bei der Berechnung der Nässe exemplarisch Wintergetreide angenommen.

Abbildung 2.19: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten > 100 %nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden, Schicht: 0-60 cm) pro Monat, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft

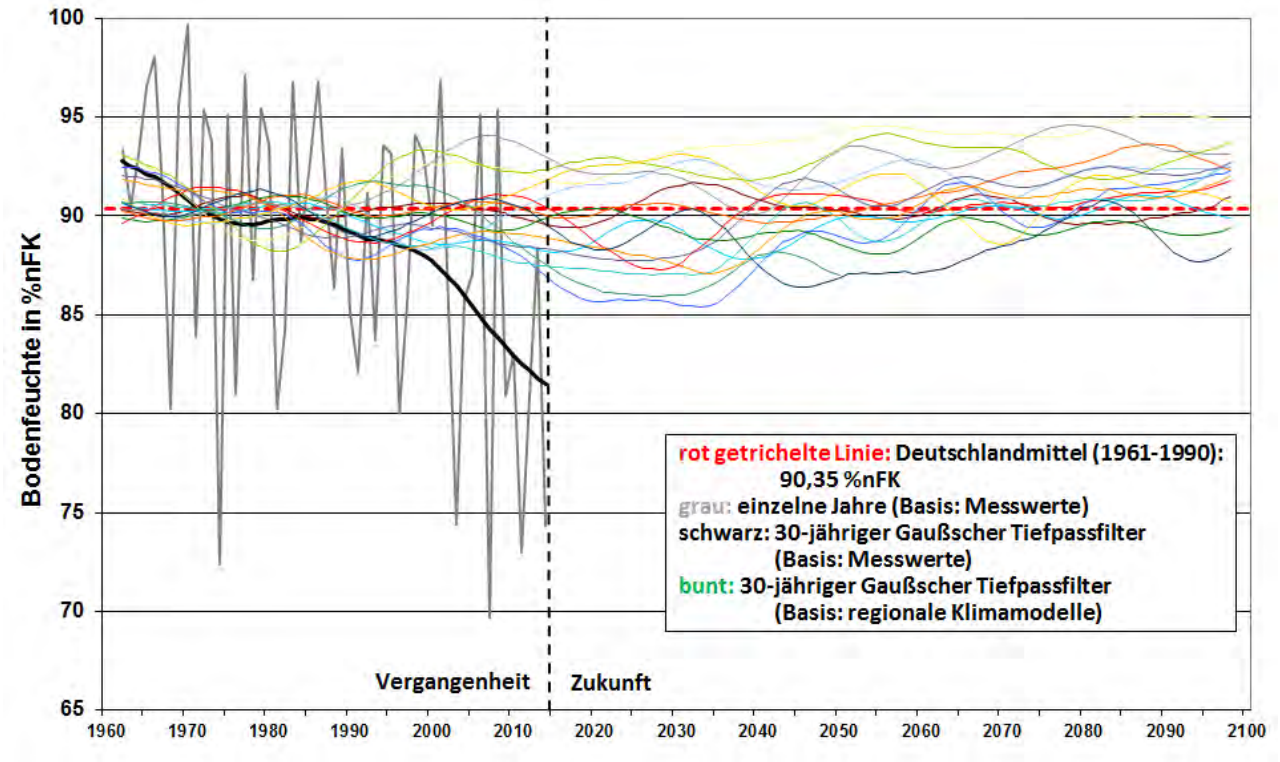


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Der Monat April gehört zu den Monaten, deren Entwicklung in der Vergangenheit deutlich von der für die Zukunft prognostizierten abweicht. So ist in der Vergangenheit eine Abnahme der Tage mit Bodenfeuchtewerte über 100 % nFK zu beobachten (vgl. Abbildung 2.19), die auf eine Zunahme der Frühjahrstrockenheit hin deutet (vgl. Kapitel 2.3.11). Für die Zukunft zeigen die Klimaprojektionen eine deutliche Zunahme der Tage mit hoher Bodenfeuchte, d. h., eine Abnahme der Frühjahrstrockenheit.

Anhand der in Abbildung 2.20 dargestellten mittel- bis langfristigen Entwicklungen der Bodenfeuchte für April wird deutlich, dass die Klimaprojektionen diesen für die Landwirtschaft wichtigen Parameter in der Vergangenheit nicht richtig abgebildet haben. Während das gleitende 30-jährige Mittel der Bodenfeuchte im April unter Wintergetreide in den letzten 50 Jahren von rund 93 auf 82 % nFK abnahm, zeigen die auf der Basis der Klimamodelldaten berechneten Bodenfeuchten eine Zunahme. Da die Klimaprojektionen das Auftreten der Frühjahrtrockenheit in der Vergangenheit nicht richtig wiedergeben, müssen die Aussagen für die Zukunft für diesen Zeitraum mit Vorsicht betrachtet werden.

Abbildung 2.20: Beobachtete und erwartete mittelfristige Entwicklung des Deutschlandmittels der Bodenfeuchte unter Wintergetreide (leichter Boden, Schicht: 0-60 cm) für den Monat April

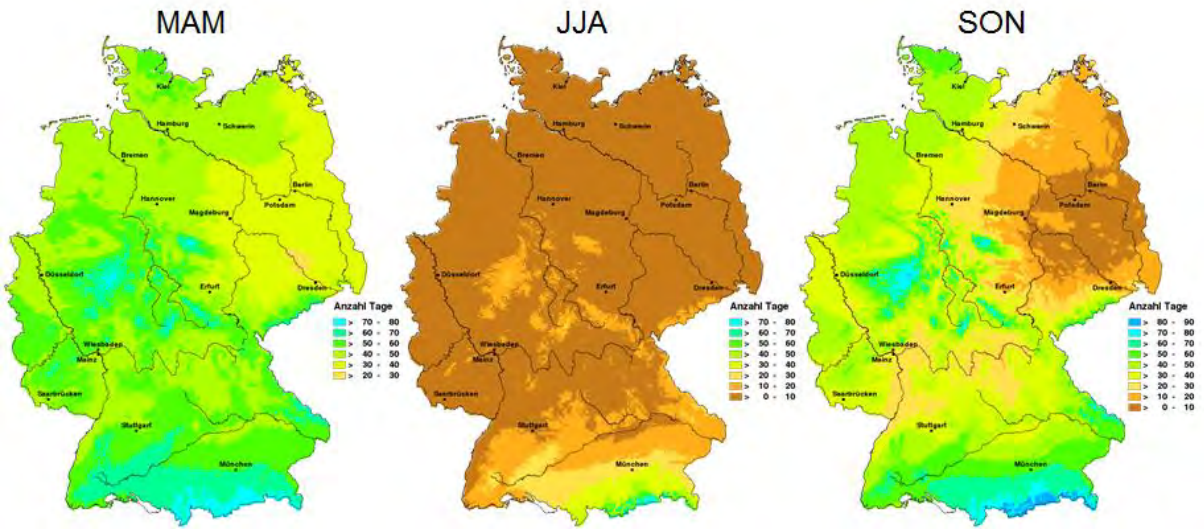


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Die Anzahl der Tage mit Nässe hat sich bis auf den April nicht substantiell verändert. Aus diesem Grund fokussiert die Darstellung des regionalen Auftretens von Nässe auf saisonale Unterschiede, und zwar für die drei Quartale März, April, Mai (MAM), Juni, Juli, August (JJA) und September, Oktober, November (SOM) für die Periode 1981-2010 (vgl. Abbildung 2.21). Die Berechnungen für einen schweren Boden zeigen für den Frühling im Westen und Süden Deutschlands, dass an 40 bis 60 Tagen der Grenzwert von 100 % nFK überschritten wird. Bedingt durch die geringeren Niederschläge trifft dies im Osten Deutschland nur an 30 bis 40 Tagen zu. Im Sommer treten so hohe Bodenfeuchten nur sehr selten auf. Im Herbst führen die Niederschläge wieder zu einem Ansteigen der Bodenfeuchte. Die Unterschiede in der Niederschlagsverteilung sind wieder deutlich zu erkennen.

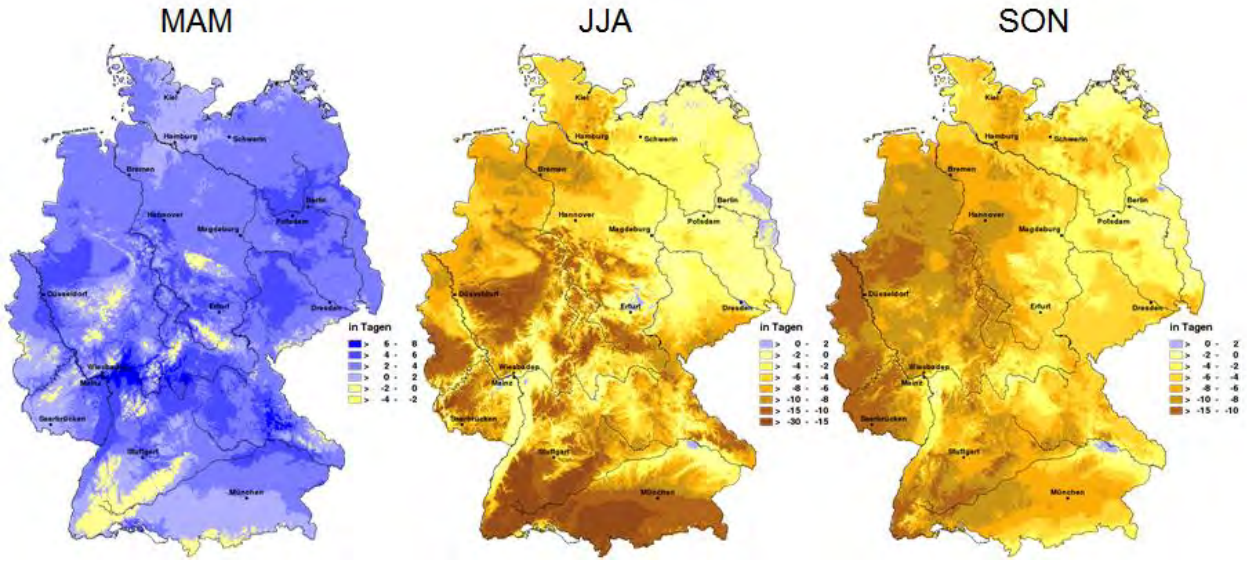
Für die Zukunft zeigt das 50. Perzentil eine Zunahme der Tage mit hoher Bodenfeuchte für das Frühjahr, während im Sommer und Herbst mit einer Abnahme zu rechnen ist (vgl. Abbildung 2.22). Die Ergebnisse für den Frühling müssen mit Vorsicht betrachtet werden, da es für den Monat April eine Diskrepanz zwischen den Beobachtungen und den Modellergebnissen in der Vergangenheit gibt (vgl. Abbildung 2.20).

Abbildung 2.21: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten > 100 %nFK (Kultur Wintergetreide, schwerer Boden, Schicht: 0-60 cm), in den Jahreszeiten Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) (30-jährige Mittelwerte 1981-2010)



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.22: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten > 100 % nFK (Kultur Wintergetreide, schwerer Boden, Schicht: 0-60 cm) in den Jahreszeiten Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON), Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990 (50. Perzentil)



Quelle: DWD-Klimaatlas.

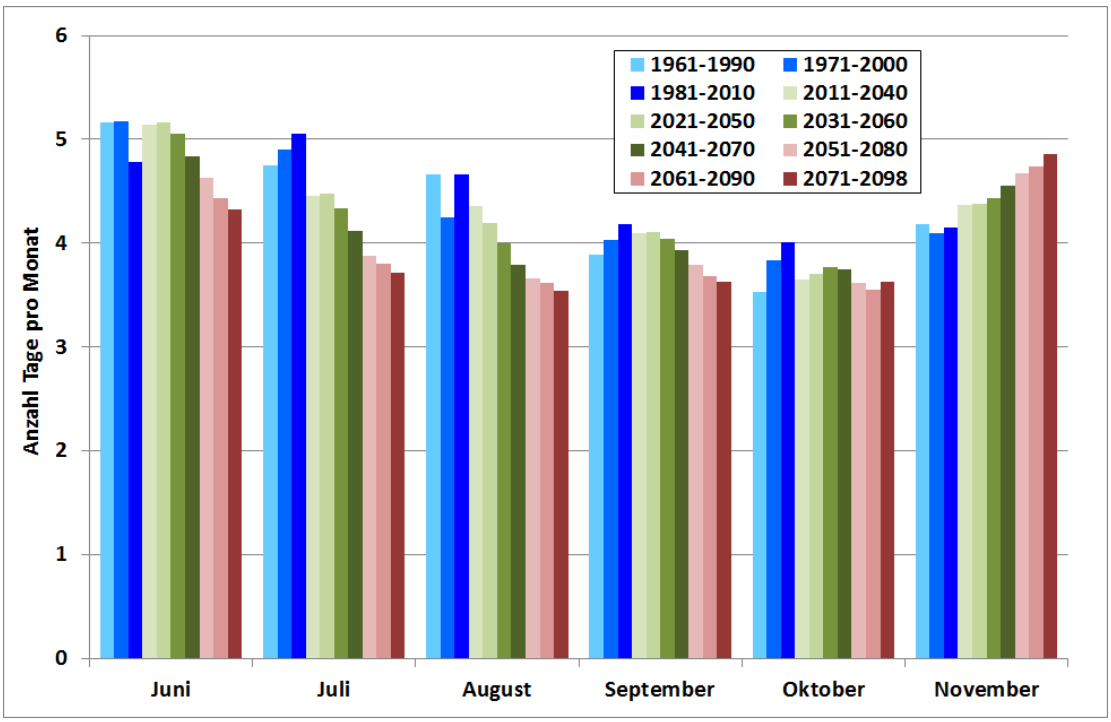
2.3.8 Dauer- und Starkregen

Die Folgen von intensiven Dauer- und Starkregen sind vielfältig und die möglichen Schädigungen von Kultur zu Kultur unterschiedlich. Grundsätzlich führen langanhaltende Niederschläge zu einer Vernässung des Bodens, deren Konsequenzen im Kapitel 2.3.7 erläutert wurden, sowie bei extremen Niederschlagsereignissen auch zu Hochwasser.

Dauerregen

Während der Ernte führen wiederholte ergiebige Niederschläge zu hohen Kornfeuchten bei Getreide, die eine Ernte erschweren und/oder hohe Trocknungskosten verursachen. Die beobachtete Entwicklung und erwarteten Änderungen der Häufigkeit von Dauerregen wurde jeweils für die Erntemonate von Juni bis November ausgewertet und in Abbildung 2.23 dargestellt. Von 1961-2010 musste in den Monaten Juni und Juli an etwa 5 Tagen mit Niederschlagssummen größer 5 mm gerechnet werden. Von August bis November lagen die Werte zwischen 3,5 und 4,5 Tagen. Der beobachtete Trend unterscheidet sich in den einzelnen Monaten. Eine leichte Abnahme zeigt nur der Juni. Im August und November gibt es keinen eindeutigen Trend. Eine Zunahme war für die Monate Juli, September und Oktober zu verzeichnen.

Abbildung 2.23: Anzahl der Tage mit Dauerregen (RR > 5 mm) für die Monate Juni bis November, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft

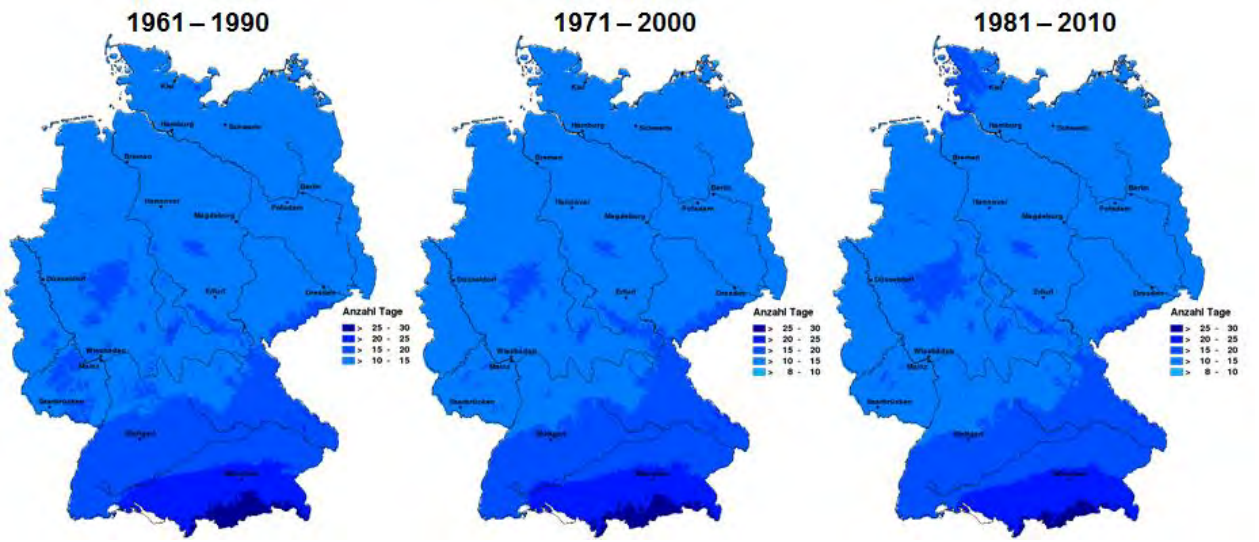


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Die Klimaprojektionen zeigen für die Monate Juni bis September eine Abnahme der Tagesniederschläge größer 5 mm. Für den Oktober nimmt die Anzahl an Tagen erst zu und ab Mitte des Jahrhunderts wieder ab. Eine deutliche Zunahme wird für den November erwartet. Die laut der Klimaprojektionen erwartete saisonale Änderung der Tage mit Dauerregen stimmt nicht mit der bisher beobachteten Entwicklung überein.

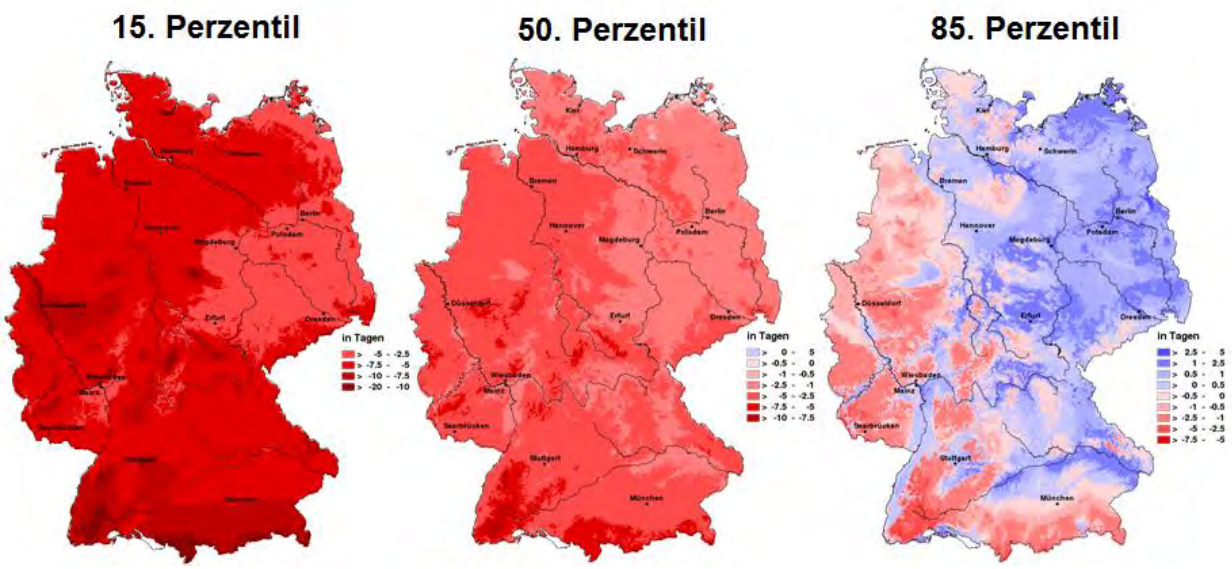
Die Karten für die Monate JJA zeigen eine deutlich Nord-Süd-Verteilung (vgl. Abbildung 2.24) mit höheren Werten im Süden Deutschland und im Bereich der Mittelgebirge. Eine eindeutige Tendenz ist in der Vergangenheit nicht zu erkennen. Die Tage mit Dauerregen sollen flächendeckend in der Zukunft abnehmen (vgl. Abbildung 2.25). Nur das 85. Perzentil gibt einen Hinweis auf eine Zunahme vor allem im Osten.

Abbildung 2.24: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Dauerregen (RR > 5mm) in den Monaten Juni bis August, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.25: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Dauerregen (RR > 5 mm) in den Monaten Juni bis August, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



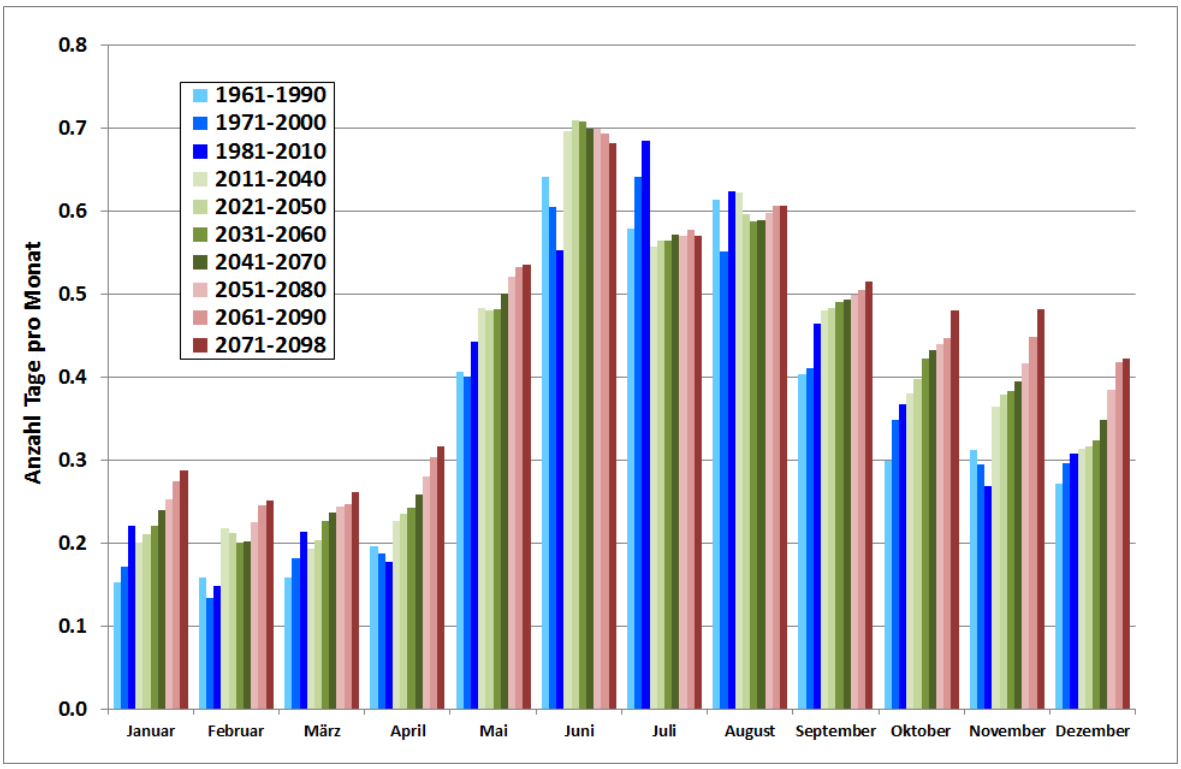
Quelle: DWD-Klimaatlas.

Starkregen

Durch starke Niederschläge, oft in Kombination mit Windböen, kann es zu irreversiblem Umknicken der Pflanzen (Lagerbildung) und/oder Kornverlust kommen, insbesondere bei Getreide, Raps und Mais. Bei Äpfeln und auch bei anderen Obstarten können Pflanzenteile abbrechen oder das Erntegut herabfallen. Starkregenereignisse können in Kulturen wie Spargel, Kopfkohl, Zwiebel, Wein und Hopfen (insbesondere in Hanglagen) Bodenverschlämmung und Erosionsschäden verursachen.

Da in den Klimaprojektionen nur Tageswerte vorliegen, wurden Tagesniederschläge von mehr als 20 mm als Indikator für Starkregen betrachtet. Über die Intensität des Niederschlages (Niederschlagsmenge innerhalb von Minuten oder Stunden) gibt es keine Informationen. Die Monate mit dem höchsten Risiko für Starkregen sind Juni, Juli und August (vgl. Abbildung 2.26). In diesen Monaten ist durchschnittlich alle zwei Jahre mit einem Starkregenereignis zu rechnen, wobei sich das Risiko von 1961-1990 bis 1981-2010 leicht vom Juni in den Juli verschoben hat.

Abbildung 2.26: Anzahl der Tage mit Starkregen (RR > 20 mm), Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



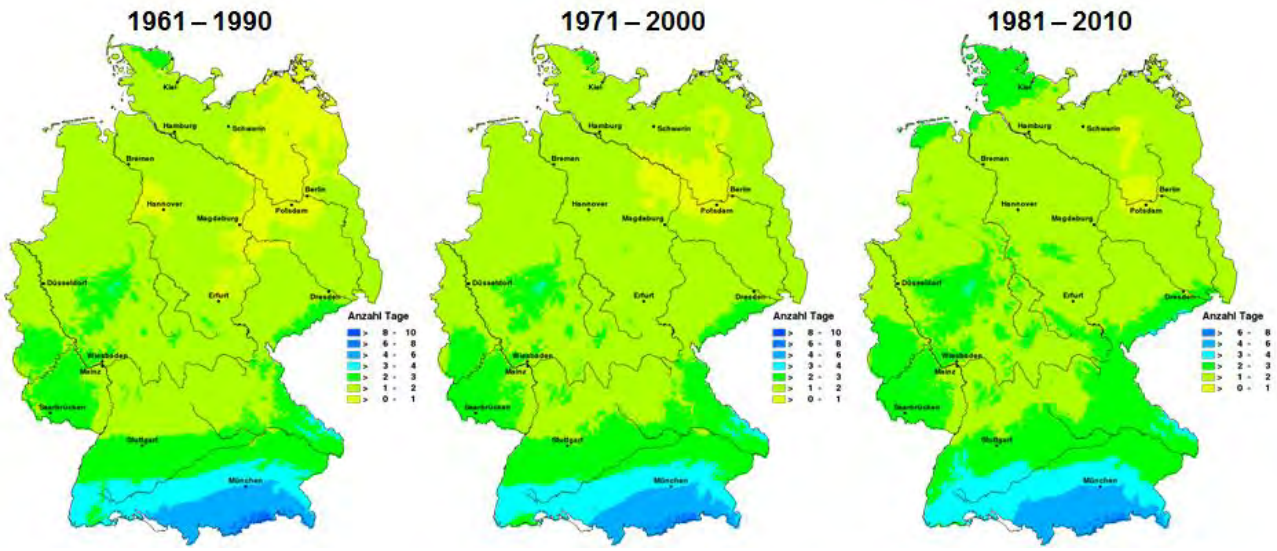
Quelle: DWD-Klimaatlas.

Nach den Klimaprojektionen wird überwiegend ein Anstieg der Starkregenereignisse erwartete, insbesondere in den Wintermonaten. Das deckt sich teilweise mit den beobachten Entwicklungen. Abgesehen von der in den Projektionen nicht abgebildeten Verlagerung der Häufigkeit des Auftretens von Starkregen vom Juni in den Juli soll das Risiko im Sommer eher konstant bleiben.

In Abbildung 2.27 zeigt ein Vergleich der Karten von 1961-1990 und 1981-2010 die regionale Veränderung der Tage mit starken Niederschlägen (Juli bis Oktober). Auffällige Änderungen waren an der Küste, in Süddeutschland und in einigen Mittelgebirgen zu verzeichnen.

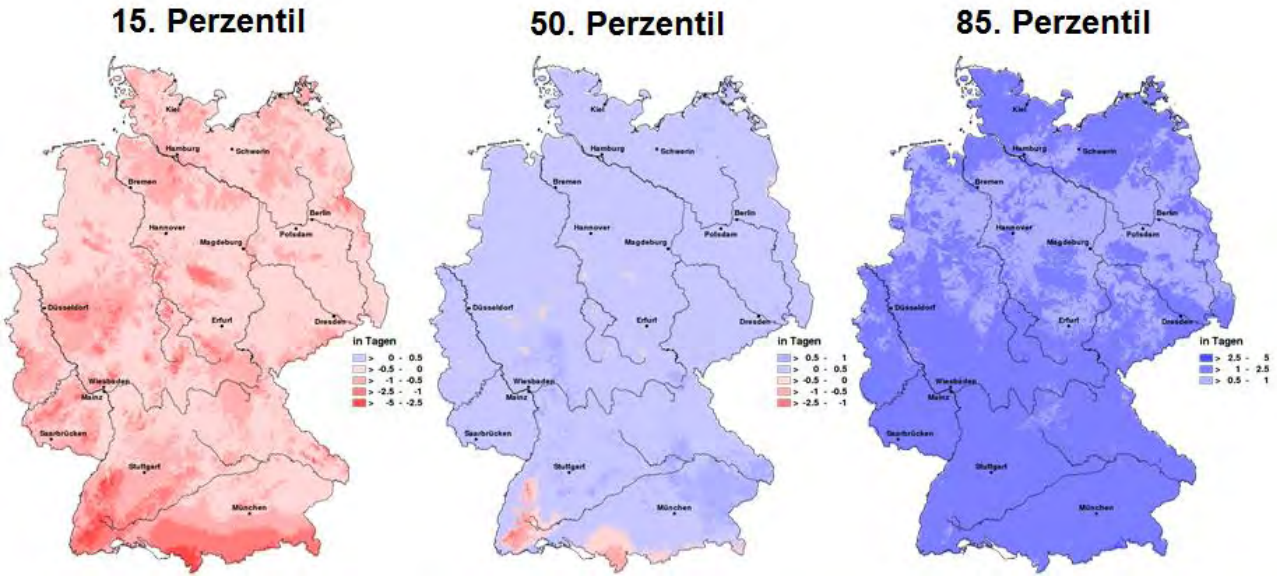
Das 50. Perzentil zeigt eine flächendeckende Zunahme der Starkregenereignisse in den Monaten Juli bis Oktober um bis zu 0,5 Tage (vgl. Abbildung 2.28). Der Schwankungsbereich der Modellergebnisse ist sehr groß und reicht von einer deutlichen Zunahme (85. Perzentil) bis zu einem deutlichen Rückgang (15. Perzentil) der Starkniederschläge.

Abbildung 2.27: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Starkregen (RR > 20 mm) in den Monaten Juli bis Oktober, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.28: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Starkregen (RR > 20 mm) in den Monaten Juli bis Oktober, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990

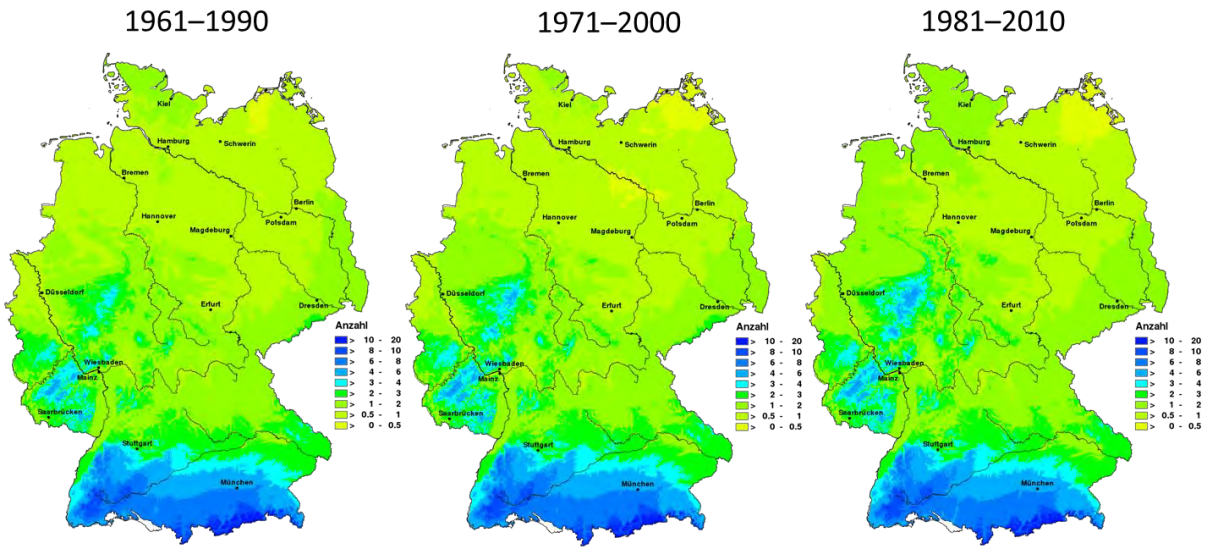


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Erstrecken sich extreme Niederschläge über mehrere Tage, besteht die Gefahr von Hochwasser. Um die regionale Verteilung und Änderung dieses Risikos darzustellen, wurden die Anzahl der Tage im Jahr ausgewertet, an denen innerhalb von drei aufeinander folgenden Tagen, die Summe

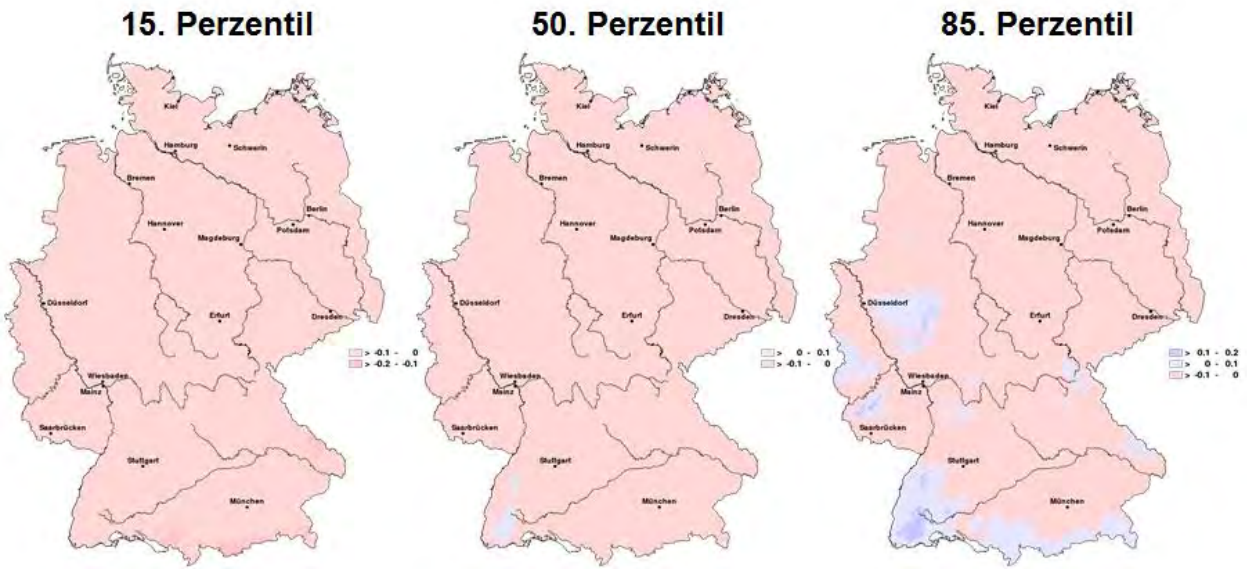
der Niederschläge mehr als 50 mm beträgt. Die Karten in Abbildung 2.29 verdeutlichen die Hochwasserentstehungsgebiete, zu denen der Schwarzwald, die Voralpen und Mittelgebirge zählen, in denen im Zeitraum 1981-2010 gegenüber 1961-1990 die Anzahl der Tage mit extrem ergiebigen Niederschlägen, die Hochwasser auslösen könnten, leicht zugenommen haben. Um präzisere Aussagen zum Hochwasserrisiko zu treffen, müssen allerdings ganze Flusseinzugsgebiete hydrologisch (KLIWAS, 2015) und weitere Niederschlagsereignisse betrachtet werden. Die Klimaprojektionen (vgl. Abbildung 2.30) weisen langfristig kaum Änderung für den in dieser Studie betrachteten Proxi-Indikator aus.

Abbildung 2.29: Häufigkeit des Auftretens einer Niederschlagssumme von mehr als 50 mm innerhalb von 3 Tagen im Jahr, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.30: Erwartete regionale Entwicklung der Häufigkeit des Auftretens einer Niederschlagssumme von mehr als 50 mm innerhalb von 3 Tagen im Jahr, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



Quelle: DWD-Klimaatlas.

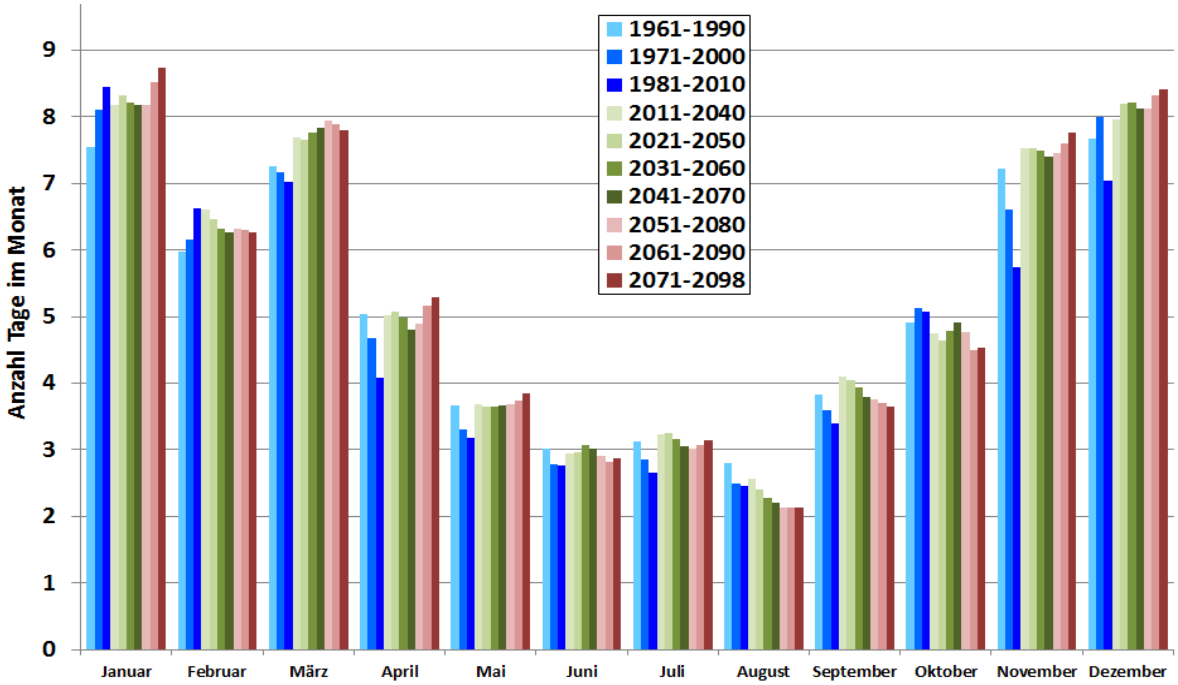
2.3.9 Wind und Sturm

Wind (Pflanzenschutz)

Spritzeinsätze für Pflanzenschutzmaßnahmen sind nach der guten fachlichen Praxis bei dauerhaften Windgeschwindigkeiten über 5 m/s zu vermeiden, da sie zu erheblichen Mittelverlusten durch Abtrift führen. Längere Phasen mit höheren Windgeschwindigkeiten können zu Verzögerungen notwendiger Pflanzenschutzapplikationen führen. Der Unkrautdruck oder Schädlingsbefall kann dadurch so hoch werden, dass es zu Ertrags- und Qualitätsverlusten kommt.

Um einen Überblick zu gewinnen, ob die Tage mit Wind zunehmen, erfolgte die Auswertung des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit. Da sich die Untersuchungen auf landwirtschaftliche Kulturen beziehen, wurden die Daten reiner Bergstationen nicht berücksichtigt. In den Monaten November bis März treten im Zeitraum 1961-2010 an durchschnittlich jeweils mehr als sechs Tagen mittlere Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s auf (vgl. Abbildung 2.31). Im Mittel gehen die Tage mit Wind ab dem Monat April bis zum August immer weiter zurück und steigen danach wieder an. Die Beobachtungen zeigen zwischen 1961-1990 und 1981-2010 einen Rückgang in den Monaten März bis September und im November. Nur im Januar und Februar ist eine eindeutige Zunahme zu verzeichnen. Die restlichen Monate weisen keine systematischen Änderungen auf. In den Klimaprojektionen liegen nur Werte des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit vor. Deren Deutschlandmittel weist keine systematischen Änderungen auf.

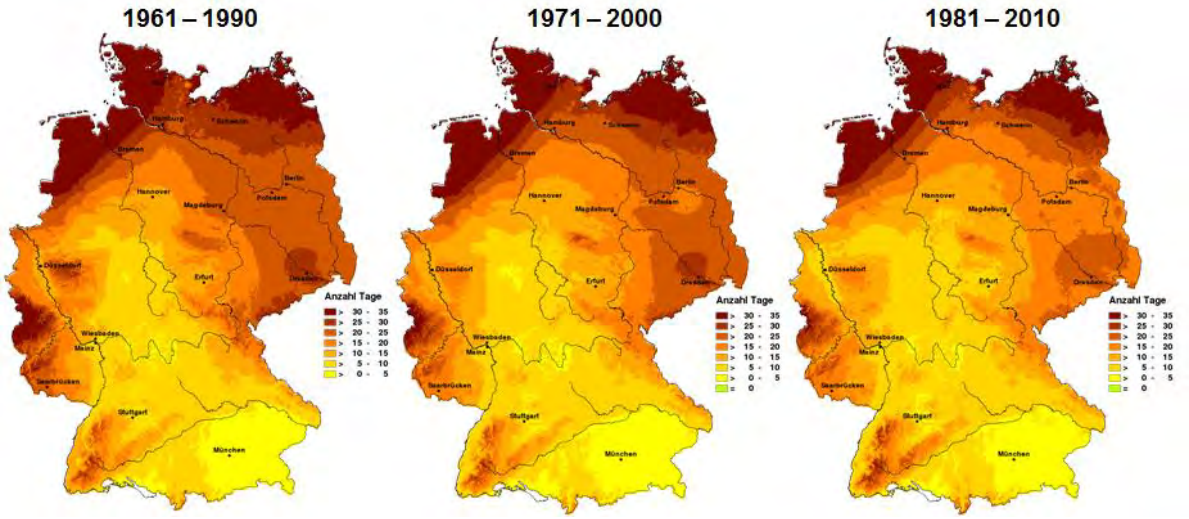
Abbildung 2.31: Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 5 m/s, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



Quelle: DWD-Klimaatlas.

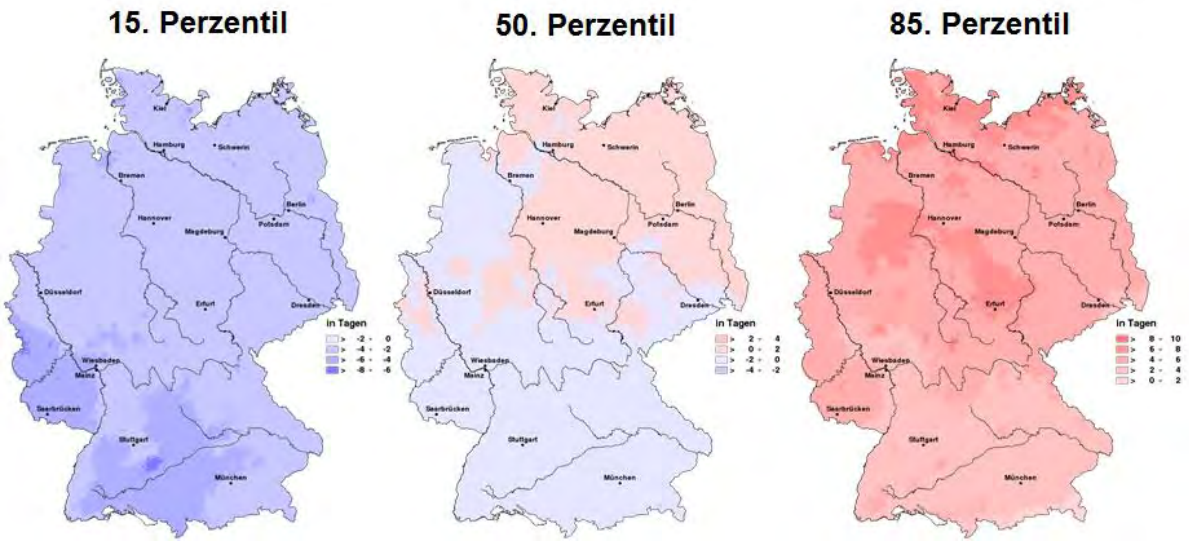
Die regionale Verteilung für die Monate März bis Juni (vgl. Abbildung 2.32) zeigt ein deutliches Nord-Süd-Gefälle. An der Küste überschreitet die Windgeschwindigkeit an bis zu 35 Tagen die Grenze von 5m/s. Je größer die Entfernung zur Küste ist, umso stärker nimmt die Anzahl an Tagen mit Wind ab. Da im Alpengebiet die hochgelegenen Bergstationen nicht mit in die Auswertung einbezogen wurden, sind nur die Mittelgebirge deutlich zu erkennen. Der Osten Deutschlands zeigt für den Zeitraum 1981-2010 einen Rückgang der Tage mit Wind im Vergleich zu 1961-1990. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen (vgl. Abbildung 2.33) reichen von einer deutlichen Abnahme bis zu einer starken Zunahme der Tage mit Windgeschwindigkeiten größer 5m/s.

Abbildung 2.32: Regionales Auftreten der Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 5 m/s in den Monaten März bis Juni, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.33: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 5 m/s im März bis Juni, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



Quelle: DWD-Klimaatlas.

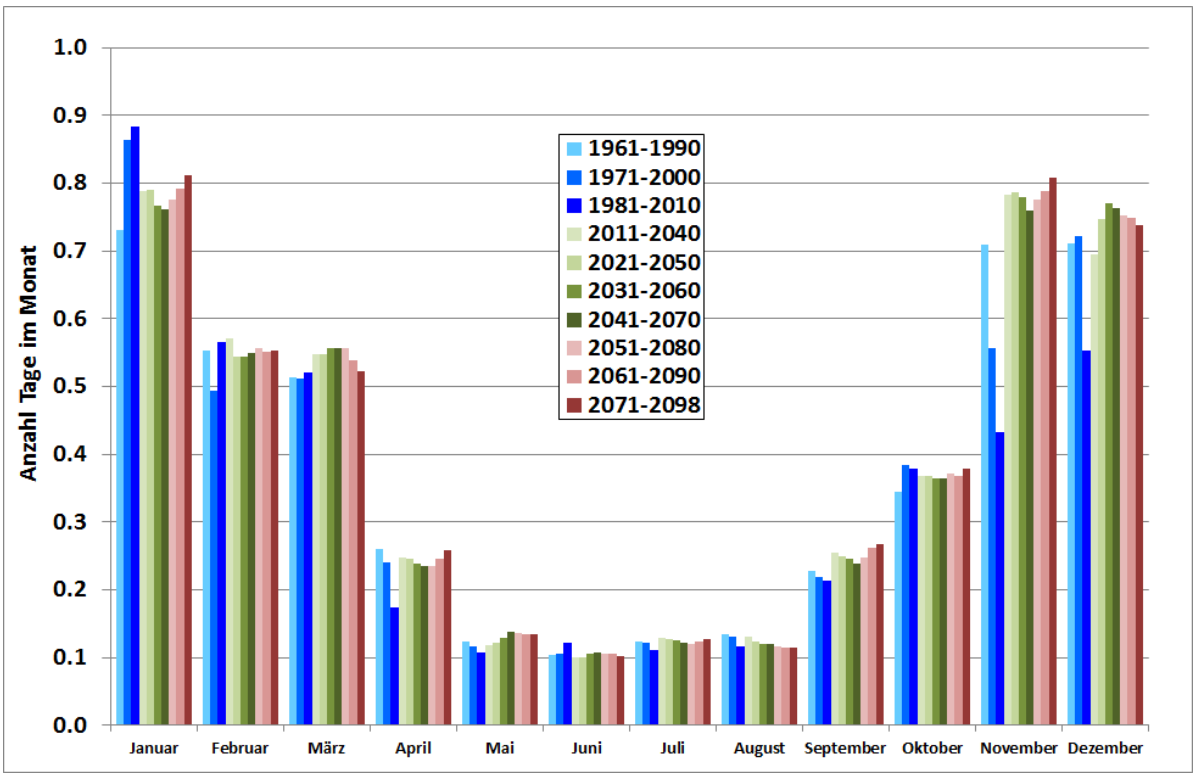
Sturm

Sturm mit hohen Windböen, oft in Kombination mit Niederschlägen, kann zum Abbrechen und Entwurzeln von Pflanzenteilen führen und ist für alle untersuchten Kulturen ein relevantes Extremwetterereignis, wobei die Kulturen eine unterschiedliche Windstärketoleranz aufweisen.

Während es durch Sturm beispielsweise bei Getreide zur Lagerbildung kommen kann, können an Dauerkulturanlagen wie Hopfen Schäden entstehen.

Die Modellierung von Winden stellt eine Herausforderung dar, da Wind als zeitlich und räumlich höchst variabler Parameter grundsätzlich schwierig zu modellieren ist und maßgeblich von der gewählten Böenparametrisierung abhängt (Becker und Hüttl, 2014). Eine Trendaussage aus den Modellen ist schwierig, so dass derzeit keine eindeutigen Hinweise auf Änderungen der Sturmereignisse in der Zukunft vorliegen. Darüber hinaus sind die für eine Sturmauswertung notwendigen maximalen Böen in den Daten der Klimamodelle nicht enthalten. Maximale Böen treten während eines Sturmes nur zeitweise auf, zwischenzeitlich geht die Windgeschwindigkeit immer wieder etwas zurück. Um diesen Effekt zu berücksichtigen und einen Eindruck zur Entwicklung des Sturmrisikos zu bekommen, wurden Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 10m/s ausgewertet. Dieser Grenzwert wird am häufigsten in den Monaten November bis Januar überschritten (vgl. Abbildung 2.34).

Abbildung 2.34: Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 10 m/s, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Für den Zeitraum 1961-1990 ergibt sich ein Mittelwert von 0,7 Tagen. Bis 1981-2010 ist der Wert nur für den Monat Januar weiter angestiegen, während für die Monate November und Dezember ein starker Rückgang zu verzeichnen ist. In den anderen Monaten wird der Grenzwert von 10 m/s deutlich weniger überschritten. Ein Trend für die Vergangenheit ist für die meisten Monate nicht

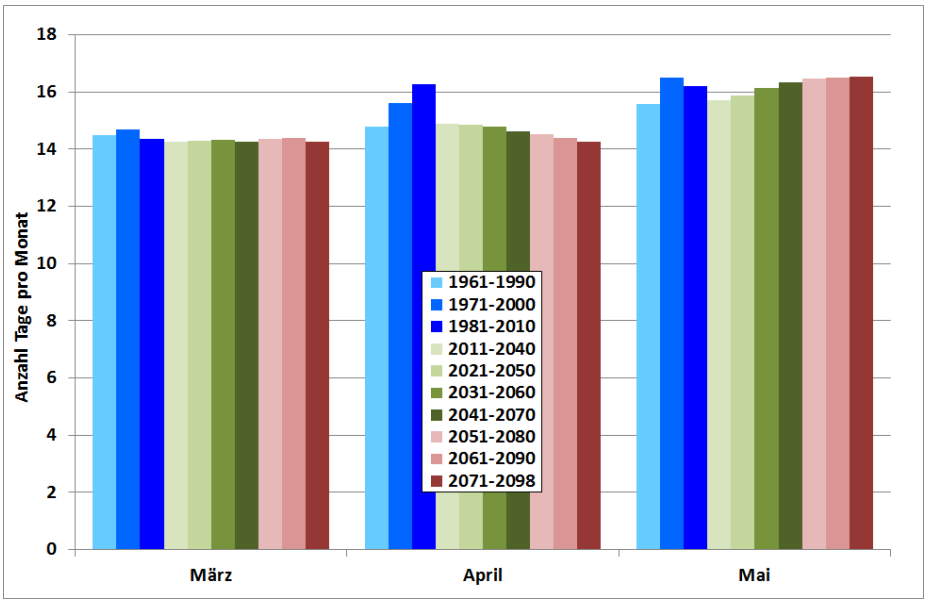
vorhanden. Nur der April zeigt einen leichten Rückgang. Regional treten ‚Sturmtage' nahezu ausschließlich in den deutschen Küstenregionen auf (Bergstationen waren ausgenommen).

2.3.10 Tage ohne Niederschlag

Fällt in einer längeren Phase nachdem Dünger ausgebracht wurde kein Niederschlag, werden die im Dünger enthaltenen Nährstoffe nicht gelöst und gelangen somit nicht zu den Wurzeln. Das schränkt das Pflanzenwachstum ein, so dass die Ernteerträge deutlich hinter den Ertragserwartungen zurückbleiben können. Dabei muss nicht notwendigerweise eine Gefahr für Trockenschäden an den Pflanzen bestehen, da die Bodenfeuchte noch ausreichend sein kann. Teilweise können vor allem beim Stickstoff hohe gasförmige Verluste entstehen. Ein sensitiver Zeitraum z. B. für Wintergetreide ist die frühe Vegetationsphase von März bis Mai. Als Indikator wurde die Anzahl der Tage, an denen kein Niederschlag (RR < 0,1 mm) fällt, gewählt.

Im März, April und Mai treten im Mittel 14 bis 16 niederschlagsfreie Tage pro Monat auf (vgl. Abbildung 2.35). Für den Monat März ergibt sich weder in der Vergangenheit noch in der Zukunft eine Änderungstendenz. Die niederschlagsfreien Tage haben in der Vergangenheit im April deutlich zugenommen, was sich mit dem Befund einer zunehmenden Frühjahrstrockenheit deckt (vgl. Kapitel 2.3.7 und Kapitel 2.3.11).

Abbildung 2.35: Anzahl der Tage ohne Niederschlag (RR < 0,1 mm) in den Monaten März bis Mai, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft

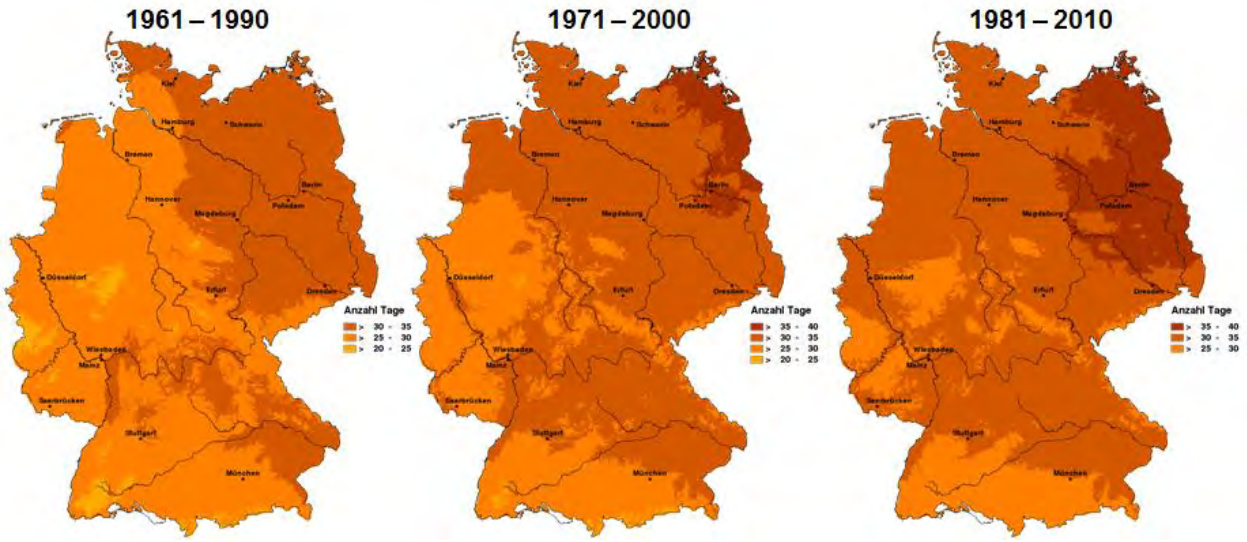


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Die Klimaprojektionen gehen jedoch von einer langsamen Abnahme aus. Eine leichte Zunahme zeigt der Mai bis 2010. Für die Zukunft wird insgesamt von einer Zunahme um etwa einen Tag ausgegangen, wobei jedoch die Werte von über 16 Tagen bereits in der Vergangenheit erreicht wurden.

Im Zeitraum Mitte März bis Mitte Mai ist die Verfügbarkeit des Düngers für Wintergetreide besonders wichtig. Niederschlagsfreie Tage treten in diesem Zeitraum im Nordosten Deutschlands häufiger als im Südwesten auf (vgl. Abbildung 2.36).

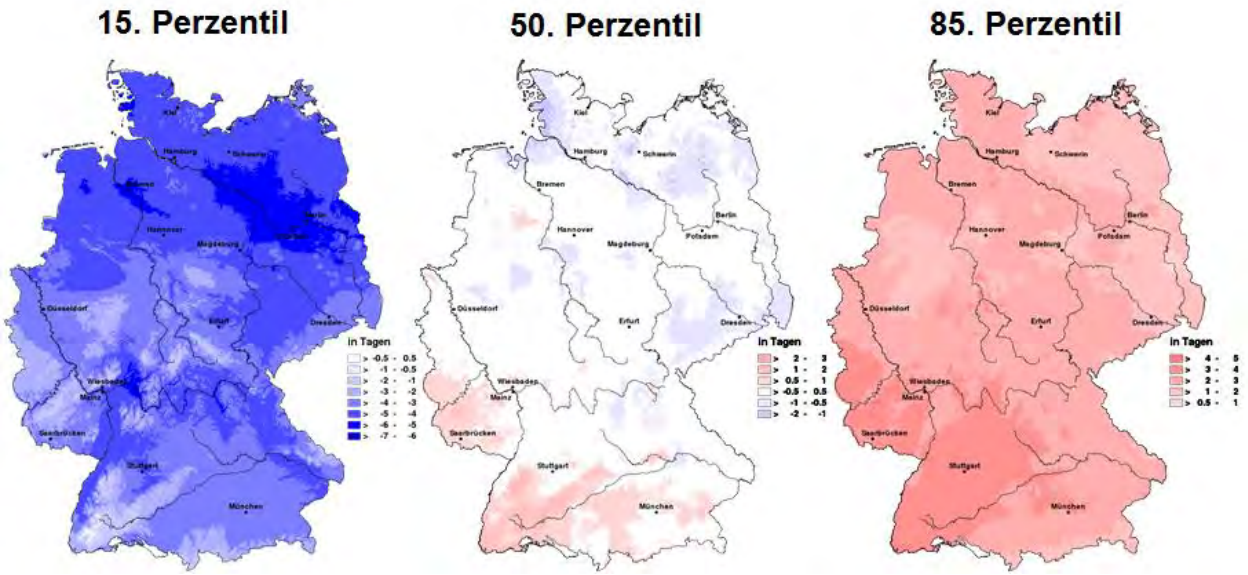
Abbildung 2.36: Regionales Auftreten der Tage ohne Niederschlag (RR < 0,1 mm) im Zeitraum 15. März bis 15. Mai, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Ein Trend zu einer Zunahme der Tage ohne Niederschlag ist deutlich zu erkennen. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen zeigen eine große Schwankungsbreite (vgl. Abbildung 2.37). Von einer Verschärfung der Situation (85. Perzentil), über keine Änderung (50. Perzentil) bis zu einer Entspannung und besseren Verfügbarkeit des Düngers (15. Perzentil) ist alles vertreten.

Abbildung 2.37: Erwartete regionale Entwicklung der Tage ohne Niederschlag (RR < 0,1 mm) im Zeitraum 15. März bis 15. Mai, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



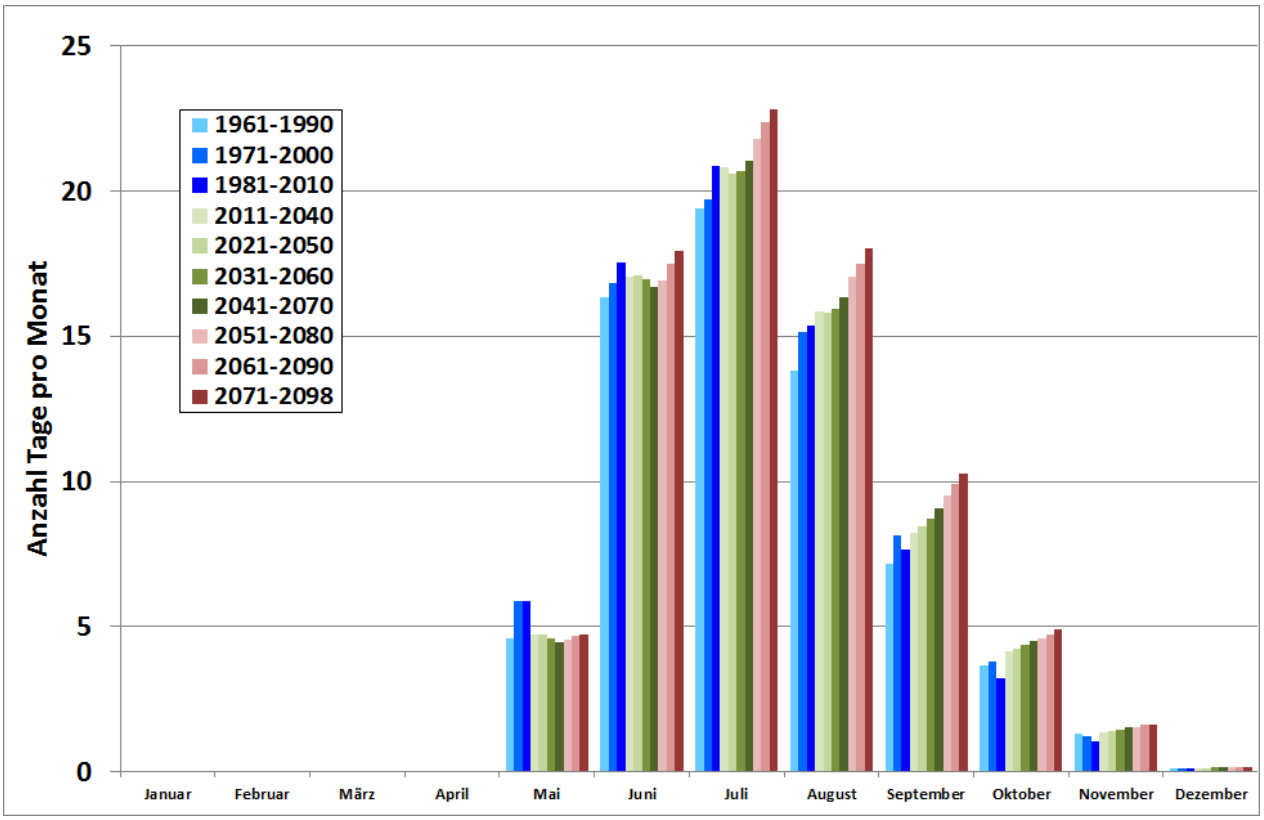
Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.11 Trockenheit

Sinkt der Bodenwassergehalt unter einen kritischen Wert, ist eine Versorgung des Wurzelapparates der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen nicht ausreichend gewährleistet. Die Kulturen haben eine unterschiedliche Toleranz gegenüber Trockenstress. Während flachwurzelnde Pflanzen wie Kartoffeln sehr sensitiv auf eine geringe Bodenfeuchte reagieren, verfügt Spargel über sehr tief reichende Wurzeln und kann sich damit ein größeres Bodenwasservolumen erschließen und ist gegenüber dem Austrocknen der oberen Bodenhorizonte vergleichsweise weniger anfällig.

Als Indikator für die langfristige Entwicklung der Gefahr für Trockenheit wurde die Anzahl der Tage, an denen das Bodenwasser 50 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) im effektiven Wurzelraum unterschreitet, berechnet. Dazu wurden auf täglicher Basis die Niederschläge, die kulturartspezifische Verdunstung mit dem verfügbaren Bodenwassergehalt des Vortages verrechnet. Abbildung 2.38 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Bodenfeuchte unter Wintergetreide flächendeckend für einen leichten Boden (bis 60 cm Tiefe). Die relevanten Monate sind April bis Oktober, wobei eine Trockenheit nach der Ernte, die für Wintergetreide in der Regel im August abgeschlossen ist, keine Folgen mehr hat. Die Monate mit der größten Gefahr für Trockenheit sind Juni, Juli und August, in denen die Bodenfeuchte jeweils mehr als die Hälfte des Monats unter 50 % nFK liegt. Die Anzahl der trockenen Tage hat seit 1961 tendenziell zugenommen und soll laut den Ergebnissen der Klimaprojektionen weiter steigen.

Abbildung 2.38: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden), monatlich, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft

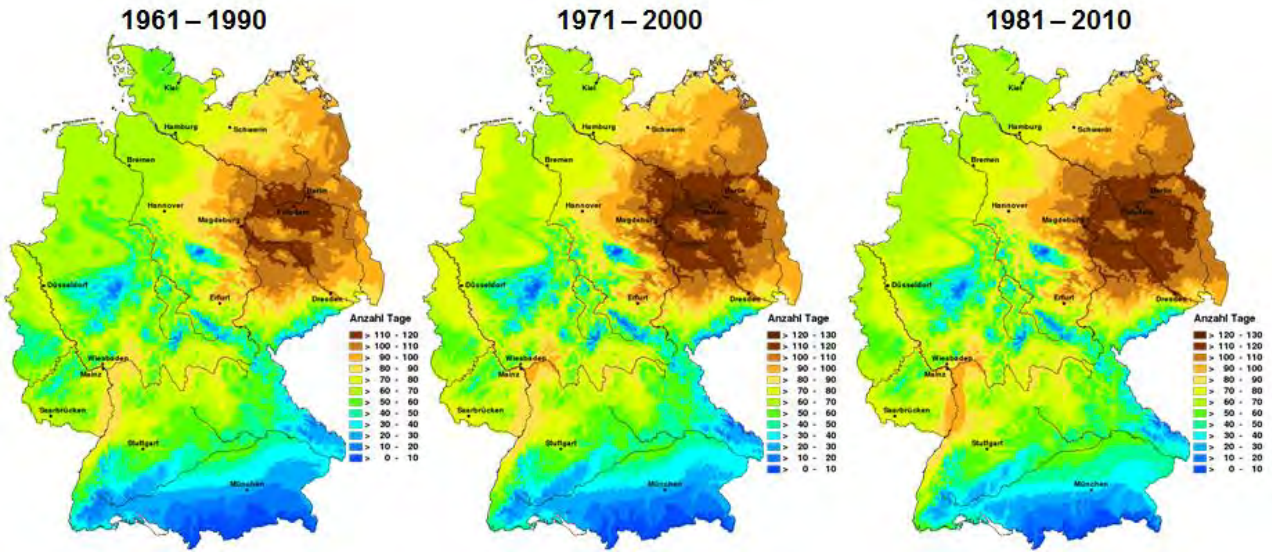


Quelle: DWD-Klimaatlas.

Die saisonalen Schwerpunkte für Trockenheit unterscheiden sich zwar bei den anderen Kulturen von denen bei Wintergetreide, die Entwicklungen in Bezug auf die Häufigkeit sind jedoch vergleichbar. Für Wald liegt der Schwellenwert für Trockenheit deutlich niedriger (nFK < 20 % im effektiven Wurzelraum), (vgl. Kapitel 3.4).

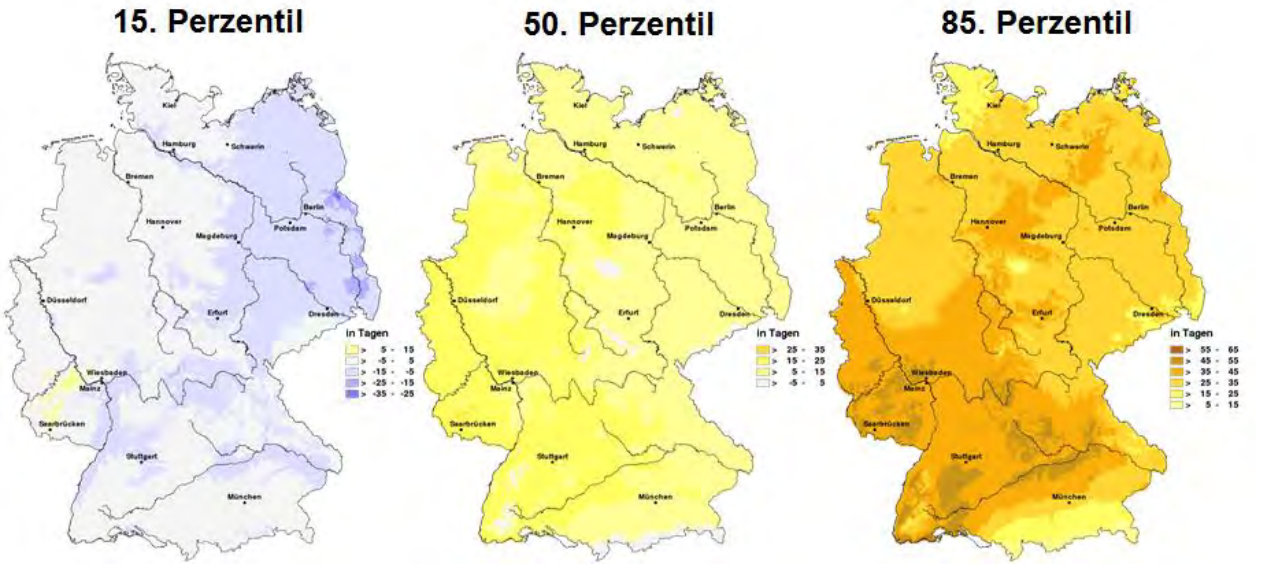
In Abbildung 2.39 sind deutlich die geringeren Niederschlagsmengen im Osten Deutschlands zu erkennen, die zu einer geringeren Bodenfeuchte führen. Für den Zeitraum April bis Oktober liegen in diesem Gebiet an 80 bis 120 Tagen (1961-1990) die berechneten Bodenfeuchtewerte unter 50 %nFK. Diese Situation hat sich bis 2010 bereits sichtbar verschärft. Mit den durch den Klimawandel steigenden Temperaturen nimmt die Verdunstung der Pflanzen zu. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts wird für den Sommer mit einer Änderung der Niederschläge von +10 % bis -30 % gerechnet (siehe www.deutscher-klimaatlas.de). Die steigende Verdunstung und die Niederschlagsänderung führen zu einer leichten Abnahme (15. Perzentil) oder einer starken Zunahme (85. Perzentil) der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 % nFK (vgl. Abbildung 2.40).

Abbildung 2.39: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.40: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Kultur Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



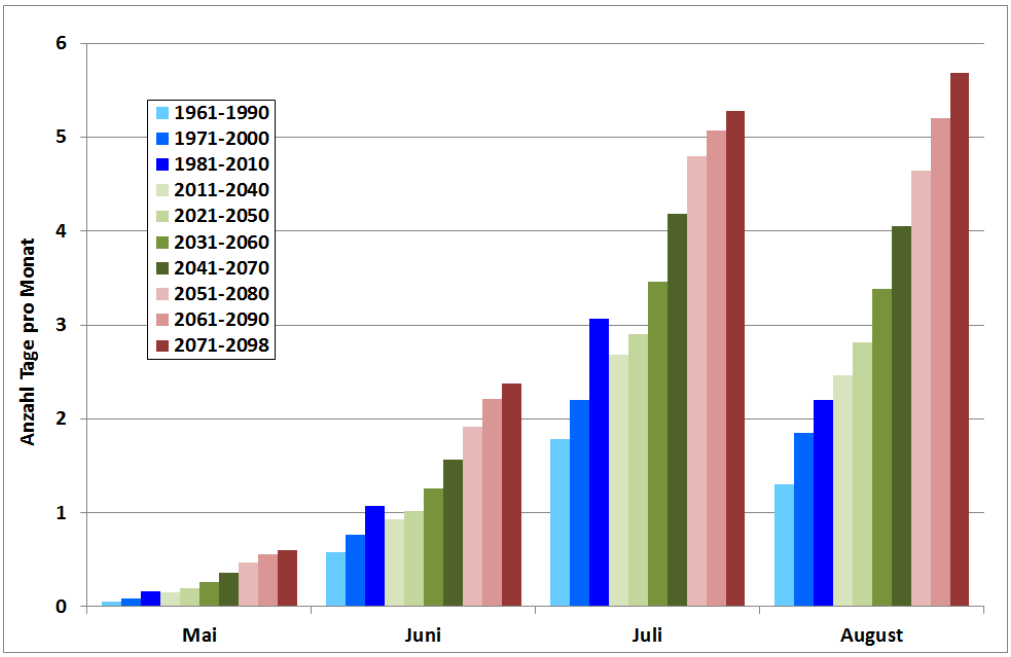
Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.12 Hitze

Kurzfristige Temperaturanstiege auf über 30°C wie sie z. B. in den Nachmittagsstunden eines Sommertages auftreten, können beispielsweise während der Blüte des Weizens zu einem rapiden Abfall der Kornzahl führen. Derart hohe Temperaturen wurden im Hitzesommer 2003 kurz vor der Anthese erreicht. Der Schwellenwert von 30°C für die Abnahme der Kornzahl gilt jedoch nur wenige Tage. Während der anschließenden Kornfüllung bewirken solche Hitzeereignisse vor allem bei Weizen eine Entwicklungsbeschleunigung und können sich u. U. negativ auf die Kornqualität auswirken, indem z. B. das Gliadin zu Glutenin-Verhältnis ansteigt (Weigel, Manderscheid, Schaller, 2007). Ferner wird das Altern der Pflanzen beschleunigt und der Photosynthese-Apparat beeinträchtigt (Lobell et al., 2012). Die Auswirkungen von Hitze sind derzeit Gegenstand experimenteller Forschung (Haensch et al. 2014). Als Indikator für Hitzetage wurden diejenigen Tage ausgewertet, an denen die Maximumtemperatur 30° C überschreitet.

Für alle betrachteten Monate hat das Deutschlandmittel der Anzahl der heißen Tage (Tmax > 30°C) in der Vergangenheit deutlich zugenommen (vgl. Abbildung 2.41). Diese Entwicklung setzt sich auch in der Zukunft fort. Zum Ende dieses Jahrhunderts werden sich die heißen Tage in den Sommermonaten im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 verdrei- (Juli) bis vervierfacht (Juni und August) haben. Im Monat Mai sind heiße Tage im Mittel eher selten. Umso deutlicher ist hier die Zunahme um einen Faktor von fast 12.

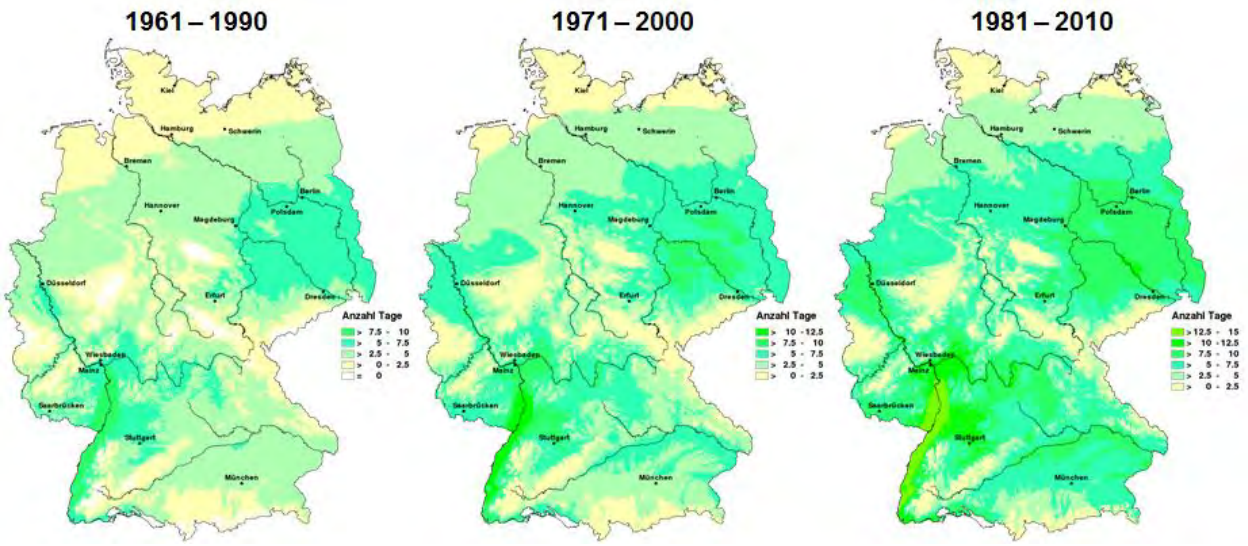
Abbildung 2.41: Anzahl der Tage mit Maximumtemperaturen > 30°C in den Monaten Mai, Juni, Juli und August, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



Quelle: DWD-Klimaatlas.

In der regionalen Verteilung für den Sommer (vgl. Abbildung 2.42, 1961-1990) fallen das Rhein- und Maintal und das Gebiet östlich von Elbe und Saale auf. Im Zeitraum bis 1981-2010 nehmen hier die heißen Tage immer weiter zu und scheinen auch in anderen Gebieten zuzunehmen. In der Zukunft muss mit einer weiteren Zunahme der heißen Tage gerechnet werden, wobei in Süddeutschland die Zunahme etwas stärker ausfällt als im Norden (vgl. Abbildung 2.43).

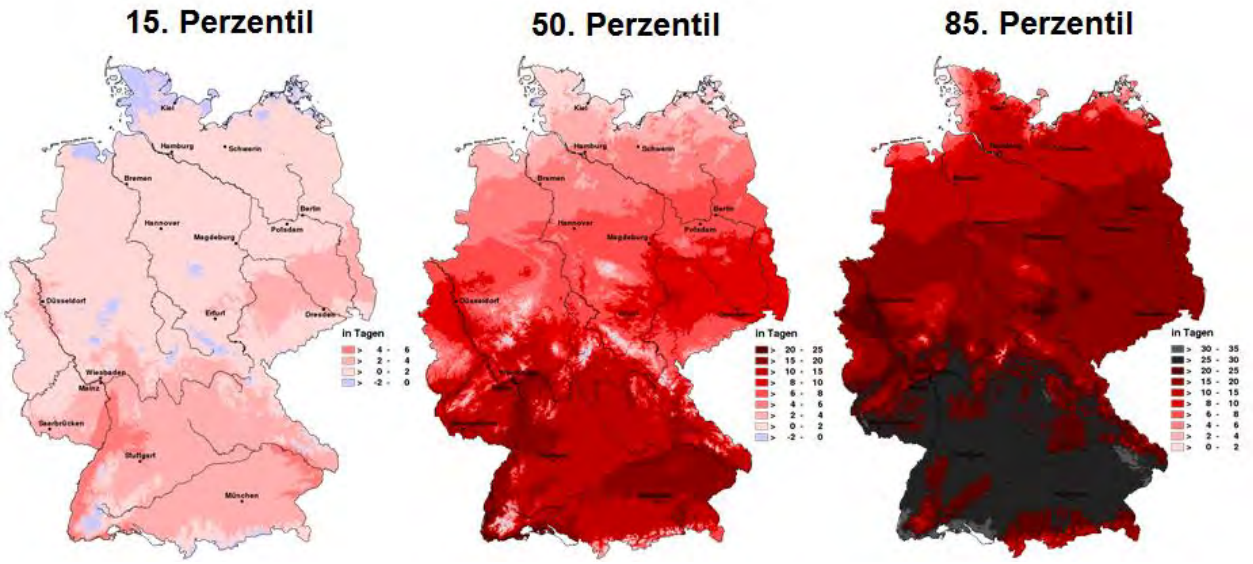
Abbildung 2.42: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Maximumtemperaturen > 30°C im Zeitraum Juni bis August, 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Die Modellergebnisse zwischen dem 15. und 85. Perzentil reichen von einer moderaten Zunahme um bis zu 4 Tagen bis zu einer flächendeckenden Zunahme um 10 bis 30 Tagen. Die von den Klimaprojektionen prognostizierte Zunahme der heißen Tage schwankt in einem sehr großen Bereich und macht damit die Abschätzung der Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft sehr schwierig.

Abbildung 2.43: Erwartete regionale Entwicklung der Anzahl der Tage mit Maximumtemperaturen > 30°C im Zeitraum Juni bis August, Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



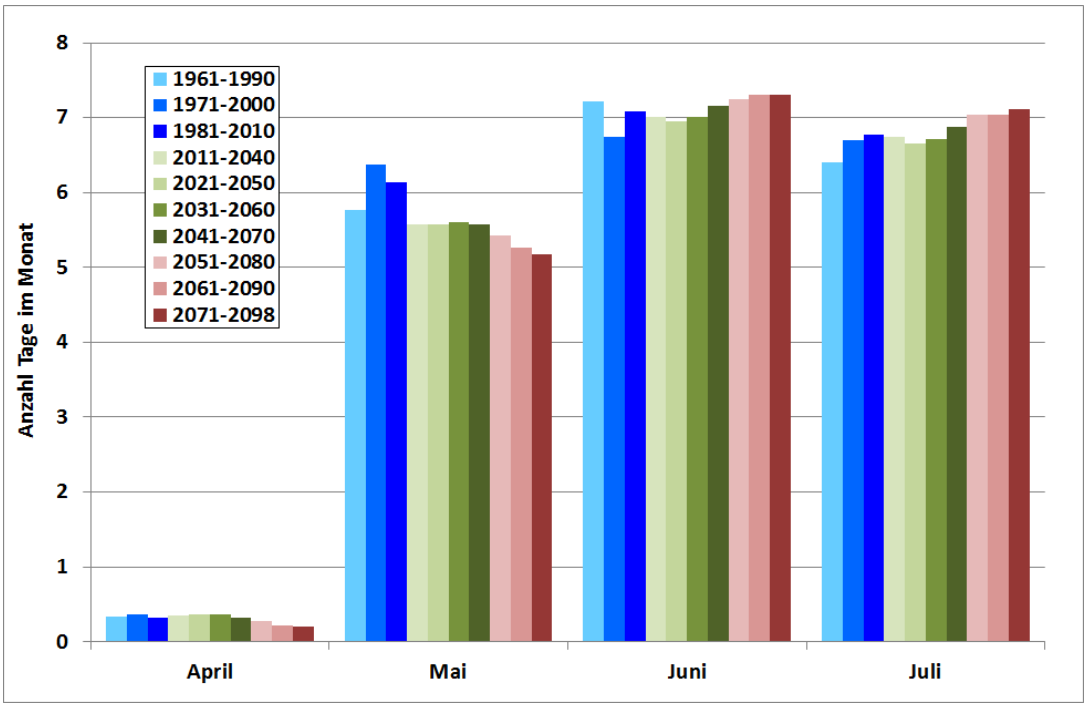
Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.13 Strahlung

Strahlungsreiche Tage mit einer Globalstrahlung (Rg) > 2500 J/(m² d) in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation führen zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosynthese-Leistung. Die Bewölkung und die Sonnenhöhe (Höhenwinkel der Sonne über dem Horizont) entscheiden über die täglichen Globalstrahlungswerte. Deutlich ist in Abbildung 2.44 zu sehen, dass bereits im April der Grenzwert von 2500 J/(m² d) überschritten wird. Die Sonne steht jedoch erst ab Mai hoch genug, dass bei Strahlungswetter der Grenzwert regelmäßig erreicht wird. In den Monaten Mai, Juni und Juli ist dies an etwa 6 bis 7 Tagen im Monat der Fall.

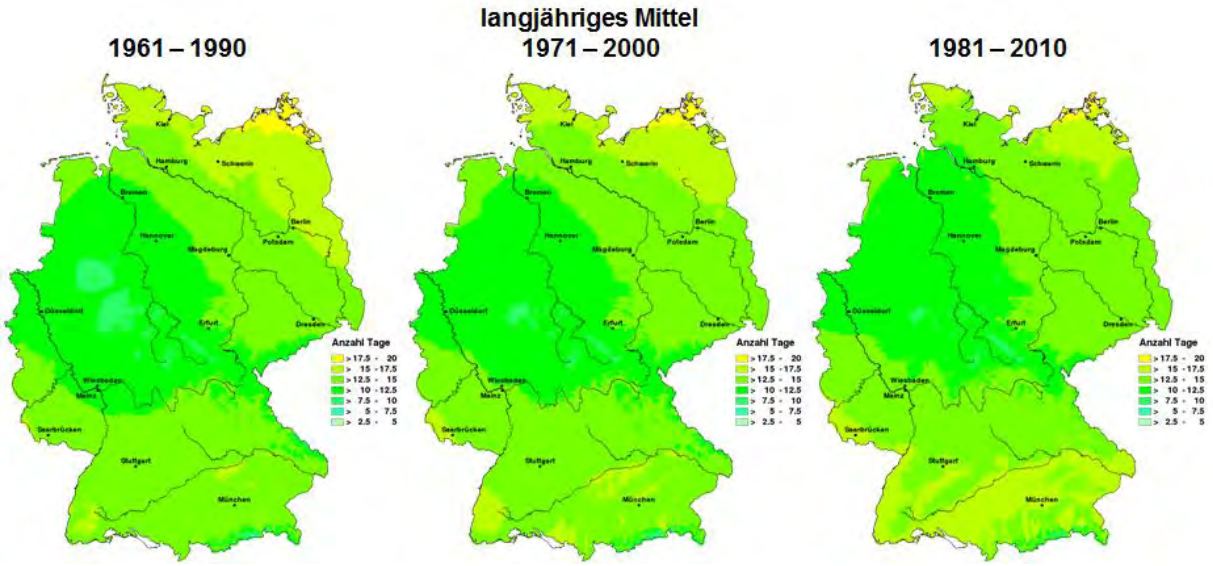
Die regionale Verteilung für die Monate April bis Juni (vgl. Abbildung 2.45) zeigt den Einfluss von Bewölkung und Sonnenhöhe sehr deutlich. Die Anzahl an Tagen mit hohen Globalstrahlungswerten nimmt nach Süden zu, da die Sonnenhöhe mit einer geringeren geografischen Breite zunimmt. Durch den höheren Sonnenstand ist der Strahlungsgenuss pro m² höher als in höheren Breiten. An der Küste, vor allem im Bereich der Ostsee, wird der Grenzwert häufiger überschritten als in Mittel- und auch Süddeutschland. Ursache hierfür ist die geringere Bewölkung, so dass trotz der geringeren Sonnenhöhe ein Wert von über 2500 J/(m² d) erreicht wird. Die prognostizierten Änderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts reichen von einer Abnahme um 2 bis 6 Tage bis zu einer Zunahme um bis zu 6 Tagen, wobei die stärkste Abnahme an der Küste und die stärkste Zunahme im Süden Deutschlands erwartet wird (vgl. Abbildung 2.46).

Abbildung 2.44: Anzahl der Tage mit Globalstrahlungswerten > 2500 J/(m²d) in den Monaten April bis Juli, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft



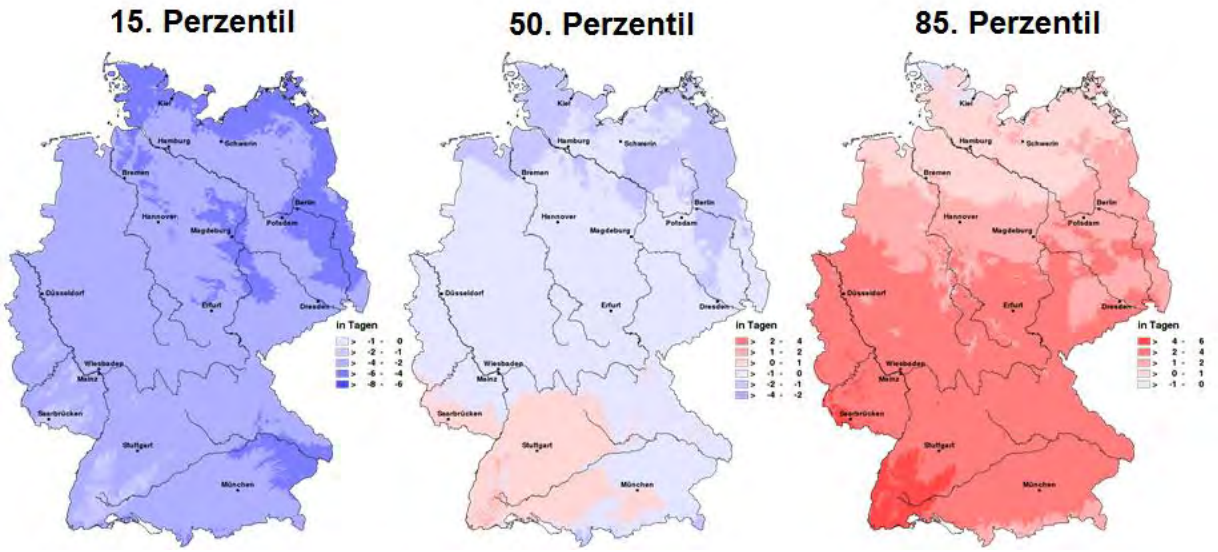
Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.45: Regionales Auftreten und Entwicklung der Tage mit Globalstrahlungswerten > 2500 J/(m²d) im Zeitraum 1.4.-30.6., 30-jährigen Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010



Quelle: DWD-Klimaatlas.

Abbildung 2.46: Erwartete regionale Entwicklung der Tage mit Globalstrahlungswerten > 2500 J/(m² d) im Zeitraum 1.4.-30.6., Änderungstendenz 2071-2098 gegenüber 1961-1990



Quelle: DWD-Klimaatlas.

2.3.14 Weitere Extremwetterlagen

Hagel ist eine agrarrelevante Extremwetterlage mit einem hohen Schadenpotenzial vor allem in Sonderkulturen aber auch in Ackerkulturen. Hagelereignisse treten allerdings sehr lokal auf und werden durch meteorologische Messverfahren nur unzureichend erfasst. Demzufolge lagen mit Blick auf die Analyse einer Änderung der Häufigkeit von Hagelereignissen keine belastbaren Stationsdaten vor. Auch von den regionalen Klimamodellen wird Hagel nicht aufgelöst. Aussagen zur Änderung der Häufigkeit und Intensität von Hagelschlag lassen sich, wenn überhaupt, nur über Proxyindikatoren ableiten. Ein solcher Indikator wäre die Anzahl schwerer Gewitter, d. h., lokal begrenzte konvektive Niederschläge, in den warmen Jahreszeiten von April bis August. Jedoch begrenzt auch hier die geringe flächenhafte Repräsentativität dieser lokalen Niederschlagsereignisse belastbare Analysen langer Zeitreihen. Darüber hinaus werden Gewitter in Klimaprojektionen nicht abgebildet. Die klimatologische Betrachtung von Hagel ist derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Forschung (DWD, 2012).

Hinweise zur regionalen Häufigkeit von Hagelereignissen geben die den Hagelversicherungen gemeldeten Schadensfälle. Die täglichen Schadensfälle je Gemeinde wurden vom GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft) für den Zeitraum von 2002 bis 2013 bereitgestellt. Die räumliche Verteilung der Hagelereignisse zeigt eine Abnahme der gemeldeten Hagelschäden von West nach Ost und von Süd nach Nord. Darüber hinaus wurden insbesondere in den Regionen mit einem hohen Sonderkulturanbau auffällig viele Hagelschäden gemeldet. Hierin

zeigt sich auch die räumliche Verbreitung von Hagelversicherungen. Für eine Evaluierung der Änderung von Hagelschlägen im Zeitablauf sind diese Daten nicht geeignet.

Das Auftreten von angetautem Schnee (Nassschnee), der so viel Wasser enthält, dass Pflanzenteile unter dem Gewicht abbrechen, kann zu mechanischen Beschädigungen von Baumkronen bis zum Wurf und Bruch ganzer Bäume, insbesondere bei Nadelholz, und zum Verlust von Einzelbäumen bis zum Totalausfall eines Bestandes führen. Ein aus meteorologischen Parametern abgeleiteter Indikator ‚Nassschnee' stand jedoch nicht zur Verfügung.

2.4 Vergleichende Beurteilung beobachteter und modellierter Extremwetterlagen

Der Fokus der Klimaforschung lag bisher auf der Projektion langfristiger Änderungen des globalen durchschnittlichen Klimas, vor allem der Temperatur und des Niederschlags. Forschungsergebnisse zum Themenkomplex „Extremereignisse" hat der Weltklimarat erst jüngst in einem Bericht "Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation" (IPCC, 2012) zusammengefasst. Demnach wird für Zentraleuropa (u.a. Deutschland) mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartet, dass die Häufigkeit und Intensität warmer Tage zu- und die Häufigkeit kalter Tage abnimmt. Ferner wird ein Anstieg der Häufigkeit, Länge und Intensität von Hitzewellen und Warmperioden erwartet. Ebenfalls soll die Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen zunehmen (IPCC, 2012).

Für diese auf Grundlage verschiedener Klimaprojektionen erwarteten Trends konnten im Rahmen von Auswertungen beobachteter Klimadaten bisher nur teilweise Hinweise dafür gefunden werden, dass es in Zentraleuropa bei den Wetterextremen seit den 1950er Jahren Änderungen gegeben hat. Während sich die Erwartungen für die Temperaturextreme in den Beobachtungen widerspiegeln, ließen sich für Starkniederschlagsereignisse keine signifikanten Trends nachweisen. Zudem fallen die Analyseergebnisse regional sehr unterschiedlich aus (IPCC, 2012). Trnka et al. (2014) kommen in einer Auswertung der neuen RCP-Szenarien zu dem Schluss, dass in Deutschland lediglich mit einer Zunahme von Hitzestress bei Weizen zu rechnen ist, dieser jedoch oft mit Trockenheit korreliert. Frühjahrstrockenheit wurde nicht untersucht.

Die bisher vorliegenden Klimaprojektionen sowie deren Regionalisierungen sind mit Unsicherheiten behaftet, da einige Prozesse in den auf langfristige Klimaänderungen ausgerichteten Modellen nur unzureichend abgebildet sind (IPCC, 2012). Daher bleibt festzuhalten, dass die zur Verfügung stehenden Klimaszenarien zwar Veränderungen der Klimavariabilität reflektieren, die Änderungen des zukünftigen Auftretens von Extremereignissen und deren Ausprägungen jedoch bisher nicht belastbar abgeleitet sind. Diese Unsicherheiten sind bei der Einordnung der Auswertungen bezüglich der künftigen Entwicklung von Extremwetterereignissen zu berücksichtigen.

Tabelle 2.1 zeigt die Zusammenstellung der für landwirtschaftliche Kulturen ausgewerteten Extremereignisse. Der Trend für die Vergangenheit und Zukunft wird in Form von Pfeilen (Zunahme: ↗, keine Änderung: →, Abnahme: ↘) dargestellt, deren Grundlage die Häufigkeitsdarstellungen sind. Ist der Trend über den gesamten Zeitraum (Vergangenheit 1961-2010, Zukunft 2011-2098) nicht einheitlich, werden zwei Pfeile kombiniert. Bei der Auswertung der Bodenfeuchte wird zwischen den Ergebnissen für einen leichten Boden (leich.B) und einen schweren Boden (sch.B.) unterschieden. Tritt das Ereignis im untersuchten Zeitraum nicht auf, ist dies extra gekennzeichnet (---).

Tabelle 2.1: Schwellenwerte für landwirtschaftliche Kulturen und Entwicklungstendenzen

Extremwetter-ereignis	Schwellenwerte/ Indikatoren	Zeitraum	Trend Vergan-genheit		Trend Zukunft	
Winterfrost	**Tmin < -20 °C, -15°C, -10°C**					
	Wi-Weizen, Wi-Gerste, Wi-Raps	01.10.-31.05.	↘		↘	
	Tmin < -25 °C					
	Roggen	01.10.-31.05.	↘		↘	
Nässe (Boden-feuchte)	**> 100 %nFK (0-60cm)**		**leich.B.**	**sch.B.**	**leich.B.**	**sch.B.**
	Wi-Weizen, Wi-Gerste	11.09.-31.03.	→	↘/↗	→	↘
	Wi-Raps	11.08.-30.04.	↘	↘	↗/→	→/↘
	Roggen	01.03.-30.04.	↘	↘	↗	↗
	Zuckerrüben	01.04.-20.10.	↘	↘	↗/→	↗/↘
	Mais	01.04.-31.10.	↘	↘	↗/↘	↗/↘
Trockenheit (Bodenfeuchte)	**< 50 %nFK (0-60cm)**					
	Wi-Gerste	01.09.-31.07.	↗	↗	→/↗	→/↗
	Wi-Weizen	01.10.-31.07.	↗	↗	→/↗	→/↗
	Wi-Raps	01.04.-30.06.	↗	↗	↘/↗	↘/↗
	< 50 %nFK (0-30cm)					
	Zuckerrüben	01.03.-31.03.	---	↗	↗/↘	↗/↘
		01.06.-30.09.	↗	↗	→/↗	→/↗
	< 40 %nFK (0-30cm)					
	Mais	01.04.-30.04.	---	↗/→	↗/↘	↗/↘
		01.07.-31.08.	↗	↗	↗	↗
Dürre	**RR(Summe) < 80mm**					
	Mais	01.05.-30.06.	↗/→		↗	
	Zuckerrüben	01.06.-30.09.	↘		↗/→	
	RR(Summe) < 250mm					
	Kartoffeln	01.06.-31.08.	↗/→		↗	
Dauerregen	**RR > 20mm**					
	Wi-Weizen, Wi-Gerste	01.10.-31.08.	↗		↗	
	Wi-Raps	01.08.-30.06.	↘/↗		↗	
	Roggen	01.04.-31.08.	↘/↗		→/↗	
	Mais	01.04.-31.10.	↗		↗	
	Zuckerrüben	15.03.-31.10.	↗		↗	
	Kartoffeln	01.04.-30.09.	↘/↗		→/↗	

	RR > 5mm			
	Wi-Gerste, Wi-Raps	01.07.-31.07.	↗	→/↘
	Wi-Weizen	01.07.-31.08.	↘/↗	↘
	Roggen	01.08.-31.08.	→	↘
	Mais	01.10.-31.10.	↗	→
	Zuckerrüben	01.10.-15.11.	↗	→
	Kartoffeln	01.09.-30.09.	↗	→/↘
Spätfrost	**Tmin < 0°C, -2°C, -4 °C**			
	Wi-Weizen, Wi-Gerste, Wi-Raps	01.02.-31.05.	↘/↗	↘
	Mais, Kartoffeln	01.04.-31.05.	**0°C: ↘ -2°C: → -4°C: ↗**	**0°,-2°,-4°C: ↘**
	Tmin < -5°C			
	Zuckerrüben	01.04.-31.05.	↗	↘/→
Wechselfrost	**Tmin < -3°C und Tmax > 3°C**			
	Wi-Weizen	01.02.-30.04.	→/↗	↘
	Wi-Gerste, Wi-Raps	01.01.-30.04.	↗	↘
Trockenheit (Niederschlag)	**RR < 0.1 mm**			
	Wi-Gerste	15.02.-15.05.	↘/→	→/↘
	Wi-Raps	15.02.-31.05.	↘/→	↗/↘
	Wi-Weizen, Roggen	15.03.-15.05.	↘	→/↘
	Kartoffeln, Mais	15.03.-15.04.	↘	→/↘
	Zuckerrüben	01.05.-31.05.	↗/↘	↗/→
Strahlung	**Rg > 2500 J/(m² d)**			
	Wi-Weizen, Wi-Gerste, Wi-Raps, Roggen, Mais, Zuckerrüben	01.04.-30.06.	↗	→
	Kartoffeln	01.05.-30.06.	↗	→
Hitze	**Tmax > 28°C**			
	Mais	10.07.-20.08.	↗	↗
	Tmax > 30°C			
	Wi-Weizen	15.05.-15.06.	↗	↗
	Wi-Raps	21.04.-31.05.	↗	↗
	Kartoffeln	01.06.-31.08.	↗	↗
	Tmax > 35°C			
	Roggen	15.07.-15.08.	↗	↗
Sturm	**Tagesmittel > 10m/s**			
	Wi-Weizen, Roggen	01.06.-31.08.	↘	↘/→
	Wi-Gerste	01.05.-31.07.	↘	↗/→
	Wi-Raps	15.05.-31.07.	→	↗/→
	Mais, Kartoffeln	01.04.-30.06.	↘	↗
	Zuckerrüben	01.04.-31.05.	↘	→/↗
	Tagesmittel > 5m/s			
	Wi-Weizen, Wi-Gerste, Mais, Zuckerrüben	01.06.-30.06.	↘	→
	Winterraps	1.4.-15.4.+1.9.-15.9.	↘	↘/↗
	Roggen	16.04.-15.05.	↘	→/↗

	Kartoffeln	01.05.-31.08.	↘	↘/↗
Starkregen	**RR > 20 mm**			
	Kartoffeln	01.04.-31.05.	→	→/↗
	Wi-Raps	15.05.-31.07.	↗	↗
	Wi-Gerste	15.05.-31.08.	↘/↗	↘/↗
	Roggen	01.06.-31.08.	↘/↗	→
	Wi-Weizen	15.06.-31.08.	↘/↗	↘/→
	Mais	15.06.-31.10.	→/↗	→/↗
Frühfrost	**Tmin < -5°C**			
	Zuckerrüben	01.10.-31.10.	↗	↘

Quelle: DWD-Klimaatlas.

Der Niederschlag ist für die Landwirtschaft von entscheidender Bedeutung und kann den Anbau von Kulturen fördern oder einschränken. Eine der ersten Untersuchungen, um die Auswirkungen des Klimawandels abzuschätzen, war die Zusammenstellung der Niederschlagssignale für verschiedene für die landwirtschaftlichen Kulturen wichtige Zeitabschnitte. Die Zusammenstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 2.47 (Otte und Frühauf, 2011). Der Zeitabschnitt V zeigt einen Rückgang der Niederschläge für die Kultur Mais. Trockenstress in diesem Zeitraum führt zu Ertragsverlusten. Die Erntebedingungen im Herbst (VI) verschlechtern sich und die Winterniederschläge (VII) nehmen zu. Zeitabschnitt I zeigt die Prognosen für die Frühjahrstrockenheit. Nach diesen Ergebnissen dürfte sie in der Zukunft keine Probleme verursachen. Da die Klimaprojektionen aber das Auftreten der Frühjahrtrockenheit in der Vergangenheit nicht richtig wiedergeben (vgl. Abbildung 2.20), müssen die Aussagen für die Zukunft für diesen Zeitraum mit Vorsicht interpretiert werden.

Abbildung 2.47: Zusammenstellung der Änderungssignale des Niederschlags

Zusammenstellung der Änderungssignale des Niederschlages für die Zeiträume 2021–2050 (a) bzw. 2071–2100 (b) im Vergleich zum langjährigen Mittelwert 1961–1990 für verschiedene für die Landwirtschaft wichtige Zeitabschnitte (I bis VII)
(rot – Niederschlagsabnahme, grün – keine bzw. geringe Änderung, blau – Niederschlagszunahme)

Globalmodell / Regionalmodell (Land)	I		II		III		IV		V		VI		VII	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
BCM / HIRHAM 5 (Dänemark)	-2 bis +2 %	+20 bis +30 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+20 bis +30 %
BCM / HIRHAM 2 (Norwegen)	-2 bis +2 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	+10 bis +20 %	keine Daten
BCM / RCA 3.0 (Schweden)	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+20 bis +30 %
CNRM CM3 / HIRHAM 5 (Dänemark)	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	> +30 %	+10 bis +20 %	> +30 %	+20 bis +30 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %
CNRM CM3 / ALADIN RM5.1 (Frankreich)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+20 bis +30 %	+10 bis +20 %	> +30 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %
ECHAM5_r1 / CLM 2.4.11 (Deutschland)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+20 bis +30 %	+2 bis +5 %	+20 bis +30 %	+2 bis +5 %	> +30 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r1 / REMO_UBA (Deutschland)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r2 / CLM 2.4.11 (Deutschland)	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+20 bis +30 %	-2 bis +2 %	+20 bis +30 %	+2 bis +5 %	+20 bis +30 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %
ECHAM5_r2 / REMO_BfG (Deutschland)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r3 / HIRHAM 5 (Dänemark)	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+20 bis +30 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r3 / REMO 5.7 (Deutschland)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+20 bis +30 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r3 / RegCM 3 (Italien)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	< -30 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r3 / RACMO 2.1 (Niederlande)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+20 bis +30 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %
ECHAM5_r3 / RCA 3.0 (Schweden)	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %
HADCM3Q0 / HADRM3Q0 (England)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	keine Daten
HADCM3Q0 / HIRHAM 3 (Norwegen)	+2 bis +5 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	+10 bis +20 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten
HADCM3Q0 / RRCM (Russland)	+10 bis +20 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten	+10 bis +20 %	keine Daten	+10 bis +20 %	keine Daten
HADCM3Q0 / CLM 2.4.6 (Schweiz)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	keine Daten
HADCM3Q0 / PROMES 2005 (Spanien)	+2 bis +5 %	keine Daten	+10 bis +20 %	keine Daten	> +30 %	keine Daten	+10 bis +20 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten	+2 bis +5 %	keine Daten	-2 bis +2 %	keine Daten
HADCM3Q3 / HADRM3Q3 (England)	+10 bis +20 %	> +30 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+20 bis +30 %	+10 bis +20 %	< -30 %	> +30 %	> +30 %	-2 bis +2 %	keine Daten
HADCM3Q3 / RCA 3.0 (Schweden)	+10 bis +20 %	> +30 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	> +30 %	> +30 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %
HADCM3Q16 / HADRM3Q16 (England)	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+20 bis +30 %	+2 bis +5 %	< -30 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	keine Daten
HADCM3Q16 / RCA 3.0 (Nordirland)	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	-2 bis +2 %	+10 bis +20 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+10 bis +20 %	+10 bis +20 %

< -30 %	-30 bis -20 %	-20 bis -10 %	-10 bis -5 %	-5 bis -2 %	-2 bis +2 %	+2 bis +5 %	+5 bis +10 %	+10 bis +20 %	+20 bis +30 %	> +30 %	keine Daten
●	◕	◑	◔	○	○	○	◔	◑	◕	●	X

Zeitabschnitte

- I Frühsommertrockenheit (15.4.-15.5.)
- II Winterraps (Beginn Knospenbildung bis Erntetermin minus 14 Tage)
- III Winterweizen (Schossen bis Gelbreife minus 10 Tage)
- IV Zuckerrüben (Bestand geschlossen bis 15.9.)
- V Mais (Fahnenschieben bis Silomaisernte minus 10 Tage)
- VI Erntebedingungen im Herbst (15.9.-15.11.)
- VII Winterniederschlag (Hinweis für die Grundwasserneubildung; 15.11.-31.3.)

Quelle: Otte und Frühauf (2011).

3 Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten

Bevor in diesem Kapitel auf die kulturartspezifischen Auswirkungen von Extremwetterlagen eingegangen wird, werden in einem Überblick die kulturartübergreifenden Möglichkeiten betrieblicher Anpassungen an Extremwetterlagen systematisiert dargestellt. Bei den Auswirkungen werden sowohl die regional unterschiedliche Bedeutung von Extremwetterlagen als auch der regional unterschiedliche Flächenumfang des Acker-und Futterbaus, der Sonderkulturen sowie des Waldes berücksichtigt. Mögliche kulturartspezifische Anpassungsmaßnahmen werden für die derzeit bedeutsamen bzw. in Zukunft relevanter werdenden Extremwetterlagen analysiert.

3.1 Systematik und Überblick von Anpassungsmöglichkeiten

Zur Reduzierung des betrieblichen Risikos kann ganz allgemein zwischen ex-ante und ex-post Risikomanagementinstrumenten (RMI) unterschieden werden. Bei ex-ante RMI geht es darum, die Schwankungen des unternehmerischen Erfolgs durch vorgelagerte Maßnahmen zu reduzieren und damit die Wahrscheinlichkeit von Negativausschlägen vorab zu verringern. Dagegen geht es bei ex-post Maßnahmen um den Umgang mit akuten Problemen nach eingetretenem Schadensfall, z. B. der Aufnahme von Notkrediten oder Notverkäufe von Vermögensgegenständen oder staatlichen ad-hoc Hilfen, z. B. in Form von Entschädigungen, Liquiditätshilfen oder verbilligten Notkrediten. In den folgenden Abschnitten werden die hier im Fokus stehenden ex-ante RMI klassifiziert und kurz beschrieben.

3.1.1 Innerbetriebliche Risikomanagementinstrumente

Viele Maßnahmen zur Reduzierung von Risiken und zum Risikoausgleich können innerhalb der eigenen Betriebsorganisation umgesetzt werden (vgl. hierzu und im Folgenden z. B. MUßHOFF und HIRSCHAUER, 2013b). Diese Maßnahmen fasst man unter der Bezeichnung „innerbetriebliche Risikomanagementinstrumente“ zusammen. In jeder Betriebsorganisation steckt ein gewisses Maß an innerbetrieblichem Risikoausgleich. Oft ist den Landwirten nicht klar, welche innerbetrieblichen Risikomanagementinstrumente sie einsetzen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Kosten wichtiger innerbetrieblicher Maßnahmen, wie z. B. der Diversifizierung, nicht als Ausgaben (out-of-pocket Kosten) sichtbar werden, sondern „nur“ zu (versteckten) Opportunitätskosten in Form von Mindereinnahmen führen.

Die innerbetrieblichen Risikomanagementinstrumente lassen sich in drei große Gruppen einteilen.

- Zur ersten Gruppe gehören alle Instrumente, mit denen man die Schwankungen von erfolgsbeeinflussenden Zufallsgrößen, wie z. B. Kosten, Erträgen oder Preisen, zu verringern versucht. Man denke bspw. an eine kostenträchtige Überkapazität in Form eines größeren oder

zusätzlichen Mähdreschers, der bei normaler Witterung nicht benötigt wird, durch den man aber in Schlechtwetterjahren mit wenigen Erntetagen die Ernteverluste reduzieren kann.

- Zur zweiten Gruppe gehören alle Instrumente, mit denen man Unsicherheitsgrößen, deren Schwankungen nicht genau gleichgerichtet oder sogar entgegengesetzt gerichtet sind, so kombiniert, dass der unternehmerische Erfolg stabilisiert wird. Hier handelt es sich im Wesentlichen um verschiedene Diversifizierungsmaßnahmen (Kombination von Produktionsverfahren, Kombination von Marktpartnern, Kombination von vertikalen Wertschöpfungsaktivitäten).
- Die Maßnahmen der dritten Gruppe lassen sich unter dem Stichwort „Bildung eines Sicherheitspuffers“ zusammenfassen. Hier geht es nicht um die Vermeidung von Negativausschlägen des periodenbezogenen Erfolgs, sondern um die Bildung von Reserven, die einem das Überleben in schlechten Zeiten erleichtern.

Die genannten Handlungsalternativen sind nur dann als „Risikomanagementinstrumente“ zu bezeichnen, wenn sie die Erfolgsstreuung verringern sowie im Mittel der Jahre Kosten verursachen und somit das Erwartungseinkommen verringern. In diesem Fall wird ein Unternehmer sie nur dann einsetzen, wenn er so risikoavers ist, dass sein Gesamtnutzen trotz des Trade-offs zwischen Einkommen und Sicherheit steigt. Ein solcher Trade-off muss nicht in jedem Fall existieren. Eine weniger riskante Handlung kann gleichzeitig auch die rentablere Handlung sein. So kann an schwachen Standorten der Anbau des trockenheitsunempfindlicheren Winterroggens sowohl rentabler als auch weniger riskant sein als der Anbau von Winterweizen. Das Gleiche gilt auch für Beregnungsanlagen, wenn die Grenzleistungen der Beregnung die Grenzkosten übersteigen. Handlungsalternativen, die rentabler und weniger riskant sind als andere, bezeichnet man als dominierend. Dem Dominanzprinzip folgend sind sie sowohl von risikoaversen als auch von risikoneutralen Entscheidern vorzuziehen. Von Risikomanagement spricht man dagegen i. d. R. nur dann, wenn es um die Wahl zwischen Alternativen auf der Risikoeffizienzlinie geht, bei denen ein Trade-off zwischen höherem Einkommen und weniger Risiko besteht. Man unterstellt damit, dass die eindeutig unterlegenen (dominierten) Handlungsalternativen bereits aussortiert sind. In diesem Sinne gilt dann auch der verbreitete Satz: „Jede Form der Risikoreduzierung kostet Geld“.

3.1.2 Außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente

Neben innerbetrieblichen Maßnahmen sind auch außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente in der Landwirtschaft verbreitet (vgl. hierzu und im Folgendem z. B. MUßHOFF und HIRSCHAUER, 2013b). Aufgrund der Natur- und Klimagebundenheit der Produktion sind in der Landwirtschaft schwankende Ernteerträge eine bedeutende Quelle des unternehmerischen Risikos. Zur Reduzierung dieses Risikos können Versicherungen eingesetzt werden, bei denen es im Falle von geringen Ernten zu einer Leistung kommt. Dabei sind schadensbezogene von indexbezogenen Versicherungen abzugrenzen. Die schadensbezogenen Versicherungen kann man in Ex-

tremwetter- und (Ernte)Ertragsversicherungen unterteilen. Bei den indexbezogenen Versicherungen unterscheidet man Regionsindex- und Wetterindexversicherungen.

- Mit Extremwetterversicherungen, wie z. B. der Hagelversicherung, lassen sich nur Schäden von spezifischen Ereignissen versichern. Unspezifische Ernteschäden, wie sie durch geringe Niederschläge oder durch eine Kombination widriger Witterungsbedingungen entstehen können, bleiben aber eine relevante Risikoquelle – auch wenn der Landwirt sich gegen einzelne Schadereignisse versichert hat.
- Bei (Ernte)Ertragsversicherungen erhält der Landwirt eine Zahlung, wenn der betriebliche Ertrag den vertraglich festgelegten Normertrag unterschreitet. Der Normertrag wird z. B. auf der Basis der zurückliegenden betrieblichen Erträge und unter Berücksichtigung eines Selbstbehalts festgeschrieben. Im Unterschied zu Extremwetterversicherungen sind Schäden unabhängig von ihrer Ursache versichert. Ähnlich funktionieren Erlösversicherungen, die zusätzlich das preisbedingte Risiko abdecken.
- Bei Regionsindexversicherungen ist die Zahlung an eine außerbetriebliche, objektiv überprüfbare Größe, wie z. B. den regionalen Weizendurchschnittsertrag, gekoppelt. Auch wenn sich die eigenen Erträge „ähnlich“ wie die Regionserträge verhalten, bleiben betriebliche Ertragsschäden eine Risikoquelle. Es kann ja durchaus zu geringen betrieblichen Erträgen kommen, ohne dass eine Ausgleichszahlung erfolgt, weil es in der Region insgesamt „gut läuft“. Aber natürlich kann auch das Gegenteil der Fall sein.
- Bei Wetterindexversicherungen erfolgt die Zahlung in Abhängigkeit von einer Wettergröße, die an einer festgelegten Wetterstation gemessen wird. Der Landwirt erhält z. B. eine Zahlung, wenn die Niederschlagsmenge innerhalb eines bestimmten Zeitraums unterhalb des langjährigen Mittels liegt. Auch bei Wetterindexversicherungen bleibt der unsichere Ertrag eine Quelle des Risikos. Zum einen kann sich das Wetter im Betrieb vom Wetter an der Messstation unterscheiden (geografisches Basisrisiko). Zum anderen ist der Ertrag nicht 1:1 von der gemessenen Wettergröße abhängig, da auch andere Wachstumsfaktoren eine Rolle spielen (Basisrisiko der Produktion).

Für die betriebliche Bewertung von Versicherungen sind drei Begriffe wichtig: die faire Prämie, der Aufpreis und die Hedgingeffektivität. Die durchschnittlich je Jahr zu erwartende Versicherungsleistung wird als versicherungsmathematisch faire Prämie bezeichnet. Wenn die jährlich zu zahlende Versicherungsprämie genau der fairen Prämie entspräche, hätte man ein einkommensneutrales Instrument zur Reduzierung des Risikos. Kosten für eine Versicherung entstehen nur durch den Aufpreis, den der Versicherer über die faire Prämie hinaus verlangt. Man darf sich beim Vergleich verschiedener Versicherungen also nicht von der Gesamtprämienhöhe leiten lassen. Aus Kostensicht ist allein die Differenz zwischen der jährlichen Versicherungsprämie und der durchschnittlich pro Jahr erwarteten Versicherungsleistung relevant.

Zur Messung der Wirksamkeit einer Versicherung kann die Hedgingeffektivität herangezogen werden. Sie gibt an, wie stark die Streuung der relevanten Erfolgsgröße (z. B. des Cashflows) prozentual verringert wird. Wird lediglich die Reduzierung der Streuung einer untergeordneten Grö-

ße berechnet, wie z. B. des Erlöses, besteht die Gefahr, dass die Wirksamkeit des betrachteten Instruments überschätzt wird. Das liegt daran, dass in diesem Fall nur die Schwankungen der Erträge und Verkaufspreise berücksichtigt werden, jedoch nicht die Schwankungen der variablen Kosten. Diese tragen aber als weiterer Risikofaktor ebenfalls zum unternehmerischen Risiko bei. Der Begriff „Hedgingeffektivität“ sollte deshalb nur für die prozentuale Reduzierung der Streuung einer klar definierten und maßgeblichen unternehmerischen Erfolgsgröße verwendet werden. Eine geringe Hedgingeffektivität ist kein grundsätzliches Problem. Auch ein wenig wirksames Instrument kann ein gutes Instrument sein, wenn es wenig kostet. Auf die Hedgingeffektivität wird in Kapitel 3.2.4.3 näher eingegangen.

Die Vor- und Nachteile unterschiedlicher marktbasierter Risikomanagementinstrumente ergeben sich aus ihrer jeweiligen Vertragskonstruktion. In Tabelle 3.1 sind die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der außerbetrieblichen Instrumente zum Management von Wetterrisiken zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Vorteile (+) und Nachteile (–) verschiedener außerbetrieblicher Managementinstrumente für Wetterrisiken

Schadensbezogene Versicherungen		Indexbezogene Versicherungen	
Extremwetter-versicherung	Ertrags-versicherung	Regionsindex-versicherung	Wetterindex-versicherung
+ Im Schadensfall erfolgt mit Sicherheit eine Leistung	+ Im Schadensfall erfolgt mit Sicherheit eine Leistung	– Beim Versicherten verbleibt ein ertragsbedingtes Basisrisiko	– Beim Versicherten verbleibt ein ertragsbedingtes Basisrisiko
– Nur Absicherung von Extremwetterschäden	+ Auch Absicherung allgemeiner Ertragseinbußen	+ Auch Absicherung allgemeiner Ertragseinbußen	+ Auch Absicherung allgemeiner Ertragseinbußen
+/– Mittlere Verwaltungs- und Regulierungskosten	– Hohe Verwaltungs- und Regulierungskosten	+ Geringe Verwaltungs- und Regulierungskosten	+ Geringe Verwaltungs- und Regulierungskosten
+ Geringe bis keine Moral-Hazard-Kosten	– Hohe Moral-Hazard-Kosten	+ Keine Moral-Hazard-Kosten	+ Keine Moral-Hazard-Kosten

Quelle: Mußhoff und Hirschauer (2013).

Der Nachteil von Extremwetterversicherungen ist, dass sie nur Schäden aufgrund von (ausgewählten) Extremwetterereignissen abdecken. Demgegenüber haben Ertragsversicherungen den Vorteil, dass der betriebliche Schaden – abgesehen vom Selbstbehalt – unabhängig von der Schadensursache abgesichert ist. Ihr Nachteil ist aber ebenso offensichtlich. Auf Seiten des Versicherers entstehen sehr hohe Kosten, die zwangsläufig zu hohen Versicherungsprämien führen, da Kosten grundsätzlich an die Versicherungsnehmer weitergereicht werden.

Kostenerhöhend wirken die Begutachtungs- und Regulierungskosten sowie das Verhaltensrisiko (Moral Hazard). In allen Fällen, in denen Landwirte mit Sorgfalt, Mühe und Kosten ohnehin nur das versicherte Einkommensniveau erzielen würden, entsteht kein Anreiz, den Schaden zu mindern. Beispiele sind Auswinterungsschäden oder Schädlingsbefall. Kostenerhöhend wirkt auch, dass Ertragsversicherungen „schlechte Versicherungsrisiken“ anziehen (adverse Selektion). Für Landwirte mit standortbedingt hohen Ertragsschwankungen sind solche Versicherungen besonders attraktiv, da sie relativ hohe Versicherungsleistungen erwarten können. Diese müssen dann über erhöhte Prämien von den Landwirten getragen werden, die über die Jahre relativ stabile Erträge haben.

Gerade umgekehrt ist die Kostensituation bei Indexversicherungen. Da die Leistung von einer außerbetrieblichen Größe abhängt, kann der Versicherungsnehmer den Versicherungsfall nicht beeinflussen. Auch adverse Selektion spielt keine Rolle. Zudem sind sehr geringe Verwaltungskosten zu erwarten. Der Index ist kostengünstig zu bestimmen und sowohl der Abschluss der Versicherung als auch die Auszahlung der Versicherungsleistung sind vollständig über das Internet automatisierbar. Wenn dieser Vorteil an die Landwirte weitergegeben wird, kann der Aufpreis gering ausfallen. Der Nachteil indexbezogener Instrumente ist allerdings, dass ein ertragsbedingtes Restrisiko verbleibt. Es gibt ja keine Sicherheit, sondern nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass es bei einem schlechten Ertrag zu einer indexabhängigen Zahlung kommt. Dementsprechend ist die Hedgingeffektivität von Indexversicherungen häufig geringer als von betrieblichen Schadensversicherungen. Allerdings stabilisieren auch die schadensbezogenen Ertrags- und Erlösversicherungen die relevante Erfolgsgröße (z. B. den Cashflow oder den Gesamtdeckungsbeitrag) nur unvollständig, da deren Schwankung neben dem unsicheren Erlös noch durch eine Vielzahl anderer Zufallsgrößen, wie z.B. den Inputpreisen, verursacht wird.

3.2 Ackerbau

Federführung: Dr. Horst Gömann (Thünen-Institut für Ländliche Räume)

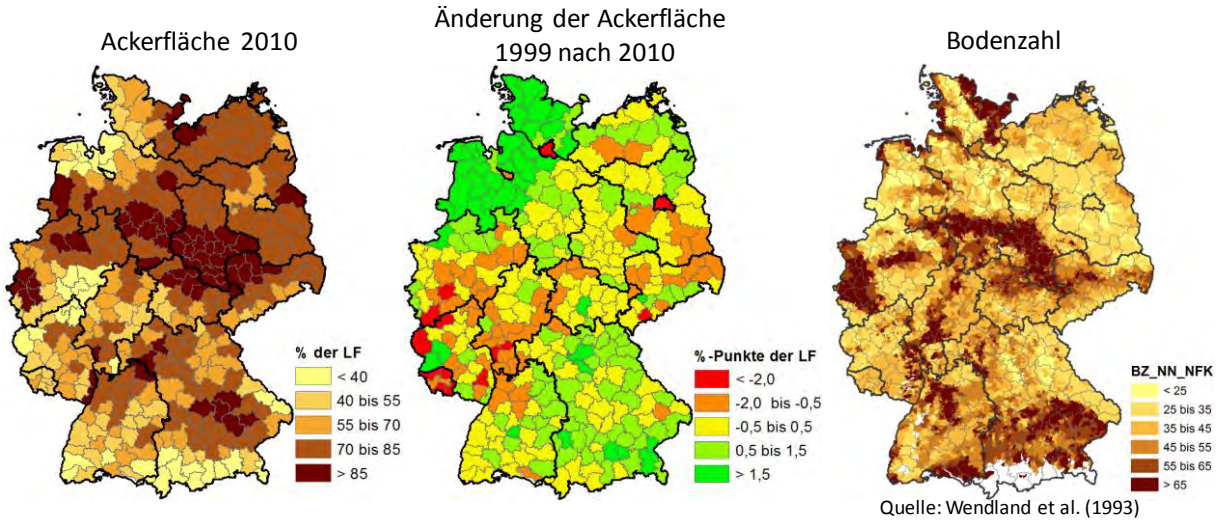
Während der letzten 50 Jahre, für die die beobachteten Extremwetterlagen ausgewertet wurden, hat in der Landwirtschaft ein beträchtlicher technischer Fortschritt und Wandel der Agrarstruktur stattgefunden. Diese Änderungen spielen wiederum eine Rolle für die Auswirkungen von Extremwetterlagen und deren Bewertung. Zunächst wird ein Überblick über wichtige langfristige Entwicklungen und regionale Anbaustrukturen gegeben. Um die Auswirkungen extremer Wetterlagen einzuordnen, werden die langfristige Entwicklung, mittelfristige Schwankungen, regionale Ertragsunterschiede sowie deren Variabilität beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse einer datenintensiven Analyse der regionalen Wirkungen ausgewählter Extremwetterlagen vorgestellt, um in der Folge auf mögliche Anpassungsmaßnahmen einzugehen.

3.2.1 Entwicklung des Anbaus und regionale Bedeutung

Die landwirtschaftliche Landnutzung unterliegt einem stetigen Wandel. Triebkräfte für diesen Wandel waren technische Fortschritte, Änderungen agrar- sowie energiepolitischer Rahmenbedingungen, Entwicklungen auf den Agrarmärkten sowie die kontinuierliche Ausdehnung der Siedlungs- und Verkehrsflächen, die oft auf fruchtbaren Ackerstandorten erfolgte. So nahm der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) von 1960 (früheres Bundesgebiet) bis 2014 (Deutschland) von rund 57 auf 47 % ab. Im Jahr 2014 betrug die LF rund 16,7 Mio. ha, davon sind etwa 12 Mio. ha Ackerfläche (AF). Grünland wurde durch Umbruch kontinuierlich in Ackerland umgewandelt, oft in Verbindung mit notwendigen Bodenmeliorationen wie Drainagen. Der Ackerflächenanteil an der LF nahm im Zeitraum von 1950 bis 2014 von rund 58 auf 71 % zu. Der Ackerbau dürfte auf diesen ehemaligen Grünlandstandorten sensitiver gegenüber Witterungsschwankungen und Extremwetterlagen reagieren als auf traditionellen Ackerbaustandorten. Ähnliche Entwicklungen der Landnutzung mit Konsequenzen für die Vulnerabilität des Ackerbaus gegenüber Extremwetterlagen haben Morten et al. (2015) im Corn-Belt festgestellt.

Abbildung 3.1 zeigt die regionale Verteilung der Ackerfläche 2010 in Deutschland (linke Karte). Die fruchtbaren Ackerbauregionen entlang des Rheins und der Donau sowie den Bördegebieten im Norddeutschen Flachland (Soest, Warburg, Hildesheim Magdeburg), die die höchsten Bodenzahlen aufweisen (rechte Karte) sind durch überdurchschnittlich hohe Ackerflächenanteile, teilweise über 85 % der LF, gekennzeichnet. Die Dynamik des Wandels der landwirtschaftlichen Landnutzung war auch im Zeitraum von 1999 bis 2010 zu beobachten. Während die Ackerfläche überwiegend in sich ausdehnenden Ballungsräumen verringert wurde, fand eine auffällige Ausdehnung der Ackerfläche meist zu Lasten von Grünland vor allem in Nordwestdeutschland und Teilen Bayerns statt (mittlere Karte).

Abbildung 3.1: Regionale Bodengüte und Ackerflächen 2010 und deren Änderungen 2010 zu 1999

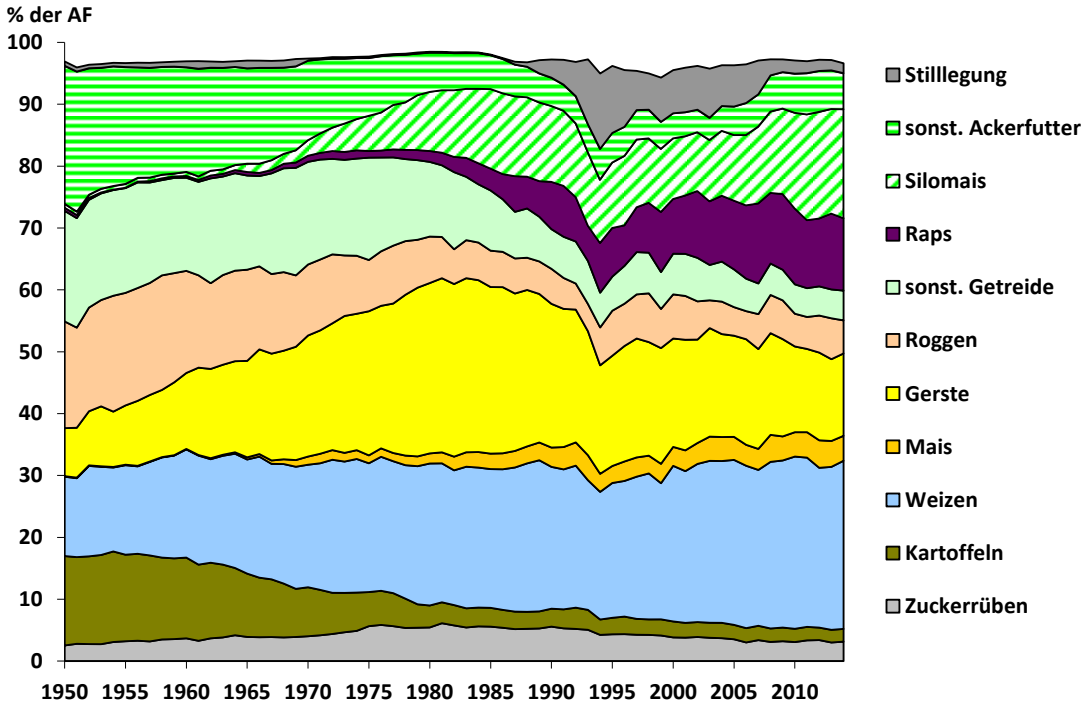


Quelle: Daten des Statistischen Bundesamts. Eigene Berechnungen und Darstellung. Wendland et al. (1993).

Im Saldo ist der Anteil der Ackerfläche um rund 0,6 %-Punkte der LF in diesem Zeitraum gestiegen. Angesichts der Verluste von Ackerflächen in den fruchtbaren Regionen (z. B. Köln-Aachener Bucht, Rhein-Main und Nord-Baden) und den Zunahmen auf den genannten vergleichsweise weniger fruchtbaren Standorten dürfte sich die durchschnittliche Qualität der Ackerfläche verringert haben. Das hat wiederum Konsequenzen für die Anfälligkeit gegenüber einigen extremen Wetterlagen, z. B. vor allem solchen in Verbindung mit Niederschlag (z. B. Dürre), da die Fruchtbarkeit des Bodens sehr eng mit seiner Wasserspeicherfähigkeit korreliert. Allerdings ist die Quantifizierung dieses Effektes sehr aufwändig und wurde im Rahmen des Projektes nicht weiter verfolgt, zumal die dazu notwendigen (georeferenzierten) Daten nur für eine vergleichsweise kurze Zeitperiode zur Verfügung stehen.

Einen Überblick über den mittel- und langfristigen Wandel der Anbaustruktur auf dem Ackerland gibt Abbildung 3.2. Auffällig sind die Wirkungen technischer Innovationen, wie z. B. der Züchtung. So hat die Einführung von 00-Raps, einer für die menschliche Ernährung geeigneten Sorte, zu einer Ausdehnung eines Anbauanteils geführt, der 2014 rund 12 % der AF betrug. Einen maßgeblichen Anreiz für diese Ausdehnung gab die Förderung von Biokraftstoffen. Mais (Silomais, CCM und Körnermais) wurde kontinuierlich durch züchterischen Fortschritt an die Klimaverhältnisse in Deutschland angepasst und sein Anbauanteil ausgedehnt. Die Maisfläche belief sich 2014 auf rund 2,6 Mio. ha. Gleichzeitig wurde der Anbau von Kartoffeln und Futterrüben stark eingeschränkt, nicht zuletzt wegen des hohen Arbeitsaufwandes bei deren Verfütterung. Die Ausdehnung der Silomaisfläche seit 2004 um rund 0,9 Mio. ha ist maßgeblich auf die Förderung der Biogasproduktion im Zuge des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) zurückzuführen.

Abbildung 3.2: Entwicklung des Anbaus von Ackerkulturen

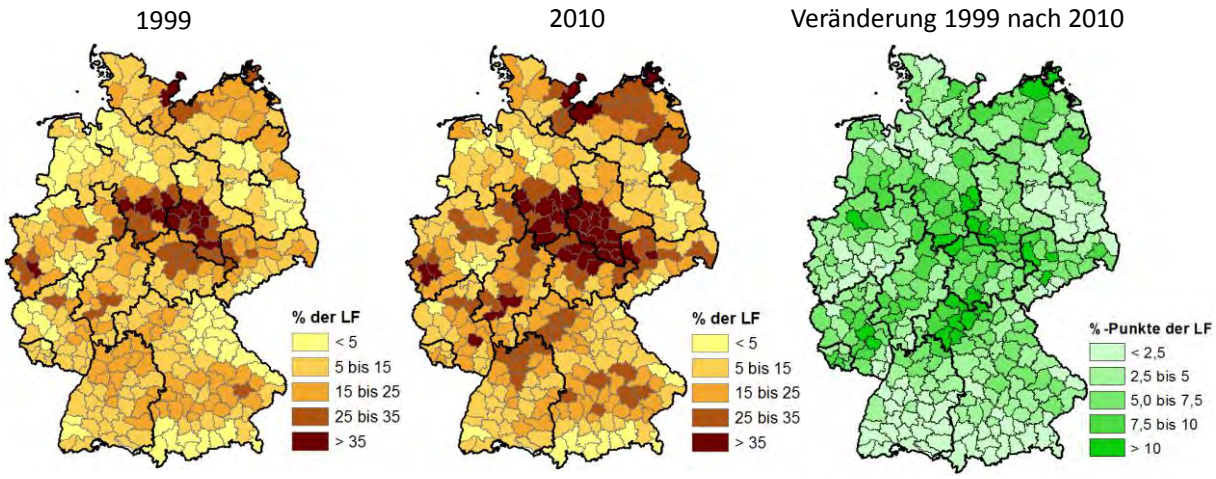


Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamts (BMEL Stat.Jb. 2014 sowie frühere Jgg.)

Innerhalb der Getreidearten wurde vor allem der Weizenanbau wegen seiner höheren Flächenproduktivitätssteigerungen ausgedehnt. Sein Anteil hat sich im Zeitraum von 1950 bis 2014 auf rund 27 % der AF verdoppelt. Die im Zuge der EU-Agrarpolitikreform 1992 eingeführte obligatorische Flächenstilllegung stellte einen erheblichen Eingriff in die Flächennutzungsstruktur dar. In den Jahren 1993 bis 1996 legten landwirtschaftliche Betriebe durchschnittlich rund 11 % (einschl. freiwilliger Stilllegung) ihrer AF still.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Änderungen der Ackerflächennutzung auf die erzielten Erträge ausgewirkt haben. Ein empirischer Nachweis ist aufgrund der zu berücksichtigenden komplexen Interdependenzen schwierig und derzeit Gegenstand der Forschung. Zwei mögliche Effekte sollen dies verdeutlichen. (1) Bei der Flächenstilllegung wurde vorrangig weniger ertragreiches Ackerland stillgelegt und auf der verbleibenden bewirtschafteten Ackerfläche ein durchschnittlich höherer Ertrag erzielt. Anschließend wurde die Flächenstilllegung nach und nach reduziert und die vergleichsweise schlechteren Ackerflächen wieder bewirtschaftet, was den Durchschnittsertrag verringerte. (2) Die Ausdehnung des Anbaus von Weizen, der im Vergleich zu anderen Getreidearten bezüglich der Standortbedingungen anspruchsvoller ist, um sein Ertragspotenzial auszuschöpfen, erfolgte zum einen durch eine Erhöhung seines Fruchtfolgeanteils und zum anderen durch eine Ausdehnung auf für den Weizen weniger geeigneten Standorten (vgl. Abbildung 3.3. Beides dürfte die Sensitivität gegenüber Extremwetterlagen erhöht haben.

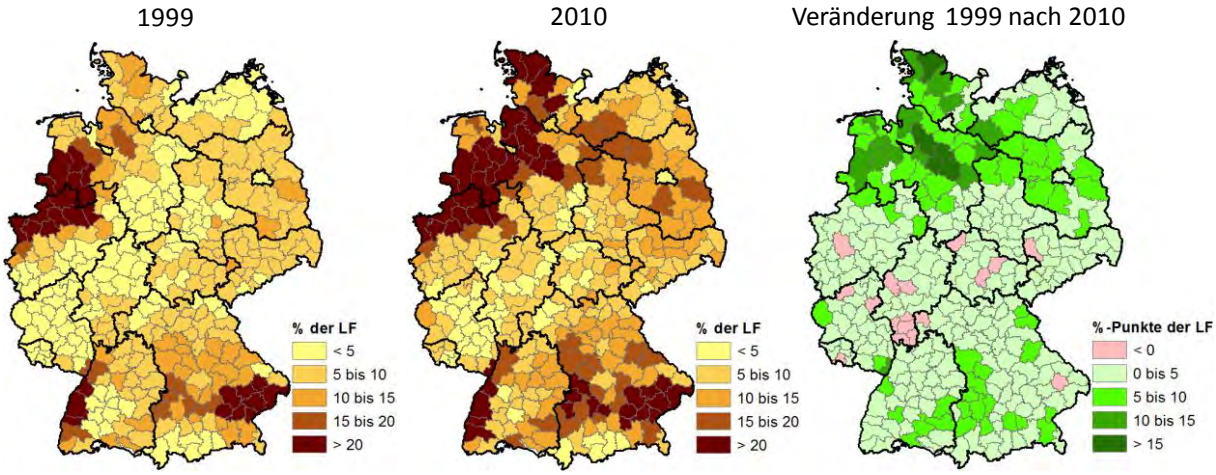
Abbildung 3.3: Entwicklung des regionalen Weizenanbaus (1999, 2010; % der LF)



Quelle: Daten des Statistischen Bundesamts. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Die Ausdehnung des Maisanbaus, vor allem Silomais, seit 2004 (vgl. Abbildung 3.2) stellt eine weitere durch politische Eingriffe verursachte massive Änderung der Anbaustruktur dar, die mit Blick auf die Auswirkungen von Extremwetterlagen von hoher Bedeutung ist. Maissilage, das Substrat für die Biogaserzeugung, muss aufgrund der hohen Transportkosten lokal, zumindest regional, produziert werden. Das bedeutet, dass sich extremwetterbedingte Produktionsausfälle ähnlich wie bei der Rindviehfütterung auf die lokale Gärsubstratversorgung der Biogasanlagen auswirken. Ein Großteil des zusätzlichen Silomaisanbaus für Biogas fand auf weniger fruchtbaren Standorten (vgl. Abbildung 3.4) statt und verdrängte weniger wettbewerbsfähige Getreidearten wie Sommergerste, Hafer und Wintermenggetreide (Gömann et al., 2013).

Abbildung 3.4: Entwicklung des regionalen Maisanbaus (1999, 2010; % der LF)



Quelle: Daten des Statistischen Bundesamts. Eigene Berechnungen und Darstellung.

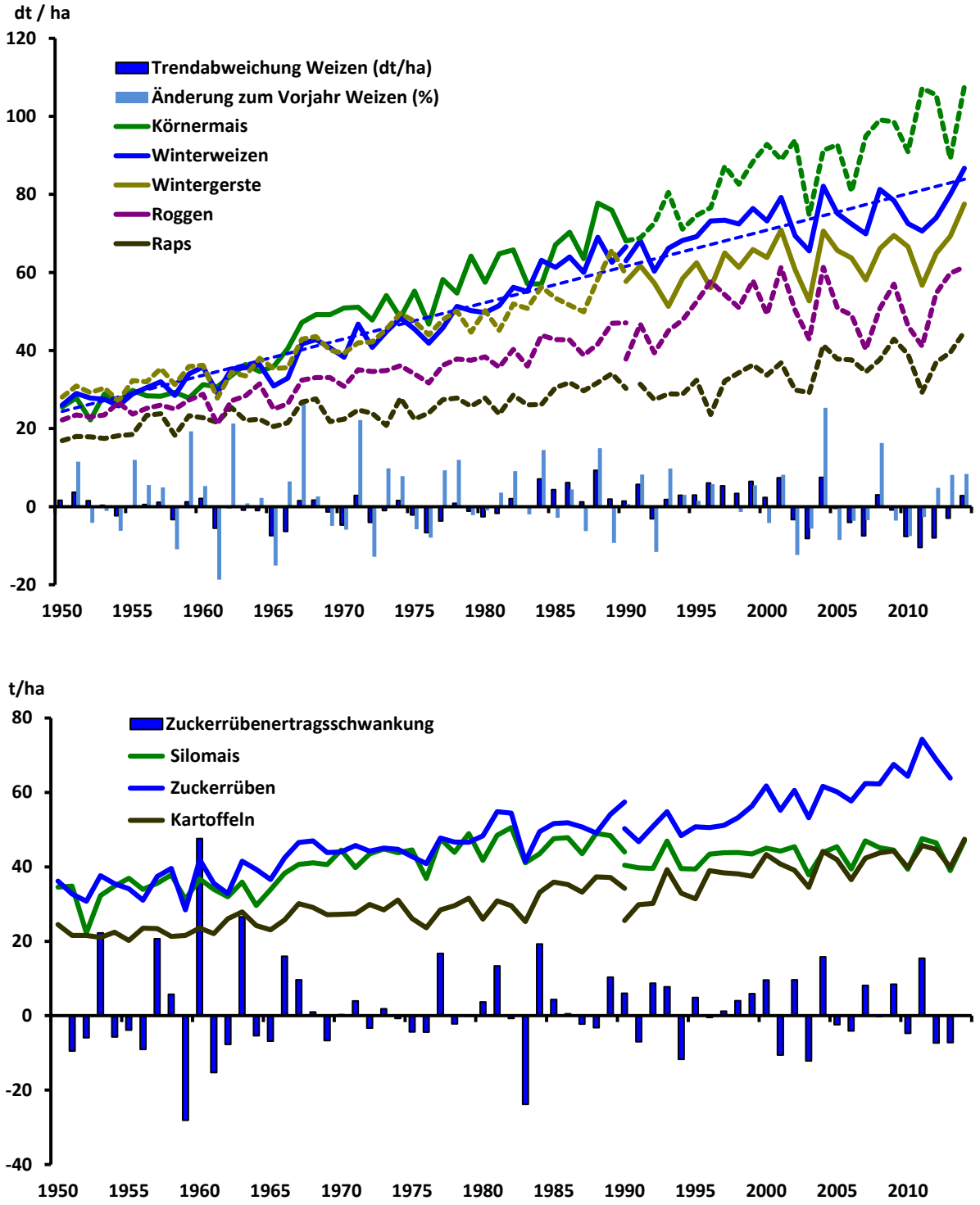
3.2.2 Ertragsentwicklungen und regionale Unterschiede

Der technische Fortschritt zeigt sich im Ackerbau vor allem in beträchtlichen jährlichen Zuwachsraten der Flächenerträge, deren Entwicklungen für ausgewählte Leitkulturen in Abbildung 3.5 dargestellt sind. Die höchsten Zuwachsraten verzeichnete der Mais, gefolgt von Winterweizen, dessen jährliche Ertragssteigerung bis Mitte der 1990er Jahre je nach Bezugszeitraum zwischen 0,8 bis 1,3 dt/ha lag. Diese Zuwachsraten konnten insbesondere durch Fortschritte in der Züchtung, im Einsatz von Mineraldünger und Pflanzenschutzmittel sowie in der Anbau- und Erntetechnik erzielt werden. Seit Mitte der 1990er Jahre wurde im sektoralen Durchschnitt ein deutlich geringerer Zuwachs von etwa 0,4 dt/ha erreicht. Die Gründe dafür sind vielschichtig und derzeit Gegenstand der Forschung. Wintergerste und Roggen haben über die gesamte Periode im Vergleich zu Mais und Weizen geringere Zuwachsraten verzeichnet. Die geringere Produktivitätssteigerung war ein Grund für die abnehmende Wettbewerbsfähigkeit der beiden Getreidearten und die kontinuierliche Einschränkung ihres Anbauanteils (vgl. Abbildung 3.2).

Die Erträge weisen infolge von Witterungseinflüssen Schwankungen von Jahr zu Jahr auf. Extreme Wetterlagen mit großer regionaler Bedeutung, wie die Dürre 2003, eine Trockenheit 2011 und Kahlfrost 2012, schlugen sich in den sektoralen Erträgen ausgewählter Leitkulturen nieder (vgl. Abbildung 3.5). Aufgrund ihrer weitreichenden Wirkungen werden diese Ereignisse auch als systemische Extremwetterlagen bzw. Risiken bezeichnet. Beim Vergleich der mittelfristigen Schwankungen von Weizen und Körnermais fallen teilweise unterschiedliche jährliche Abweichungen auf, die auf die unterschiedlichen Wachstumsperioden beider Kulturen zurückzuführen sind. Während die Dürre 2003 von März bis weit in den August hin andauerte und sowohl Weizen als auch Mais betraf, fiel die Trockenheit im Jahr 2011 zumeist in die Vegetationsperiode von Wintergetreide und Winterraps. Körnermais verzeichnete in dem Jahr eine Rekordernte. Mit steigendem Ertragsniveau nahmen die absoluten witterungsbedingten Ertragsschwankungen im Zeitablauf zu. Hingegen weisen die von der Trendschätzung unabhängigen relativen Änderungen der Weizenerträge zum Vorjahr keine signifikante Zunahme auf.

Um die Auswirkungen von Extremereignissen auf den Ertrag beurteilen zu können, wird die allgemeine Variabilität verschiedener Ackerkulturen noch einmal anhand der jährlichen Abweichungen vom langjährigen Mittelwert (bezogen auf die Jahre 1999-2013) dargestellt (vgl. Tabelle 3.2). Zusätzlich wurde die mittlere Standardabweichung der jährlichen Erträge vom Mittelwert berechnet, die als Maß für die allgemeine Variabilität angesehen werden kann. Hier wird nochmals deutlich wie unterschiedlich die Extreme auf die Kulturen gewirkt haben. Während das Jahr 2003 ein extremes Jahr für alle Kulturen war, zeigt zum Beispiel das Jahr 2011 extreme Ertragsausfälle für Wintergerste, Roggen und Raps, gleichzeitig jedoch gute Erträge für Zuckerrüben und Kartoffeln. Wird die mittlere Standardabweichung für die Kulturen betrachtet, so zeigt sich, dass Ertragsschwankungen von 6 – 10 % für die meisten Kulturen eine normale Variabilität darstellt. Für Raps und Roggen liegt die natürliche Ertragsvariabilität mit 13,6 % bzw. 11,5 % schon sehr hoch. Grundsätzlich kann von einem Extremereignis erst dann gesprochen werden, wenn die negativen Ertragsabweichungen höher als die allgemeine Variabilität sind.

Abbildung 3.5: Entwicklung der Erträge ausgewählter Ackerkulturen (dt/ha; 1950 bis 2014)



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamts (BMEL Stat.Jb. 2014 sowie frühere Jgg.)

Tabelle 3.2: Prozentuale Ertragsabweichungen verschiedener Kulturen vom langjährigen Mittel (1999-2013) in Deutschland (Datenbasis: Regionale Ertragsdaten 1999-2013)

Jahr	Wi-Weizen	Wi-Gerste	Wi-Roggen	Wi-Raps	So-Gerste	Hafer	Silo-mais	Zucker-rübe	Kar-toffeln
1999	2.3	2.4	12.4	0.4	3.8	7.2	-0.2	-8.6	**-9.0**
2000	-2.0	-0.8	-4.3	-6.8	-5.5	-1.6	3.4	0.0	5.8
2001	6.0	**10.2**	**19.0**	2.0	-2.5	5.7	1.5	**-10.5**	-0.5
2002	**-7.1**	-5.7	-2.4	**-17.3**	**-10.9**	-6.5	4.2	-5.5	-4.6
2003	**-12.3**	**-18.1**	**-16.7**	**-19.3**	-1.9	-1.6	**-13.2**	**-13.7**	**-16.3**
2004	**9.9**	**9.7**	**19.0**	**14.2**	**11.6**	**11.7**	0.6	-0.1	7.7
2005	0.6	2.0	-1.2	4.5	-5.3	-1.6	4.2	-2.4	2.3
2006	-3.1	-1.0	-4.7	3.9	-5.3	-3.1	**-9.6**	-6.4	**-11.3**
2007	-6.4	**-9.7**	**-22.0**	-4.6	**-12.9**	**-12.3**	7.8	1.2	3.1
2008	**8.9**	2.7	-1.4	4.2	-2.5	-5.2	3.6	1.0	6.7
2009	5.0	8.0	10.6	**18.6**	5.5	**8.9**	2.1	**9.5**	7.6
2010	-2.9	3.5	-10.1	7.8	0.4	**-9.3**	**-9.6**	-0.1	-4.3
2011	-5.5	**-11.9**	**-20.2**	**-19.0**	0.0	-6.3	9.2	**20.4**	**9.8**
2012	-0.9	0.9	6.2	2.3	**15.1**	**11.5**	6.5	**11.6**	7.4
2013	**7.5**	7.7	16.1	9.2	**10.6**	2.3	**-10.6**	3.6	-4.4
Mittlere Standard-abweichung	± 6.5	± 8.2	± 13.6	± 11.5	± 8.0	± 7.6	± 7.2	± 8.9	± 8.0

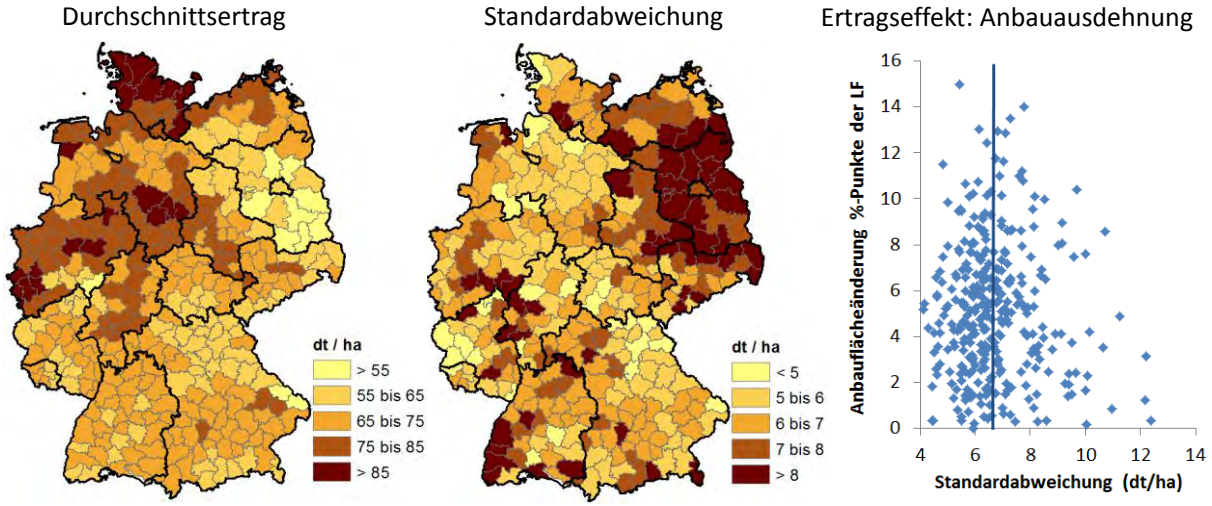
Quelle: Daten Statistisches Bundesamt. Eigene Berechnungen.

Auf welchen weniger fruchtbaren Standorten der Weizenanbau ausgedehnt wurde, zeigt ein Vergleich der jeweils rechten Karten der Abbildung 3.1 (Bodenqualität) bzw. Abbildung 3.3 (Anbauänderung). Die Folgen für die klimabedingten Schwankungen der Weizenerträge stellt Abbildung 3.6 dar. Im Mittel der Jahre 1995 bis 2013 belief sich der sektorale Durchschnittsertrag auf rund 74 dt/ha. Die höchsten regionalen Erträge mit mehr als 85 dt/ha wurden in den für den Weizenanbau klimatisch günstigen Küstenregionen und den Regionen mit den fruchtbarsten Böden erzielt. Unterdurchschnittlich fielen die Erträge auf weniger fruchtbaren Standorten Ostdeutschlands aus, die aufgrund des kontinentaler geprägten Klimas geringere Niederschläge aufweisen, und im Süden Deutschlands.

Die mittlere jährliche Schwankung der regionalen Erträge im Zeitraum 1995 bis 2013 belief sich, gemessen an der mit den Weizenflächen gewichteten Standardabweichungen der Erträge, auf 6,7 dt/ha. Auffällig sind die überdurchschnittlich hohen Schwankungen in den weniger fruchtbaren Regionen Ostdeutschlands (vgl. Abbildung 3.6 mittlere Karte). Im rechten Schaubild der Abbildung 3.6 wurden die Ertragsschwankungen mit den Anbauausdehnungen kombiniert. Der Weizenanbau wurde von 1999 bis 2010 von 2,4 auf 3,2 Mio. ha um rund 0,8 Mio. ha ausgedehnt,

davon ca. 42 % in Regionen mit einer überdurchschnittlichen Ertragsschwankung (> 6,7 dt/ha; rechts der eingezeichneten Linie).

Abbildung 3.6: Regionale durchschnittliche Weizenerträge und Standardabweichungen (1995-2013, dt/ha) sowie Beziehung zwischen regionalen Standardabweichungen und Anbauänderungen (1999 zu 2010; %-Punkte der LF)



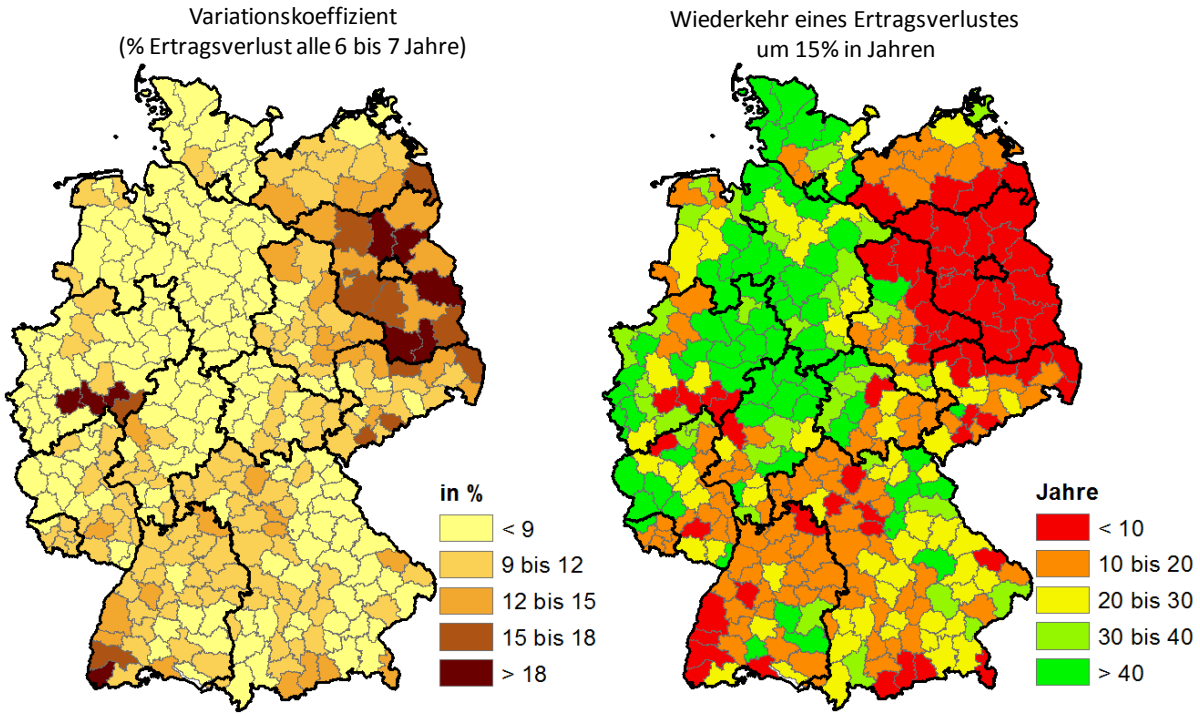
Quelle: Daten des Statistischen Bundesamts. Eigene Berechnungen und Darstellung. Gömann (2015)

Es ist davon auszugehen, dass durch die Ausdehnung der Weizenfläche der Anbau wettbewerbsschwächerer Kulturen auf tendenziell weniger fruchtbare Standorte reduziert wurde. Dadurch dürfte die Ertragsvariabilität auch dieser Kulturen tendenziell zugenommen haben. Aus den dargestellten Auswirkungen der Änderungen der Weizenanbaustruktur auf die Weizenerträge kann nicht gefolgert werden, dass die Ertragsvariabilität generell in diesem Maße zugenommen hat. Durch die Ausdehnung des Weizenanbaus wurden andere Kulturen, wie Winter- oder Sommergerste verdrängt, die auf diesen Standorten ebenfalls eine überdurchschnittliche Variabilität aufgewiesen haben. In diesem Zusammenhang steigt die Ertragsvariabilität insgesamt nur in dem Maße, in dem die verdrängten Kulturen „besser“ für den Standort geeignet waren als Weizen.

Mit Blick auf die folgenden Analysen zu den Auswirkungen ausgewählter Extremwetterlagen auf Weizenerträge wird die beobachtete Variabilität der regionalen Weizenerträge in Abbildung 3.7 noch einmal unter zwei unterschiedlichen Aspekten betrachtet. Wird eine Normalverteilung der Erträge unterstellt, so bedeutet die in Abbildung 3.6 (mittlere Karte) dargestellte Standardabweichung, dass der Ertrag statistisch gesehen, etwa alle 6 bis 7 Jahre, um den Betrag der Standardabweichung über- bzw. unterhalb des Durchschnittsertrages liegt. Die in Abbildung 3.7 (linke Karte) dargestellten regionalen Variationskoeffizienten drücken die Standardabweichungen in Prozent des jeweiligen Durchschnittsertrages aus. Demnach liegen die Weizenerträge vor allem in einigen Regionen Brandenburgs und Sachsens alle 6 bis 7 Jahre mehr als 15 % unter dem Durchschnittertrag. Demgegenüber gibt die rechte Karte in Abbildung 3.7 die statistische Wiederkehrhäufigkeit eines um 15 % unter dem regionalen Durchschnittsertrag liegenden Minderertrages in

Jahren an. Entsprechend der hohen Variationskoeffizienten für Ostdeutschland ist mit diesem Ereignis in weniger als 10 Jahren zu rechnen. In vielen Regionen Westdeutschlands liegt die Wiederkehrhäufigkeit bei mehr als 30 Jahren. Diese Betrachtung ist vor dem Hintergrund der Anpassung an derartige Ereignisse beispielsweise durch Bewässerung oder Versicherung gegen dieses Risiko von Interesse.

Abbildung 3.7: Variabilität der regionalen Weizenerträge (1995-2013)



Quelle: Daten des Statistischen Bundesamts. Eigene Berechnungen und Darstellung.

3.2.3 Wirkungsanalyse von Extremwetterlagen

Agrarrelevante Extremwetterlagen wirken sich letztlich auf den mengenmäßigen und/oder qualitativen Ertrag der Ackerfrüchte und des Grünlandes aus. Aufgrund der einerseits bei vielen Extremwetterlagen hohen Komplexität der Wirkungszusammenhänge und der andererseits oft spärlichen und heterogenen empirischen Datengrundlage wurden die Auswirkungen, Schäden bzw. Kosten auf der Basis sehr unterschiedlich belastbarer Daten und mit Hilfe verschiedener methodischer Vorgehensweisen abgeschätzt.

3.2.3.1 Literaturrecherche und Expertengespräche

In einem ersten Schritt wurden wichtige Extremwetterlagen für den Acker- und Futterbau auf der Basis von Angaben aus der Literatur identifiziert, deren Wirkungen auf die Pflanzen bzw. auf den

Produktionsprozess beschrieben und sensitive Zeiträume sowie kulturartspezifische Schwellenwerte für die Extremwetterlagen zusammengestellt (Lilienthal, 2013). Anschließend wurden die erstellten „Schwellenwertmatrizen“ im Rahmen von Workshops mit Experten diskutiert. Im Anschluss an die Auswertungen der Literatur und Expertengespräche zur Relevanz einzelner Extremwetterlagen wurde eine Auswahl für die wichtigsten Extremwetterlagen getroffen. Ferner war die Auswahl durch die Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Beispielsweise konnten keine substantiellen Analysen zum Hagelschlag durchgeführt werden (vgl. Kapitel 2.3.14).

Darüber hinaus wurde eine spezifisch auf biotische Auswirkungen ausgerichtete Literaturrecherche durchgeführt. Zunächst erfolgten die Recherchen für den Zeitraum von 1945 bis zur Gegenwart parallel in den Literaturdatenbanken „Web of Science“ und „Scopus“. Aus Kapazitätsgründen und weil die Rechercheergebnisse der Literaturdatenbanken weitgehend identisch waren sowie das „Web of Science“ eine geringfügig größere Ausbeute bot, wurde die Recherche ab Mai 2013 auf letzteres beschränkt und monatlich im „Advanced Search“-Modus wiederholt, um aktuelle Einträge zu erfassen. Zusätzlich wurden Informationen in Zeitschriftenumläufen und Sekundärauswertungen sowie im Klimafolgenkataster des PIK *http://www.klimafolgenkataster.de* gesucht. Die Recherchen erfolgten zu den für Acker- und Futterbau genannten Kulturen und Extremwetterbegriffen. In die Recherche flossen all jene Schaderreger kulturartenspezifisch ein, für die bekannt ist oder infolge von Analogieschlüssen aus ihrer Biologie vermutet wird, dass sie durch den zu erwartenden Klimawandel allgemein beeinflusst werden (Auflistung der Schaderreger und Quellen s. unter: Seidel, 2014a). Sowohl bei den Kulturpflanzen als auch bei den Schaderregern wurden die deutschen Bezeichnungen, englischen Bezeichnungen sowie lateinischen Bezeichnungen und jeweilige Synonyma aus dem „EPPO Plant Protection Thesaurus“ (http://eppt.eppo.org/index.php) berücksichtigt.

Bis zum 08. Januar 2015 wurden im „Web of Science“ insgesamt 1,6 Mio. Einzelabfragen (= Kombination „Kultur + Schaderregerbegriff + Extremum“) durchgeführt. Hierbei und aus der ergänzenden Suche s.o.) wurden insgesamt 387 Veröffentlichungen gefunden. Nach Lektüre dieser Veröffentlichungen konnten 71 Publikationen verifiziert werden, die belastbare und damit weiter verwendbare Aussagen zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf das Auftreten und/oder die Schadwirkung von durch den Klimawandel vermutlich beeinflussten Schaderregern entnommen werden können. Für im Ackerfutterbau auftretende Schaderreger wurden keine verwertbaren Publikationen gefunden. Vergleichsweise groß war die Anzahl der verwertbaren Publikationen zu Weizen (24) und Mais (21), gefolgt von Gerste (11). Für die anderen recherchierten Kulturen standen nochmals weniger Arbeiten zur Verfügung: Grünland (7), Raps (3), Zuckerrüben (3) sowie die Kartoffeln (2).

Die meisten Arbeiten befassten sich mit Auswirkungen von Dürre (39), gefolgt von Trockenheit (13), Hitze (11), Starkregen (9), Überflutung (8), Spätfrost (1) und Kahlfrost (1) auf die klimarelevanten Schaderreger der Kulturen. Keine Informationen wurden zu den Auswirkungen von Hagel, Sturm, Frühfrost und Nassschnee, anderen Extremtemperaturen sowie zum Begriff „Extremwetter“ gefunden. Etwas mehr als die Hälfte der Arbeiten zum Einfluss von Extremwetterereignissen

auf die klimawandelrelevanten Schaderreger in wichtigen Ackerbaukulturen beschäftigte sich mit Schadpilzen, etwas weniger als die Hälfte mit Schadinsekten. Die Einflüsse von Extremwetterereignissen auf durch Viren und Bakterien verursachte Erkrankungen der Kulturpflanzen, Unkräuter und die Kulturpflanzen schädigende Säugetiere, wie z. B. Mäuse, wurden bisher kaum untersucht, die letzteren beiden nur für das Grünland (ausführlich s. Seidel, 2014a, c).

Es werden in der gefundenen Literatur sowohl hemmende als auch fördernde Einflüsse der genannten Extremwettereignisse auf die Schaderreger (Auftreten, Befallsstärke, Populationsdynamik bzw. Epidemiologie, Mykotoxinproduktion) direkt oder indirekt über die Beeinflussung der Kulturpflanze (veränderte Prädisposition, Resistenz oder Toleranz) beschrieben. Weiterhin wird von Einflüssen auf chemische und alternative Pflanzenschutzmaßnahmen (geminderte oder erhöhte Wirkung, veränderte Phytotoxizität) berichtet, die ihrerseits dann auf die Schaderreger verändert wirken.

Obwohl Schaderreger unter gegenwärtigen Klimabedingungen Ertragsverluste von bis zu 40 % (ohne Pflanzenschutzmaßnahmen) verursachen können und es weltweit sehr viele Publikationen zum Einfluss des Klimawandels allgemein auf Schaderreger gibt, konnten nur 71 belastbare Arbeiten gefunden werden, die sich mit den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderreger in den in diesem Projekt untersuchten Acker- und Futterbaukulturen befassten. Diese Arbeiten liefern erste Hinweise darauf, dass Extremwetterereignisse Schaderreger fördern und/oder hemmen können, sowohl direkt als auch indirekt über die Pflanze oder Wirkung auf Pflanzenschutzmaßnahmen. Es deutet sich an, dass zwischen den einzelnen Extrema, Schaderregern, Kulturpflanzen, Kulturmaßnahmen und Pflanzenschutzmaßnahmen Wechselwirkungen möglich sind, welche Einzelwirkungen verändern, ggf. auch aufheben. Die insgesamt extrem lückenhafte Datenlage zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderregerauftreten und Schadwirkung lässt jedoch noch keine Schlussfolgerungen zu Risiken, Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen und für den Pflanzenschutz allgemein zu. Daher gingen die wenigen vorhandenen lückenhaften Daten nicht in die weiteren Auswertungen im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens ein. Es besteht hier ein erhöhter Forschungsbedarf, um den für eine Folgenabschätzung erforderlichen Bedarf an Primärdaten zu decken.

3.2.3.2 Rückschauende statistische Analyse

Die im Kapitel 3.2.2 beschriebenen Schwankungen der Weizenerträge auf Kreisebene vermitteln einen Eindruck über den Einfluss jährlicher Witterungsschwankungen, insbesondere von Extremereignissen auf die Erträge. Darüber hinaus verdeutlichen die regionalen Unterschiede der Erträge ihre Abhängigkeit von den Standortbedingungen wie Boden und Klima. Die Standortbedingungen innerhalb der Kreise können sehr heterogen sein, so dass die Kreismittelwerte nicht die Gegebenheiten der Ackerflächen repräsentieren, auf denen die Kultur tatsächlich angebaut wird. Dies führen beispielsweise Wechsung et al. (2008) bei der Entwicklung von Ertragsmodellen auf der Grundlage von Kreiserträgen als eine gravierende Limitation an.

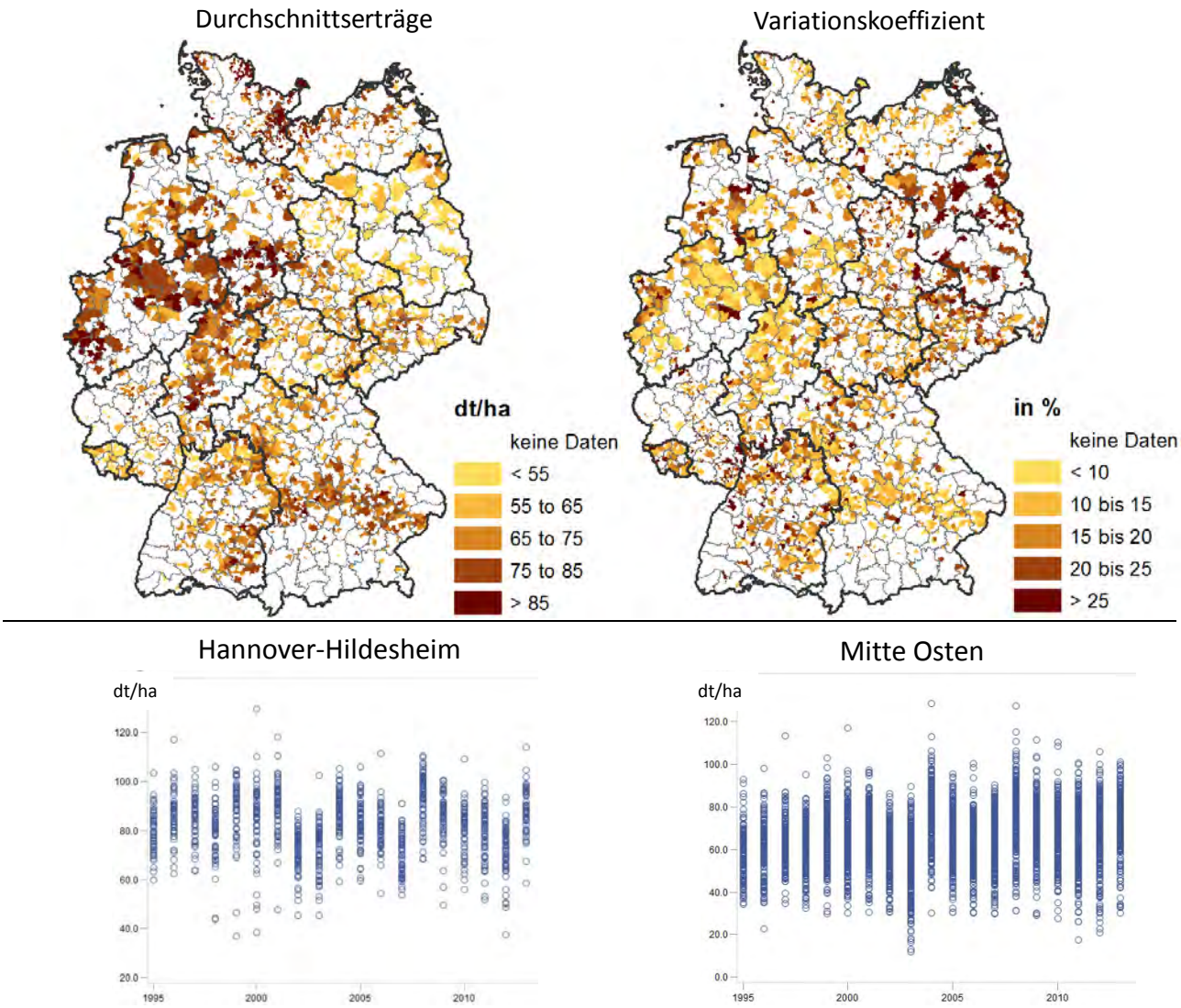
Aus diesem Grund wurden die am Thünen-Institut vorliegenden Daten des Informationsnetzes landwirtschaftlicher Buchführungen (kurz: Testbetriebsnetz) verwendet. Im Testbetriebsnetz werden die Buchführungsabschlüsse von jährlich ca. 11.500 repräsentativ ausgewählten Betrieben auf freiwilliger Basis erhoben und anonymisiert analysiert. Das Testbetriebsnetz ist eine offene Stichprobe mit einer jährlichen Fluktuation von 300 bis 500 Betrieben. Für die Analyse der Auswirkungen von Extremwetterlagen konnten Ertragsdaten für einen Zeitraum von 1995 bis 2013 für die berichteten Marktfrüchte verwendet werden, wobei für Weizen mit Abstand die meisten Beobachtungen vorlagen. Die Erträge nicht marktgängiger Pflanzen wie Silomais werden, abgesehen des seit Kurzem erfassten Energiemaises, nicht aufgezeichnet. Vor diesem Hintergrund fokussieren die Analysen auf Winterweizen, dessen Anbaufläche sich im Jahr 2014 auf rund 27 % der AF belief. Er wird in Fruchtfolge mit weiteren Winterkulturen wie Wintergerste, Roggen, Triticale und Winterraps angebaut, deren Fläche weitere rund 30 % der AF einnahm. Da diese Winterkulturen eine nahezu identische Vegetationsphase, eine ähnliche Exponiertheit gegenüber Extremwetterlagen und nur geringe Unterschiede bezüglich der Schwellenwerte aufweisen, sind die Ergebnisse für Weizen auch auf die anderen Winterkulturen übertragbar.

Neben den klimabedingten Auswirkungen beeinflussen betriebliche Faktoren in starkem Maße die Variabilität der Erträge. Dazu gehören u.a. die Betriebsgröße, die Bewirtschaftungsform (konventionell oder ökologisch) und die Möglichkeit zur Bewässerung. Hinzu kommt eine durch die Fluktuation in der Stichprobe bedingte Variabilität. Um den Einfluss dieser Faktoren möglichst gering zu halten, wurden aus dem Testbetriebsnetz nur konventionell wirtschaftende Betriebe ohne Bewässerungsflächen selektiert, die mindestens 5 ha Weizen angebaut hatten und mindestens 9 Jahre der Stichprobe angehörten. Die Weizenerträge wurden als flächengewichtetes Mittel der Gemeinde des Betriebssitzes zugeordnet, wobei die Gemeindereformen im genannten Zeitraum berücksichtigt wurden. Auf diese Weise wurde eine einzigartige, konsistente und regional sehr hoch aufgelöste Ertragsdatenbasis für 1995 bis 2013 zusammengestellt, die bei den gewählten Selektionskriterien flächendeckend ca. 30.000 beobachtete Winterweizenerträge umfasste.

Abbildung 3.8 (linke Karte) stellt die regionale Abdeckung der durchschnittlichen betrieblichen Weizenerträge auf Gemeindeebene dar. Sie weist eine hohe Repräsentativität für die Anbauregionen auf (vgl. Abbildung 3.3). Ebenso spiegeln die regionalen Unterschiede der betrieblichen Er-

träge die der Kreiserträge wider (vgl. Abbildung 3.6). Das räumliche Muster der Variabilität der Betriebserträge stimmt ebenfalls mit den Kreiserträgen überein, mit einer überdurchschnittlich hohen Ertragsunsicherheit in den östlichen Regionen (vgl. Abbildung 3.8; rechte Karte).

Abbildung 3.8: Durchschnittliche betriebliche Weizenerträge in den Gemeinden (1995-2013) und jährliche Schwanken betrieblicher Erträge in den Regionen Hannover-Hildesheim und Mitte-Osten

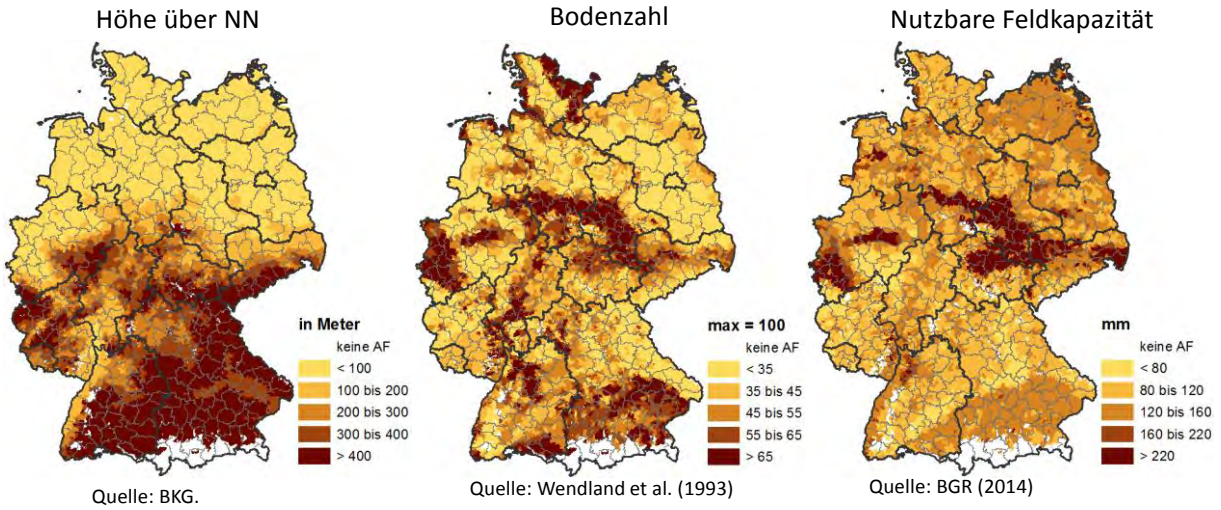


Quelle: Daten BMEL-Testbetriebsnetz. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Standortbedingungen, wie die Höhe, die nutzbare Feldkapazität (nFK) sowie die Bodenqualität, bestimmen das erzielbare Ertragspotenzial. Um die Heterogenität der Standortbedingungen räumlich differenziert zu berücksichtigen, standen eine von Wendland et al. (1993) abgeleitete Bodengütezahl (3x3 km Raster), eine aus der Bodenübersichtskarte (BÜK 1000) nach Richter et al., (2007) berechnete nutzbare Feldkapazität (BGR, 2014) sowie die Höhe über Normal Null (NN) aus dem Digitalem LandschaftsModell zur Verfügung. Die Daten wurden mit ArcGIS 10.1 für die

im Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) enthaltenen Ackerflächen verschnitten und auf Gemeindeebene gemittelt. Die Parameter zeigt Abbildung 3.9.

Abbildung 3.9: Höhe (in m über NN), Nutzbare Feldkapazität in der Wurzelzone (60 cm), Bodenzahl



Quelle: BKG. BGR. Wendland et al. (1993).

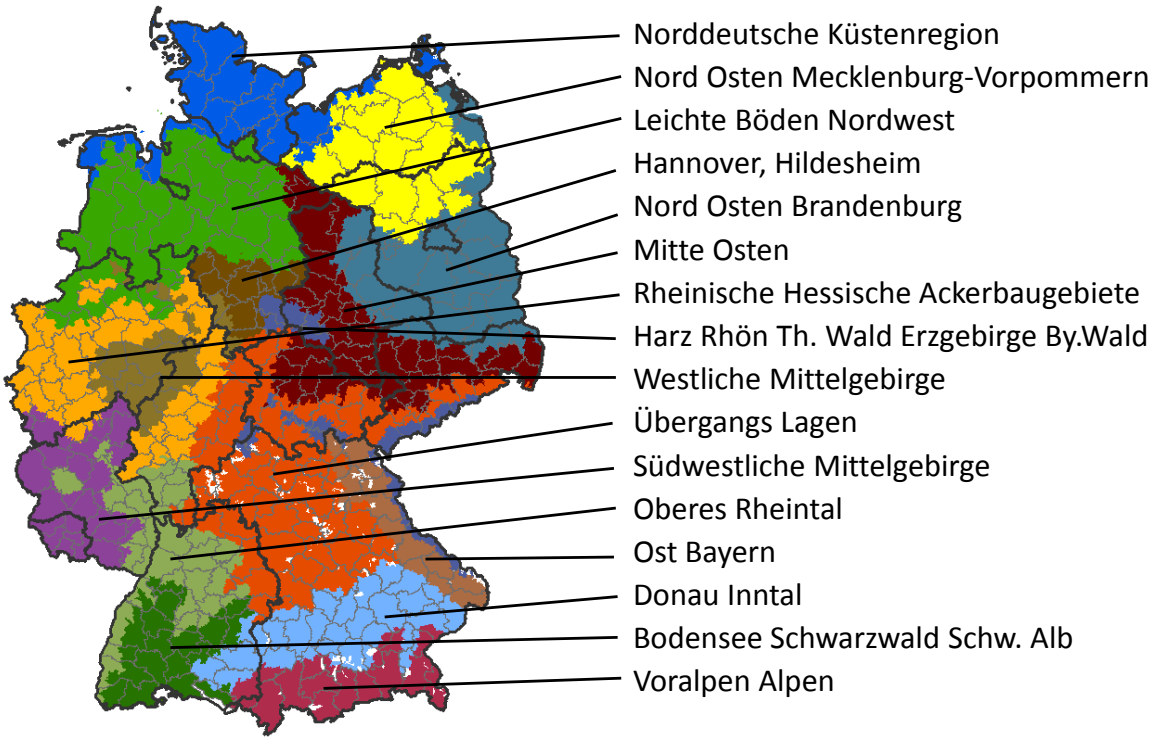
Aufgrund der heterogenen Standortbedingungen innerhalb der Landkreise wurden für die Ertragsanalysen räumliche Einheiten verwendet, die nach natürlichen Standortbedingungen abgegrenzt wurden. Eine Einteilung homogener landwirtschaftlicher Raumeinheiten ist insbesondere für extreme Trockenheit bzw. Vernässung von Bedeutung, da diesbezüglich Standortbedingungen, wie Boden und vor allem das Niederschlagsgeschehen, zusammenwirken. Dazu wird auf die Gliederung der „Boden-Klima-Räume der Bundesrepublik Deutschland (BKR)“ und die Karten kulturspezifischer Anbaugebiete zurückgegriffen (Roßberg et al., 2007). Erstere stellt ein Produkt der Anstalten für Landwirtschaft bzw. der Landwirtschaftskammern der Bundesländer und des JKI dar. Letztere werden als Basis des regionalisierten Sortenwesens verwandt und sind in Zusammenarbeit mit dem Sortenversuchswesen der Bundesländer und des JKI entstanden.

Die BKR wurden zu 16 Regionsclustern so zusammengefasst, dass einerseits ein möglichst homogener Charakter der Standortbedingungen gewahrt blieb und andererseits für die Teilräume ausreichend Weizenertragsbeobachtungen für die multiple Regressionsanalyse zur Verfügung standen. Die vorgenommene Zusammenfassung der BKR ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

Aus den in Kapitel 2.1 beschriebenen Klimadaten wurden für den Ackerbau relevante Extremwetterlagen als Indikatoren (Variable) spezifiziert, um die beobachteten betrieblichen Ertragsschwankungen von Jahr zu Jahr zu erklären. Dazu standen die minimale, mittlere und maximale Tagestemperatur, der Niederschlag, die potenzielle Verdunstung sowie die Globalstrahlung zur Verfügung. Der DWD hat diese täglich an seinen Stationen (N=132) seit 1961 gemessenen Parameter auf 1x1 km Raster interpoliert und bereitgestellt. Die Rasterdaten wurden flächengewich-

tet auf Gemeindeebene gemittelt, um eine gemeinsame räumliche Basis mit den Erträgen des Testbetriebsnetzes zu schaffen. Für Winterweizen wurden nachstehende Extremwetterlagen betrachtet, auf deren räumliche Bedeutung und Variabilität im Folgenden eingegangen wird.

Abbildung 3.10: Zusammengefasste Bodenklimaräume (BKR)

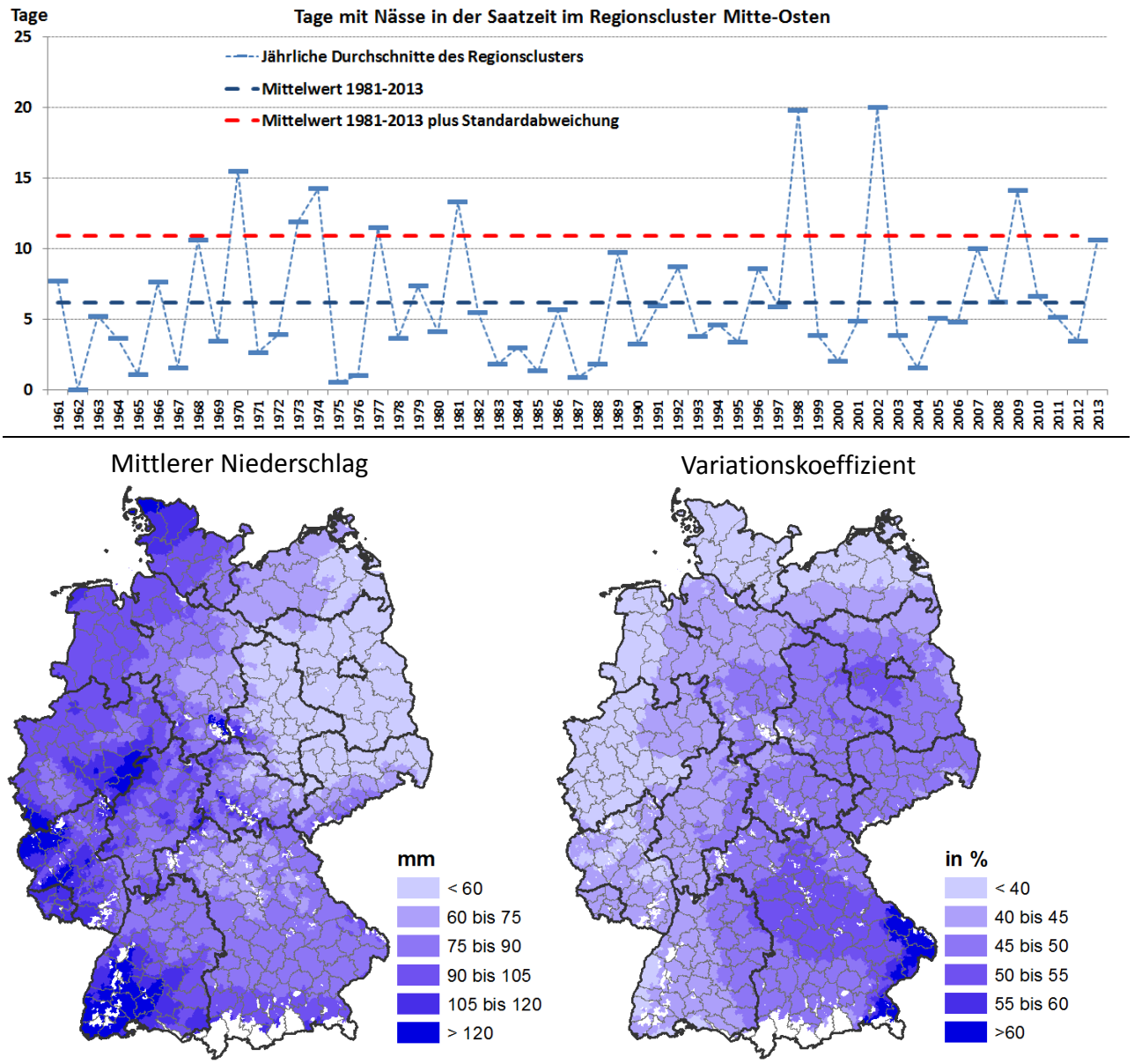


Quelle: verändert nach Roßberg et al. (2007).

Indikator „Tage mit Nässe zur Saatzeit“ (mittlerer Niederschlag einschließlich der drei vorhergehenden Tage > 3 mm/Tag) sowie Niederschlagsmenge (mm) im Zeitraum 1.10. bis 15.11.): Die Aussaat von Winterweizen erfordert ein feinkrümeliges Saatbett, das beim Vorliegen zu nasser Bedingungen nicht bereitet werden kann. Darüber hinaus kann der Boden bei zu heftigen Niederschlägen verschlämmen, was die Keimung erschwert, zumal Winterweizen kein „Dunkelkeimer“ ist. Die jährlichen Schwankungen der Nässetage zeigt Abbildung 3.11 exemplarisch für den Regionscluster Mitte-Osten. Im Mittel traten 6 Nässetage zur Saatzeit auf, wobei bis zu 11 Nässetagen im normalen Schwankungsbereich liegen. Auffällig viele Nässetage wiesen die Jahre 1998, 2002 und 2009 auf. Zum Vergleich: in der ‚Norddeutschen Küstenregion‘ betrug das Mittel 12 und bis zu 17 Nässetage waren der normale Schwankungsbereich. Die räumliche Variabilität der Nässetage ist nicht so ausgeprägt wie die Ergiebigkeit der Niederschläge in diesem Zeitraum (vgl. Karten in Abbildung 3.11). Auffällig sind die von Westen nach Osten abnehmenden durchschnittlichen Niederschläge bei gleichzeitig zunehmender Variabilität.

Aufgrund der vergleichsweise höheren Ertragsschwankungen in Ostdeutschland wurde bei vielen der im Folgenden beschriebenen jährlichen Entwicklungen von Extremereignissen exemplarisch der Regionscluster Mitte-Osten dargestellt.

Abbildung 3.11: Tage mit Nässe zur Saatzeit sowie regionale Verteilung und Variabilität von Niederschlägen zur Saatzeit von Weizen (1.10.-15.11.)

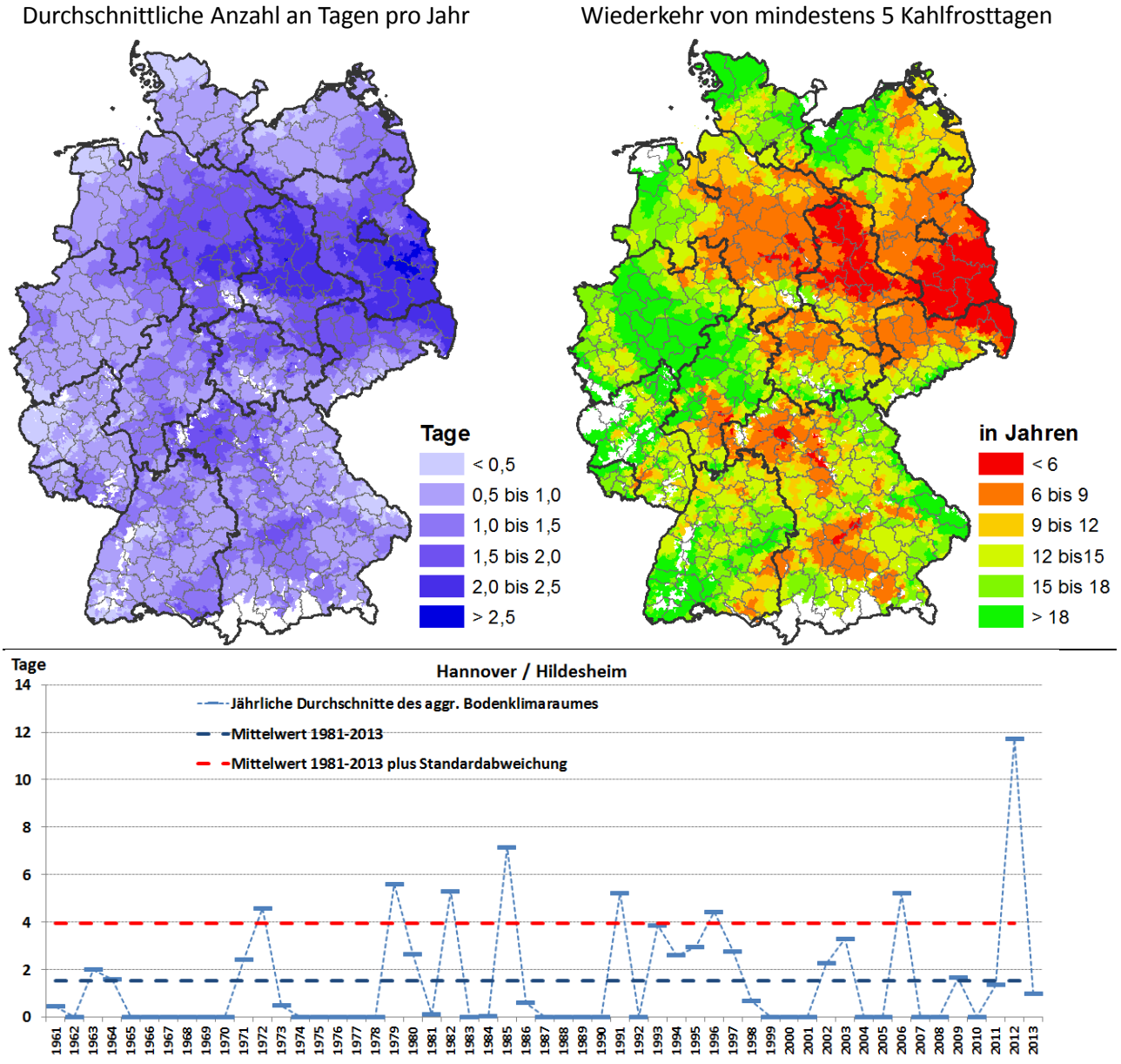


Quelle: Daten des DWD. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Indikator „Anzahl der Tage mit Kahlfrost" (Tmin < -10 °C ohne Schneedecke): Ackerkulturen reagieren auf Extremfröste (vgl. Kap. 2.3.3) besonders sensitiv, wenn die Pflanzen nicht durch eine Schneeschicht geschützt werden. Die Frostempfindlichkeit ist bei Winterweizen, Wintergerste, Roggen, Triticale und Raps unterschiedlich. Mit Schäden ist ab Temperaturen von unter -10 °C zu rechnen, wobei die Dauer des Kahlfrostes eine Rolle spielt. Eine Schneeschicht wurde durch die Annahme abgebildet, dass Niederschlag bei einer mittleren Tagestemperatur von weniger als 1 C° als Schnee fällt, der wiederum bei höheren Temperaturen schmilzt. Allerdings sind die lokalen Bedingungen entscheidend, ob ein Niederschlag als Schnee oder Regen fällt. Diesbezüglich stößt die Repräsentativität der räumlichen Interpolation der Stationsdaten des gemessenen Nieder-

schlags und auch der Temperatur an Grenzen. Die auf diese Weise ermittelten regionale Wettersituationen, die eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kahlfrösten aufweisen, zeigt Abbildung 3.12.

Abbildung 3.12: Regionale Verteilung und Wiederkehr von Kahlfrösten (1981 bis 2013)



Quelle: Daten des DWD. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Überdurchschnittlich viele ‚Kahlfrosttage' traten nach den Berechnungen in der norddeutschen Tiefebene auf vor allem von Ostniedersachsen bis Brandenburg. Dieses regionale Muster deckt sich mit der Betroffenheit von Auswinterungen infolge des Kahlfrostes im Winter 2012. Es wurden für das Ereignis „mindestens 5 Kahlfrosttage in einem Winter" Wiederkehrintervalle ermittelt. Die kürzesten Wiederkehrintervalle von weniger als 10 Jahren wiesen die genannten Regio-

nen in der Norddeutschen Tiefebene auf. Exemplarisch wurde das mittlere jährliche Auftreten von Kahlfrösten für die Region Hannover/Hildesheim dargestellt. Den Berechnungen zufolge waren von 1961 bis 2013 in 20 Jahren jeweils mehr als ein Kahlfrosttag zu verzeichnen, davon 6 Jahre mit mehr als 5 Tagen.

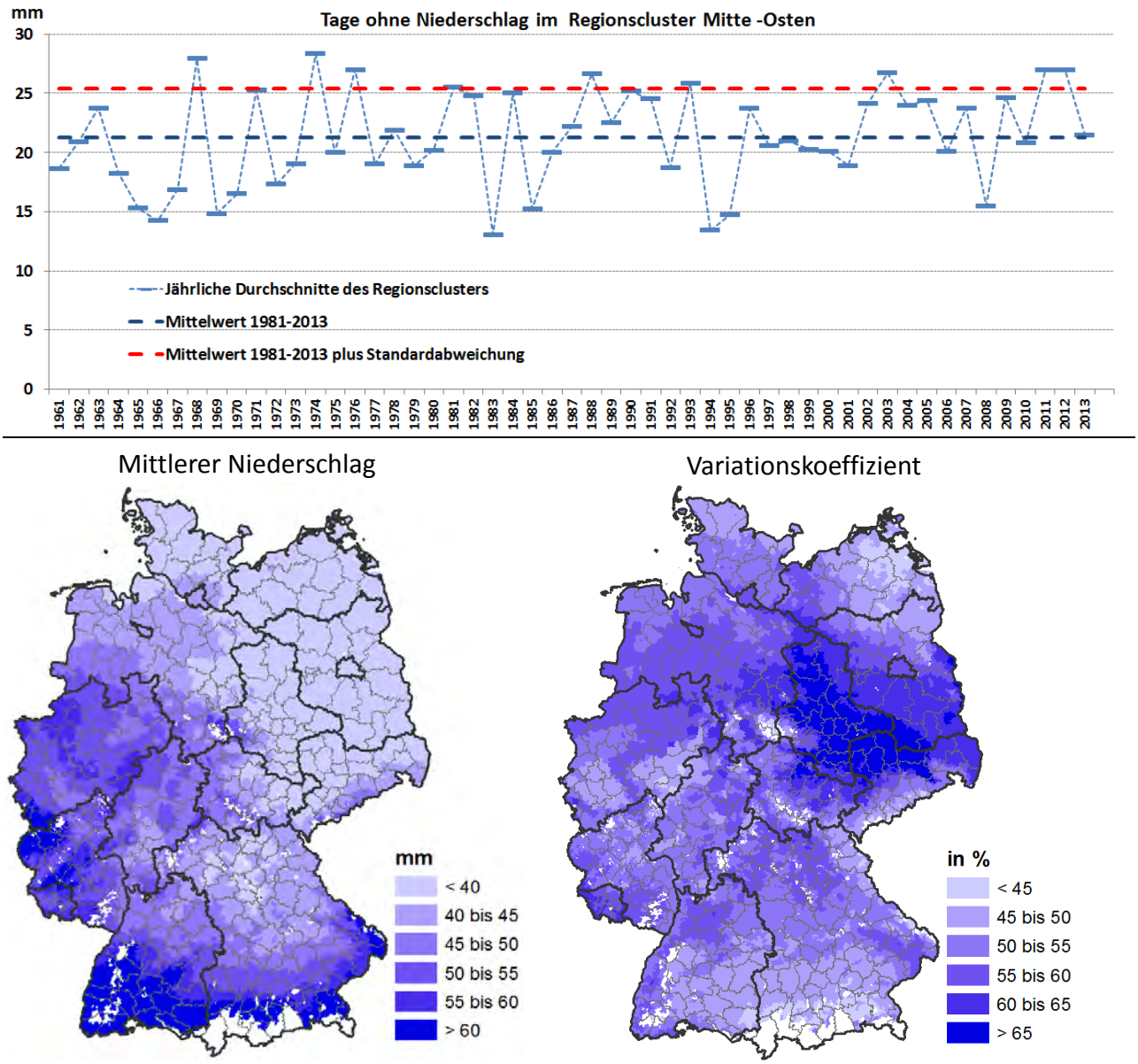
Indikator „Tage ohne Niederschlag“ (< 1 mm) sowie Niederschlag zu Vegetationsbeginn (10 Tage vor bis 20 Tage nach errechnetem Vegetationsbeginn): In den letzten 15 Jahren wurde eine Zunahme einer Frühjahrstrockenheit, vor allem im April, beobachtet (vgl. Abbildung 2.35). Unabhängig davon, ob der Boden noch genügend Feuchtigkeit aus den Winterniederschlägen aufweist, werden bei geringen oder ausbleibenden Niederschlägen zu Vegetationsbeginn die ausgebrachten Nährstoffe (Dünger) nicht gelöst und gelangen nicht zu den Wurzeln. Darüber hinaus entweicht Stickstoff oft als klimaschädliches Lachgas (N_2O) oder als elementares Stickstoffgas (N_2). Ohne diese Nährstoffe bleibt das Wachstum der Pflanzen deutlich hinter ihrem Potenzial zurück, was die Pflanzen im späteren Verlauf der Vegetationsperiode kaum kompensieren können.

Dieses Extremereignis wurde durch die Anzahl der Tage ohne Niederschlag berücksichtigt und zum anderen mit den Niederschlagsmengen in dieser Zeit verglichen. Die zunehmende Frühjahrstrockenheit schlug sich unter anderem in einem Anstieg der Anzahl der Tage ohne Niederschlag seit dem Jahr 2002 im Regionscluster Mitte-Osten nieder. Diese lagen auffällig oft am oberen Bereich des normalen Schwankungsbereiches und 3 Mal darüber (vgl. Abbildung 3.13). Gleichzeitig hat die Niederschlagsmenge zu Vegetationsbeginn in diesem Regionscluster in den letzten 10 Jahren häufig deutlich unter dem langjährigen Mittel von rund 40 mm, bei einer Standardabweichung von 21 mm gelegen. Besonders hervorzuheben ist 2012 mit lediglich 13 mm Niederschlag. Im Dürrejahr 2003 regnete es im frühen Frühjahr mit 18 mm ebenfalls ‚extrem‘ wenig. Im Mittel hat die Niederschlagsmenge an Tagen mit Niederschlag tendenziell abgenommen.

Die regionale Verteilung der Niederschlagsmengen 10 Tage vor bis 20 Tage nach errechnetem Vegetationsbeginn zeigt ebenfalls Abbildung 3.13. Auch hier macht sich das von Westen nach Osten kontinentaler werdende Klima bemerkbar. Während in westlichen Hauptweizenanbaugebieten in dieser 30tägigen Phase im langjährigen Mittel zwischen 45-60 mm Niederschlag fallen, waren es in Ostdeutschland mit Ausnahme der Harzregion weniger als 40 mm. Demgegenüber nimmt die Variabilität der Früh-Frühjahrsniederschläge von West nach Ost zu. Die höchsten Schwankungen waren in der Region Mitte-Osten zu verzeichnen.

Indikator „Trockenheit während der Vegetation“ (Niederschlagsmenge 21 Tage nach errechnetem Vegetationsbeginn bis zur Ernte): Eine ausreichende Bodenfeuchtigkeit während der Vegetationsperiode ist ein entscheidender Faktor für die Ertragsentwicklung. Auf schweren Böden, die über eine hohe Wasserhaltekapazität (nutzbare Feldkapazität; nFK) verfügen (vgl. Abbildung 3.9; rechte Karte), können Pflanzen ausbleibende Niederschläge über einen längeren Zeitraum besser überstehen im Vergleich zu leichten, schnell austrocknenden Böden.

Abbildung 3.13: Tage ohne Niederschlag im Regionscluster Mitte-Osten sowie regionale Verteilung und Variabilität der Niederschläge (1981-2013) jeweils 30tägige Periode um den Vegetationsbeginn

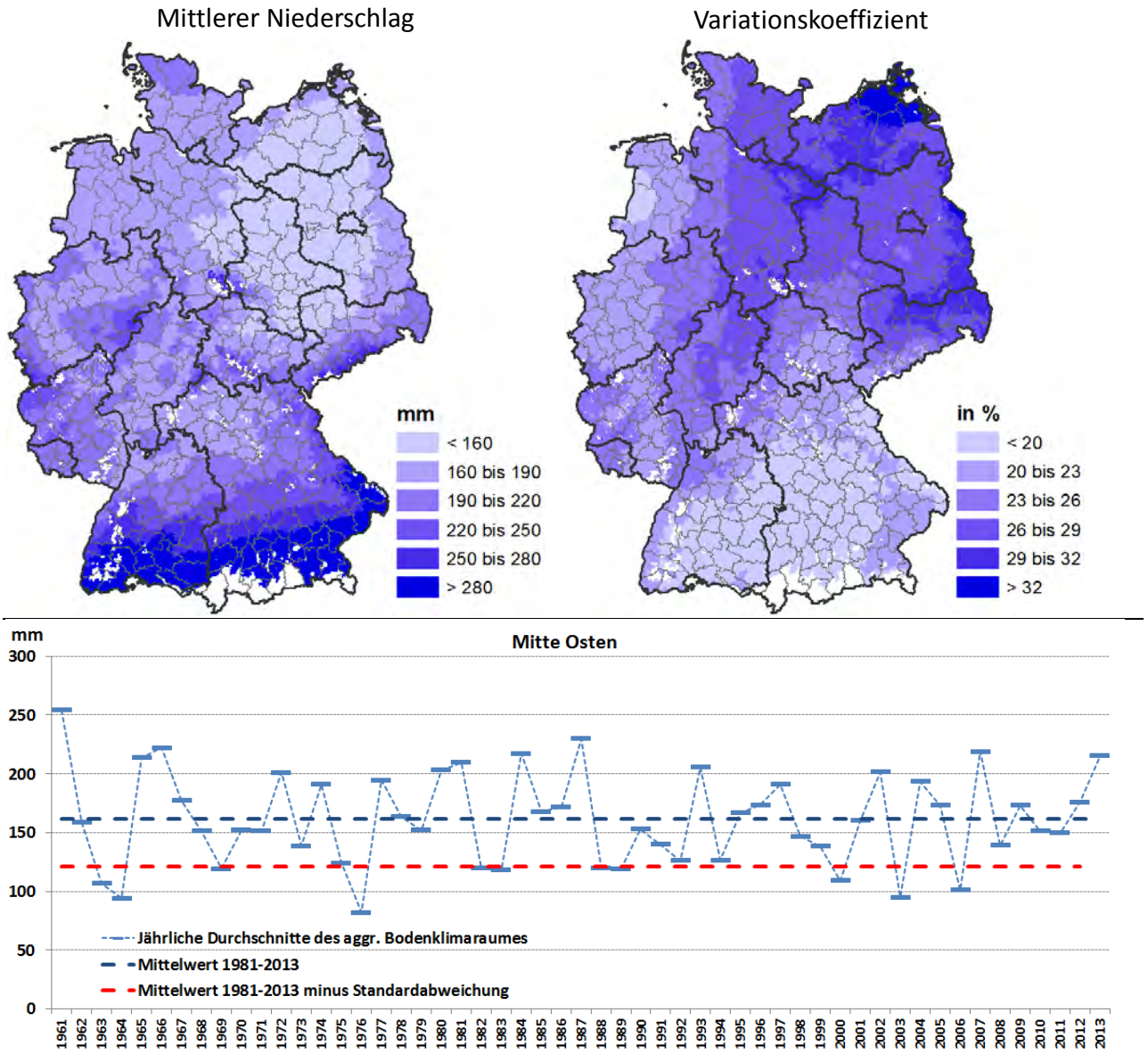


Quelle: Daten des DWD. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Die regionale Verteilung der Niederschlagsmengen ab dem 21sten Tag nach errechnetem Vegetationsbeginn zeigt Abbildung 3.14. Auch hier wird der von West nach Ost zunehmende kontinentale Einfluss in Form einer Abnahme der mittleren Niederschlagsmenge und einer zunehmenden Variabilität deutlich. Die jährlichen Schwankungen werden exemplarisch für die Region Mitte-Osten dargestellt, in der die mittlere Niederschlagssumme im Zeitraum von 1961-2013 rund 160 mm betrug, bei einer Standardabweichung von 40 mm. Gemessen an diesem Wertebereich haben die extrem niederschlagsreichen Jahren im Zeitraum von 1961 bis 2013 von ca. alle vier

Jahre auf etwa alle sechs Jahr abgenommen. Das trockenste Jahr war 1976 mit nur 82 mm Niederschlag, gefolgt von 1963 und 2003 mit nur jeweils etwa 95 mm.

Abbildung 3.14: Regionale Verteilung und Variabilität des Niederschlags (21. Tag nach Vegetationsbeginn bis zur Ernte; 1981-2013)

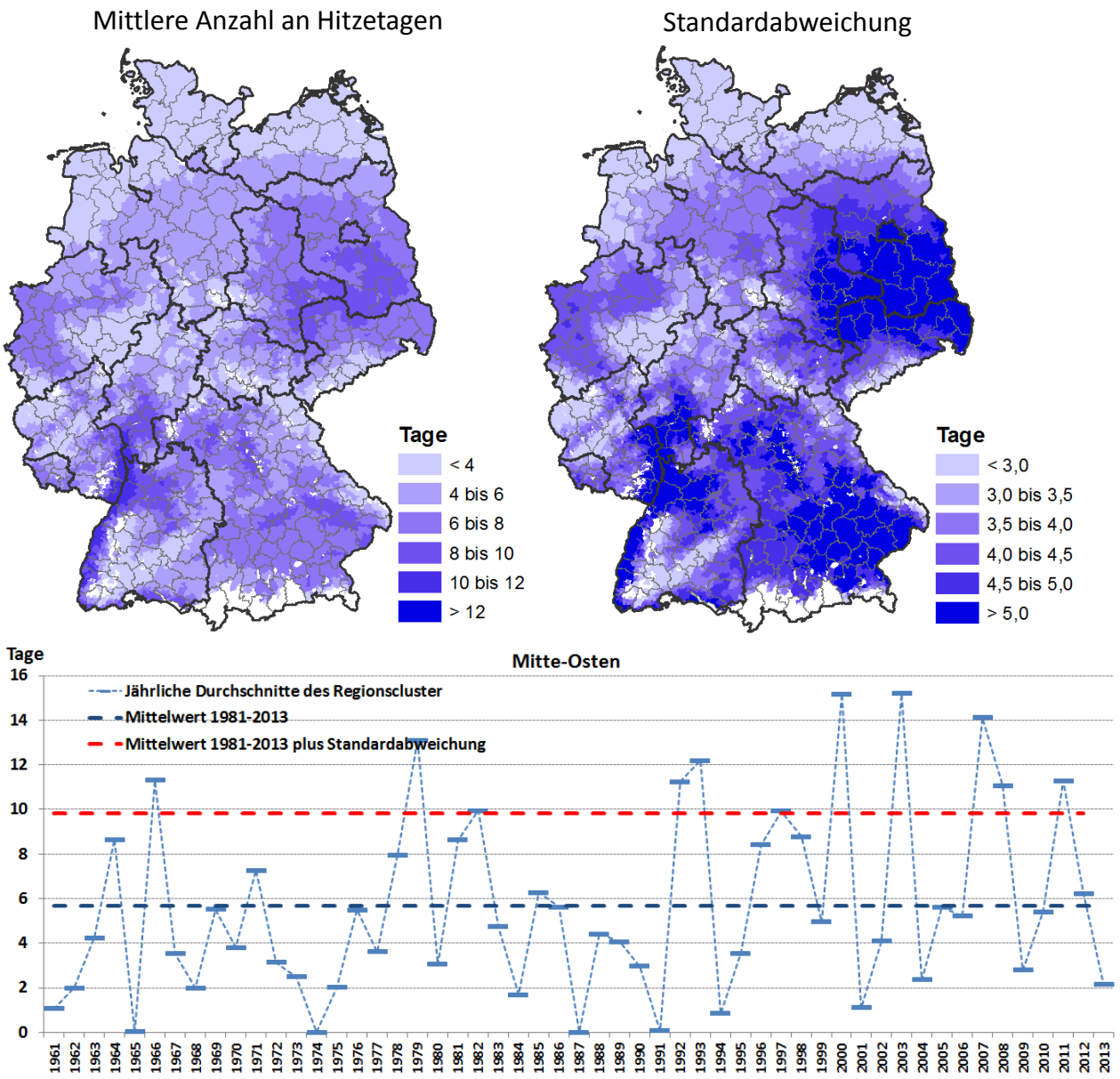


Quelle: Daten des DWD. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Indikator „Anzahl der Hitzetage zur Ährenentwicklung und Blüte“ (> 25 °C; Zeitraum 5. Mai bis 15. Juni): Nach derzeitigem Stand des Wissens scheint Hitzestress während der Blüte das Wachstum des Weizen zu beeinträchtigen und soll für eine geringere Kornzahl je Ähre verantwortlich sein (Lobell et al., 2012), wobei Haensch et al., (2014) bei Experimenten in Klimakammern keine Wirkungen von Hitzestress auf die Erträge festgestellt haben, wenn die Pflanzen nicht gleichzeitig einem Trockenstress ausgesetzt sind.

Die regionale Verteilung der Hitzetage zur Weizenblüte, für die der Zeitraum 5. Mai bis 15. Juni verwendet wurde, zeigt Abbildung 3.15. Da an Hitzetagen auch die Verdunstung erhöht ist, korrelieren sie mit Trockenheit. Auffällig ist die überdurchschnittlich hohe Anzahl an Hitzetagen entlang des Rheins sowie in Ostdeutschland. Die jährlichen Schwankungen der Hitzetage für die Region Mitte-Osten verdeutlichen die auffällige Zunahme der Hitzetage in den letzten 10 Jahren.

Abbildung 3.15: Regionale Verteilung und Variabilität der Hitzetage zur Weizenblüte (1981-2013)



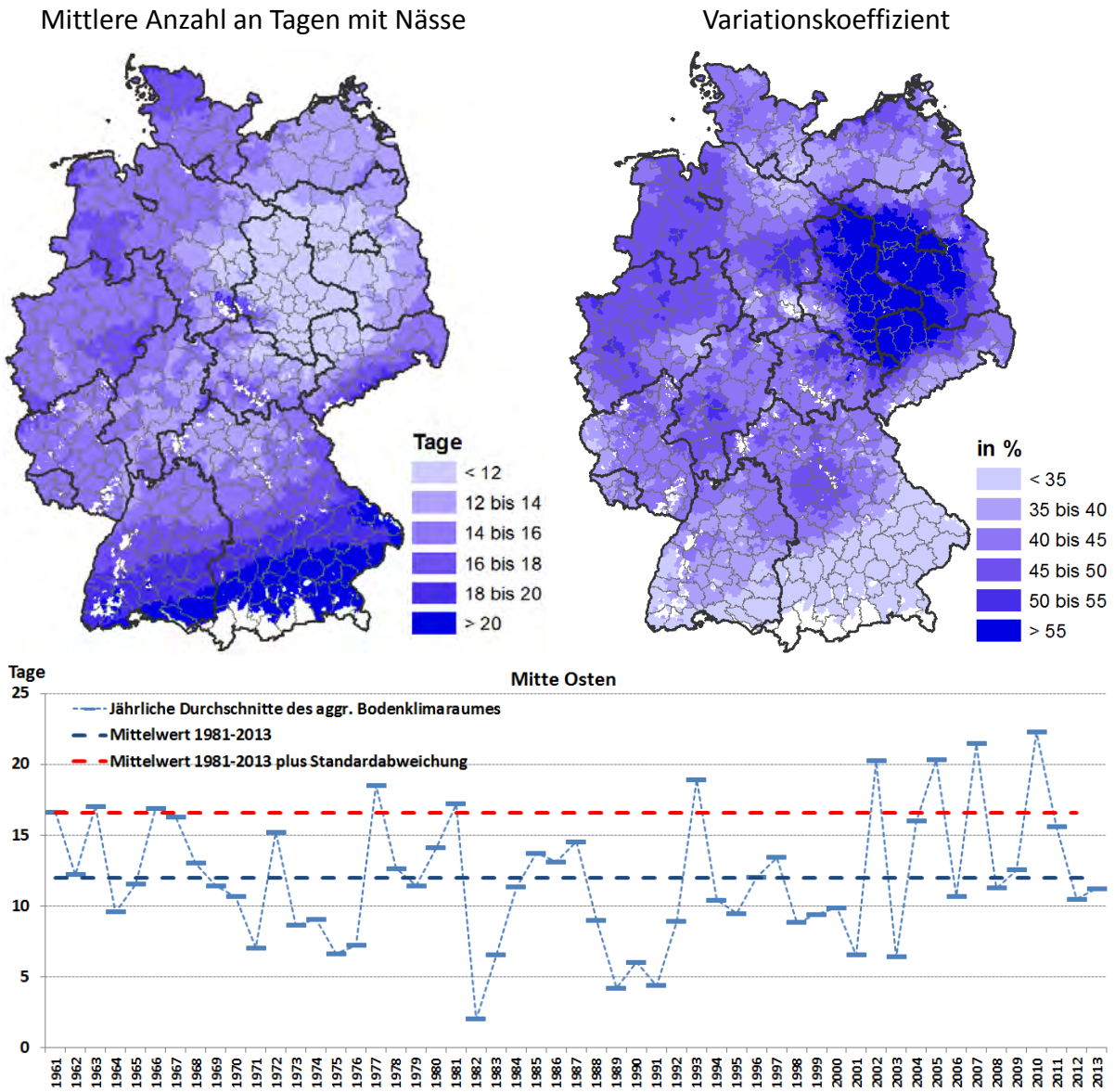
Quelle: Daten des DWD. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Indikator: Tage mit Nässe zur Erntezeit (mittlerer Niederschlag einschl. der drei vorhergehenden Tage > 3 mm): Nässe während der Erntezeit erhöht die Kornfeuchtigkeit, so dass das Erntegut getrocknet werden muss. Bei extremer Nässe kann sogar das Befahren des Bodens unmöglich

sein. Bei fortwährender Nässe verzögert sich die Ernte, was sich negativ auf die Kornqualität, wie z. B. auf die Backqualität beim Weizen, auswirkt. Roggen neigt sogar dazu, bei längeren Nässephasen auf dem Halm zu keimen und auszuwachsen.

Die regionale Verteilung der Tage mit Nässe zur Ernte zeigt Abbildung 3.16, wobei der Westen im Mittel von 1981 bis 2013 mehr Nässetage in der Ernte zu verzeichnen hatte als der Osten. Allerdings ist in der Region Mitte-Osten eine Zunahme der Nässetage in den letzten 10 bis 15 Jahren zu beobachten gewesen, wobei 2010 das Jahr mit den meisten nassen Tagen (22) seit 1961 war.

Abbildung 3.16: Regionale Verteilung und Variabilität der Tage mit Nässe zur Ernte



Quelle: Daten des DWD. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse wurden für die 16 zusammengefassten Bodenklimaräume (Regionscluster) Modelle entwickelt (geschätzt), die den Einfluss von extremen Wetterlagen auf die betrieblichen Weizenerträge abbilden (Gömann, 2015). Folgende Variablen wurden verwendet, um die Schwankungen der Weizenerträge zu erklären, in erster Linie die negativen Ertragswirkungen:

- **Bodenzahl** zur Berücksichtigung der heterogenen Standortbedingungen innerhalb der zusammengefassten Bodenklimaräume
- **Trend**, um dem technischen Fortschritt Rechnung zu tragen
- **Tage mit Nässe zur Saatzeit**. Es wurde angenommen, dass mit zunehmender Anzahl der Nässetage die Wahrscheinlichkeit abnimmt, dass Weizen unter günstigen Bedingungen gesät werden kann
- **Tage mit Kahlfrost** zur Berücksichtigung des Einflusses extremer Fröste
- **Tage ohne Niederschlag im Zeitraum 10 Tage vor bis 20 Tage nach errechnetem Vegetationsbeginn**. Es wurde angenommen, dass bei einer zunehmenden Anzahl an Tagen ohne Niederschlag die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ausgebrachter Dünger nicht gelöst wird und nicht in ausreichendem Maß pflanzenverfügbar wird.
- **Niederschlagsmenge vom 21sten Tage nach errechnetem Vegetationsbeginn bis zur Ernte**. Es wurde angenommen, dass sich sowohl zu wenig als auch zu viel Niederschlag ungünstig auswirken. Aus diesem Grund wurde eine quadratische Funktionsform mit einem linearen und quadratischen Term für die Niederschlagsmenge unterstellt
- **Hitzetage (Tmax > 25°C**; im Zeitraum 5. Mai bis 15. Juni) beeinträchtigen beim Weizen die Kornzahl je Ähre und führen in Kombination mit Trockenstress zu Mindererträgen.
- **Tage mit Nässe in der Erntezeit** zur Berücksichtigung widriger Erntebedingungen

Die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse, die mit dem Programm SAS 9.3 (Procedure: PROC REG) differenziert nach ‚Regionscluster' durchgeführt wurde, sind für ausgewählte Regionscluster in Tabelle 3.3 ausgewiesen.

Die Beiträge der ‚Extremwetterlagenvariablen' zur Erklärung der Variabilität der beobachteten Weizenerträge sind, gemessen am Bestimmtheitsmaß (R^2), in den Regionen sehr unterschiedlich. Bestimmtheitsmaße von mehr als 0,2, d. h. 20 % der Varianz in den Weizenerträgen werden erklärt, sind für derart umfangreiche Querschnitts-Zeitreihenanalysen zufriedenstellende Ergebnisse. Sowohl das Vorzeichen als auch die Höhe der geschätzten Koeffizienten wiesen sowohl bei Variationen der Stichprobe als auch unterschiedlicher Anzahl (und Spezifikation) zusätzlicher erklärender Variablen, wie z. B. Niederschlagsmenge zur Saatzeit bzw. zum Vegetationsbeginn, eine hohe Stabilität auf.

Ein Großteil der Ertragsvariabilität basiert auf betriebsspezifischen Unterschieden, die sich durch die Bodenzahl bzw. nutzbare Feldkapazität nur teilweise erklären lassen. Werden die betriebs-

spezifischen Unterschiede bei den Schätzungen berücksichtigt (Fixed-Effect-Modell), liegen die Bestimmtheitsmaße in allen Regionen zwischen 0,4 bis 0,6. Die für die Extremwettervariablen geschätzten Koeffizienten ändern sich dabei nur wenig. Die Bodenzahl und nutzbare Feldkapazität werden beim Fixed-Effekt-Ansatz nicht benötigt. Die in Tabelle 3.3 ausgewiesenen Koeffizienten wurden mit Hilfe des rückwärtigen Ausschlussverfahrens bestimmt und sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5 % von null verschieden, d. h., sie hatten in dem Zeitraum 1995 bis 2013 einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Weizenerträge.

Im Beobachtungszeitraum wiesen die betrieblichen Weizenerträge in den meisten Regionen einen positiven **Trend** zwischen 0,2 bis 0,7 dt/ha auf. Für die Region ‚Hannover-Hildesheim', einer für den Weizenanbau bedeutenden Anbauregion, wurde kein signifikanter Trend ermittelt. Die geschätzten Koeffizienten für die **Bodenzahl** sind in allen Regionen positiv oder null (nicht signifikant).

Die Koeffizienten der **Nässetage** zur Saatzeit besagen, dass in den meisten Regionen bis auf die Boden-Klima-Region ‚Südwestliche Mittelgebirge' eine höhere Anzahl an Nässetagen zu geringeren Erträgen führten.

Tabelle 3.3: Schätzergebnisse zu den Auswirkungen von Extremwetterlagen auf Weizenerträge

	Intercept	Trend	Bodenzahl	nutzb. Feldk.	Nässe-Tage-Saat	Tage Kahlfrost	Tage o. Nied. Veg. Beginn	Niedschlag in der Vegetation		Hitze-Tage	Nässe-Tage-Ernte	Beobacht.	R^2
Boden-Klima-Räume	lin	lin	lin	lin	lin	lin	lin	lin	sqr	lin	lin		
Norddeutsche Küstenregion	81,50	0,24	0,259				-0,309		-0,00007	-0,600	-0,312	3911	0,123
Nord Osten Mecklenburg-Vorpommern	42,84	0,36	0,523	0,064		-0,799	-0,470	0,092	-0,00022	-1,521		1698	0,317
Leichte Böden Nordwest	56,33	0,37	0,153		-0,143	0,398	-0,488	0,232	-0,00060		-0,143	2264	0,067
Hannover, Hildesheim	78,06		0,094	0,024		-0,744	-0,576	0,148	-0,00049	-0,468		1181	0,205
Nord Osten Brandenburg	44,66	0,35	0,184		-0,206	-0,579		0,134	-0,00035	-0,987	-0,252	1895	0,207
Mitte Osten	31,18	0,63	0,400	-0,022		-0,474	-0,462	0,273	-0,00070	-0,180	-0,219	4834	0,241
Rheinische Hessische Ackerbaugebiete	46,41	0,37	0,067	0,090		-0,278	-0,128	0,189	-0,00054	-0,258		3466	0,152
Harz Rhön Th. Wald Erzgebirge By.Wald	18,51	0,70	0,612				-0,798	0,225	-0,00041			290	0,180
Westliche Mittelgebirge	67,20		0,238			-0,551				-0,452		690	0,051
Übergangs Lagen	34,05	0,31	0,306	-0,029	-0,177	-0,504	-0,233	0,221	-0,00045			7512	0,158
Süd Westliche Mittelgebirge	36,35	0,29		0,112	0,104	-0,755		0,155	-0,00036	-0,787		2277	0,081
Oberes Rheintal	62,93	0,44	0,193	-0,038	-0,172	-0,435				-0,470		3261	0,113
Ost Bayern	16,11	0,48						0,408	-0,00090			291	0,091
Donau Inntal	58,05	0,53			-0,303		-0,171	0,166	-0,00034		-0,106	2538	0,129
Bodensee Schwarzwald Schw. Alb	57,69	0,68			-0,352	0,796	-0,322	0,040				801	0,088
Voralpen Alpen	105,4			-0,205	-0,657	-1,010						145	0,196

Koeffizienten signifikant bei α=0,05.

Quelle: Eigene Berechnungen.

Kahlfrost wirkt sich in den meisten Regionen mit Ausnahme der Regionscluster ‚Leichte Böden Nordwest' und ‚Bodensee-Schwarzwald-Schwäbische Alp' negativ auf den Weizenertrag aus. In den bedeutenden Anbauregionen liegt die geschätzte Ertragseinbuße pro Kahlfrosttag zwischen 0,4 und 0,8 dt/ha. Die Gesamtwirkung extremen Kahlfrosts ist jedoch größer, da hier nur die Ertragseinbußen der nicht umgebrochenen Bestände berücksichtigt wurden. Die Schäden durch

den Umbruch und die Neueinsaat ausgewinterter Bestände sind hier nicht berücksichtig und wurden separat kalkuliert (vgl. Kapitel 3.2.3.3).

Eine erwartete negative Ertragswirkung von Wechselfrosttagen spiegelte sich in den Schätzergebnissen in nur drei Regionen wider. Multikollinearität, d. h., eine hohe Korrelation zwischen Kahlfrost und Wechselfrost, war keine Ursache für die unerwarteten Koeffizienten. Da die Variable darüber hinaus keinen hohen zusätzlichen Erklärungsbeitrag lieferte, blieb sie im Schätzansatz unberücksichtigt.

Tage ohne Niederschlag zu Vegetationsbeginn zeigten in allen Regionen eine negative Wirkung auf den Weizenertrag. Einen vergleichsweise hohen Einfluss hatten sie in der Region ‚Hannover-Hildesheim'. Da die negative Wirkung von Tagen ohne Niederschlag grundsätzlich weitgehend unabhängig von der Bodengüte erwartet wird, sind die vergleichsweise geringen Effekt im Regionscluster ‚Rheinische-Hessische-Ackerbaugebiete' überraschend.

Eindeutig positive Wirkungen hatte der Niederschlag, der in der restlichen Vegetationsperiode fällt. Gemessen an den geschätzten linearen Termen erhöhen 10 mm mehr Niederschlag den Weizenertrag zwischen 1,5 bis 2,5 dt/ha und umgekehrt. Ertragszuwächse, die im Rahmen von Beregnungsversuchen erzielt wurden (Fricke et al., 2011; Lüttger et al, 2005), liegen innerhalb der genannten Spanne. Einen geringen oder keinen Einfluss hat der Niederschlag in Regionen mit ausreichenden Niederschlägen wie an der Küste, in Mittelgebirgen oder auf Standorten mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität wie Hannover-Hildesheim. Der Einfluss geringer Niederschläge ist zusammen mit dem Einfluss von Hitzestress zu betrachten.

Hitzetage treten oft in Kombination mit Trockenheit auf. Einerseits ist die Verdunstung höher und andererseits ist die Wahrscheinlichkeit von Niederschlägen geringer. Nach den Schätzergebnissen wirkt sich eine steigende Anzahl an Hitzetagen, wie erwartet negativ auf den Weizenertrag aus. Eine auffällig hohe Wirkung haben Hitzetage, vor allem in Ostdeutschland. Hier lässt sich allerdings die Wirkung, wie erwähnt, nicht eindeutig vom Einfluss des Niederschlags in der Vegetationsperiode differenzieren. Bleibt die Variable ‚Hitzetage' unberücksichtigt, erhöht sich der Koeffizient für den Niederschlag. Dieser Effekt ist weniger ausgeprägt in den Regionen ‚Hannover-Hildesheim' und ‚Mitte-Osten' und tritt in den übrigen Regionen nicht auf.

Nässetage zur Ernte wirken sich nach den Ergebnissen, wie erwartet, negativ auf den Ertrag aus, vor allem in der norddeutschen Tiefebene, aber auch im ‚Donau-Inntal'.

3.2.3.3 Abschätzung von Schäden ausgewählter Extremwetterlagen

Auf der Basis der in Tabelle 3.3 ausgewiesenen Ergebnisse werden im Folgenden für ausgewählte Extremwetterlagen Schäden bzw. Ertragsverluste kalkuliert. Die Höhe des Schadens hängt vom Erzeugerpreis für Weizen ab, für den 20 Euro/dt unterstellt wurden. Dazu wurde in einem ersten

Schritt überprüft, inwiefern die Schätzergebnisse in der Lage sind, die Auswirkungen extremer Jahre abzubilden.

Die Witterungsverhältnisse im Jahr 2003 waren in mehrfacher Hinsicht extrem. Einem strengen Winter mit bundesweit rund 2,7 Tagen Kahlfrost (Mittel 1961-2013 ca. 1,2) folgte ein Frühjahr mit rund 27 Tagen von 30 Tagen um den Vegetationsbeginn ohne Niederschlag (Mittel 1961-2013 ca. 20), einer Niederschlagsmenge von lediglich 130 mm in der Vegetationsperiode (Mittel 1961-2013 ca. 190 mm) verbunden mit 14 Hitzetagen in der Vegetation (Mittel 1961-2013 ca. 5). Nach Berechnungen auf Basis der Modellergebnisse lag der sektorale Weizenertrag im Jahr 2003 um 10,8 % unter demjenigen, der bei mittlerer Ausprägung der Extremwettervariablen erzielt worden wäre. Davon entfielen 7 % auf den Kahlfrost, 22 % auf die Frühjahrstrockenheit und der Rest auf den Trockenheits- und Hitzestress während der Vegetationzeit. Der beobachtete Weizenertrag fiel je nach Bezugsgröße (Zeitraum für Trend bzw. Mittelwerte) um 10,5 bis 12,3 % geringer aus. Für das trockene Jahr 1976 wurde eine vergleichbar zufriedenstellende Reproduktion des beobachteten Ertragsverlustes erzielt.

Angesichts der plausiblen Reproduktion der Schadereignisse sollen die Modellergebnisse im Folgenden auf Kahlfrost, Tage ohne Niederschlag zum Vegetationsbeginn sowie Trockenheit und Hitze während der Vegetationszeit angewendet werden, um die jeweiligen zu erwartenden monetären Schäden einzuordnen. Dabei wurden in Abhängigkeit der statistischen Verteilung des Extremereignisses unterschiedlich vorgegangen. Bei Kahlfrost wurde eine Kahlfrostdauer von mindestens 5 Tagen festgelegt. Bei den anderen genannten Extremwettervariablen wurde auf der Basis ihrer Standardabweichung regionalspezifisch die Ausprägung der Variablen errechnet, die statistisch betrachtet alle 15 Jahre auftritt (Bezugszeitraum 1961-2013). Definitionsgemäß liegt diese Ausprägung um das 1,5fache der Standardabweichung über bzw. unter dem Mittel.

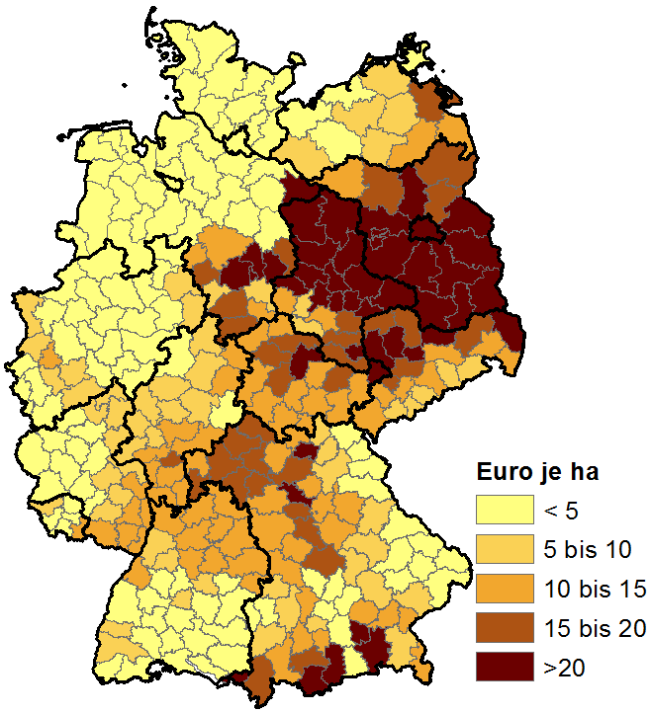
Auswirkungen eines Winters mit mindestens 7 Kahlfrosttagen: Bei dieser Dauer ist neben den Ertragsverlusten mit erheblichen Auswinterungen zu rechnen. Es wurde angenommen, dass 25 % der ausgesäten Winterweizenflächen umgebrochen und neu eingesät werden. Als Kosten für die Neueinsaat wurden 500 Euro angesetzt.

Nach den Berechnungen beläuft sich der sektorale Minderertrag für Winterweizen im Jahr des Auftretens auf rund 0,9 Mio. t (3,6 % der durchschnittlichen Erntemenge) und die Erlösverluste auf 171 Mio. Euro. Für die Auswinterung wurden 0,6 Mio. ha (25 % der Anbaufläche) kalkuliert und etwa 318 Mio. Euro Kosten für Umbruch und Neuansaat. Unter Berücksichtigung der regional unterschiedlichen Wiederkehrhäufigkeiten (vgl. Abbildung 3.12; rechte Karte) beträgt der zu erwartende durchschnittliche Ernteverlust 64.000 t und der Erlösverlust rund 13 Mio. Euro pro Jahr. Zum Vergleich: Im Zeitraum von 2000/01 bis 2013/14 belief sich die wegen Auswinterung oder anderer Schäden umgepflügte Fläche bei Winterweizen auf 1,5 % der Aussaatfläche, bei Wintergerste auf 2,0 % und Winterraps auf 1,4 %. Beim Roggen wurden nur 0,4 % der Aussaatflächen umgepflügt (BMEL, 2015b). Das bedeutet, dass die annahmebasierte Auswinterung in Höhe von 1,5 % allein für Kahlfrost eher zu hoch angesetzt sein dürfte. Die Kosten der Neuansaat belaufen

sich nach den Kalkulationen auf 23 Mio. Euro. Die Gesamtkosten für das Kahlfrostereignis summieren sich auf 36 Mio. Euro auf. Das Ergebnis ändert sich mit jedem Prozentpunkt, der für den Anteil der umzupflügenden Fläche unterstellt wird (z. B. 26 % anstatt 25 %) um 1 Mio. Euro. Je nach Annahme für den Umbruch (20-30 % der Aussaatfläche) und Erzeugerpreis für Weizen (15-25 Euro/dt) schwanken die Gesamtkosten zwischen 30-45 Mio. Euro.

Wird der durch das spezifische Extremwetterereignis erwartbaren Schaden auf die Gesamtfläche bezogen, ergibt sich die sogenannte Faire-Prämie. Diese wäre jedes Jahr zurückzulegen, um den entstandenen Schaden des beschriebenen Extremwetterereignisses ‚sieben Kahlfrosttage' zu kompensieren. Die regionalen Unterschiede der zu erwartenden Schäden zeigt Abbildung 3.17. Auffällig sind die überdurchschnittlichen hohen Kosten in den besonders kahlfrostgefährdeten östlichen Regionen des norddeutschen Flachlandes.

Abbildung 3.17: Regionale monetäre Verluste durch mindestens 5 Tage Kahlfrost bei Winterweizen (mittlere jährliche Erlösverluste und Kosten für die Neuansaat)

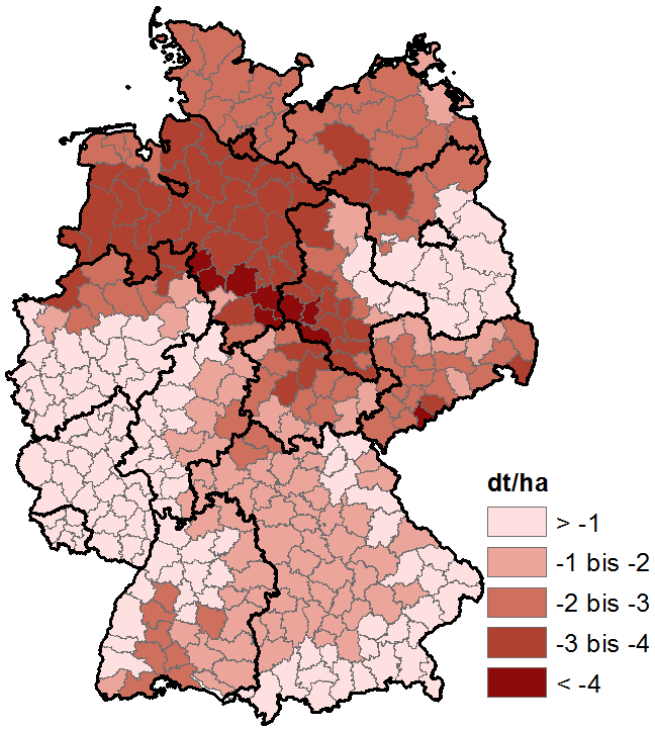


Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung.

Auswirkungen einer statistisch alle 15 Jahre wiederkehrenden (hohen) Anzahl von Tagen ohne Niederschlag 10 Tage vor bis 20 Tage nach Vegetationsbeginn: Konkret beläuft sich die Anzahl der Tage ohne Niederschlag bundesweit (gewichtet mit den regionalen Weizenflächen) auf rund 21 Tage. Das regionale Maximum liegt bei 29 Tagen. In der Region Mitte-Osten betrug das 1,5fache der Standardabweichung 27 Tage. Dieser Wert wurde in den Jahren 2003, 2011 und 2012 nahezu erreicht (vgl. Abbildung 3.13).

Die regionalspezifischen Ertragsverluste infolge einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden hohen Anzahl an Tagen ohne Niederschlag zeigt Abbildung 3.18. Im sektoralen Durchschnitt beträgt der Minderertrag rund 2 dt/ha, wobei erhebliche regionale Unterschiede zu verzeichnen sind. Da die negative Wirkung von Tagen ohne Niederschlag grundsätzlich auf allen Ackerflächen unabhängig von Ihrer Fruchtbarkeit relevant sein dürfte, sind die vergleichsweise geringen Effekte in der Region ‚Rheinisch-Hessische-Ackerbaugebiete' zu hinterfragen und zu prüfen. Bundesweit würde die Weizenernte um 0,65 Mio. t geringer ausfallen und 131 Mio. Euro weniger erlöst werden. Zum Vergleich: das Jahr 2003 fiel diesbezüglich etwas weniger extrem aus.

Abbildung 3.18: Regionale Auswirkungen einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden hohen Anzahl an Tagen ohne Niederschlag 10 Tage vor bis 20 Tage nach Vegetationsbeginn auf die Weizenerträge

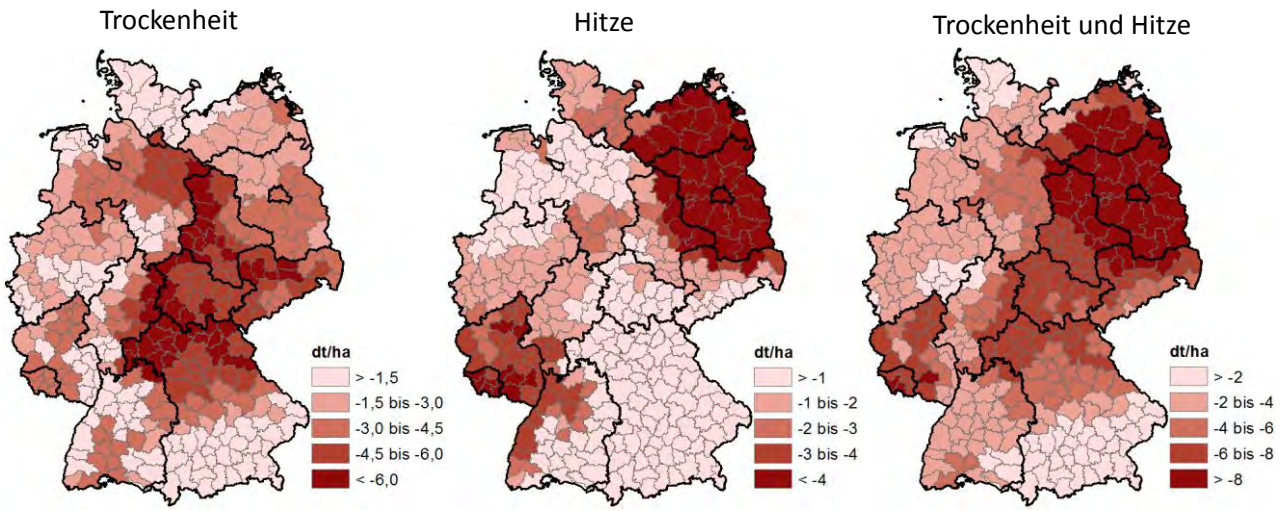


Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung.

Auswirkungen einer statistisch alle 15 Jahre wiederkehrenden Trockenheit in der Vegetationsperiode bzw. wiederkehrenden Hitzeperiode: Die Niederschlagssumme liegt definitionsgemäß um das 1,5fache der Standardabweichung (‚normaler' Schwankungsbereich) unterhalb des mittleren Niederschlags, was bundesweit rund 114 mm gegenüber dem Mittel (1961-2013) von 190 mm bedeutet. Bei diesem Ereignis, das beispielsweise im Regionscluster Mitte-Osten seit 1961 in der Tat drei Mal auftrat, letztmalig 2003, fallen weniger als 100 mm Niederschlag (vgl. Abbildung 3.14). Die Anzahl der Hitzetage würde entsprechend um das 1,5fache über der durchschnittlichen Anzahl an Hitzetagen liegen. Im Regionscluster Mitte-Osten würden entsprechend 12 Hitzetage in der sensiblen Phase auftreten, gegenüber 6 Tagen im langjährigen Mittel (vgl. Abbildung 3.15). Seit dem Jahr 2000 trat dieser Fall allein drei Mal (2000, 2003 und 2007) ein.

Die regional spezifischen Effekte einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden Trockenheit in der Vegetationsperiode sind in Abbildung 3.19 dargestellt. Die im Mittel noch geringeren Niederschläge im Vergleich zum Jahr 2003 führen zu einem durchschnittlichen Ertragsrückgang um 3,2 dt/ha (2,7 dt/ha im Jahr 2003). Bezüglich der Anzahl an Hitzetagen war jedoch das Jahr 2003 extremer. Bundesweit waren es 14,4 Tage und damit mehr als die 10,7 Tage, die statistisch alle 15 Jahre zu erwarten sind. Für das Jahr 2003 errechnete sich ein Ertragsrückgang um 3 dt/ha gegenüber 2 dt/ha alle 15 Jahre. Die regionalen Unterschiede sind beträchtlich. Die höchsten regionalen Ertragsrückgänge eines kombinierten Trockenheits- und Hitzestresses belaufen sich nach den Berechnungen auf bis zu 17 dt/ha. Dabei ist zu beachten, dass die Kombination dieser beiden Ereignisse nicht notwendigerweise statistisch alle 15 Jahre auftritt. Sie würde zu einem Ernteausfall in Höhe von 1,7 Mio. t Weizen führen, etwa 7 % der Erntemenge.

Abbildung 3.19: Regional spezifische Auswirkungen einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden Trockenheit bzw. Hitzephase in der Vegetationsperiode auf die Weizenerträge



Quelle: Daten des Statistischen Bundesamts. Eigene Berechnungen und Darstellung.

Aus den dargestellten Ertragsverlusten lassen sich die mittleren jährlichen zu erwartenden Erlösverluste ableiten.

3.2.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen für ausgewählte und auch nach Meinung von Experten und Praktikern relevante Extremwetterlagen die Auswirkungen auf regionale Weizenerträge und monetäre Verluste in Deutschland. Hierbei handelt es sich um Extremwetterlagen, die einen systemischen Charakter aufweisen. Einige sehr lokal auftretende Extremwetterlagen, wie Hagel und Starkregen, konnten wegen nicht belastbarer Beobachtungsdaten bzw. eingeschränkter räumlicher Repräsentativität der Wetterstationsdaten nicht analysiert werden. So wird ein an einer Wetterstation gemessenes

Starkregenereignis in die Fläche interpoliert, auch wenn dort keine Starkregenereignisse stattfanden. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall. Nicht an Wetterstationen beobachtete Starkregenereignisse haben sicherlich eine Wirkung auf die Weizenerträge. Da die erklärende Variable aber keine entsprechende Ausprägung (Schwankung) aufweist, bleibt die Ertragsschwankung unerklärt.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass der Fokus der Wirkungsanalysen auf Extremwettern lag, d. h., in erster Linie auf den negativen Ertragsausschlägen. Positive Ertragsschwankungen (Rekordernten) lassen sich mit diesem Ansatz zur eingeschränkt reproduzieren. Dafür müssten entsprechende Variablen für optimale Wachstumsbedingungen definiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass die beobachteten extremen negativen Ertragsschwankungen, wie im Jahr 2003, in der Regel nicht auf eine singuläre Anomalie (Extremwetterlage) zurückzuführen sind, sondern das Ergebnis mehrerer extremer Wetterlagen sind (2003: Kahlfrost, Frühjahrstrockenheit sowie Trockenheit- und Hitze während der Vegetationsphase).

Die Auswirkungen einer extremen Trockenheit, nämlich gänzlich ausbleibender Niederschläge von der Bestockung in der ersten Aprildekade bis zur Ernte im Verlauf des Juli, auf die Ertragsbildung bei Wintergetreidearten haben Schittenhelm et al. (2014) am Standort Braunschweig untersucht. Das Ziel dieser Studie war es, die maximale Auswirkung von Wasserknappheit auf den Ertrag von Wintergetreidearten aufzuzeigen. Das pflanzenverfügbare Wasser im Boden betrug zur Bestockung rund 100 mm. In den Beständen, in denen mit Hilfe von Rain-Sheltern der Trockenstress simuliert wurde, nahm das verfügbare Bodenwasser nach etwa 30 - 40 Tagen auf unter 30 % ab. Die Kornerträge, die nur auf der Basis des nach dem Winter verfügbaren Bodenwassers erzielt wurden, betrugen etwa 40 % der unter kontrollierten Bedingungen (ausreichendes Bodenwasser) erzielten Erträge.

Die Analysen der Klimaprojektionen (vgl. Kapitel 2.3) zeigen mit Ausnahme einer Zunahme von Hitzetagen keine auffälligen (signifikanten) Änderungen (Zunahmen) der Häufigkeit von Extremwetterlagen bis zur Mitte des Jahrhunderts. Die in den letzten 15 Jahren zu beobachtende Häufung von Frühjahrstrockenheit ist in den Klimaprojektionsdaten nicht abgebildet. Trnka et al. (2014) kommen bei Ihrer Auswertung der neuen RCP-Szenarien zu ähnlichen Ergebnissen für Mitteleuropa (z. B. Deutschland und Niederlande). Sie weisen jedoch auf eine höhere Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Hitze- und Trockenstress hin. Ob Kahlfröste zunehmen werden, lässt sich nicht klären. In einer Studie kommen Wechsung et al. (2008) zu dem Ergebnis, dass die „Zukunftsaussichten der ostdeutschen Landwirtschaft durch die absehbare Entwicklung der Flächenproduktivität“ bei der in der Studie projizierten Klimaänderung (Basis ECHAM5 regionalisiert mit STAR II) nicht eingeschränkt werden.

Um in Ergänzung zu den statistischen Analysen sowie zu den Resultaten von Pflanzenwachstumsmodellen (a) die Relevanz der Definition verschiedener Extremwetterlagen aus der Sicht der Praxis zu erfassen und (b) ihre Auswirkungen auf die Ackerkulturen und (c) die Anpassungsoptionen von landwirtschaftlichen Unternehmern exemplarisch zu erheben, wurde vom Thünen-

Institut für Betriebswirtschaft ein Berater-Workshop durchgeführt.[5] Die teilnehmenden Berater repräsentierten dabei die Regionen Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Niederrhein, Niederbayern, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Das Auftreten, die Relevanz und die Wirkungen der untersuchten Extremwetterlagen wurden bestätigt und teilweise präzisiert:

- Es wurde die Hypothese formuliert, dass der Februar zunehmend der kälteste Monat des Jahres wird, was bei gleichzeitig milden Wintern das Auswinterungsrisiko latent erhöht, weil die Pflanzenbestände zu diesem Zeitpunkt deutlich stärker entwickelt und damit anfälliger sind als bei „früher üblichen“ Wintern.
- Die hohen Niederschläge zur Ernte von Weizen und Raps werden vielfach dadurch zu einem ackerbaulichen Problem, dass gleichzeitig vermehrt sehr niedrige Temperaturen und starke Bewölkung herrschen. Folglich findet nur eine sehr geringe Verdunstung statt, die Böden und die Pflanzenbestände trocken nur sehr zögerlich ab.
- Es besteht der Eindruck, dass die früher vielfach zu beobachtende Frühsommer-Trockenheit vermehrt im zeitigen Frühjahr (März, April) zu beobachten ist und dann insbesondere die Nährstoff-Aufnahme der Pflanzen (v.a. von Weizen und Raps) und damit deren Wachstum reduziert wird.

Nach Einschätzung der befragten Experten gibt es – von kleinräumigen Extremen abgesehen – keine regelmäßigen, großräumigen Extremwetterereignisse, die wirklich verheerende wirtschaftliche Konsequenzen infolge von Totalausfällen haben. Gleichwohl gibt es eine Reihe von vielfach kulturartenspezifischen Wetterereignissen, die regelmäßig erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachen, wie z. B. Starkregen. Wetterrisiken sind augenscheinlich eher kleinräumig – maximal auf Ebene von Bundesländern - relevant. Wasser ist - sei es wegen Überfluss oder Mangel - das dominierende ackerbauliche Problem. Mit einer Ausweitung von Beregnungsmöglichkeiten ließen sich witterungsbedingte Schäden nachhaltig und deutlich reduzieren. Umgekehrt führen alle (umwelt-)politischen Maßnahmen zum Rückbau von Vorflutern oder zur Verminderung der Drainage von Flächen dazu, die potenziellen Kosten von zu hohen Niederschlägen im Herbst zu erhöhen.

Quantitative Ertragseffekte sind die dominierenden Schäden über alle hier betrachteten Kulturarten hinweg; im Fall von Getreide können Verluste in Folge von geringem Korngewicht eintreten. Gleichwohl gibt es, insbesondere bei Kartoffeln und Getreide, Schäden infolge von witterungsinduzierten phytosanitären Problemen (Mykotoxine und Fäulnis). Insbesondere bei Kartoffeln können diese auch wirtschaftliche Totalschäden verursachen. Bei nicht global gehandelten Spezialkulturen wie Kartoffeln ist bei der wirtschaftlichen Analyse von Kosten von Wetterkalamitäten

[5] An dieser Stelle bedanken sich die Autoren dieser Studie ganz herzlich bei den Kolleginnen und Kollegen der Beratung für ihre wertvollen Hinweise und Anregungen; ohne sie wäre dieser Teil der Untersuchung nicht möglich gewesen. Workshop-Teilnehmer waren: Herr Ulrich Henne (LUB SH), Frau Andrea Ziesemer (LFA MV), Herr Wilfried Beeker (LWK NRW), Herr Joachim Dömling (AELF SW Bayern), Herr Stephan Deike (FAP Sachsen-Anhalt), Frau Katharina Jerchel (Hanse Agro), Herr Reimer Mohr (Hanse Agro).

ggf. die Wechselbeziehung zwischen sinkendem Angebot und steigenden Preisen zu berücksichtigen. Das heißt, Einbußen bei den Erträgen werden u.U. zumindest teilweise kompensiert durch steigende Preise.

3.2.4 Anpassungsoptionen

3.2.4.1 Agronomische Maßnahmen

Mit Blick auf die betrachteten Extremwetterlagen bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Anpassung und Reduktion von Schäden. Zur Vermeidung von Kahlfrostschäden können winterhärtere Sorten oder gar Kulturen (z. B. Roggen) angebaut werden. Um eine optimale Düngewirkung im Frühjahr zu erreichen, ist Flexibilität bezüglich des Düngezeitpunktes gefragt. Damit der optimale Düngezeitpunkt zuverlässig bestimmt werden kann, ist u.a. eine verlässliche mittelfristige (wochenweise) Wettervorhersage, insbesondere der Tage mit Niederschlag, unerlässlich.

Hinsichtlich des zunehmenden Hitzestresses beschreiben Trnka et al. (2014) den Trade-off der Verwendung früherer Sorten, bei denen einerseits die Gefahr des Hitzestress verringert wird, andererseits aber aufgrund der im früheren Stadium der Vegetationsperiode geringeren Strahlung negative Effekte auf die Kornerträge zu erwarten sind. Dieser Trade-off ist auch bei der oben genannten Wahl kältetoleranterer Sorten oder Kulturen abzuwägen.

Um den negativen Auswirkungen von Trockenstress entgegenzuwirken, bestehen einerseits agronomische Maßnahmen wie eine ‚wassersparende' und standortangepasste Bodenbearbeitung und andererseits die im Folgenden zusammengefassten Möglichkeiten des Wassermanagements. Einige der ‚wassersparenden' Maßnahmen, wie pfluglose Bodenbearbeitung, werden auch in Regionen mit einer vergleichsweise hohen Neigung zu Vernässungen eingesetzt. Die überwiegend bei zur Vernässung neigenden Flächen eingesetzte Maßnahme sind Drainagen. In einer Studie von Morton et al. (2015) gaben rund drei Viertel der befragten Betriebe im Mittleren Westen der USA (Corn Belt) an, drainierte Flächen zu bewirtschaften.

3.2.4.2 Wassermanagement

Zusammenfassung des Schlussberichts des EH-Vorhabens (2813HS007) „Wassermanagement in der Landwirtschaft" bearbeitet vom ZALF / Steidl et al. (2014).

Eine Wasserknappheit ist in Deutschland, zumindest gegenwärtig und auf nationaler Ebene, nicht gegeben. Die Darstellung der Niederschlagsverteilung, klimatischen Wasserbilanz sowie der nutzbaren Feldkapazität (nFk_{we}) in Deutschland zeigt große regionale Unterschiede für die Vegetationsperiode. Es lassen sich Defizitstandorte ermitteln, an denen die Verdunstung höher ausfällt als

der Niederschlag (Bsp. in Nordostdeutschland) und die Wirtschaftlichkeit des Anbaus einiger Fruchtarten durch Bewässerung verbessert werden könnte. Das benötigte Zusatzwasser kann durch Entnahme aus Grund- bzw. Oberflächenwasser, Wasserspeichern, Grundwasseranreicherung oder Wasserüberleitungen verfügbar gemacht werden. Daten zur aktuellen Situation der landwirtschaftlichen Bewässerung wurden in der Landwirtschaftszählung 2010 erhoben. Diese beinhaltet auf Landkreisebene Angaben zu Flächenanteilen, Wassermengen, bewässerten Fruchtarten und zur Herkunft des Zusatzwassers. Etwa 3,8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands werden demnach bewässert. Das größte geschlossene Beregnungsgebiet befindet sich in Nordost-Niedersachsen, weitere Beregnungsgebiete sind die Vorderpfalz, das Hessische Ried, das Niederrheingebiet sowie das „Knoblauchsland“. Den flächenmäßigen Hauptanteil der bewässerten Fruchtarten bildeten im Bezugsjahr 2009 Getreide, gefolgt von Kartoffeln. Das verwendete Wasser wird vorwiegend aus dem Grundwasser entnommen, wobei große regionale Unterschiede bestehen. Zu etwa 80 % werden Beregnungsverfahren angewendet (20 % Tropfbewässerung).

Die Entnahme von Beregnungswasser aus Grund- und Oberflächenwasser ist in Deutschland rechtlich eindeutig in den Wasserhaushaltsgesetzen und entsprechenden Verordnungen der Länder, die - oft unterschiedliche - Vorgaben für Entnahmemengen und Nutzungsentgelte enthalten, geregelt und wird von den Wasserbehörden der Länder umgesetzt und überprüft. Die Erlaubnisse / Bewilligungen zur Wasserentnahme werden befristet erteilt, um mögliche Veränderungen der Rahmenbedingungen, z. B. ein geringeres nutzbares Wasserdargebot, ggf. abfangen zu können.

Auf Standorten mit Gefahr zur Vernässung werden Entwässerungsverfahren angewendet. Diese können unter- sowie oberirdisch, als Dränung oder Grabenentwässerung sowie frei oder reguliert erfolgen. Schätzungen nach werden in Deutschland 2 - 2,6 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche durch Rohrdränung entwässert, jedoch ist eine Ermittlung der tatsächlich existierenden Dränsysteme aufgrund der schlechten Datenlage kaum möglich. Stau- oder Grundwasser kann auf fast allen dafür in Frage kommenden Flächen abgeleitet werden. Der geltende Rechtsrahmen erlaubt in den meisten Fällen die Instandhaltung und Erneuerung bestehender Dränanlagen und Grabensysteme.

Sowohl die Be- als auch Entwässerung dient als Wassermanagementsystem für die Landwirtschaft der Ertragssicherung sowie der Abmilderung der Auswirkungen beim Eintreten von Extremwetterlagen. Die Ergebnisse von verschiedenen Bewässerungsversuchen zeigen einen in bestimmten Grenzen linearen Verlauf der Mehrerträge durch Bewässerung. Auch durch Dränung kann eine Ertragszunahme erreicht werden. Die Rentabilität der Wassermanagementsysteme Bewässerung, Entwässerung, Wasserspeicherung oder -überleitungen wird durch die dabei anfallenden Investitionskosten, Verfahrenskosten sowie den Instandhaltungskosten bestimmt. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist die Gegenüberstellung des Nutzens (z. B. Erlöse durch Mehrertrag) entscheidend.

Die beregnungskostenfreie Leistung als Differenz aus monetärem Mehrertrag und Mehrkosten kann als verfahrensbezogene Bewertungsmethode für die Rentabilität der Beregnung verwendet werden. Mittels der Kapitalwertmethode kann die langfristige Rentabilität der Beregnung für verschiedene Fruchtarten mit unterschiedlichen Zusatzwasserbedarfen ermittelt werden. Unregelmäßig auftretende Extremwetterlagen, wie Trockenphasen, erhöhen den Mittelwert des Zusatzwasserbedarfs über den Planungszeitraum und haben somit einen, wenn auch niedrigen Einfluss auf die Rentabilität von Bewässerungsanlagen. Bei einer Zunahme der Häufigkeit oder der Ausprägung von Trockenjahren steigt die Beregnungswürdigkeit sowohl bereits beregneter Standorte als auch solcher, bei denen bislang noch keine Beregnungswürdigkeit besteht. Die Entwicklung ist außerdem abhängig von der zukünftigen Änderung der Kostenfaktoren der Wassermanagementsysteme sowie der Entwicklung der landwirtschaftlichen Produktpreise. So würde ein steigendes Preisniveau die Rentabilität der Beregnung für einige Fruchtarten und Standorte erhöhen, während ein fallendes Preisniveau zum Verlust der Rentabilität auf Grenzstandorten führt. Für Winterroggen und Silomais ist die Beregnung weder aktuell noch bei einem Preisanstieg bis zu 20 % rentabel, während die Rentabilität für Kartoffeln sogar bei einer Preisminderung bis zu 20 % noch 97 % der aktuell rentablen Flächen bestehen bleibt.

Der Einfluss der Klimaänderung und der Verdopplung der Beregnungsfläche auf Abflusssituation und die Wirtschaftlichkeit der Beregnung wurde für ein Fallbeispiel zur Beregnung in einem Brandenburger Untersuchungsgebiet mit 119 ermittelten Beregnungsnutzern untersucht. Infolge der Änderung des Klimas können in den Monaten Mai, Juli und August deutliche Gebietsabflussrückgänge erwartet werden. Der Beregnungsbedarf steigt hingegen etwas an. Trotzdem bleibt der Einfluss der Beregnung auch wegen der geringen Anteile der beregneten Flächen an der Einzugsgebietsfläche eher gering. Ernstzunehmende Defizite beim Wasserdargebot konnten allerdings nicht abgeleitet werden. Bei fast allen Fruchtarten wurden leicht zunehmende Mehrerträge festgestellt. Eine Beregnung wäre daher in der Zukunft rentabler als unter heutigen Klimabedingungen. Die Zunahmen sind jedoch sehr gering und können leicht von Änderungen der Markt- und Betriebsmittelpreise überlagert werden.

Die angenommene Verdopplung der heute beregneten Flächen des Fallbeispiels Brandenburg bis zur nahen Zukunft zeigt zwar deutlich geringere Änderungen der Gebietsabflüsse als die ohne Flächenverdopplung, würde aber die in den beregnungsrelevanten Monaten ohnehin schon geringen Abflüsse der Nuthe und Plane weiter reduzieren. Der infolge der Flächenverdopplung gestiegene Beregnungswasserbedarf kann aber noch überwiegend gedeckt werden. Nur in trockenen Jahren sind für wenige Fruchtarten geringe Defizite zu erwarten. Damit wird die Wirtschaftlichkeit der Beregnung jedoch nicht beeinträchtigt. Aufgrund der in dieser Region noch immer relativ geringen Beregnungsflächen wäre zumindest unter den Modellannahmen eine Verdopplung der Flächen wirtschaftlich vorteilhaft.

In Deutschland werden einige **großräumige Wasserüberleitungen** zur Bereitstellung von landwirtschaftlichem Bewässerungswasser genutzt. Ausgehend von der technisch möglichen Verteilung des entnommenen Oberflächenwassers in einem Korridor von 2 km zu beiden Uferseiten

ohne Inanspruchnahme weiterer Überleitungssysteme, könnten ca. 359.000 ha landwirtschaftliche Fläche zusätzlich durch die Entnahme von Bewässerungswasser aus Kanalsystemen bewässert werden. Im Einzelfall ist das jedoch abhängig von den ackerbaulichen Voraussetzungen, den administrativen Anforderungen, der technischen Realisierbarkeit und schließlich der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit. Vor der Errichtung neuer Überleitungssysteme sollten zunächst alle Möglichkeiten, die regionalen Wasserressourcen besser zu bewirtschaften, sowie der Wasserbeschaffung und der Erhöhung der Effizienz der Wassernutzung im eigenen Einzugsgebiet beurteilt und ausgeschöpft werden. Die Planung für jede vorgeschlagene Wasserüberleitung muss sich nach den Grundsätzen einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung ausrichten, unter der aktiven Beteiligung aller Akteure auf lokaler (kommunaler), Landes- und Bundesebene.

In bewässerungsintensiven Regionen zeigt sich, dass bei regionaler Wasserknappheit die Bewässerung kaum heruntergefahren wird. Die dort entstandenen Verwertungsbedingungen für landwirtschaftliche Produkte veranlassen stattdessen die Erschließung neuer Bewässerungsquellen wie Überleitungen oder gar gereinigtes Abwasser (Bsp. Knoblauchland, Uelzen). Eine Analyse der Rahmenbedingungen, die diese hohe Bewässerungsintensität fördern (z. B. Konzentrationen der verarbeitenden Industrie), und die Prüfung einer möglichen Verlagerung der Produktionsschwerpunkte auf andere Regionen mit ähnlichen Klima- und Bodenbedingungen sowie ausreichend verfügbarem Wasserdargebot sind zu empfehlen. Jedoch kann auch auf andere politische Steuerungsinstrumente für eine Umverteilung der Bewässerungsintensität, wie z. B. die Steuerung über höhere lokale Abgaben, zurückgegriffen werden. In den Bundesländern ist eine einheitlich geregelte Erhebung von Gebühren für die Wassernutzung zu empfehlen, die je nach Wasserdargebot auch unterschiedlich hoch sein bzw. ansteigen können. Eine Mindestgebühr ist zur Vermeidung von Wettbewerbsverzerrungen zwischen den Ländern geboten.

Fördermöglichkeiten sollten sich auf ein Wassermanagement zur Abmilderung der Effekte von Extremwetterlagen, z. B. Trockenphasen, konzentrieren. Da schon heute in einigen Regionen der Wasserhaushalt durch die Bewässerung stark beansprucht wird, sollte sich eine Investitionsförderung zur Ausdehnung der Bewässerungsflächen an der regionalen Verfügbarkeit des Zusatzwassers orientieren (z. B. Gebietskulissen). Bewässerungsmaßnahmen sollten nur in den Gebieten mit einem ausreichenden Zusatzwasserdargebot gefördert werden und sich dort aus Gründen einer ressourcenschonenden Wassernutzung an bereits in Förderprogrammen einiger Bundesländer verfolgte Fokussierung auf wassersparende bzw. effizienzsteigernde Bewässerungsmaßnahmen konzentrieren. In Gebieten mit einem nicht mehr ausreichend verfügbaren Zusatzwasserdargebot böten sich Förderungen für eine Wasserbereitstellung aus anderen Gebieten an. Dabei sollte aber geprüft werden, ob der gesellschaftliche Nutzen die gesellschaftlichen Kosten tatsächlich übersteigt, wenn Maßnahmen über die hier gezeigten Möglichkeiten der großräumigen Wasserüberleitung hinausgehen sollen. Die Förderung des Baus neuer, rein für die Bewässerung dienenden Wasserüberleitungssysteme ist ökonomisch und ökologisch fraglich. Unabhängig vom Zusatzwasserdargebot sollte eine Beratung zu wassersparenden Produktionsverfahren (Sortenwahl, Anbauweisen, Bodenbearbeitung) und Forschungsvorhaben zu den wassersparenden Anbauverfahren bzw. Bewässerungstechnologien gefördert werden. Letztlich können auch Versi-

cherungslösungen günstiger als eine Förderung von Investitionen in neue, leistungsfähigere Bewässerungsanlagen sein.

3.2.4.3 Abwendung negativer wirtschaftlicher Folgen

Beitrag aus dem Schlussberichts des EH-Vorhabens (2813HS006) „Abwendung bzw. Reduzierung wirtschaftlicher Folgen von Extremwetterverhältnissen für die Landwirtschaft in Deutschland" bearbeitet von der Georg August-Universität Göttingen / Feil und Mußhoff (2015).

Mit Hilfe von Ernteertragsversicherungssystemen lassen sich bei Ackerkulturen negative wirtschaftliche Folgen abwenden. Um die Wirksamkeit verschiedener Optionen zu bewerten, wurden auf Basis betrieblicher Daten Simulationen für unterschiedliche Standortbedingungen und Wetterereignisse durchgeführt. Die untersuchten Betriebe liegen in den Landkreisen Herzogtum Lauenburg, Peine, Düren, Eichstätt, Spree-Neiße und Teltow-Fläming. Diese Landkreise sind sowohl in Bezug auf ihre räumliche Lage als auch in Bezug auf die Bodengüte und die klimatischen Bedingungen relativ heterogen und bilden somit einen guten Querschnitt für die unterschiedlichen Produktionsbedingungen in der deutschen Landwirtschaft. Als Grundlage für die Wirksamkeitsanalyse der zu untersuchenden RMI wurde der betriebliche Weizenertrag herangezogen, da Weizen in Deutschland die Ackerkultur mit der größten Anbaufläche ist. Ertragsdaten für alle Betriebe lagen für den Zeitraum von 1995 bis 2012 vor.

Zur Analyse der Wirksamkeit potenzieller Versicherungsinstrumente zur Absicherung gegen Extremwetterrisiken auf den oben beschriebenen Betrieben wurde die historische Simulation eingesetzt (Details siehe Feil und Mußhoff, 2014). Zur Messung der Wirksamkeit einer Versicherung kann die Hedgingeffektivität herangezogen werden. Sie gibt an, wie stark die Streuung (z. B. die Standardabweichung) der relevanten Erfolgsgröße (z. B. des Erlöses) durch den Einsatz der Versicherung prozentual verringert wird. Folgende Versicherungstypen wurden untersucht:

- Betriebsertragsversicherung mit 10 % bzw. 20 % Selbstbehalt
- Regionsindexversicherung mit 10 % bzw. 15 % Selbstbehalt
- Wetterindexversicherung mit den beiden Wetterindices „Anzahl Trockentage zwischen 15. März und 15. Mai" sowie „Niederschlagssumme zwischen 15. März und 15. Mai".

Es lassen sich folgende Ergebnisse festhalten (vgl. Tabelle 3.4):

- Bei der Betriebsertragsversicherung führt eine Erhöhung des Selbstbehaltes von 10 % auf 20 % zu einer Absenkung der Hedgingeffektivität für alle Landkreise. Die Ergebnisse verdeutlichen aber auch, dass ein möglichst „effizientes" Design von Versicherungsinstrumenten immer von den regionalen Gegebenheiten abhängt und keine pauschalen Handlungsempfehlungen für die Politik und Versicherungsunternehmen getroffen werden sollten: Während die Hedgingeffektivität im Landkreis Peine nach der Erhöhung des Selbstbehaltes auf nahe Null (1,78 %) absinkt und damit einen Einsatz dieses Instrumentes für den Landwirt als nicht mehr

sinnvoll erscheinen lässt, ist z. B. die Hedgingeffektivität im Landkreis Spree-Neiße auch nach der Erhöhung des Selbstbehaltes mit 17,98 % immer noch vergleichsweise hoch.

- Der Einsatz einer Regionsindexversicherung führt bei einem Selbstbehalt von 10 % in allen Landkreisen zu einer wesentlich geringeren Hedgingeffektivität als die Betriebsertragsversicherung. So sinkt diese für den Landkreis Düren beispielsweise auf null ab. Dies kann mit dem beim einzelnen Landwirt verbleibenden Basisrisiko einer Regionsindexversicherung begründet werden. Eine Erhöhung des Selbstbehaltes von 10 % auf 15 % reduziert die Hedgingeffektivität der Regionsindexversicherung für alle Landkreise zwar deutlich; diese aber verbleibt z. B. im Landkreis Spree-Neiße mit 12,35 % immer noch auf einem sehr hohen, für die Landwirte durchaus lohnend erscheinendem Niveau.
- Der Wahl der Wettervariablen und dem konkreten Design der Wetterindexversicherung in Bezug auf das Strike-Level und die Tick-Size kommt eine entscheidende Bedeutung zu. So erreicht die auf der Niederschlagssumme basierende Wetterindexversicherung, im Gegensatz zu der auf Trockentagen basierenden Wetterindexversicherung, eine deutlich positive Hedgingeffektivität für alle Landkreise. Hierbei ergeben sich jedoch große regionale Unterschiede, z. B. zwischen dem Landkreis Düren (3,14 %) und dem Landkreis Spree-Neiße (12,83 %). Im Durchschnitt über alle Landkreise erreicht die auf der Niederschlagssumme basierende Wetterindexversicherung jedoch immer noch eine Hedgingeffektivität von 6,57 %. Somit könnten Wetterindexversicherungen gegen Trockenheitsrisiken für viele Betriebe in Deutschland interessant sein, da sie im Vergleich zu schadensbezogenen Versicherungstypen zu wesentlich geringeren Verwaltungs- und Regulierungskosten führen und dieser Vorteil in Form geringerer Aufpreise an die Landwirte weitergegeben werden könnte (vgl. Kapitel 3.1.2).
- Wie wichtig die regionale Differenzierung bei dem Design von Wetterindexversicherungen für deren Wirksamkeit ist, zeigt ein Vergleich der Ergebnisse der auf Ebene der einzelnen Landkreise für optimierten Strike-Level und Tick-Size mit einer Variante, in der diese Variablen über alle Landkreise hinweg optimiert wurden. Der Vergleich zeigt, dass die auf Landkreisebene optimierten Instrumente zu wesentlich höheren Hedgingeffektivitäten in allen Landkreisen führen.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Versicherungstypen in Abhängigkeit von dem gewählten Design eine positive Hedgingeffektivität aufweisen. Somit sind alle drei Versicherungen für ein verbessertes Management von Extremwetterereignissen in deutschen landwirtschaftlichen Betrieben grundsätzlich geeignet. Erwartungsgemäß ist hierbei die Hedgingeffektivität der beiden indexbezogenen Versicherungen geringer als die der schadensbezogenen Betriebsertragsversicherung. Der Grund hierfür liegt in dem Basisrisiko, welches bei indexbezogenen Instrumenten beim Versicherten verbleibt. Jedoch ist eine geringere Hedgingeffektivität kein grundsätzliches Problem. Auch ein wenig wirksames Instrument kann ein gutes Instrument sein, wenn es wenig kostet. Bei wetterindexbezogenen Instrumenten sind sehr geringe Transaktionskosten und keine Moral-Hazard-Kosten zu erwarten. So liegt der potenzielle Kostenvorteil wetterindexbasierter Versicherungen gegenüber schadensbezogenen Versicherungen, wie z. B. der klassischen Hagel-

versicherung, bei ca. 24 % (vgl. Münchener und Magdeburger Agrarversicherung, 2006). In diesem ist noch nicht das Einsparpotenzial durch einen reduzierten Verwaltungsapparat berücksichtigt. Sofern dieser Vorteil an die Landwirte weitergegeben wird, kann der Aufpreis vergleichsweise gering ausfallen. Wetterindexbezogene Instrumente können so insbesondere für Landwirte mit einer vergleichsweise geringeren Risikoaversion und Betroffenheit interessant sein.

Tabelle 3.4: Hedgingeffektivität von Betriebs- und Regionsertragsversicherung mit unterschiedlichen Selbstbehalten

Landkreis	Betriebsertragsversicherung mit einem Selbstbehalt von …		Regionsertragsversicherung einem Selbstbehalt von …		Wetterindexversicherung[1] auf Basis von	
	10%	20%	10%	15%	Trockentagen[2]	Niederschlagssumme[2]
Herzogtum Lauenburg	22,08%	7,61%	2,91%	0,00%	6,90%	4,56%
Peine	16,44%	1,78%	5,14%	1,41%	5,48%	5,27%
Düren	17,56%	3,12%	0,00%	0,00%	1,30%	3,14%
Eichstätt	19,96%	8,49%	3,96%	0,03%	0,00%	9,51%
Spree-Neiße	29,83%	17,98%	16,82%	12,35%	0,24%	12,83%
Teltow-Fläming	29,34%	16,92%	11,83%	8,19%	5,34%	4,10%
Durchschnitt	22,53%	9,32%	6,78%	3,66%	3,21%	6,57%

[1] mit auf Landkreisebene optimierten Strike-Level und Tick-Size

[2] zwischen 15. März und 15. Mai

Quelle: Feil und Mußhoff (2014). Unveröffentlichtes Manuskript. Schlussbericht FKZ2813HS006.

Neben der Wirksamkeit scheint auch die Gefahrenspezifität der Instrumente besonders wichtig. Ein Landwirt, der ausschließlich durch Trockenheitsereignisse Ertragsschäden erfährt, wird nur schwer davon zu überzeugen sein, sich gegen für ihn nicht relevante Wetterereignisse abzusichern. Ein für viele Gefahren ausgelegtes Komplettpaket könnte dann vergleichsweise schnell unattraktiv werden. Ein breites Angebotsportfolio der Versicherer ist wichtig, um mit vielen verschiedenen Instrumenten möglichst viele Landwirte anzusprechen und damit ein entsprechendes Marktvolumen zu erreichen. Die in der Wirksamkeitsanalyse untersuchte wetterindexbasierte Trockenheitsversicherung ist ein Vorschlag, wie man ein Einzelrisiko möglichst bedarfsgerecht absichern könnte. Auf dieser Indexbasis könnten auch für weitere Extremwetterrisiken Versicherungsprodukte entwickelt werden.

3.3 Sonderkulturen

Federführung: Dr. Sandra Krengel (Julius Kühn-Institut für Strategien und Folgenabschätzung / Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz)

Das Kapitel Sonderkulturen wurde federführend vom Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR) in Neustadt/Weinstraße im Rahmen eines Entscheidungshilfe-Vorhabens „Agrarrelevante Extremwetterlagen - Sonderkulturen“ (FKZ 2813HS002) bearbeitet. Der Fokus im Bereich Dauerkulturen lag auf dem Apfelanbau als Leitkultur für den Obstbau, dem Weinbau, dem Hopfenbau und im Bereich Gemüsebau auf den Leitkulturen Speisezwiebel, Spargel, Möhre und Kopfkohl (Weiß- & Rotkohl). Das DLR-Rheinpfalz wurde im Bereich Apfel- und Hopfenanbau durch das Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee in Bavendorf (Apfel), das Obstbauzentrum “Esteburg“ in Jork (Apfel) und die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft in Hüll/Wolnzach (Hopfen) unterstützt. Darüber hinaus hat das Thünen-Institut für Betriebswirtschaft mitgewirkt.

In den folgenden Kapiteln sind die wichtigsten Ergebnisse aus dem o.g. Vorhaben aufgeführt. Detailliertere Ausführungen, auch zur verwendeten Methode, sind dem aus diesem Teilprojekt hervorgegangenem Endbericht zu entnehmen (Krengel et al. 2015).

3.3.1 Überblick über die Vorgehensweise

Informationen zu Extremwettern wie Schwellenwerte, Wirkungen auf Pflanzen, Risikomanagementmöglichkeiten wurden im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche gewonnen. Dazu wurden Fachbücher, Onlinedatenbanken, Informationsportale, wie das Hortipendium, Hortigate und das Vitipendium, sowie Jahresberichte und andere Veröffentlichungen von Forschungseinrichtungen und vorliegende Daten genutzt. Die recherchierten Fakten wurden durch Berater und Wissenschaftler mit deren Expertenwissen abgeglichen und etwaige Ergänzungen vorgenommen.

Bei den Schwellenwerten wurden Grenzwerte gesucht bzw. erfragt, die je nach Extremwetterlage und Kultur den Eintritt ertragsrelevanter Einbußen markieren. Je nach Extremwetterlage wurde entweder der „worst case“ unter allen Angaben als Schwellenwert herangezogen oder auch eine Spanne und die jeweilige Wertigkeit (z. B. bezogen auf Entwicklungsstadien oder Prädisposition) angegeben. Die definierten Schwellenwerte wurden, wie in Kapitel 1, beschrieben durch den DWD verwendet, um die vergangene und zukünftige Relevanz abzuschätzen. Die abzufragenden, also relevanten Zeiträume wurden über die Auswertung von Expertenbefragungen festgelegt.

Die Expertenbefragungen unter Beratern und Praktikern wurden persönlich oder postalisch mit Hilfe einer Befragungsmatrix durchgeführt. Die Auswahl der befragten Betriebe erfolgte in Zusammenarbeit mit Beratern der jeweiligen Anbaugebiete. Die befragten Experten haben dabei, auf Basis Ihrer Erfahrung der letzten Jahre, das durch eine Extremwetterlage für die jeweilige Kultur ausgehende Risiko mit 0 (kein Risiko), 1 (mittleres Risiko) und 2 (starkes Risiko) im Jahresver-

lauf für Ihre Region bewertet und innerhalb der als relevant eingestuften Extremwetterlagen eine Rangfolge erstellt. Dabei galt es, die Bewertung unter Ausschluss etwaiger Gegenmaßnahmen durchzuführen. Die Monate wurden zum Zweck der genaueren zeitlichen Eingrenzung in drei Dekaden untergliedert. Alle auswertbaren Angaben wurden gemittelt, woraus ein Überblick über die durchschnittliche Relevanz im Jahresverlauf und ein Ranking (Rang) abgeleitet werden konnte. Die sich aus den ganzzahligen Angaben 0, 1 oder 2 berechneten Mittelwerte liegen zwischen 0 und 2 und wurden für eine übersichtliche Darstellung des Risikos in die vier Risikoklassen (gering, schwach, mittel und stark) klassifiziert. Für jede Extremwetterlage wurde außerdem ein Risikowert berechnet, der zwischen 0 (ganzjährig kein Risiko) und 72 (ganzjährig hohes Risiko) liegt. Mit Hilfe der in den Expertenbefragungen gewonnenen Erkenntnisse konnten die relevanten Extremwetterlagen, die sensitiven Phasen im Jahresverlauf und regionale Unterschiede identifiziert werden.

Die Definition ertragsrelevanter Schwellenwerte erfolgte auf Basis der Literaturrecherchen und Experteninterviews bzw. -befragungen. Dabei wurden Grenzwerte gesucht bzw. erfragt, die je nach Extremwetterlage und Kultur den Beginn ertragsrelevanter Einbußen markieren. Die auf diesem Wege definierten Schwellenwerte beruhen nicht auf mathematischen Modellen oder Zusammenhängen und sind eher als Richtwerte auf Basis des aktuellen Wissensstandes anzusehen. Durch den Deutschen Wetterdienst wurden sie verwendet, um die vergangene und zukünftige Relevanz mit Hilfe der in Kapitel 2.2 beschriebenen Methodik abzuschätzen.

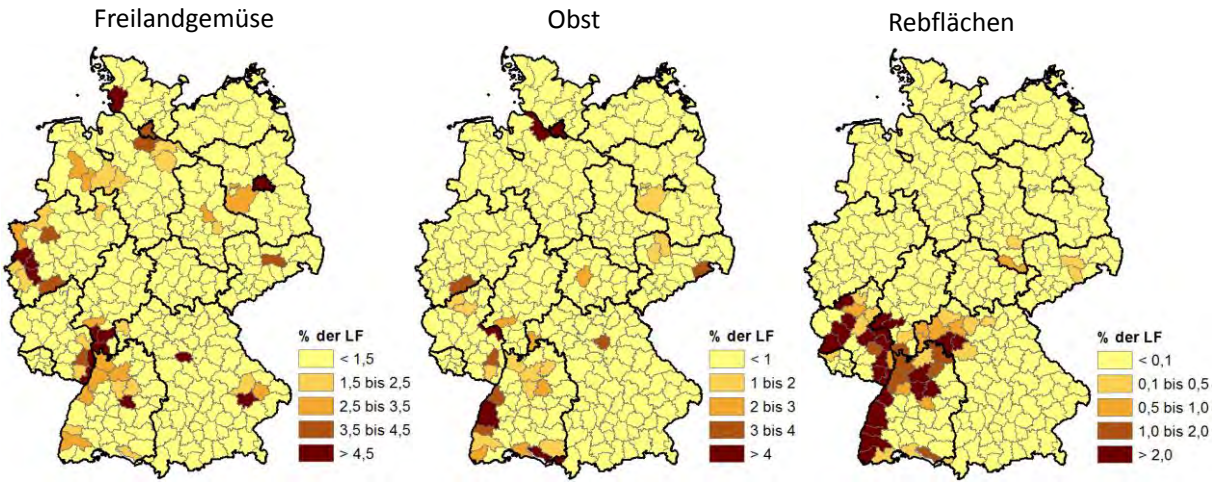
Zur Abschätzung von Auswirkungen von Extremwetterlagen auf Erträge und Qualitäten standen wider Erwarten nur wenige verwertbare Daten zur Verfügung. Flächenspezifische Aufzeichnungen zu Erträgen und/oder dem Auftreten von Extremwetterlagen sind besonders im Bereich der Sonderkulturen sehr rar bzw. gar nicht vorhanden. So konnten im Gemüsebau keine Daten gewonnen werden und dementsprechend auch keine exemplarischen Analysen erfolgen. Im Apfelanbau konnten in Kooperation mit dem Obstbauversuchsring in Jork in Betrieben im Anbaugebiet „Niederelbe“ Ertragsdaten erfasst werden, die zu einer exemplarischen Quantifizierung des ertragssenkenden Einflusses von Spätfrösten im Apfelanbau beitragen konnten. Im Weinbau wurden Ertragsdaten von ca. n=200 Flächen pro Jahr durch eine Winzergenossenschaft im Anbaugebiet „Pfalz“ zur Verfügung gestellt, auf deren Basis der ertragssenkende Einfluss auf Erträge und Mostgewichte des Spätfrostereignisses im Jahr 2011 im Vergleich zu den weitestgehend spätfrostfreien Jahren 2010, 2012 & 2013 abgeleitet werden konnten. Exemplarisch für den Hopfenanbau wurden vom Hopfenring e.V. über die Bayerische LfL Ertragsdaten der Jahre 2006 bis 2013 und Qualitätsdaten (Alphasäurengehalte) der Jahre 2000 bis 2012 für das Hopfenanbaugebiet „Hallertau“ zur Verfügung gestellt. Die Ertragsdaten untergliederten sich nach Sorten und in insgesamt 14 Herkunftsbezirke, wodurch eine zwar begrenzte, aber dennoch regionalisierte und sortenspezifische Betrachtung möglich war.

3.3.2 Regionale Bedeutung des Anbaus (Sensitivität)

Gemüse

In Deutschland haben im Jahr 2012 knapp 7.000 Betriebe auf insgesamt ca. 115.000 ha Gemüse im Freiland angebaut. Die Intensität des Gemüsebaus ist regional sehr unterschiedlich verteilt, und konzentriert sich insbesondere in den Niederungen größerer Flüsse sowie in der Nähe von Ballungszentren. Abbildung 3.20 (linke Karte) verdeutlicht, dass es in Deutschland mehrere Gemüsecluster gibt, die jeweils hohe Anteile an der gesamtdeutschen Gemüseproduktion aufweisen. In Norddeutschland sind dies der Landkreis Dithmarschen in Schleswig-Holstein sowie die Landkreise Harburg, Lüneburg, Uelzen, Cloppenburg und Diepholz in Niedersachsen. Im westlichen Nordrhein-Westfalen entlang des Niederrheins sind Kleve, Viersen und der Rhein-Kreis Neuss sowie der Rhein-Erft-Kreis von Bedeutung. Der Rhein-Pfalz Kreis am Oberrhein ist mit Abstand die intensivste Gemüseanbauregion Deutschlands. Dort werden auf über 11.000 ha, die 72 % der dortigen Ackerfläche ausmachen, zahlreiche Gemüsearten angebaut. Auf der gegenüberliegenden Rheinseite sind zahlreiche Landkreise im Regierungsbezirk Darmstadt ebenfalls bedeutsam. In Niederbayern sind die Landkreise nordöstlich von München entlang Isar und Donau wichtige Anbaugebiete. In Brandenburg werden über 5.000 ha Gemüse angebaut, die Hälfte davon rund um Potsdam.

Abbildung 3.20: Regionale Bedeutung von Freilandgemüse, Obst- und Rebflächen (% der LF, 2010)



Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (2010).

Im Folgenden werden die Analysen zur Bedeutung von Extremwetterereignissen und möglichen Anpassungsmaßnahmen als Fallbeispiele für die wichtigsten Kulturen Spargel, Möhre, Speisezwiebel und Kopfkohl (Weiß- und Rotkohl) durchgeführt (vgl. Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Zehn wichtigste Gemüsearten Deutschlands 2014

	Anbaufläche	Erntemenge	Betriebe	Ø ha/Betrieb
	ha	t	Anzahl	ha/Betrieb
Spargel (im Ertrag)	20.122	114.090	1.978	10,2
Speisezwiebeln	10.224	500.472	1.486	6,9
Möhren und Karotten	10.111	609.353	1.662	6,1
Weißkohl	5.815	477.816	1.975	2,9
Spargel (nicht im Ertrag)	5.213		1.159	4,5
Blumenkohl	4.057	121.406	1.368	3,0
Frischerbsen zum Drusch	4.041	25.131	200	20,2
Buschbohnen	3.980	44.770	1.245	3,2
Eissalat	3.772	129.814	850	4,4
Radies	3.498	82.922	719	4,9

Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt 2015

Obst

In Deutschland bauen knapp 7.500 Betriebe auf ca. 45.600 ha Fläche unterschiedliche Obstbäume an. Äpfel stellen dabei mit 70 % den Großteil dar, gefolgt von Süßkirschen (11,5 %), Pflaumen (8,5 %), Sauerkirschen (5 %) und Birnen (4,2 %). Hinsichtlich der Baumobsterntemenge betrugen Äpfel im Jahr 2012 sogar 90 %. Daher werden wir uns im Folgenden auf den Apfel als die wichtigste Leitkultur im Obstbereich beschränken. In Deutschland gibt es drei wichtige Apfel Anbauregionen, nämlich die Region Bodensee, Altes Land und Sachsen, die im Jahr 2012 zusammen 69 % der Apfelanbaufläche und 71 % der Apfelernte ausmachten (vgl. Abbildung 3.20; mittlere Karte). Die Bodenseeregion und das Alte Land sind dabei fast gleichbedeutend, da beide jeweils ca. 30 % der Fläche bzw. der Ernte repräsentieren. Allerdings sind die Strukturen sehr unterschiedlich. Während in Süddeutschland fast 3.500 Betriebe auf durchschnittlich je 3 ha wirtschaften, umfassen die 700 Betriebe im Alten Land im Durchschnitt 13 und in Sachsen über 51 ha. Sachsen kultiviert 8 % der deutschen Apfelanbauflächen und Nordrhein-Westfalen weitere 5 % (Statistisches Bundesamt, 2012 und 2013b).

Wein

In Deutschland wird Wein in 13 verschiedenen Anbaugebieten kultiviert (vgl. Abbildung 3.20; rechte Karte). Diese konzentrieren sich insbesondere im sonnigen und warmen Südwesten, in der Nähe der Flüsse Mosel, Rhein, Nahe, Neckar und Main. Zwei kleinere Anbaugebiete befinden sich nordöstlich an Saale-Unstrut und in Sachsen entlang der Elbe. Im Jahr 2013 haben ca. 18.700 Betriebe über 102.000 ha Rebfläche kultiviert. Fast die Hälfte der Reben steht in Rheinhessen und der Pfalz. Weitere große Anbaugebiete sind Baden, Württemberg und die Mosel. In 2013 wurden in der Summe 8,4 Millionen Hektoliter Wein bzw. Weinmost produziert. Davon waren im deutschlandweiten Durchschnitt 61 % Weißweine, was jedoch von Anbauregion zu Anbauregion schwankt. In zahlreichen Gebieten werden sogar noch höher Anteile an weißen Rebsorten ange-

baut, so z. B. an der Mosel, in Franken und dem Rheingau. In Württemberg oder an der Ahr sind es hingegen hauptsächlich Rotweine (Statistisches Bundesamt, 2014a,b,c).

Hopfen

Die Sonderkultur Hopfen wird in Deutschland auf knapp 17.000 ha Fläche angebaut (2013). Im Vergleich zu anderen Kulturen mag dies gering erscheinen, allerdings ist Deutschland weltweit nach wie vor der größte Hopfenproduzent und hat einen Anteil von knapp 70 % an der europäischen und 30 % an der weltweiten Produktion (FAOSTAT, 2014). In Deutschland konzentriert sich die Hopfenanbaufläche zu 84 % in der Hallertau, die sich auf die Regierungsbezirke Ober- und Niederbayern erstreckt. Trotz Strukturwandels und stetiger Aufgabe zahlreicher Produzenten, gibt es dort nach wie vor knapp 1.000 Betriebe, die auf durchschnittlich 14,2 ha Land Hopfen anbauen. In der Region Tettnang nahe dem Bodensee bauen ca. 150 Betriebe 1.200 ha Hopfen an. In der Anbauregion Elbe-Saale, die sich auf drei ostdeutsche Bundesländer aufteilt, findet man die größten Betriebe mit durchschnittlich über 40 ha Hopfen. Spalt bei Nürnberg ist zwar ein traditionelles, jedoch mittlerweile eher kleines Anbaugebiet mit nur 350 ha Fläche (LfL, 2014).

3.3.3 Literaturrecherche zu den Wirkungen von Extremwetterlagen

Die Reihenfolge der Extremwetterlagen orientiert sich an der von den Experten geäußerten Relevanz, wobei die Wichtigkeit (Rangfolge) kulturspezifisch unterschiedlich sein kann.

3.3.3.1 Hagel

Hagel verursacht mechanische Schäden an oberirdischen Pflanzenteilen, Blättern, Erntegut und jüngerem Holz. Durch das Durchlöchern oder sogar Abschlagen der Blätter werden die Assimilationsfläche und damit die Photosyntheseleistung reduziert. Durch die Beschädigung des Erntegutes kann es neben der erheblichen optischen Qualitätsbeeinflussung zu Sekundärinfektionen und Reifeverzögerung kommen. Der Standort, der Zeitpunkt, die Bewirtschaftungsform und auch sortenspezifische Eigenschaften haben beträchtlichen Einfluss auf das Ausmaß der Hagelschäden und entsprechender sekundärer Schädigungen. So kann bei Dauerkulturen ein leichter Entwicklungsrückstand, der in der Regel mit geringeren Zuckergehalten in den Früchten einhergeht, beim Befall mit Sekundärerregern oder eine besonders widerstandsfähige Morphologie der Früchte und Blätter in Hinblick auf mechanische Schäden von großem Vorteil sein. Starke Hagelschläge sind in der Lage Totalausfälle zu verursachen.

Des Weiteren können sich bei Dauerkulturen alle Schäden, die für die Pflanzen Stress verursachen - also auch Hagel - negativ auf den Ertrag im Folgejahr auswirken. Auch zusätzliche Kosten für spezielle Schnittmaßnahmen und Schäden an Hagelnetzen mindern das Betriebseinkommen in einem „Hageljahr“. Als besonders gefährdet werden windoffene Lagen ohne Abschirmung, vor

allem Westhänge, angegeben. Generell wird von einer Zunahme der Hagelschlaggefahr von Nord- nach Süddeutschland ausgegangen (vgl. Kapitel 2.3.14).

Apfel

Die Intensivierung der Apfelproduktion in den letzten Jahrzehnten führte zu einer erhöhten Empfindlichkeit gegenüber Hagelschäden. Um die Ernte zu erleichtern und die Ausfärbung zu verbessern, befindet sich der Großteil der Äpfel an der Peripherie der Bäume und ist somit weniger geschützt (König 2014). Das Ausmaß der Schädigung hängt außerdem vom Zeitpunkt des Auftretens und dem sortenspezifischen Entwicklungsstand ab. So kann Hagel im Apfelanbau mechanische Schäden an Früchten, Blättern und am Holz oder gar das Abschlagen der Früchte verursachen, was bis hin zu 100 %igen Ertrags- und Qualitätseinbußen führen kann. Eine weitere Folge kann eine stressinduzierte erhöhte Ethylenproduktion sein, die einen ungewollten Fruchtfall induziert. Die Vermarktungsfähigkeit der Äpfel kann durch das Ausbleiben der Reifung der Früchte, verkorkte Stellen und Sekundärinfektionen an den Früchten stark herabsetzt bis gar nicht mehr gegeben sein (Friedrich 1993; Fischer et al. 2002, Vereinigte Hagel 2014). Nach Angaben von Apfelproduzenten und Beratern im Anbaugebiet „Niederelbe“ entstanden durch Hagelereignisse in betroffenen, einzelnen Betrieben in den letzten Jahren Ertragseinbußen zwischen 30 und 90 %.

Wein

Mechanische Beschädigungen durch Hagel können im Weinbau an Trieben, Gescheinen und Trauben entstehen (Vogt & Schruft 2000, Bauer et al. 2008; Müller et al. 2008; Hoppmann 2010; Expertenbefragung DLR 2014). Welche Pflanzenteile betroffen sind, hängt auch im Weinbau vom Zeitpunkt, der Ausrichtung der Rebzeilen und dem Entwicklungsstand der Pflanzen ab. Hier haben auch die Sorten erheblichen Einfluss auf das Schadensmaß. Rebsorten mit einer dickeren, stabileren Beerenhaut sind naturgemäß widerstandsfähiger gegenüber mechanischen Verletzungen als solche mit einer dünnen Beerenhaut. In Minimalschnittanlagen sind die Beeren in der Regel besser vor mechanischen Beschädigungen geschützt als in konventionellen Erziehungsvarianten, wie Flach- oder Rundbogenerziehung. Hagelschäden vor der Blüte führen häufig zu der Ausbildung von nachgetriebenen Trauben, auch Geiztrauben genannt, mit verzögerter Reife. Hagelschäden im Frühsommer (Juni) können einen deutlich reduzierten Fruchtansatz nach sich ziehen. Bei frühem Auftreten der Hagelschäden besteht allerdings die Möglichkeit, dass diese durch einen Neuaustrieb kompensiert werden. Nach Expertenangaben kann es nach Hagelschäden zu einem zweiwöchigen Wachstumsstillstand kommen. Eine weitere, indirekte Folge von Hagelschädigungen kann der Sekundärbefall geschädigter Pflanzenteile und Beeren mit pilzlichen Erregern und Schwächeparasiten, wie *Botrytis cinerea* und *Penicillium* ssp., sein. Es droht die Gefahr der Entstehung von Essig-, Rosa-, Weiß- und Grünfäule verbunden mit Mykotoxinbildung, was erheblichen Einfluss auf die Qualität der Beeren und ihre Weiterverarbeitbarkeit zu Wein haben kann. Ist durch die Schädigung der Triebe ein Zapfenschnitt notwendig, kann dies zu geringerer Fruchtbarkeit der unteren Augen im Folgejahr führen (Vogt & Schruft 2000). Als weitere Spätfolgen werden ein erschwertes Biegen bzw. Bruchschäden beim Biegen im Folgejahr genannt.

Hopfen

Mechanische Beschädigungen durch Hagel können im Hopfen an den neuaustreibenden Bodentrieben, den Blättern, den Hopfenreben sowie den Blüten und Dolden auftreten (Portner 2009; Expertenbefragung LfL Bayern 2014). Auch im Hopfen ist der Schädigungsgrad erheblich vom Entwicklungsstadium abhängig. Je später das Hagelereignis eintritt, desto höher ist der Schaden für die Pflanze und den Ertrag, da Ausgleichsmaßnahmen immer schwieriger werden. Verletzte und zerstörte Hopfenreben "bluten" und reagieren mit mehrwöchigem Wachstumsstillstand. Man unterscheidet drei Kategorien der Schädigung: leichte Schäden (Blattverletzung und einzelne Kopfabschläge), mittlere Schäden (Kopfabschläge, Blattverluste, leichte Rebenverletzungen) und schwere Schäden (Reben ganz oder weitestgehend zerstört). Infolge der Beschädigungen und entstandenen Wunden an den Pflanzen kommt es häufig zu erhöhten Raten der Infektion mit *Peronospora humuli.* Je nach Zeitpunkt können Verluste zwischen 20 und 90 % entstehen und Folgekosten für das Anleiten und Andrehen neuer junger Bodentriebe, vor allem zusätzliche Personalkosten, und erhöhten Pflanzenschutzmittelaufwand anfallen.

Gemüse

Hagel ist auch in der Gemüseproduktion eine der gefürchtetsten Extremwetterlagen. Durch ihn können massive Schädigungen entstehen, welche mit erheblichen Verlusten einhergehen (Vogel 1996; Crüger et al. 2002; Davis & Raid 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Backhaus et al. 2005; Rimmer et al. 2007; Schwartz & Mohan 2008; Ziegler 2010; Expertenbefragungen DLR Rheinpfalz 2014; Hortipendium 2014; Vereinigte Hagel 2014).

Zumeist wird bei Spargelpflanzen das nach Beendigung der Spargelernte wachsende Laub durch Hagel geschädigt. Erfolgt in Folge ein Neuaustrieb, werden zusätzliche Reservestoffe verzehrt, was wie bei anderen mehrjährigen Kulturen zu einer Ertragsminderung im Folgejahr führen kann. Bei frühen Hagelschlägen kann es aber auch zu einer Beschädigung der Köpfe und entsprechender qualitativer Einbußen des Erntegutes kommen. Die vorgeschädigten Pflanzenteile können des Weiteren durch nachfolgende Infektionen z. B. durch *Fusarium culmorum* (Erreger der Fußkrankheit) betroffen sein.

An Speisezwiebeln entstehen durch Hagel meist einseitige (entsprechend Windrichtung) Einschlagstellen an den Schlotten, die sich später zu weißen bis gelblichen Schadstellen entwickeln. Durch die Schädigungen kann es zu Wachstumsverzögerungen oder -stockungen und in Folge dessen zu kleineren Bulben, einer verminderter Lagerfähigkeit und Folgeinfektionen geschädigter Pflanzen, Pflanzenteile und Bulben, häufig mit *Erwinia carotovora*, kommen.

Auch an Möhren können Hagelschauer Beschädigungen an Laub und Möhrenkörper verursachen, was zu Vermarktungsproblemen - insbesondere bei Bundmöhren - und Ernteerschwernissen (Klemmbandroder) führt.

An Weiß- und Rotkohl kommt es zur Beschädigung der Köpfe bis hin zum Platzen. Das führt zu einer geminderten Vermarktungsfähigkeit. Oft ist nur noch ein Teil des Kohlkopfes verwertbar.

Frühe Hagelschäden können Verletzungen des Vegetationskegels verursachen, welche zu einer Rosettenbildung und späterem Verlust führen. Wie bei allen Kulturen drohen auch dem Kopfkohl Folgeinfektionen und die Förderung bereits bestehenden Pilzbefalls (Sclerotinia, Botrytis etc.).

3.3.3.2 Spätfrost

Neben Hagel gehört Spätfrost – vor allem im Apfel- und Weinbau - zu den gefürchtetsten Extremwetterlagen. Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die Schwellenwerte für Spätfrost der betrachteten Kulturen sowie seine Entwicklungstendenz laut der Klimadatenauswertung. Spätfröste im Frühjahr verursachen Schädigungen bis hin zu Totalausfällen. Die Ursache kann zum einen die Bildung von Eiskristallen in Zellen, Zellwänden oder Interzellularen sein, wodurch die Zellstrukturen zerstört werden. Zum anderen kann es, vor allem bei geringen Minusgraden, zu osmotischen Veränderungen im Zellinneren und darauf basierenden Welkeerscheinungen kommen (Tiedemann 2013).

Tabelle 3.6: Grenzwerte für Spätfrost bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Spätfrost

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikator-einheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Apfel	Grüne Spitzen: Tmin ≤ - 7 °C* Rote Knospe: Tmin ≤ - 2°C* Vollblüte: Tmin ≤ 0 °C*	°C (Tmin) pro d	Mrz-Jun	↓	↓
Wein	Tmin ≤ 0 °C (bodennah) (≥ 1 h) Tmin ≤ 2 °C (2m-Werte) Tmin ≤ – 3 °C (Totalschäden mgl.)	°C (Tmin) pro d	Apr-Jun	0 °C: ↘** 2 °C: ↘ - 3°C: ↗(Apr)	0 °C: ↘** 2 °C: ↘ - 3 °C: ↘
Hopfen	Tmin ≤ -5°C	° C (Tmin) pro d	Apr- Mai	↗	↘
Spargel	Tmin ≤ - 1 bis - 3 °C	° C (Tmin) pro d	Feb-Mai	→↘	↘
Speisezwiebel	Tmin ≤ -3 bis - 9 °C (> 1 d)	° C (Tmin) pro d	Mrz-Jun	↗	↘
Möhren	Tmin ≤ 0 bis - 4 °C	° C (Tmin) pro d	Apr-Mai	≤ 0 °C: ↘ - 4 °C: ↗	↘
Weiß- und Rotkohl	Tmin ≤ 0 bis - 12 °C	Tmin (°C) pro d	Mrz-Mai	≤ 0 °C: ↘ ≤ - 12 °C: ↗	↘

Durch Spätfrost gefährdet sind vor allem die jungen Blätter, Blütenanlagen und das jungen Erntegut. Bei Apfel und Wein gilt, je weiter die Entwicklung im Frühjahr bereits vorangeschritten ist, umso verheerender können seine Schäden ausfallen. Besondere Beachtung verdient dabei der

immer frühere Vegetationsbeginn. Auch wenn die Gefahr des Auftretens von Spätfrösten laut aktueller Klimaprognosen eher stagniert oder gar abnimmt, so erhöht sich durch den früheren Vegetationsbeginn dennoch die Wahrscheinlichkeit, dass die Pflanzen sich bereits in sehr spätfrostempfindlichen Entwicklungsstufen befinden. Besonders gefährdet sind diese Bestände in tiefen Lagen und Lagen, die die Bildung von Kaltluftseen oder Kaltluftstauungen an geografischen oder baulichen Hindernissen begünstigen. In der Regel ist die Gefahr von Spätfrostschädigungen bei früh austreibenden Sorten, sehr früh gesäten oder gepflanzten Beständen und Erziehungssystemen (Apfel und Wein) mit kurzen Stammformen höher. Die durch Spätfrost verursachten Ertragsausfälle können bei Obstgehölzen zu einer ungewollten Verstärkung der Alternanz führen, was sich auf die Fruchterträge und -qualitäten im Folgejahr auswirkt und zusätzliche Pflegearbeiten, wie Ausdünnungsmaßnahmen, zur Steuerung dieser nach sich zieht.

Apfel

Die Frostempfindlichkeit der Apfelblütenorgane nimmt mit zunehmender Entwicklung zur Vollblüte hin zu. In Abhängigkeit vom Grad der Blütenschädigung unterbleibt die Fruchtentwicklung oder es entstehen beschädigte Früchte, die teilweise nicht mehr vermarktungsfähig sind (Link, 2002; Arbeitstagebuch für das Obstjahr 2013). Kurze Stiele, Frostrisse und Frostnarben an den Früchten führen zu qualitativen Beeinträchtigungen. Frost während der Zellteilungsphase der jungen Früchte im Frühjahr kann eine erhöhte Fruchtberostung verursachen. Nach König (2014) sind die jungen Früchte noch empfindlicher als die Blüten. Von Spätfrost geschädigte Früchte zeigen ein Ablösen der Fruchthaut, können einschrumpfen und sogar ganz abfallen. Nach Link (2002) kann es aber auch zu Blattschäden durch Spätfröste kommen. Dadurch erhöht sich beispielsweise die Empfindlichkeit gegenüber Pflanzenschutzmaßnahmen, was eine unerwünschte Reduzierung des Blattapparates nach sich ziehen kann. Auch ein übermäßiges Triebwachstum wird als Folge von Spätfrostschäden genannt. Durch die zur Spätfrostbekämpfung eingesetzte Frostschutzberegnung kann nach mehrmaligem Einsatz an aufeinanderfolgenden Tagen die Last des Eises an den Bäumen so groß werden, dass diese umkippen.

Wein

Durch Spätfröste kann es im Weinbau zu Schädigungen oder sogar zum Absterben der Augen (Blattknospen) im Wollestadium sowie zu Schädigungen an den Primärblättern, Blütenanlagen und Triebachsen kommen. Das Verrieseln bzw. Abwachsen der Gescheine kann zu einer ungleichmäßigen Befruchtung und zur verstärkten Ausbildung jungfernfrüchtiger Beeren, im schlechtesten Fall zu einem Totalausfall, führen.

Hopfen

Im Hopfenanbau ist die potenzielle Schädigung durch Spätfröste im Vergleich zum Wein- und Apfelanbau als weniger relevant einzuschätzen. Spätfröste im April/Mai können zum Absterben bereits entwickelter Triebspitzen führen. Die Pflanzen treiben in der Regel erneut, allerdings mit einer gewissen Verzögerung, aus und müssen gegebenenfalls neu aufgeleitet werden. Ein mess-

barer Trend zu einem früheren Vegetationsbeginn ist beim Hopfen, zumindest für die hier betrachteten Jahre, nicht zu verzeichnen.

Gemüse

Spätfrostschäden in Gemüsekulturen betreffen im Gegensatz zu Apfel und Wein in der Regel nicht die Blütenorgane sondern vor allem junge vegetative Pflanzenteile oder bei Spargel unter Umständen das junge Erntegut (Vogel 1996; Crüger et al. 2002; Davis & Raid 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Backhaus et al. 2005; Rimmer et al. 2007; Schwartz & Mohan 2008; Ziegler 2010; Expertenbefragungen DLR 2014; Hortipendium 2014; Vereinigte Hagel 2014).

In Spargel kann Spätfrost Schäden an jungen Trieben und dem Erntegut verursachen. Eine Folge können glasige Köpfe sein, was die Vermarktungsfähigkeit negativ beeinflusst.

Besonders in Sommerzwiebeln kann es an jungen, noch nicht akklimatisierten Keimblättern und Trieben in der Keimphase und während der Jugendentwicklung zu Spätfrostschäden kommen. Diese führen zu gelben Verfärbungen – oft direkt über der Bodenoberfläche -, verdrehten Schlotten, Welkeerscheinungen, Nekrosen und/oder Verfärbungen (Vogel 1996; Backhaus et al. 2005; Schwartz & Mohan 2008). Winterzwiebeln sind durch Spätfröste im Frühjahr einer erhöhten Gefahr des Schossens ausgesetzt, was eine unzureichende Bulbenbildung zur Folge hat.

In Möhren kann Spätfrost ein unerwünschtes Schossen, die Schädigung junger Pflanzen und die Ausbildung deformierter Rübenkörper verursachen.

Auch in Weiß- und Rotkohl kann Spätfrost ein unerwünschtes Schossen und die spätere Blütenbildung induzieren. Direkte Spätfrostschäden an den Pflanzen können sich durch ein Aufplatzen der Epidermis auf der Unterseite zeigen. Schädigungen der Zellen können zu einer erhöhten Zelldurchlässigkeit führen, die mit einem Verlust gelöster Stoffe oder sogar dem Zelltod einhergehen kann. Auch die Wasseraufnahme durch die Wurzeln kann bei Bodenfrost verhindert werden. Wenn währenddessen die Pflanzen weiter transpirieren, sind Trockenstress bis hin zum Absterben der Pflanzen mögliche Folgen (Frosttrocknis).

3.3.3.3 Trockenheit und extreme Dürre

Ausbleibender Niederschlag und zu geringe Bodenwassergehalte können insbesondere in Gemüse und Hopfen zu erheblichen Schäden bis hin zu Totalausfällen führen (Vogel 1996; 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004). Aber auch bei den tiefwurzelnden Kulturen Wein und Apfel kommt es in Folge lang andauernder Trockenheit zu einer ungenügenden Deckung des Wasserbedarfs und dadurch hervorgerufenen Schädigungen (vgl. Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Grenzwerte für Trockenheit bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Trockenheit

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikator-einheit	Zeitraum	Trend Ver-gangenheit	Trend Zukunft
Apfel	≤ 15 - 30 mm Niederschlag/Monat (≥ 2,5 - 5 w)	mm pro M	Mrz-Okt	→	→
Wein	≤ 40 mm Niederschlag/Monat	mm pro M	Apr-Sep	↗ (Apr, Jun, Aug) ↘ (Jul, Sep)	→↘ (Apr - Jun, Aug) ↗ (Jul, Sep)
Hopfen	≤ 30 mm Niederschlag/Monat < 1 mm Niederschlag/11 d	mm pro M mm über 11 d	Jun- Aug	→	↗
Spargel	≤ 160 mm Niederschlag (Jul-Aug) ≤ 200-260 mm (Jun-Sep) nFK ≤ 50-60 %**	mm mm nFK (%) pro d und w**	Feb-Sep	↘	↗
Speisezwiebel	nFK ≤ 40 - 50 % ** ≤ 400 bis 450 mm Niederschlag innerhalb Kulturzeit (Mrz-Sep) ≤ 50 mm Niederschlag/Monat (Mrz; Apr) ≤ 70-80 mm Niederschlag/Monat (Jun)	nFK (%)** mm pro M	Mrz-Sep	≤ 400-450 mm (Mrz-Sep): →↗ ≤ 50 mm (Mrz & Apr): ↘ (Mrz), ↗ (Apr) ≤ 70-80 mm (Jun): ↗	≤ 400-450 mm (Mrz-Sep): → ≤ 50 mm (Mrz, Apr): ↗ (Mrz), ↘ (Apr) ≤ 70-80 mm (Jun): →↘
Möhren	≤ 300 - 500 mm Niederschlag (Jul-Sep) 0 mm (≥ 3 w)	mm pro 3 w	Mrz-Aug		
Weiß- und Rotkohl	≤ 50 % nFK (4 w)** ≤ 50 mm/Monat (Apr-Mai) ≤ 70-80 mm/Monat (Jun-Aug)	nFK (%) pro M** mm pro M mm pro M	Apr-Nov	≤ 50 mm (Apr-Mai): ↗ ≤ 70-80 mm (Apr-Mai): →↗	≤ 50 mm (Apr-Mai): → (Vgl. 1962-90) ≤ 70-80 mm (Apr-Mai): →

Der fehlende Bodenwassergehalt behindert die Verfügbarkeit und Aufnahme von Nährstoffen. Die Transpiration und die Photosynthese der Pflanzen werden herabgesetzt (verringerte CO_2-Aufnahme), was eine Verzögerung der Entwicklung sowie Wachstums- und Reifehemmung, Vergilbungen, vorzeitiger Herbstfärbung und Blattfall verursachen kann (Quast 1986; Vogt & Schruft 2000; Meyer 2004; Hoppmann 2010; Expertenbefragungen DLR, KOB, LfL Bayern & OVR 2014). In Konsequenz kann es bei den mehrjährigen Kulturen zu einer erheblich geminderten Reservestoff-/Assimilateeinlagerung kommen, was die Winterfrosthärte deutlich herabsetzen und sich negativ auf die Erträge der Folgejahre auswirken kann (Rebschutzdienst 2014). Je nach Kultur und Ent-

wicklungsstand variiert der jeweils tolerierbare Zeitraum. Auch die Wirkung von Bodenherbiziden und damit der Bekämpfungserfolg kann durch zu trockene Bedingungen gemindert werden. Der Trockenstress selbst kann wie bei allen anderen Extremwetterlagen die Prädisposition – also die Empfindlichkeit zum Beispiel gegenüber Schaderregern – erhöhen (Tiedemann 2013). Besonders geneigte, südexponierte Standorte und solche mit leichten, wenig tiefgründigen Böden sind der Gefahr von Trockenstress ausgesetzt (Vogt & Schruft 2000; Expertenbefragungen DLR 2014).

Apfel

Im Apfelanbau kann es durch Trockenstress zu einem verzögerten, gehemmten oder sogar ausbleibenden Triebabschluss kommen. Vor allem Trockenstress während der Zellteilungsphase beeinflusst die Fruchtentwicklung negativ, was die Ausbildung zu kleiner Früchte oder sogar vorzeitigen Fruchtfall nach sich ziehen kann (Link 2002). Durch zu geringen Bodenwassergehalt (Dürre) kommt es häufig zu Kalimangel, da genügend Bodenwasser für die Lösung des Kaliums von den Tonmineralen im Boden notwendig ist. Neben den genannten Auswirkungen kommt eine erhöhte Gefahr der Infektion mit trockentoleranten Erregern hinzu, was sich beispielsweise in einer Fruchtberostung zeigen kann.

Wein

Obwohl Reben als recht trockentolerant gelten, können auch im Weinbau die zu Beginn aufgeführten Auswirkungen durch zu geringe Niederschlagsmengen und Bodenwassergehalte entstehen. Rebschulen und Junganlagen sind stärker durch zu geringe Niederschlagsmengen gefährdet als Ertragsanlagen mit älteren Pflanzen, die in der Regel über ein tiefer reichendes Wurzelwerk verfügen (Expertenbefragung DLR 2014). Es kann zu einer Trockenheitschlorose und zu einer geminderten Reservestoffeinlagerung kommen. An den Beeren selbst kann Trockenheit dazu führen, dass die Beerenhaut fest und wenig dehnbar ist, so dass es bei einer späteren feuchten Phase schneller zum Platzen oder Reißen der Beerenhaut kommt. Aber auch zu kleine, notreife Beeren, die einen Mangel an Inhaltsstoffen oder Fehlaromen, wie die untypische Alterungsnote (UTA) aufweisen, können durch eine unzureichende Wasserverfügbarkeit hervorgerufen werden (Rebschutzdienst 2014). Häufig tritt Trockenheit in Kombination mit Hitze auf, was die Einleitung von Notreifeprozessen und eine Schwächung der Reben verursachen kann. Es besteht eine erhöhte Gefahr der Ausprägung von Symptomen nach der Infektion mit wärmeliebenden, trockentoleranten Erregern z. B. *Pseudopezicula tracheiphila* (Erreger Roter Brenner) und xylembewohnende Pilze wie *Phaeoacremonium aleophilum* und *Phaeomoniella chlamydospora* (Esca-Erreger). Durch den hervorgerufenen Stress kann es zum Ausbruch latent vorhandener Virus- und Phytoplasmenkrankheiten kommen. Die Schäden können von erheblichen Mostgewichtseinbußen und Wuchsstockungen bis hin zum Absterben bei Jungreben reichen (Expertenbefragung DLR 2014).

Hopfen

Im Hopfenbau können fehlende Niederschläge, neben den bereits genannten Auswirkungen, vor allem zu einem verzögerten Austrieb sowie der Hemmung der Blütenentwicklung, Doldenentwicklung, Doldenreife und Alphasäuresynthese führen. Die Gefahr des Befalls mit Spinnmilben ist

erhöht, denn diese treten in heißen, trockenen Jahren besonders stark auf (LfL Bayern 2013). Bei Gießbehandlungen, zum Beispiel gegen Peronospora-Primär-Infektion und Bodenschädlinge, kann es bei zu geringer Bodenfeuchte (Dürre) zum Verbleiben der Mittel in der oberen Bodenschicht kommen, was dazu führt, dass diese nicht ausreichend aufgenommen und wirken können. Ertragsausfälle durch Trockenstress von 10 bis 50 % sind durchaus möglich.

Gemüse

Im Vergleich zu Wein und Apfel sind ausbleibende Niederschläge und zu geringe Bodenwassergehalte im Gemüsebau in weiten Teilen Deutschlands von deutlich höherer Bedeutung und können enorme Verluste bis hin zu Totalausfällen verursachen (Vogel 1996; Crüger et al. 2002; Davis & Raid 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Backhaus et al. 2005; Rimmer et al. 2007; Schwartz & Mohan 2008; Ziegler 2010; Expertenbefragungen DLR Rheinpfalz 2014; Hortipendium, 2014). Dass etwa 50 % der Freilandgemüseflächen in Deutschland bewässert werden (Feller, 2013), bestätigt die Relevanz des Faktors Wasser im Gemüsebau.

Im Vergleich zu den anderen betrachteten Gemüsekulturen ist Spargel recht trockentolerant. Dennoch kann bei Überschreiten der Grenzwerte durch Trockenstress das Wachstum der Spargelstangen und der Neuaustrieb reduziert sein, Spitzenwelke auftreten (Ca-Mangel) und der Befall mit trockenheitsliebenden Erregern, wie *Puccinia asparagi* (Erreger Spargelrost) gefördert werden. Zu durch Trockenstress hervorgerufenen, qualitativen Mängeln zählen ein zu geringer Stangendurchmesser; verholzte Stangen, Rotfärbung und Aufblühen der Köpfe sowie hohle, ovale und gerissene Stangen.

Bei Speisezwiebel kann Trockenheit zu geminderten Feldaufgangraten, gelblich-braunen Verfärbungen an den Schlotten bis hin zum Absterben der Pflanzen und deutlich reduzierten Erträgen führen. Der induzierte Stress erhöhte die Anfälligkeit gegenüber Schaderregern (z. B. durch Nährstoffmangel/-festlegung). Der Befall mit Thripsen, Zwiebelminierfliegen und Spinnmilben wird durch Trockenheit und warme Temperaturen gefördert. Typische, durch Trockenstress verursachte qualitative Mängel sind zu kleine Bulben; Verbrühungen an den Bulben und Schalenlosigkeit/Nacktschaligkeit.

In Möhren kann es in Folge ausbleibender Niederschläge und zu geringer Bodenwasserhalte zu einer Keimverzögerung; geringeren Bestandesdichten; einer Störung der Bildung von Pflanzenmasse und eines erhöhten Risikos der Infektion mit *Erysiphe* sp. und *Streptomyces* sp. kommen. Qualitative Mängel können warzige, korkartige, ringförmig eingeschnürte Rübenkörper sein.

Trockenschäden zeigen sich in Weiß- und Rotkohl unter anderem an vergilbten, verkümmerten Pflanzen und Reifeverzögerungen. Trockenheit während Jugendentwicklung kann zum Schossen führen. Innenbrand (durch Calciummangel), Tabakkrankheit (Blattschichten unter den Deckblättern tabakähnlich grau & trocken), zu kleine Umblätter in Verbindung mit zu kleinen, zu festen Köpfen und strengem Geschmack und geplatzte Köpfe werden als qualitative Schäden angegeben.

3.3.3.4 Überschwemmung und Staunässe

Durch die zumeist durch Dauerregen hervorgerufene Überschwemmung und Staunässe entsteht eine Wassersättigung des Bodens, die zu massivem Sauerstoff- und Nährstoffmangel und im späteren Verlauf zu Erosion, Verschlämmung und Verkrustung führen kann. Für dieses Extremereignis stehen für Sonderkulturen keine auswertbaren Klimaparameter zur Verfügung. Das Risiko für Überschwemmung und Staunässe ist auf verdichteten Böden oder Standorten mit hohen Grundwasserständen besonders hoch. Auch eine übermäßige Beregnung oder der Einsatz hoher Wassermengen zur Frostschutzberegnung kann Staunässe verursachen. Dabei sind der Zeitpunkt, die Bodentemperaturen und die Dauer weitere, das Schadausmaß beeinflussende, Faktoren. Die Auswirkungen von Überschwemmung und Staunässe auf den Ertrag von Obstkulturen, insbesondere Apfel, sind im Frühjahr am größten, da es hier nach Link (2002) zu Schäden während der Zellteilung kommt. Bei gesäten Kulturen kann es zu geminderten Auflaufraten kommen. Generell sind jüngere Pflanzen aufgrund ihres geringer ausgeprägten Wurzelapparates empfindlicher gegenüber Staunässeschäden als ältere.

Durch den Sauerstoffmangel wird das Wurzelsystem geschädigt, der Boden kühlt aus, der Energiestoffwechsel der Pflanze wird gehemmt, es kommt zu Wachstumsstockungen und Reifeverzögerungen, es entstehen Vergilbungen und die Anfälligkeit gegenüber sekundären Schadereignissen steigt. Im schlechtesten Falle sterben ganze Bäume und Pflanzen ab (Vogel 1996; Friedrich 1993; Crüger et al. 2002; Fischer et al. 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; LfL Bayern 2013; Rebschutzdienst 2014). Das geminderte Wurzelwachstum kann sich außerdem langfristig negativ auf die Wasserverfügbarkeit unter trockenen Bedingungen auswirken. Der durch die genannten Auswirkungen entstandene Stress kann die Erträge und Qualitäten des betreffenden und bei mehrjährigen auch des darauffolgenden Jahres beeinflussen und sich negativ auf die Holzreife und infolgedessen auf die Frosthärte auswirken (Müller et al. 2008). Wenn die Befahrbarkeit der Böden durch Staunässe nicht mehr gegeben ist, muss unter Umständen die Durchführung der Kulturarbeiten verschoben werden oder ausfallen. Unter anaeroben Bedingungen im Boden kann es außerdem zu einer unerwünschten Veränderung der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften kommen.

Apfel

Im Apfelanbau trägt die Wahl der Unterlage entscheidend zur Anfälligkeit gegenüber Schäden durch Staunässe bei. Die gegenüber Krankheitserregern zwar widerstandsfähigen, aber schwach wachsenden Unterlagen sind in der Regel deutlich empfindlicher, was ein wesentlicher Grund für die Entscheidung war, weite Teile des Anbaugebietes „Niederelbe“ durch Polderung zu entwässern. Dennoch kann es zu Überschwemmungen und Staunässe aus oben genannten Gründen kommen. Im Apfelanbau zeigen sich Schäden vorrangig durch Fruchtfall in einer verringerter Fruchtanzahl, einer gestörten Abreife der Früchte, verringerten Fruchtgrößen oder bis hin zum Absterben der Pflanzen.

Wein

Im Weinbau ist das Risiko für Staunässe- bzw. Überschwemmung in Ertragsanlagen recht gering, da in Hinblick auf die Erwärmbarkeit zumeist geneigte Flächen für den Weinanbau genutzt werden. Rebschulen hingegen nutzen für Pflanzenanzucht oftmals ebene Flächen. Das führt dazu, dass sie im Vergleich zu Ertragsanlagen einem generell höheren Risiko ausgesetzt sind, durch Überschwemmung oder Staunässe betroffen zu sein. Prinzipiell sind junge Rebpflanzen empfindlicher als ältere. So ist im Frühjahr vor allem in Junganlagen die Gefahr für das Auftreten von Chlorosen – hervorgerufen durch den akuten Sauerstoffmangel und die verschlechterte Photosyntheseleistung - durch Überschwemmung und Staunässe besonders hoch. Auch im Hinblick auf wichtige kulturtechnische Arbeiten in Rebschulen, wie das „Ausschulen“ (Entnahme der in Rebschulen herangezogenen Jungpflanzen), besteht die Gefahr, dass diese aufgrund der mangelnden Befahrbarkeit der Böden nicht termingerecht durchgeführt werden (Expertenbefragung DLR 2014). Nach Bauer et al. (2008) kann es im Weinbau durch Staunässe zum völligem Ausbleiben der Erträge kommen.

Hopfen

Auch im Hopfenbau kann es durch Überschwemmung und Staunässe zu den eingangs geschilderten Auswirkungen kommen. Die Sorten „Hallertauer Taurus“, „Hersbrucker Spät“ und „Herkules“ zeigen sich dem durch Staunässe entstehenden Sauerstoffmangel und der dadurch geminderten Photosyntheseleistung als besonders empfindlich (LfL Bayern 2014). Durch den Sauerstoffmangel und die kühlen Bodenbedingungen besteht ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Stockfäule. Diese kann mit einer verminderten Triebzahl, geringeren Vitalität, erhöhten Stressempfindlichkeit, Nährstoffaufnahmestörungen, geringem Längenwachstum und verminderter Seitentrieblänge bis hin zu Welkeerscheinungen einhergehen (LfL Bayern 2013). Sind die Böden Ende August bis September durch Staunässe nicht befahrbar kann es dazu kommen, dass keine termingerechte Ernte möglich ist und entsprechende Mängel, wie ein geminderter Doldenertrag, eine geminderte innere Qualität, z. B. Alphasäure, eine geminderte äußere Qualität z. B. Verfärbung, glanzloses Aussehen, Zerblätterung der Dolden, auftreten (Lutz et al. 2009). Neben der Gefahr des Totalausfalles sind durch Staunässe hervorgerufene Ertragseinbußen um 20 bis 30 % keine Seltenheit (Expertenbefragung LfL Bayern 2014).

Gemüse

Wie für alle bisher behandelten Kulturen geht auch für die Gemüsekulturen von Staunässe ein Risiko für Schädigungen aus, welches bis hin zu Totalausfällen reichen kann (Vogel 1996; Crüger et al. 2002; Davis & Raid 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Backhaus et al. 2005; Rimmer et al. 2007; Schwartz & Mohan 2008; Expertenbefragungen DLR Rheinpfalz 2014; Hortipendium 2014).

Im Spargelanbau kommt es durch Staunässe zu mangelndem Wachstum, lückigen Beständen, faulen Wurzeln bis hin zu Flächenausfällen. Auch die Gefahr des Befalls mit feuchtigkeitsliebenden Krankheitserregern, wie *Stemphylium botryosum* (Stemphylium-Spargellaubkrankheit),

Botrytis cinerea (Grauschimmel), *Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi* (Fusarium-Wurzelfäule) und *Phytophthora sojae* (Kronen- und Sprossfäule) ist erhöht. Jungpflanzen sind besonders gefährdet, mit *Penicillium glaucum* infiziert zu werden. Als qualitative Mängel in Folge von Staunässe werden für Spargel gerissene Stangen (durch zu hohe Wasseraufnahme) oder auch eine Berostung durch *Fusarium* sp. und *Phytophthora* sp. genannt.

Neben den genannten Auswirkungen kann es in Speisezwiebeln durch Staunässe zu einem Ausbleiben der Bildung einer transpirationsmindernden Gewebeschicht und zu hoher Wasseraufnahme kommen. Des Weiteren können Nässeschäden während der Feldnachreife entstehen und für das Zwiebelwachstum wichtige, endotrophe Mykorrhizapilze geschädigt werden. Auch im Speisezwiebelanbau droht dann eine erhöhte Gefahr der Infektion mit feuchtebedürftigen bakteriellen und pilzlichen Schaderregern, wie *Erwinia* ssp., *Pythium* ssp., *Fusarium* ssp., *Pseudomonas cepacia*, *Sclerotium cepivorum*, *Peronospora destructor*, *Alternaria* spp., *Stemphylium* spp., *Botrytis* spp.; und des Befalls mit Stängelälchen (*Ditylenchus dipsaci*). Eine beeinträchtigte Lagerfähigkeit, die Bildung von Nebenbulben (glockigen Bulben), Dickhälse, Wasserhäute/Glasigkeit und Verschmutzungen können die Qualität des Erntegutes mindern.

Im Möhrenanbau werden deformierte Rüben, die Bildung kleiner Anschwellungen, Platzen (v.a. bei Regen nach trockener Periode), Wasserfleckenkrankheit (Sauerstoffmangel und Kalziumunterversorgung), Wachstumsverzögerungen und schwächere Wurzelausbildung durch Abkühlung und Bodenverdichtung als mögliche Auswirkungen von Staunässe genannt. Durch Staunässe betroffene Möhren zeigen oft eine mangelhafte Ausfärbung, einen schlechten Geschmack und verstärkt Verschmutzungen.

Für Weiß- und Rotkohl sind als mögliche Folgen die Korksucht (übermäßige Zellstreckung des Blattgewebes, Durchbruch der Blattoberhaut und Verkorkung), das Schossen der jungen Pflanzen infolge extremer Nässe und die erhöhte Gefahr der Infektion mit feuchtebedürftigen Pilzkrankheiten wie *Phoma* sp. und *Peronospora* sp. sowie Bakteriosen wie *Pseudomas* sp. und *Erwinia* sp.; zu nennen. Auch die Entstehung von Lagerfäulen wird durch zu nass geerntete Köpfe gefördert. Als qualitative Mängel in Folge von Staunässe werden des Weiteren Innenblattnekrosen, ein ungünstiges Spross-Wurzel-Verhältnis, das Platzen nahezu erntereifer Kohlköpfe (v. a. bei feuchter Witterung infolge einer recht trockenen Witterung) und Schmutzanhaftungen genannt.

3.3.3.5 Dauerregen und Starkregen

Die Extremwetterlagen Dauerregen und Starkregen zeichnen sich durch zu hohe Niederschlagsmengen über einen sehr kurzen (Starkregen) oder langen (Dauerregen) Zeitraum aus (vgl. Tabelle 3.8). Beide sind nicht gänzlich von „Überschwemmung und Staunässe“ abzugrenzen, denn häufig sind kurze heftige oder langanhaltende und ergiebige Niederschlagsereignisse ursächlich für deren Entstehung. So kann es, wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, zu einer Wassersättigung des Bodens (Staunässe) und dadurch zu Sauerstoffmangel kommen.

Tabelle 3.8: Grenzwerte für Dauer- und Starkregen bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Dauer- und Starkregen

Kulturart/ Extremwetter-lage	Schwellenwerte	Indikator-einheit	Zeitraum	Trend Ver-gangenheit	Trend Zukunft
Apfel Dauerregen	≥ 10 mm Niederschlag/d	mm pro d; mm ≥7 d	Mrz-Okt	↘ (Mrz-Jun) ↗ (Jul-Okt)	↗ (Mrz-Apr) ↘ (Mai-Okt)
Apfel Starkregen	≥ 10 - 40 mm Niederschlag/h (d)	mm pro h (d)	Mrz-Okt	↗	↗
Wein Dauerregen	≥ 60 mm Niederschlag/Monat	mm pro M	Mrz-Okt (Jan-Dez)	→	→
Wein Starkregen	≥ 10 mm Niederschlag/2 d	mm über 2 d	Apr-Okt	↘ (Apr, Mai) ↗ (Jun-Okt)	↗ (Apr, Mai, Sep, Okt) ↘ (Jun-Aug)
Hopfen Dauerregen	≥ 100 mm Niederschlag/Woche	mm ≥ 7 d	Mrz -Sep	→	→
Hopfen Starkregen	≥ 25 mm Niederschlag/h (d)	mm pro h oder pro d	Mai -Sep	→↗	↗
Spargel Dauerregen	≥ 30 mm Niederschlag/d ≥ 150 mm Niederschlag/Monat	mm pro d mm pro M	Jan-Dez	≥ 30 mm/d: ↗ ≥ 150 mm/M: ↗	≥ 30 mm/d: ↗ ≥ 150 mm/M: ↗ (Okt-Mai) ↘ (Jun-Sep)
Spargel Starkregen	≥ 20 mm Niederschlag/h	mm pro d*	Jan-Dez	≥ 20 mm/d: ↗	≥ 20 mm/d: ↗
Speisezwiebel Dauerregen	≥ 150 mm/Monat (Jul; Aug)	mm pro M	Jul, Aug	≥ 150 mm/M: ↗	≥ 150 mm/M: ↘ (bis 2040) →(2041-98)
Speisezwiebel Starkregen	≥ 20 – 30 mm Nieder-schlag/Ereignis (Verschläm-mung) ≥ 50 mm Niederschlag/Ereignis (Erosion)	mm pro d*	Jan-Dez	≥ 20 mm/d: ↗ ≥ 30 mm/d: →↗ ≥ 50 mm/d: →	≥ 20 mm/d: ↗ (außer Jul) ≥ 30 mm/d: ↗ (außer Jul) ≥ 50 mm/d→↗
Möhren Starkregen	≥ 20 mm Niederschlag/Ereignis	mm pro d*	Feb-Jul (Jan-Dez)	→↗	↗
Weiß- und Rotkohl Dauerregen	≥ 120 mm/Monat (Apr-Mai) ≥ 150 mm/Monat (Jun-Sep)	mm pro M mm pro M	Jan-Dez	↘ (Vgl. 1962-90 vs. 1971-2000) ↗ (Vgl. 1971-2000 vs. 1981-10)	≥ 120 mm/M: → ≥ 150 mm/M: →↘
Weiß- und Rotkohl Starkregen	≥ 20 – 50 mm/Ereignis	mm pro d*	Mrz-Aug (Jan-Dez)	≥ 20 mm: →↗ ≥ 50 mm: →↘	↗

Häufige Folgen sind des Weiteren die Auswaschung von Nährstoffen (vorrangig bei Dauerregen), Erosion, Verschlämmung sowie Verkrustung. Auch Wachstumsstockungen- und -verzögerungen oder geminderte Auflaufraten können Folgen dieser Auswirkungen sein. Insbesondere Böden mit einer schlechten Drainagefähigkeit und stark geneigte Flächen sind von einem oberflächigen

Wasserabfluss und den Folgen, wie Erosion und Verschlämmung, betroffen. Vor allem in Kombination mit kühler Witterung ist die Gefahr für das Auftreten von Chlorosen recht hoch (Expertenbefragung DLR 2014). Dauer- und auch Starkregen kann in Dauerkulturen im Frühjahr direkt und indirekt, durch die geminderte Flugaktivität von bestäubenden Insekten (Steffens 2013), die Befruchtung negativ beeinflussen. Als Folge sind eine geringere Befruchtungsrate und dadurch geringere Fruchtansätze oder unbefruchtete Scheinfrüchte zu nennen. Sogar im Folgejahr können sich die durch das Befahren vernässter Böden entstandenen Strukturschäden negativ auf das Wachstum der Pflanzen auswirken. Eine besondere Bedeutung kommt den Extremwetterlagen Dauerregen und Starkregen zu, weil es durch sie ganzjährig zu einer erhöhten Infektionsgefahr mit feuchtigkeitsliebenden Krankheitserregern kommen kann. Zum einen bietet eine erhöhte und verlängerte Phase hoher Blattfeuchtigkeit gute Bedingungen für viele Erreger, zum anderen kann Starkregen durch das Aufschleudern von Pilzsporen zu deren Verbreitung beitragen. Gleiches gilt für die Verbreitung von Blattflecken-induzierenden Bakterien, besonders Pseudomonaden. Im späteren Entwicklungsverlauf kann das Erntegut durch zu feuchte Bedingungen in Folge hoher Wasseraufnahme platzen. Dies führt zum einen an sich schon zu qualitativen Beeinträchtigungen, zum anderen fördert es die Besiedelung mit Sekundärfäuleerregern. Neben den genannten kulturtechnischen Beeinträchtigungen drohen durch Dauer- und Starkregen auch die Abwaschung von Pflanzenschutzmitteln und eine verminderte Wirkung dieser.

Apfel

Neben den unter Kapitel 3.3.3.4 genannten Auswirkungen durch stauende Nässe geht von Dauerregen geht im Apfelanbau vor allem in Hinblick auf die erhöhte Wahrscheinlichkeit der Infektion mit Schorf, Obstbaumkrebs und Botrytis eine Gefahr aus, dies gilt insbesondere ab dem Knospenaufbruch (OVA 2013). Ein Schorfbefall beispielsweise kann mit erheblichen Qualitätseinbußen einhergehen. Auch ein Totalausfall ist durch Dauerregen im Apfelanbau möglich. Starkregen kann (vor allem in Kombination mit starkem Wind) zum Abwurf von Früchten oder gar zum Abbrechen von Ästen führen.

Wein

Durch Dauerregen kann es im Weinbau (v.a. in Kombination mit kühler Witterung) zur Verrieselung der Blüten kommen und dementsprechend zu einer verminderten Befruchtungsrate. Außerdem geht von feuchten Bedingungen eine erhöhte Infektionsgefahr mit feuchtigkeitsliebenden Erregern, wie *Botrytis cinera* (Grauschimmel) und *Phomopsis viticola* (Schwarzfleckenkrankheit), aus. Im Mai und Juni kann insbesondere Starkregen die Infektion mit *Plasmopara viticola* (Falscher Mehltau) fördern, weil die Sporen durch das Auftreffen der Regentropfen besser verbreitet werden (Hoppmann 2010). Häufig kommt es in Folge von andauerndem Niederschlag oder starkem Regen zum Platzen der Beeren und derer Besiedelung mit Sekundärfäuleerregern. Dadurch können Essig-, Rosa-, Weiß- und Grünfäule sowie die Mykotoxinbildung gefördert werden. Dies kann die Verarbeitung der Beeren zu Wein erheblich erschweren oder sogar gänzlich verhindern (Expertenbefragung DLR 2014).

Hopfen

Auch im Hopfenbau können sich Dauer- und Starkregen in eingangs geschilderter Weise negativ auswirken. Ein in Hinblick auf Verschlämmung und Erosion besonders gefährdeter Zeitraum ist die Phase des zweiten Anackerns, da dann der Boden nicht über die Durchwurzelung der Unkräuter und Zwischenfrüchte geschützt ist und besonders locker ist (Niedermeier 2011). In Phasen mit Dauerregen besteht ein erhöhter Infektionsdruck (insbesondere Primärinfektion) mit *Pseudoperonosopora humuli*.

Gemüse

Die anfangs aufgeführten Auswirkungen wie Verschlämmung, Verkrustung oder Wassererosion können bei Spargel zu deformierten Stangen, einer unerwünschten Rotfärbung der Köpfe (in Folge Bodenabtrag durch Wassererosion) und einer erhöhten Gefahr des Befalls mit feuchtigkeitsliebenden Krankheitserregern, wie *Stemphylium botryosum* (Erreger Stemphylium-Spargellaubkrankheit), *Botrytis cinerea* (Grauschimmel), *Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi* (Fusarium-Wurzelfäule) und *Phytophthora sojae* (Kronen- und Sprossfäule) führen (Vogel 1996, Wonneberger & Keller2004; Hortipendium 2014).

Nach Krug et al. (2003) und Schwartz und Mohan (2008) kann es in Speisezwiebeln durch Starkregen zu Druckstellen und Verletzungen an den Schlotten, Glasigkeit, zu kleinen Bulben und Dickhälsen (Wachstumsstockungen und –verzögerungen) kommen. Wenn aufgrund von Vernässung die Ernte verspätet stattfindet, ist die Gefahr für das Auftreten der Schalenlosigkeit (Nacktschaligkeit) erhöht. Auch Verschmutzungen und die Förderung feuchtebedürftiger Schaderreger, wie *Erwinia* ssp., *Pythium* ssp., *Fusarium* ssp., *Pseudomonas cepacia*, *Sclerotium cepivorum*, *Peronospora destructor*, *Alternaria* spp., *Stemphylium* spp., *Botrytis* spp. und Stängelälchen (*Ditylen*chus dipsaci) werden als Folgen von Stark- und Dauerregen genannt (Vogel 1996; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004).

In Möhren droht durch Stark- und Dauerregen ebenfalls eine Verschmutzung des Krautes und der Rüben, das Platzen der Möhren (zu hohe Wasseraufnahme) und eine erhöhte Gefahr der Infektion mit feuchtigkeitsliebenden Krankheits- und Sekundärfäuleerregern, wie *Alternaria* sp., *Erwinia* sp., *Phytium* spp. , *Cersospora* sp. und *Chalara thielaviopsis* (Chalara-Lagerfäule) (Crüger 1991; Crüger et al. 2002; Expertenbefragung DLR 2014).

In Weiß- und Rotkohl kann es durch zu hohe Niederschläge zum Platzen nahezu erntereifer Kohlköpfe (Crüger et al. 2002; Rimmer et al. 2007), zu Schmutzanhaftungen und einer erhöhten Gefahr von Pilzkrankheiten wie *Phoma* sp. und *Peronospora* sp. sowie Bakteriosen wie *Pseudomas* sp. und *Erwinia* sp. kommen. Auch Lagerfäulen können durch zu nass geerntete Köpfe gefördert werden (Wonneberger & Keller 2004).

3.3.3.6 Hitze

Sehr hohe Temperaturen (Hitze) können bei Pflanzen zu Veränderungen in der Proteinsynthese, deutlich zu hohe Temperaturen sogar zu Denaturierungsprozessen in Zellen und Membranen führen, was sich u. a. in Welkeerscheinungen oder sonnenbrand- bzw. verbrühungsähnlichen Schäden zeigen kann. Die Pflanzen reagieren auf Hitzestress mit dem Schließen der Stomata und verbrauchen höhere Mengen Wasser. Wenn das Temperaturoptimum der Photosynthese überschritten wurde, nimmt die Assimilationsleistung wieder ab, wodurch sich die Entwicklungsprozesse verlangsamen oder gehemmt werden (Friedrich 1993). Bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und Flüssigdüngern bei zu hohen Temperaturen können „Verbrennungen“ entstehen, die die Pflanzen schwächen und die Assimilationsfläche mindern. In Folge zu starker Hitze kann es demzufolge auch zu einer Behinderung bzw. Einschränkung bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln kommen. Die kulturspezifischen Schwellenwerte für Hitze sowie die beobachtete und projizierte Entwicklung von Hitzetagen sind in Tabelle 3.9 zusammengestellt.

Tabelle 3.9: Grenzwerte für Hitze bei Sonderkulturen und Entwicklungstendenzen für Hitze

Extremwetter-lage	Schwellenwerte	Indikator-einheit	Zeitraum	Trend Ver-gangenheit	Trend Zu-kunft
Apfel	Tmax ≥ 30 - 40 °C	°C (Tmax) pro d	Apr-Sep	30 °C: ↗ 40 °C: →	↑
Wein	Tmax ≥ 35 °C	°C (Tmax) pro d	Mai-Sep	↗	↑
Hopfen	Tmax ≥ 28-30 °C (≥ 7 d)	° C (Tmax) über ≥ 7 d	Jun- Aug	↗	↑
Spargel	Tmax ≥ 30 °C	° C (Tmax) pro d	Mrz-Sep	↗	↑
Speisezwiebeln	Tmax ≥ 30 °C	° C (Tmax) pro d	Apr-Aug	↗	↑
Möhren	Tmax ≥ 25 bis 28 °C	° C (Tmax) pro d	Mai-Aug	↗	↘ (bis 2050) ↗ (2050-98)
Weiß- und Rot-kohl	Tmax ≥ 30 - 35 °C Nachttemperaturen Tmin ≥ 25 °C	° C (Tmax) pro d ° C (Tmin) pro d	Apr-Sep	↗	↑

Apfel

Nach Link (2002) und Expertenbefragungen am OVR in Jork und KOB in Bavendorf (2014) kann es durch Hitze an den Blättern des Apfels zu Nekrosen bzw. Verbräunungen kommen, wodurch die Assimilationsfläche verringert und die Versorgung des Baumes und der Früchte mit Assimilaten vermindert wird. In Folge entstehen beispielsweise kleinere Früchte, was eine erhebliche qualitative und quantitative Einschränkung darstellt. Häufig tritt Hitze in Kombination mit hoher Sonneneinstrahlung auf, was Sonnenbrand an den Blättern und Früchten hervorufen kann. Auch Glasigkeit (durch Störung im Zuckerstoffwechsel) wird im Apfelanbau als eine mögliche Folge von Hitze angegeben. Mögliche biotische Folgen sind eine erhöhte Gefahr der Infektion mit wärmeliebenden Erregern und eine höhere Wahrscheinlichkeit von Fraßschäden durch Vögel, die - um ihren Wasserbedarf zu decken - verstärkt Früchte anpicken.

Wein

Hitze kann nach Müller et al. (2008) eine Notreife der Beeren nach sich ziehen, was erhebliche Mostgewichteinbußen verursacht. Wenn gleichzeitig eine sehr geringe Luftfeuchtigkeit vorherrscht, entstehen verbrühungsähnliche Schäden und ein Kochgeschmack in den Beeren. Hitze nach dem Stecken der jungen Reben in Rebschulanlagen kann zum unerwünschten Austreiben an den Verwachsungsstellen führen. Auch die Gefahr der Ausprägung der Symptome von Infektionen mit wärmeliebenden, trockentoleranten Erregern, z. B. *Pseudopezicula tracheiphila* (Erreger Roter Brenner) und xylembewohnende Pilze, wie *Phaeoacremonium aleophilum* und *Phaeomoniella chlamydospora* (Esca-Erreger), steigt bei hitzegestressten und dadurch geschwächten Reben (Expertenbefragung DLR 2014).

Hopfen

Auch im Hopfenbau sind sonnenbrandähnliche Schäden als Folge von Hitze zu nennen. Diese treten vorrangig auf den Blättern in den oberen Bereichen der Pflanze auf. Ertragsrelevante Schäden durch Hitze entstehen aber meist nur bei gleichzeitigem Auftreten von Trockenheit (Expertenbefragungen LfL Bayern 2014). Hitze fördert des Weiteren den Aufbau einer starken Spinnmilbenpopulation, die im schlimmsten Fall einen Totalausfall verursachen kann. Auch die Wirksamkeit von Pflanzenschutzmittel kann durch die hitzeinduzierte Ausbildung einer starken Wachsschicht auf den Blättern eingeschränkt sein.

Gemüse

Hitze während der Ernteperiode kann zu dünne Spargelstangen, aufgeblühte Köpfe und eine Beigefärbung der Köpfe (zu hohen Temperaturen unter der Folie) verursachen (Krug et al. 2003). Hitze in den späteren Sommermonaten wiederum kann zu einem frühzeitigen Altern des Laubes führen, was sich negativ auf die Assimilationsleistung und die Einlagerung von Reservestoffen auswirkt. Auch der Befall mit wärmeliebenden Erregern, z. B. *Puccinia asparagi* (Erreger Spargelrost), kann gefördert werden.

Speisezwiebeln können durch Hitze während der Keimung, der Bulbenbildung bis hin zur Feldnachreifeperiode geschädigt werden. Folgen können die Schädigung der Keimlinge, die Ausbildung kleinerer Bulben, aufgrund zu zeitiger Bulbenbildung und früherer Abreife, Verbrühungen der Bulben während Feldnachreifeperiode und Schalenlosigkeit (Nacktschaligkeit), durch zu hohe Temperaturen zur Erntezeit, sein (Crüger et al. 2002; Krug et al. 2003; Schwartz & Mohan 2008). Für die Saatgutproduktion kann Hitze von Bedeutung sein, weil es zu einer Hemmung der Ausbildung von Blütenanlagen (Antivernalisation) und Devernalisation kommen kann. Des Weiteren droht auch im Speisezwiebelanbau eine erhöhte Gefahr der Infektion mit wärmeliebenden Pathogenen, z. B. *Pseudomonas cepacia*, *Phoma terrestris* und *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepae*.

Bei Möhren kann es bei Hitze zu einer geminderten Keimung, zur Beschädigung oberflächennaher Wurzeln junger Pflanzen, Einschnürungen an jungen Pflanzen oberhalb Bodenoberfläche und späterem Umknicken kommen. Nach Davis und Raid (2002) kann es durch die Schädigung junger

Pflanzen bis zum Totalausfall kommen. Typische, durch Hitze verursachte qualitative Mängel sind längeres, weiches Laub, kürzere und deformierte Rüben sowie ein bitterer Geschmack (Vogel 1996; Davis & Raid 2002; Krug et al. 2003; Expertenbefragung DLR 2014). Temperaturen über 25 °C gelten als optimale Bedingungen für Infektion mit *Xanthomonas campestris* pv. *carotae* und *Alternaria radicina* (Crüger 1991; Crüger et al. 2002).

Blattpunktnekrosen, auch „grijs“ oder „black speck“ genannt, sind bei Weiß- und Rotkohl typische Auswirkungen von Hitzestress (Wonneberger & Keller 2004; Crüger 1991).

3.3.3.7 Sonstige Extremwetterlagen

Winter- und Kahlfrost

Kahl- und Winterfrösten kommt im Sonderkulturanbau im Vergleich zu den bisher behandelten Extremwetterlagen eine etwas geringere Bedeutung zu. Kommt es dennoch zu einer Schädigung durch Winterfrost, tritt sie an Dauerkulturen in der Regel in der Phase der Vegetationsruhe auf. Von den behandelten Gemüsekulturen können vor allem Spargel und Winterzwiebeln durch Winterfröste geschädigt werden. Erheblichen Einfluss auf die Anfälligkeit gegenüber Winterfrost hat der vorhergehende Witterungsverlauf. Besonders starke Schäden können durch plötzlich eintretende, tiefe Minusgrade entstehen. Konnte vorher eine langsame Akklimatisierung stattfinden und die Pflanzen einen physiologischen Frostschutz aufbauen, sind tiefe Minusgrade in der Regel besser durch die Pflanzen tolerierbar. Neben dem Sorteneffekt hat vor allem auch der Grad der Reservestoffeinlagerung (Dauerkulturen) Einfluss auf das Schadausmaß. Haben die Pflanzen beispielsweise in der vorhergehenden Vegetationsperiode Stress (biotisch oder abiotisch) erfahren oder sehr hohe Erträge ausgebildet, konnten sie zumeist weniger Reservestoffe einlagern (schlechte Holzreife) und sind anfälliger gegenüber Frostschäden (Fischer et al. 2002). Warme Zwischenperioden können zur Unterbrechung der endogenen Ruhe (Winterruhe) der Pflanzen führen, was die Frosthärte ebenfalls deutlich herabsetzt. Winterfrostschäden werden vor allem durch die Eisbildung in Zellen, Zellwänden oder Interzellularen und den dadurch entstehenden mechanischen Schäden verursacht. Von den mehrjährigen Kulturen sind Apfel und Wein aufgrund ihrer Morphologie (Stämme und Winterknospen oberirdisch) stärker gefährdet als Hopfen und Spargel, wobei es auch hier zu Ausfällen durch Kahlfrost kommen kann. Schäden können an den Stämmen, Wurzeln und den Winterknospen entstehen, wobei nach Experteneinschätzungen am DLR (2014) Augenschäden bis 20 % im Weinbau relativ gut kompensierbar sind. Eine reflektierende Schneedecke kann das einseitige Erwärmen der Stämme an zwar strahlungsreichen aber sehr kalten Wintertagen fördern. Die Temperaturdifferenz zwischen der besonnten und beschatteten Seite kann zu erheblichen Stammschäden (z. B. Frostrissen) führen (Expertenbefragung OVR, 2014). Zusätzlich besteht die Gefahr einer Frosttrocknis, bei der aus dem noch gefrorenen Boden und den Wurzeln an Tagen mit transpirationsfördernden Bedingungen (z. B. Sonne) kein Wassernachschub erfolgen kann. Nach Fischer et al. (2002) treten Winterfrostschäden im Apfelanabau etwa alle 10 bis 12 Jahre auf. Sowohl im Weinbau als auch im Apfelanbau können Stammschäden, vor allem in Junganlagen, zum völligen Absterben der Pflanzen führen (Exper-

tenbefragungen DLR & KOB 2014). Durch die entstandenen Wunden am Holz kann es zu Folgeinfektionen kommen, was im Weinbau z. B. zum vermehrten Auftreten von Mauke (*Agrobacterium vitis*), Eutypiose (*Eutypa lata*) und Esca in den Folgejahren führen kann. Besonders die von kontinentalem Klima geprägten Standorte, wie sie überwiegend in Ostdeutschland zu finden sind, sind von Winterfrostschäden bedroht.

Sturm

Sturm nimmt in den meisten Sonderkulturen einen geringeren Stellenwert als beispielweise Hagel und Trockenheit ein. Dennoch kann es durch Sturm zu mechanischen Beschädigungen direkt durch den Wind oder durch windtransportierte Partikel (Winderosion) kommen (Expertenbefragung DLR 2014). Starke Sturmböen sind in der Lage, ganze Bäume umzukippen oder brechen zu lassen, Schäden an den Unterstützungsvorrichtungen hervorzurufen oder bei Gemüsekulturen ganze Triebe zu brechen oder auszudrehen (Krug et al. 2003). Obwohl ein Aufrichten umgekippter Baumzeilen oder ein erneutes Anleiten von Hopfentrieben oftmals ohne Folgeschäden möglich ist, kann es durch Sturm auch zu einem Totalausfall kommen (Expertenbefragungen DLR, KOB, LfL Bayern & OVR 2014). Oft treten in Folge dieser Schäden erhebliche Entwicklungs- und Reifeverzögerungen auf. Es können Druckstellen, Scheuerspuren (auch durch die Unterstützungsvorrichtungen) oder Abschmirgelungen an Trieben oder dem Erntegut entstehen, was qualitative Verluste mit sich bringt und Eintrittspforten für Folgekrankheiten schafft (Crüger et al. 2002; Davis & Raid 2002; Wonneberger & Keller 2004; Müller et al. 2008; Schwartz & Mohan 2008). Der Abtrag von Boden durch Wind kann dazu führen, dass die Köpfe von Möhren oder Spargel freigelegt werden und es aufgrund der Lichteinwirkung zu einer qualitätsmindernden Grünköpfigkeit bei Möhre oder einer Rotfärbung der Köpfe bei Spargel kommt. Zu hohe Windgeschwindigkeiten behindern des Weiteren die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln (Abdriftvermeidung). Durch Winderosion kann es zu einer Verlagerung von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen auf andere Flächen kommen, die dadurch geschädigt werden können (Expertenbefragung DLR 2014). Die Anfälligkeit für Sturmschäden hängt neben der Bewirtschaftungsform (je mehr Blattfläche, umso anfälliger) auch von der jeweiligen Entwicklungsphase ab. In der Regel nimmt das Risiko für größere Sturmschäden bei Dauerkulturen mit fortschreitender Entwicklung und Blattfläche zu. So ist die Anfälligkeit für Sturm besonders hoch, wenn der Hopfen die volle Gerüsthöhe erreicht hat oder Apfel und Wein einen hohen Fruchtbehang aufweisen. Bei Gemüsekulturen, z. B. Weiß- und Rotkohl, sind hingegen junge Pflanzen besonders empfindlich gegenüber Sturmschäden, z. B. durch Abrieb bei Winderosion.

Frühfrost

Herbstfröste (Frühfröste) können zu Schäden an noch nicht beernteten Beständen oder am Laub führen, sind aber in der Regel von geringerer Bedeutung. Auch diese Frühfrostschäden werden durch die Bildung von Eiskristallen in Zellen und Interzellularen und die dadurch entstehende Schädigung der Zellwände bzw. Zellen oder durch osmotische Veränderungen verursacht (siehe Kapitel 3.3.3.2). Die Eiskristallbildung kann zudem die Enzymreaktionen im Erntegut stören, was geschmackliche - zumeist unerwünschte - Veränderungen mit sich bringt (Link 2002). Eiswein ist hier eine Ausnahme, er bedarf gerade einer Frosteinwirkung von mindestens -7 °C (meist erst im

Verlauf des Winters erreicht), um seinen typischen Charakter zu erhalten. Bei Gemüsekulturen sind beispielsweise Speisezwiebeln kurz vor bzw. während der Feldnachreife, Möhren und Kopfkohl durch Frühfrost gefährdet. Frostschäden zeigen sich dann meist als glasige/wässrige Stellen bis hin zu Rissen und Deformierungen (Crüger 1991; Crüger et al. 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Schwartz & Mohan 2008). Das vorzeitige Abfrieren noch grüner Pflanzenteile hat eine Minderung der Photosyntheserate zur Folge (Müller et al. 2008) und kann so zu einem gestörten Reifeprozess, einer Verzögerung der Ernte, einer Hemmung der Ausbildung qualitativer Merkmale – wie der Mostgewichte im Weinbau – und einer verschlechterten Einlagerung von Reservestoffen, Beeinträchtigung der Holzreife und Frosthärte (Vogt & Schruft 2000) führen. Erfrorene Rebblätter verfärben sich rötlich-braun und rollen sich ein (Rebschutzdienst 2014). Bei Frühfrostschäden an den Beeren im Wein verfärben sich diese ebenfalls rotbraun und die Zuckereinlagerung wird gestoppt (Expertenbefragung DLR 2014). Wie bei Spätfrösten ergeben sich durch Frühfröste die Sorteneigenschaften unterschiedliche Schadwirkungen. Kaltluftstaulagen sind hierbei besonders anfällig. Nach Link (2002) kann es bei spätreifenden Sorten im Herbst eher zu Schäden durch Frost kommen. Die klimabedingt in der Regel spätere Ernte in ostdeutschen Lagen führt dort zu einem tendenziell höheren Risiko für Frühfrostschäden.

Nassschnee

Nassschnee spielt in allen behandelten Dauerkulturen eine eher untergeordnete Rolle. Trotzdem kann es - vor allem in Apfelanlagen - durch Nassschnee zu einer so hohen Last kommen, dass Pflanzenteile abbrechen. Auch aus phytosanitärer Sicht ist Nassschnee negativ zu bewerten. Unter einer lang anhaltenden geschlossenen Schneedecke verrottet das Falllaub unter sauerstoffarmen Bedingungen eher schlecht, wodurch auch die Zersetzung der Krankheitserreger gehemmt sein kann. Für das Folgejahr entstehen dadurch ein erhöhtes Sporenpotenzial und ein erhöhtes Infektionsrisiko mit Krankheiten (Klein 2011). Eine geschlossene Schneedecke kann im Gemüsebau einen Sauerstoffmangel, mechanische Belastung und eine Saatgutverschlämmung sowie entsprechende Folgeschäden verursachen (Expertenbefragung DLR 2014).

Extreme Strahlungsintensität

Zu hohe Strahlungsintensitäten gewinnen zunehmend an Relevanz. In Apfel und Wein werden in den letzten Jahren verstärkt Sonnenbrandschäden an den Blättern oder auch Früchten beobachtet. Meist treten diese Schäden in Folge einer Kombination aus zu hohen Strahlungsintensitäten und zu starker Hitze auf (Expertenbefragungen DLR & OVR 2014). Auch bei Speisezwiebeln und Kopfkohl können Verbrennungen (Sonnenbrand) grüner Pflanzenteile, der Kohlköpfe oder Bulben, vorrangig während der Feldnachreifeperiode, auftreten. Geschädigte grüne Pflanzenteile zeigen meist weiße, absterbende Spitzen und Blattspitzenverkrümmungen. Dadurch sind das Wachstum und die Assimilation gehemmt (Crüger 1991; Crüger et al. 2002; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Backhaus et al. 2005; Schwartz & Mohan 2008; Expertenbefragung DLR 2014)

Extreme Temperaturwechsel können sowohl im Winter – meist als Wechselfrost - Schäden an Wurzel und Stämmen als auch während der Vegetationsperiode Schäden verursachen, wenn die

Pflanzen nicht in der Lage waren, sich an die schnellen Änderungen anzupassen. Dies kann sich zum Beispiel in einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Krankheiten widerspiegeln. Wechselfröste führen beispielsweise zum Hochfrieren von Zwiebelkeimlingen (Expertenbefragung DLR 2014).

Auch zu warme oder kalte Phasen im Herbst und Winter können schädigend sein. Obwohl es sich hier nicht immer zwangsläufig um eine Extremwetterlage handeln muss, die sich durch eine überdurchschnittliche Abweichung von den Normaltemperaturen auszeichnet, sollen sie nicht unerwähnt bleiben. Zu hohe Temperaturen im Winter können zu einer Brechung der Winterruhe und damit einer Absenkung der Frosthärte führen, was vor allem bei plötzlich eintretenden tieferen Minustemperaturen problematisch wird. Solche Temperaturwechsel können die Eisweinproduktion verzögern bzw. stören (Hoppmann 2010).

3.3.4 Literaturrecherche zu den biotischen Gefahrenpotenzialen

Gemüse

Die Recherchen erfolgten wie im Kapitel 3.2.3.1 beschrieben und beschränkten sich für Gemüse auf Spargel als Leitkultur. Eine Auflistung der für Spargel betrachteten Schaderreger und Quellen findet sich unter Seidel, 2014b. Für Spargel wurden bis zum 08. Januar 2015 im „Web of Science“ insgesamt 159 068 Einzelabfragen (= Kombination „Kultur + Schaderregerbegriff + Extremum“) gestellt. Gefunden wurden lediglich 2 Veröffentlichungen. Sie befassen sich mit den befallsfördernden Wirkungen von Überflutung und/oder Starkregen auf die pilzlichen Schaderreger *Phytophthora megasperma var. Sojae* sowie *P. cryptogea (l.c.* Seidel, 2014 b*).*

Die Datenlage auch in Bezug auf die Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf die Schaderreger an Spargel ist nicht ausreichend belastbar, um Ergebnisse verallgemeinern zu können und Schlussfolgerungen zu ziehen. Die gefundenen Daten gingen daher nicht in die weiteren Auswertungen für dieses Verbundforschungsvorhaben ein. Um den für eine Folgenabschätzung erforderlich Bedarf an Primärdaten besser decken zu können, besteht weiterer Forschungsbedarf.

Dauerkulturen

Eine Auflistung der für Wein, Hopfen und Apfel jeweils betrachteten Schaderreger und Quellen ist in Seidel (2014b) zu finden. Für Wein, Hopfen und Apfel wurden bis zum 08. Januar 2015 im „Web of Science“ insgesamt 689195 Einzelabfragen (= Kombination „Kultur + Schaderregerbegriff + Extremum“) gestellt. Hierbei und aus der ergänzenden Suche in Zeitschriftenumläufen u.a. wurden insgesamt 46 Veröffentlichungen gefunden. Davon waren lediglich 12 Publikationen nach der Lektüre aller Publikationen als Datenquelle für weitere Auswertung geeignet, belastbare und damit weiter verwendbare Aussagen zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf das Auftreten und/oder die Schadwirkung von durch den Klimawandel vermutlich beeinflussten Schaderregern zu liefern. Für im Hopfen auftretenden Schaderreger wurden keine verwertbaren

Publikationen gefunden, für Apfel blieben nach Durchsicht 11 Veröffentlichungen übrig, für Wein lediglich eine.

Die meisten Arbeiten beschäftigten sich mit den Auswirkungen von Sturm auf die klimawandelrelevanten Schaderreger der genannten Kulturen (5), gefolgt von Trockenheit (3), Hagel oder Starkregen (jeweils 2) und Überflutung oder Hitze (jeweils 1). Da einige Arbeiten die Wirkungen mehrerer Extrema beschreiben, übersteigt die Summe der genannten Zahlen die genannte Gesamtzahl an vorhandenen Quellen von 12. Zu den Auswirkungen von Dürre, Frühfrost, Spätfrost, Kahlfrost, Nassschnee, anderen Extremtemperaturen als Hitze oder unter dem Begriff „Extremwetter“ wurden keine Quellen und somit keine Informationen gefunden.

Der Einfluss von Extremwetterereignissen auf Viruserkrankungen, Unkräuter und pflanzenschädigende Säugetiere bei Apfel, Wein und Hopfen ist bisher nicht untersucht worden bzw. es liegen noch keine Veröffentlichungen dazu vor (*l.c.* Seidel, 2014 b). Etwas weniger als die Hälfte der gefundenen und verwertbaren Publikationen beschäftigt sich mit dem Einfluss extremer Witterung auf das phytopathogene Bakterium *Erwinia amylovora* (Feuerbranderreger). Drei Publikationen hatten die Auswirkungen von Überflutungen oder Hagel bzw. Hitze in Kombination mit Trockenheit auf phytopathogene Pilze an Wein und Apfel zum Untersuchungsgegenstand. Mit dem Einfluss von Hagel auf *Cydia pomonella* (Apfelwickler) also ein Schadinsekt, befasste sich eine Arbeit (*l.c.* Seidel, 2014 b, c).

Sowohl von hemmenden als auch fördernden Einflüssen der genannten Extremwettereignisse auf die Schaderreger (Auftreten, Befallsstärke, Entwicklungszyklus, Populationsdynamik bzw. Epidemiologie) direkt oder indirekt über die Beeinflussung der Kulturpflanze (hier veränderte Prädisposition) wird berichtet (*l.c.* Seidel, 2014 b, c). Weiterhin werden Einflüsse auf alternative Pflanzenschutzmaßnahmen (geminderte Wirkung von Resistenzinduktoren) geschildert (*l.c.* Seidel, 2014 b, c). Offensichtlich gibt es auch Auswirkungen von Maßnahmen, welche die Wirkung von Extremwetterereignissen auf Schaderreger mindern sollen: Hagelnetze können vor dem Apfelwickler schützen, aber den Apfelschorf fördern (*l.c.* Seidel, 2014 b, c).

Obwohl Dauerkulturen sehr kostenintensiv sind, Schaderreger hier bereits unter herkömmlichen Klimabedingungen beträchtliche Verluste verursachen können und z. B. die Auswirkungen von bekannten Extremwetterereignissen wie Hagel, Sturm oder Überflutungen auf diese Kulturen selbst teils drastisch sind und mit erheblichen qualitativen und quantitativen Ertragsverlusten bis zu Totalausfällen einhergehen, liegen kaum Informationen zu den Auswirkungen der Extremwetterereignisse auf Schaderreger vor. Nur 12 Publikationen konnten hierzu gefunden werden. Im Hinblick auf die Extremwetterereignisse überlebenden Kulturpflanzen wäre aber durchaus von Interesse, ob sie z. B. von Schaderregern besser befallen werden können, ob zusätzliche Schäden durch Schaderreger entstehen können oder aber auch ein geringerer Befall möglich ist, wie die Schaderreger selbst durch Extrema beeinflusst sind und ob Maßnahmen zu deren Abwehr oder inwieweit Schutzmaßnahmen vor Extremwetterereignissen Abhilfe vor Schaderregern schaffen können. Diese Publikationen liefern erste Hinweise darauf, dass Extremwetterereignisse Schader-

reger fördern und/oder hemmen können, sowohl direkt als auch indirekt über die Pflanze oder durch Pflanzenschutzmaßnahmen. Es deutet sich an, dass zwischen den einzelnen Extrema, Schaderregern, Pflanze, Kulturmaßnahmen und Pflanzenschutzmaßnahmen Wechselwirkungen möglich sind, welche Einzeleffekte verändern oder auch aufheben. Die insgesamt extrem lückenhafte Datenlage zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf das Schaderregerauftreten und die Schadwirkung lässt jedoch noch keine Schlussfolgerungen zu Risiken, Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen und für den Pflanzenschutz allgemein zu. Daher blieben die wenigen, lückenhaften Daten bei den weiteren Auswertungen im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens unberücksichtigt. Um den für eine Folgenabschätzung erforderlich Bedarf an Primärdaten zu decken, besteht ein erhöhter Forschungsbedarf.

3.3.5 Expertengespräche zur Relevanz von Extremwetterereignissen

Apfel

Expertenbefragungen unter Beratern und Praktikern in den Apfelanbaugebieten „Niederelbe“ (n=18) und „Bodensee“ (n=26) zeigten in Hinblick auf die Relevanz der einzelnen Extremwetterlagen deutliche regionale Unterschiede. Wie Tabelle 3.10 zeigt, führt in beiden Anbaugebieten Hagel die Rangliste der relevanten Extremwetterlagen an.

Tabelle 3.10: Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Apfelanbau

Niederelbe			Bodensee		
Rang	Extremwetterlage	RN**	Rang	Extremwetterlage	RN ± SD
1	Hagel	2,06	1	Hagel	1,23 ± 0,53
2	Spätfrost	2,17	2	Trockenheit	3,38 ± 1,69
3	Staunässe/Überschwemmung	4,72	3	Spätfrost	3,43 ± 2,50
4	Dauerregen	5,06	4	Hitze	3,71 ± 2,08
5	Kahl-/Winterfrost	5,72	5	Starkregen	3,89 ± 2,05
6	Hitze	6,06	6	Dauerregen	4,59 ± 2,63
7	Starkregen	6,34	7	Sturm	4,89 ± 3,20
8	Frühfrost	8,28	8	Extreme Dürre	5,27 ± 4,10
9	Sturm	8,39	9	Kahl-/Winterfröste	5,89 ± 2,75
10	Extreme Dürre	8,78	10	Frühfröste	6,31 ± 3,20
11	Trockenheit	9,00	11	Staunässe/Überschwemmung	7,50 ± 2,02
12	Nassschnee	11,44	12	Nassschnee	7,63 ± 3,36

Basis: Befragungen in Kooperation mit dem Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee in Bavendorf (Bodensee) und dem Esteburg Obstbauzentrum in Jork (Niederelbe), unter Beratern und Praktiker in den Anbaugebieten „Niederelbe“ (n=18) und „Bodensee“ (n=26) berechnete Ränge, mittlere Rangnoten (RN) ± Standardabweichung (SD). * ohne SD.

Unterschiede zeigten sich aber auf den nachfolgenden Rängen. Die Experten im Anbaugebiet „Niederelbe“ vergaben Rang 2 an Spätfrost und Rang 3 an „Überschwemmung und Staunässe“.

Die im Anbaugebiet „Bodensee“ befragten Experten sehen nach Hagel hingegen vor allem Trockenheit und dann erst Spätfrost als relevant an.

Auf der Basis der Expertenbefragungen wurden über den Jahresverlauf für die von den Extremwetterlagen ausgehenden Risiken (Dauer und Schadpotenzial) abgeleitet. Es zeigt sich, dass für die beiden Apfelanbaugebiete die Risiken teilweise sehr unterschiedlich bewertet werden. Während das Schadpotenzial an der „Niederelbe“, auf das ganze Jahr bezogen, durch Dauerregen und „Überschwemmung/Staunässe“ am höchsten ist und vom eigentlichen Ranking abweicht, zeigen am „Bodensee“, in Übereinstimmung mit dem vergebenen Ranking, Hagel und Trockenheit die höchsten Risikowerte.

Wein

Wie Tabelle 3.11 zeigt, wurden Spätfrost (Rang 1), Hagel (Rang 2) und Trockenheit (Rang 3) im Rahmen der Befragung von Beratern und Praktikern in den Weinanbaugebieten „Pfalz“ (n=6), „Rheinhessen“ (n=7), „Franken“ (n=6), „Nahe“ (n=4) und „Rheingau“ (n=1) über alle betrachteten Anbaugebiete als die drei relevantesten Extremwetterlagen identifiziert. Werden die Anbaugebiete getrennt voneinander betrachtet, werden jedoch regionale Unterschiede deutlich. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die geografische Lage nicht nur entscheidenden Einfluss auf die großklimatischen Eigenschaften eines Anbaugebietes, sondern auch auf die Relevanz (Häufigkeit, Dauer und Schadpotenzial) von Extremwetterlagen haben kann und sich die Anbaugebiete darin zum Teil erheblich unterschieden können.

Tabelle 3.11: Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Weinbau

	Pfalz		**Rheinhessen***		**Franken***		**gesamt**	
Rang	Rang	RN	Rang	RN	Rang	RN	Rang	RN
Trockenheit	4	4,0 ± 1,8	6	3,8 ± 2,7	1	2,0 ± 1,3	3	3,2 ± 2,1
Hitze	5	4,5 ± 1,7	8	5,8 ± 2,1	4	4,2 ± 2,4	6	4,7 ± 2,0
Staunässe/ Dauerregen	8	5,8 ± 3,5	7	4,3 ± 2,2	2	2,8 ± 2,2	5	4,4 ± 2,8
Starkregen	6	5,0 ± 2,6	5	3,6 ± 2,4	3	4,0 ± 1,7	4	4,1 ± 2,2
Hagel	1	1,4 ± 0,9	1	2,0 ± 1,3	6	5,3 ± 1,0	2	2,6 ± 1,9
Sturm	7	5,7 ± 2,3	4	3,5 ± 0,6	7	7,0 ± 1,4	7	5,4 ± 2,3
Spätfrost	2	2,2 ± 0,4	2	2,5 ± 0,8	1	2,0 ± 1,1	1	2,2 ± 0,8
Winterfrost	3	3,0 ± 1,2	3	3,3 ± 1,5	5	5,0 ± 2,0	4	4,1 ± 1,9
Frühfrost	9	7,0 ± 2,7	9	9,0**	8	8,5 ± 0,7	8	7,8 ± 2,0
Nassschnee	10	10,3 ± 1,5	10	10,0**	-	-	9	10,3 ± 1,3

Basis: Befragungen unter Mitwirkung des Thünen-Instituts (Dr. K. Strohm und A. Bender) unter Beratern und Praktiker in den Anbaugebieten „Pfalz“ (n=6), „Rheinhessen“ (n=7) und „Franken“ (n=6) berechnete Ränge, mittlere Rangnoten (RN) ± Standardabweichung (SD), * n=1, - als nicht relevant eingestuft.

Gemittelt über alle befragten Experten und Weinanbaugebiete geht von Trockenheit die längste Phase starken Risikos (Anfang Juli-Mitte August) aus. Das von Spätfrost ausgehende Risiko bewerteten die Befragten von Ende April bis Mitte Mai als stark. Besonders hohe Gefahr und eine starkes Potenzial für Schäden geht im Weinbau von Hagel von Anfang Juli bis Mitte Juli aus. Von allen anderen Extremwetterlagen geht maximal ein mittleres Risiko aus, wobei dieses bei Kahl-/Winterfrost mit einer zweimonatigen Phase zu Beginn des Jahres (Jan-Feb) am längsten anhält. Nach den Auswertungen besitzt Trockenheit den höchsten Risikowert im Weinbau, gefolgt von Hagel und Dauerregen/Staunässe.

Hopfen

Eine Besonderheit der Dauerkultur „Hopfen“ ist, dass die Pflanzen in jedem Jahr komplett neu aus dem Wurzelstock austreiben und erwachsen muss. So erreicht sie im Vergleich zu Apfel und Wein die Phase der Blattbildung und der Blüte erst etwa einen bis anderthalb Monate später und kommt damit eher in den durch „Frühsommertrockenheit“ gefährdeten Zeitraum, entgeht während der Blüte so aber der Spätfrostgefahr.

Exemplarisch für den Hopfenanbau wurden Befragungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im größten Anbaugebiet „Hallertau“ durchgeführt. Die n=34 befragten Berater und Praktiker erstellten eine Rangfolge (vgl. Tabelle 3.12). Von allen Extremwetterlagen bis einschließlich Rang 7 geht eine mindestens 1-monatige Phase mit starkem Risiko aus. Das von den Extremwetterlagen ausgehende Risiko (Risikowerte) wurde auch unter Ausklammerung der Häufigkeit ihres Auftretens als Schadpotenzial bewertet. Demnach werden Überschwemmung/Staunässe sowie „Dauer- und Starkregen“ als sehr relevant eingestuft. Hagel bleibt weiterhin auf Rang 2.

Tabelle 3.12: Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Hopfenbau

	Hallertau	
Rang	Extremwetterlage	RN
1	Extreme Dürre	1,8 ± 1,1
2	Hagel	2,3 ± 1,5
3	Trockenheit	2,9 ± 1,3
4	Hitze	3,7 ± 1,3
5	Sturm	4,1 ± 2,1
6	Staunässe/Überschwemmung	5,9 ± 2,2
7	Starkregen	6,4 ± 1,8
8	Dauerregen	6,7 ± 2,1
9	Spätfrost	8,2 ± 1,7
10	Frühfrost	10,7 ± 0,9
11	Kahl-/Winterfrost	10,8 ± 1,1
12	Nassschnee	11,6 ± 0,6

Basis: Befragungen in Kooperation mit der Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern in Hüll (Hallertau)unter Beratern und Praktiker im Anbaugebiet „Hallertau“ (n=34) berechnete Ränge, mittlere Rangnoten (RN) ± Standardabweichung (SD)

Gemüse

Die Expertenbefragungen im Gemüsebau fanden deutschlandweit und größtenteils postalisch statt. Aufgrund des Stichprobenumfanges von n=11-13 je Kultur und zum Zweck der Vermeidung von Fehlinterpretationen wurden die Ergebnisse nicht regionalisiert (z. B. auf Bundeslandebene) dargestellt, sondern als Gesamtüberblick für den Anbau in Deutschland. Aus den Befragungsrücklaufen ergaben sich die in Tabelle 3.13 dargestellten Rangfolgen.

Tabelle 3.13: Expertenbewertungen zur Relevanz von Extremwetterlagen im Gemüsebau

	Spargel		Speisezwiebel		Möhre		Weiß- und Rotkohl	
	Rang*	RN	Rang*	RN	Rang*	RN	Rang*	RN
Hagel	2	2,1 ± 1,2	2	2,5 ± 1,5	5	3,3 ± 1,5	2	2,1 ± 1,5
Trockenheit	3	2,5 ± 1,5	1	2,4 ± 1,5	1	2,0 ± 1,2	1	2,0 ± 1,0
Hitze	5	4,3 ± 1,8	5	3,4 ± 1,6	4	3,0 ± 1,4	4	3,0 ± 1,1
Sturm	6	4,7 ± 1,5	6	5,4 ± 1,5	-	-	-	-
Staunässe (Dauerregen)	1	2,0 ± 1,1	4	3,0 ± 1,8	3	2,5 ± 1,7	3	2,9 ± 1,7
Starkregen	4	3,7 ± 2,4	3	2,9 ± 1,1	2	2,4 ± 0,9	5	3,4 ± 1,3
Spätfrost	7	6,2 ± 2,7	7	6,5 ± 1,3	-	-	7	4,3 ± 1,5
Frühfrost	9	7,0 ± 2,6	-	-	-	-	7	4,3 ± 2,1
Kahl-/Winterfrost	-	-	8	7,7 ± 1,5	-	-	-	-
Nassschnee	8	7,3 ± 1,2	-	-	-	-		

Basis: bundesweite Befragungen unter Beratern und Praktiker zu Spargel (n=12), Speisezwiebel (n=13), Möhre (n=11) sowie Weiß- und Rotkohl (n=11) berechnete Ränge, mittlere Rangnoten (RN) ± Standardabweichung (SD) *Ränge nur dann berechnet, wenn mindestens drei (n≥3) der Befragten diese Extremwetterlage als relevant eingeschätzt und einen Rang vergeben haben

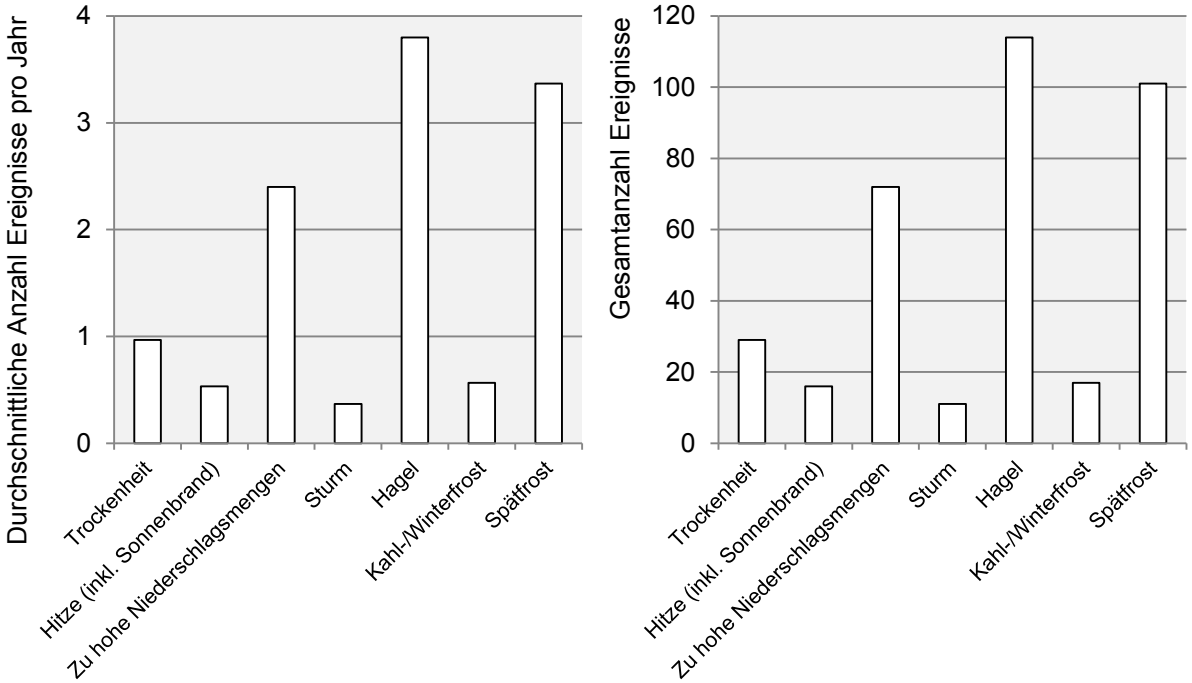
3.3.6 Auswertung vorhandener Daten

Apfel

Die Auswertung der jährlichen Ausführungen zum Verlauf des Obstjahres im Kernobstbau des OVR in Jork (vgl. Abbildung 3.21) bestätigt die durch die Experten vergebene Rangfolge im Anbaugebiet „Niederelbe“. Hagel trat im Zeitraum 1983 bis 2013 am häufigsten (114) und knapp 4-mal pro Jahr auf, Spätfrost am zweithäufigsten (knapp 3,5 x pro Jahr) und zu hohe Niederschlagsmengen (Dauer- und Starkregen, Staunässe und Überschwemmung) im Durchschnitt knapp 2,5-mal pro Jahr. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass dieser Übersicht nicht zu entnehmen ist, in welchem Umfang das Anbaugebiet jeweils betroffen war. Es kann also sein, dass die Ereignisse sehr regional begrenzt aufgetreten sind oder große Teile des Anbaugebietes betroffen waren. Keinesfalls traten in jedem Jahr alle Extremwetterlagen im gesamten Anbaugebiet auf. Dennoch geben die Grafiken einen guten Überblick, dass die Einschätzung der Experten beim

Ranking der Extremwetterlagen mit dem wahrscheinlichen, tatsächlichen Auftreten übereinstimmte.

Abbildung 3.21: a, b Gesamtanzahl (a) und mittlere Anzahl pro Jahr (b) der Extremwetterereignisse an der „Niederelbe“ in den Jahren 1983 bis 2013

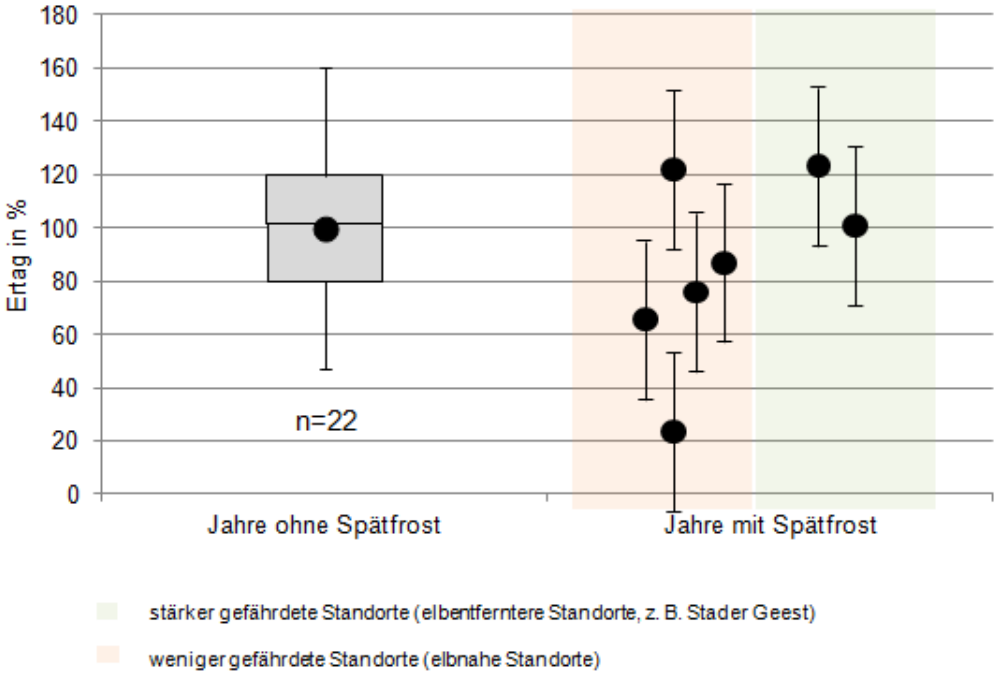


Quelle: König (2014). Auf Basis einer Auswertung der „Jahresberichte zum Obstbaujahr“ (Mitteilungen OVR Jork).

Für den Apfelanbau gelang es in Betrieben an der „Niederelbe“, Ertragsdaten von Flächen zu sammeln, um das Schadpotenzial von Spätfrösten (in Bezug auf den Ertrag) zumindest grob zu quantifizieren. Eine besondere Schwierigkeit lag darin, Flächen zu finden, die nicht frostschutzberegnet sind, genügend lange Standzeiten (ab 4. Ertragsjahr) aufweisen und trotzdem in mindestens einem Jahr Spätfrostschäden erfahren haben. Hier muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es derzeit keine Quellen gibt, in der entsprechende Daten regelmäßig erhoben werden, was ein erhebliches Defizit im Hinblick auf die Quantifizierbarkeit des Schadausmaßes von Extremwetterlagen darstellt. So wurden in Absprache mit Beratern des Obstbauversuchsringes in Jork für eine erste exemplarische Erhebung im Apfelanbau die Sorten „Elstar“ und „Jonagold“ ausgewählt, da diese im Hinblick auf den Anbauumfang an der „Niederelbe“ am bedeutendsten sind. Die Erträge in den Jahren „ohne Spätfrost“ wurden den Erträgen „mit Spätfrost“ relativ gegenübergestellt und dabei zusätzlich in Flächen unterschieden, die grundsätzlich stärker oder weniger stark spätfrostgefährdet sind. Die Schwankung der Erträge innerhalb der spätfrostfreien Jahre wurde als Alternanz aufgefasst und den Erträgen der Jahre „mit Spätfrost“ zugeordnet, um zu verdeutlichen, in welchem Rahmen die potenziellen Mindererträge schwanken könnten.

So ergaben sich für beide Sorten „Elstar“ (vgl. Abbildung 3.22) und „Jonagold“, deren Erträge auf den betrachteten Flächen in spätfrostfreien Jahren (n=22 bzw. n=19 Einzelerträge) zwischen knapp 50 t/ha und bis zu 160 t/ha schwankten, in Spätfrostjahren und auf spätfrostgefährdeten Anlagen Mindererträge von bis zu 80 %. Setzt man zusätzlich noch die Schwankung der Erträge durch Alternanz an, kann ein Spätfrostschaden bis zum Totalausfall führen. Besonders gefährdet sind Knospen und Blüten von Bäumen, die im Vorjahr sehr hohe Erträge erzielt haben (physiologisch schwach). Auch wenn der Datenumfang recht klein war und dieser keine statistischen Auswertverfahren zulässt, so zeigt sich doch bei Betrachtung der Erträge in Jahren „mit Spätfrost“, dass die nicht betroffenen (weniger gefährdete) Flächen einer geringeren Gefahr von Mindererträgen ausgesetzt sind und dort zum Teil sogar überdurchschnittliche Erträge erzielt werden könnten. Denkbar ist, dass durch eine geminderte Ertragsreduzierung auf den nicht betroffenen Flächen ein Ausgleich der Mindererträge betroffener Flächen angestrebt wurde. Allerdings könnte dies eine qualitative Beeinträchtigung nach sich ziehen. Da keine entsprechenden Qualitäts- oder Erlösdaten zur Verfügung standen, bleibt diese Annahme spekulativ und interessant für weitergehende Betrachtungen und umfassendere, statistische Datenanalysen.

Abbildung 3.22: Ertragsverluste (in % vom Mittelwert der Jahre ohne Spätfrost) durch Spätfrost bei der Apfelsorte „Elstar“ im Anbaugebiet „Niederelbe“ in Abhängigkeit von der Spätfrostgefährdung des Standortes (Whisker=mittlere Standardabweichung in Jahren ohne Spätfrost/Alternanz)



Quelle: Obstbaubetriebe im Anbaugebiet „Niederelbe“

Wein

Die Auswertung der durch die Weinbauberatung des DLR Rheinpfalz in Neustadt/Weinstr. erstellten jährlichen Übersichten zu den im Weinanbaugebiet „Pfalz“ gemeldeten Schäden durch Extremwetterlagen (vgl. Tabelle 3.14) zeigt, dass Hagel in allen der betrachteten Jahre aufgetreten ist. In den Jahren 2006, 2008 und 2010 – was knapp einem Drittel der untersuchten Jahre entspricht - kam es in der „Pfalz“ durch Hagel zu besonders starken und großflächigen Schäden, die im Juni 2010 über 4000 ha (Oberhofer 2012) des Weinanbaugebietes betroffen haben. Diese Ergebnisse bestätigen die hohe Relevanz des Hagels in diesem Weinanbaugebiet. Im Bereich der Mittelmosel kam es im August des Jahres 2011 zu enormen Hagelschäden, die laut Mitteilungen Nr. 20 des Rebschutzdienstes (DLR Mosel, 2014) auf bis zu 90 % Schaden in den betroffenen Flächen beziffert wurden, was einem Totalausfall nahe kommt. Die von den Experten als am zweit relevantesten eingeschätzte Extremwetterlage Spätfrost trat in 4 von 10 Jahren auf, wobei besonders starke Schäden im Jahr 2011 zu verzeichnen waren. In diesem Jahr waren nach Oberhofer (2012) in der „Pfalz“ 4000 bis 5000 ha betroffen, was mit einer geschätzten Schadenssumme von 30 – 40 Mio. Euro einherging. Betroffen davon waren in der Pfalz etwa 20 % aller Lagen. Deutschlandweit waren in diesem Jahr etwa 15000 ha Wein durch Spätfrostschäden betroffen. Die geschätzte Schadenssumme betrug rund 100 Mio. Euro (Oberhofer, 2012).

Tabelle 3.14: Überblick zu Extremwetterschäden und Schadausmaß im Weinanbaugebiet „Pfalz“ für den Zeitraum 2004 bis 2013

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Frühfrost										
Hagel										
Hitze										
Kahl-/Winterfrost										
Spätfrost										
Starkregen/Abschwemmung/Erosion										
Staunässe										
Sturm										
Trockenstress										
Sonnenbrand										

	nein
	Ja, nur aber nur partielle Schäden
	ja, teilweise starke Schäden
	ja, besonders starke Schäden

Quelle: Zusammenstellung der Schadensmeldungen, DLR Rheinpfalz

Wie sich die Spätfrostschäden des Jahres 2011 auf die Erträge und Mostgewichte ausgewirkt haben, konnte anhand einer exemplarischen Datenauswertung gezeigt werden und wird im folgenden Abschnitt behandelt. Durch die von den befragten Experten in der „Pfalz“ auf Rang 3 gewertete Extremwetterlage „Kahl-/Winterfrost“ kam es in 4 von 10 Jahren zu Schäden. Dabei fällt auf, dass die Schäden vorrangig in den letzten Jahren, genauer 2009, 2010, 2011 und 2013, auftraten. Ggf. hat dieses zeitnahe gehäufte Auftreten von „Kahl-/Winterfost“ die Bewertung durch die Ex-

perten in gewissem Maße beeinflusst. Obwohl Sturmschäden relativ oft (in 8 von 10 Jahren) auftreten, kann hier festgehalten werden, dass die dadurch bedingten Schäden recht vereinzelt, z. B. in anfälligen Sorten wie Dornfelder oder in bestimmten Lagen, angefallen sind.

Trotz des geringen Umfanges verfügbarer Daten, die für die Quantifizierung von Ertrags- und Qualitätseinbußen durch Extremwetterlagen geeignet sind, konnte eine exemplarische Analyse von Ertrags- und Mostgewichtsdaten der Jahre 2010 bis 2013 (n=200 pro Jahr) von jeweils n≥10 weißen und roten Rebsorten in Hinblick auf die Auswirkungen des Spätfrostereignisses im Jahr 2011 (Spätfrostereignis Anfang Mai, bis auf - 4 °C) erfolgen. Die zur Verfügung gestellten anonymisierten Daten stammen aus dem Raum Pfalz. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Flächen ausschließlich im Jahr 2011 ertragsrelevant durch Spätfrost betroffen waren.

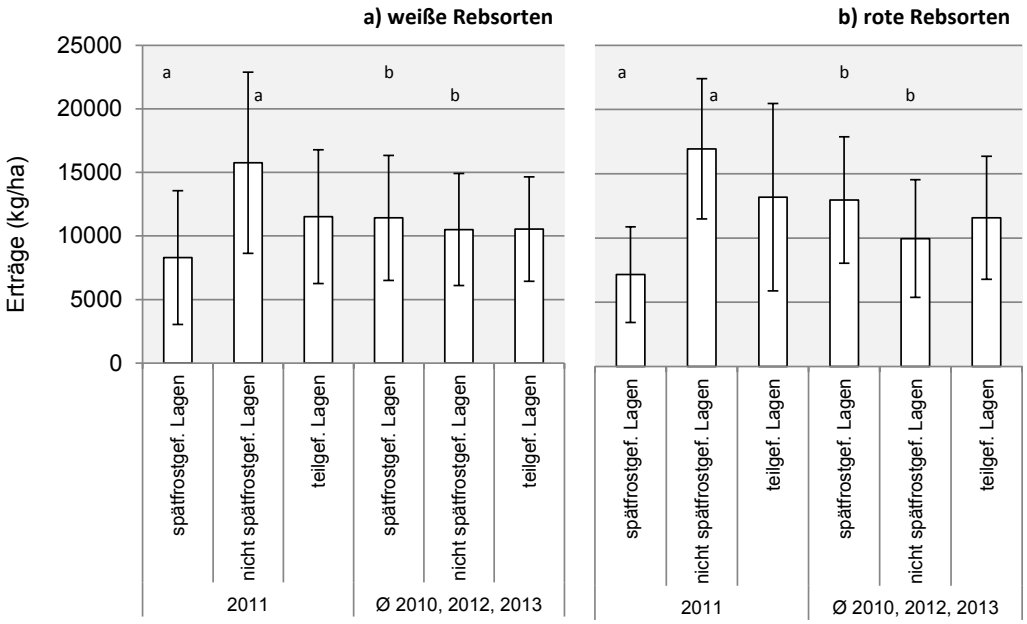
Die in die Untersuchungen einbezogene Gesamtfläche setzte sich in Hinblick auf die Spätfrostgefährdung aus circa 48 % teilgefährdeten, 36 % gefährdeten und knapp 16 % nicht gefährdeten Lagen zusammen. An dieser Stelle sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich die Anteile in anderen Gebieten grundlegend anders zusammensetzen können. Die Daten spiegeln eine Teilregion des Anbaugebietes Pfalz wider, die besonders von Spätfrost betroffen war. Im betrachteten Gebiet erfolgte der Austrieb im Jahr 2011, in Abhängigkeit der Rebsorten, im Mittel etwa ab dem 10./11. April, was einer Verfrühung um circa 10 Tage gegenüber dem durchschnittlichen Austriebszeitpunkt entsprach. Diese Abweichung erhöhte sich in Bezug auf den Blühbeginn (im Mittel 22.-25.05.) nochmals auf circa 18 bis 20 Tage. In den spätfrostfreien Jahren wurden die höchsten Erträge auf den gefährdeten Flächen erreicht.

Die Gegenüberstellung der Erträge der spätfrostfreien Jahre 2010, 2012 und 2013 mit den Erträgen im Spätfrostjahr 2011 ergaben auf gefährdeten Flächen für die Weißweinsorten durchschnittliche Mindererträge um 27 %, in extremen Fällen um bis zu 75 %, (vgl. Abbildung 3.23). In den Rotweinsorten konnten auf den gefährdeten Flächen durchschnittliche Mindererträge um 44 %, in extremen Fällen um bis zu 80 %, gemessen werden (vgl. Abbildung 3.24). Auf den nicht gefährdeten Flächen wurden hingegen im Spätfrostjahr 2011 überdurchschnittlich hohe Erträge (im Mittel + 50 %), aber im Vergleich zum Durchschnitt etwas geringere Mostgewichte erzielt. Die teilgefährdeten Lagen zeigten in diesem Jahr keine auffällige Ertragsbeeinflussung, allenfalls eine leichte Tendenz zu höheren Erträgen. Bis zu welchem Grad die Ertragssteigerung der nicht betroffenen Flächen des Jahres 2011 dem generell hohen Ertragsniveau dieses Jahres und ggf. bewusst geminderten Ertragsreduzierungsmaßnahmen zugerechnet werden kann, ist an dieser Stelle nicht eindeutig zu klären. Allerdings ist in Anbetracht des hohen Ertragsniveaus des Jahres 2011 anzunehmen, dass die Einbußen deutlich über den durchschnittlichen Werten von 27 und 44 % lagen (Expertenbefragung DLR 2014). Fakt ist, dass in ertragsstarken Jahren Extremwetterschäden in der Regel noch größere Verluste hervorrufen können als in ertragsschwachen.

Ein Ausgleich der Mindererträge der betroffenen Flächen durch die Mehrerträge der nicht betroffenen Flächen ist auch aufgrund ihres unterschiedlichen Anteils an der Gesamtfläche (36 vs. 16 %) nicht möglich gewesen. Im Zuge erweiterter Datensammlungen wäre die Betrachtung, wie

sich diese Zusammenhänge ökonomisch bewerten lassen, von großem Wert. So könnten die Auswirkungen von Spätfrost im Weinbau auch monetär quantifiziert werden.

Abbildung 3.23: a, b Vergleich der mittleren Erträge (kg/ha) der weißen (a) und roten (b) Rebsorten im Spätfrostjahr 2011 mit den mittleren Erträgen der Jahre 2010, 2012, 2013 (ohne Spätfrost)

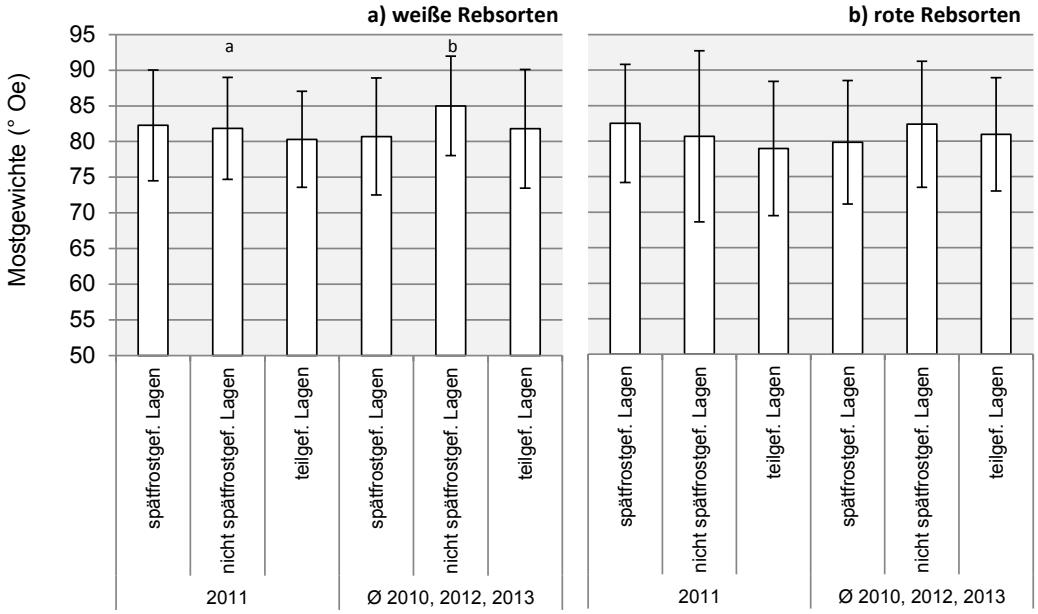


Anmerkungen: Paarweise Vgl. mittels t-Test, Buchstaben kennz. signif. Unterschiede

Quelle: anonym, Anbaugebiet „Pfalz“

Neben der Spätfrostgefährdung durch die Lage kann auch der sortenspezifische Austriebszeitpunkt Einfluss auf den Grad potenzieller Spätfrostschäden haben. Dabei ist die Hypothese, dass ein früherer Austrieb die Spätfrostgefährdung erhöht. Daher wurden die Sorten in früh, frühmittel, mittel, mittel-spät und spät austreibenden Sorten kategorisiert und der Einfluss dieser Eigenschaft im Hinblick auf den Grad der Spätfrostschäden analysiert. Dabei wurde zusätzlich betrachtet, in welchem Ausmaß die Spätfrostgefährdung der Lagen diese Schäden beeinflusst.

Abbildung 3.24: a, b Vergleich der mittleren Mostgewichte (°Oe) der weißen (a) und roten (b) Rebsorten im Spätfrostjahr 2011 mit den mittleren Mostgewichten der Jahre 2010, 2012, 2013 (ohne Spätfrost)

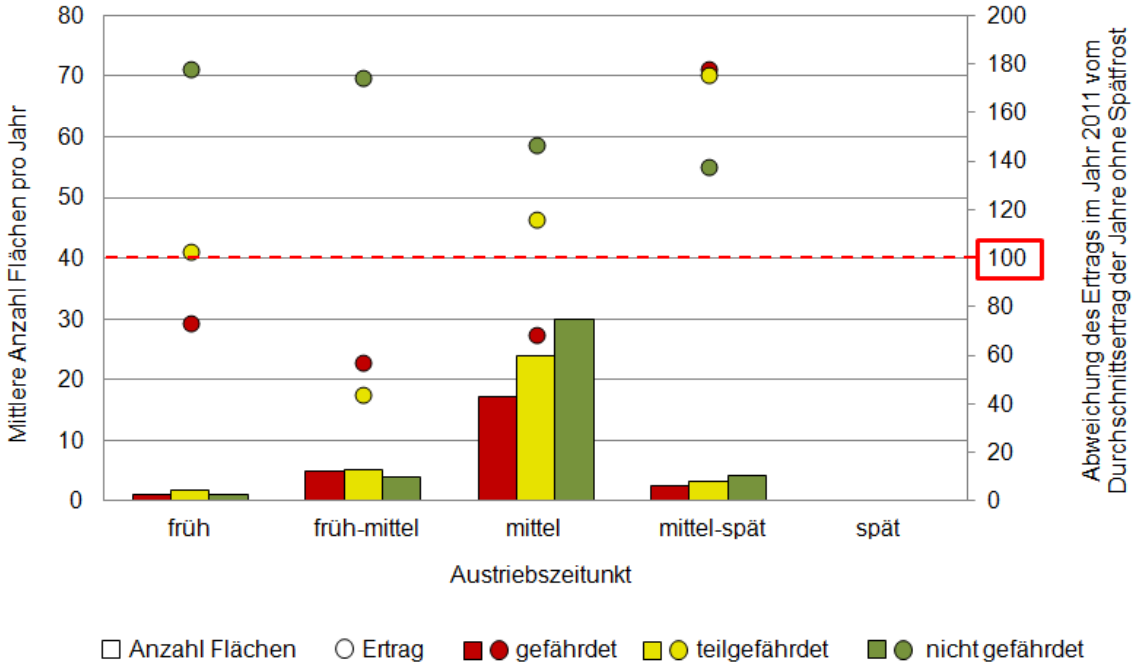


Anmerkungen: Paarweise Vgl. mittels t-Test, Buchstaben kennz. signif. Unterschiede

Quelle: anonym, Anbaugebiet „Pfalz“

In Abbildung 3.25 wird ersichtlich, dass früh bis mittel austreibende weiße Rebsorten auf Spätfrostgefährdeten Lagen die größten Spätfrostschäden erfahren können und im Mittel 30 bis 40 % Ertragsverluste gegenüber dem mittleren Ertrag aufweisen, was deutlich über dem durchschnittlichen Ertragsverlust aller Austriebsklassen der Weißweinsorten (- 27 %) liegt. Auch hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass das hohe Ertragsniveau des Jahres 2011 zu noch höheren Verlusten geführt haben kann. Allerdings verdeutlicht die Abbildung 3.25 auch, dass früh, früh-mittel sowie mittel-spät austreibende weiße Rebsorten in nur geringem Umfang und spät austreibende gar nicht angebaut werden. So sind die gewonnen Ergebnisse nur in der Lage, erste Hinweise zu liefern. Ein größerer Stichprobenumfang ist unabdingbar, um aussagefähige, statistische Analysen durchführen zu können. Im Jahr 2011 war der Austrieb Anfang April sehr früh, so dass bis zum Auftreten des Frostereignisses am 4. Mai alle Sorten ausgetrieben hatten. In einem Jahr mit späterem Austrieb ist tendenziell mit größeren Unterschieden zwischen den Sorten zu rechnen.

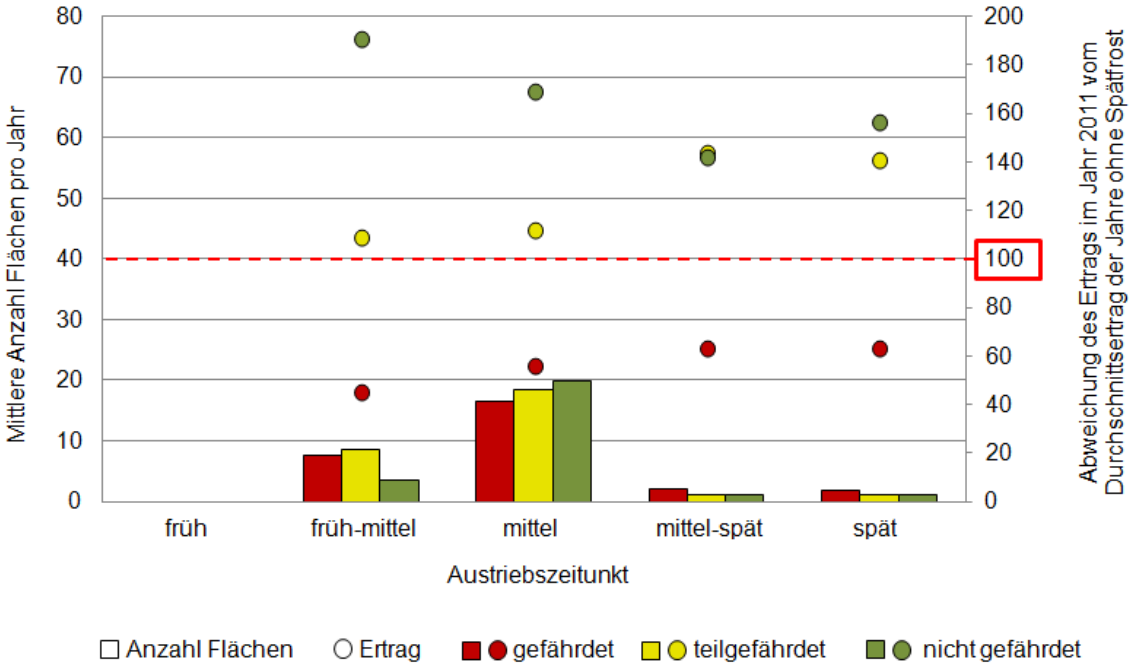
Abbildung 3.25: Einfluss des Austriebzeitpunktes und des Spätfrostrisikos der Lagen auf das Ausmaß der Ertragseinbußen durch Spätfrost im April 2011 in weißen Rebsorten



Quelle: anonym, Anbaugebiet „Pfalz“

Die gleiche Auswertung erfolgte für die roten Rebsorten (vgl. Abbildung 3.26). Das angebaute Sortenspektrum des betrachteten Anbaugebietes umfasste keine früh austreibenden roten Rebsorten. Früh-mittel und mittel austreibende rote Sorten dominierten den Anbau in dem betrachteten Gebiet. Für die roten Rebsorten zeigte sich, dass der Anbau in gefährdeten Lagen - unabhängig von der Austriebklasse - immer zu deutlichen Mindererträgen durch den Spätfrost führte. Es ist allenfalls eine leichte Tendenz für geringere Schäden bei später austreibenden Rebsorten zu erkennen. Auch hier können die Analysen auf Grund des zum Teil geringen Stichprobenumfanges nur erste Hinweise und vor allem eine Anregung für weitere Analysen geben. Eine größere Datenmenge und statistische Auswertverfahren würden zeigen, ob diese Tendenz bestätigt werden kann und um wie viel das Schadpotenzial in Abhängigkeit der Sorteneigenschaften schwankt. Darüber hinaus sind eindeutige Effekte des Austriebzeitpunktes auf die Mostgewichte von der verfügbaren Datenbasis nicht ableitbar.

Abbildung 3.26: Einfluss des Austriebzeitpunktes und des Spätfrostrisikos der Lagen auf das Ausmaß der Ertragseinbußen durch Spätfrost im April 2011 in roten Rebsorten

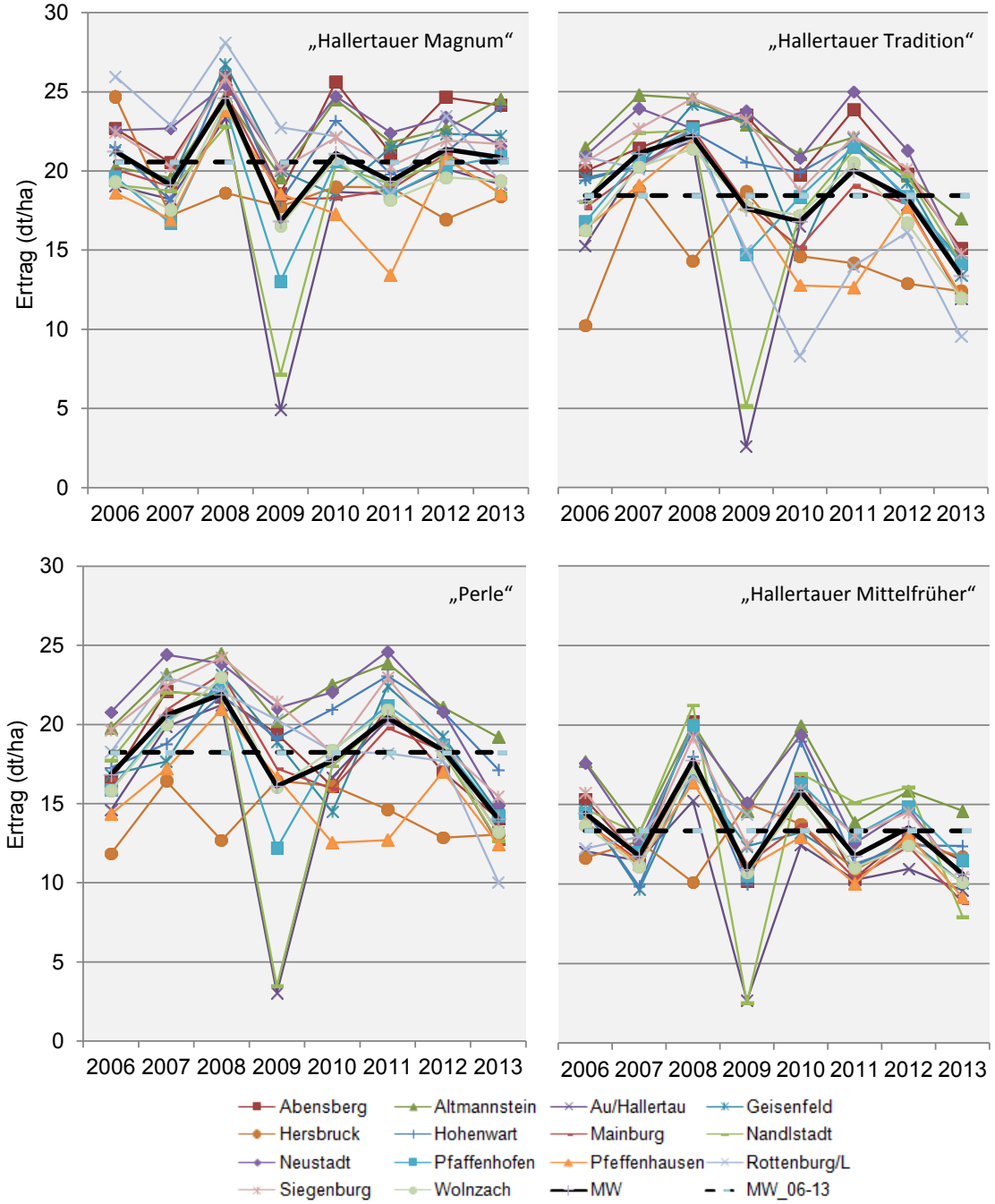


Quelle: anonym, Anbaugebiet „Pfalz“

Hopfen

Die Auswertung der durch den Hopfenring e.V. zur Verfügung gestellten Ertragsdaten für das Anbaugebiet „Hallertau“ der Jahre 2006 bis 2013 erfolgte exemplarisch anhand der vier dort bedeutendsten Hopfensorten „Hallertauer Magnum“, „Hallertauer Tradition“, „Perle“ und „Hallertauer Mittelfrüh“ (vgl. Abbildung 3.27). Dabei ist festzuhalten, dass pro Sorte und Jahr jeweils ein Durchschnittswert pro Herkunftsbezirk (insgesamt n=14 Herkunftsbezirke) zur Verfügung stand und so keine statistische Auswertung in Hinblick auf jahresspezifische Unterschiede zwischen den Erträgen innerhalb eines Herkunftsbezirkes möglich war. Die Auswertung der Erträge dieser vier Sorten in den 14 Herkunftsbezirken (vgl. Abbildung 3.27) zeigte dennoch, insbesondere in den Jahren 2006, 2009 und 2013, eine starke, negative Abweichung vom mittleren Ertrag der Sorten.

Abbildung 3.27: Erträge (dt/ha) der Hopfensorten „Hallertauer Magnum“, „Hallertauer Tradition“, „Perle“ und „Hallertauer Mittelfrüh“ in den Jahren 2006 bis 2013 in den 14 Herkunftsbezirken des Anbaugebietes „Hallertau“



Quelle: Hopfenring e.V., Anbaugebiet „Hallertau“

Im Jahr 2006 waren davon vor allem die Sorten „Hallertauer Tradition“ und „Perle“ in den Herkunftsbezirken „Hersbruck“, „Pfeffenhausen“ und Au i. d. Hallertau“ betroffen. Eine Recherche in den Jahresberichten Hopfen der Bayerischen LfL, genauer der Rückschau auf den Witterungsver-

lauf des Jahres 2006, ergab, dass in diesem Jahr zunächst ein feuchtes Frühjahr Pflanzenschutzmaßnahmen behinderte. In den Monaten März bis Juni fielen jeweils > 100mm Niederschlag pro m² und Monat, was das bis zu doppelte der langjährigen Niederschlagsmengen darstellte. Im Juli wurden Rekordtemperaturen (Tmitt ca. + 4 °C, Tmax + 6 °C vgl. langjähriges Mittel) und ausgesprochen hohe Trockenheit (ca. – 50 % vgl. langjähriges Mittel) festgestellt, was zu bis zu 40 %igen Ertragsausfällen führte (Bayerische LfL Hopfenjahresbericht 2006). Hinzu kam im August großflächiger Hagel, der partiell weitere Verluste erzeugte. In 2009 zeigten sich über alle Sorten bis zu 85 %ige Ertragseinbußen. Besonders betroffen waren in diesem Jahr die Herkunftsbezirke „Au i. d. Hallertau“, „Nandlstadt“ und „Pfaffenhofen“. Laut LfL Jahresbericht für 2009 war starker Hagel Ende Mai dafür ursächlich. Im Juni folgten hohe Niederschläge (ca. + 10 – 20 % vgl. langjähriges Mittel), woraus ein besonders hoher Peronosporabefall resultierte, der durch die vorherigen Hagelschädigungen besonders gefördert wurde (Bayerische LfL, 2009). Das dritte Jahr mit auffälligen Mindererträgen war 2013. Außer bei „Hallertauer Magnum“ zeigten alle betrachteten Sorten in fast allen Herkunftsbezirken Mindererträge, teilweise über 40 %. In 2013 führte ein langer Winter zu einem späten Austrieb, der die Periode für die notwendigen Frühjahrsarbeiten verkürzte. Im Mai und Juni sorgten hohe Regenmengen (ca. + 50 – 70 % vgl. langjähriges Mittel) für Wachstumsverzögerungen, vernässte Böden und Überschwemmungen in Tallagen (Bayerische LfL, 2013). Gegen Mitte bis Ende Juni kam es zu zusätzlichen Hagelschäden. Dieses Jahr war somit ein gutes Beispiel für das Aufsummieren mehrerer, in sich schädigender, Extremwetterlagen.

Am häufigsten zeigten sich im betrachteten Zeitraum von 2006 bis 2013 in den Herkunftsbezirken „Hersbruck“ und „Pfeffenhausen“ unterdurchschnittliche Erträge. Eine exemplarische Analyse einiger standortspezifischer Charakteristika auf den Hopfenflächen dieser beiden Gemeinden zeigt, dass die dominierenden Bodenarten in diesen deutlich von den mittleren Bodenartenanteilen des restlichen Anbaugebietes „Hallertau“ abweichen (vgl. Abbildung 3.27). Darüber hinaus unterscheiden sich die Hopfenflächen in den beiden Gemeinden in ihrer mittleren Hangneigung. Genauere, statistische Analysen – basierend auf genügend Daten - könnten zeigen, ob und wie standortspezifische Charakteristika Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Mindererträgen durch Extremwetterlagen haben.

Abschließend kann festgehalten werden, dass das Ausmaß der Ertragseinbußen stark sorten- und standortabhängig war bzw. ist und dass die endgültigen Ertragseinbußen oft die Folge mehrerer Extreme zu sein scheinen. Des Weiteren scheinen die Schäden in vielen Fällen eine Kombination aus direkten abiotischen Schäden und biotischen Folgeschäden zu sein. Auf Basis der vorliegenden Daten ist die Zuordnung des extremwetterlagenspezifischen Ertragseinflusses bzw. die Quantifizierung des Einflusses der biotischen Folgeinfektionen schwierig bis unmöglich. Da derzeit hierzu keine Einzeldaten auf Flächenebene vorliegen, können Zusammenhänge statistisch nicht abgeleitet werden.

Gemüse

Im Gemüsebau waren - wider Erwarten - keine verwendbaren Daten verfügbar bzw. deren Bereitstellung nicht realisierbar. Angefragt wurden unter anderem Versuchsbetriebe, der Speise-

zwiebel-Anbauverband, das Testbetriebsnetz und das Vergleichsbetriebsnetz. Problem war, dass es in der Regel keine flächenbezogenen Ertragsdaten gibt bzw. diese nicht im Rahmen einer Erhebung gesammelt wurden. Die generell verfügbaren Ertragsdaten im Gemüsebau sind hierfür nicht verwendbar, da Sie aggregiert (nicht flächen- oder standortspezifisch, sondern zu meist auf Bundesland- oder Kreisebene) und oftmals geschätzt (z. B. Ernteschätzungen) sind. Sie sind daher zur Ableitung des Einflusses von Extremwetterlagen ungeeignet. Erschwerend kommt in Bezug auf alle behandelten Sonderkulturen hinzu, dass das Auftreten der zumeist sehr lokalen Extremwetterlagen nicht flächenspezifisch dokumentiert wurde.

3.3.7 Anpassungsoptionen

Nachfolgend sind Maßnahmen zur direkten und indirekten Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterschädigungen bzw. der Minimierung finanzieller Verluste sowie deren Vor- und Nachteile (Pro und Contra) tabellarisch zusammengetragen (vgl. Tabelle 3.15)

Einige der Maßnahmen sind über staatliche Programme förderfähig. Diese Programme gehen entweder auf den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) und damit auf die EU-VO 1303/2013 zurück (Amtsblatt 2013a) oder auf die Gemeinsame Marktorganisation für landwirtschaftliche Erzeugnisse (GMO) nach EU-VO 1308/2013 (Amtsblatt 2013b).

Die ELER-Förderung erfolgt in Deutschland im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) auf Landesebene, die neben der Verbesserung Ländlicher Strukturen insbesondere landwirtschaftliche Unternehmen fördert. Ein zentrales Element der einzelbetrieblichen Förderung ist das Agrarinvestitionsförderprogramm (AFP). In der Förderperiode ab 2014 unterstützt das AFP investive Maßnahmen für eine wettbewerbsfähige, nachhaltige, besonders umweltschonende und besonders tiergerechte Landwirtschaft. Generell steht der Ansatz „öffentliche Mittel für öffentliche Leistungen“ bereitzustellen im Mittelpunkt (BMEL, 2014). Jedoch erlassen die Bundesländer eigene Richtlinien, die Schwerpunkte setzen oder bestimmte Maßnahmen von einer Förderung ausschließen. Hinsichtlich der Extremwetterereignisse im Obst-, Gemüse- und Weinbau sind je nach Bundesland vor allem Investitionen in folgende langlebige Wirtschaftsgüter mit einem Basiszuschuss von bis zu 20 % förderfähig:

- Bewässerungsanlagen, wenn eine Wassereinsparung von mindestens 25 % erreicht wird (Ziel: Ressourcenschutz bzw. Erhöhung der Ressourceneffizienz), Niedersachsen schließt diese Förderung explizit aus (LWK-NI, 2015)
- Hagelnetze, Baden-Württemberg erwähnt dies explizit (MLR, 2015)

Über das AFP hinaus finanziert Bayern aus Landesmitteln das Sonderprogramm Landwirtschaft (BaySL), durch das unter anderem Verluste durch Unwetterschäden im Obst-, Garten-, Wein- und Sonderkulturbau vermindert werden sollen (STMELF, 2014a). Als förderfähige Investitionen mit

bis zu 25 % Zuschuss wird die Anschaffung von Witterungsschutzeinrichtungen im Sonderkulturbereich erwähnt.

Betriebe des Obst- und Gemüsebaus können über die GMO für Maßnahmen zur Abfederung von Schäden aus Extremwetterereignissen gefördert werden. Die Förderhöhe für Aktionen über die GMO beträgt 50 % (Amtsblatt 2013b). Die Förderrahmenbedingungen sind in der „Nationalen Strategie für nachhaltige operationelle Programme der Erzeugerorganisationen für Obst und Gemüse in Deutschland“ festgelegt (BMEL 2015). Daraus folgt, dass ausschließlich Mitglieder von Erzeugerorganisationen für Obst oder Gemüse (EO) über die EO förderwürdig sind. In der investiven Förderung innerhalb der GMO können Investitionen in Hagelschutznetze und in wassereffiziente Beregnungsanlagen, z. B. Tropfbewässerung, gefördert werden. Darüber hinaus sind Ernteversicherungen förderfähig. Von der Förderung im Rahmen der Nationalen Strategie generell ausgeschlossen sind Investitionen, „[…] die zur Erfüllung der ursächlichen Aufgaben eines landwirtschaftlichen Betriebes notwendig sind […]“ (BMEL 2015, S. 26). Auch die Förderung von Modernisierungsinvestitionen ist unter besonderen Bedingungen möglich.

Im Rahmen der GMO für den Weinsektor haben einige Bundesländer, so z. B. Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz, spezielle Förderprogramme für die „Umstrukturierung und Umstellung von Rebflächen“ aufgelegt. In deren Rahmen wird z. B. die Beschaffung und feste Installation von Tropfbewässerungsanlagen unterstützt, was zur Minderung des Risikos von Trockenheit beitragen kann (STMELF, 2014b).

Allgemein besteht der Ausschluss einer Parallelförderung, d. h. jede Maßnahme kann nur durch ein einziges Programm gefördert werden, also entweder im AFP oder im Rahmen eines operationellen Programmes einer Erzeugergemeinschaft.

Dauerkulturen

Tabelle 3.15: Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterlagen im Dauerkulturanbau

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Hagelschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
1. Hagel-versicherung	- Versicherung zahlt die Ernteverluste durch den Hagelschlag - per Gutachten wird das Schadausmaß bestimmt - Höhe der Versicherungsprämien regional verschieden	- kein zusätzlicher Arbeitsaufwand - universell „einsetzbar“ - Ausgleich Erlöseinbußen (Höhe je nach Prämie und Schadausmaß)	- kostenintensiv - keine Minderung bzw. Verhinderung der direkten Schäden und Verluste → negative Folgen hinsichtlich Kundenbindung und Folgeschäden an den Pflanzen möglich	3-6, 19
2. Hagelnetze	- direkte Hagelabwehr durch das Anbringen von Hagelnetzen über dem Kulturpflanzenbestand	- hoher Wirkungsgrad - Zusatznutzen durch Vogelabwehr - direktes Schadensreduktionspotenzial bis zu 100 % (je nach Größe und Intensität der Hagelereignisse)	- kostenintensiv (ca. 14000-20000 EUR/ha) - herabgesetzte Lichtdurchlässigkeit kann Ausfärbung bzw. Ausreife der Früchte negativ beeinflussen - negative Veränderung hinsichtlich des Mikroklimas möglich - kaum flächendeckender Einsatz möglich - negative ökologische Auswirkungen (z. B. auf Biodiversität) möglich	1, 3-6, 14

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Hagelschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
3. Hagelflieger	- „Beimpfen“ der Wolken mit Silberjodid - Einbringen zusätzlicher Kristallisationskeime - Bildung von mehr, aber kleineren Hagelkörnern, die bis zum Auftreffen am Boden geschmolzen sind oder nun geringe Schäden verursachen - meist gemeinschaftliche Organisation und Kostenübernahmen in Form von Vereinen (z. B. Hagelabwehr im Rems-Murr-Kreis gibt seit 1980; Verein zur Hagelabwehr Vorder- und Südpfalz)	- gute Kosten-Nutzen-Relation (Vereine) - keine maschinengebundenen Fixkosten (bis auf Mitgliedsbeiträge) - direktes Schadensreduktionspotenzial 40 bis 60 %	- Wirksamkeit umstritten - Verschiebung des Hagels auf Nachbargebiete möglich/fraglich - genaue Wetterbeobachtungen unumgänglich, um gezielten Einsatz zu planen - Abhängigkeit von „Dritten“ (Pilot, Verein, Anbieter, Behörden)	1, 3-6, 8, 14
4. Kulturtechnische Maßnahmen	- Laubwandgestaltung (mehr Laub als Schutz) - Rückschnitt geschädigten Materials (Vermeidung Folgeinfektionen) - gestaffelte Lese im Weinbau - spätere Ernte im Hopfenbau - Umerziehung nicht geschädigter Seitentriebe zu Leittrieben - angepasste Pflanzenschutzstrategien zur Minderung von Folgeinfektionen	- Maßnahmen relativ flexibel einsetzbar - guter Wirkungsgrad insbesondere in Hinblick auf die Minimierung von Folgeinfektionen	- Qualitätseinbußen möglich - zusätzliche(r) Arbeitsaufwand und -kosten - je nach Sorte und Produktionsziel Verfahren unterschiedlich gut geeignet - hoher Managementanspruch	1, 3-6, 8, 10, 12, 16, 14
5. Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung	- Zeilenausrichtung (nicht quer zur Hauptwindrichtung) - Wahl robusterer Erziehungsvarianten (z. B. extensivere Verfahren wie Minimalschnitt im Weinbau)	- bei extensiven Verfahren (z. B. Minimalschnitt) zusätzlich verringerte Lohn- und Betriebsmittelkosten	- Qualitätseinbußen möglich - Zeilenausrichtung von Standortbedingungen und Bewirtschaftbarkeit abhängig - je nach Sorte und Produktionsziel Verfahren unterschiedlich gut geeignet	1, 3-6, 8, 12, 14, 16

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Spätfrostschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
1. Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung	- Meidung von Frostlagen (z. B. Tallagen, Senken) - an den Standort angepasste Sortenwahl (Austriebs- und Blütezeitpunkt, Winterfestigkeit) - Entfernung von Hindernissen, die die Kaltluftabfluss verhindern können - bergseitige Schutzpflanzungen - Wahl weniger frostgefährdeter Erziehungsformen (z. B. Hochstämme)	- guter Wirkungsgrad - zum Teil ohne hohe zusätzliche Investitionskosten (z. B. Anschaffung spezieller Geräte) realisierbar	- Erträge und Qualitäten können unter der Wahl angepasster Sorten und Anlagegestaltung leiden - Flexibilität in der Auswahl einer Lage oder Sorte nicht immer gegeben - zum Teil hoher Arbeitsaufwand in Verbindung mit entsprechend hohen Kosten	*1, 3-6, 8, 9, 12, 13, 16, 18*
2. Frostberegnung	- Nutzung der Erstarrungswärme bei Umwandlung von Wasser zu Eis - Abwehr von Frösten bis - 6 °C - Totalbedeckungs- oder Reihenbewässerungssystem	- guter Wirkungsgrad - zusätzliche Nutzung der Anlagen zur Bewässerung möglich	- hoher Wasser- und Energieverbrauch (ca. 100.000 L/Nacht und ha, ca. 900 EUR/ha und Jahr) - Bereitstellung Wasservorrat nötig - hohe Wartungskosten - Abknicken langer Triebe oder ganzer Zeilen möglich (Eislast) - Gefahr der Vernässung von Böden	*1, 3-6, 8, 12, 16, 18*
3. Durchmischung kalter und warmer Luftschichten (Windräder und -maschinen, Helikopter)	Windräder/-maschinen: - warme Luft wird aus Höhe nach unten gewirbelt und kalte Luft aus Senken heraus gewirbelt (z. B. Wasser- und Bodenverband Duttweiler, Pfalz) - Abdeckung: 5 ha pro Windrad *- ca. 30.000 EUR pro Windrad* *- ca. 750 EUR pro Jahr und ha (20 a)* Helikopter: - Durchmischung von Luftschichten (Temperaturausgleich) - Abdeckung von 10 – 20 ha pro Helikopter	- flexibel einsetzbar - zeitgenaue Bereitstellung (Helikopter nur bedingt, da Genehmigung Nachtflug nötig) - guter Wirkungsgrad	- hoher Investitionsbedarf, Kraftstoffverbrauch (insbesondere Windmaschinen) und hohe Fixkosten - genehmigungspflichtig (z. B. Nachtflug) - Lärmbelästigung möglich - Wirkungsgrad stark vom Standort beeinflusst (z. B. Windmaschinen in Senken geringerer Wirkungsgrad)	*1, 3-6, 8, 9, 12, 15, 16, 18*

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Spätfrostschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
4. Kultur-technische Maß-nahmen	- Boden erst nach den Eisheiligen lockern (Wärmenachschub) - Unkraut und Begrünung beseitigen (Bewuchs erhöht Frostgefahr) *- in Übergangslagen extensive, weniger empfindliche Erziehungssysteme (z. B.* Minimalschnitt Weinbau) - Biegen erst nach den Eisheiligen (Weinbau) - Frostreserven (-triebe, -ruten) *belassen* *- Austriebsverzögerung (z. B. durch „d*ouble pruning“ *im Weinbau) oder* Öle bzw. eine helle Abdeckung des Bodens, die die Wärme rückstrahlt	- extensivere Erziehungssysteme (z. B. Minimalschnitt) gehen mit geringeren Lohn- und Betriebsmittelkosten einher und sind auch ggü. anderen Extremwetterlagen von Vorteil (z. B. Hagel) Double pruning: - kann den Austrieb um bis zu 30 Tage verzögern Pflanzenöle: - einfache und günstige Möglichkeit - Austriebverzögerung in Versuchen um bis zu 20 Tagen	- qualitative Einbußen möglich - zusätzliche Arbeitsgänge und -kosten - hoher Managementanspruch Double pruning: - noch nicht praxistauglich, da die Reifeverzögerung zu stark Pflanzenöle: - Methode muss noch weiter erforscht und optimiert werden	1, 3-6, 7, 8, 9, 12, 13, 16, 17, 18
5. Direkte Lufterwärmung (Frostkerzen, Heizdrähte, Frostbuster)	Frostkerzen (Stopgel): - Abbrennen von 200-350 Paraffinkerzen pro ha erwärmt die Luft (nicht überall zugelassen) Heizdrähte: - Heizdrähte werden um den Stamm und/ oder den Kordon/die Bogrebe gewickelt - Wärme wird durch Oberflächenkontakt auf die Rebe übertragen und per Saftstrom in Triebe und Blätter geleitet - Frostschutz bis zu – 6 °C Frostbuster: - fahrbare Gasturbine erhitzt Luft - alle 10 min muss dieselbe Stelle „behandelt“ werden	- guter Wirkungsgrad	- sehr hohe Kosten (Frostkerzen bis 2400 EUR pro ha und Frostnacht) - für Heizdrähte muss eine elektrische Anschlussleistung von circa 90 kW/ha gewährleistet werden (v. a. in ortsnahen Lagen realisierbar) - hoher Arbeitsaufwand und zusätzliche Lohnkosten (Frostkerzen ausbringen und Frostbuster durch den Bestand fahren) - Frostkerzen nicht überall zugelassen - geringer Abdeckungsgrad (nur auf kleineren Flächen praktikabel)	3, 4, 6, 15, 17

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Spätfrostschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
6. Frostversicherung (Weinbau)	- Absicherung finanzieller Verluste durch Fröste (Starkfröste), die nach dem 1. Mai Blütenschäden hervorrufen können	- kein zusätzlicher Arbeitsaufwand - universell „einsetzbar“ - Ausgleich Erlöseinbußen (Höhe je nach Prämie und Schadausmaß)	- kostenintensiv - keine Minderung bzw. Verhinderung der direkten Schäden und Verluste des Erntegutes → negative Folgen hinsichtlich Kundenbindung und Folgeschäden an den Pflanzen möglich	15, 19

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Trocken-, Dürre-, Strahlungs- und Hitzeschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
1. Bewässerung (Trocken- und Hitzestress)	- Ausgleich Wasserdefizite bei Trockenstress - Nutzung Kühlungseffekt bei Hitzestress Kurzfristig: - flexible (Tropf-) Bewässerung Langfristig: - stationäre Bewässerungsanlagen mit Tropfschläuchen	- hoher Wirkungsgrad - zusätzliche Nutzung zur Frostberegnung möglich - ständige Verfügbarkeit (wenn Bereitstellung Wasser gesichert)	- hohe Investitions- und Betriebskosten - Verfügbarkeit hoher Wassermengen notwendig - Erosion und Förderung von Pilzkrankheiten möglich - Gefahr der Versalzung der Böden - gesetzliche Beschränkungen	2, 3-6
2a. Kulturtechnische Maßnahmen (Trockenstress, Hitze)	Kurzfristig: - Erträge und Blattfläche reduzieren (Assimilationsleistung senken) - Blattdüngung (Nährstoffzufuhr gewährleisten) - flache Bodenbearbeitung - Begrünung kurzhalten (Wasserkonkurrenz minimieren) - Bodenbedeckung (z. B. Stroh) Langfristig: - Tiefenlockerung (Durchwurzelbarkeit erhöhen) - Verbesserung Bodenstruktur (Humus, Kalk) - standortangepasstes Bodenpflegesystem (Offenhaltung, Begrünungsmanagement, Mulchsaat, Zwischenfrüchte)	- guter Wirkungsgrad - relativ flexibel einsetzbar	- qualitative Einbußen möglich - zusätzliche Arbeitsgänge und -kosten - hoher Managementanspruch	2, 3-6, 8, 11, 14

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Trocken-, Dürre-, Strahlungs- und Hitzeschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
2b. kulturtechnische Maßnahmen (Strahlung)	Schutz vor Sonnenbrand (Strahlung): - Härtung der Beerenhaut durch frühzeitiges Entblättern der Traubenzone - Nur sonnenabgewandte Seite entblättern - Sortenwahl - mehr Decklaub stehen lassen (z. B. auch Minimalschnitt) - Zeilenausrichtung nach Nord/Süd	siehe 2a	siehe 2a	siehe 2a
3. Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung (Trockenstress)	- Wahl von Standorten mit genügendem Wasserhaltevermögen - Wahl von Standorten mit Bewässerungsmöglichkeiten - Standraum reduzieren, um tiefere Durchwurzelung zu erzielen - Wahl trockentoleranter Unterlagen und Sorten	- guter Wirkungsgrad - zum Teil ohne hohe, zusätzliche Investitionskosten (z. B. Anschaffung spezieller Geräte) realisierbar	- Erträge und Qualitäten können unter der Wahl angepasster Sorten und Anbauverfahren leiden - Flexibilität in der Auswahl einer Lage oder Sorte nicht immer gegeben - zum Teil hoher Arbeitsaufwand in Verbindung mit entsprechend hohen Kosten	2,3-6, 8, 11

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Nässeschäden (Dauer- und Starkregen, Staunässe)				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
1. Standort- und Sortenwahl, Anlagengestaltung	- Meidung von Standorten mit stauenden Bodenschichten (z. B. Lehmschichten) - zur Erosionsvermeidung Anlage der Reihen quer zum Hang bzw. Unterbrechung z. B. mit Grünstreifen - Wahl wenig empfindlicher Sorten- und Unterlagen (staunässeempfindliche oder krankheitsanfällige Sorten vermeiden) - Anlegen von Drainagesystemen	- guter Wirkungsgrad - zum Teil ohne hohe, zusätzliche Investitionskosten durch z. B. die Anschaffung spezieller Geräte (z. B. Sortenwahl) realisierbar	- Erträge und Qualitäten können unter der Wahl angepasster Sorten und Anbauverfahren leiden - Flexibilität in der Auswahl einer Lage oder Sorte nicht immer gegeben (Vermarktungsfähigkeit) - zum Teil hoher Arbeitsaufwand in Verbindung mit entsprechend hohen Kosten - zum Teil nur auf kleinen oder Teilflächen praktikabel (z. B. Drainage)	1, 3-6, 8, 12
2. Kulturtechnische Maßnahmen	- Bodenabdeckung bzw. Begrünung (v.a. in Steillagen) zur Minderung des Erosionsrisikos - Wasserinfiltration erhöhen (z. B. durch angepasste Bodenbearbeitung, Verdichtung minimieren) - Schaffung eines guten Mikroklimas (Senkung Infektionswahrscheinlichkeit z. B. ausreichende Belüftung durch Entblätterung und Erziehungsform)	- guter Wirkungsgrad - relativ flexibel einsetzbar	- qualitative Einbußen möglich - zusätzliche Arbeitsgänge - hoher Managementanspruch	3-6, 8
3. Versicherung (Kernobst)	- Versicherung zahlt die Minderung der Ernte durch Starkregen - Höhe der Versicherungsprämien regional verschieden	- kein zusätzlicher Arbeitsaufwand - universell „einsetzbar“ - Ausgleich Erlöseinbußen (Höhe je nach Prämie und Schadausmaß)	- kostenintensiv - keine Minderung bzw. Verhinderung der direkten Schäden und Verluste des Erntegutes → negative Folgen hinsichtlich Kundenbindung und Folgeschäden an den Pflanzen möglich	19

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Winterfrostschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
1. Lagen- und Sortenwahl, Anlagengestaltung	- Frostlagen meiden - Sortenwahl (winterfrostunempfindliche Sorten wählen) - keine Hochstämme in Winterfrostlagen - Flächenplanierung (Auffüllung von Senken und Vermeidung Kaltluftstaulagen	- guter Wirkungsgrad - zum Teil ohne hohe zusätzliche Investitionskosten durch z. B. die Anschaffung spezieller Geräte (z. B. Sortenwahl) realisierbar	- Erträge und Qualitäten können unter der der Wahl angepasster Sorten und Anbauverfahren leiden - Flexibilität in der Auswahl einer Lage oder Sorte nicht immer gegeben (Vermarktungsfähigkeit) - zum Teil hoher Arbeitsaufwand in Verbindung mit entsprechend hohen Kosten	1, 3-6, 18
2. Kulturtechnische Maßnahmen	- Holzreife fördern (ausreichende Nährstoffversorgung mit Kalium und Magnesium, Vermeidung von Übererträgen) - Bodenbearbeitung und -management (Wärmenachschub) - Weißen von Stämmen (Reflektion Sonnenlicht und Minimierung Temperaturunterschiede im Stamm) - im Herbst Anhäufeln der Reben in Junganlagen (Weinbau) - Aufdecken und Strunkschneiden nicht im Herbst durchführen (Hopfen) - direkte Winterfrostabwehr aus technischen und wirtschaftlichen Gründen kaum durchgeführt (Einsatz von Windrädern wird geprüft)	- guter Wirkungsgrad - relativ flexibel einsetzbar	- qualitative Einbußen möglich - zusätzliche Arbeitsgänge - hoher Managementanspruch	1, 3-6, 18

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden				
	Erläuterungen	**Pro**	**Contra**	**Quellen**
1. Kulturtechnische Maßnahmen	- Rückschnitt und Absammeln geschädigten Materials (Vermeidung Folgeinfektionen) - neues Anheften oder Anleiten der Triebe (Hopfen und Wein) - „Laubärmere“ Erziehungsvarianten wählen (Angriffsfläche Wind minimieren) - frühe Heft-/Anleitarbeiten (Hopfen und Wein) (- Hagelschutznetze)	- relativ flexibel einsetzbar - guter Wirkungsgrad insbesondere in Hinblick auf die Minimierung von Folgeinfektionen	- qualitative Einbußen möglich - zusätzliche Arbeitsgänge - hoher Managementanspruch - vor allem als Ergänzungsmaßnahme auf besonders gefährdeten Teilflächen sinnvoll	3-6, 12
2. Lagen- und Sortenwahl, Anlagengestaltung	- Zeilen-/Reihenausrichtung (nicht quer zur Hauptwindrichtung) - Windschutzhecken oder Streifen pflanzen - Stabilität Unterstützungsmaterial/ Anlagen verstärken: Erhöhung der Abspannungen an den Ecken, Winkel der Abspannungen flacher wählen, Betonmasten an Ecken verwenden, Betonerdanker verwenden, Seildurchmesser für Abspannseile erhöhen	- guter Wirkungsgrad	- kostenintensiv - qualitative Einbußen möglich - abhängig von Standort und Produktionsziel	3-6, 12, 17
3. Versicherung (vor allem Kernobst)	- Absicherung finanzieller Verluste durch Sturm - Höhe der Versicherungsprämien regional verschieden	- kein zusätzlicher Arbeitsaufwand - universell „einsetzbar“ - Ausgleich Erlöseinbußen (Höhe je nach Prämie und Schadausmaß)	- sehr hohen Prämien, in meisten Gebieten unwirtschaftlich	5, 19

1. Bauer et al. (2008); 2. DLR Weinbau Information „Trockenstress“ (2008); 3. Expertenbefragungen DLR (2014); 4. Expertenbefragungen KOB (2014); 5. Expertenbefragungen LfL Bayern (2014); 6. Expertenbefragungen OVR (2014); 7. Hopfenbau-Ringfax Nr. 21 (2011); 8. Hoppmann (2010); 9. ***Landwirtschaftliches Wochenblatt (2013); 10.*** LfL Bayern (2013); 11. Michel (2014); 12. Müller et al. (2008); 13. Müller & Schwappach (2014); 14. Oberhofer (2011); 15. Oberhofer (2012); 16. Vogt & Schruft (2000); 17. www.lfl.bayern.de (2014); 18. Rebschutzdienst (2014); 19. Vereinigte Hagel (2014)

Gemüse

Im Gemüsebau können nicht alle der in Tabelle 3.15 für Dauerkulturen aufgeführten Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden durch Extremwetterlagen umgesetzt werden. Das liegt hauptsächlich daran, dass viele Gemüsekulturen einjährig sind bzw. mehrere Sätze innerhalb einer Vegetationsperiode gesät oder gepflanzt werden. Dementsprechend unterscheidet sich auch die Kulturführung maßgeblich von der im Dauerkulturanbau. Spargel nimmt als mehrjährige Gemüsekultur eine Sonderstellung ein. Im Folgenden (vgl. Tabelle 3.16) sind einige wichtige und im Gemüsebau umsetzbare Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterschädigungen zusammengefasst (u.a. Vogel 1996; Krug et al. 2003; Wonneberger & Keller 2004; Expertenbefragungen DLR 2014; Hortipendium 2014).

Tabelle 3.16: Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterlagen im Gemüseanbau

Extremwetterlage	Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden
Trockenheit/Dürre	Beregnung → Ausgleich fehlender Niederschlagsmengen; stationäre und mobile Systeme verfügbar
	Kulturtechnische Maßnahmen → Wasserhaltekapazität, -verfügbarkeit und -nutzungseffizienz erhöhen angepasste Bodenbearbeitung (Infiltration verbessern, kapillaren Wasseraufstieg unterbrechen) Fruchtfolge (z. B. Durchwurzelbarkeit und Humusgehalt) Sortenwahl (Trockenheitstoleranz und Krankheitsresistenz) Bestandesdichte; Saattiefe & -zeitpunkt angepasste Düngestrategie (z. B. Kalium verbessert Wassernutzungeffizienz) Winterdämme flacher anlegen (v.a. auf Flächen mit fehlenden Winterniederschlägen) Flachbeetanbau auf trockenstressgefährdeten, sandigen Böden humussteigernde Maßnahmen (z. B. Fruchtfolge, Zwischenfruchtanbau, organische Düngung)
Hitze	Angepasstes Folienmanagement → Abnehmen bzw. Drehen der Folien von Schwarz auf Weiß
	Beregnung → Nutzung Kühlungseffekt und Ausgleich des durch höhere Verdunstungsraten entstandenen Wasserdefizits
	Sortenwahl → Auswahl hitzetoleranter Sorten
Staunässe (Dauerregen und Überschwemmung)	Standortwahl und Anlage eingeschlossene Lagen (schlechtere Abtrocknung durch Wind) und Senken meiden Bodenart (Wasseraufnahme- und Infiltrationsvermögen beachten) Dämme anlegen (Abstand Wurzel Grundwasser erhöhen, Verbesserung Abtrocknung durch Schaffung größerer Oberfläche) Flachbeetanbau (Vermeidung von Verschlämmung in der Wurzelzone durch stauende Niederschläge) Reihenausrichtung (Abfluss) Dammhöhe (Abstand Wurzel Grundwasser erhöhen)
	Kulturtechnische Maßnahmen → Verbesserung Drainagefähigkeit, Infiltration und Minderung Verschlämmung sowie

Extremwetterlage	Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Schäden
	Erosion Bodenbearbeitung (Direkt- und Mulchsaatverfahren, Verdichtungen minimieren, Versickerungsfähigkeit steigern) Begrünungsmanagement (Durchwurzelung) Einebnen der Dämme bei schweren Böden (geringere Gefahr Verschlämmung im Wurzelbereich) Drainagen und Entwässerungsgräben Abdeckung mit Folien, Vliesen und Folientunneln → Vorbeugung von Krankheiten Sortenwahl (Nässetoleranz und Krankheitsresistenz) Abdecken mit Folie Beizung, Pflanzenschutz angepasstes Erntemanagement
	Änderung der Vermarktungsform → z. B. Verarbeitung statt Frischware
Starkregen	Anlagengestaltung Ausrichtung der Reihen quer zu möglichem Gefälle einer Fläche, um Wassererosion zu mindern Verkürzung der erosiven Hanglage (Unterteilung der Flächen und unterschiedliche Bewirtschaftung, z. B. Winterung und Sommerung)
	Kulturtechnische Maßnahmen → Erosionsminderung Bodenbearbeitung (Direkt- und Mulchsaatverfahren, Verdichtungen minimieren, Versickerungsfähigkeit steigern) Begrünung zwischen den Dämmen, Untersaaten Einebnen der Dämme nach Ernteperiode (s. Dauerregen) Abdeckung mit Folien, Vliesen und Folientunneln Sortenwahl (Nässetoleranz und Krankheitsresistenz)
	Änderung der Vermarktungsform → z. B. Verarbeitung statt Frischware
Hagel	Hagelversicherung
	Abdeckung → z. B. mit Hagelschutznetzen ggf. Folien
	Hagelflieger → Einbringen von Silberjodid in Gewitterwolken
	Änderung der Vermarktungsform → z. B. Verarbeitung statt Frischware
Sturm	Beregnung → Minderung Bodenabtrag durch Winderosion
	Sortenwahl → standfestere Sorten, z. B. mit kürzeren Internodien
	Anlagengestaltung und kulturtechnische Maßnahmen → Erosionsminderung Windschutzpflanzungen (z. B. Knicks) Begrünung, Unter- und Zwischensaaten Direkt-, Strip Till- oder Mulchsaatverfahren (nicht-wendende Bodenbearbeitung)
	Änderung der Vermarktungsform → z. B. Verarbeitung statt Frischware
Spät-, Früh- und Winterfrost	Standortwahl → Frostlagen und Kaltluftstaulagen meiden
	Kulturtechnische Maßnahmen Saat- bzw. Pflanztermine und –tiefe Kalidüngung (Erhöhung Frosttoleranz) Sortenwahl (teilweise sortenspezifische Frosttoleranz) angepasstes Erntemanagement (z. B. Spargel bei Spätfrostgefahr auch abends ernten) Optimierung Reservestoffeinlagerung direkte Frostbekämpfungsmaßnahmen (z. B. Frostberegnung, Gebläse, Rotoren)

3.3.8 Ökonomische Bewertung

Federführung: Dr. Walter Dirksmeyer (Thünen-Institut für Betriebswirtschaft)

Aufgrund zeitlicher Restriktionen und einer geringen Bereitschaft von Experten oder Kooperationspartnern, sich ohne finanzielle Entschädigung zu engagieren, konnten nur für die Kulturen Spargel und Wein Expertengespräche durchgeführt und eigene ökonomische Berechnungen angestellt werden. Um eine grobe Einschätzung über potenziell ökonomische Auswirkungen von Extremwetterlagen zu bekommen, wurden für ausgewählte Gemüsearten Kalkulationsdaten der LfL (2015 a,b,c) verwendet. Als Betrachtungszeitraum wurde jeweils der Dreijahresdurchschnitt von 2011-13 gewählt und durch Modellierung unterschiedlicher Szenarien Änderungen des Deckungsbeitrags untersucht.

Spargel

Mit Unterstützung von Beratern der Landwirtschaftskammer Niedersachsen konnten Betriebsleiter von zwei Spargelbetrieben (10 ha bzw. 80 ha Spargel) im Raum Osnabrück getrennt voneinander befragt werden. Sowohl Betriebsleiter als auch Berater haben betont, dass Spargelbetriebe sehr heterogen sind (Anbaufläche, Kombination mit anderen Kulturen, Verarbeitung des Spargel auf dem Betrieb und Absatz) und jeweils andere Strategien verfolgen. Daher ist es schwer Pauschalaussagen zu treffen.

Im Spargelanbau kann die Verwendung von ‚schwarz-weiß' Folien als Standard angesehen werden. Die Folie dient der Verfrühung der Ernte, bietet Schutz vor Wind- und Wassererosion, Sonneneinstrahlung, reduziert den Unkrautaufwuchs sowie Probleme mit der Bodenfliege. Normalerweise kann die Folie über die komplette Standzeit der Anlage, also 8 Jahre lang, genutzt werden. Zur Ernte wird die Folie entweder von Hand oder mittels Spargelspinne (Hilfseinrichtung bei der Ernte) angehoben.

Beide Betriebsleiter schätzen Extremwetterlagen als derzeit nicht sehr bedeutend für den Spargelanbau ein, haben jedoch die Befürchtung, dass extreme Wetterereignisse in Zukunft zunehmen könnten. Dabei ist zu beachten, dass Spargel eine mehrjährige Kultur ist und eventuelle Schäden sich auf die Folgejahre auswirken können. Berater empfehlen für die rentable Bewirtschaftung einer professionellen Spargelanlage eine 8-jährige Standzeit, was auch meist in der Praxis vorzufinden ist:

Standjahr	**1.**	**2.**	**3.**	**4.**	**5.**	**6.**	**7.**	**8.**
Anteil an gesamter Spargelfläche	12,5 %	12,5 %	12,5 %	12,5 %	12,5 %	12,5 %	12,5 %	12,5 %
Ertragspotenzial	0 %	25 %	65 %	100 %	100 %	100 %	90 %	80 %
Hagelversicherung	evtl.	evtl.	ja	ja	ja	evtl.	/	/
Damm + Folie	/	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

Hinsichtlich Extremwetterlagen wurden konkret nachfolgende Ereignisse diskutiert:

1. Hagel

Von allen Extremwetterereignissen wurde der Hagel am relevantesten gesehen, wobei das Auftreten in Süddeutschland vermutlich noch höher ist. Insbesondere ein Hagelschauer zwischen Ende Juni (nach der Ernte) und Ende August kann kritisch sein und hohe Schäden verursachen, da dann das Kraut durch den Damm durchwächst und durch Photosynthese Energie in den Wurzeln einlagern soll. Wenn das Laub jedoch beschädigt wurde und die Pflanze somit weniger Energie einlagert, kann es insbesondere in noch jungen Anlagen zu Schäden und Ertragseinbußen in den darauffolgenden Jahren kommen.[6] Dies zeigt sich z. B. daran, dass die Spargelstangen im Folgejahr dünner sein können, was sich als Qualitätsdefekt auf die Handelsklasse und somit negativ auf den Markterlös auswirkt. Dünnere Stangen bedeuten ferner höhere Erntekosten infolge von Änderungen im Ernterhythmus und höherem Aufwand je kg beim Stechen. Eine Bezifferung möglicher Schäden ist jedoch sehr schwer möglich und mit vielen Unbekannten versehen.

Anpassungsmaßnahmen:

- Spargelbetriebe schließen z. T. und wohl auch mit zunehmender Tendenz eine Hagelversicherung ab, insbesondere wenn sie in der Vergangenheit diesbezüglich negative Erfahrungen damit gemacht haben. Da die Abdeckung von Hagelschäden im ersten Standjahr durch die Versicherung eher als unzureichend eingestuft wird, versichern die meisten Betriebe ihre Anlage frühestens ab dem 2. oder 3. Standjahr. Wegen des abnehmenden Ertrags zum Ende der Standzeit wird die Versicherung in der Regel im 5. oder 6. Standjahr beendet. Bei einer unterstellten gleichbleibenden Aufpflanzrate werden so lediglich 37,5 % bis 62,5 % der Spargelflächen versichert. Eine durchschnittliche Prämie für die Hagelversicherung betrug in 2013-14 ca. 275 €/ha Spargel.
- Betriebe, bei denen die Spargelflächen über größeren Umkreis verstreut sind, betrachten diesen Umstand bereits als Risikomanagementstrategie. Sie schließen tendenziell seltener eine Versicherung ab. Stattdessen werden die Kosten eines eventuell auftretenden Schadens aus den gebildeten Rücklagen getragen.

2. Trockenheit

Wassermangel kann in zu trockenen Jahren schätzungsweise 20-50 % Ertragsminderung verursachen. Wenn junge Anlagen unter Wassermangel leiden, besteht das Risiko, dass sich diese Ertragseinbußen in den Folgejahre bemerkbar machen. Beregnung in trockenen Jahren zu gewähr-

[6] Aus der Literaturanalyse ist bekannt, dass es nach Hagel auch zu Sekundärinfektionen, z. B. durch Pilzbefall, kommen kann. Dies wurde in den zwei Expertengesprächen allerdings nicht thematisiert und daher ist davon auszugehen, dass dies eine untergeordnete und ökonomisch nicht so relevante Rolle spielt.

leisten, erfordert die Verfügbarkeit von Wasser in der Nähe, Wasserentnahmerechte, ggf. Brunnen sowie die entsprechende maschinelle Ausstattung. Manche Betriebe verfügen über Jahrzehnte alte Wasserrechte, viele jedoch nicht. Die Praktiker berichten davon, dass es derzeit immer schwieriger wird, neue Wasserrechte zu beantragen, da die Landkreise deren Genehmigung sehr restriktiv handhaben.

Anpassungsmaßnahmen:

Falls ein Betrieb Spargel nicht generell bewässert, wird in Trockenphasen versucht, zumindest die Junganlagen zu bewässern, um so die Folgeschäden möglichst zu minimieren. Die einfachste und kostengünstigste Möglichkeit ist, das Wasser mit einem Güllefass aufs Feld zu transportieren. Die Ausbringung erfolgt durch Schleppschläuche. Dies ist allerdings nur so lange möglich, wie noch keine Dämme gezogen sind. Die Arbeitserledigung erfolgt in Eigenleistung oder durch Lohnunternehmen. Die Gesamtkosten hängen von der auszubringenden Wassermenge ab (Größe des Güllefasses und Anzahl der Fahrten), die nötig ist, um der Pflanze ein gutes Wachstum zu ermöglichen. Die Praktiker erwähnten diese Kennzahlen:

- Lohnunternehmer: ca. 1.500 – 2.000 €/ha Komplettpreis (Arbeit, Maschinen, Wasser)
- Eigene Mechanisierung: Güllefass plus ca. 20 Akh eines Schlepperfahrers pro ha

3. Hitze

Außer einem sinnvollen Folienmanagement gibt es gegen Hitze nichts. Das Drehen der Folie von der schwarzen auf die weiße Seite muss rechtzeitig erfolgen. Dies kann mittels Spargelspinne einfach in den Erntegang integriert werden und erfordert keinen zeitlichen Mehraufwand. Am Beginn einer Reihe dreht man die Folie um, beschwert das Ende und die Folie wird automatisch durch die Spargelspinne auf der gewünschten Seite abgelegt.

4. Sturm

Sturm ist nur bei bestimmten Spargelsorten ein Problem, welche schwache Triebe ausbilden, leicht abknicken bzw. ins Lager gehen. Allerdings sind solche Sorten nicht mehr marktrelevant, da auch der Spargel dieser Sorten grundsätzlich anfällig ist und durch die maschinelle Marktaufbereitung leicht bricht.

Werden die Spargeldämme auf dem Feld angelegt, so hat der Landwirt vor allem eine optimale Maschinenausnutzung bzw. Arbeitsorganisation im Auge und richtet sich zwangsläufig nicht nach der vorherrschenden Windrichtung.

Speisezwiebel

Der mögliche Einfluss von Extremwetterlagen auf den Deckungsbeitrag von Speisezwiebeln wurde anhand der Kalkulationsdaten der LfL (2015a) abgeschätzt. Da die Erträge innerhalb eines Jah-

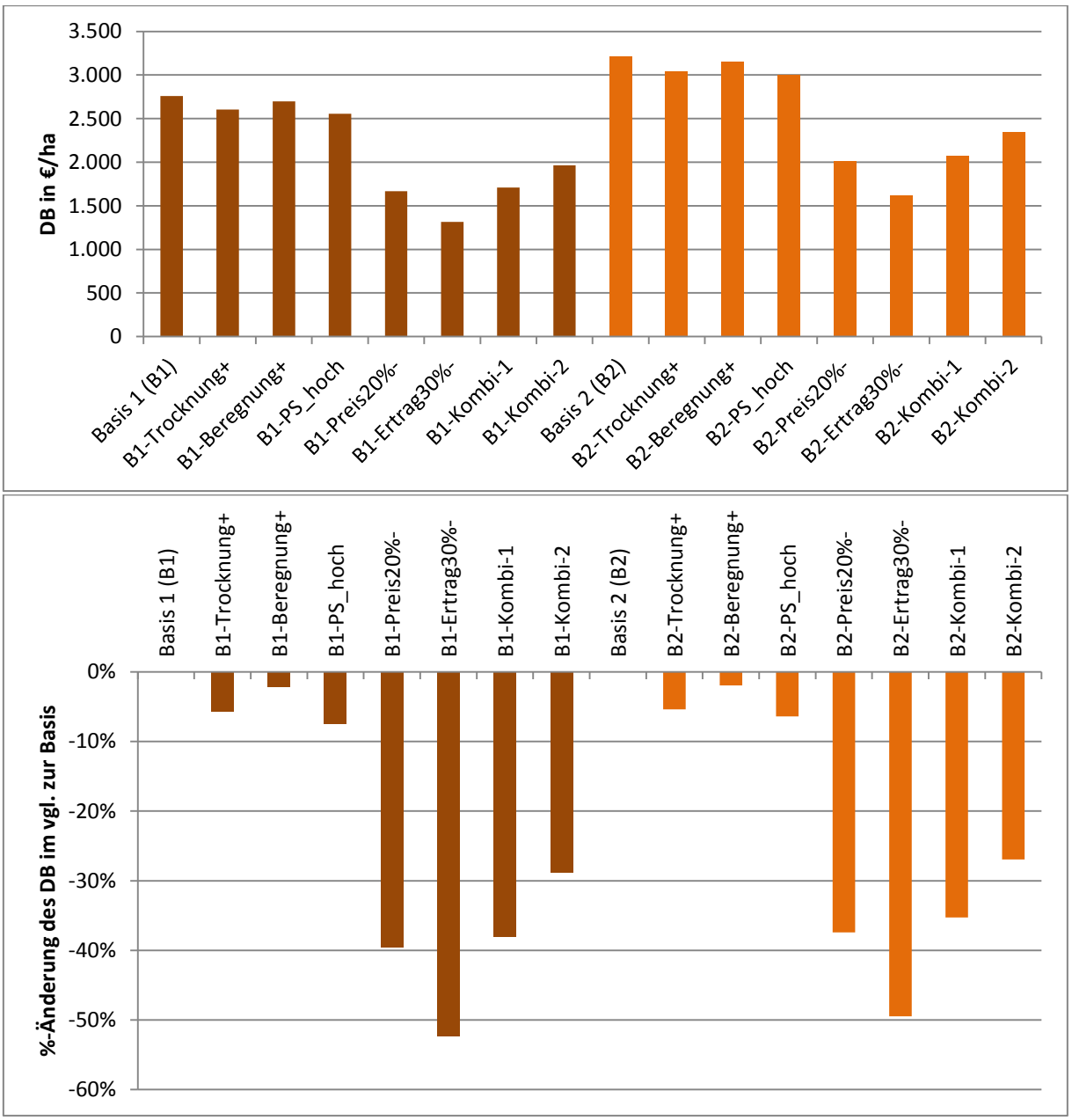
res zwischen den Anbauregionen deutlich schwanken können, wurden außerdem zwei Basisszenarien, B1 mit 500 dt/ha und B2 mit 550 dt/ha, gewählt.

Im Folgenden wurden dann unterschiedliche Parameter verändert und deren ökonomische Auswirkung (ceteris paribus) in sieben Szenario-Rechnungen kalkuliert.

- Trocknung+: anstatt 50 % müssen 100 % des Erntegutes getrocknet werden
- Beregnung+: anstatt 2 werden 4 Beregnungsdurchgänge durchgeführt
- PS_hoch: in der LfL Datenbank ist die Intensität des Pflanzenschutzes hoch anstatt mittel
- Preis -20 %: der Erzeugerpreis für Speisezwiebeln wurde um 20 % gesenkt
- Ertrag -30 %: der Hektarertrag wurde um 30 % gesenkt
- Kombi-1: zu trocken - doppelt so viel Beregnung, 10 % geringerer Ertrag, 10 % geringerer Preis
- Kombi-2: zu nass – 20 % mehr Pflanzenschutz, 10 % geringerer Preis, 100 % Trocknung

Die getroffenen Annahmen und Szenarien sind stark vereinfacht im Gegensatz zur komplexen Realität auf den Betrieben. Die Frage, ob genügend Wasser oder Wasserrechte für eine verdoppelte Beregnung zur Verfügung stehen, bleibt z. B. bei der Szenarioberechnung außen vor. Da die ökonomische Betrachtung beim Deckungsbeitrag (DB) endet, werden außerdem eventuelle Änderungen im Arbeitsaufwand der Festangestellten (im Basisszenario ca. 25 Akh) nicht berücksichtigt. Nichtsdestotrotz verdeutlichen die in Abbildung 3.28 dargestellten Simulationsergebnisse, dass Zwiebelbetriebe Wetterrisiken und damit verbundene Ertragseinbußen vermutlich gut abpuffern können. In der Basiskalkulation 1 beträgt der Deckungsbeitrag zunächst 2.760 €/ha. Die simulierte 30 %-ige Reduktion des Marktpreises verursacht die deutlichste DB Reduktion, nämlich um 52 %, wonach der DB auf 1.315 €/ha sinkt. Laut Analysen der AMI (2012) wurden in 2010 ca. 25 % der in Deutschland erzeugten Speisezwiebeln weiterverarbeitet. Falls die Industrie ihren Bedarf nicht frühzeitig komplett über Lieferverträge deckt, ergibt sich hier für Anbauer eventuell Potenzial, auch Produkte mit niedrigerer Qualität abzusetzen.

Abbildung 3.28: Höhe bzw. Änderung des Deckungsbeitrags von Speisezwiebeln je nach Szenario



Erläuterung: Basisszenario B1 mit 500 dt/ha; Basisszenario B2 mit 550 dt/ha.

Quelle: eigene Berechnungen nach LfL (2015a); Dieselpreis auf 1,2 €/l abgesenkt.

Kopfkohl - Weißkohl

Da Weißkohl mit 67 % der Anbaufläche der wichtigste Kopfkohl ist, gefolgt von Rotkohl und Wirsing, wird sich die folgende ökonomische Analyse auf Weißkohl beschränken. Die LfL (2015b) Kalkulationsdaten enthalten Informationen zu Weißkohl, der als Industrieware weiterverarbeitet wird. Laut verschiedener Quellen werden 35 bis 50 % der deutschen Weißkohlproduktion zu Sau-

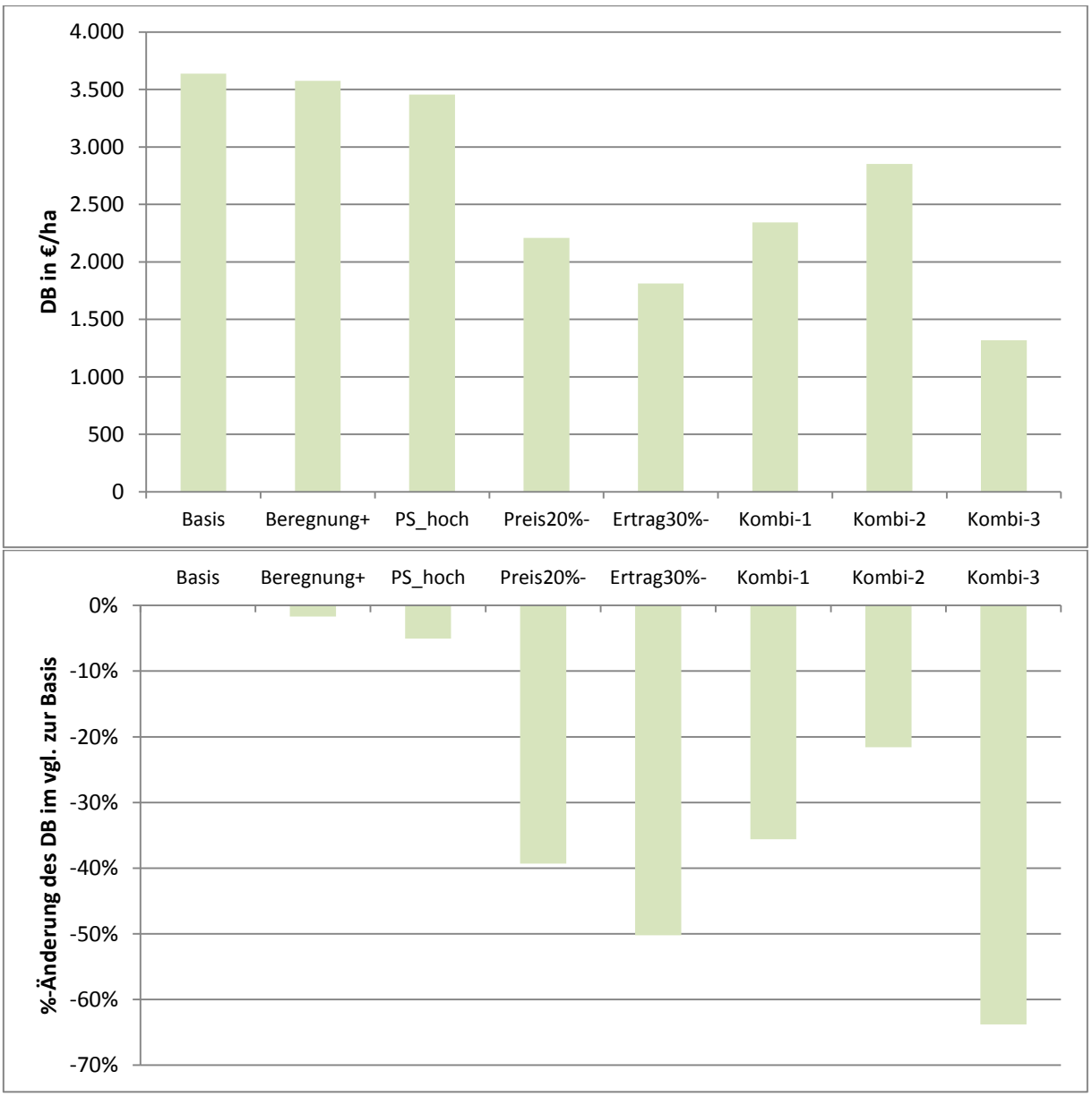
erkraut oder anderen Produkten weiterverarbeitet (AMI, 2012; Frietsch, 2014), was eine Verwendung der Daten für Industrieware rechtfertigt.

Die Schwankungen der Weißkohlerträge für die Verarbeitungsindustrie sind nicht bekannt, weshalb für Weißkohl nur ein Basisszenario mit 1.250 dt/ha gewählt wurde. Im Folgenden wurden dann einzelne Parameter verändert und deren ökonomische Auswirkung (ceteris paribus) in sieben Szenario-Rechnungen kalkuliert:

- Beregnung+: anstatt 2 werden 4 Beregnungsdurchgänge durchgeführt
- PS_hoch: in der LfL Datenbank ist die Intensität des Pflanzenschutzes hoch anstatt mittel
- Preis -20 %: der Erzeugerpreis für Weißkohl wurde um 20 % gesenkt
- Ertrag -30 %: der Hektarertrag wurde um 30 % gesenkt
- Kombi-1: zu trocken - doppelt so viel Beregnung, 10 % geringerer Ertrag, 10 % geringerer Preis
- Kombi-2: zu nass – 20 % mehr Pflanzenschutz, 10 % geringerer Preis
- Kombi-3: 20 % geringerer Ertrag und 20 % geringerer Preis

Die getroffenen Annahmen und Szenarien sind stark vereinfacht im Gegensatz zur komplexen Realität auf den Betrieben. Die Frage, ob genügend Wasser oder Wasserrechte für eine verdoppelte Beregnung zur Verfügung stehen, bleibt bei den Szenarioberechnungen z. B. außen vor. Da die ökonomische Betrachtung beim Deckungsbeitrag endet, werden außerdem eventuelle Änderungen im Arbeitsaufwand der Festangestellten (im Basisszenario ca. 28 Akh) nicht berücksichtigt. Unter Berücksichtigung der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Eintrittswahrscheinlichkeiten kann davon ausgegangen werden, dass Weißkohlbetriebe in der Regel die Wetterrisiken und damit verbundene Ertragseinbußen (vgl. Abbildung 3.29) gut abpuffern können. In der Basiskalkulation beträgt der Deckungsbeitrag zunächst 3.640 €/ha. Das kombinierte Szenario mit 20 % weniger Ertrag und 20 % niedrigerem Marktpreis verursacht die deutlichste DB Reduktion, nämlich um 64 %, wonach der DB auf 1.318 €/ha sinkt.

Abbildung 3.29: Höhe bzw. Änderung des Deckungsbeitrags von Weißkohl (Industrieware) je nach Szenario



Quelle: eigene Berechnungen nach LfL (2015b); Dieselpreis auf 1,2 €/l abgesenkt.

Möhren/Karotten

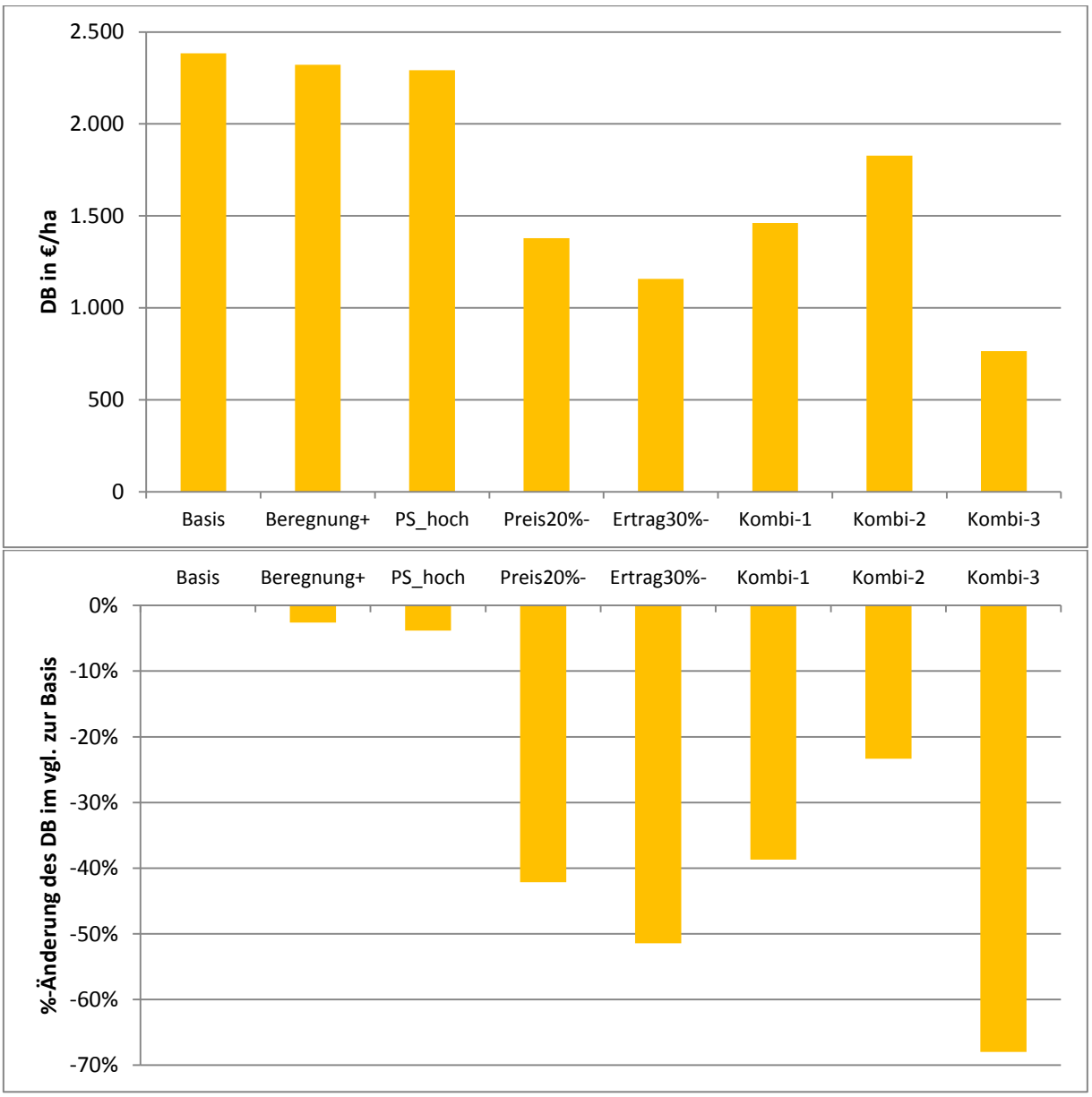
Die LfL (2015c) Kalkulationsdaten enthalten Informationen zu Karotten, die als Industrieware, z. B. zu Tiefkühlkost oder Saft, weiterverarbeitet werden. Die AMI (2012) hat in ihrer Warenstromanalyse geschätzt, dass im Jahr 2010 ca. 45 % der in Deutschland produzierten Möhren weiterverarbeitet wurden. Daher erfolgt die ökonomische Abschätzung anhand des Beispiels der Verarbeitungskarotten.

Die Schwankungen der Karottenerträge für die Verarbeitungsindustrie sind nicht bekannt, weshalb für Karotten nur ein Basisszenario mit 850 dt/ha gewählt wurde. Im Folgenden wurden dann ebenfalls einzelne Parameter verändert und sieben Szenario-Rechnungen berechnet:

- Beregnung+: anstatt 1 werden 3 Beregnungsdurchgänge durchgeführt
- PS_hoch: in der LfL Datenbank ist die Intensität des Pflanzenschutzes hoch anstatt mittel
- Preis -20 %: der Erzeugerpreis für Karotten wurde um 20 % gesenkt
- Ertrag -30 %: der Hektarertrag wurde um 30 % gesenkt
- Kombi-1: zu trocken - dreimal so viel Beregnung, 10 % geringerer Ertrag, 10 % geringerer Preis
- Kombi-2: zu nass – 20 % mehr Pflanzenschutz, 10 % geringerer Preis
- Kombi-3: 20 % geringerer Ertrag und 20 % geringerer Preis

Die getroffenen Annahmen und Szenarien sind stark vereinfacht im Gegensatz zur komplexen Realität auf den Betrieben. Die Frage, ob genügend Wasser oder Wasserrechte für eine vermehrte Beregnung zur Verfügung stehen, bleibt zum Beispiel außen vor. Da die ökonomische Betrachtung beim Deckungsbeitrag endet, werden außerdem eventuelle Änderungen im Arbeitsaufwand der Festangestellten (im Basisszenario mindestens 35 Akh) nicht berücksichtigt. Nichtsdestotrotz verdeutlicht die Abbildung 3.30, dass Karottenbetriebe Wetterrisiken und damit verbundene Ertragseinbußen offensichtlich gut abpuffern können. In der Basiskalkulation beträgt der Deckungsbeitrag zunächst 2.385 €/ha. Nur im Extremfall, dem kombinierten Szenario mit 20 % weniger Ertrag und 20 % niedrigerem Marktpreis sinkt der DB auf unter 1.000 €/ha, welches einer Reduktion um 68 % gegenüber dem Basisszenario entspricht.

Abbildung 3.30: Höhe bzw. Änderung des Deckungsbeitrags von Karotten (Industrieware) je nach Szenario



Quelle: eigene Berechnungen nach LfL (2015c); Dieselpreis auf 1,2 €/l abgesenkt.

Apfel

Die Expertenbefragungen an der Niederelbe und dem Bodensee haben ergeben, dass Hagel und Spätfrost in beiden Anbaugebieten die größte Relevanz besitzen. Während Staunässe besonders an der Niederelbe als Problem gesehen wird, liegt in manchen Gebieten der Bodensee Anbauregion eher Trockenheit im Fokus (vgl. Kapitel 3.3.5). Als Anpassungen gegenüber diesen Extremwetterereignissen kommen in der Praxis folgende gängigen Maßnahmen in Frage: Hagelschutznetze und Hagelversicherung, Frostschutzberegnung, Drainage/Polderung und Bewässerung.

1. Hagel

In Süddeutschland treten Hagelereignisse recht häufig auf. Als gängige Anpassungsmaßnahme wählt die Mehrheit der dort ansässigen Betriebe die Errichtung von Hagelschutznetzen, insbesondere bei der Anlage neuer Flächen (Röhrig, 2015). Produktive Altanlagen werden teilweise mit Hagelschutznetzen nachgerüstet. Ein wichtiger Grund für den hohen Verbreitungsgrad von Hagelnetzen in Baden-Württemberg ist vermutlich die Förderung, die auf zwei unterschiedlichen Wegen gewährt werden kann. Zum einen bezuschussen Erzeugerorganisationen (EO) die Investitionskosten ihrer Mitglieder mit bis zu 50 % im Rahmen der operationellen Programme der Gemeinsamen Marktordnung (GMO). Produzenten, die keiner EO angeschlossen sind, können dagegen bis zu 20 % Basisförderung durch das Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) erhalten (MLR, 2014).

An der Niederelbe tritt Hagel im Vergleich zu Süddeutschland weniger häufig auf. Zudem sind die Betriebe im Alten Land im Durchschnitt deutlich größer als in der Bodenseeregion (vgl. Kapitel 3.3.2), so dass bei typischerweise lokal sehr begrenzten Hagelereignissen die Wahrscheinlichkeit gering ist, dass ein Großteil des Betriebes von einem Hagelschaden getroffen wird. Hagelnetze sind hier eher unüblich, wohl auch da die beschattende Wirkung die Ausfärbung der Früchte gefährden würde. Ein Großteil der Betriebe im Alten Land hat sich jedoch gegen Hagelschlag bei Kernobst versichert (Röhrig, 2015). Allerdings muss ein Betrieb 100 % seiner Flächen versichern und dann entscheiden, ob sich dies in Relation zu einem ab und zu auftretenden Schaden rechnet (Vereinigte Hagel, 2014).

2. Spätfrost

An der Niederelbe sind Expertenschätzungen zu Folge mindestens 75 % des Obst-Anbaugebietes bzw. der Betriebe mit Frostberegnung ausgestattet (vgl. Kapitel 3.3.6; Röhrig, 2015). Diese Überkronenberegnung kann in trockenen Vegetationsperioden auch zur zusätzlichen Bewässerung eingesetzt werden. In Süddeutschland ist das Auftreten von Spätfrost weniger relevant als im Norden und von daher sind hier nur ca. 5 % der Betriebe mit dieser Technik ausgestattet.

3. Trockenheit

Die befragten süddeutschen Apfelproduzenten haben Trockenheit als zweitwichtigstes Extremwetterereignis, mit deutlichem Abstand nach Hagel, eingestuft (vgl. Kapitel 3.3.5). Allerdings variieren die Niederschläge am Bodensee stark und nehmen von West nach Ost kontinuierlich zu. Auch die Bodenbeschaffenheit und Wasserhaltekapazität unterscheiden sich zwischen den Standorten. Nach Experteneinschätzung ist daher Trockenheit nur in Teilen der westlichen Anbauregion von Relevanz (Büchele, 2015). Vermutlich verfügen daher bisher nur ca. 10 % der Betriebe in der Bodensee Region über Bewässerungseinrichtungen (Röhrig, 2015). Die Betriebe können für die Anschaffung von Tröpfchenbewässerung eine Förderung über das AFP Programm

oder ihre EO beantragen, so dass deren Finanzierung vermutlich kein oder nur ein geringes Investitionshemmnis darstellt (Büchele, 2015).

Insgesamt zeigt der hohe Verbreitungsgrad von regional spezifischen Maßnahmen gegen Hagel- und Spätfrostschäden, dass dies mittlerweile Standardmaßnahmen sind, die in der Regel für die Produzenten rentabel sind. Daher wird auf weitergehende ökonomische Analysen verzichtet. Auch bezüglich der Trockenheit wird kein zusätzlicher Handlungsbedarf für die Politik gesehen.

Wein

Für den Weinbau konnten Kosten und Nutzen verschiedener Anpassungsmaßnahmen an Extremwetterlagen exemplarisch in zwei Weinbauregionen im Rahmen einer Masterarbeit analysiert werden. Dazu wurden zwei Fokusgruppendiskussionen mit Weinbauberatern, Wissenschaftlern und Winzern durchgeführt. Ziel war es, sowohl die Relevanz und Auswirkungen der Extremwetterlagen Spätfrost, Hagel und Trockenheit im Weinbau als auch unterschiedliche Anpassungsmaßnahmen an diese zu diskutieren. Die Auswirkungen der Extremwetterlagen Spätfrost, Hagel und Trockenheit auf die Produktionssysteme im Weinbau wurden anschließend anhand sog. typischer Betriebe modelliert. Typische Betriebe sind fiktive Betriebsmodelle, deren Betriebsdaten die realen Betriebe einer landwirtschaftlichen Region widerspiegeln sollen. Sie bilden ein funktionierendes Produktionssystem ab inkl. der Preise und Mengen, was eine erweiterte Vollkostenanalyse ermöglicht. Die Datengrundlage der betrachteten typischen Betriebe beruht auf öffentlichen Buchführungsdaten sowie auf den Erfahrungswerten, Aussagen und Betriebsdaten von Beratern, Wissenschaftlern und Winzern.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Weinregionen in Deutschland lag bei der Untersuchung der Fokus auf Rheinhessen, der größten Weinanbauregion Deutschlands. Ebenso wurde die Region Franken betrachtet, da diese wegen der östlichen Lage in Deutschland, andere klimatische und geographische Bedingungen aufweist als die Weinbaugebiete im Südwesten Deutschlands. Zudem unterscheiden sich die Betriebsstrukturen sowohl innerhalb der Regionen als auch zwischen Franken und Rheinhessen sehr. Für Rheinhessen wurde daher ein Fasswein-Betrieb mit 30 ha modelliert und für Franken ein direktvermarktender Flaschenwein-Erzeuger mit 10 ha Rebfläche. So können Anpassungsoptionen je nach angestrebtem Weinqualitäts- und Preissegment betrachtet werden. Optionen wie bspw. Hagelschutznetze könnten für einen Weinbau-Betrieb, der Flaschenwein im Hochpreissegment erzeugt, durchaus rentabel sein. Fassweinproduzenten würden hingegen die hohen Investitionen nicht aufbringen, sondern kostengünstigere Anpassungsoptionen wählen und bspw. ihr Produktionssystem auf Minimalschnitt im Spalier (MSS) umstellen.

Zunächst werden die Betriebsergebnisse beider typischen Betriebe basierend auf Werten des Jahres 2013 kalkuliert. Der Status quo kann folglich mit den Extremwetter-Szenarien verglichen werden. Es findet ein Vergleich der Betriebsergebnisse vor und nach einem Extremwetterereignis statt. Inwiefern praxistaugliche Anpassungsoptionen die ökonomischen Folgen der unterstellten Extremwetter-Szenarien für die typischen Betriebe vermindern können, wird im Rahmen eines

Mit-ohne-Vergleichs der Betriebsergebnisse analysiert. Die verschiedenen Anpassungsoptionen werden anhand von Nettobarwerten der Deckungsbeiträge über die angenommene durchschnittliche Nutzungsdauer der Reben von 25 Jahren ökonomisch bewertet. Die dynamische Betrachtung unterliegt den getroffenen Annahmen bzgl. der Extremwetter-Szenarien für Spätfrost und Hagel. Die unterstellten Häufigkeiten wurden mangels regionaler Extremwetter-Daten zur Vereinfachung mit den Experten gewählt. Auch wenn die Szenarien die Realität, also das rein zufällige und ungewisse Auftreten, von agrarrelevanten Extremwetterlagen nicht widerspiegeln, so dienen sie als Stütze zur Ableitung der Handlungsempfehlungen. Zum Schluss werden die Ergebnisse beider Regionen miteinander verglichen sowie Modellbeschränkungen und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Laut den Experteneinschätzungen in Kapitel 3.3.5 scheinen insbesondere Spätfrost, Hagel und Trockenheit im Weinbau von Relevanz zu sein. Deshalb wurden mit den Experten verschiedene Extremwetterszenarien bzgl. Schadensausmaß und -intensität basierend auf Erfahrungswerten erstellt. Tabelle 3.17 fasst die Szenarien sowie die praxistauglichen Anpassungsoptionen für die Weinbauregionen Rheinhessen und Franken zusammen:

Tabelle 3.17: Getroffene Annahmen bzgl. Extremwetter-Szenarien und praxistauglicher Anpassungsoptionen im Weinbau

Extremwetterlage	Szenario 1	Szenario 2	Praxistaugliche Anpassungsoptionen	Spezifika für Rheinhessen	Spezifika für Franken
Spätfrost	Totalschaden auf betroffener Fläche	30 % Ertrags-einbußen auf betroffener Fläche	Windmaschinen Frostkerzen Minimalschnitt	Betroffene Fläche in Rheinhessen ca. 15 %; Frostkerzen praxisirrelevant für Fassweinproduzenten aufgrund hoher Arbeitserledigungskosten	Betroffene Fläche in Franken 40 %
Hagel	Totalschaden auf 50 % der Fläche alle 15 Jahre	Totalschaden auf 10 % der Fläche alle 3 Jahre	Hagelversicherung Minimalschnitt	Hagel-Szenario 3: Totalschaden auf 20 % der Fläche alle 8 Jahre	Minimalschnitt praxisirrelevant für Flaschenweinproduzent, u. a. aufgrund angestrebter Traubenqualität
Trockenheit	Szenario für Rheinhessen: Gesamtfläche betroffen, Ertrag minus 40 %, Qualitätseinbußen nicht quantifizierbar	Szenario für Franken: 30 % der Gesamtfläche inkl. Junganlagen, Ertrags- und Qualitätsverlust von jew. 50 %	Keine, da typische Betriebe in beiden Regionen nicht über Wasserzugangsrechte verfügen		Im Notfall Bewässern von Junganlagen möglich

Die nach einem Extremwetterereignis erforderlichen Arbeitsschritte und Zusatzkosten wurden mit den Experten besprochen und in das Produktionssystem integriert. Schließlich wurden mögliche Anpassungsoptionen diskutiert. Von den aufgezeigten Anpassungsoptionen an Spätfrost, Hagel und Trockenheit (vgl. Kapitel 3.3.7) wurden nur jene betrachtet, die von den teilnehmenden Experten als praxistauglich eingeschätzt werden (vgl. Tabelle 3.17).

Da die Vorgehensweise des Vorher-nachher-Vergleichs der typischen Betriebe in Rheinhessen und Franken gleich verläuft, wird im Folgenden auf Rheinhessen fokussiert. Bei Betrachtung der Anpassungsoptionen werden zusätzliche Ergebnisse des typischen Betriebs in Franken ebenfalls betrachtet. Die ausführlichen Ausarbeitungen sind der Masterarbeit (Bender, 2015) zu entnehmen.

Vorher-nachher-Vergleich der Folgen von Spätfrost, Hagel und Trockenheit in Rheinhessen

Zwei unterschiedliche Produktionssysteme stellen in Rheinhessen den Status quo dar. Zum einen das Produktionssystem mit der in Deutschland gängigen Spalierdrahtrahmenerziehung und zum anderen der Minimalschnitt im Spalier (MSS) auf 30 % der Gesamtrebfläche. In Rheinhessen wird MSS zunehmend genutzt, da hierbei enorme Kosteneinsparungen erzielt werden können. Diese Maßnahmen lohnen sich insbesondere für Fassweinproduzenten, die im Wesentlichen Trauben für Weine im unteren Preissegment produzieren. Gleichzeitig ist dieses Produktionssystem robuster gegenüber Spätfrost- und Hagelereignissen als andere Erziehungsmethoden (Erfahrungswerten zufolge beträgt der Wirkungsgrad von MSS ca. 50 %). Der Status quo mit MSS wird im Rahmen des Mit-ohne-Vergleichs der Anpassungsoptionen betrachtet. Tabelle 3.18 veranschaulicht die ökonomische Wirkung der angenommenen Extremwetterlagen. Der Status quo bildet die Situation in einem Jahr ohne Extremwetter ab. Die Betriebswerte unter den jeweiligen Spätfrost-, Hagel- und Trockenheit-Szenarien werden in Vergleich zum Status quo gesetzt und die relativen Änderungen betrachtet.

Unter den angenommenen Szenarien wirkt sich das Hagel-Szenario 1 am stärksten auf das Betriebsergebnis aus: Sowohl der Deckungsbeitrag (- 76 %) als auch der Gewinn (- 206 %) des typischen Betriebes vermindern sich stark aufgrund eines Totalschadens auf der Hälfte der Gesamtfläche. Unter den getroffenen Annahmen erleidet der typische Betrieb in Rheinhessen ebenfalls enorme Verluste im Falle von Trockenheit: Der Deckungsbeitrag in Euro/ha reduziert sich um mehr als die Hälfte. Der Betrieb erfährt Gewinnverluste von knapp 160 %. Das Spätfrost-Szenario 1, ein Totalschaden auf etwa 15 % der Fläche, resultiert in einem 66 % geringeren Gewinn und um ein Viertel verminderten Deckungsbeitrag im Vergleich zum Status quo. Inwiefern diese Verluste mit Hilfe der aufgeführten Anpassungsoptionen reduziert werden können, wird anhand eines Mit-ohne-Vergleichs analysiert.

Tabelle 3.18: Ökonomische Folgen der Extremwetter-Szenarien auf den typischen Betrieb in Rheinhessen

Zustand	Erlös in Euro/ha	Direktkosten in Euro/ha	AKh/ha	Arbeitskosten in Euro/ha	Betriebskosten in Euro/ha	Gewinn in Euro/ha	Deckungsbeitrag in Euro/ha
Status quo	8.942	2.385	168	2.658	4.413	2.250	6.558
Spätfrost							
Spätfrost-Szenario 1	7.268	2.296	168	2.651	4.370	765	4.972
Änderung in %	-18,72	-3,73	-0,19	-0,24	-0,99	-66,02	-24,18
Spätfrost-Szenario 2	8.334	2.296	168	2.658	4.413	1.837	6.144
Änderung in %	-6,81	-3,73	0,01	0,00	0,00	-18,37	-6,30
Hagel							
Hagel-Szenario 1	4.081	2.487	172	2.758	4.188	-2.388	1.594
Änderung in %	-54,37	4,27	2,39	3,75	-5,10	-206,13	-75,70
Hagel-Szenario 2	8.334	2.403	169	2.673	4.370	1.682	5.931
Änderung in %	-6,81	0,75	0,42	0,56	-0,99	-25,26	-9,56
Trockenheit							
Gesamtertrag -40 %	5.365	2.385	169	2.674	4.430	-1.327	2.981
Änderung in %	-40,00	0,00	0,46	0,61	0,37	-158,94	-54,55

Mit- und ohne-Vergleich von Anpassungsoptionen an Extremwetterlagen im Weinbau für den typischen Betrieb in Rheinhessen und Franken

Für Rheinhessen wird folglich das MSS als Anpassungsoption an Hagel und Spätfrost auf 30 % der Rebflächen modelliert und eine Hagelversicherung auf allen Ertragsanlagen sowie eine Windmaschine zur Vermeidung von Spätfrost unterstellt. Der Flaschenwein produzierende Betrieb in Franken könnte aufgrund der Betriebsgröße Frostkerzen in Spätfrost-Nächten aufstellen. Des Weiteren wird eine Windmaschine als Anpassungsoption modelliert sowie eine Versicherung gegen Hagelschäden. Beide typischen Betriebe verfügen über keinerlei Wasserzugangsrechte. Im Falle von Trockenheit stehen den Weinbau-Betrieben daher keine Möglichkeiten zur Verfügung, obwohl technische Lösungen wie flexible oder stationäre Tropfbewässerung existieren. Ohne Zugang zu Wasser sind diese in der Praxis jedoch nicht umsetzbar.

Die **Anpassungsoptionen an Hagel** für den typischen Betrieb in Rheinhessen wurden so realitätsnah wie möglich in das Betriebsmodell integriert. Bei der Hagelversicherung sichert der Fassweinproduzent alle Ertragsanlagen ab. Unterstellt wird ein Hektarwert, der sich nach den erwarteten Erträgen und den sortenspezifischen Erlösen des Fassweinproduzenten richtet. Die Versicherungsprämie von 3 % entspricht der durchschnittlich zu zahlenden Prämie aller versicherten Winzer in Rheinland-Pfalz. Im Vergleich zum Status quo erhöhen sich dadurch die Direktkosten des rheinhessischen Betriebs um 14 %. In einem Jahr ohne Hagelschäden reduziert sich durch die Versicherung der Deckungsbeitrag von 6.558 auf 6.222 Euro/ha (vgl. Tabelle 3.19). Dies entspricht einer Minderung um ca. 5 %. Auch wenn die Hagelversicherung die Schäden nicht verhin-

dern kann, so wird durch die zum Erntezeitpunkt ausgezahlte Entschädigung die Liquidität des Betriebes beibehalten. Unter der Annahme des ersten Hagel-Szenarios mit einer Hagelversicherung würde der Betrieb eine Auszahlung i. H. v. 145.858 Euro erhalten und bei dem zweiten Hagel-Szenario 18.260 Euro.

Während durch eine Hagelversicherung im Fall von Hagel-Szenario 1 der Deckungsbeitrag um mehr als 280 % im Vergleich zur Situation ohne Anpassungsoption (Deckungsbeitragsverlust von 76 %) steigt, so zeigt sich ein verhaltener Anstieg des Deckungsbeitrags unter der Annahme von Hagel-Szenario 2. Hier beträgt der Deckungsbeitrag ohne Hagelversicherung 5.931 Euro/ha und mit Hagelversicherung 6.203 Euro/ha. Dies entspricht einer Steigerung von knapp 5 %. Verglichen mit dem Zustand ohne Hagelversicherung sinkt der Deckungsbeitrag unter Hagel-Szenario 2 nicht mehr um 10 %, sondern erhöht sich um ca. 5 %.

Tabelle 3.19: Vergleich der Hagel-Szenarien in Rheinhessen mit und ohne Hagelversicherung

Zustand	Erlös in Euro/ha	Direkt-kosten in Euro/ha	AKh/ha	Arbeits-kosten in Euro/ha	Betriebskos-ten in Euro/ha	Gewinn ohne Opportunitäts-kosten in Eu-ro/ha	Deckungs-beitrag in Euro/ha
Status quo	8.942	2.385	168	2.658	4.413	2.250	6.558
Status quo mit Hagelversicherung	8.942	2.721	168	2.658	4.413	1.915	6.222
Änderung in %	*0,00*	*14,09*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*-14,91*	*-5,12*
Hagel-Szenario 1	4.081	2.487	172	2.758	4.188	-2.388	1.594
Hagel-Szenario 1 mit Hagelversiche-rung	8.942	2.823	172	2.758	4.188	2.138	6.119
Änderung in %	*119,15*	*13,51*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*189,52*	*283,98*
Hagel-Szenario 2	8.334	2.403	169	2.673	4.370	1.682	5.931
Hagel-Szenario 2 mit Hagelversiche-rung	8.942	2.739	169	2.673	4.370	1.955	6.203
Änderung in %	*7,30*	*13,98*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*16,24*	*4,60*

Beim Minimalschnitt im Spalier mit einem Wirkungsgrad von 50 % im Vergleich zur normalen Spalierdrahtrahmenerziehung können Hagelschäden an den Weintrauben reduziert werden: Zuvor sank der Deckungsbeitrag unter Hagel-Szenario 1 und 2 um jeweils 76 % und 10 %. Im MSS reduziert sich der Deckungsbeitrag lediglich um etwa die Hälfte in Hagel-Szenario 1 und um 3 % in Szenario 2 (vgl. Tabelle 3.20).

Tabelle 3.20: Vergleich der Hagel-Szenarien in Rheinhessen mit dem Produktionssystem MSS

Zustand	Erlös in Euro/ha	Gewinn in Euro/ha	Deckungsbeitrag in Euro/ha
Status quo mit MSS	8.942	2.391	6.596
Hagel-Szenario 1 mit MSS	5.613	-867	3.192
Änderung in %	*-37,23*	*-136,27*	*-51,60*
Hagel-Szenario 2 mit MSS	8.743	2.192	6.397
Änderung in %	*-2,23*	*-8,34*	*-3,02*

Die MSS-Reberziehungsmethode ist auch eine der **Anpassungsoptionen an Spätfrost**. Mit dem Produktionssystem unter MSS verringert sich der Deckungsbeitrag parallel zu den Hagel-Szenarien auch unter Spätfrost in etwa um die Hälfte. Eine andere Möglichkeit zur Minderung der Spätfrost-Gefahr sind Windmaschinen. Für den typischen Betrieb in Rheinhessen wird angenommen, dass im Jahr 2013 eine Windmaschine zum Preis von 35.000 Euro gekauft wird. Es wird ein Wirkungsgrad der Maschine von 100 % angenommen. Somit entfällt die Unterscheidung in zwei Spätfrost-Szenarien auf 15 % der Fläche von jeweils 100 % und 30 % Ertragseinbußen. Durch die erzeugte Luftverwirbelung kann eine Fläche von bis zu 7 ha geschützt werden. Die Maschine mit einer Nutzungsdauer von 25 Jahren verbraucht je Spätfrostnacht 350 l Diesel. Für Rheinhessen werden im Jahr 2013 zwei Spätfrostnächte simuliert. Die jährliche Wartungszeit beträgt 6 AKh mit Reparaturkosten in Höhe von 100 Euro. Bei einer Nacht mit Spätfrostgefährdung erhält der Betriebsleiter eine Nachricht. An- und Ausschalten der Maschine wird jeweils mit 1 AKh modelliert.

Die Anschaffung einer Windmaschine wirkt sich in einem Jahr ohne Spätfrost-Ereignis leicht negativ auf den Gewinn sowie den Deckungsbeitrag aus. Sowohl unter Spätfrost-Szenario 1 als auch unter Szenario 2 wird mit Hilfe der Windmaschine der erwartete Ertrag ermöglicht. Die Deckungsbeiträge sinken nicht mehr um 24 % (Szenario 1) und 6 % (Szenario 2), sondern erhöhen sich entsprechend um 31 % und 6 % (vgl. Tabelle 3.21). Jedoch scheint sich eine Windmaschine erst im Falle von stärkeren Spätfrostereignissen zu lohnen, da auch höhere Direktkosten durch den Energieverbrauch mit der Maschinennutzung verbunden sind.

Tabelle 3.21: Vergleich von Spätfrostszenarien für Winzer in Rheinhessen mit und ohne Windmaschine

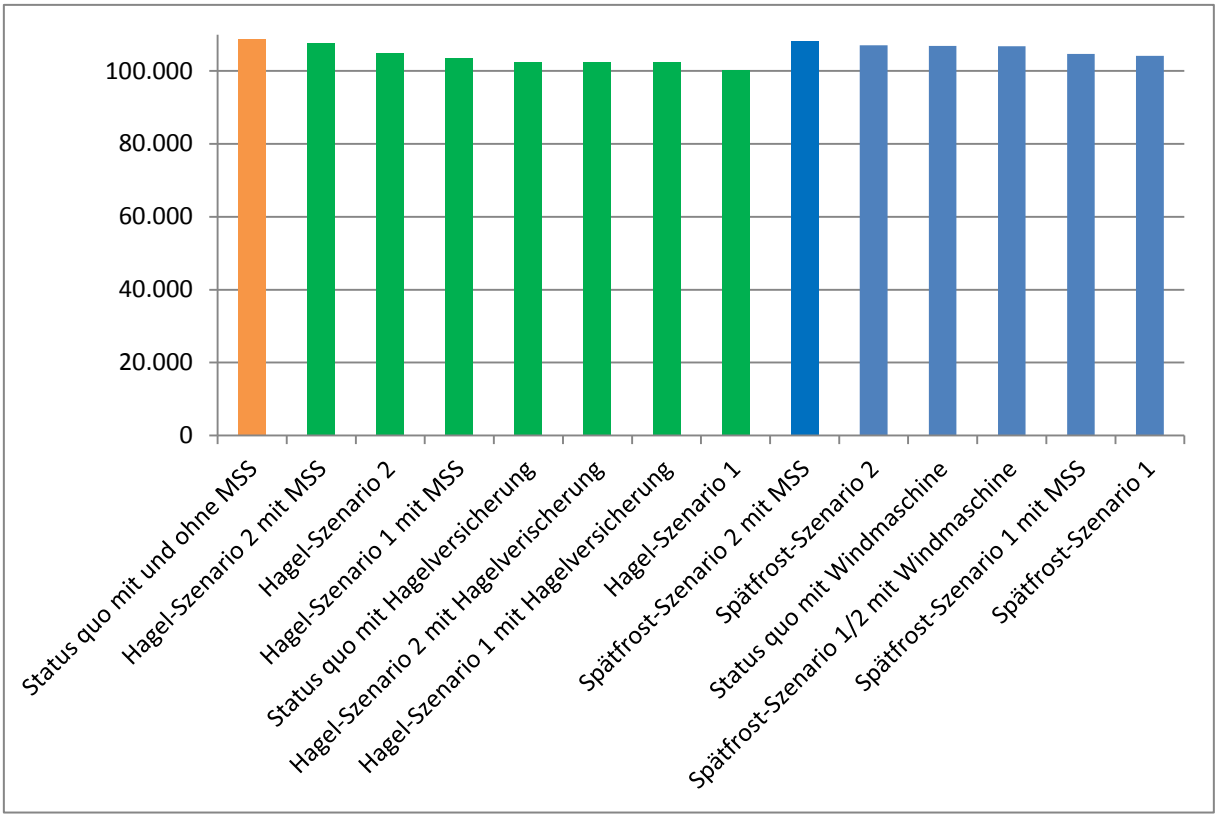
Zustand	Erlös in Euro/ha	Direkt-kosten in Euro/ha	AKh/ha	Arbeitskos-ten in Eu-ro/ha	Betriebskos-ten in Eu-ro/ha	Gewinn in Eu-ro/ha	Deckungs-beitrag in Euro/ha
Status quo	8.942	2.385	168	2.658	4.413	2.250	6.558
Status quo mit Windmaschine	8.942	2.389	168	2.663	4.471	2.206	6.554
Änderung in %	*0,00*	*0,17*	*0,13*	*0,18*	*1,29*	*-1,99*	*-0,06*
Spätfrost-Szenario 1	7.268	2.296	168	2.651	4.370	765	4.972
Spätfrost-Szenario 1-2 mit Windmaschine	8.942	2.415	168	2.666	4.474	2.180	6.528
Änderung in %	*23,04*	*4,055*	*0,36*	*0,53*	*2,38*	*185,12*	*31,29*
Spätfrost-Szenario 2	8.334	2.296	168	2.658	4.413	1.837	6.144
Spätfrost-Szenario 1-2 mit Windmaschine	8.942	2.415	168	2.666	4.474	2.180	6.528
Änderung in %	*7,30*	*4,055,18*	*0,16*	*0,29*	*1,37*	*18,67*	*6,25*

Ökonomische Bewertung verschiedener Anpassungsoptionen an Hagel- und Spätfrost-Szenarien

Zur ökonomischen Bewertung der verschiedenen Szenarien und Anpassungsoptionen in Rheinhessen dienen die Nettobarwerte. Die Deckungsbeiträge in Euro/ha wurden über 25 Jahre diskontiert mit einem Kalkulationszins von 3,5 %. Da regionalen Häufigkeiten des Extremwetterereignisses Hagel nicht und bei Spätfrost nur teilweise vorliegen, wird unterstellt, dass die Szenarien basierend auf den Expertenaussagen regelmäßig eintreffen. Das bedeutet für Hagel-Szenario 2 bspw.: Alle drei Jahre tritt ein Hagel-Totalschaden auf 10 % der Gesamtfläche auf. In Abbildung 3.31 sind die verschiedenen Barwerte nach Hagel bzw. Spätfrost und der jeweiligen Höhe des Gegenwartswertes sortiert.

Die höchsten Gegenwartswerte nach dem Status quo werden bei Hagel mit der kulturtechnischen Maßnahme MSS erzielt. Auch eine Hagelversicherung ist von Vorteil, da insb. bei starken Hagel-Ereignissen wie in Szenario 1 ein höherer Barwert erreicht wird als in der Situation ohne Anpassungsoption. Im Fall von Spätfrost wäre unter den getroffenen Annahmen MSS gegenüber einer Windmaschine vorzuziehen, wenn der Spätfrost-Schaden verhältnismäßig gering ist. Je höher das Spätfrostrisiko einer Rebfläche ist, desto rentabler ist die Investition einer Windmaschine.

Abbildung 3.31: Nettobarwerte der Deckungsbeiträge in Euro/ha mit und ohne Anpassungsoptionen für verschiedene Szenarien für Winzer in Rheinhessen

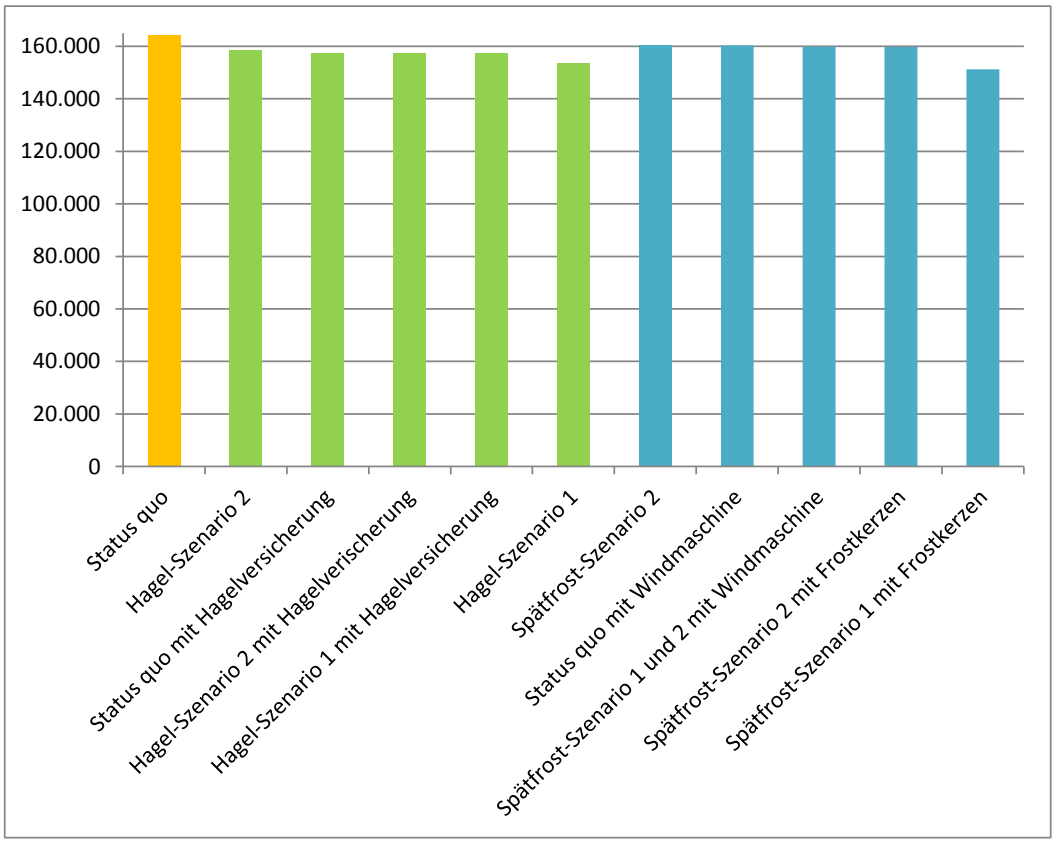


Für den typischen Flaschenweinproduzenten in **Franken** wird als weitere Anpassungsoption an Spätfrost das Aufstellen sog. Frostkerzen modelliert. Paraffin-Kerzen werden in den Rebzeilen aufgestellt und angezündet, so kann durch die erzeugte Wärme bei günstigen Windverhältnissen das Spätfrostrisiko reduziert werden. Mit einem Investitionsbedarf von 7-10 Euro/Stück benötigt der Winzer laut den Teilnehmenden der Fokusgruppendiskussion 600 Kerzen/ha. Die Herstellerangaben von 200-500 Stück/ha seien nicht ausreichend, um den gewünschten Wärme-Effekt in Franken zu erzielen. Unter der Annahme von 9 Euro je Kerze erhöhen sich die Direktkosten folglich um 5.400 Euro/ha. Eine Kerze brennt erfahrungsgemäß drei Nächte lang, d. h., alle Kerzen werden unter der Annahme von fünf Frostnächten in Franken einmal ausgetauscht mit einem Zeitaufwand von 20 AKh/ha. Der Investitionsbedarf an Kerzen erhöht sich somit auf 10.800 Euro. Der Arbeitszeitaufwand für das Aufstellen und Abbauen der Kerzen beläuft sich jeweils auf insg. 20 Stunden/ha. Anzünden und Löschen der Kerzen beanspruchen in etwa 3 AKh/ha. Während die Kerzen brennen, überwachen zwei Arbeitskräfte die Anlagen von 3-7 Uhr morgens. Inkl. Abbau und Entsorgung der Frostkerzen benötigt der typische Betrieb in Franken demnach insg. ca. 56 AKh/ha, um diese Maßnahme für eine Nacht mit Spätfrost-Gefährdung zu nutzen. Es wird angenommen, dass die Spätfrost-Gefahr stets auf derselben Fläche gegeben ist.

Im Vergleich zu Spätfrost-Szenario 1 ohne Frostkerzen lässt sich mit dieser Anpassungsoption nur eine minimale Verbesserung des Deckungsbeitrags von etwa 1 % erzielen. Im Gegensatz dazu

bietet eine Windmaschine, u. a. durch den geringeren Arbeitskräfteaufwand, im Vergleich zum selben Szenario eine Erhöhung des Deckungsbeitrags um ca. 73 %. Bei einer dynamischen Betrachtung der Anpassungsoptionen für Franken ergeben sich die in Abbildung 3.32 Gegenwartswerte.

Abbildung 3.32: Nettobarwerte der Deckungsbeiträge in Euro/ha mit und ohne Anpassungsoptionen für verschiedene Szenarien für Winzer in Franken



Wie bereits beim typischen Betrieb in Rheinhessen zeigt sich, je stärker das Ausmaß der Extremwetterlage ist, desto niedriger ist der Gegenwartswert. Eine Windmaschine wäre demnach gegenüber den Frostkerzen vorzuziehen. Problematisch bei den Frostkerzen ist, dass bei ungünstigen Windverhältnissen die Wärme abdriften kann. Der Wirkungsgrad der Kerzen kann somit nicht garantiert werden. Zudem können die Rebstöcke verrußen, weshalb sich diese Methode nur für Grenzlagen anbietet. Das Risiko des rechtzeitigen Aufstellens der Kerzen sowie das adäquate Einschätzen der Wettervorhersagen bei Spätfrost sollte von den betroffenen Winzern nicht unterschätzt werden. Zusätzlich herrscht stets Ungewissheit über das Ausmaß eines Spätfrostereignisses. Deshalb sollten planungssichere und vollautomatisierte Anpassungsoptionen wie eine Windmaschine in besonders Spätfrost-gefährdeten Lagen bevorzugt werden. Die Investition einer Windmaschine kann jedoch nur ab einer gewissen Betriebsgröße oder im Verbund mit mehreren betroffenen Winzern realisiert werden. Für Betriebe mit kleinen Rebflächen, die bspw. Weinbau nur im Nebenerwerb betreiben, können Frostkerzen hingegen eine rentable Anpassungsoption an Spätfrost darstellen, sofern ausreichend Arbeitskapazitäten vorhanden sind.

3.4 Extremwetterlagen im Wald

Federführung: Prof. Dr. Andreas Bolte (Thünen-Institut für Waldökosysteme)

3.4.1 Regionale Bedeutung des Waldes

Wälder bedecken in Deutschland mit 11,4 Mio. ha etwa 32 % der Landoberfläche. Damit sind Wälder nach den landwirtschaftlich genutzten Flächen bundesweit die zweitgrößte Landnutzungsform. Wälder finden sich meist dort, wo klimatische Bedingungen, die Bodenbeschaffenheit oder die Geländebedingungen insbesondere eine landwirtschaftliche Nutzung ausschließen oder wenig ertragreich erscheinen lassen. Die sind zum Beispiel die Hoch- und Steillagen der Mittel- und Hochgebirge, feinbodenarme Gesteinsböden, nährstoffarme Sandstandorte oder Nassstandorte. Einen überdurchschnittlichen Waldanteil haben die Flächenländer Rheinland-Pfalz (42 %) und Hessen (42 %), geringe Anteile Niedersachsen (25 %), Mecklenburg-Vorpommern (24 %) und Schleswig-Holstein (11 %) (BMEL 2014a).

Die vier Hauptbaumarten Fichte (25 %), Kiefer (22 %), Buchen (15 %) und Eiche (10 %) prägen das Waldbild in Deutschland. Von den nicht-heimischen Baumarten erreicht nur die Douglasie mit etwa 2 % nennenswerte Flächenanteile. Die Verbreitungsschwerpunkte der fünf Baumarten unterscheiden sich z. T. erheblich. Während Fichte und Buche vorwiegend in den Mittelgebirgslagen Deutschlands verbreitet sind, liegt der Schwerpunkt des Kiefernvorkommens im norddeutschen Tiefland, neben regionalen Verbreitungen in Franken, der Oberpfalz und dem Pfälzer Wald. Die heimischen Eichenarten sind gleichmäßiger verbreitet mit regionalen Schwerpunkten in süd- und westdeutschen Mittelgebirgen. Auch die Douglasie kommt häufiger in den Mittelgebirgen Südwestdeutschlands vor (Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz). Sie wurde aber auch auf einigen Standorten im Norddeutschen Tiefland angebaut (Hickler et al. 2012, BMEL 2014a).

Deutschland hat mit 3,7 Mrd. m³ Gesamtvorrat die vorratsreichsten Wälder in der EU. Innerhalb des letzten Jahrzehnts (1. Oktober 2002 bis 1. Oktober 2012 als Stichtage der Bundeswaldinventur) ist der durchschnittliche Holzvorrat[7] pro ha um 7 % auf 336 m³ angestiegen. Dieser Anstieg betrifft alle Hauptbaumarten bis auf die Fichte, deren Flächenanteil und Vorrat durch den Umbau von Fichtenreinbeständen in Laub- und Mischwälder gesunken ist. Stark erhöht hat sich besonders der Vorrat von alten und starken Bäumen mit einem Durchmesser über 50 cm. Der Holzzuwachs liegt weiterhin auf einem hohen Niveau von 10,8 $m^3\ ha^{-1}\ a^{-1}$ für alle Baumarten (im Hauptbestand). Am zuwachsstärksten sind die Nadelbaumarten Douglasie, Tanne und Fichte (18,9 bis 15,3 $m^3\ ha^{-1}\ a^{-1}$). Geringere Zuwächse haben die Kiefer, Buche und Eiche (9,3 bis 8,3 $m^3\ ha^{-1}\ a^{-1}$). Vom Gesamtzuwachs von 122 Mio. $m^3\ a^{-1}$ gingen im Zeitraum von 2002 bis 2012 jährlich 15 Mio. m³ in den Vorratsaufbau, 8 Mio. m³ verblieben als Totholzvorrat in den Wäldern. Von den ver-

[7] Die Vorrats- und Zuwachsangaben beziehen sich auf das Derbholz mit einem Mindestdurchmesser von 7 cm mit Rinde.

bliebenen 99 Mio. m³ Holzvorrat wurden 76 Mio. m³ (Erntefestmeter ohne Rinde) genutzt, der Rest von 23 Mio. m³ umfasste Ernteverluste (Reisig, Stubben) und Rinde (BMEL, 2014a). Mit ihren langen Bewirtschaftungszeiträumen von mehreren Jahrzehnten bis über einem Jahrhundert sind Wälder besonders vom Klimawandel und die Verschärfung von Extremwetterlagen betroffen.

3.4.2 Auswirkungen

3.4.2.1 Literaturrecherche zur Wirkung von Extremwetterlagen auf Wälder

In einer umfassenden Literaturrecherche wurden ca. 300 Veröffentlichungen zur Wirkung von Extremwetterlagen auf Wälder vorgesichtet und geprüft. Aus den herausgefilterten Informationen wurden drei unterschiedliche Wirkungsbereiche identifiziert: **(1) Temperaturextreme** mit den Komponenten Frost (Extremfrost), Spätfrost und Hitze (inkl. Strahlung und Ozonbelastung), **(2) Wassermangel- bzw. -überschuss** mit Nässe/Überflutung, Trockenheit, Dürre (letal) sowie Kahlfrost (Frosttrocknis) und **(3) Mechanische Belastungen** mit Sturm (unterschieden nach Gewitterstürmen und Herbst-/Winter-Orkanen) sowie Nassschnee/Eisanhang (Duftanhang).

In einer zweiten Stufe wurden Informationen zu Indikatoren und Schwellenwerten für Wirkungen von Extremwetterlagen zusammengestellt und in ihrer Bedeutung (zukünftige Häufigkeit, Schadeinfluss und ableitbare, kritische Schwellenwerte) bewertet (Tabelle 3.22 bis Tabelle 3.24). Dabei wurden die Wirkungsklassen geringe Bedeutung (grau), mäßige/unklare Bedeutung (gelb) und hohe Bedeutung (rot) angewendet. Kriterium war das zu erwartende Schadausmaß.

Bei den Bewertungen sind Beschränkungen zu beachten. Die Wirkungen beziehen sich auf wetter- und witterungsbedingte abiotische Einflüsse. Folge- und Begleitschäden dieser Einflüsse durch Schaderreger, die erhebliche Schäden verursachen können (vgl. Schelhaas et al. 2003, Schlyter et al. 2006, Bolte et al. 2010), sind nicht enthalten. Ebenso nicht enthalten sind Wechselwirkungen von Einzeleinflüssen wie z. B. das Zusammentreffen von Nassschnee-Belastung und Sturmeinfluss. Zudem sind viele Schwellenwerte nur aus lokalen oder regionalen Fallstudien abgeleitet und daher mit Unsicherheit bei der Übertragung auf andere Regionen belastet. Dies betrifft insbesondere die Schwellenwerte für Nassschnee/Eisanhang und sommerliche Gewitterstürme.

Tabelle 3.22: Schwellenwerte für die Wirkung von Temperaturextremen auf Wälder (inkl. Zusatzwirkungen), grau: geringe Bedeutung, gelb: mäßige Bedeutung, rot: hohe Bedeutung

Agrarrelevante Extremwetterlage	Wertebereich [Literaturbezug]	Indikator-einheit	Zeitraum	Häufigkeit (nach DWD)	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost (Extremfrost)	Min. Lufttemp. T_{min} [1] (Altbestand/Verjüngung)< -60/-50°C (Fichte), -35/-19°C (Buche), -90/-70 °C (Kiefer), -30/-20 °C (Traubeneiche)	Anzahl Ereignisse	01.10. - 31.03.	extrem selten	Absterben des Kambialgewebes, (Aufbrechen des Stammgewebes, „Frostrisse“, geringe Bedeutung, Eiche)
Spätfrost	Min. Luftemperaturen <0°C nach Beginn der Vegetationszeit (Tm > 10°C) [2], (Schäden abhängig vom Austriebsstadium und Baumart)	Zeitpunkt nach Beginn Vegetations-periode, Anzahl Ereignisse	01.04. - 30.06.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Beschädigung/Absterben der frisch gebildeten Assimilationsorgane am Beginn der Vegetationsperiode (sensitiv: Buche, Tanne, Douglasie, Jungpflanzen).
Hitze (Strahlung / Ozonbelastung)	Blattoberflächen-temperatur TB> 40°C (Buche) [3] CL AOT40 > 2,4 ppm h (Buche), bis > 4,7 ppm h (Fichte, Kiefer)	Anzahl Ereignisse	01.03. - 31.10.	häufiger (infolge Klimawandel)	Schädigung und Absterben des Blatt/Nadelgewebes (Ozon: nennenswerte Einschränkung der Photosynthese)

[1] Hickler T, Bolte A, Hartard B, et al. (2012): Folgen des Klimawandels für die Biodiversität in Wald und Forst. In: Mosbrugger V, Brasseur G, Schaller M, Stribrny B [Hrsg.]: Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 164-221. [2] Krause A (2011): Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen. Ber. Institut Meteorol. Klimatol. Univ. Hannover Bd. 77, 108 Seiten (und Anhang). [3] Karlsson PE, Uddling J, Braun S, et al. (2004): New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone, Atmos Environ, 38:2283–2294.

Unter diesen Restriktionen zeigen sich zusammenfassend drei Einflüsse mit hoher Bedeutung: **(1) Trockenheit**, die sich zuwachsmindernd auf ältere Hauptbestände auswirkt, **(2) Dürre (letale Trockenheit)**, die primär Jungpflanzen und Waldverjüngungen betrifft und **(3) Herbst- und Winter-Orkane**, die ältere Waldbestände schädigen.

Detaillierte Analysen konzentrierten sich daher in der Folge auf diese Einflüsse. Allerdings wurde der Trockenheitseinfluss auf ältere Waldbestände (Zuwachsminderung) in Rücksprache mit dem BMEL ausgeklammert, da entsprechend aufgearbeitete Grundlagendaten der dritten Bundeswaldinventur (BWI 2012) zum Zeitpunkt der Analysen noch nicht vorlagen und mehrere Drittmittelprojekte (BMEL und BMUB, Projektträger BLE: Waldklimafonds) hierzu forschen und in den nächsten Jahren Ergebnisse vorlegen werden. Die hier vorgelegten Ergebnisse fokussieren sich daher auf die beiden Aspekte **Trockenheitswirkung auf die Waldverjüngung** und **Sturmschäden an Altbeständen**.

Tabelle 3.23: Schwellenwerte für die Wirkung von Wassermangel und -überschuss auf Wälder, grau: geringe Bedeutung, gelb: mäßige Bedeutung, rot: hohe Bedeutung

Agrarrelevante Extremwetterlage	Wertebereich [Literaturbezug]	Indikator-einheit	Zeitraum	Häufigkeit (nach DWD)	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Nässe/ Überflutung	nFK > 100 % (stagnierende Nässe) bzw. Überflutung [4]	%-Anteil an der Vegetations-periodenlänge >10 (Buche) bis >60 (Stieleiche)	01.04. - 31.10.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Der Boden ist wassergesättigt oder überflutet. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel (fehlende Wurzelatmung).
Trockenheit (zuwachsmindernd)	nFK <50 % (im effektiven Wurzelraum) [vgl. Ackerkulturen]	Anzahl der Tage	01.04. - 30.10.	häufiger (infolge Klimawandel)	Aufgrund eines geringen Bodenwasserangebots wird das Wachstum vermindert oder eingestellt.
Dürre (letal, hauptsächlich Verjüngung!)	nFK <20 % (im effektiven Wurzelraum) [5]	Anzahl der Tage	01.04. - 30.10.	häufiger (infolge Klimawandel)	Aufgrund des zu geringen Bodenwassergehaltes ist eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit Wasser nicht mehr ausreichend gewährleistet (Verlust der Wasserleitfähigkeit und Embolien).
Kahlfrost (Frosttrocknis)	Blatttemperatur >10°C bei Eistagen (Bodentemperatur <-2°C) ohne Schneedecke [6, 7]	Anzahl der Tage	01.10. - 30.4.	selten	Gefrorener Boden bzw. blockierte Wasserleitungsbahnen und hohe Einstrahlung auf schneefreie Kronen führt zu Engpässen in der Wasserversorgung (nur Nadelbäume, geringe Bedeutung).

[4] Glenz C, Schlaepfer R, Iorgulescu I Kienast F. (2006): Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. For Ecol Manage 235:1-13.
[5] Czajkowski T, Schill H (2013): Ableitung von Absterbewahrscheinlichkeiten der Baumartenverjüngung bei Buchen und Fichten durch Trockenheit im Zusammenhang mit dem Auftreten von Extremwetterereignissen in Deutschland. Schlussbericht zum Entscheidungshilfe-Vorhaben (EH2) Agrarrelevante Extremwetterlagen, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) (nicht publ.). (FKZ 2813HS003)
[6] Lerch G (1991): Pflanzenökologie. Akademieverlag, Berlin, 535 Seiten.
[7] Larcher W (2001):Ökophysiologie der Pflanzen. UTB Verlag, Stuttgart, 408 Seiten.

Tabelle 3.24: Schwellenwerte für die Wirkung von mechanischen Belastungen auf Wälder, grau: geringe Bedeutung, gelb: mäßige Bedeutung, rot: hohe Bedeutung

Agrarrelevante Extremwetterlage	Wertebereich [Literaturbezug]	Indikator-einheit	Zeitraum	Häufigkeit (nach DWD)	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Nassschnee / Eisanhang (Duftanhang)	Tagesniederschlag T:-0,5 – 2°C > 50 mm, Periodenniederschlag T:-0,5 – 2°C > 150 mm [8]	Summe Tages- bzw. Perioden-niederschlag [mm]	01.10. bis 31.03.	selten?	Mechanische Beschädigungen von Baumkronen bis zum Wurf und Bruch ganzer Bäume (insbesondere Nadelholzbestände)
Sturm (Gewitterstürme)	Wind > 11 bis 20 m s^{-1} [9]	Anzahl Ereignisse	01.04.-30.09.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Wurf und Stammbruch von Bäumen (auch belaubte Laubbaumarten)
Sturm (Herbst/Winter-Orkane)	[Komplexe Windcharakteristik; Lage/Windstärke/Böigkeit, 10]	Anzahl Ereignisse	1.9.-30.4.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Wurf und Stammbruch von Bäumen (insbesondere Fichte und andere flachwurzelnde Nadelbäume)

[8] Hager, H., Willinger, M. (1994): Schneebruch und Windwurf im Böhmerwald. Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur, 7, 147-169. [9] Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H. (1999). Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. Clim. Change 41, 1, 17-36. [10] Schmidt, M. (2014). Analyse und Projektion der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern. Schlussbericht vom Entscheidungshilfe-Vorhaben (EH3) Agrarrelevante Extremwetterlagen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen (nicht publ.) (FKZ 2813HS004).

3.4.2.2 Trockenheitswirkung auf die Waldverjüngung

Trockenextreme wirken insbesondere durch die Erhöhung der Absterbewahrscheinlichkeit auf die trockenheitsempfindliche Baumverjüngung. Der Ausfall der Verjüngung führt zu erheblichen Mehrkosten bei der Begründung von Waldbeständen und bei mehrfacher Wiederholung zu einem generellen Verlust der Baumarteneignung. Zur Modellierung der Absterbewahrscheinlichkeiten von Baumverjüngungen fehlen bisher noch grundlegende Daten und Informationen, da Trockenheitssimulationen bisher nur sehr selten bis zum Absterben der untersuchten Jungpflanzen fortgesetzt wurden. Solche Daten werden aber dringend benötigt, um die Absterbewahrscheinlichkeit von Baumartenverjüngung bei extremer Trockenheit deutschlandweit modellieren zu können.

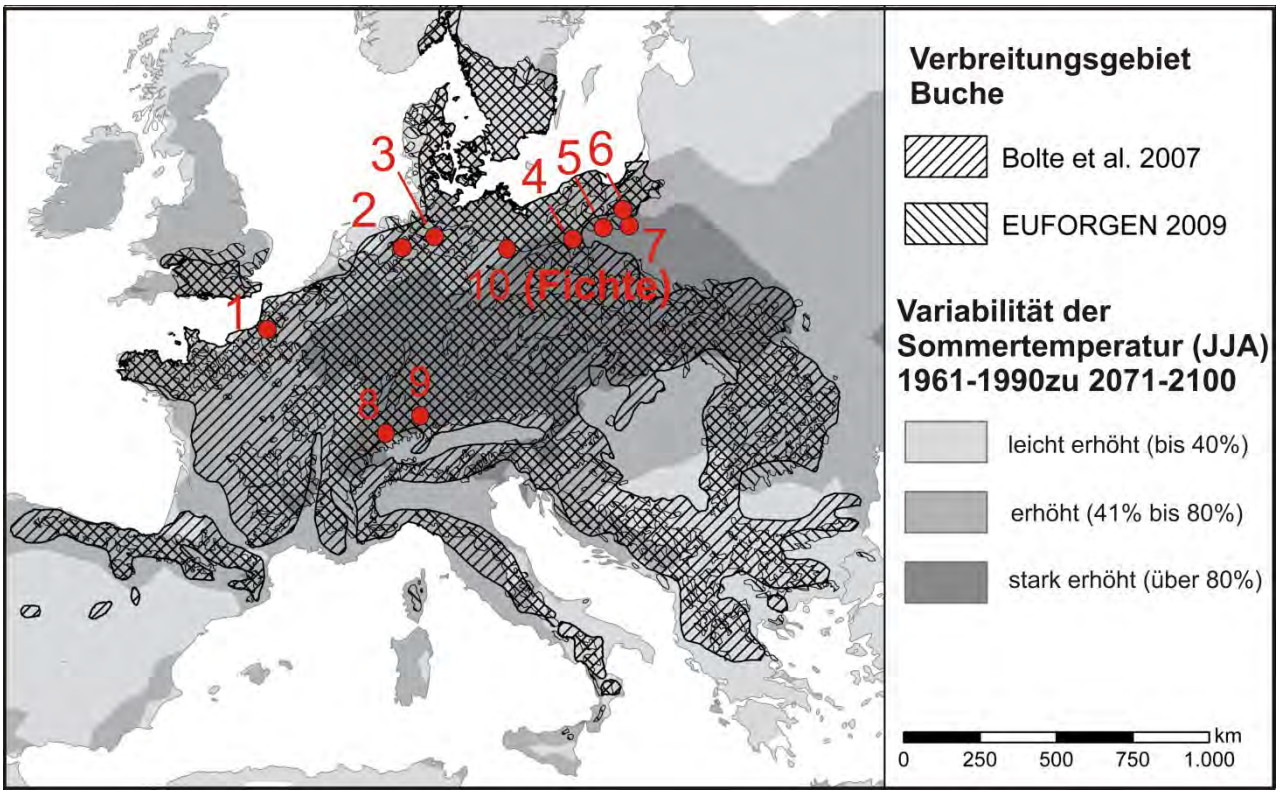
Daher wurde in einem ersten Schritt die Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE), Professur für Forstbotanik, damit beauftragt, die Absterbewahrscheinlichkeit von jungen Buchen- und Fichtenpflanzen experimentell zu untersuchen und aus den Ergebnissen allgemein anwendbare Schwellenwerte für das trockenheitsbedingte Absterben der Waldverjüngung abzuleiten. Fichte und Buche wurden als wichtige Hauptbaumarten mit geringer Toleranz gegenüber Trockenheit gewählt (Geßler et al. 2007, Zang et al. 2014). In einem weiteren Schritt erfolgte eine

deutschlandweite Modellierung des Auftretens dieser kritischen Schwellenwerte innerhalb der **ersten fünf Jahre** sowie die Ableitung zu erwartender ökonomischer Schäden.

3.4.2.2.1 Kritische Schwellenwerte der Trockenheitswirkung

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Buchenjungpflanzen neun anerkannter Saatgutherkünfte ausgewählt: zwei aus Deutschland, eine aus Frankreich, zwei aus der Schweiz und vier aus Polen. Diese Auswahl folgt im Tiefland einem Klimagradienten zunehmender Trockenheit und Sommerwärme von West (Frankreich/Norddeutschland) nach Ost (Polen, s. Tabelle 3.25, Abbildung 3.33). Ein Hochlagen- und ein Talstandort in der Schweiz ergänzen die Auswahl. Die Fichte wird mit einer ostdeutschen Herkunft aus mäßig trockenem Klima repräsentiert.

Abbildung 3.33: Lage der untersuchten Herkünfte; neun Buchen- und eine Fichtenherkunft



Quelle: Variabilität nach Schär et al. (2004)

Tabelle 3.25: Lage und Klimaparameter der untersuchten Herkünfte

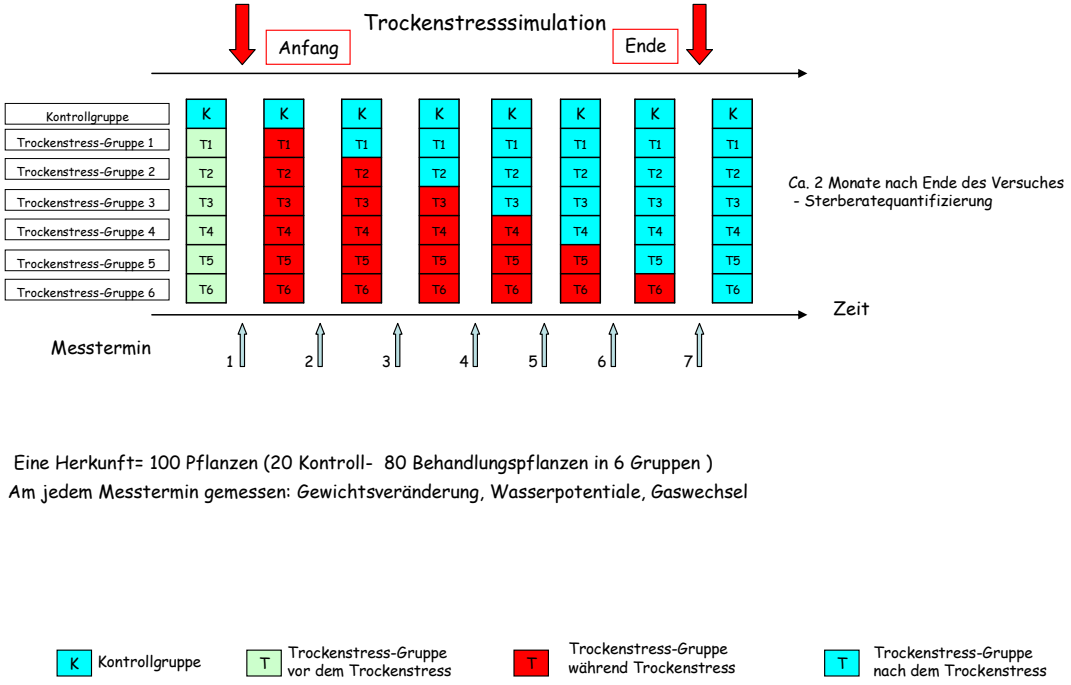
Nr.	Land	Baumart	Herkunft	Geogr. Breite		Geogr. Länge		Höhe	Jahres-Niederschlag	Jahres-Mitteltemp.	Juli-Mittel	Klimastation
				°	'	°	'	[m ü. NN]	[mm]	[°C]	[°C]	
1	Frankreich	Buche	Crecy	50	15	1	53	<200	700 - 750	10,3	17,9	Lille
2	Deutschland	Buche	Ahlhorn	52	57	8	21	<200	650 - 700	9,0	17,4	Bremen
3	Deutschland	Buche	Sellhorn	53	24	9	50	<200	750 - 800	9,2	16,9	Hamburg-F.
4	Polen	Buche	Jamy	52	41	17	40	<200	500 - 550	8,2	18,2	Poznan
5	Polen	Buche	Golub-Dobrzyn	53	5	18	56	<200	550 - 600	7,8	18,8	Torun
6	Polen	Buche	Brodnica	53	16	19	30	<200	550 - 600	7,8	18,8	Torun
7	Polen	Buche	Skrwilno	53	1	19	36	<200	550 - 600	7,8	18,8	Torun
8	Schweiz	Buche	Tüscherz-Alfermé	47	8	7	12	918	1400-1450	6,7	15,5	Schaffhausen*
9	Schweiz	Buche	Neunkirch	47	41	8	32	463	850-900	8,5	17,8	Biel*
10	Deutschland	Fichte	NO-dt. Tiefland	52	40	13	49	<200	550-600	8,6	17,7	Rüdnitz

* Hochaufgelöste Klimamodellierung anhand Meteoschweiz-Daten (Genossenschaft Meteotest)

Die Versuchspflanzen von sieben Buchenherkünften (Nr. 1 bis 7) wurden aus Bucheckern in den Thünen-Instituten für Forstgenetik sowie für Waldökosysteme kultiviert. Die Pflanzen der Herkünfte 8 und 9 wurden in der Schweiz von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf kultiviert und als 2-jähriges Pflanzmaterial im Herbst 2012 nach Deutschland geliefert. Die 3-jährigen Fichtenpflanzen wurden von der Baumschule Rudolf Schrader GmbH & Co. angezogen und kultiviert. Im Spätherbst 2012 erfolgte die Umtopfung von jeweils 100 Pflanzen pro Herkunft in 2-Liter Gefäße, sog. Rosentöpfe (Firma - Hermann Meyer KG). Das verwendete Pflanzensubstrat war ein mittelsandiger Feinsand (fSms) und wurde aus einem naturnahen Buchenwaldbestand im Raum Eberswalde entnommen (Revier: Wildtränke, Finowtaler Sandbraunerde).

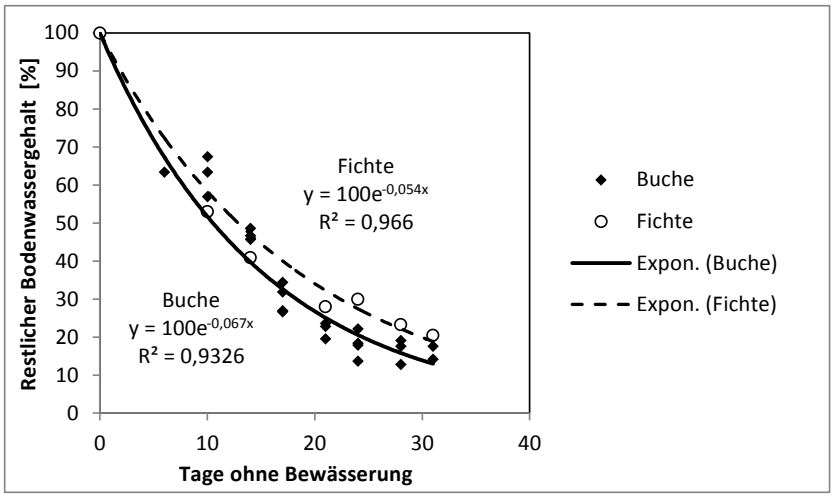
Die Trockenstressexperimente fanden im Gewächshaus des Botanischen Gartens der HNEE zwischen dem 9. Juli und dem 16. August statt. Die Pflanzenbestände (z. B. eine Herkunft = 100 Pflanzen) wurden in 2 Gruppen eingeteilt: Kontrollpflanzen ohne jeglichen Stress und Behandlungspflanzen mit Trockenstress (vgl. Abbildung 3.34). Die Kontrollpflanzen (20 Stück) wurden während des Experimentes durchgängig mit optimaler Wasserversorgung kultiviert. Diese Pflanzen bildeten eine Referenzgruppe bei Messungen und Erhebungen zur Trockenstress-Reaktion. Die restlichen 80 Pflanzen wurden nach der Aufsättigung der Töpfe mit Wasser - bis zum Erreichen der nutzbaren Feldkapazität (nFK)- Trockenheit ausgesetzt, indem sie nicht bewässert wurden. Anhand des Wasserverbrauchs (durch wiederholte Wägung der Töpfe bestimmt, s. Abbildung 3.35) und des okular eingeschätzten Vitalitätszustands erfolgte eine Bestimmung der Pflanzenmortalität an bis zu sieben Terminen während der Austrocknungsphase. Kriterien für die Einschätzung war eine komplette Blattwelke und Pflanzenwasserpotenzialwerte unter -5 MPa. Nach der durchgeführten Trockenstresssimulation wurden die untersuchten Pflanzen bis zur Feldkapazität aufgesättigt und regelmäßig bewässert. Ca. zwei Monate nach den letzten Messungen wurde eine zweite Einschätzung zur abgestorbenen Pflanzenanzahl durchgeführt.

Abbildung 3.34: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns



Quelle: eigene Darstellung.

Abbildung 3.35: Zusammenhang zwischen Länge der Trockenheit und dem relativen Bodenwassergehalt (Bezug: nutzbare Feldkapazität, nFK)



Quelle: eigene Berechnungen.

Die Informationen zur Mortalität der Jungpflanzen wurden in Form von Absterbe- bzw. Überlebensraten der Pflanzenpopulation unterschiedlicher Herkunft zusammengefasst. Da die Populationsgröße während des Experiments durch die geplante Entnahme von Teilpopulationen und zu-

sätzlichen Ausfällen durch Mortalität variabel war, wurde der arithmetische Mittelwert der insgesamt im Versuch verbliebenen Pflanzenanzahl ($\bar{x}_{arithm}$) gebildet (Gl. 1). Dieser lag zwischen 45 und 60 Pflanzen. Die Mortalitätsrate (M_k) der einzelnen Populationen (Herkünfte) ergab sich durch das Aufsummieren der abgestorbenen Pflanzenanzahl (m_i) zum Erhebungszeitpunkt k und die Bildung des Quotienten von Anzahl abgestorbener Pflanzen und dem arithmetischen Mittelwert der Versuchspflanzen-Anzahl ($\bar{x}_{arithm}$).

$$M_k = \frac{\sum_{i=1}^{k} m_i}{\bar{x}_{arithm}} \qquad (1)$$

Die Überlebensrate (S_k) zu einem bestimmten Erhebungszeitpunkt ergibt sich nach Gleichung (2).

$$S_k = 1 - M_k \qquad (2)$$

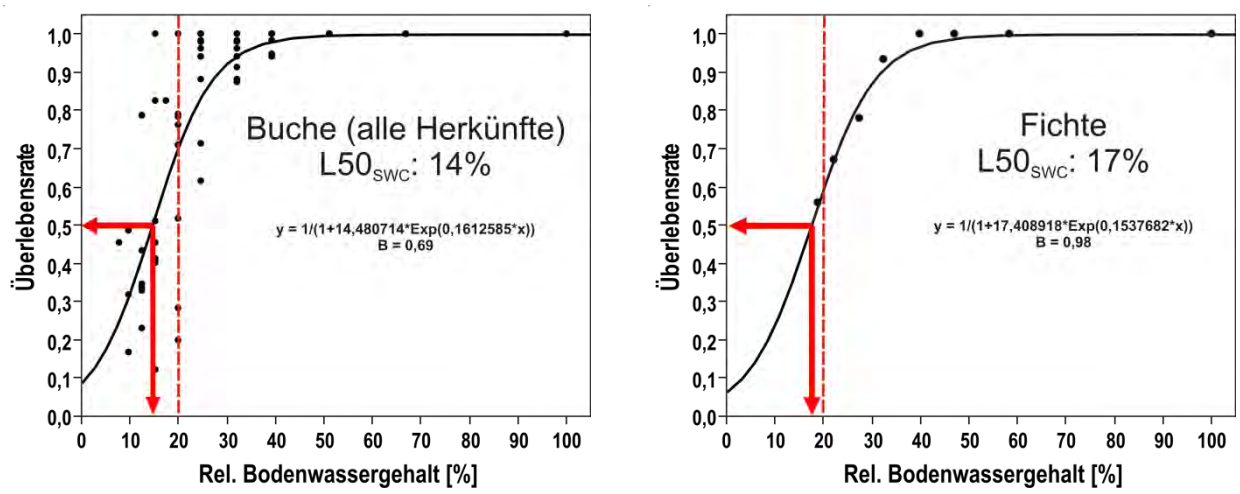
Aus den Überlebensraten wurden Überlebensfunktionen (S) mit Hilfe einer logistischen Regression und dem Statistik-Programmpaket JMP 11 abgeleitet (nicht-lineare Anpassung). Hierzu wurde die folgende Funktion (Gl. 3) iterativ aus Startwerten angepasst. Als Eingangsvariable x für die logistische Regression wurde die Ausschöpfung des Bodenwasserhaushaltes gewählt.

$$S(x) = \frac{1}{1 + ß_o\, e^{(ß_1 x)}} \qquad (3)$$

Aus den Überlebensfunktionen konnte die letale Dosis an Trockenheit (50 % überlebende Population, L50: S = 50) bezogen auf den relativen Bodenwasservorrat (SWC) zum Ausgangsvorrat (100 % = Feldkapazität) abgeleitet werden ($L50_{SWC}$).

Beide Baumarten erreichen 50 % Mortalität bei 14 % bis 17 % des relativen Bodenwasservorrats, bezogen auf die nutzbare Feldkapazität (vgl. Abbildung 3.36). Die Unterschiede zwischen den untersuchten Buchenherkünften werden hier aus Platzgründen nicht weiter erläutert und sind im Abschlussbericht (Czajkowski et al. 2013) näher ausgeführt. Unter Einbeziehung von Unsicherheiten und konservativer Betrachtung kann eine kritische Schwelle von **20 % des relativen Bodenwasservorrats** (bezogen auf die nutzbare Feldkapazität, nFK) bestätigt werden (vgl. rote Markierungslinie in Abbildung 3.36). Beim Unterschreiten dieser Schwelle ist mit erheblichen Ausfällen der Verjüngung zu rechnen. Daher bildet diese kritische Schwelle die Grundlage weiterer räumlicher Modellierungen zu kritischer Trockenheit für die Waldverjüngung.

Abbildung 3.36: Kritische Grenzen des relativen Bodenwasservorrats für Buche und Fichte



Erläuterung: Kritische Grenzen des relativen Bodenwasservorrats (roter Pfeil), (bezogen auf die nutzbare Feldkapazität (nFK)) für Buche (alle Herkünfte) und Fichte (L50SWC) sowie konservativer, kritischer Schwellenwert (20 % relativer Bodenwassergehalt, (bezogen auf nFK), gestrichelte rote Linie)

3.4.2.2.2 Räumliche Modellierung kritischer Trockenheit für die Waldverjüngung

Anhand der kritischen Trockenheitsschwelle erfolgte die Bewertung von Trockenperioden für die Waldverjüngung mit Hilfe einer regionalen Modellierung. Die regionale Differenzierung kritischer Trockenheit wird für die Referenzperiode 1961-1990, das Trockenjahr 2003 und die Szenarienzeiträume 2021-2050 sowie 2071-2100 dargestellt. Dabei ergaben sich folgende spezifisch für den Wald angepasste Arbeitsschritte:

- Auswahl und Berechnung der Parameter zur Kennzeichnung der meteorologischen Trockenheit:
  - Jahresmitteltemperatur
  - Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April bis September)
  - Anzahl der Trockentage in der Vegetationsperiode (Tage < 1 mm Niederschlag)
- Darstellung der regionalen Differenzierung von Bodenwasserspeicherkapazität und effektivem Wasserdargebot
- Modellierung von Kennwerten des Wasserhaushaltes zur Kennzeichnung der kritischen Trockenheit für die Verjüngung (Modell BROOK90)
  - Anzahl der Tage mit Unterschreitung von 20 % nFK in der Bodentiefe 0-50 cm

Da die Verjüngung von Wäldern in Deutschland fast ausschließlich unter dem Schirm des Altbestandes stattfindet, wird das niederschlagsbedingte Wasserangebot für die Jungpflanzen im Gegensatz zu agrarischer Nutzung stark von der hohen Verdunstung (Interzeptionsverdunstung und

Transpiration) des Altbestandes verändert. Die hydrologischen Prozesse im Wald werden daher auf den Bodenwasserhaushalt als integrierende Größe bezogen. Bei Kenntnis der nutzbaren Bodenwasserspeicherkapazität und der tiefenabhängigen Bodenwasserdynamik wird die Charakterisierung der Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Niederschlagsmangel, Bodenaustrocknung und Pflanzenreaktion möglich.

Mit Hilfe der nutzbaren Feldkapazität (nFK) wird die Differenzierung der Bodenwasserspeicherkapazität bis 50 cm Bodentiefe als Wurzelraum für die Verjüngung dargestellt. Durch die Kombination von Niederschlagsangebot in der Vegetationsperiode und der nutzbaren Feldkapazität wird die räumliche Differenzierung des relativen Bodenwassergehalts (%nFK) und dem Erreichen und der Überschreitung kritischer Trockenheitsgrenzen aufgezeigt.

Nachfolgend werden die methodischen Schritte in Kurzform dargestellt.

Datengrundlage

Als Witterungsdaten werden Zeitreihen von 1.218 Stationen als Tageswerte der Jahre 1901 bis 2010 genutzt. Die Daten basieren auf Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) aufgearbeitet wurden. Neben diesen gemessenen und interpolierten Daten standen als Klimaszenario die q50 Realisierung des RCP 8.5 Szenarios berechnet mit dem STARS-Modell für die gleichen 1.218 Stationen zur Verfügung. Diese Szenariendaten weichen von den DWD-geführten Untersuchungen ab. Die Analysen wurden innerhalb eines benachbarten Projektes durchgeführt. Hier wurden die Daten konsistent von der Modellkalibrierung bis zur Modellierung der Szenarien eingesetzt. Aufgrund der Konsistenz und eines unverhältnismäßigen Mehraufwandes wurde auf die Nutzung des DWD-Klimaensembles an dieser Stelle verzichtet. Im Vergleich zu dem DWD-Klimaensemble ordnen sich die Niederschläge der q50 Realisierung des STARS-Szenario in der Vegetationsperiode im oberen Bereich bei dem CLM-Szenario ein. Die Klimadaten, die zur potenziellen Verdunstung beitragen, führen zu vergleichsweise hohen potenziellen Verdunstungen, welche oft neben dem REMO-Szenario die Maximalwerte liefern. Als Kombination aus Niederschlag und potenzieller Verdunstung reiht sich die klimatische Wasserbilanz der q50-Realisierung des STARS-Szenarios in das Mittelfeld des Ensembles ein. Um die Stationsdaten auf die Flächen zu übertragen, wurden Thiessen-Polygone genutzt. Für die Modellierung wurden die Daten mit einem Interpolationsverfahren (Ziche und Seidling 2010) auf eine repräsentative Zeitreihe pro Landkreis regionalisiert. Für die Analyse werden die Referenzperiode 1961-1990 und das Trockenjahr 2003 betrachtet. Bei den Szenarien wurden die 30a Perioden 2021-2050 und 2071-2100 berücksichtigt.

Als bundesweite und flächendeckende Bodenkarte wurde die des Bundesamtes für Geologie und Rohstoffe genutzt. In dieser Karte werden die Böden nach verschiedenen Landnutzungen unterteilt (Richter et al. 2007). In dieser Analyse werden Waldböden für die Referenzprofile mit bodenhydrologischen Parametern genutzt. Als Eingangswerte für die Altbestände wurden die in Tabelle 3.26 gezeigten Werte aus Ertragstafeln (Schober 1975) verwendet.

Tabelle 3.26: Kennwerte der Altbestände für die Modellierung

Baum	Bonität (Ertragsklasse bzw. Höhenbonität)	Alter	Höhe
Rotbuche (*Fagus sylvatica)*	II	80-100	24.8
Fichte (*Picea abies)*	36	80-100	34.32
Kiefer (*Pinus sylvestris)*	II	80-100	21.98

Wasserhaushaltsmodell

Das Wasserhaushaltsmodell BROOK90 berechnet Wasserflüsse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre (Federer 2002, Federer et al. 2003). Innerhalb des Thünen-Institutes für Waldökosysteme wurde das Modell erweitert und angepasst. Die Erweiterungen umfassten unter anderem die Implementierung der witterungsabhängigen Phänologie sowie eine erweiterte Wurzelparametrisierung im Modell.

Die für die Modellierung benötigten zentralen Eingangsdaten sind Witterung (7 Messgrößen als Tageswerte), Bodenparameter (Horizonte, kF-PF-Parameter) sowie Daten zur Vegetation (Blattflächenindex/LAI, Wurzeltiefe, Baumhöhe). Die Kalibrierung erfolgt anhand von beobachteten Daten von waldwachstumskundlichen Versuchsflächen. Vor allem die Vegetationsparametrisierung von Buche, Kiefer und Fichte standen hierbei im Vordergrund.

Das Modell bilanziert den Wasserhaushalt tageweise und gibt als Ausgabeparameter unter anderem die potenzielle und die reale Transpiration sowie den Bodenwassergehalt der einzelnen Horizonte aus. Aus diesen Parametern werden die in Tabelle 3.27 abgebildeten Parameter berechnet.

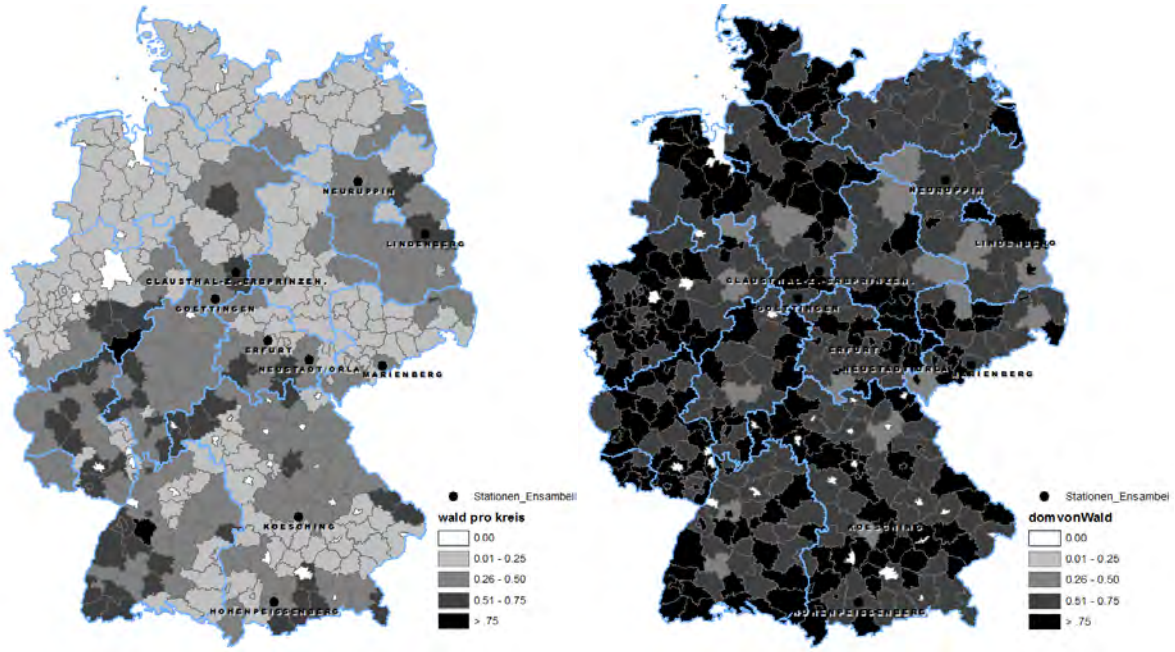
Tabelle 3.27: Liste der vorhandenen Indikatoren, bilanziert wird die Vegetationsperiode (Monate April bis September)

Name	Gruppe	Beschreibung
prec	Klima	Niederschlag
kliwa	Klima	Klimatische Wasserbilanz
tpa	Klima	Anzahl Trockentage
dnfk5020	Boden	Anzahl der Tage an denen der kritische Bodenwassergehalt (20% nutzbarer Bodenwasservorrat, nFK) bis 50 cm Bodentiefe unterschritten wird

Räumliche Modellierung

Um repräsentative, flächenhafte Aussagen tätigen zu können, wurde nach Landkreisen modelliert. Es ergaben sich 391 Kreise mit Waldflächen. Pro Kreis wurden die zwei häufigsten Waldböden genutzt, was einer Anzahl von 765 Plots entspricht. 17 Kreise haben keine Waldböden ausgewiesen. Dies sind vor allem kreisfreie Städte (vgl. Abbildung 3.37, links, weiße Flächen). Durch die Berücksichtigung der zwei dominierenden Waldböden pro Kreis haben 228 Kreise eine prozentuale Abdeckung von mindestens 75 % der Modellflächen bezüglich der Waldbodenflächen (vgl. Abbildung 3.37, rechts). Nur 15 Kreise haben eine geringe prozentuale Abdeckung von minimal 34 % bis 50 % der Modellflächen bezüglich der Waldbodenflächen. Damit sind die meisten Waldflächen in der Modellierung erfasst. Es werden die vier festgelegten Betrachtungszeiträume bzw. -punkte der Untersuchung (1961-1990; 2003; 2021-2050; 2071-2100) plus ein Jahr Vorlauf modelliert. Die Aggregation der Modellausgabe erfolgt dann pro Kreis flächengewichtet.

Abbildung 3.37: Waldanteil an der Landkreisfläche (links) und Flächenanteil der modellierten Böden an den Waldböden (rechts)



Erläuterung: Die Punkte stellen die ausgewählten Referenz-Klimastationen dar.

Modellergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass kritische Trockenheitsperioden (letale Dürren) für die Verjüngung hauptsächlich in den heute schon trockenen Regionen des nordostdeutschen Tieflandes und Teilen Süd- bzw. Südwestdeutschlands vorkommen können (vgl. Abbildung 3.38). Bei Anwendung eines konservativen Ansatzes und der Erfahrungen aus dem extremen Trockenjahr 2003 ist mit lebensbedrohlichem Wassermangel für die Verjüngung bei einer lang anhaltenden Unterschreitung der kritischen Schwelle des relativen Wasservorrats von **unter 20 % nFK an mehr als 150 Tagen** zu rechnen. Dies betrifft bis zum Jahr 2050 nach den Projektionen zwar kein Durchschnitts-

jahr (vgl. Tabelle 3.28), zum Ende dieses Jahrhunderts können kritische Trockenheitsperioden unter Fichten- und Kiefernaltbeständen allerdings bereits in Durchschnittsjahren, z. B. in Teilen des zentralen Ostdeutschlands, des Rheinlandes und Unterfrankens, auftreten. Die geringere Trockenheitsgefahr unter einem Buchenschirm hängt mit dessen geringeren Interzeptionsverlusten zusammen, eine Differenzierung der Dürregefahr nach Baumarten in der Verjüngung ist nach bisherigem Kenntnisstand nicht möglich.

Abbildung 3.38: Anzahl der Tage < nFK 20 % Bodentiefe 0–50 cm (dnfk5020) in Vegetationsperiode

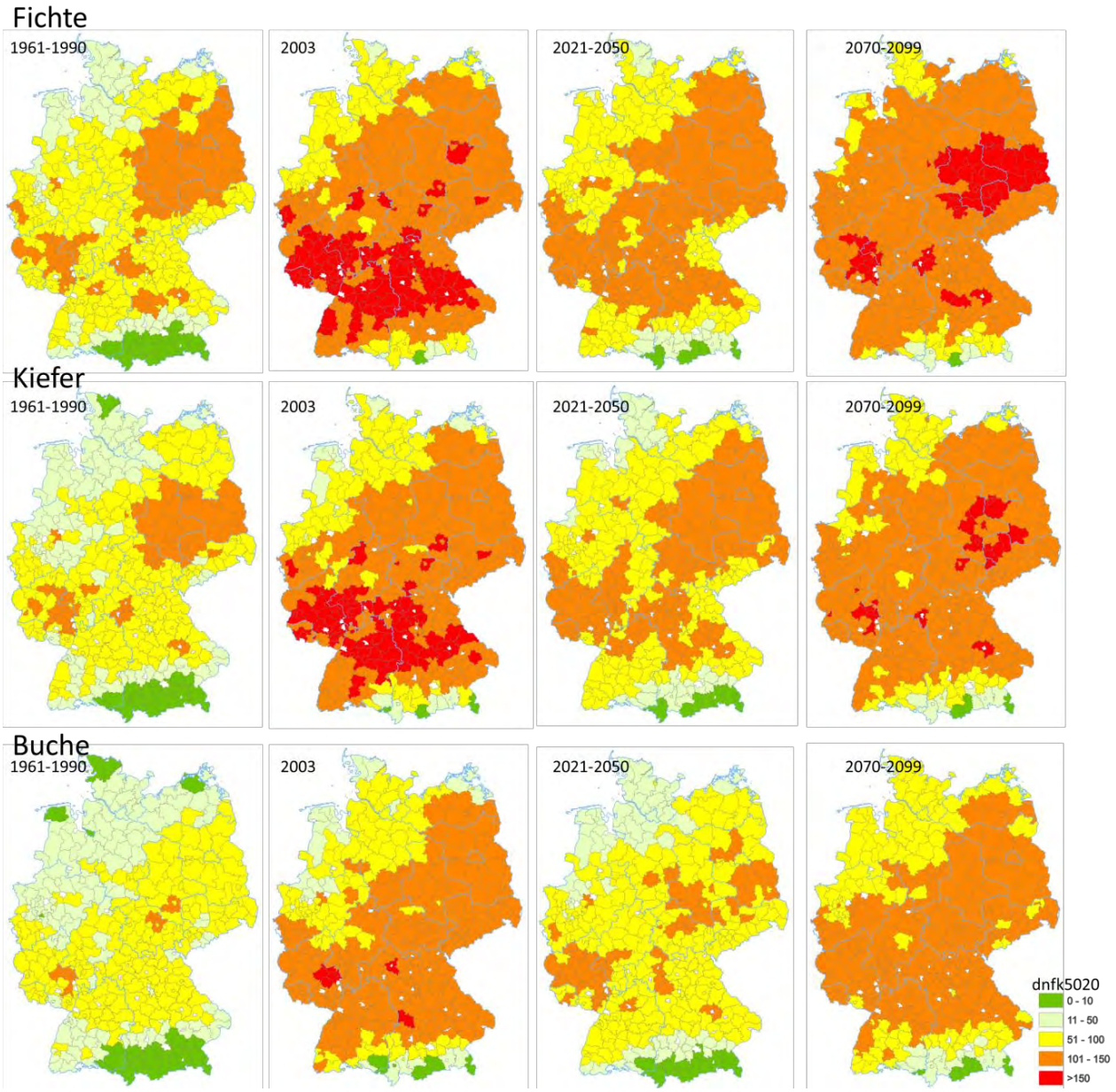


Tabelle 3.28: Anzahl der Tage mit kritischer Trockenheit während der Vegetationsperiode (Unterschreitung nFK 20 %, Bodentiefe 0–50 cm)

Periode	Fichte	Kiefer	Buche
1961-1990	76	66	53
2003	133	126	105
2021-2050	99	90	76
2070-2099	125	118	102

Die Darstellung des empirischen Wiederkehrintervalls in Abbildung 3.39 macht deutlich, dass unter einem Fichten- und Kiefernschirm zum Ende des Jahrhunderts große Bereiche Ost- und Süddeutschlands alle fünf Jahre oder sogar kürzer mit kritischer Trockenheit für die Verjüngung zu rechnen haben. Bei Fichten und Kiefern sollen nach den Berechnungen rund 42 bzw. 30 % Flächen betreffen (vgl. Tabelle 3.29). Dies würde faktisch einen drohenden Verlust der Verjüngungsfähigkeit der Wälder mit den heutigen Baumarten und Waldverjüngungsverfahren bedeuten. Ganz anders sieht es in Buchenwäldern mit nur geringer Erhöhung des Wiederkehrintervalls von kritischer Trockenheit gegenüber dem Referenzzeitraum aus. Dies setzt jedoch voraus, dass der Buchenaltholzschirm selbst durch kritische Trockenheit und mögliche Folgeschäden flächig erhalten bleibt.

Abbildung 3.39: Empirisches Wiederkehrintervall von kritischer Trockenheit (dnfk5020 > 150 Tage)

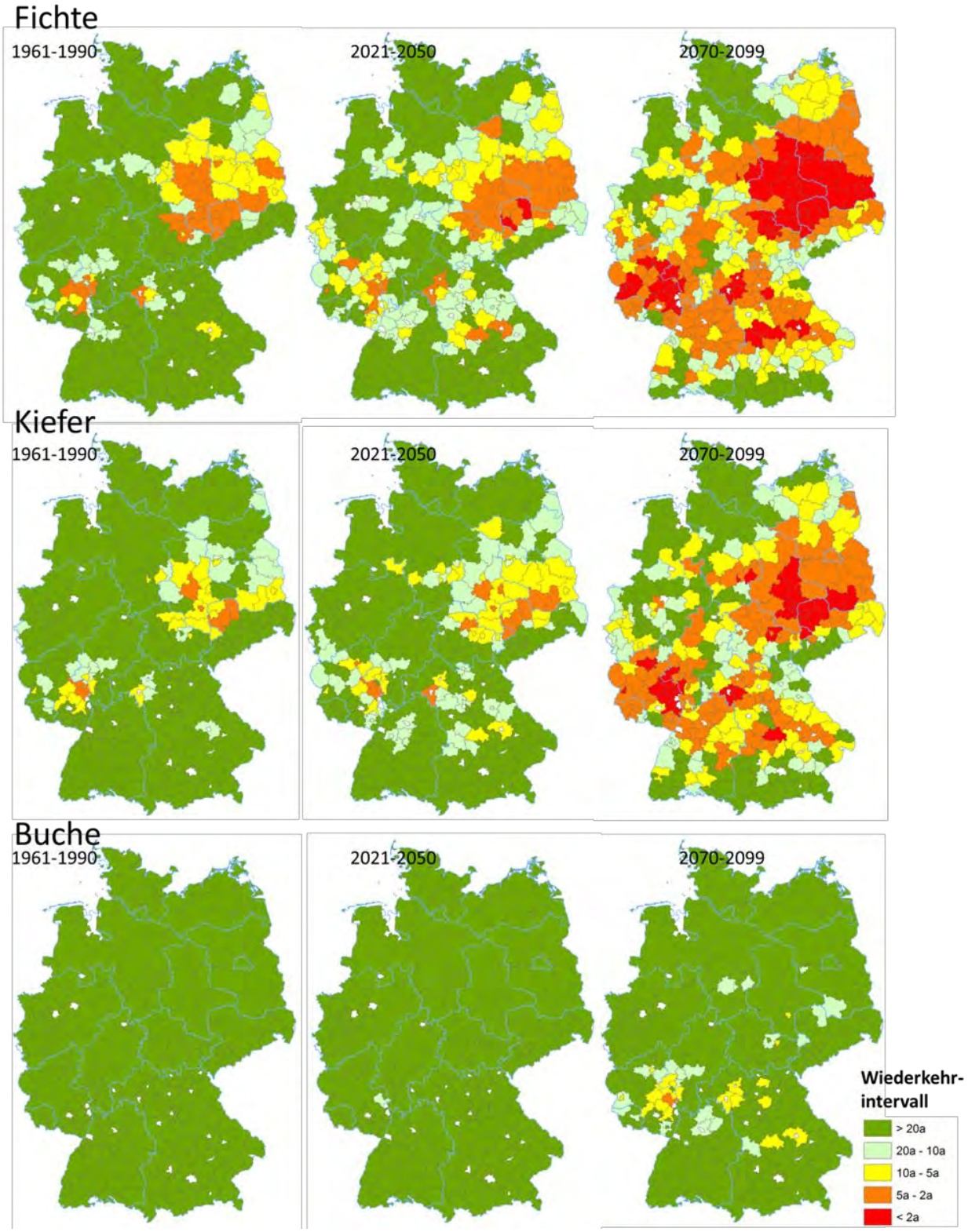


Tabelle 3.29: Empirisches Wiederkehrintervall von kritischen Trockenheitsperioden (dnfk5020 > 150 Tage), Flächenanteile in Prozent

Klassen	1961-1990 (Referenz)			2021-2050			2070-2099		
	Fichte	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer	Buche	Fichte	Kiefer	Buche
>20 Jahre	76,7	85,4	100,0	56,9	70,2	99,2	18,3	31,7	89,0
>10 – 20 Jahre	10,1	9,8	0,0	22,5	18,9	0,7	20,1	21,5	7,8
>5 – 10 Jahre	7,8	4,2	0,0	12,0	9,3	0,0	19,8	15,9	2,5
≤ 5 Jahre	5,4	0,6	0,0	8,6	1,6	0,0	41,7	30,9	0,6

Ökonomische Bewertung der Trockenheitsschäden an der Verjüngung

Für die ökonomische Bewertung von Trockenheitsschäden an der Verjüngung wurde unterstellt, dass die Verjüngung eines ursprünglich unter regulären Bedingungen begründeten Reinbestandes nach n Jahren einmalig letal und flächig ausfällt und unter erhöhten Kosten erneut künstlich begründet werden muss und alle Zahlungsströme um n Jahre verzögert eintreten. Es wurde davon ausgegangen, dass nach dem Trockenheitsschaden kein Baumartenwechsel erfolgt (d. h. die standörtliche Eignung der jeweiligen Baumart erhalten bleibt).

Bei der Walderneuerung wurde im Referenzszenario (bzw. reguläre Bewirtschaftung ohne Trockenheitsschaden) bei den Baumarten Buche und Fichte ein Flächenanteil der Naturverjüngung von 80 % und bei den Baumarten Eiche, Kiefer und Douglasie von 50 % unterstellt. Für die verbleibenden Flächen wurden Nachbesserungen durch künstliche Verjüngung mit entsprechenden Kulturkosten angesetzt. Bei der wiederholten Walderneuerung im Trockenheitsschadensszenario nach 5 Jahren wurde davon ausgegangen, dass die gesamte Fläche nach dem Trockenheitsschaden künstlich verjüngt werden muss. Für die Walderneuerung bzw. Wiederaufforstung wurden die in Tabelle 3.30 aufgeführten Kosten für die einzelnen Baumarten angesetzt.

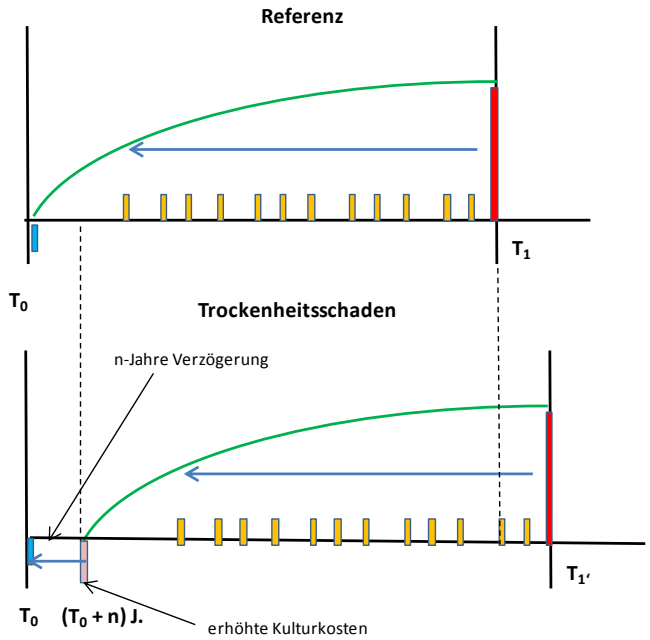
Tabelle 3.30: Unterstellte Walderneuerungs- bzw. Wiederaufforstungskosten

	Fichte	Kiefer	Douglasie	Buche	Eiche
Wiederaufforstungskosten in €/ha					
Bestandesbegründung Referenzbestand	620 €	2.850 €	2.850 €	1.460 €	3.800 €
2. Bestandesbegründung nach 5 Jahren aufgrund von Trockenschaden	3.100 €	5.700 €	5.700 €	7.300 €	7.600 €

Die Höhe des Schadens wird durch die Erwartungswertdifferenz der auf T_0 diskontierten Zahlungsströme des Referenzbestandes, der nicht durch Trockenheit geschädigt wird, und einem durch Trockenheit geschädigten Bestand bewertet. Neben den Walderneuerungs- bzw. Wiederaufforstungskosten sind in Abbildung 3.40 die Zahlungsströme der Vornutzungen sowie der Endnutzung zu T_1 bzw. $T_{1'}$ dieses Bewertungsansatzes schematisch dargestellt. Als Zahlungsströme der Vor- und Endnutzungen wurden die holzerntekostenfreien Erlöse (Deckungsbeitrag I) mit den

identischen Eingangsdaten wie im folgenden Kapitel 3.4.2.3 zur Sturmschadensbewertung berechnet.

Abbildung 3.40: Vergleich der Zahlungsströme zwischen einem trockengeschädigten Bestand und einem Bestand ohne Trockenheitsschaden



Anmerkung: gelbe Säulen: holzerntekostenfreie Erlöse der Vornutzungen, rote Säulen: holzerntekostenfreie Erlöse der regulären Endnutzung, blaue bzw. violette Säulen: Kosten der Walderneuerung, grüne Linie: schematische Holzvorratsentwicklung, blauer Pfeil: Diskontierung auf T0

Bezogen auf den Bewertungszeitpunkt zum Beginn der Bestandsbegründung (T_0) berechnet sich die Höhe des Schadens durch die zusätzliche Bestandsbegründung nach folgender Formel:

$$Zusätzliche\ Aufforstungskosten\ zum\ Zeitunkt\ \ T_0 = Bb_{Trocken} \cdot (1+i)^{-n}$$

$Bb_{Trocken}$: Bestandsbegründungskosten, (Trocken: nach Trockenheitsschaden)

i: Kalkulationszinssatz

n: Anzahl Jahre nach Eintritt des Trockenheitsschadens.

Der Schaden durch einen um n Jahre verzögerten Eintritt des Produktionsbeginns mit den Zahlungsströmen der Vor- und Endnutzungen (ohne Bestandsbegründung) berechnet sich wie folgt:

$$Schaden\ durch\ Verzögerung\ des\ Zahlungsstroms = Nbw_{Referenz}(1-(1+i)^{-n})$$

$Nbw_{Referenz}$: Nettobarwert zum Zeitpunkt der Bestandsbegründung

i: Kalkulationszinssatz

n: Anzahl Jahre, nach denen ein Trockenheitsschaden eintritt.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Erwartungswertdifferenzen des Referenzszenarios und des Trockenheitsschadensszenarios für typische forstliche Umtriebszeiten der Baumarten. Als kalkulatorischer Zinssatz wurden 1,5 % angesetzt.

Aus Tabelle 3.31 wird grundsätzlich deutlich, dass die Erwartungswerte der ertragsstarken Baumarten Douglasie und Fichte in der regulären Bewirtschaftung (Referenzszenario) weiter über denen der Kiefer, Buche und Eiche liegen. Ebenso sind im Trockenheitsszenario die Erwartungswerte der Douglasie und Fichte weiter positiv, während die Erwartungswerte der Kiefer, Buche und Eiche negative Vorzeichen aufweisen. Die hohen Bestandsbegründungskosten der zusätzlichen Walderneuerung nach Trockenheitsschäden können durch die holzerntekostenfreien Erlöse der Vor- und Endnutzungen dieser ertragsschwachen Baumarten nicht zusätzlich kompensiert werden.

Tabelle 3.31: Erwartungswerte des Referenz- und des Trockenheitsszenario und deren Differenz

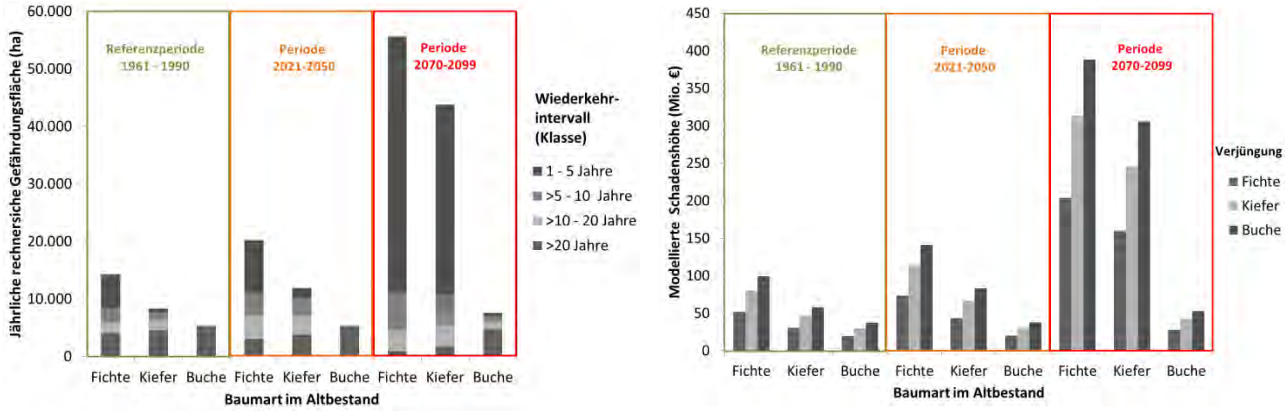
Baumart	Umtriebszeit	Erwartungswert des Referenzszenarios	Erwartungswert des Trockenheitsszenario	Erwartungswertdifferenz
Fichte (Ekl I)	90 J.	10.208 €	6.554 €	**-3.654 €**
Kiefer (Ekl I)	120 J.	1.757 €	-3.865 €	**-5.622 €**
Douglasie (Ekl I)	80 J.	15.048 €	8.473 €	**-6.575 €**
Buche (Ekl II)	140 J.	1.413 €	-5.569 €	**-6.982 €**
Eiche (Ekl II)	160 J.	59 €	-7.272 €	**-7.332 €**

Für eine Abschätzung des möglichen Schadausmaßes durch Trockenschäden an der Verjüngung auf Bundesebene wurde zunächst die rechnerische jährliche Verjüngungsfläche aus der BWI 2012 hergeleitet. Die Waldfläche in der ersten Altersklasse (1 bis 20 Jahre) beträgt 1.066.834 ha (Thünen-Institut 2015). Daraus ergibt sich eine mittlere jährliche Verjüngungsfläche von 53.342 ha. Wird unterstellt, dass die Verjüngung bis zum Alter von 5 Jahren von letaler Trockenheit betroffen werden kann, ergibt sich eine jährliche potenzielle „Gefährdungsfläche“ von 266.709 ha (Verjüngung im Alter von 1 bis 5 Jahre). Bezieht man diese Fläche auf die Anteile der klassierten, empirischen Wiederkehrintervalle, kann man für die pauschalen Bestandsszenarien Fichte, Kiefer und Buche (Altbestand) mittlere, jährliche Gefährdungsflächen ableiten (vgl. Tabelle 3.32) und die monetären Schäden für die verjüngten Baumarten (Beispiel Fichte, Kiefer und Buche) abschätzen (Abbildung 3.41). Die Szenarien dürfen nicht als Simulation derzeitiger oder zukünftiger realer Bestandssituationen angesehen werden, da die jeweiligen Baumarten pauschal auf alle Standorte ohne Berücksichtigung ihrer Standortseignung gesetzt werden. Da eine zutreffende Simulation zukünftiger Waldflächenverteilung in ferner Zukunft (bis 2070-2099) nicht möglich erscheint, können aber so zumindest die Baumartendifferenzierung bei gleicher Verbreitung dargestellt werden.

Tabelle 3.32: Mittlere rechnerische Gefährdungsfläche (Verjüngung) pro Jahr bezogen auf das mittlere Wiederkehrintervall für kritische Trockenheit

Pot. jährliche Gefährdungsfläche bundesweit (ha)	Empirisches Wiederkehrintervall (Klasse)	Mittleres Wiederkehrintervall (Jahre)	Mittlere rechnerische Gefährdungsfläche pro Jahr (ha)
266.709	>20 Jahre	50	5.334
266.709	>10 - 20 Jahre	15	17.781
266.709	>5 - 10 Jahre	8	33.339
266.709	1 - 5 Jahre	2,5	106.684

Abbildung 3.41: Jährliche, rechnerische Gefährdungsflächen (links) und Schadenssummen (rechts) für kritische Trockenheit (Bestandes-Szenarien Fichte, Kiefer und Buche-Altbestände)



Die Baumart im Altbestand wirkt sich entscheidend sowohl auf die Größe der bundesweiten Gefährdungsfläche als auch auf die errechnete Erwartungswertdifferenz aus. Ein Buchen-Altbestand minimiert beides erheblich, unter der Voraussetzung, dass dieser selbst durch Trockenheit und mögliche Folgeschäden nicht ausfällt. Die höheren Schadenssummen unterschiedlicher Baumarten wirken sich dazu im Vergleich nur unbedeutend aus. Nur bei Hochgefährdungs-Szenarien (Fichten- und Kiefern-Altbestand in der Periode 2070-2099) lassen sich erhebliche Unterschiede in den Schadenssummen bei der Verwendung unterschiedlicher Baumarten in der Verjüngung erkennen. Hier nicht betrachtet ist allerdings die Wirkung der Trockenschäden der Verjüngung auf die absoluten Erwartungswerte für die gesamte Produktionszeit der einzelnen Baumarten. Hier können die ertragsstarken Baumarten Douglasie und Fichte deutlich besser als Buche oder Eiche Trockenschäden in der Verjüngungsphase ökonomisch kompensieren.

Aus den Simulationen lässt sich zusammenfassend ableiten, dass der derzeitige Waldumbau von Nadelwäldern zu Buchen- und ggf. anderen Laubwäldern sich, insbesondere in Trockengebieten, positiv auf die zukünftige Verjüngungsfähigkeit auswirkt. Dies setzt jedoch voraus, dass die Altbestände bei einer Verjüngung unter Schirm auch unter Trockenheit erhalten werden können. Buchenwälder wirken sich gegenüber reinen Kiefern- und Fichtenwäldern, insbesondere durch ihre

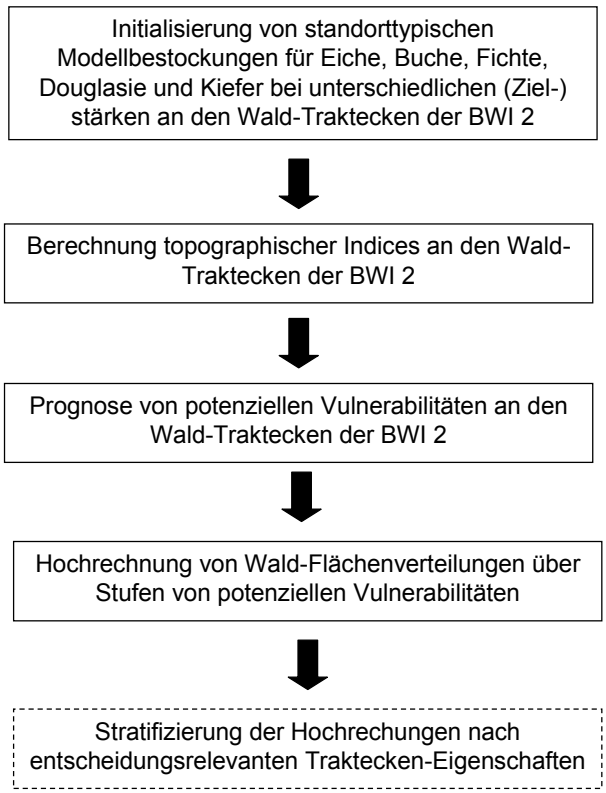
geringere Verdunstung und ihre höhere Strahlungsabschirmung unter Schirm, mäßigend auf die Wirkung von klimatischer Trockenheit auf die Verjüngung aus. Die Zeitspanne für einen Waldumbau ist aber begrenzt und scheint sich ab Mitte des Jahrhunderts abzulaufen. Mischbestände mit Buche und Nadelbaumarten wie Kiefer, Fichte und Douglasie wurden in die Simulation zwar nicht einbezogen, langjährige waldökologische Untersuchungen zeigen aber, dass sich die Vorteilswirkung der Buche auch in Mischbeständen mit Nadelbaumarten positiv auswirkt (Müller 2011).

3.4.2.3 Sturmschäden

Vulnerabilitätsschätzungen gegenüber Winterstürmen

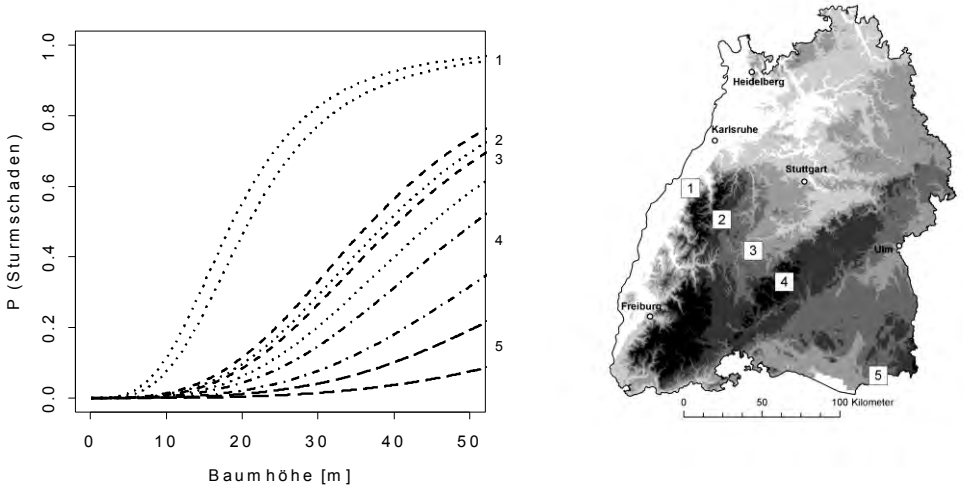
Stürme sind schon immer eine der bedeutendsten Schadfaktoren für die Forstwirtschaft. Sie verursachen beispielswiese durch Holzentwertung oder Hiebsunreifeverluste erhebliche wirtschaftliche Schäden (z. B. Schelhaas et al. 2003). Die Einschätzung der Sturmschadensempfindlichkeit der Wälder erfolgte im laufenden Projekt in zwei Teilschritten. Zunächst wurden durch die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA, Dr. Matthias Schmidt, FKZ 2813HS004) die potenziellen Vulnerabilitäten gegenüber Winterstürmen für die einheimischen Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche sowie für die eingeführte Baumart Douglasie geschätzt. Bezugsgröße ist dabei der Zieldurchmesser der Bäume (Schmidt 2014). Die Modellierung der potenziellen Vulnerabilität des Waldes gegenüber Winterstürmen erfolgte mit Hilfe eines statistischen Sturmschadenmodells und verschiedener Hilfsmodelle. Abbildung 3.42 zeigt das Ablaufschema der Modellierung. Die Prognose erfolgte für die Wald-Traktecken der Bundeswaldinventur (BWI 2, Stand 2002) und prognostiziert an diesen Standorten die potenzielle Sturmvulnerabilität anhand von topographischen Indizes und Baumdimension. Als Ergebnis lassen sich Waldflächenverteilungen differenziert nach Stufen der Vulnerabilität und gegebenenfalls stratifiziert nach weiteren Merkmalen wie Höhenstufen oder für großräumige regionale Einheiten berechnen.

Abbildung 3.42: Ablaufdiagramm der Gesamtkonzeption zur Prognose potenzieller Vulnerabilitäten des Waldes in Deutschland durch Winterstürme



Das verwendete empirische Sturmschadenmodell ist auf der Grundlage von Schadansprachen in der BWI 2002 nach dem Winterorkan 'Lothar' am 26.12.1999 in Baden-Württemberg entwickelt worden (Schmidt et al. 2010). Die breite Datengrundlage und die enge zeitliche Nähe zwischen dem Wintersturm und dem Inventurzeitpunkt wurden für die Entwicklung eines Modells genutzt, welches im Bereich der statistischen Sturmschadenmodelle eine bisher nicht erreichte Sensitivität gegenüber einer Vielzahl von Einflussfaktoren aufweist. Das Modell erlaubt Schätzungen, die sensitiv gegenüber der Baumart(gruppe), dem BHD, der Baumhöhe sowie der Exponiertheit des Geländes sind. Effekte auf die Sturmschadenswahrscheinlichkeit, die aus der spezifischen Struktur von Beständen (Bestandesstabilität) oder aus der Lage von Beständen zueinander oder in Bezug auf vorgelagerte Waldränder resultieren, können durch das Sturmschadenmodell aber nicht abgebildet werden. Ein wichtiger Modellaspekt ist, dass die geographische Lage als Ersatz für die regionale Windgeschwindigkeit fungiert. Damit lassen sich in Simulationen die Auswirkungen verschiedener Windgeschwindigkeiten abbilden. Anstelle von konkreten mittleren oder maximalen Windgeschwindigkeiten können allerdings lediglich qualitative Vorgaben gemacht werden. Die Verwendung der Koordinaten der Position 1 bzw. 2 (vgl. Abbildung 3.43) würde Bedingungen in Luv bzw. in Lee des Nordschwarzwaldes beim Durchzug des Wintersturms 'Lothar' abbilden.

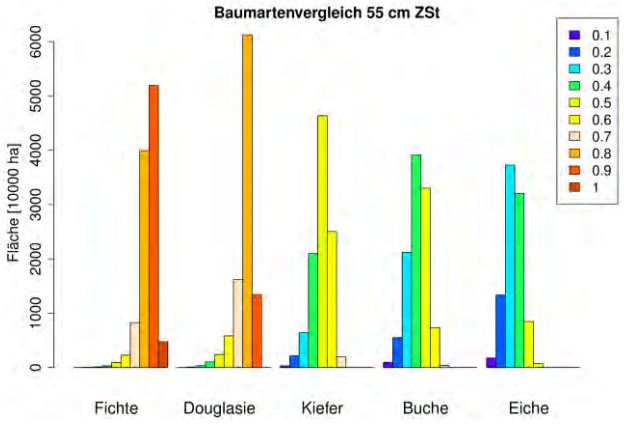
Abbildung 3.43: Durch die geographische Lage und die Einzelbaumhöhe bedingte Unterschiede der prognostizierten Schadwahrscheinlichkeit; (95% Prognoseintervall)



Erläuterungen: In der Abbildung und der Karte übereinstimmende Ziffern kennzeichnen die Zugehörigkeit der Wahrscheinlichkeitsverläufe zur jeweiligen geographischen Lage. Der Brusthöhendurchmesser (BHD) wird mit variierender Höhe so verändert, dass ein konstantes Baumhöhen zu BHD-Verhältnis (h/d-Wert) von 80 [cm/cm] resultiert. Die übrigen Prädiktoren wurden konstant gehalten (Baumartengruppe Fichte, Median der Exponiertheit (modifizierte Topex-to-Distance-Indices)).

Die Einschätzung der Vulnerabilität wurde für verschiedene Normbestockungen von Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer bei unterschiedlichen BHD-Stufen durchgeführt (vgl. Abbildung 3.44, Beispiel Zieldurchmesser: 55 cm). Für realistische Prognosen wurden die zugehörigen Baumhöhen der BHD-Stufen standortsensitiv geschätzt, wobei jedoch nur klimatische und keine Effekte von Bodenparametern berücksichtigt werden konnten. Die Effekte der Geländeexposition und -exponiertheit gegenüber hypothetischen Hauptwindrichtungen wurden bei der Vulnerabilitätsprognose mit Hilfe topographischer Indizes abgebildet, die auf der Grundlage eines deutschlandweiten digitalen Geländemodells (90 x 90 m) berechnet wurden. Als meteorologische Randbedingungen wurden zwei Winterstürme in Orkanstärke und exakt südwestlicher bzw. nordwestlicher Windrichtung verwendet, die über Proxyvariablen spezifiziert wurden.

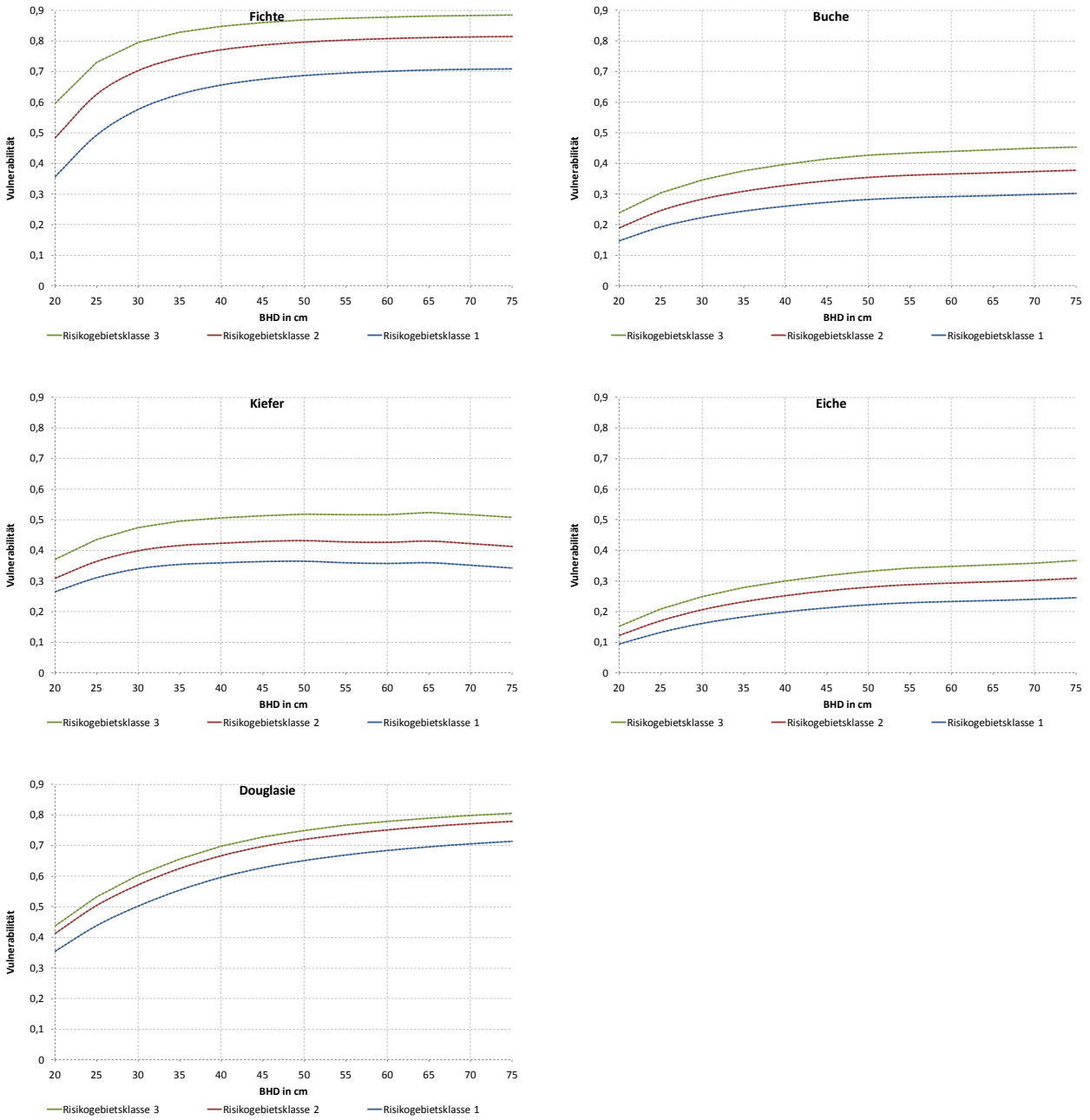
Abbildung 3.44: Flächenverteilungen des Waldes in Deutschland differenziert nach Vulnerabilitätsstufen gegenüber Winterstürmen für unterschiedliche Normbestockungen bei einem einheitlichen BHD von 55 cm



Erläuterungen: Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt. Die Vulnerabilitätsstufen sind durch ihre Obergrenze definiert.

Durch diese Modellierung liegen potenzielle Vulnerabilitäten aller Baumarten für forstübliche Zielstärken innerhalb eines Intervalls von 20 cm bis 75 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) mit einer Schrittweite von 5 cm vor. Die drei Risikogebietsklassen (1: geringe, 2: mittlere und 3: hohe Vulnerabilität) wurden einheitlich für alle Baumarten durch eine Flächendrittelung der BWI-Traktecken anhand der Vulnerabilität von Fichte mit dem BHD 45 cm als Referenz gebildet. Der Überblick zur Abhängigkeit der Vulnerabilität gegenüber Sturmschäden in Abbildung 3.45 macht deutlich, dass die Fichte sehr hohe Vulnerabilitäten aufweist, die aber unterhalb eines Zieldurchmessers von 40 cm deutlich abnehmen. Auch Douglasie ist deutlich vulnerabler als die winterkahlen Laubbaumarten Buche und Eiche, die weniger Angriffsfläche für Wind liefern. Die tiefwurzelnde Kiefer liegt im Mittelfeld.

Abbildung 3.45: Vulnerabilität nach BHD-Stufen und Risikogebietsklassen für die Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche



Ökonomische Bewertung anhand von Erwartungswertdifferenzen

Ziel der ökonomischen Bewertung ist es, auf Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen die wirtschaftlichen Schäden eines extremen Wintersturmes abzuschätzen und forstökonomische Handlungsalternativen aufzuzeigen. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Eintrittswahrscheinlichkeiten solcher extremer Winterstürme in ihrer Häufigkeit und in ihrer regionalen Verteilung unbekannt sind.

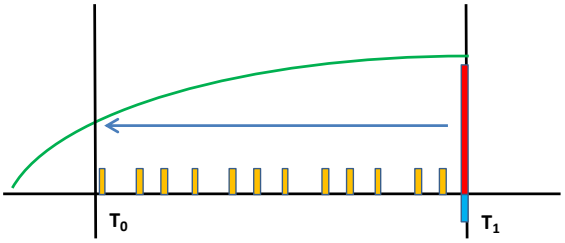
Um die baumarten- und zielstärkenspezifischen Erwartungswertdifferenzen bei prognostizierten Vulnerabilitäten für drei Risikogebietsklassen zu berechnen, wurden für standardisierte Bestände die jeweiligen naturalen Entwicklungen von ausschließlich unbeschädigten Beständen (ohne Sturmschäden) in einem Referenzszenario sowie von unbeschädigten Beständen und beschädigten Beständen (in Summe) in einem Extremwetterszenario modelliert. Ausgehend vom aktuellen BHD der betrachteten Bestände (zum Zeitpunkt T_0, dem Eintritt des Sturmschadensereignisses) wurde als einheitlicher Bewertungszeitraum im Referenzszenario und im Extremwetterszenario der Zeitraum bis zum Erreichen des Ziel-BHDs der Ursprungsbestände (T_1) unterstellt (vgl. Abbildung 3.46). Der potenzielle ökonomische Schaden durch ein Sturmereignis wurde aus der Differenz der auf T_0 diskontierten Nettobarwerte der Zahlungsströme zwischen Referenz- und Extremwetterszenario abgeleitet. Es werden nur solche Zahlungsströme betrachtet, die in Bezug auf das Sturmereignis variabel sind. Hierunter subsumieren sich die Holzerlöse, die Holzerntekosten, die Kosten für die Begründung des Folgebestandes sowie der kalkulatorische Liquidationswert der hiebsunreifen Bestände am Ende des Betrachtungszeitraumes.

Für die nach Risikogebietsklassen differenzierte Bewertung wurden die beschädigten Bestände und die nicht beschädigten Bestände im Extremwetterszenario mit den errechneten Vulnerabilitäten verknüpft. Dazu wurde angenommen, dass in einem Gebiet der Vulnerabilitätsstufe i alle ideellen Bestände der Baumart j in der BHD-Klasse k entsprechend der Vulnerabilität $v_{i,j,k}$ zum Zeitpunkt T_0 von dem extremen Sturmereignis betroffen werden und flächig ausfallen. Alle restlichen Bestände werden nicht vom Sturm betroffen (d. h., aus einem Wintersturm resultieren entweder vollständig, flächig ausgefallene Bestände oder vollständig, flächig unbeschädigte Bestände zum Zeitpunkt T_0). Die durch Sturmwurf flächig ausgefallenen Ursprungsbestände werden nach diesem Bewertungsansatz zum Zeitpunkt T_0 sofort durch künstlich verjüngte Folgebestände derselben Baumart und mit dem gleichen Ziel-BHD als Produktionsziel ersetzt. Im Vergleich zu den unbeschädigten Beständen wurde bei dieser kalamitätsbedingten Zwangsnutzung ein um den Faktor 3 erhöhter n. v. D.-Anteil unterstellt. Diese Folgebestände die zum Ende des Bewertungszeitraumes T_1 noch nicht hiebsreif sind (d. h., Zeitraum bis zum Erreichen des Ziel-BHDs der Ursprungsbestände), werden kalkulatorisch mit ihrem Liquidationswert (Abtriebswert) bewertet. Nach Eintritt eines Wintersturms weist das Extremwetterszenario demnach eine Betriebsklasse mit der gleichen Baumart und mit dem gleichen Ziel-BHD, jedoch mit zwei Bestandeskollektiven unterschiedlichen Alters auf. Dieser Bewertungsansatz ist in Abbildung 3.46 schematisch dargestellt und stichwortartig skizziert.

Abbildung 3.46: Schematische Darstellung des Bewertungsansatzes zur Ermittlung der baumarten- und zielstärkenspezifischen Erwartungswertdifferenzen bei prognostizierten Vulnerabilitäten

ohne Sturmschaden (= Referenzszenario)

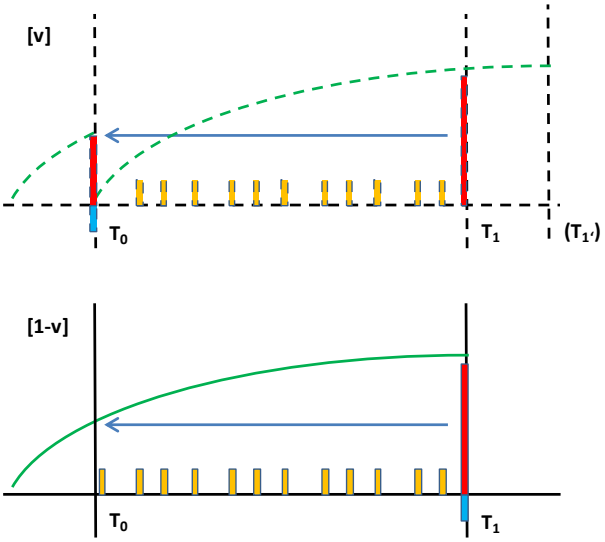
– Mit einem Bestand mit aktuellem BHD (**T_0**) wird ein Ziel-BHD in Zukunft (**T_1**) angestrebt.
– Alle zukünftigen Vornutzungen sowie die Endnutzung (Abtriebswert abzüglich Kulturkosten) werden auf heute (**T_0**) diskontiert (=Erwartungswert: Nettobarwert der zukünftigen Erträge).



mit Sturmschaden (= Extremwetterszenario)

– Gegenüber Sturmschadensereignissen haben die Ausgangsbestände (siehe Referenzszenario) baumarten-, BHD- und risikogebietsspezifische Vulnerabilitäten für einen flächigen Totalausfall (v).
– Der vom Totalausfall betroffene Ursprungsbestand wird zu **T_0** mit seinem Liquidationswert abzüglich erhöhter Kulturkosten sowie erhöhtem n.v.D-Anteil bewertet.
– Es wird angenommen, dass mit dem zu **T_0** begründeten Folgebestand der ursprüngliche Ziel-BHD angestrebt wird (kein Baumartenwechsel).
– Der Bewertungszeitraum für den Folgebestand ist identisch mit dem ursprünglichen Bewertungszeitraum im Referenzfall.
– Für den Folgebestand werden alle zukünftigen Vornutzungen sowie der Liquidations- bzw. Zerschlagungswert des hiebsunreifen Bestandes zu **T_1** auf **T_0** diskontiert (Der Ziel-BHD wird vom Folgebestand zu **T_1** nicht erreicht).

– Die von Sturmschäden nicht betroffenen Bestände haben die Gegenwahrscheinlichkeit (1-v) und erreichen regulär den Ziel-BHD analog zum Referenzfall.
– Der Erwartungswert im Extremwetterszenario setzt sich zusammen aus den Erwartungswerten der beschädigten und unbeschädigten Bestände.



Anmerkung: gelbe Säulen: holzerntekostenfreie Erlöse der Vornutzungen, rote Säulen: holzerntekostenfreie Erlöse der regulären Endnutzung bzw. der Liquidation nicht hiebsreifer Bestände, blaue Säulen: Kosten der Walderneuerung, grüne Linie: schematische Holzvorratsentwicklung, blauer Pfeil: Diskontierung auf T_0.

Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

In den nachfolgenden Tabellen sind die absoluten Erwartungswertdifferenzen sowie die relativen Erwartungswertvergleiche der beiden Szenarien für die Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche in den drei Risikogebietsklassen differenziert nach BHD-Stufen dargestellt (Tabelle 3.33 bis Tabelle 3.37). In den Tabellen ist in der Zelle links oben jeweils die Risikogebietsklasse (1: geringe, 2: mittlere und 3: hohe Vulnerabilität) angegeben. In den Spaltenköpfen sind der BHD des Grundflächenmittelstamms (d_g) und das Bestandesalter des aktuellen Bestandes zum Zeitpunkt T_0 dargestellt. Der BHD des aktuellen Bestandes ist hierbei fettgedruckt in Zentimeter (cm) angegeben. Das aktuelle Bestandesalter in Jahren steht in der Klammer. In den Zeilenköpfen findet sich der zukünftig angestrebte Ziel-BHD und das damit verbundene Ziel-Bestandesalter zum Zeitpunkt T_1 (BHD-Zieldurchmesser des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)).

Die absoluten Erwartungswertdifferenzen in Euro/ha und der relative Erwartungswertvergleich in Prozent nach Ziel-BHD-Stufen können ausgehend von den Spaltenköpfen abgelesen werden. Für Fichtenbestände mit einem aktuellen BHD von 20 cm und einem Bestandesalter von 50 Jahren in der Risikogebietsklasse 1, welche von einem Wintersturm zum Zeitpunkt T_0 im Extremwetterszenario getroffen werden, errechnet sich bei einem angestrebten Ziel-BHD von 35 cm im Bestandesalter von 90 Jahren (bzw. einer noch 40-jährigen Restproduktionszeit bis T_1) eine absolute Erwartungswertdifferenz von -4.103 Euro/ha zum Referenzszenario. Der Erwartungswert im Extremwetterszenario erreicht hiermit 81 % des Erwartungswertes des Referenzszenarios (vgl. linke Ergebnistabelle unter Tabelle 3.33). Mit diesen absoluten Erwartungswertdifferenzen und dem relativen Erwartungswertvergleich sind zugleich die absoluten Erwartungswerte des Referenz- und des Extremwetterszenarios berechenbar. Grundsätzlich ist bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen, dass die absoluten Erwartungswerte zwischen den ertragsstarken Baumarten Fichte und Douglasie und den ertragsschwachen Baumarten Buche, Eiche und Kiefer deutlich abweichen.

Bei Beständen, bei denen der aktuelle BHD und der Ziel-BHD übereinstimmen, errechnet sich die Erwartungswertdifferenz aus den erhöhten Kulturkosten und n. v. D.-Anteilen der geschädigten Bestände. Für Fichtenbestände mit einem aktuellen BHD und Ziel-BHD von jeweils 20 cm in der Risikogebietsklasse 1 ergeben sich bspw. -1.294 Euro/ha bzw. 87 %. Beim relativen Vergleich der Erwartungswerte des Extremwetterszenarios mit dem Referenzszenario finden sich in den niedrigen BHD-Stufen teilweise negative Prozentangaben. In diesen Fällen übersteigt das negative Erwartungswertergebnis des Extremwetterszenarios in seiner Höhe die positiven Erwartungswerte des Referenzszenarios um den angegeben negativen Prozentsatz.

Ein Ergebnisvergleich zwischen den Baumarten unterliegt Einschränkungen, da die abweichende Wuchsdynamik und Hiebsreife der Baumarten zu beachten ist. So weist ein Douglasienbestand der Bonität I in der BHD-Stufe 20 cm ein Bestandesalter von 25 Jahren auf und erreicht einen Ziel-BHD von 45 cm in einem Bestandesalter von 60 Jahren bzw. in einer Restproduktionszeit von 35 Jahren. Ein Buchenbestand der Bonität II mit einem aktuellen BHD von 20 cm hat hingegen ein Bestandesalter von 70 Jahren und benötigt weitere 70 Jahre um einen Ziel-BHD von ebenfalls 45 cm zu erreichen. Dieser deutliche zeitliche Unterschied bis zum Erreichen des gleichen Ziel-BHDs wirkt sich bei der Diskontierung stark auf die Höhe des Erwartungswerts aus.

Tabelle 3.33: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Fichte

Risikogebietsklasse 1			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_{gi}; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			50 J.	65 J.	75 J.	90 J.	105 J.	120 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_{gi}; T_1)	20	50 J.	-1.294 € (87 %)										
	25	65 J.	-3.448 € (79 %)	-2.226 € (88 %)									
	30	75 J.	-4.233 € (78 %)	-3.918 € (82 %)	-2.934 € (88 %)								
	35	90 J.	-4.103 € (81 %)	-5.167 € (80 %)	-4.995 € (82 %)	-3.616 € (88 %)							
	40	105 J.	-3.309 € (85 %)	-4.410 € (83 %)	-5.110 € (83 %)	-4.792 € (85 %)	-4.080 € (88 %)						
	45	120 J.	-2.492 € (89 %)	-2.922 € (89 %)	-3.405 € (88 %)	-4.193 € (87 %)	-4.364 € (88 %)	-4.348 € (88 %)					

Risikogebietsklasse 2			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_{gi}; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			50 J.	65 J.	75 J.	90 J.	105 J.	120 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_{gi}; T_1)	20	50 J.	-1.749 € (83 %)										
	25	65 J.	-4.659 € (71 %)	-2.824 € (85 %)									
	30	75 J.	-5.721 € (70 %)	-4.971 € (78 %)	-3.578 € (85 %)								
	35	90 J.	-5.544 € (74 %)	-6.555 € (74 %)	-6.093 € (78 %)	-4.311 € (86 %)							
	40	105 J.	-4.472 € (80 %)	-5.595 € (79 %)	-6.234 € (79 %)	-5.712 € (82 %)	-4.797 € (86 %)						
	45	120 J.	-3.367 € (85 %)	-3.707 € (86 %)	-4.153 € (86 %)	-4.999 € (85 %)	-5.130 € (85 %)	-5.069 € (86 %)					

Risikogebietsklasse 3			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_{gi}; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			50 J.	65 J.	75 J.	90 J.	105 J.	120 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_{gi}; T_1)	20	50 J.	-2.161 (56 %) €										
	25	65 J.	-5.759 € (65 %)	-3.294 € (82 %)									
	30	75 J.	-7.071 € (63 %)	-5.799 € (74 %)	-4.044 € (83 %)								
	35	90 J.	-6.853 € (68 %)	-7.647 € (70 %)	-6.885 € (75 %)	-4.789 € (84 %)							
	40	105 J.	-5.527 € (75 %)	-6.526 € (75 %)	-7.044 € (76 %)	-6.346 € (81 %)	-5.279 € (85 %)						
	45	120 J.	-4.162 € (82 %)	-4.325 € (84 %)	-4.693 € (84 %)	-5.553 € (83 %)	-5.646 € (84 %)	-5.548 € (85 %)					

Tabelle 3.34: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Kiefer

Risikogebietsklasse 1			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_{gi}; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			45 J.	60 J.	80 J.	95 J.	120 J.	140 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_{gi}; T_1)	20	45 J.	-848 € (-48 %)										
	25	60 J.	-1.624 € (54 %)	-1.099 € (71 %)									
	30	80 J.	-2.074 € (66 %)	-2.082 € (70 %)	-1.332 € (82 %)								
	35	95 J.	-2.021 € (72 %)	-2.281 € (73 %)	-2.005 € (78 %)	-1.472 € (85 %)							
	40	120 J.	-1.817 € (77 %)	-1.924 € (80 %)	-2.026 € (81 %)	-2.053 € (82 %)	-1.598 € (87 %)						
	45	140 J.	-1.661 € (79 %)	-1.629 € (83 %)	-1.471 € (86 %)	-1.470 € (87 %)	-1.638 € (87 %)	-1.658 € (88 %)					

Risikogebietsklasse 2			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_{gi}; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			45 J.	60 J.	80 J.	95 J.	120 J.	140 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_{gi}; T_1)	20	45 J.	-992 € (-73 %)										
	25	60 J.	-1.900 € (46 %)	-1.289 € (66 %)									
	30	80 J.	-2.427 € (60 %)	-2.443 € (65 %)	-1.563 € (79 %)								
	35	95 J.	-2.365 € (67 %)	-2.677 € (68 %)	-2.353 € (75 %)	-1.730 € (82 %)							
	40	120 J.	-2.126 € (74 %)	-2.258 € (76 %)	-2.377 € (78 %)	-2.412 € (79 %)	-1.883 € (85 %)						
	45	140 J.	-1.943 € (76 %)	-1.912 € (80 %)	-1.726 € (84 %)	-1.728 € (85 %)	-1.930 € (85 %)	-1.958 € (85 %)					

Risikogebietsklasse 3			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_{gi}; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			45 J.	60 J.	80 J.	95 J.	120 J.	140 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_{gi}; T_1)	20	45 J.	-1.187 € (-107 %)										
	25	60 J.	-2.274 € (35 %)	-1.541 € (59 %)									
	30	80 J.	-2.905 € (52 %)	-2.921 € (58 %)	-1.861 € (75 %)								
	35	95 J.	-2.831 € (61 %)	-3.199 € (62 %)	-2.802 € (70 %)	-2.062 € (79 %)							
	40	120 J.	-2.545 € (68 %)	-2.699 € (71 %)	-2.831 € (73 %)	-2.874 € (75 %)	-2.250 € (82 %)						
	45	140 J.	-2.326 € (71 %)	-2.285 € (76 %)	-2.056 € (81 %)	-2.059 € (82 %)	-2.307 € (82 %)	-2.346 € (83 %)					

Tabelle 3.35: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Douglasie

Risikogebietsklasse 1			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_g; T_0)										
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
			25 J.	35 J.	40 J.	45 J.	55 J.	60 J.	70 J.	80 J.	85 J.	95 J.	100 J.
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)	20	25 J.	-1.146 € (-38 %)										
	25	35 J.	-3.229 € (52 %)	-1.684 € (75 %)									
	30	40 J.	-4.308 € (56 %)	-3.231 € (68 %)	-2.104 € (79 %)								
	35	45 J.	-4.910 € (61 %)	-4.712 € (65 %)	-3.932 € (71 %)	-2.520 € (81 %)							
	40	55 J.	-5.552 € (68 %)	-6.689 € (65 %)	-7.028 € (64 %)	-6.203 € (69 %)	-3.112 € (84 %)						
	45	60 J.	-5.563 € (72 %)	-7.134 € (67 %)	-7.683 € (66 %)	-7.706 € (66 %)	-4.988 € (78 %)	-3.471 € (85 %)					
	50	70 J.	-5.281 € (77 %)	-7.040 € (72 %)	-8.045 € (69 %)	-8.596 € (68 %)	-7.852 € (72 %)	-6.719 € (76 %)	-3.957 € (86 %)				
	55	80 J.	-4.856 € (80 %)	-6.360 € (77 %)	-7.313 € (74 %)	-7.993 € (73 %)	-8.203 € (73 %)	-8.071 € (74 %)	-6.500 € (80 %)	-4.374 € (86 %)			
	60	85 J.	-4.636 € (82 %)	-5.956 € (79 %)	-6.787 € (77 %)	-7.403 € (76 %)	-7.762 € (76 %)	-7.956 € (75 %)	-7.362 € (78 %)	-5.403 € (84 %)	-4.605 € (87 %)		
	65	95 J.	-4.251 € (84 %)	-5.178 € (82 %)	-5.728 € (81 %)	-6.056 € (81 %)	-6.215 € (81 %)	-6.505 € (81 %)	-6.822 € (80 %)	-6.726 € (81 %)	-6.062 € (83 %)	-4.923 € (87 %)	
	70	100 J.	-4.097 € (85 %)	-4.835 € (84 %)	-5.239 € (83 %)	-5.424 € (83 %)	-5.327 € (84 %)	-5.538 € (84 %)	-5.978 € (83 %)	-6.307 € (83 %)	-6.493 € (82 %)	-5.432 € (86 %)	-5.100 € (87 %)

Risikogebietsklasse 2			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_g; T_0)										
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
			25 J.	35 J.	40 J.	45 J.	55 J.	60 J.	70 J.	80 J.	85 J.	95 J.	100 J.
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)	20	25 J.	-1.337 € (-61 %)										
	25	35 J.	-3.769 € (44 %)	-1.940 € (71 %)									
	30	40 J.	-5.028 € (49 %)	-3.723 € (63 %)	-2.398 € (76 %)								
	35	45 J.	-5.731 € (55 %)	-5.429 € (60 %)	-4.481 € (67 %)	-2.844 € (79 %)							
	40	55 J.	-6.480 € (63 %)	-7.708 € (60 %)	-8.009 € (59 %)	-6.999 € (65 %)	-3.482 € (82 %)						
	45	60 J.	-6.493 € (67 %)	-8.220 € (62 %)	-8.756 € (61 %)	-8.695 € (62 %)	-5.581 € (76 %)	-3.858 € (83 %)					
	50	70 J.	-6.163 € (73 %)	-8.112 € (68 %)	-9.168 € (65 %)	-9.699 € (64 %)	-8.785 € (68 %)	-7.468 € (73 %)	-4.377 € (84 %)				
	55	80 J.	-5.667 € (77 %)	-7.329 € (73 %)	-8.334 € (71 %)	-9.019 € (69 %)	-9.179 € (70 %)	-8.971 € (71 %)	-7.190 € (77 %)	-4.820 € (85 %)			
	60	85 J.	-5.411 € (79 %)	-6.863 € (76 %)	-7.735 € (74 %)	-8.353 € (73 %)	-8.684 € (73 %)	-8.844 € (73 %)	-8.143 € (75 %)	-5.953 € (82 %)	-5.058 € (85 %)		
	65	95 J.	-4.962 € (81 %)	-5.967 € (80 %)	-6.528 € (79 %)	-6.834 € (78 %)	-6.954 € (79 %)	-7.231 € (79 %)	-7.545 € (78 %)	-7.411 € (79 %)	-6.658 € (82 %)	-5.393 € (86 %)	
	70	100 J.	-4.782 € (82 %)	-5.571 € (81 %)	-5.971 € (81 %)	-6.120 € (81 %)	-5.960 € (82 %)	-6.156 € (82 %)	-6.613 € (81 %)	-6.950 € (81 %)	-7.132 € (81 %)	-5.951 € (84 %)	-5.576 € (86 %)

Risikogebietsklasse 3			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_g; T_0)										
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
			25 J.	35 J.	40 J.	45 J.	55 J.	60 J.	70 J.	80 J.	85 J.	95 J.	100 J.
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)	20	25 J.	-1.416 € (-70 %)										
	25	35 J.	-3.990 € (41 %)	-2.052 € (69 %)									
	30	40 J.	-5.322 € (45 %)	-3.938 € (61 %)	-2.529 € (75 %)								
	35	45 J.	-6.067 € (52 %)	-5.742 € (58 %)	-4.725 € (65 %)	-2.988 € (78 %)							
	40	55 J.	-6.859 € (61 %)	-8.153 € (58 %)	-8.446 € (57 %)	-7.354 € (63 %)	-3.646 € (82 %)						
	45	60 J.	-6.874 € (65 %)	-8.694 € (60 %)	-9.234 € (59 %)	-9.137 € (60 %)	-5.844 € (74 %)	-4.028 € (82 %)					
	50	70 J.	-6.525 € (71 %)	-8.580 € (66 %)	-9.668 € (63 %)	-10.191 € (62 %)	-9.198 € (67 %)	-7.797 € (72 %)	-4.560 € (84 %)				
	55	80 J.	-6.000 € (76 %)	-7.752 € (72 %)	-8.789 € (69 %)	-9.476 € (68 %)	-9.611 € (69 %)	-9.367 € (70 %)	-7.491 € (76 %)	-5.013 € (84 %)			
	60	85 J.	-5.728 € (77 %)	-7.259 € (74 %)	-8.157 € (72 %)	-8.777 € (71 %)	-9.093 € (71 %)	-9.234 € (71 %)	-8.484 € (74 %)	-6.191 € (82 %)	-5.252 € (85 %)		
	65	95 J.	-5.253 € (80 %)	-6.311 € (78 %)	-6.885 € (77 %)	-7.181 € (77 %)	-7.281 € (78 %)	-7.550 € (78 %)	-7.861 € (77 %)	-7.707 € (78 %)	-6.914 € (81 %)	-5.594 € (85 %)	
	70	100 J.	-5.062 € (81 %)	-5.893 € (80 %)	-6.297 € (80 %)	-6.431 € (80 %)	-6.240 € (81 %)	-6.427 € (81 %)	-6.889 € (81 %)	-7.227 € (80 %)	-7.407 € (80 %)	-6.173 € (84 %)	-5.778 € (85 %)

Tabelle 3.36: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Buche

Risikogebietsklasse 1			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_g; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			70 J.	85 J.	100 J.	115 J.	125 J.	140 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)	20	70 J.	-898 € (15 %)										
	25	85 J.	-1.228 € (63 %)	-1.227 € (66 %)									
	30	100 J.	-1.499 € (71 %)	-1.670 € (72 %)	-1.487 € (77 %)								
	35	115 J.	-1.692 € (74 %)	-1.982 € (74 %)	-1.940 € (77 %)	-1.693 € (81 %)							
	40	125 J.	-1.739 € (75 %)	-2.141 € (74 %)	-2.146 € (77 %)	-1.976 € (80 %)	-1.846 € (82 %)						
	45	140 J.	-1.731 € (77 %)	-2.215 € (75 %)	-2.368 € (77 %)	-2.253 € (80 %)	-2.189 € (81 %)	-1.996 € (84 %)					

Risikogebietsklasse 2			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_g; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			70 J.	85 J.	100 J.	115 J.	125 J.	140 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)	20	70 J.	-1.159 € (-10 %)										
	25	85 J.	-1.587 € (52 %)	-1.570 € (57 %)									
	30	100 J.	-1.936 € (62 %)	-2.136 € (64 %)	-1.890 € (70 %)								
	35	115 J.	-2.186 € (66 %)	-2.536 € (66 %)	-2.466 € (71 %)	-2.143 € (76 %)							
	40	125 J.	-2.247 € (68 %)	-2.739 € (67 %)	-2.729 € (71 %)	-2.501 € (75 %)	-2.329 € (78 %)						
	45	140 J.	-2.236 € (71 %)	-2.834 € (69 %)	-3.010 € (71 %)	-2.852 € (75 %)	-2.762 € (77 %)	-2.511 € (80 %)					

Risikogebietsklasse 3			BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_g; T_0)										
			20	25	30	35	40	45					
			70 J.	85 J.	100 J.	115 J.	125 J.	140 J.					
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_g; T_1)	20	70 J.	-1.455 € (-38 %)										
	25	85 J.	-1.991 € (40 %)	-1.937 € (46 %)									
	30	100 J.	-2.429 € (53 %)	-2.636 € (55 %)	-2.309 € (64 %)								
	35	115 J.	-2.742 € (57 %)	-3.130 € (58 %)	-3.013 € (64 %)	-2.602 € (71 %)							
	40	125 J.	-2.819 € (60 %)	-3.381 € (59 %)	-3.334 € (64 %)	-3.037 € (70 %)	-2.816 € (73 %)						
	45	140 J.	-2.806 € (63 %)	-3.498 € (61 %)	-3.678 € (64 %)	-3.463 € (69 %)	-3.339 € (72 %)	-3.026 € (76 %)					

Tabelle 3.37: Absolute Erwartungswertdifferenzen (Euro/ha) und relative Erwartungswertvergleiche (%) nach Ziel-BHD-Stufen zwischen dem Referenz- und Extremwetterszenario der Baumart Eiche

Risikogebietsklasse 1		BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_0; T_0)										
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
		65 J.	80 J.	95 J.	110 J.	125 J.	140 J.	155 J.	170 J.	185 J.	200 J.	
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_1; T_1)	20 65 J.	-376€ (*)										
	25 80 J.	-625€ (21 %)	-565€ (19 %)									
	30 95 J.	-877€ (73 %)	-978€ (74 %)	-744€ (80 %)								
	35 110 J.	-1.065€ (80 %)	-1.352€ (79 %)	-1.279€ (82 %)	-911€ (88 %)							
	40 125 J.	-1.184€ (83 %)	-1.626€ (81 %)	-1.752€ (82 %)	-1.540€ (86 %)	-1.075€ (90 %)						
	45 140 J.	-1.243€ (85 %)	-1.786€ (83 %)	-2.075€ (83 %)	-2.057€ (85 %)	-1.735€ (88 %)	-1.241€ (92 %)					
	50 155 J.	-1.251€ (87 %)	-1.822€ (84 %)	-2.198€ (83 %)	-2.321€ (85 %)	-2.159€ (87 %)	-1.759€ (90 %)	-1.392€ (93 %)				
	55 170 J.	-1.233€ (87 %)	-1.804€ (85 %)	-2.197€ (84 %)	-2.396€ (85 %)	-2.360€ (87 %)	-2.096€ (89 %)	-1.783€ (92 %)	-1.522€ (93 %)			
	60 185 J.	-1.207€ (88 %)	-1.761€ (86 %)	-2.150€ (85 %)	-2.360€ (86 %)	-2.394€ (87 %)	-2.245€ (89 %)	-2.050€ (91 %)	-1.816€ (93 %)	-1.641€ (94 %)		
	65 200 J.	-1.161€ (88 %)	-1.682€ (86 %)	-2.033€ (86 %)	-2.215€ (86 %)	-2.230€ (88 %)	-2.116€ (89 %)	-1.991€ (91 %)	-1.813€ (92 %)	-1.585€ (94 %)	-1.737€ (94 %)	

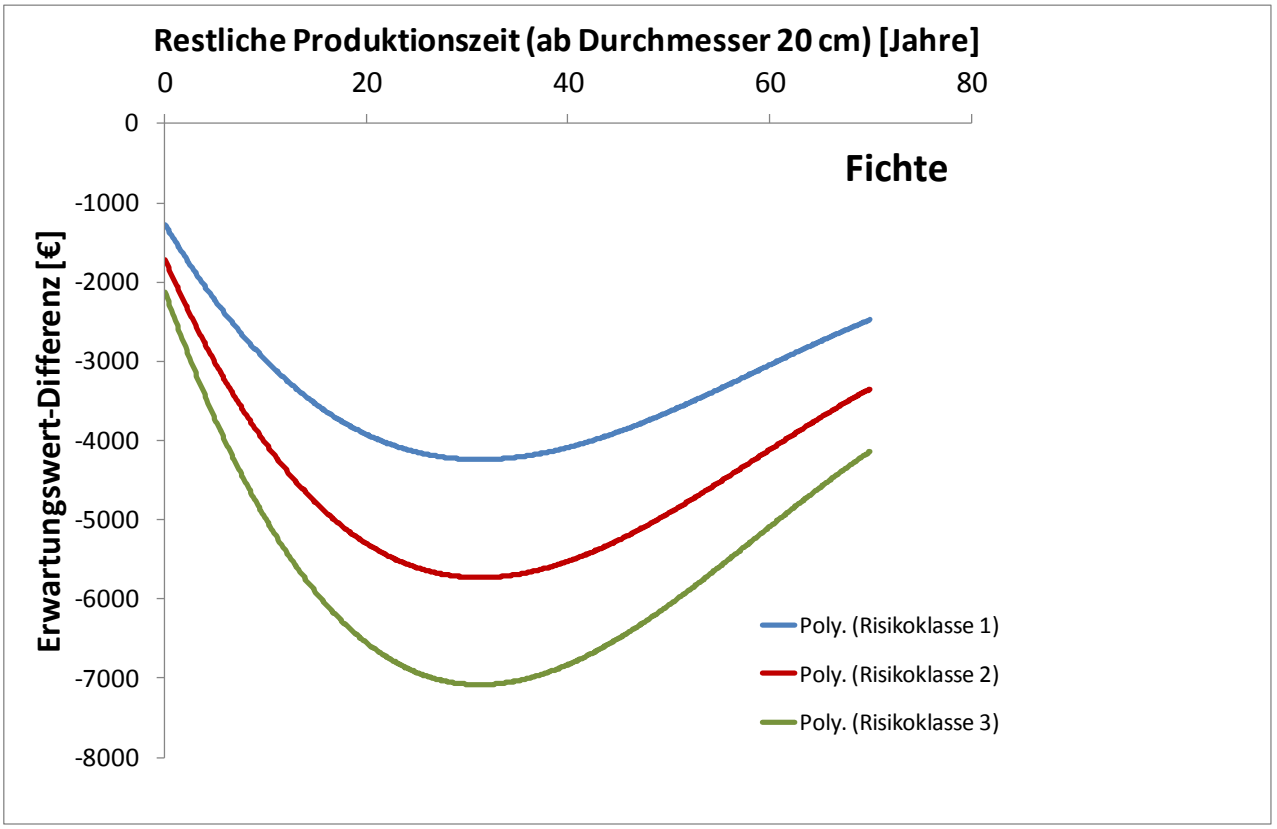
Risikogebietsklasse 2		BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_0; T_0)										
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
		65 J.	80 J.	95 J.	110 J.	125 J.	140 J.	155 J.	170 J.	185 J.	200 J.	
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_1; T_1)	20 65 J.	-489€ (*)										
	25 80 J.	-814€ (-3 %)	-726€ (-4 %)									
	30 95 J.	-1.141€ (65 %)	-1.257€ (67 %)	-947€ (75 %)								
	35 110 J.	-1.386€ (74 %)	-1.738€ (73 %)	-1.630€ (77 %)	-1.154€ (84 %)							
	40 125 J.	-1.541€ (79 %)	-2.091€ (76 %)	-2.232€ (77 %)	-1.949€ (82 %)	-1.355€ (88 %)						
	45 140 J.	-1.618€ (81 %)	-2.296€ (78 %)	-2.644€ (78 %)	-2.604€ (81 %)	-2.186€ (85 %)	-1.559€ (90 %)					
	50 155 J.	-1.629€ (83 %)	-2.343€ (79 %)	-2.800€ (79 %)	-2.938€ (80 %)	-2.721€ (84 %)	-2.210€ (88 %)	-1.744€ (91 %)				
	55 170 J.	-1.604€ (84 %)	-2.319€ (81 %)	-2.799€ (80 %)	-3.033€ (81 %)	-2.974€ (83 %)	-2.633€ (86 %)	-2.234€ (89 %)	-1.906€ (92 %)			
	60 185 J.	-1.570€ (84 %)	-2.264€ (82 %)	-2.739€ (81 %)	-2.987€ (82 %)	-3.016€ (84 %)	-2.820€ (86 %)	-2.570€ (88 %)	-2.274€ (91 %)	-2.055€ (92 %)		
	65 200 J.	-1.511€ (85 %)	-2.163€ (82 %)	-2.590€ (82 %)	-2.804€ (83 %)	-2.810€ (85 %)	-2.658€ (87 %)	-2.495€ (89 %)	-2.270€ (91 %)	-1.985€ (93 %)	-2.176€ (93 %)	

Risikogebietsklasse 3		BHD des Grundflächenmittelstamms [cm] des aktuellen Bestandes (d_0; T_0)										
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
		65 J.	80 J.	95 J.	110 J.	125 J.	140 J.	155 J.	170 J.	185 J.	200 J.	
Ziel-BHD [cm] des Grundflächenmittelstamms (d_1; T_1)	20 65 J.	-608€ (*)										
	25 80 J.	-1.011€ (-27 %)	-888€ (-27 %)									
	30 95 J.	-1.418€ (57 %)	-1.538€ (60 %)	-1.145€ (70 %)								
	35 110 J.	-1.722€ (68 %)	-2.126€ (67 %)	-1.970€ (72 %)	-1.385€ (81 %)							
	40 125 J.	-1.915€ (73 %)	-2.558€ (71 %)	-2.698€ (73 %)	-2.340€ (78 %)	-1.618€ (86 %)						
	45 140 J.	-2.011€ (76 %)	-2.808€ (73 %)	-3.196€ (73 %)	-3.125€ (77 %)	-2.611€ (82 %)	-1.856€ (88 %)					
	50 155 J.	-2.024€ (78 %)	-2.865€ (75 %)	-3.385€ (74 %)	-3.527€ (76 %)	-3.250€ (80 %)	-2.630€ (85 %)	-2.072€ (89 %)				
	55 170 J.	-1.994€ (80 %)	-2.837€ (76 %)	-3.384€ (76 %)	-3.641€ (77 %)	-3.553€ (80 %)	-3.134€ (84 %)	-2.654€ (87 %)	-2.263€ (90 %)			
	60 185 J.	-1.952€ (81 %)	-2.770€ (77 %)	-3.311€ (77 %)	-3.586€ (78 %)	-3.603€ (80 %)	-3.357€ (83 %)	-3.053€ (86 %)	-2.700€ (89 %)	-2.441€ (91 %)		
	65 200 J.	-1.878€ (81 %)	-2.646€ (78 %)	-3.132€ (78 %)	-3.366€ (79 %)	-3.357€ (82 %)	-3.163€ (84 %)	-2.964€ (87 %)	-2.695€ (89 %)	-2.358€ (91 %)	-2.585€ (91 %)	

Aufgrund des Bewertungsansatzes und der getroffenen Annahmen ist bei allen Baumarten zu beobachten, dass bei aktuell hiebsreifen bzw. zielstarken Beständen (d. h., aktueller BHD und Ziel-BHD sind gleich) im Sturmschadensfall die absoluten Erwartungswertdifferenzen mit zunehmender BHD-Stufe innerhalb einer Baumart steigen. Die BHD-abhängigen Erwartungswertdifferenzen resultieren in diesem Bewertungsfall aus den erhöhten Kosten für die Wiederaufforstung, welche aufgrund der getroffenen Annahmen über alle BHD-Stufen pro Flächeneinheit zwar konstant sind, deren relativer Flächenanteil jedoch aufgrund der Vulnerabilität mit dem BHD steigt (vgl. Abbildung 3.45). Eine weitere Einflussgröße auf die steigenden Erwartungswertdifferenzen mit zunehmender BHD-Stufe sind die erhöhten n. v. D-Anteile. Für reguläre Endnutzungen wurden 5 % n. v. D. und nach Sturmschäden in den ausgefallenen Beständen 15 % unterstellt. Die mit der BHD-Stufe steigende Erwartungswertdifferenz ergibt sich daher auch aus dem zunehmenden Vorrat bzw. den höheren n. v. D.-Mengen der sturmgeschädigten Bestände. Ebenso wirken sich die nach BHD-Stufen differenzierten Preise auf das Bewertungsergebnis aus. Bereits bei diesem einfacheren Bewertungsfall von Sturmschäden in hiebsreifen bzw. zielstarken Beständen ohne Blick in die Zukunft wird deutlich, dass auf die BHD-spezifischen Erwartungswertdifferenzen mit der Waldwachstums-, Vulnerabilitäts- und Preisfunktion drei nicht lineare Einflussfaktoren wirken und deshalb einfache Interpretationsansätze nicht möglich sind.

Ausgehend von diesen Verlusten durch Sturmschäden zum Zeitpunkt T_0, welche gerade anhand von hiebsreifen Beständen aufgezeigt wurden, wirkt bei einer zukunftsgerichteten Perspektive zusätzlich die Entwicklung der Folgebestände auf das Gesamtbewertungsergebnis. Als zukunftsgerichteter Bewertungszeitraum wurde einheitlich der Zeitraum bis zum Erreichen des Ziel-BHDs der Ursprungsbestände gewählt. Ist dieser Bewertungszeitraum ausreichend lang, können die Folgebestände durch Vornutzungserträge und den Wert des stehenden Bestandes zum Ende des Betrachtungszeitraumes (T_1) teilweise den durch Sturmschäden zu T_0 bedingten, niedrigeren Erwartungswert kompensieren. Bei kurzen Restproduktionszeiträumen haben die Folgebestände hingegen keine Erträge durch Vornutzungen und keinen liquidierbaren Wert des stehenden Bestandes. Diese grundsätzliche Wirkung der Folgebestände auf den relativen Erwartungswertvergleich ist bei allen Baumarten, ausgehend von Sturmschäden in Beständen mit niedrigem aktuellen BHD und hohen angestrebten Ziel-BHD, gut erkennbar (vgl. Tabelle 3.33 bis Tabelle 3.37). Die Folgebestände schnellwachsender und ertragsstarker Baumarten tragen zur Kompensation erlittener Sturmschäden deutlich früher bei. Durch die Diskontierung der Zahlungssalden bei der Erwartungswertberechnung verstärkt sich dieser Effekt bei ertragsstarken Baumarten, die früh viel Holzzuwachs auf der Fläche akkumulieren. Exemplarisch ist dieser Zusammenhang der Entwicklung der Erwartungswertdifferenzen nachfolgend für einen Fichtenbestand mit BHD 20 cm dargestellt (vgl. Abbildung 3.47).

Abbildung 3.47: Entwicklung der Erwartungswertdifferenzen eines Fichtenbestandes mit BHD 20 cm differenziert nach Risikogebietsklassen



Für die Darstellung des wirtschaftlichen Schadens durch extreme Winterstürme wurde in den Ergebnistabellen die absolute Erwartungswertdifferenz zwischen dem Referenz- und dem Extremwetterszenario angegeben. Die BHD-abhängigen Erwartungswertdifferenzen sind grundsätzlich bei den schnellwachsenden und ertragsstarken (Nadelholz-)Baumarten höher. Im Vergleich zu den anderen Baumarten weist deshalb auch die Douglasie die höchsten Erwartungswertdifferenzen auf (vgl. Tabelle 3.35). Diese Erwartungswertdifferenzen sowie die naturalen Vulnerabilitäten in Abbildung 3.45 sollten jedoch nicht isoliert als entscheidungsrelevante Kennzahlen für die Baumartenwahl unter Ungewissheit zu extremen Wintersturmereignissen betrachtet werden. Ebenfalls zu berücksichtigen sind die absoluten Erwartungswerte mit und ohne potenzielle Sturmschäden sowie die Umtriebszeiten der einzelnen Baumarten. In Tabelle 3.31 wurden bereits exemplarisch die Erwartungswerte der einzelnen Baumarten für typische Umtriebszeiten dargestellt (siehe Erwartungswerte des Referenzsszenarios). Ausgehend von regulären Bestandesbegründungskosten zu T_0 und einer regulären Bewirtschaftung auf Basis der getroffenen Annahmen sind in Tabelle 3.31 für die gesamte Umtriebszeit die Erwartungswerte dargestellt. So weist bspw. die Douglasie gegenüber der Buche einen um den Faktor 10,6 höheren Erwartungswert auf, welcher in drei Fünftel der Produktionszeit erreicht wird. Zum einem wird aus diesen Größenordnungen deutlich, dass sich Forstbetriebe bei fehlender Kenntnis zur Eintrittswahrscheinlichkeit und regionalen Verteilung von extremen Winterstürmen mit schnellwachsenden und ertragsstarken Baumarten bis zum Erreichen ihrer regulären Produktionsziele für eine kürze-

re Zeit festlegen, was als vorteilhaft zu betrachten ist. Zum anderen wird deutlich, dass sich die höheren naturalen Vulnerabilitäten der sturmgefährdeten, jedoch schnellwachsenden und ertragsstarken Baumarten Douglasie und Fichte relativieren, wenn der deutliche Erwartungswertunterschied zu einer ertragsschwachen, jedoch wenig sturmgefährdeten Baumart wie der Buche betrachtet wird. Trotz einer deutlich höheren Vulnerabilität liegen die absoluten Erwartungswerte der Douglasie im Extremwetterszenario deutlich über der Buche bei gleichen aktuellen BHD- und Ziel-BHD-Kombinationen. Wird berücksichtigt, dass die Buche ihren Ziel-BHD in deutlich längerer Zeit erreicht, in der Douglasienfolgebestände bereits weitere Erträge generieren könnten, verschärft sich dieser Effekt durch den längeren Diskontierungszeitraum.

Da mit dem BHD bei allen Baumarten die Vulnerabilität steigt, könnte eine mögliche Anpassungsstrategie an extreme Winterstürme darin bestehen den Ziel-BHD zu reduzieren. Aus den relativen Erwartungswertvergleichen der Tabelle 3.33 bis Tabelle 3.37 ist für hiebsreife Bestände, welche zum Zeitpunkt T_0 von einem Sturmschaden betroffen sind (d. h., aktueller BHD und Ziel-BHD sind identisch), dieser Vulnerabilitätsverlauf jedoch nicht ablesbar. Dieser Befund deutet darauf hin, dass bei einer Reduktion auf (sehr) niedrige Zielstärken die ebenfalls ergebnisrelevanten Waldwachstums- und Preisfunktionen in Kombination stärker wirken als die Vulnerabilitätsfunktion. Einen weiteren Einfluss auf dieses Ergebnis dürften die unterstellten Kosten für die Begründung der Folgebestände haben. Mit den vorratsarmen Beständen niedriger Ziel-Stärke können nur verhältnismäßig geringere holzerntekostenfreie Erlöse zur Deckung der unterstellten Wiederaufforstungskosten in der regulären Bewirtschaftung und nach Sturmschadenskalamitäten generiert werden.

3.4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Literaturrecherchen zur Wirkung von Extremwetterlagen und die vertiefenden Analysen und Modellierung zur Trockenheitswirkung auf die Verjüngung sowie zur Sturmschadenswirkung auf die Hauptbestände ergeben zusammenfassend folgende Erkenntnisse:

Literaturanalysen

- Die wichtigsten (ökonomischen) Wirkungen von Extremwetterlagen auf Wälder betreffen **Trockenheit** (und ggf. Folgeschäden durch Schadorganismen) und **Sturmeinflüsse (Herbst- und Winterorkane)**. Trockenheit wirkt sich direkt auf ältere Bestände vorwiegend zuwachsmindernd aus, Jungpflanzen (Baumartenverjüngung) können durch starke Trockenheit (Dürre) absterben.

Trockenheitswirkung auf Waldverjüngungen (Jungbestände)

- Waldverjüngungen geraten bei einem **nutzbaren Rest-Bodenwasservorrat von unter 20 %** (der nutzbaren Feldkapazität, nFK) in akuten Trockenstress, der zum Absterben der Bestände

führt. Diese kritische Trockenheitsschwelle wurde für Buchen- und Fichtenverjüngung auf gleichem Niveau nachgewiesen.

- **Kritische Trockenheiten** (< 20 % nFK, bis 50 cm Bodentiefe) für die Verjüngung aller Hauptbaumarten können in weiten Teilen Ostdeutschland und vielen Gebieten Süddeutschlands zum Ende des Jahrhunderts (2070-2099) **alle zwei bis fünf Jahre** auftreten. Dies betrifft aber nur **Verjüngungen unter Altbaumbeständen mit Kiefer und Fichte** und kann zu **stark erhöhten ökonomischen Schäden** führen. Unter Buche steigen die Trockenheitsgefahr und das ökonomische Schadenspotenzial durch Trockenschäden an der Verjüngung dagegen nur geringfügig. Dies setzt jedoch voraus, dass die Altbestände bei zunehmender Trockenheit erhalten werden können. Grund hierfür ist die deutlich geringere Interzeptions-Verdunstung von Buchen-Altbeständen im Vergleich zu Altbeständen mit Nadelbaumarten. Altbestände mit Mischungen aus Buche und Nadelbäumen (Fichte, Kiefer, Douglasie) wurden zwar nicht untersucht, die geringere Interzeptionsverdunstung der Mischbestände könnte in abgeschwächter Form auch Vorteile gegenüber Nadelbaum-Reinbeständen bieten.
- **Waldumbauten** von reinen Nadelbaumbeständen in Buchen- und ggf. anderen Laubbaumbestände sowie in Mischbestände wirken zukünftiger kritischer Trockenheit entgegen. Ein günstiger Zeitrahmen dafür scheint aber nur in den nächsten Jahrzehnten gegeben (bis zur Mitte des Jahrhunderts). Eine Verjüngung bzw. Neubegründung reiner Kiefern- und Fichtenbestände (und ggf. auch Douglasie) erscheint vor diesem Hintergrund ohne eine Abkehr von bisherigen Grundsätzen wie (Natur-) Verjüngung unter Schirm mit einheimischen Baumarten und keine Anwendung von Bewässerung fraglich.

Sturmwirkung auf ältere Bestände

- Unter einer gegebenen Lage und Windexponiertheit wird die Vulnerabilität von Waldbeständen gegenüber Sturmschäden durch **Winterorkane** entscheidend von der Baumart (**Fichte > Douglasie > Kiefer > Buche > Eiche**) und der ansteigenden Dimension der Bäume (Höhe, Durchmesser) bestimmt. Bei den sturmempfindlichen Baumarten wie der Fichte oder der Douglasie nimmt die Vulnerabilität in jüngeren Beständen mit einem Brusthöhen-Durchmesser (BDH) unter 30 cm (Fichte) oder 40 cm (Douglasie) stark ab.
- Die potenziellen **ökonomischen Einbußen durch Sturmschäden** (Erwartungswert-Differenz zwischen schadfreiem und geschädigtem Bestand) sind stark vom **schadfreien Erwartungswert (Douglasie > Fichte >> Kiefer > Buche >> Eiche)** und von der **restlichen Produktionszeit** (Zeitraum bis zum Erreichen eines angestrebten Zieldurchmessers) abhängig. Lange Produktionszeiträume erhöhen das ökonomische Schadpotenzial insbesondere bei Douglasien- und Fichtenbeständen mit hohen Erwartungswerten. Unterschiedliche Sturmintensitätsstufen wirken sich dagegen weniger aus. Grundsätzlich sind die ertragsstarken Baumarten Douglasie und Fichte unter den heutigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen den anderen Baumarten weit überlegen. Aus wirtschaftlicher Sicht können sie hierdurch im Vergleich zu den anderen Baumarten ein deutlich höheres Schadniveau ökonomisch kompensieren.

3.4.3 Anpassungsoptionen

Die dargestellten Anpassungsoptionen der Wälder und der Forstwirtschaft in Deutschland umfassen zum einen **waldbauliche Maßnahmen**, um die Gefährdungen durch Extremwetterlagen zu vermindern und die Waldbestände zukünftig anpassungsfähiger zu gestalten. Zum anderen sind auch **strategische, ökonomische Überlegungen** enthalten, wie die Forstwirtschaft negative wirtschaftliche Folgen durch Extremwetterlagen abwenden bzw. mildern kann.

3.4.3.1 Waldumbau zur Erhaltung der Verjüngungsfähigkeit

Die klaren Ergebnisse zur Vorteilswirkung von Buchenwaldbeständen auf das Bodenwasserangebot für die Verjüngung machen deutlich, dass der seit etwa drei Jahrzehnten laufende **Waldumbau von reinen Nadelwäldern in Laub- und Mischwäldern** eine Anpassungsoption darstellt. Obwohl in unserer Analyse nur die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche (als Reinbestände) enthalten waren, zeigen Ergebnisse zu gemischten Kiefern-Buchenbeständen eine ähnliche Vorteilswirkung von Mischbeständen gegenüber reinen Nadelwäldern in abgeschwächter Form (Müller 2011).

Waldumbauten von reinen Nadelwäldern in Laub- und Laub-Mischwäldern können sich aber auf Grundlage der vorgelegten Analysen, insbesondere auf trockenheitsgefährdete Gebiete in Ostdeutschland und Süd(west)-Deutschland beziehen, in denen am schnellsten die Verjüngungsfähigkeit der Wälder gefährdet sein könnte. Dies betrifft in Ostdeutschland vorwiegend den Umbau von reinen Kiefernwäldern in Rein- oder Mischbeständen mit Buche, Eiche oder Winterlinde. In Süddeutschland reine Fichte- oder Kiefernbestände in Rein- oder Mischbestände mit Buche, Eiche oder anderen Laubwaldarten. Die Gesamtsumme der hierdurch möglicherweise abgewendeten **Schäden durch Klimaextreme liegt deutschlandweit bei mehreren hundert Millionen Euro**. Darin sind nicht eingerechnet mögliche hohe Schäden durch den Verlust der zukünftigen Verjüngungsfähigkeit der Standorte. Allerdings sind aus ökonomischer Sicht auch die sehr hohen Investitionssummen für den Waldumbau zu berücksichtigen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass unter den aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen die Ertragssituation der Forstwirtschaft und die holzbasierte Wertschöpfung und Beschäftigung überwiegend auf Nadelholz basiert. Geringerer Handlungsdruck liegt im nordwestdeutschen Tiefland, in den höheren Lagen der Mittelgebirge und im Voralpenland vor.

Einschränkung: Die Bewertung der kritischen Trockenheit für die Verjüngung erfolgte anhand von Experimenten an Buchen- und Fichtenjungpflanzen. Die Übertragung der für beide Arten festgestellten kritischen Schwelle von 20 % des nutzbaren restlichen Bodenwasservorrats (20 % nFK, bis 50 cm Bodentiefe) muss noch für andere Baumarten geprüft und bestätigt werden. Ebenso wurde die Wirkung von kritischer Trockenheit und möglicher Folgeschäden auf die Altbestände nicht untersucht. Hier ebenfalls nicht betrachtet sind Anpassungsmöglichkeiten durch eine Reduktion der Bestandsdichten durch stärkere Pflege- und Durchforstungseingriffe. Diese Optionen wären separat zu prüfen und zu bewerten.

3.4.3.2 Verkürzung der Zieldurchmesser für Fichte und Douglasie

Die Analysen zur Sturmwirkung auf die Wälder machen eine differenzierte Betrachtung von Baumarten und deren Zieldurchmesser notwendig. Die hohe Vulnerabilität von Fichte und Douglasie gegenüber Winterstürmen spricht zunächst für den Umbau von Reinbeständen beider Baumarten in gefährdeten Gebirgslagen (westexponierte Luv-Hanglagen, exponierte Kammlagen) in weniger anfällige Laub- und Mischwälder. Allerdings betrifft dieser Waldumbau ganz andere Standorte als der o. g. Waldumbau zur Anpassung an (zukünftige) Trockenheit. Die Aufgabe von solchen standörtlich gut geeigneten Standorten für den Nadelholz-Anbau hätte erhebliche ökonomische Nachteile mit Erwartungswertunterschieden von über 10.000 € pro ha gegenüber Laubwaldanbau. Bei einer Waldfläche in Höhenlagen von über 600 m ü. NN von 1,5 Mio. ha (Thünen-Institut 2015) und einem angenommenen Anteil von einem Drittel (0,5 Mio. ha) läge der **Erwartungswertverlust deutschlandweit in einer Größenordnung von 5 Milliarden €.** Zudem sind viele sturmexponierte Kammstandorte der Mittelgebirge derzeit nicht geeignet für Buchen- und Eichenanbau.

Eine andere Option liegt in der Verkürzung der Zieldurchmesser bei der Beibehaltung von Nadelwäldern und Nadel-Mischwäldern. Bei Fichte könnte ein reduzierter Ziel-BHD in einer Größenordnung von 25 cm BHD, und bei Douglasie von 30 cm BHD liegen. Dies bedeutet eine erhebliche Reduktion der Produktionszeiträume für wüchsige Baumarten wie Fichte und Douglasie sowie eine erhebliche Verminderung der Schadenschadenvulnerabilität (s. Abbildung 3.45). Zusätzlich kann damit die hohe Nachfrage nach schwachen und mittelstarken Nadelholzsortimenten besser bedient werden.

3.4.3.3 Mischwaldbegründung

Eine wesentliche Komponente in der bisherigen Anpassungsstrategie der Forstbetriebe an den Klimawandel liegt in der Umwandlung von Reinbeständen in Mischwaldbeständen, um das Risiko von Schäden auf mehrere Baumarten mit unterschiedlichen Anpassungspotenzialen zu verteilen und dadurch zu vermindern (Knoke et al. 2005, 2008, Bolte et al. 2009). Mit den vorgelegten Analysen und Ergebnissen lassen sich diese allgemeinen Anpassungsansätze nicht direkt prüfen, aber die Übereinstimmung und Konflikte können diskutiert werden.

Die Frage der Erhaltung eines verjüngungsfreundlichen Bodenwasservorrats kann in die Mischwaldstrategie problemlos integriert werden, indem in Mischwälder eine Laubwaldkomponente (Buchen- oder Eichenanteil) berücksichtigt wird. So können ökonomisch und anpassungsstrategisch erwünschte Nadelholzanteile (Kiefer, Douglasie und Fichte) auch hier erhalten werden.

Schwieriger ist die Frage der Kombination von verminderten Zieldurchmessern bei Nadelbaumarten mit dem Mischwaldkonzept, da mögliche Laubwaldarten mit geringerer Produktivität meist deutlich längere Produktionszeiträume haben. Allerdings könnte bei einer Annahme von starker

Sturmexposition auf etwa 0,5 Mio. ha (< 5 %) Waldfläche ein segregativer Ansatz verfolgt werden und diese „Sonderstandorte“ bewusst einer entsprechenden besonderen Produktionsform zugeordnet werden, um einerseits das Sturmschadensrisiko zu vermindern und andererseits stark nachgefragtes Nadelholz zu produzieren, dessen Anteil an der Gesamtwaldfläche stark sinkt (vgl. BMEL 2014a).

Aus ökonomischer Sicht ist aber auch auf Nachteile eines Waldumbaus zu Mischwäldern hinzuweisen wie:

- hohe Kosten für die Begründung der Mischwälder, insbesondere des Laubholzanteils,
- höhere Kosten für die Mischungsregulierung sowie
- Verringerung des ökonomischen Werts der Waldbestände nach heutigen Maßstäben.

3.5 Exkurs: Hochwasser

Federführung: Marlen Hauschild (Thünen-Institut für Ländliche Räume)

3.5.1 Überblick zur Entwicklung der Häufigkeit von Hochwassern

Hochwasser, wie z.B. an der Elbe im August 2002 und Juni 2013 sowie an der Donau im August 2005 und im Juni 2013, sind immer wiederkehrende Ereignisse, die sich in Intensität und Wiederkehrwahrscheinlichkeit unterscheiden. Das Auftreten von Hochwasserereignissen ist nicht zu verhindern, da sie ein Teil des natürlichen Wasserkreislaufs sind (vgl. PATT und JÜPNER 2013). Die Landwirtschaft ist von Überflutungen durch Hochwasser in zweifacher Hinsicht betroffen.

- Erstens werden landwirtschaftliche Flächen und Infrastrukturen überflutet, wodurch direkte Schäden an den Flächen entstehen können (siehe Kapitel 3.5.6).
- Zweitens werden im Rahmen der Umsetzung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der EU (Amtsblatt der Europäischen Union, 2007) bis Dezember 2015 Hochwassermanagementpläne festgelegt, woraufhin die betroffenen Betriebe Bewirtschaftungsauflagen (wie z.B. die Umwandlung von Acker in Grünland) erfüllen werden müssen.

In der deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wird von einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen aufgrund häufigerer und intensiverer Niederschläge ausgegangen (BMU, 2008). Zudem wird speziell auf einen Anstieg der Hochwassergefahr im Winter hingewiesen (ebd.). Auch in der Hochwasserschutzfibel, die vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung herausgegeben wurde, wird davon ausgegangen, dass beispielsweise in Süddeutschland kritische Pegel zukünftig häufiger erreicht und überschritten werden können (HOCHWASSERSCHUTZFIBEL, 2013).

Im Rahmen des KLIWA-Projekts wurde die Thematik des Klimawandels und die Konsequenzen für die Wasserwirtschaft für den Bezugsraum Süddeutschland bearbeitet. Es fand eine Langzeituntersuchung zu den jährlichen und halbjährlichen Abflusshöchstwerten von 115 Pegeln in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz für den Zeitraum 1932-2010 statt. Die Analyse der Pegel ergab für den gesamten Zeitraum überwiegend steigende Hochwasserabflüsse im Gesamtjahr, speziell im Winterhalbjahr und in abgeschwächter Form auch im Sommerhalbjahr. Bezogen auf das Gesamtjahr konnte an 73 % der Pegel ein ansteigender Trend und bei 27 % der Pegel ein abnehmender Trend festgestellt werden (KLIWA-MONITORINGBERICHT, 2011). Bei der Analyse aller 115 Pegel liegt die Signifikanz der Pegel mit zunehmendem Trend im Mittel bei 30 % und bei den Pegeln mit abnehmendem Trend bei 5 % (ebd.).

Anhand einer deutschlandweiten Analyse durch PETROW et al. (2009) von 145 Pegeln und deren Abflüssen für den Zeitraum von 1951 – 2002 wurde ermittelt, dass die Hochwassergefahr in dem betrachteten Zeitraum, insbesondere wegen einer erhöhten Hochwasser-Frequenz, angestiegen ist. Allgemein sind besonders im Winter Veränderungen der Pegelabflüsse festgestellt worden,

von denen die meisten einen ansteigenden Trend aufweisen (PETROW et al., 2009). Besonders betroffen von Veränderungen im Abflussverhalten der Pegel, das nach Petrow et al. (2009) klimabedingt ist, sind West-, Süd- und Mitteldeutschland.

In der Arbeit von STURM et al. (2001), in der die Auftrittshäufigkeit und Stärke von Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 recherchiert wurde, konnte festgestellt werden, dass die im 20. Jahrhundert erkennbare Zunahme der Pegeldurchflüsse und Hochwasser schon in den vergangenen Jahrhunderten, als der Mensch noch keinen anthropogenen Treibhauseffekt verursacht hat, in ähnlicher Weise phasenweise aufgetreten ist. Die Phasen eines verstärkten Vorkommens von Hochwasserereignissen wechselten dabei immer wieder mit Phasen deutlich reduzierter Hochwasserereignisse (ebd.).

Bei der Betrachtung von verschiedenen Modellergebnissen, die die Entwicklung von Hochwassersituationen in der Zukunft darstellen, ist für viele Pegel in Deutschland eine Zunahme der Hochwasserabflüsse ermittelt worden (siehe KLIWA-Studie, GDV-Studie 2011, HUANG et al. 2014).

Die Ergebnisse aus der Wasserhaushaltsmodellierung, die im Rahmen der KLIWA-Studie zur Ermittlung möglicher Veränderungen des Abflussgeschehens in der Zukunft für den Bezugsraum Bayern und Baden-Württemberg durchgeführt wurde, ergeben bis zum Zieljahr 2050 eine Hochwasserverschärfung bedingt durch Klimaveränderungen (HENNEGRIFF et al., 2006; KATZENBERGER, 2012). In den Modellrechnungen wurden mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse durch Wasserhaushaltssimulationen mit der Klimaprojektion ECHAM4/ WETTREG 2003 berücksichtigt. Die Ergebnisse der Simulationen bilden laut KATZENBERGER (2012) eindeutige Hinweise auf eine Hochwasserverschärfung in der Zukunft ab. Für das Zukunftsszenario 2021 bis 2050 ergibt sich aus den Modellrechnungen die Tendenz zu höheren Abflüssen, die bei Pegeln mit pluvialem Regime größer ausfällt als bei Pegeln mit nivalem Abflussregime (KATZENBERGER, 2012).

Auch KÖSTNER und KUHNERT (2011) gehen davon aus, dass die Hochwassergefahr speziell für das Winterhalbjahr ansteigen wird, da sich die Abflüsse in diesem Zeitraum erhöhen und die Verdunstung im Vergleich zum Sommerhalbjahr geringer ist. Nach HENNEGRIFF et al. (2006) werden die mittleren, aber auch die extremen Hochwasser voraussichtlich deutlich zunehmen, auch wenn die Ergebnisse aus der Modellkette Globalmodell – regionale Klimamodelle – Wasserhaushaltsmodelle mit Unsicherheiten behaftet sind.

In einer vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) in Auftrag gegebenen Studie zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation durch Hochwasser in Deutschland (GDV, 2011) zeigen sich in den Ergebnissen der durchgeführten Modellläufe regional sehr unterschiedliche Entwicklungen. Laut HATTERMANN et al. (2014) ergab die Studie Abflusstrends, die räumlich uneinheitlich sind und die durch folgende Muster geprägt sind: Flusseinzugsgebiete in Bergregionen zeigen oft einen Anstieg der Hochwasserabflüsse, während die Modellergebnisse für das Tiefland bei den Nebenflüssen oft einen Rückgang der Hochwasserabflüsse

verzeichnen. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Anzahl der Hochwasser an den Westseiten der Mittelgebirge, am Fuße der Alpen und in Ostdeutschland (ebd. S.20). Obwohl insgesamt die Flussabschnitte mit einem positiven Trend für Hochwassersituationen in der Zukunft für die verwendeten Szenarienzeiträume (2011-2040 und 2041-2070) errechnet wurden, sind auch in diesen Modellrechnungen Regionen mit negativem Trend erkennbar. Die Studie ermittelte zudem eine generelle Verkürzung der Wiederkehrperioden von Hochwasser über alle verwendeten Modelle, Szenarien und untersuchten Perioden bis 2100 hinweg (GDV, 2011; HATTERMANN et al., 2014). Aus einem 50-jährlichen Hochwasser könnte in Zukunft ein 25-jährliches Hochwasser werden (GDV, 2011). Für HATTERMANN et al. (2014) wird anhand der Modellergebnisse der Studie die These bestätigt, dass der Klimawandel mehr hydrologische Extreme hervorbringen wird. Außerdem wird aber auch auf die Unsicherheiten der Modellergebnisse hingewiesen und auf die Notwendigkeit zur Verbesserung der Robustheit der Ergebnisse, wie beispielsweise durch die Verwendung weiterer Kombinationen von Klimaprojektionen mit globalen und regionalen Klimamodellen (HATTERMANN et al., 2014).

HUNAG et al. (2014) führten in einer Studie der Flusseinzugsgebiete Donau, Elbe, Ems, Rhein und Weser 16 Szenarien-Rechnungen mit regionalen Klimamodellen für die Zeiträume 2021-2060 und 2061-2100 durch. Die Ergebnisse zeigen eine moderate Wahrscheinlichkeit für den Anstieg von Hochwassern mit einer derzeit 50-jährigen Wahrscheinlichkeit für die meisten deutschen Flüsse in beiden Szenarien-Zeiträumen. HUANG et al. (2014) weisen dabei auf die großen Unsicherheiten hin, die bei Projektionen für Hochwasser vorhanden und zudem abhängig vom verwendeten Klimaszenario sind.

GEIGER et al. (2010) weisen ebenfalls darauf hin, dass die grundlegenden Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt umstritten und bisher noch nicht genügend untersucht sind. Auch MERZ et al. (2012) legen dar, dass Projektionen zu den Änderungen des Wasserhaushalts durch den Klimawandel in höher auflösenden Raum- und Zeitskalen derzeit noch mit großen Unsicherheiten in den Modellketten verbunden sind.

Auch wenn für den überwiegenden Teil der Pegel in der modellierten Zukunft ein ansteigender Trend der Hochwasserabflüsse zu erwarten ist, wird es auch Pegel geben, die, wie bereits beobachtet, einen Rückgang der Abflüsse insbesondere im Sommerhalbjahr zu verzeichnen haben werden (vgl. GDV, 2011; WEBER et al., 2008).

Ergebnisse des DWD, der im Rahmen dieses Projekts den Proxy-Indikator Starkniederschlag für die Entwicklung der Hochwassergefahr auswertete, lassen keine Tendenzen der Zunahme von Starkniederschlagsereignissen, weder in der Vergangenheit seit 1961, noch in den Klimaprojektionen erkennen (vgl. Kapitel 2.3.8). Die Niederschlagsdaten vom DWD zeigen dabei die Summe aller Ereignisse, bei denen die Niederschlagssumme in 3 aufeinanderfolgenden Tagen aus 132 ausgewerteten Stationen vom Jahr 1962 bis 2013 > 50 mm, > 60 mm, > 70 mm, > 75 mm, > 80 mm und > 90 mm betrug. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich beim Starkniederschlag lediglich um einen Indikator handelt, der für die Entstehung von Hochwasser verantwortlich ist.

Wichtige Hochwasser-Indikatoren, wie die Schneeschmelze oder eine vorangegangene Wassersättigung des Bodens, wurden im Rahmen dieser Studie nicht auf mögliche Tendenzen für die Zukunft ausgewertet.

Zur Einordnung des Ausmaßes der landwirtschaftlichen Flächen, die von Hochwasser betroffen sein könnten, wurden erstmals deutschlandweit die potenziell betroffenen Acker-, Grünland- und Sonderkulturflächen ermittelt. Dazu wurden die georeferenzierten Daten der Hochwassergefahrenflächen, deren Ausweisung in die Zuständigkeit der Länder fällt, mit den georeferenzierten Daten der landwirtschaftlichen Flächen von Acker-, Grünland und Sonderkulturen mittels eines Geoinformationssystems verschnitten und ausgewertet.

3.5.2 Definition von Hochwasser

Das Vorkommen von Hochwasser ist ein natürliches Ereignis, das immer wieder in verschiedenen Intensitäten auftritt. Bei einem Hochwasser werden Landflächen, die für gewöhnlich nicht mit Wasser bedeckt sind, zeitlich begrenzt überflutet (vgl. MERZ 2014; HERML-RL 2007). Bedingt durch das Hochwasserereignis steigt der Wasserstand im Flussbett so weit an, dass es zu einem Ausufern des Flusses kommt, wobei die anliegenden Landflächen überflutet werden (vgl. WWF, 2007). Die Zeitspanne, die ein Hochwasserereignis in großen Flusseinzugsgebieten anhält, dauert normalerweise mehrere Tage bis Wochen (vgl. EHRET und BÁRDOSSY, 2003). Die Wiederkehrwahrscheinlichkeit eines Hochwassers ist abhängig von der Intensität des Hochwasserereignisses. Je größer und intensiver das Ausmaß der hochwasserbedingten Überflutungen ausfällt, desto seltener ist die Wiederkehrwahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis.

3.5.3 Entstehung von Hochwasser

Die wesentlichste Ursache für die Entstehung von Hochwasser im deutschen Binnenland ist ein großflächig lang andauernder oder kurzzeitiger, sehr starker Niederschlag auf wassergesättigten oder gefrorenen Böden. Am Anfang eines Niederschlagsereignisses kann das Wasser von den Pflanzen und der Bodenoberfläche noch aufgenommen werden. Dauert der Niederschlag jedoch weiter an, versickert ein Teil des Wassers zum Grundwasserleiter, während ebenfalls der Oberflächenabfluss ansteigt (PATT und JÜPNER, 2013). Ist die Speicherkapazität des Bodens erschöpft, kann der Boden kein weiteres Wasser mehr aufnehmen, und es kommt zu einem oberflächigen Abfluss des Niederschlages (PATT und JÜPNER, 2013). In Folge führt dies zu steigenden Wasserständen in den Fließgewässern (ebd.).

Sind die betroffenen Böden gefroren oder bereits durchfeuchtet, wird die Entstehung eines Hochwasserereignisses begünstigt, wohingegen bei trockenen Böden, die eine hohe Wasserspeicherkapazität besitzen, das Niederschlagswasser länger zurückgehalten werden kann (vgl. EHRET und BÁRDOSSY, 2003). Ob ein Boden die Menge des auftretenden Niederschlagswassers aufneh-

men kann, ist von der Bodenzusammensetzung, der Bodennutzung, und der vorhandenen Wassersättigung abhängig (vgl. SMUL, 2012; BAUMGARTEN 2011). Die Entstehung von Hochwasser findet bereits im Einzugsgebiet des Flusses statt (ebd.). Kann das Niederschlagswasser nicht vom Boden aufgenommen werden, kommt es zu einem Abfluss des Wassers in Bäche, Flüsse und Seen (BAUMGARTEN, 2011), wodurch deren Wasserstand ansteigt.

Auch die Jahreszeiten haben Einfluss auf die Entstehungswahrscheinlichkeit eines Hochwassers. Im Winter wird ein Hochwasser oftmals durch einen Temperaturanstieg, der zur Schneeschmelze führt, herbeigeführt. Eine besondere Gefahr für die Entstehung von Hochwasser wird durch Rekordniederschläge in Kombination mit einer Schneeschmelze hervorgerufen (vgl. PODBERGER, 2015). Im Frühjahr steigt die Gefahr für ein Hochwasser durch den Eintritt der Schneeschmelze an (HORNEMANN, 2006). Grund für ein Hochwasser im Sommer ist vorwiegend eine Vb-Wetterlage, ein außergewöhnliches Tiefdruckgebiet, das sich über dem nördlichen Mittelmeer bildet und in unseren Breitengraden starke Niederschläge zur Folge hat (BAUMGARTEN, 2011).

Da Böden und Wälder einen großen Teil des Niederschlagswassers speichern können, haben sie eine wichtige Funktion als biologische Hochwasserpuffer (PODBREGAR und LOHMANN, 2015). Allerdings können auch wasserungesättigte Böden von Oberflächenabfluss betroffen sein, da die Durchlässigkeit der Bodenoberfläche in den ersten Millimetern Einfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens hat (AUERSWALD, 2002). Sind die Böden verschlämmt, wie es z.B. nach sommerlichen Starkregen vorkommen kann, erhöht dies die Abflussdisposition (ebd.). Der Bedeckungsgrad des Bodens mit Vegetation ist dabei entscheidend. Je bedeckter die Bodenbedeckung, desto verzögerter tritt Verschlämmung auf Ackerflächen auf, was dem Abfluss entgegenwirkt (ebd.).

Die Auswertungen im Forschungsvorhaben KLIWAS, das die Auswirkungen des Klimawandels auf deutsche Wasserstraßen untersuchte, zeigen für den Beobachtungszeitraum (1951 bis 2006) eine Zunahme der Winterniederschläge zwischen 5 und 30 % in Abhängigkeit von der Gebietslage (KLIWAS, 2015). Auch für die Zukunft kann über eine Ensemble-Auswertung verschiedener Klimamodelle für die nahe Zukunft (2021-2060) und für die ferne Zukunft (2061-2100), mit einer Tendenz zur Niederschlagszunahme im Winter und einer Abnahme im Sommer (KLIWAS, 2015) gerechnet werden. In der DAS (BMU, 2008) wird für Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2050 eine Zunahme der Winterniederschläge um bis zu 40 % und in einigen Gebieten der Mittelgebirgsregionen der Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz und Teile des Nord-Ostens Bayerns sogar um bis zu 70 % erwartet.

Die Größe des Flussbettes bestimmt dabei, welche Wassermenge das Gewässer aufnehmen kann. Erst wenn dieses Volumen ausgeschöpft ist, tritt der Fluss über seine Ufer und es vergrößern sich die Querschnitte des Abflusses, wodurch die Fließgeschwindigkeit der Hochwasserwelle abnimmt (PATT und JÜPNER, 2013). Es entsteht eine Abflussverzögerung, die zu einem temporären Rückhalt des Wassers führt, woraufhin sich in den folgenden Gewässerabschnitten niedrigere Wasserstände ergeben (ebd.). Die extremen Hochwasserereignisse werden durch das Zusammenwirken von

Konstellationen, die den Oberflächenabfluss fördern, wie z.B. Starkregen auf gefrorene oder gesättigte Böden, hervorgerufen. Der Oberflächenabfluss des Niederschlagswassers hat nicht nur Einfluss auf die Entwicklung der Hochwasserwelle und damit die Entstehung von Hochwasser, sondern auch auf die Flächen selbst, was sich negativ auf das kurzfristige Ertragspotenzial, und langfristig durch Bodenerosion auf die Bodenfruchtbarkeit auswirkt (AUERSWALD, 2002). Bei der Betrachtung von Hochwasserereignissen ist zu beachten, dass es sich um wetterabhängige Naturereignisse handelt, die immer wiederkehren, aber nicht langfristig vorhersagbar sind (vgl. SMUL 2012).

3.5.4 Förderung der Hochwasserentstehung durch menschlichen Eingriff

Obwohl Hochwasser natürliche Ereignisse im jahreszeitlichen Abflussrhythmus von Flüssen sind, trägt auch der Mensch zur Entstehung von Hochwasserereignissen bei. Flussbegradigungen führen zu einer Verkürzung des Flusslaufs, was den Abfluss des Wassers beschleunigt und die Fließzeiten von Hochwasserwellen verringert (HORNEMANN, 2006). Wird ein Fluss begradigt ermöglicht dies, dass größere Schiffe den Fluss befahren können. Zudem erhöht sich die Fließgeschwindigkeit eines Flusses, wodurch die Schiffe eine Strecke in kürzerer Zeit zurückzulegen können. Der Oberrhein wurde beispielsweise um 82 Kilometer und der Unterrhein um 23 Kilometer gekürzt, mit der Folge, dass sich die Fließzeit der Hochwasserwelle im Rhein auf der Strecke zwischen Basel und Maxau um 30 Stunden verringerte (HORNEMANN, 2006). Eine weitere Konsequenz der höheren Fließgeschwindigkeit sind steilere und höhere Wasserwellen, die zu einer Verschärfung des Hochwassers führen können (ebd.).

Im heutigen Bundesgebiet wurden nach HORNEMANN (2006) durch Eindeichungen seit dem 12. Jahrhundert die natürlichen Überschwemmungsflächen, die zum Rückhalt des Hochwassers dienen, von 6172 Quadratkilometer auf heute nur noch 838 Quadratkilometer reduziert. An der Elbe wurde durch Flussbegradigungen so in den natürlichen Flusslauf eingegriffen, dass sich der Flusslauf um 55 Kilometer auf tschechischem und um 20 Kilometer auf deutschem Gebiet verkürzte (HORNEMANN, 2006). Durch das Abschneiden von Auen und Altarmen zur Begradigung von Flüssen kommt es zu einer Verringerung der ursprünglichen Auenflächen. Bei den Flüssen Rhein, Elbe, Donau und Oder stehen dabei zum Teil nur noch 10 bis 20 Prozent ihrer ursprünglichen Auen als Überschwemmungsfläche zur Verfügung (MATHAN, 2013). Dadurch konzentriert sich der Abfluss vieler Zuflüsse schneller in einem Flussbett, was die Laufzeiten der Hochwasserwellen reduziert und die Wellen steiler macht (HORNEMANN, 2006).

Die landwirtschaftliche Nutzung von Böden bestimmt auch deren Wasseraufnahmefähigkeit. Umso verdichteter der Boden ist, ausgelöst z. B. durch unsachgemäße Bearbeitung, desto weniger Wasser versickert im Boden und fließt dementsprechend oberflächlich ab (MATHAN, 2013). Bodenverdichtung durch schwere Landmaschinen steigert demzufolge die Hochwassergefahr in den gefährdeten Gebieten. Der Mensch begünstigt die Entstehung von hochwasserbedingten Überflutungen, z.B. aufgrund der Zunahme der Versiegelungsflächen durch die Bebauung mit Ver-

kehrswegen und Siedlungsflächen, oder durch das Begradigen von Flüssen, bei dem die natürlichen Ausuferungsflächen abgeschnitten werden (vgl. DISSE, 2013). Das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwassers und den möglichen Schäden, z.B. auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, wirtschaftliche Tätigkeiten oder das Kulturerbe, wird im Wasserhaushaltsgesetz (§73 Absatz 1 Satz 2) als das Hochwasserrisiko bezeichnet (vgl. WHG, 2009). Je mehr Werte sich auf überflutungsgefährdeten Flächen befinden und je kürzer die Frequenzen für das Auftreten von Hochwasserereignissen auf diesen Flächen sind, desto größer ist das Hochwasserrisiko.

3.5.5 Regionale Einordnung der Flusshochwasser in Deutschland im Jahresverlauf

Flusshochwasser können zu allen Jahreszeiten auftreten. Winterhochwasser an Flüssen treten in den westlichen Einzugsgebieten speziell am Rhein und an der Weser sowie in den östlichen Einzugsgebieten an Elbe und Oder mit langer Dauer und großflächiger Ausdehnung auf (MERZ, 2014). Auch die Donau ist an den nördlichen Zuflüssen durch Winterhochwasser geprägt (vgl. BEURTON und THIEKEN, 2009; PETROW et al., 2009), bei Elbe und Oder kommen zudem noch Sommer- und Frühjahrshochwasser hinzu, wobei die Sommerhochwasser trotz geringerer Gesamtanzahl öfter zu Extremabflüssen führen, wie z. B. das Elbehochwasser im August 2002 zeigt (MERZ, 2014). Die Flüsse der südlichen Einzugsgebiete im Alpenbereich, speziell die Donau mit ihren südlichen Nebenflüssen, erfahren eine multimodale Verteilung von Hochwasserereignissen im Jahresverlauf (vgl. BEURTON & THIEKEN, 2009; PETROW et al., 2009; MERZ, 2014). Das bedeutet, dass dort Hochwasser während der Schneeschmelze im Frühjahr sowie auch während der Sommermonate auftreten.

3.5.6 Hochwasserbedingte Schäden auf landwirtschaftlichen Flächen

Die Schäden, die auf landwirtschaftlichen Flächen im Zuge eines Hochwassers auftreten können, sind vielfältig. Durch die Überflutung kommt es zu direkten Schäden wie Ernteausfällen und zeitweiligen Qualitätsverlusten der landwirtschaftlichen Produkte sowie zu indirekten Schäden durch die Beeinträchtigung des Bodenzustands, z. B. aufgrund von Schadstoffeinträgen, wie von Arsen und Schwermetallen (vgl. JAECKEL et al., 2009), oder des Abtrags von Oberboden. Im Jahr der Überflutung kann es zu Ertragsverlusten durch direkte Schädigungen an der Pflanze kommen, die beispielsweise durch das Abfaulen von Pflanzenteilen oder das Ersticken von Pflanzen und Bodenlebewesen verursacht werden (vgl. STAHL et al., 2005). Ein eintretender Sauerstoffmangel im Wurzelbereich hemmt die weitere Pflanzenentwicklung mit der Folge von Ertragsminderungen bis hin zum Totalausfall (vgl. ROTERMUND, 2010).

Bodenerosion, also der Abtrag des Oberbodens, ist eine Folge von Überflutungen. Die Erosion führt zur Verletzung, Entwurzelung, Überdeckung oder sogar Vernichtung von Kulturpflanzen. Ob eine Fläche dabei besonders anfällig ist, wird im Wesentlichen von der Art und dem Umfang der

Bodenbedeckung bestimmt (HYDROTEC, 2001). Bewachsene Flächen sind weniger anfällig für Erosion als solche, die kürzlich abgeerntet oder bestellt wurden (FRIELINGHAUS et al., 2002). Ackerflächen sind somit besonders anfällig für Erosion in den Wintermonaten von Dezember bis März sowie direkt nach der Ernte. Da Zuckerrüben und Mais lange Zeiträume mit geringer Vegetationsbedeckung aufweisen, besitzen Flächen mit diesen Kulturen ein erhöhtes Erosionsrisiko verglichen mit Kulturen längerer Vegetationsbedeckung, wie z.B. Wintergetreide (HYDROTEC, 2001; FRIELINGHAUS et al., 2002). Durch Hochwasser können Saatgut, Düngemittel oder Pflanzenschutzmittel vom Ausbringungsort weggespült und an unerwünschter Stelle abgelagert werden. Weitere Probleme durch eine Überflutung ergeben sich durch die Auswaschung von Nährstoffen, das Einspülen unerwünschter Samen auf die Flächen, Denitrifikation und den Transport phytopathogener Pilze (HYDROTEC, 2001).

Durch die Überflutung landwirtschaftlicher Flächen kann es zum erschwerten Befahren der Äcker aufgrund tiefer Erosionsrillen kommen (BACH et al., 2014), was daraufhin nötige Maßnahmen zur Pflege beeinträchtigt, wie z.B. Frühjahrsdüngergaben, die dann erst zu einem späteren Zeitpunkt, d.h., nach dem Rückgang des Wassers, möglich sind (ROTERMUND, 2010). Es können Wochen vergehen, bis die Böden nach einem Hochwasserereignis abgetrocknet und wieder befahrbar sind (TOPAGRAR.COM, 2013 c). Die Folge davon sind Auswirkungen auf die Fruchtfolge, die durch Verzögerungen bei der Bestellung der Flächen bzw. einer Neubestellung auftreten. Durch das Ausbleiben von Pflegearbeiten kann es zur Verunkrautung und zu einer Erhöhung des Krankheitsdrucks auf die Pflanze, insbesondere durch Pilzbefall kommen (STAHL et al., 2005; TOPAGRAR, 2013 a). Bleiben die Rückstände von vernichteten Pflanzenteilen, die in den Boden eingearbeitet, beziehungsweise abtransportiert werden müssen auf der Fläche, kann auch dies zu Problemen durch das Wuchern von Unkraut führen (ebd.).

Schäden entstehen außerdem durch Abwasser, Öl und Schmutzwasser, die durch die Überflutung auf den Flächen verteilt werden und dadurch zu einer Verunreinigung des Bodens führen. Eine besondere Gefahr für landwirtschaftliche Nutzflächen ergibt sich durch eine Überflutung in Siedlungsnähe, da sich das Wasser hier mit Heizöl aus überfluteten Tanks, Giftstoffen aus Industriebetrieben oder aus vollgelaufenen Kläranlagen vermischen kann (vgl. TOPAGRAR.COM, 2013 c). Auch wenn der Bestand das Hochwasser überlebt, kann es dazu kommen, dass die Vermarktung der betroffenen Kulturen erschwert beziehungsweise ausgeschlossen werden muss (ebd.), verbunden mit Einkommenseinbußen für die betroffenen Betriebe. Ein zusätzlicher Schaden entsteht, wenn es durch die zeitweise Überflutung zu einer Wertminderung der landwirtschaftlichen Fläche kommt. Gründe hierfür können Bodenverluste, das verringerte Ertragspotenzial und Schadstoffeinträge auf der Fläche sein (STAHL et al., 2005). Durch Überflutungen können die Ertragseigenschaften einer Fläche durch Schadstoffeinträge, den Abtrag des Oberbodens oder einer Veränderung des Wasserspeichervermögens dauerhaft geschädigt werden (STAHL et al., 2005).

Verunreinigungen können zum Beispiel auf Grünland die Futteraufnahme durch das Vieh reduzieren oder sogar eine Verweigerung des Futters hervorrufen (ROTERMUND, 2010). Kommt es im Falle einer Überflutung zu mehrjährigen Ausfällen aufgrund einer Kontamination des Bodens, kann

dies existenzgefährdend für die betroffenen Landwirte werden (z.B. Spargelbetrieb mit wenig Fläche).

Die hochwasserbedingten Schäden sind, wie erwähnt, abhängig von der Flächennutzung und den Anbaukulturen der betroffenen Flächen, der Jahreszeit, der Dauer der Überflutung und den Folgeschäden durch Bodenerosion und Bodenverunreinigung. Aus den Ertrags- und Qualitätsverlusten der Ernte ergeben sich wirtschaftliche Schäden für die Betroffenen (STAHL et al., 2005). Außerdem muss unter bestimmten Umständen zusätzlich in eine Neuansaat, Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutzbehandlung investiert werden (ebd.). Das jahreszeitliche Auftreten eines Hochwasserereignisses spielt dabei eine entscheidende Rolle für die Höhe des Schadens. Tritt ein Hochwasser kurz vor der Ernte auf, muss mit einem Totalverlust gerechnet werden (HYDROTEC, 2001), im frühen Winter hingegen ist es weniger gravierend und führt eventuell lediglich zu einer Verzögerung bei der Bestellung des Ackers, die in der Wachstumsperiode wieder ausgeglichen werden kann (ebd.). Überflutungen können z. B. beim Grünland Schäden an der vorhandenen Grasnarbe durch das Ersticken und Verdrängen hochwertiger Futtergräser hinterlassen (ROTERMUND, 2010). Es ist daher notwendig, die Schäden an der Grasnarbe durch eine Nachsaat oder Durchsaat zu beseitigen, um die Qualität des Gräserbestandes wieder herzustellen und somit die Futterqualität zu erhalten (ebd.). Aus den Erfahrungen mit den Folgen des Elbehochwassers im Jahr 2002 zeigt sich, dass die vollständige Erholung überschwemmter Wiesen bis zu 5 Jahre andauern kann (TOPAGRAR, 2013 c). Fließt das Wasser ab, bleiben die Flächen verdreckt und verschlammt zurück und eine Ernte muss ausgeschlossen werden (TOPAGRAR, 2013 b). Stehen Kulturen mit unterirdischen Ertragsorganen, wie Kartoffeln oder Rüben, unter Wasser, kommt es sehr schnell zu einer Fäule des Erntegutes (ebd.). Auch Silage in Form von Silageballen wird durch eine Überflutung und das damit verbundene Eindringen von Wasser in das Futter unbrauchbar (ebd.).

Die Schadenshöhe im Falle einer Überflutung unterscheidet sich zwischen der Flächennutzung und den einzelnen Kulturarten beträchtlich. So ergeben sich im Durchschnitt Schadensbeträge von etwa 1.000 €/ha für Ackerland, 500 €/ha für Grünland und 1.800 €/ha für Gartenland (vgl. Tabelle 3.38). Beim Ackerland variieren die Schadensbeträge deutlich zwischen den Kulturen. So werden für das Hochwasser 2013 vom MLU Sachsen-Anhalt (2013) Schadensbeträge von 4.355 €/ha bei Kartoffeln und 615 €/ha für Winterrogen aufgeführt. Für die Wiederherstellung des guten Zustandes der Flächen muss laut MLU Sachsen-Anhalt (2013) für Ackerland 100 bis 250 €/ha und für Grünland 90 bis 281 €/ha ausgegeben werden.

Tabelle 3.38: Schadensbeträge durch Überflutung in €/ha der landwirtschaftlichen Flächen Ackerland, Grünland und Gartenland (zugehörig zu den Sonderkulturen)

	Schadensbetrag in €/ ha		
Quelle	Ackerland	Grünland	Gartenland
(HYDROTEC, 2001)	720 €/ha	340 €/ ha	1.840 €/ha
(BAUERNVERBAND, 2013), Durchschnittliche Schätzung der Hochwasserschäden 2013	1.200 €/ha	700 €/ha	
(MANIAK, 2001)	1.800 DM/ha --> 920 €/ha	900 DM/ha --> 460 €/ha	
(MLU SACHSEN-ANHALT, 2013)	1.252 €/ha (Durchschnitt der Kulturen), z. B.: Kartoffeln 4.355 €/ha, Winterweizen 1.224 €/ha, Silomais 697 €/ha, Zuckerrüben 1.695 €/ha, Winterroggen 615 €/ha, Körnergewinnung durch Erbsen, Bohnen und Lupinen 374 €/ha	724 €/ha (Totalverlust mit zwei Grasschnitten), 434 €/ha (1. Grasschnitt, 60%), 290 €/ha (2. Grasschnitt, 40%)	
(ROTERMUND, 2010)		348 €/ha (Kosten zusammengesetzt aus: Futterbeschaffung, Wiederherstellung der Grasnarbe, sonstige Kosten)	
Durchschnitt	1.000 €/ha	500 €/ ha	1.840 €/ ha

3.5.7 Flächenanalyse von Hochwasser betroffenen Landwirtschaftsflächen

Zur Ermittlung der landwirtschaftlichen Flächen, die im Falle eines Hochwasserereignisses von Überflutungen betroffen sind, wurde eine GIS-gestützte Flächenanalyse durchgeführt. Dazu wurden die potenziellen Überflutungsflächen aus drei Hochwasserszenarien mit den Flächendaten zur Landnutzung verschnitten.

3.5.7.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die landwirtschaftliche Flächennutzung dienen die Geodaten aus dem Basis-DLM (Basis-DLM, 2013). Die landwirtschaftlichen Flächen werden für die Berechnungen unterteilt in Grünland, Ackerland und Sonderkulturen. Die Sonderkulturen sind im Datensatz zusammengesetzt aus Hopfen, Gartenland, Baumschulen, Weingärten und Obstplantagen.

Die Überflutungsflächen werden gemäß § 74 im Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2009) definiert, woraus sich der Datensatz zu den potenziellen Hochwassergebieten ableitet. Die Daten der über-

flutungsgefährdeten Flächen werden von den Ländern zur Erstellung der Hochwassergefahrenkarten erhoben. Der Datensatz der Überflutungsflächen beschreibt das Ausmaß (Wasserstand und Durchflussmenge) der betroffenen Flächen anhand der Jährlichkeit der statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit des Hochwasserereignisses in drei Intensitätsstufen. Die drei Wiederkehrwahrscheinlichkeiten entsprechen dabei einem 20-jährlichen, 100-jährlichen und 200-jährlichen Hochwasserereignis. Das heißt, dass es sich bei den potenziellen Überflutungsgebieten um Flächen handelt, die in einem Zeitraum von 20, 100 und 200 Jahren erneut überflutet werden können. Das Differenzieren von Hochwasser nach Jährlichkeiten beruht auf Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen, die sich aus statistischen Auswertungen der Abflüsse eines Flusses der Daten der Vergangenheit ableiten, die über viele Jahrzehnte beobachtet wurden (MATHAN, 2013). Hochwasserereignisse, die sehr selten auftreten, wie ein HQ 200, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit statistisch gesehen nur etwa alle 200 Jahre vorkommt, haben höhere Durchflussmengen und Wasserstände als die Hochwasserereignisse höherer Eintrittswahrscheinlichkeiten. Die Wiederkehrwahrscheinlichkeit entspricht dabei nicht unbedingt der tatsächlichen Anzahl an Jahren, die vergehen, bevor ein solches Hochwasserereignis an der gleichen Stelle wieder eintreten kann. Es können auch deutlich weniger als 200 Jahre bis zum nächsten HQ 200 Ereignis vergehen (MATHAN 2013). Die Bereitstellung der georeferenzierten Daten zu den Überflutungsflächen erfolgte über WasserBLIcK, eine Bund-Länder-Informations- und Kommunikationsplattform (WASSERBLICK/BFG, 2015 b) oder über die zuständigen Behörden in den Ländern selbst. Die potenziellen Überflutungsflächen wurden dabei im Rahmen der Hochwasserrahmen-Richtlinie (HWRM-RL) von den Ländern ermittelt und als Datensatz aus den Hochwassergefahrenkarten bereitgestellt. Die Methodik, die zur Erhebung der Überflutungsgebiete in den Ländern verwendet wurde, ist zwar weitgehend abgestimmt, aber nicht bundesweit einheitlich, da unterschiedliche landesrechtliche Regelungen existieren (WASSERBLICK/ BFG, 2015 a). Dies ist bei einem Vergleich der Überflutungsflächen zwischen den Ländern dringend zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Projekts wurden GIS-basierte Verschneidungen der Daten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung mit den Überflutungsflächen durchgeführt. Dadurch wurden die landwirtschaftlichen Flächen, untergliedert nach Nutzungsform, ermittelt, die im Falle der drei Hochwasserszenarien (HQ 20, HQ 100 und HQ 200) durch eine Überflutung potenziell gefährdet sind.

3.5.7.2 Ergebnisse

Die verschiedenen naturräumlichen Bedingungen, wie die Größe des Landes und der sich in Flussnähe befindenden landwirtschaftlichen Flächen und deren Höhenlage sowie das Vorhandensein von Flüssen, führen zu unterschiedlichen Ausprägungen im Ausmaß der überflutungsgefährdeten Flächen zwischen den Bundesländern. So sind in Deutschland insgesamt 4,9 Mio. ha für die Ausmaße eines Hochwassers mit 200-jähriger Wiederkehrwahrscheinlichkeit als überflutungsgefährdet definiert. Diese Flächen umfassen 12 % des gesamten Ackerlandes, 25 % des Grünlands und 12 % der Sonderkulturflächen (vgl. Tabelle 3.39). Im Vergleich dazu sind bei einem Hochwasser mit 20-jähriger Wiederkehrwahrscheinlichkeit ca. 740.000 ha potenziell überflutungsgefähr-

det. Das entspricht 1 % des Ackerlandes, 4 % des Grünlands und 1 % der Sonderkulturflächen in Deutschland.

Tabelle 3.39: Flächen in den bei Hochwassern der Kategorie HQ-20, HQ-100 und HQ-200 gefährdeten Gebieten (in Tsd. ha)

Hochwasserszenario	Überflutungsfläche gesamt	landwirtschaftlich genutzte Überflutungsflächen			
		Sonderkulturen	Grünland	Ackerland	Summe
In Tsd. ha					
HQ 20	740	3	251	166	419
HQ 100	2116	8	660	523	1191
HQ 200	4929	35	1604	1520	3160
Anteil in %					
HQ 20	100	0,4	34	22	57
HQ 100	100	0,4	31	25	56
HQ 200	100	0,7	33	31	64

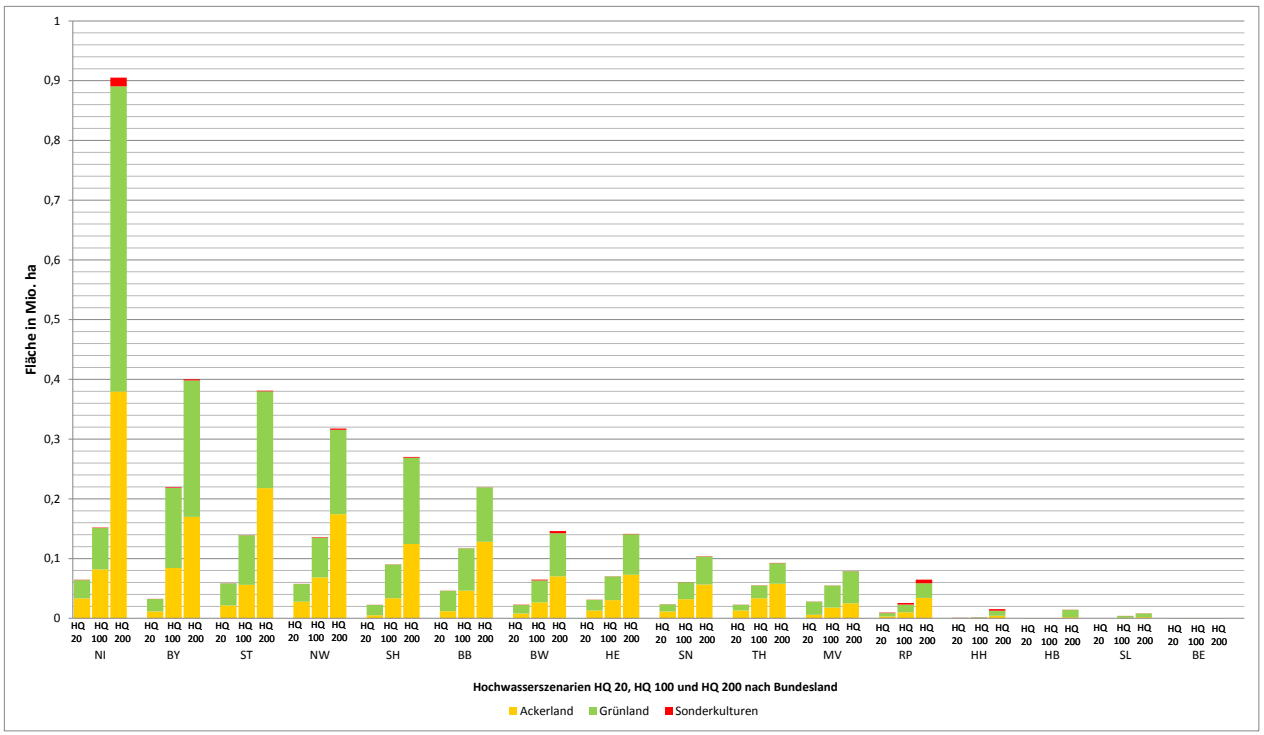
Quelle: Darstellung der Ergebnisse aus der Flächenanalyse der potenziell durch Hochwasser (HQ 20, HQ 100, HQ 200) überflutungsgefährdeten Flächen (WASSERBLICK/Bfg, 2015 b sowie für BY das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU), www.lfu.bayern.de, Stand der Daten Dez. 2014 und für BB das LUGV BB, Stand der Daten 27.01.2015) und der davon betroffenen landwirtschaftlichen Flächen (ATKIS-Datensatz Basis-DLM, 2013)

In Abbildung 3.48 werden die hochwassergefährdeten landwirtschaftlichen Flächen, untergliedert nach Nutzung und Hochwasserszenarien, auf Bundeslandebene dargestellt.

Im Mittel über alle drei Überflutungsszenarien sind 0,5 % der potenziellen Überflutungsflächen Sonderkulturen, 32 % Grünland und 26 % Ackerland (vgl. Tabelle 3.39). Die überflutungsgefährdeten Flächen sind im Mittel ca. 60 % landwirtschaftliche Flächen, die sich aus Ackerland, Grünland und Sonderkulturen zusammensetzen.

Aus den Ergebnissen der Flächenanalyse zu den potenziell überflutungsgefährdeten landwirtschaftlichen Flächen im Falle eines HQ 20 sind die Anteile nach Bundesländern folgendermaßen aufgeteilt. Die Bundesländer NI, ST, NW, BB und BY ergeben einen Anteil von 62 %, BW, HE, MV, SN, SH und TH 35 % und die Länder BE, HB, HH, RP und SL sind mit einem Anteil von 2,5 % vertreten.

Abbildung 3.48: Darstellung der landwirtschaftlichen Flächen Ackerland, Grünland und Sonderkulturen, die laut der Überflutungsflächen eines HQ 20, HQ 100 oder HQ 200 von Überflutung betroffen sind



Quelle: Eigene Darstellung aus den Ergebnissen der Analyse.

Eine Hochrechnung der Schäden für die jeweiligen Hochwasserszenarien ist mit den in dieser Studie verfügbaren Daten zur Landnutzung und zu den Überflutungsflächen nicht zielführend, da anhand dieser Daten nicht genau vorhergesagt kann, an welcher Stelle des Flusses es in welchem Ausmaß zu einem Übertreten des Ufers kommen kann. Bei der Prognose einer Schadensermittlung wäre zu bedenken, dass bei einer hochwasserbedingten Überflutung nicht der komplette Fluss über die Ufer tritt. Die Hochwasserwelle wird im Verlauf des Hochwasserereignisses abgeschwächt, nachdem das Wasser, z.B. durch Deichbruch, auf die umliegenden Flächen ausweichen konnte.

Das Ausmaß der Schäden hängt stark davon ab, ob Siedlungen und Infrastrukturen oder landwirtschaftliche Flächen und Wald überflutet werden. So waren bei der Elbeflut 2002 vergleichsweise mehr Siedlungen und Infrastrukturen betroffen als im Jahr 2013. Zur Unterstützung der vom Hochwasser 2013 betroffenen Land- und Forstwirtschaft wurden an die Bundesländer insgesamt rund 300 Mio. € aus dem etablierten Aufbaufonds ausgezahlt, davon entfielen rund 43 % auf Sachsen-Anhalt. Der Schadensausgleich in der ländlichen Infrastruktur im Außenbereich von Gemeinden betrug rund 348 Mio. € (BUNDESREGIERUNG, 2014).

3.5.8 Hochwassermanagement landwirtschaftlicher Flächen

Neben den verursachten Schäden auf Siedlungs- wie auf Landwirtschaftsflächen bildet regelmäßiges Hochwasser an den natürlichen Flussauen aber eine Grundlage für einen der „artenreichsten Lebensräume[n] Mitteleuropas.“ (GRAW, 2005). Auf die natürliche Abfolge von Überschwemmung und Austrocknung der Flussauen hat sich die betroffene Tier- und Pflanzenwelt angepasst (ebd.). Überschwemmungen können für Böden außerdem eine hervorragende Basen- und Nährstoffversorgung bedeuten, weil Nährstoffe und Sedimente immer wieder nachgeliefert werden (WALENTOWSKI, 2008). Die überfluteten Auenflächen sind „[…] ausgesprochen fruchtbar […]“ und bieten nach einem Hochwasser oft sehr gute Bedingungen für die Keimung von Auenbäumen (ebd.). Überflutungsgefährdete Flächen erstrecken sich naturbedingt in angrenzender Lage zu Flüssen. Auf diesen Flächen befinden sich neben den hochwasserverträglichen Auen allerdings auch Sachgüter, wie z.B. Siedlungen, Industrie, Kulturgut oder Flächen, die landwirtschaftlich intensiv genutzt werden und die durch Hochwasser gefährdet sind und dadurch Schaden nehmen können.

Zur Verringerung der nachteiligen Folgen von Hochwasser gibt die EU-HWRM-RL (2007/60/EG) einen einheitlichen Rahmen für den Umgang mit dem Hochwasserrisiko in Flusseinzugsgebieten vor. Die Vorgaben wurden in Deutschland mit dem Abschnitt 6 im Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2009) in nationales Recht umgesetzt. Einen Kern bildet die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten für Gebiete mit signifikantem Hochwasserrisiko. Auf der Grundlage dieser Karten sind Hochwasserrisikomanagementpläne zu entwickeln, in denen Maßnahmen, wie Deichrückverlegungen und Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen, vorgesehen sind (LAWA, 2014; HORNEMANN und RECHENBERG, 2006). Eine erste Schätzung der erforderlichen Mittel für die Umsetzung der Maßnahmen ergab ein Gesamtvolumen von rund 5,4 Mrd. € (LAWA, 2014).

Die Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes werden im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe (GAK) "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" nach den Grundsätzen des GAK-Rahmenplans für die Förderung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung des ländlichen Raums unter Berücksichtigung der Ziele der EG-Wasserrahmenrichtlinie und der EU-HWRM-RL gefördert. Über die zu fördernden Maßnahmen und den Einsatz dieser Mittel entscheiden die Länder in Durchführung des GAK-Rahmenplans in eigener Verantwortung (BUNDESREGIERUNG, 2014). Allerdings bieten Deiche und andere Hochwasserschutzanlagen keinen 100-prozentigen Schutz und das Risiko einer Überflutung bleibt bestehen, da es zum Deichbruch oder zu einer Überschreitung der Schutzanlage kommen kann. Hochwasserschutzanlagen werden für einen bestimmten theoretischen Schutzgrad erbaut; ein Hochwasser kann jedoch jederzeit diesen Wert überschreiten und es kommt zu einer Überflutung der Flächen trotz Schutzanlage (PATT und JÜPNER, 2013).

Die Landwirtschaft kann durch die Art der Bodenbearbeitung die Schäden im Falle eines Hochwassers eindämmen und somit eine Hochwasservorsorge betreiben. Das Abschwächen beziehungsweise Aufhalten der Bodenerosion ist dabei eine wichtige Maßnahme, damit weniger Einträge von Nähr- und Schadstoffen in Gewässern, wie Bäche, Flüsse und Seen, stattfinden. Außer-

dem wird durch Erosionsschutz der Bodenwasserhaushalt gefördert, was sich positiv auf die Speicherfähigkeit von Regenwasser im Boden auswirkt (vgl. HORNEMANN und RECHENBERG, 2006).

Eine konservierende Bodenbearbeitung mit Direktsaat und die Anwendung der Streifenbearbeitung trägt beispielsweise zum Schutz der bodenschützenden Mulchauflage und zum Erhalt stabiler Bodenaggregate bei (BACH et al., 2014). Die Verringerung des Zeitraums ohne eine Bodenbedeckung führt ebenfalls zu verbessertem Erosionsschutz und kann durch eine gute Fruchtfolgegestaltung, geeignete Zwischenfrüchte und Untersaaten erreicht werden (ebd.). Besonders erosionsgefährdet sind dabei die Anbauflächen von Mais und Zuckerrüben, da diese geprägt sind durch große offenliegende Flächen ohne die Bedeckung einer schützenden Vegetation.

Die Umwandlung von Ackerland in Grünland ist ebenfalls eine Schutzmaßnahme gegen Bodenerosion und Nährstoffauswaschung, da hier der Boden ganzjährig mit einer Pflanzendecke bedeckt ist, die einen Schutz vor Erosion bietet und die zudem die Wasseraufnahme erleichtert. Da Flussauen oftmals sehr ertragreich sind, ist ihre Nutzung als Ackerland für viele Betriebe von existenzieller Bedeutung (vgl. MANIAK, 2001). Deshalb besteht bei den Landwirten ein großes Interesse an der Nutzung dieser sich in der Gefahrenzone für Überflutung befindenden Flächen. Eine weitere Hochwasserschutzmaßnahme an Flüssen ist der Einsatz von Polderflächen. Diese werden im Falle eines Hochwassers gezielt geflutet, um die Hochwasserwelle abzuschwächen und so Schaden von anderen, sonst vom Hochwasser betroffenen Flächen, wie zum Beispiel Siedlungen, Infrastruktur und Industrie, abzuhalten.

An Hängen fördert das Pflügen parallel zum Hang, also quer zur Fließrichtung, den Wasserrückhalt auf diesen Flächen (BROMBACH et. al., 2013). Außerdem werden durch diese Form der Bodenbearbeitung Sedimente in der Fläche zurückgehalten, die ansonsten bei Starkniederschlägen weggespült und sich anderswo ablagern würden. Allgemein sind Bodenbearbeitungsverfahren, die den Oberboden schonen und seine Infiltrationsfähigkeit erhalten, vorteilhaft gegen Erosion (BROMBACH et. al., 2013). Je dichter und höher der Pflanzenbewuchs auf einer Fläche ist, desto besser funktioniert dort der natürliche Wasserrückhalt (BAUMGARTEN, 2011). Um den Abfluss bei Niederschlag auf landwirtschaftlichen Flächen zu reduzieren, kann bei Reihenkulturen das Mulchsaatverfahren angewendet werden. Nach SCHRÖDER und AUERSWALD (2000) können durch eine Mulchsaat, die bei Hackfrüchten über die gesamte Fruchtfolge Anwendung findet, ca. 30 % des Oberflächenabflusses gegenüber dem konventionellen Anbau verhindert werden.

Verschlämmungsschichten, die bevorzugt auf Ackerflächen mit geringer Vegetationsdecke entstehen, führen zu einer Verringerung der Wasseraufnahme des Bodens. Ist die Bodenoberfläche verschlämmt, können trockene Böden bei intensiven Niederschlägen das Wasser nicht mehr vollständig aufnehmen und es kommt zu einem Oberflächenabfluss (SCHRÖDER und AUERSWALD, 2000). Durch Mulchsaat nimmt der Fließwiderstand im Fall einer Überflutung zu, weil die Bodenoberfläche aufgrund der geringeren Verschlämmung rauer bleibt und mit der Mulchschicht einen größeren Widerstand bildet (AUERSWALD, 2002). Außerdem bleibt dem Boden durch die Verringerung der Fließgeschwindigkeit des Wassers mehr Zeit für die Infiltration des Abflusswassers auf dem

Feld (ebd.). AUERSWALD (2002) folgert, dass sich durch eine kleinparzellierte, vielfältige Flächennutzung bei durchaus gleicher Fruchtartenverteilung der Abfluss gegenüber großflächigen und homogenen Landnutzungen wesentlich reduzieren lässt. Solche Maßnahmen, die den Abfluss von Wasser auf landwirtschaftlichen Flächen verringern, tragen außerdem zur Reduktion von Bodenerosion bei (FRIELINGHAUS et al., 2002; AUERSWALD, 2002).

Ist eine landwirtschaftliche Fläche bereits durch Hochwasser geschädigt worden, kann der Zwischenfruchtanbau helfen, indem die Kultur durch ihre natürlichen Wachstumsprozesse das Wasser aus dem Boden zieht. Dadurch kommt es außerdem mit Hilfe der Pflanzenwurzeln zu einer Auflockerung des Bodens. Zwischenfrüchte haben zudem eine starke Biomassebildung und pro 10 cm Pflanzenaufwuchs können 10 mm Wasser aus dem Boden aufgenommen werden (TOPAGRAR, 2013 c). Die gewählte Zwischenfrucht sollte allerdings in die Fruchtfolge sowie zum Boden passen.

4 Beurteilung agrarpolitischer Maßnahmen zur Unterstützung von Anpassungen an Extremwetterlagen

Federführung: Dr. Frank Offermann (Thünen-Institut für Betriebswirtschaft)

Eine Systematisierung und generelle Bewertung der Gründe für staatliches Handeln und einzelner potenzieller agrarpolitscher Instrumente zum Umgang mit wetterbedingten Ertragsrisiken in der Landwirtschaft wurde bereits vom Wissenschaftlichen Beirat für Agrarpolitik beim BMEL (WBA, 2011) vorgenommen. Dieser Bericht beschränkt sich daher darauf, diese Erkenntnisse vor dem Hintergrund neuerer Literatur (z. B. OECD, 2011a; Anton et al, 2012; Cordier,2014; Bahrs, 2011), dem spezifisch zu diesem Zweck in Auftrag gegebenen EH-Vorhaben (Feil und Mußhoff, 2014; FKZ 2813HS006), aktuellen agrarpolitischen Entwicklungen in Deutschland und ausgewählten anderen Ländern sowie den Erkenntnissen zur erwarteten Entwicklung agrarrelevanter Extremwetterlagen und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung (vgl. Kapitel 3) einzuordnen und bei Bedarf neu zu bewerten.

4.1 Argumente und Instrumente für staatliches Handeln im Extremwetterrisikomanagement

Staatliches Handeln sollte sich auf die Korrektur von durch Marktversagen hervorgerufenen Problemen beschränken. Potenzielle Gründe für Marktversagen im Bereich des Extremwetterrisikomanagement sind u.a. (OECD, 2009; Keller 2010; WBA, 2011):

- Informationsdefizite der Landwirte

  Risikomanagement stellt ein komplexes Entscheidungsproblem dar. Es steht eine Vielzahl potenzieller Anpassungs- und Vorsorgeoptionen zur Verfügung, die sich in ihrer Wirkung häufig gegenseitig beeinflussen. Diesbezügliche Informationsdefizite können z. B. auftreten, wenn die Informationssuche für einen einzelnen Landwirt sehr teuer ist (z. B. hinsichtlich der Eignung neuer technischer oder agronomischer Verfahren) oder die Wirkungsweisen komplexer Risikomanagementinstrumente (wie z. B. bestimmte Versicherungstypen) schwer einzuordnen sind.

  Auch die Fehleinschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Wetterrisiken (von Keller, 2010 als ‚kognitives Versagen' bezeichnet) kann Ursache von aus gesellschaftlicher Sicht suboptimalem Risikomanagement sein.

- Asymmetrische Informationsverteilung und Transaktionskosten

  Das Entstehen von Märkten für Risiko kann durch Informationsvorteile der Versicherungsnehmer behindert werden, die zu betrügerischem Verhalten („Moralisches Wagnis") und adverser Selektion führen können. Diese Probleme lassen sich durch entsprechende Vertragsgestaltung reduzieren oder ausschalten, führen aber zu Transaktionskosten. Hohe Transaktionskosten können die Entstehung entsprechender Versicherungsmärkte verhindern.

- Systemische Risiken (Kumulrisiken)

  Treten Einzelrisiken nicht unabhängig voneinander sondern gleichzeitig bei sehr vielen Marktteilnehmern auf (z. B. großflächige Trockenheit), so funktioniert der für Versicherungen wichtige „Ausgleich im Kollektiv“ nicht mehr.

- Echte Unsicherheit

  Echte Unsicherheiten treten auf, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit und/oder der Schadensumfang nicht bekannt sind. Gründe können das Fehlen historischer Daten oder sich stark ändernde Rahmenbedingungen (wie das in diesem Bericht untersuchte Auftreten von Extremwetterereignissen von dem Hintergrund des Klimawandels) sein.

- Verzerrungen auf landwirtschaftlichen Märkten durch andere staatliche Eingriffe

  Politikbedingte Verzerrungen auf den Märkten für landwirtschaftliche Produkte (z. B. Preisstützung) können Risikomanagementinstrumente zurückdrängen oder an der Weiterentwicklung behindern. Wettbewerbsverzerrungen können auch durch die Interventionen auf Versicherungsmärkten in anderen Ländern entstehen (z. B. Subventionierung von Extremwetter- oder Ertragsversicherungen in anderen EU-Mitgliedsstaaten).

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Instrumente und Ansatzstellen zur Förderung der Anpassung und Absicherung an Extremwetterlagen:

- Informationsunterstützung der Markteilnehmer
- Förderung agronomischer/technischer Lösungen etc. (Forschung und betriebliche Implementierung)
- Förderung von Versicherungen (Steuervergünstigung, Prämie; Rückversicherung)
- Steuerliche Maßnahmen
- Staatliche Ad-hoc-Katastrophenhilfen
- Überbetriebliche präventive Maßnahmen z. B. des Hochwasserschutzes oder Wassermanagements (vgl. Kapitel 3.2.4.2)

Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein kurzer Überblick über die staatliche Förderung von Risikomanagementinstrumenten in Deutschland und ausgewählten Ländern gegeben, um anschließend eine Bewertung ausgewählter Instrumente für Deutschland vorzunehmen.

4.2 Erfahrungen mit staatlichen Maßnahmen in Deutschland und ausgewählten anderen Ländern

In Deutschland werden Versicherungen gegen Wetterrisiken wie Sturm, Extremfrost, Starkregen und Überschwemmungen sowie Hagel durch die Gewährung eines stark ermäßigten Steuersatzes gestützt. Der monetäre Wert dieser Förderung beträgt jährlich ca. 32 Mio. € mit steigender Ten-

denz auch aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Mehrgefahrenversicherungen mit höheren Beitragssätzen. Diese Stützung wird nicht dem Agrarhaushalt angelastet. Die Freistellung der Mehrgefahrenversicherung von der normalen Versicherungssteuer in Höhe von 19 % seit 2013 hat zur steigenden Verbreitung dieses Versicherungstyps beigetragen. Rund 12 % der Prämie der Vereinigten Hagelversicherung in Deutschland entfällt mittlerweile auf die Mehrgefahrenversicherung, so dass ein stark steigender Trend für diese Ernteabsicherung vorliegt.

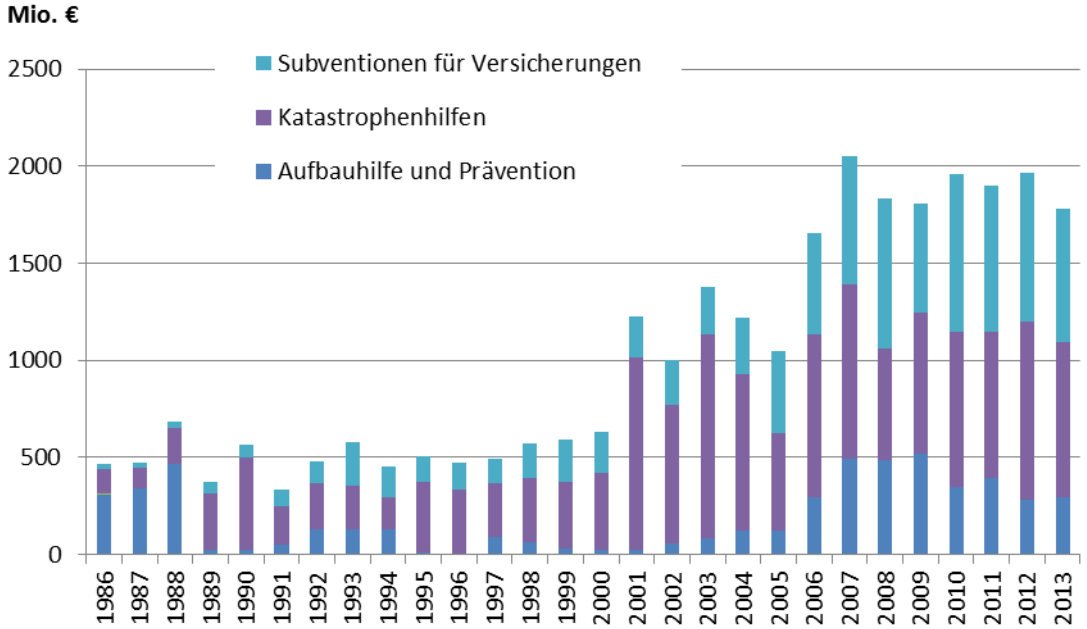
Im Zeitraum 2000-2010 wurden in Deutschland von Bund und Ländern 160 Mio. € an landwirtschaftliche Betriebe für staatliche Katastrophenhilfen ausgezahlt (WBA, 2011), d. h., im Mittel der Jahre ca. 15 Mio. €/Jahr. Die großflächigen Überschwemmungen im Jahr 2013 lösten hingegen ein umfangreiches Hilfspaket aus, in dessen Rahmen 237 Mio. € im Bereich ländliche Infrastruktur und Land- und Forstwirtschaft eingesetzt wurden, wovon 156 Mio. € für den Ausgleich von Aufwuchsschäden auf landwirtschaftlichen Nutzflächen verwendet wurden.

Die Etablierung von innerbetrieblichen Maßnahmen zur Reduzierung eines potenziellen Schadens im Falle von Extremwetterereignissen wird in vielen Bundesländern über eine investive Förderung (z. B. von Hagelnetzen, Beregnungsanlagen) unterstützt.

Für die OECD-Länder wird seit vielen Jahren die staatliche Unterstützung des Agrarsektors erfasst. Eine Auswertung der Förderung von Risikomanagementinstrumenten mit potenziellem Bezug zu Extremwetterlagen zeigt, dass die öffentlichen Ausgaben im Zeitablauf zunächst deutlich angestiegen sind[8], sich dann aber in den letzten acht Jahren bei ungefähr 1,8 Mrd. €/Jahr stabilisiert haben (vgl. Abbildung 4.1). Die Bedeutung der Förderung von Versicherungslösungen, die zu einem großen Teil den Extremwetterversicherungen zugeordnet werden können, hat dabei zugenommen und hatte in den letzten drei Jahren einen Anteil von knapp 40 % an den gesamten staatlichen Ausgaben für Risikomanagementinstrumente. Der starke Anstieg der Katastrophenhilfen in 2001ff ist v.a. auf Entschädigungszahlungen im Rahmen der BSE-Krise (insbesondere in Großbritannien) und damit nicht auf extremwetterbedingte Ereignisse zurückzuführen.

[8] Bei der Interpretation ist allerdings zu berücksichtigen ist, dass die EU innerhalb der abgebildeten Zeit mehrfach erweitert wurde, und es sich um nominale (d.h., nicht-deflationierte) Angaben handelt.

Abbildung 4.1: Entwicklung der staatlichen Ausgaben für ex-ante und ex-post Risikomanagementinstrumente in der EU-27



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis OECD Agricultural Support Estimate database September 2014.

Weltweit haben sich, häufig mit staatlicher Unterstützung, unterschiedliche Formen von Wetterversicherungssystemen etabliert. Tabelle 4.1 liefert für ausgewählte Länder (Deutschland, Frankreich, Österreich, Luxemburg, Spanien, Indien, Kanada, USA) einen Überblick. Wie anhand von Tabelle 4.1 deutlich wird, unterscheiden sich die Versicherungssysteme in Art und Anzahl der versicherbaren Risiken. Eine Absicherung gegen Schäden durch Hagelschlag ist in fast allen aufgeführten Ländern erhältlich. Für die Hagelversicherung können dann zumeist Zusatzversicherungen abgeschlossen werden, um weitere Schadensursachen in den Versicherungsschutz zu integrieren. Der Übergang von der Ein- zur Mehrgefahrenversicherung ist somit fließend. Neben den versicherbaren Risiken liefert die Übersicht auch Informationen über staatliche Prämiensubventionen, Steuervergünstigungen, die Partizipation landwirtschaftlicher Betriebe am Versicherungssystem, die gewährten staatlichen landwirtschaftlichen Nothilfen (Ad-hoc-Maßnahmen) sowie Informationen über die staatliche Beteiligung an den beschriebenen Versicherungsprodukten in Form einer Rückversicherung in den einzelnen Ländern. Die Ausgestaltung von Versicherungsverträgen kann dabei höchst unterschiedlich konzipiert sein (Details siehe Feil und Mußhoff, 2014).

Tabelle 4.1: Internationale Beispiele der Unterstützung für Wetterversicherungssysteme

Land	Versicherbare Gefahren	Prämiensubvention, Steuervergünstigungen	Staatliche Nothilfe	Partizipation der Betriebe	Rückver-sicherung
Deutsch-land	Hagel, Sturm, Frost, Auswinterung, Starkregen Hochwasser, Trockenheit z.Zt. nur sehr begrenzt	vergünstigter Steuersatz 0,03 % auf die Versicherungssumme	Im Katastrophenfall durch Länder bzw. Bund	ca. 40% der Betriebe für Hagel; > 3% der Ackerfläche für Mehrgefahrenvers.	ausschließlich privatwirtschaft-lich
Spanien	Frost, Hagel, Überschwemmung, Feuer, Regen, Trockenheit, stürmischer oder heißer Wind	Prämiensubvention 55% (Staat zahlt zwischen 40% und 45%, den Rest übernehmen die Regionalregierungen); Befreit von Versicherungssteuer	Ad-hoc-Hilfen (bei außergewöhnlichen Schadenereignissen und nur für versicherte Landwirte)	ca. 35%	überwiegend staatlich
Frank-reich	Hagel, Eis, Überschwemmung, Wasserüberschuss und Trockenheit	Prämiensubvention 35% bzw. 40% (bei Junglandwirten) der Prämie zur Mehrgefahrenversicherung für Getreide, Ölsaaten und Eiweißpflanzen Befreit von Versicherungssteuer	Kalamitätsfonds bei Naturkatastrophen (z. B. außergewöhnliche Dürre, Erdbeben, Flutwellen), die nicht von privaten Versicherungen abgedeckt werden	20% der Betriebe (35 % der AF)	ausschließlich privatwirtschaft-lich
Luxem-burg	Hagel, Frost/Auswinterung, Sturm, Überschwemmung, Wolkenbruch, Trockenheit	50% Prämiensubvention Steuer: 4% auf Versicherungsbetrag	keine Ad-hoc-Hilfen	10%	ausschließlich privatwirtschaft-lich
Italien	Naturgefahren: Erdbeben, Erdrutsche, Lawinen, Überschwemmung; Widrige Witterungsbedingungen: Hagel, Frost, Trockenheit, übermäßiger Regen, Eis	Prämiensubvention bis zu 80% bei Versicherung gegen Naturgefahren, 50% bei Versicherung gegen widrige Wetterbedingungen (im Fall des Eintretens einer Naturkatastrophe 80%); Steuer: max 2,5% auf Versicherungsbetrag	Direkte Kalamitätshilfe (nur bei nicht versicherbaren Risiken bzw. in Regionen, in denen sich die Landwirte nicht versichern können)	8% (erst 2009 eingeführt)	privatwirt-schaftlich und öffentlich (für neue Mehr-gefahrens-versicherungen)
USA	Dürre, Trockenheit, Frost/Kälte, Insektenbefall, Feuer, Sturm/Tornados, Hagel, Wildschaden, Unbefahrbarkeit des Feldes zur Ernte, Erdbeben, Pflanzenkrankheiten, Nässe, Überschwemmung, Blitzschlag, Erlös	Prämiensubvention 35 bis 100%	Bei außergewöhnlichen Schadenereignissen, für die kein Versicherungsschutz erhältlich ist	80%	staatlich möglich
Kanada	Dürre, Frost, Starkniederschlag, Überschwemmung, Schädlingsbefall, Pilzkrankheiten, Hagel, Sturm, Schnee, Einkommen	Prämiensubvention ca. 66% (von Provinz zu Provinz verschieden)	Bei außergewöhnlichen Schadenereignissen	50%	ausschließlich staatlich möglich

Quelle: Feil und Mußhoff (2014)

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass in vielen Ländern bei typischen risikobezogenen Politiken der Aspekt ‚Risikoreduzierung' mit der Gewährung von Einkommensunterstützung verwechselt wird (Tangermann, 2011).

4.3 (Neu-)Bewertung von Argumenten und Instrumenten für staatliches Handeln im Extremwetterrisikomanagement für Deutschland

4.3.1 Informationsunterstützung

Die Analysen haben gezeigt, dass trotz der in diesem Vorhaben gemachten Fortschritte in vielen Bereichen noch erhebliche Wissenslücken im Hinblick auf die Relevanz (Häufigkeit und Schadenshöhe) und zukünftige Entwicklung agrarrelevanter Extremwetterlagen (vgl. Kapitel 2) sowie über die Möglichkeiten und Kosten von betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten bestehen (vgl. Kapitel 3). Viele der bestehenden Herausforderungen zum Einsatz von ex-ante Risikomanagementinstrumenten für den Umgang mit Extremwetterereignissen sind auf fehlende oder asymmetrisch verteilte Informationen zurückzuführen. Insofern kann der Staat durch Erarbeitung und Verbreitung von Informationen dazu beitragen, Märkte für Risikomanagementinstrumente zu entwickeln und Entscheidungshilfen für die beteiligten Akteure zur Verfügung zu stellen. Der Verbesserung der Informations- und Entscheidungslage der Landwirte kommt ein hoher Stellenwert zu, da nur auf dieser Ebene effiziente individuelle, betriebs- und standortangepasste Risikomanagementstrategien zu identifizieren und zu implementieren sind.

Der WBA (2011) hat in seiner Stellungnahme nur sehr allgemein darauf hingewiesen, dass der Staat die Marktposition landwirtschaftlicher Unternehmer und Versicherer durch Informationsunterstützung und Transparenzschaffung stärken kann. Konkrete Empfehlungen zur Informationsunterstützung lassen sich auf Basis des vorliegenden Berichtes wie folgt zusammenfassen:

- Weiterentwicklung der Zuverlässigkeit von Wettervorhersagen, insbesondere regionaler extremer Wetterereignisse. Die Analysen haben gezeigt, dass viele lokale Extremwetterereignisse wie Hagel und Starkregenereignisse anhand von an Wetterstationen gemessenen Werten nur unzureichend in der Fläche abgebildet werden. Hier bietet die Nutzung neuerer, zum Teil bereits eingesetzter Technologien (z. B. Radarmessungen) vielversprechende Möglichkeiten.
- Bereitstellung regional differenzierter Wetterinformationen als Grundlage für Versicherungslösungen (z. B. indexbasierte Versicherungstypen), die das Wetterrisiko eines Betriebes möglichst gut für seinen Standort repräsentieren.
- Der aktuelle Stand der Forschung zum Einfluss der Wechselwirkungen extremer Wetterlagen auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen reicht derzeit nicht aus, um konkrete Handlungsempfehlungen zur Anpassung zu geben. Vor allem die Wirkungen von Hitzestress und Trockenheit

sowie deren Kombination bedarf weiterer Forschungsanstrengungen, um die derzeit existierenden Widersprüche bzgl. der Effekte aufzulösen.

4.3.2 Förderung agronomischer, technischer Lösungen

Die Analysen haben gezeigt, dass agronomische und technische Ansätze erhebliches Potenzial zur Reduzierung des Risikos sowie der Schäden von Extremwetterlagen haben. Teilweise wurden bzw. werden entsprechende Maßnahmen (z. B. standortangepasste Bodenbearbeitung, Hagelnetze) über die 2. Säule der GAP (oder insbesondere im Dauer- und Sonderkulturbereich auch über im Rahmen der 1. Säule unterstützte Erzeugergemeinschaften) gefördert. Eine staatliche Förderung sollte sich hierbei auf privatwirtschaftlich nicht finanzierbare Forschung (Innovationsförderung) und zeitlich begrenzte Anreize zur betrieblichen Implementierung (Einführungsförderung) beschränken.

Die Analysen in Kapitel 2 haben gezeigt, dass keine Abnahme der Niederschlagsmenge in Deutschland zu erwarten ist. Ggf. verschiebt sich die saisonale Verteilung des Niederschlags. Beispielsweise könnte, wie beobachtet, die Frühjahrtrockenheit weiterhin zunehmen. Im Falle einer Zunahme von Trockenheitsphase in der Vegetationsperiode bei gleichzeitig steigenden Temperaturen gewinnen Maßnahmen im Bereich des Wassermanagements, Be- und Entwässerung, an Bedeutung. Die Implementierung derartiger Maßnahmen erfordert in der Regel eine überbetriebliche Koordination. Hierbei ist staatliches Handeln gefordert, bestehende Rahmenbedingungen weiterzuentwickeln.

4.3.3 Steuerliche Förderung einer Risikoausgleichsrücklage

Seit längerem wird in Deutschland über die Möglichkeit diskutiert, für landwirtschaftliche Betriebe einen steuerlichen Anreiz zur Vorsorge durch eine Rücklagenbildung in Form einer sogenannten „Risikoausgleichsrücklage“ zu schaffen. Der WBA (2011) hat sich gegen die Einführung einer sektorspezifischen Risikoausgleichsrücklage ausgesprochen, diese als generelle steuerpolitische Maßnahme zur Einkommensglättung als ergänzendes Instrument jedoch nicht abgelehnt. Inzwischen liegen die Ergebnisse einer umfassenden Studie vor (Bahrs, 2011), die die Wirkungen einer Risikoausgleichsrücklage für landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland untersucht hat. Danach würden, je nach Ausgestaltung, die Kosten für den Fiskus bei 35 Mio. €/Jahr liegen. Der aus einer solchen Regelung resultierende steuerliche Anreiz, eine Rücklagenbildung zu betreiben, ist im Schnitt der Betriebe gering (178 €/Betrieb), wobei große Schwankungen zwischen den Betrieben auftreten. Im Hinblick auf die Wirkung des Instrumentes speziell mit Fokus auf Extremwetterereignisse lassen sich dabei folgende Vor- und Nachteile identifizieren:

- Die Risikoausgleichsrücklage setzt an einer gesamtbetrieblichen Erfolgsgröße an, die u. U. mit risikorelevanten Zielgrößen (wie dem Cashflow) enger korreliert ist als (kulturspezifische) ertragsorientierte Instrumente.

- Für einen erheblichen Teil der Betriebe entsteht nahezu kein erhöhter Anreiz zur Bildung einer Rücklage. Für juristische Personen fällt die Anreizwirkung aufgrund des Steuersystems gering aus. Zudem ist das Instrument nur in buchführenden Betrieben einsetzbar.
- In Betrieben mit einer hohen Einkommenskraft und damit höherer Steuerbelastung ist der Anreiz entsprechend höher; somit werden tendenziell eher Betriebe gefördert, die aus eigener Kraft in der Lage sind, Extremwetterereignisse aufzufangen.
- Insbesondere Veredlungsbetriebe profitieren. Die Einkommensschwankungen in diesen Betrieben sind aber v.a. auf Marktpreisschwankungen und weniger auf Extremwetterereignisse zurückzuführen.
- Die Risikoausgleichsrücklage soll innerbetriebliches Risikomanagement stärken. Für Ereignisse mit großem (existenzgefährdendem) Schadenspotenzial, wie sie bei einigen Extremwetterereignissen auftreten können, sind Versicherungslösungen, die die Risiken über viele Versicherungsnehmer verteilen, i. d. R. eine effizientere Lösung. Die Risikoausgleichsrücklage als Risikomanagementinstrument versagt bei Betrieben, die (noch) keine ausreichenden Rücklagen bilden konnten oder in denen wegen eines kürzlich aufgetreten großen Schadensfalls die Rücklagen gerade aufgebraucht worden sind (Gause, 2010).

Eine Rücklagenbildung als innerbetriebliches Risikomanagementinstrument ist sinnvoll. Die steuerliche Förderung einer Risikoausgleichsrücklage stellt jedoch in der Regel kein effektives Politikinstrument zur Förderung der Anpassung an Extremwetterereignisse dar.

4.3.4 Förderung von Versicherungslösungen und Ad-hoc-Hilfen

4.3.4.1 Einordnung von Versicherungslösungen und Ad-hoc-Hilfen

Versicherungen und Ad-hoc-Hilfen sind auf unterschiedliche Risikoebenen ausgerichtet, und unterscheiden sich entsprechend in ihrer Zielsetzung:

- Versicherungen dienen dazu, Risiken für Individuen zu verteilen (i. d. R. auf eine Vielzahl durch die gleiche Gefahr bedrohter Personen) und für Individuen die Schadenshöhe im Schadensfall zu reduzieren. Sie dienen nicht dazu, das Einkommen zu erhöhen - im Gegenteil: Der Erwartungswert aus der Summe von Versicherungsbeiträgen und Schadenserstattung ist aufgrund der Transaktionskosten (Betriebskosten der Versicherung, Risiko- und Gewinnmarge des Versicherungsanbieters) für die Gesamtheit der Versicherten und in der Regel auch für die einzelnen Versicherten negativ. Versicherungen sind den ex-ante Risikomanagementinstrumenten zuzuordnen. Staatliches Handeln sollte sich auf die Korrektur von durch Marktversagen hervorgerufenen Problemen beschränken (vgl. Kapitel 4.1)
- Ad-hoc-Hilfen dienen nach dem Eintreten von „katastrophalen“ Ereignissen (d. h., Ereignissen, die relativ selten eintreten, dann aber zu einem hohen (existenzbedrohenden) Schaden

bei einer Vielzahl von Betroffenen führen und daher die Gefahr bergen, das wirtschaftlich-soziale Gefüge einer Region nachhaltig zu beeinträchtigen) dazu, die Überlebensfähigkeit von Betrieben (Liquidität) zu sichern und die akute Einkommenssituation (Konsummöglichkeiten) der Betroffenen zu verbessern. Staatliche Ad-hoc-Hilfen umfassen neben Liquiditätshilfen oder verbilligten Notkrediten häufig Entschädigungen und können durch einen etablierten „EU-Solidaritätsfonds“ kofinanziert werden (Amtsblatt 2002). Auch wenn sie nur in Extremsituationen gewährt werden, so heben Ad-hoc-Hilfen (im Gegensatz zu einer Absicherung über privatwirtschaftliche Versicherungen) im Mittel der Jahre das Einkommen aller ausgleichsberechtigten Individuen an, ohne von diesen (oder von anderen Landwirten, die dem gleichen (Katastrophen-)Risiko unterliegen, aber im konkreten Fall nicht betroffen sind) ex-ante oder ex-post Beiträge zu erheben. Es ist in der Regel unbestritten, dass der Staat besondere Pflichten im Hinblick auf „katastrophale“ Ereignisse hat.

Dass Ad-hoc-Hilfen dennoch häufig im Zusammenhang mit (der Förderung von) Versicherungslösungen diskutiert werden, liegt an

- Problemen, katastrophale Ereignisse (mit entsprechenden Begründungen für staatliches Handeln) operationabel von ‚versicherbaren‘ Ereignissen abzugrenzen,
- der Gefahr, dass die Aussicht auf Ad-hoc-Hilfen die Entstehung von Versicherungslösungen verhindert,
- einer Reihe von potenziellen Vorteilen, die Versicherungslösungen gegenüber Ad-hoc-Hilfen bieten könnten.

4.3.4.2 Förderung von Versicherungslösungen mit dem Hauptziel Risikomanagement

Für die meisten Wetterrisiken lassen sich die in Versicherungsmärkten auftretenden Probleme von betrügerischem Verhalten („Moralisches Wagnis“) und adverser Selektion der Versicherungsteilnehmer bei den in Deutschland praktizierten Ertragsschadensversicherungen durch entsprechende Vertragsgestaltung beherrschen (WBA, 2011). Die deutschen Versicherer besitzen in diesen Zusammenhang langjährige Erfahrung in der Vertragsgestaltung und Schadensabwicklung, die sich auch in der Entwicklung und zunehmenden Verbreitung von Mehrgefahrenversicherungen zeigt. Die Analysen von Feil und Mußhoff (2014) belegen zudem auch quantitativ das Potenzial von in dieser Hinsicht robusteren Indexversicherungen.

Der WBA (2011) hat die Dauersubventionierung einer allgemeinen Mehrgefahrenversicherung als für finanz-, versicherungs- und volkwirtschaftlich nicht vertretbar bewertet. Seit 2013 werden in Deutschland Mehrgefahrenversicherungen (Versicherungen gegen Wetterrisiken wie Sturm, Starkfrost, Starkregen und Überschwemmungen sowie Hagel) durch die Gewährung eines stark ermäßigten Steuersatzes gestützt. Die Verbreitung von Mehrgefahrenversicherungen hat sich seither deutlich erhöht. Rund 10 % aller hagelversicherten Landwirte hatten Anfang 2014 eine

Mehrgefahrenversicherung abgeschlossen (top Agrar, 4/2104). Bei der Vereinigten Hagel stieg die gegen die drei Risiken „Hagelschlag, Sturm und Starkregen“ abgesicherte Ackerfläche im Wirtschaftsjahr 2014 auf 376.000 ha (Vereinigte Hagel, 2014). Eine über die Fortführung der Steuerermäßigung hinausgehende staatliche Unterstützung einer allgemeinen Mehrgefahrenversicherung scheint vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll.

Potenzieller staatlicher Handlungsbedarf wurde vom WBA (2011) hingegen für eine Übergangszeit für die Risiken Trockenheit und Überschwemmung gesehen, die in Deutschland oft systemischen Charakter haben. In Verbindung mit dem Vorliegen sogenannter „echter Unsicherheiten“, d. h., unbekannter Wahrscheinlichkeitsverteilungen, könnten sich für die Versicherer oder sogar Rückversicherer unkalkulierbare Gesamtrisiken ergeben, die dazu führen, dass es zu keinem Angebot an privatwirtschaftlichen Versicherungslösungen kommt oder Sicherheitszuschläge so hoch ausfallen, dass kaum Nachfrage nach den angebotenen Produkten besteht. Nach Auskunft der Vereinigten Hagel und der Münchener und Magdeburger Agrarversicherung ist es gerade in Bezug auf Trockenheitsereignisse schwierig, einen Rückversicherer zu finden. Hauptgrund hierfür sei die schwierige Bewertung von klimawandelbedingt zunehmend großflächig auftretenden (und damit hohen Auszahlungen auslösenden) Trockenheitsschäden. Die Analysen in Kapitel 3.2.3.3 zeigen, dass auch Kahlfröste, die zu Auswinterungsschäden führen, in Deutschland systemischen Charakter aufweisen können. Die Schadenssumme ist in diesem Fall aufgrund der Anpassungsmöglichkeiten jedoch vergleichsweise begrenzt, so dass dieses Argument fehlende (Rück-)Versicherungsangebote für das Risiko „Kahlfröste“ nur begrenzt erklären kann.

Die Förderung der Etablierung von Versicherungslösungen kann mit Hilfe verschiedener Instrumente erfolgen:

- Informationsunterstützung: Informationsdefizite und –asymmetrien sind wichtige Gründe für (prohibitiv) hohe Kosten von Versicherungslösungen. Eine Reihe der unter Kapitel 4.3.1 aufgeführten Optionen für staatliche geförderte Informationsverbesserungen senken diese Kosten und verbessern damit die Bedingungen für das Entstehen eines privatwirtschaftlichen Versicherungsmarktes.
- Subventionierung der Versicherungsprämien
- Reduzierung der Kosten für die Rückversicherung

In Bezug auf eine Subventionierung von Versicherungsprämien sollte hierbei beachtet werden, dass diese nicht einseitig für bestimmte Versicherungstypen erfolgt. So könnte eine einseitige staatliche Förderung für bestimmte Versicherungstypen von den Landwirten als Gütesiegel wahrgenommen werden (vgl. Mußhoff et al., 2014). Vielmehr sollte sich eine staatliche Förderung auf ein möglichst breites Spektrum an Versicherungstypen erstrecken. So könnte jeder Landwirt gemäß seiner persönlichen Risikoeinstellung und Risikobetroffenheit aus einem breiten Angebot das aus seiner Sicht optimale Instrument wählen.

Eine Förderung der Versicherungsprämien führt zu jährlich wiederkehrenden staatlichen Ausgaben. Nach einer Phase der Marktentwicklung ist damit zu rechnen, dass diese vergleichsweise stabil und damit planbar sind. Eine Finanzierung der staatlichen Beteiligung an Extremwetterversicherungen ist unter bestimmten Bedingungen über die zweite Säule der Agrarpolitik möglich. Die Haushaltsbelastung und Planbarkeit im Falle einer Beteiligung an Rückversicherungssystemen hängt von der konkreten Ausgestaltung ab (proportional/non-porportional; stop-loss, loss-excess, quota share oder aber Beteiligung an Rückversicherungskosten des Erstversicherers). Grundsätzlich wird bei der Beteiligung des Staates an Rückversicherungssystemen ein erheblicher Anteil des Risikos durch diesen übernommen. Damit besteht auch die Gefahr, dass staatliche Haushalte bei systemischen Risiken im Schadensfall in Einzeljahren stark belastet werden. Eine Beteiligung an den jährlichen Kosten einer Rückversicherung hätte in dieser Hinsicht Vorteile. Für den Landwirt ergeben sich keine Unterschiede zwischen Prämiensubvention oder Beteiligung des Staates an einer Rückversicherung (WBA, 2011).

Der WBA (2011) hat vorgeschlagen, für die systemischen Risiken Trockenheit und Überschwemmung als Markteinführungshilfe eine zeitlich degressiv gestaffelte Prämiensubvention in Erwägung zu ziehen. Eine staatliche Förderung sollte in diesem Fall nicht höher liegen als die Differenz von fairer Prämie und tatsächlicher Prämie. Diese Differenz ist je nach Produkt und versicherten Risiken unterschiedlich; erste Abschätzungen für eine allgemeine Mehrgefahrenversicherung in Deutschland ergeben Aufschläge auf die Nettorisikoprämie in der Größenordnung von 17 % (GDV, 2008) bzw. 22,5 % (Keller, 2010). Bei höheren Fördersätzen wird die Versicherungsteilnahme auch für einen risikoneutralen Landwirt finanziell attraktiv: Der Beitrag der Förderung zum Risikomanagement ist in diesem Fall null, es erfolgt eine reine Einkommenssubvention. Eine Einkommenspolitik im Rahmen von Wetterversicherungen ist jedoch wenig effizient. Die nach EU-Recht mögliche Förderung von bis zu 65 % ist vor diesem Hintergrund als zu hoch einzustufen. Entsprechend hohe Prämiensubventionen in anderen Ländern sollten im Rahmen europäischer Verhandlungen reduziert werden.

Ob es durch höhere Subventionen für Versicherungsprämien in anderen Ländern zu Wettbewerbsnachteilen für die deutsche Landwirtschaft kommt, lässt sich jedoch nicht pauschal ableiten. Tangermann (2011) weist darauf hin, dass existierende quantitative Studien für rein risikoorientierte Politikinstrumente zwar nur geringe Verzerrungen festgestellt haben, jedoch bei Berücksichtigung des häufig (implizit) mit diesen Politiken verbundenen Einkommenstransfers erheblich größere Verzerrungen zu erwarten sind. Im Vergleich zur Höhe und den Unterschieden in den Direktzahlungen zwischen den EU-Mitgliedsstaaten sind die Unterschiede in den Subventionen für Versicherungsprämien derzeit vergleichsweise gering (EU: < 5 €/ha LF; Spanien ca. 15 €/ha LF). Die Auswirkungen auf die Wettbewerbsposition der deutschen Landwirtschaft hängen u. a. davon ab, ob die staatliche Förderung die Anbaustruktur in den jeweiligen Ländern beeinflusst (z. B. weil die Förderung risikoreichere Kulturen vorzüglicher macht, oder weil sich die Subventionsraten zwischen den Produkten unterscheiden), und dadurch Produkte, die in einer Wettbewerbssituation zu in Deutschland üblichen Anbauprodukten stehen, gefördert oder evtl. sogar benachteiligt werden. Anhand der Marktübersicht (Feil und Mußhoff, 2014) lässt sich fest-

stellen, dass die in anderen EU-Mitgliedsländern geförderten Versicherungen in der Regel eine Reihe verschiedener Acker- und Sonderkulturen umfassen und Subventionsraten keine produktspezifischen Unterschiede aufweisen. Die stärkere Verbreitung der Förderung von Wetterversicherungen in den südlichen EU-Mitgliedsstaaten lässt zumindest vermuten, dass teilweise Produkte gefördert werden, die nicht in einer direkten Konkurrenzbeziehung zu in Deutschland üblichen Anbauprodukten stehen. Eine quantitative Abschätzung liegt jedoch nicht vor. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Nach den Programmplanungen der Förderperiode 2014-2020 setzen 14 Mitgliedsstaaten Maßnahmen des Risikomanagements um (EU-Kommission, 2015). Dafür sind insgesamt rund 2,7 Mrd. € in der 2. Säule (gemäß §§ 36-39 VO 1305/2013, Amtsblatt 2013c) vorgesehen, wovon rund 80 % auf Beihilfen für Versicherungsprämien entfallen, etwa 15 % für Fonds auf Gegenseitigkeit und der Rest auf Maßnahmen zur Einkommensstabilisierung. Von der Möglichkeit, Risikomanagement zu unterstützen, machen insbesondere Italien und Frankreich Gebrauch, auf die rund 80 % der Gesamtausgaben entfallen.

4.3.5 Ad-hoc Hilfen vs. Förderung von Versicherungslösungen für katastrophale Ereignisse

Das Instrument staatlicher Ad-hoc-Hilfen wird häufig kritisch gesehen. Diese Kritikpunkte und potenzielle Vor- und Nachteile von Versicherungslösungen werden im folgenden Abschnitt kurz wiedergegeben und vor dem Hintergrund der Projektergebnisse, der Erfahrungen mit Ad-hoc-Hilfen in Deutschland sowie neuerer Literatur kurz eingeordnet:

- Die in Deutschland gemachten Erfahrungen mit Ad-Hoc-Hilfen für die Landwirtschaft nach Wetterextremereignissen zeigen, dass dieses Instrument im Katastrophenfall zu hohen Mittelausgaben führen kann, in der Vergangenheit im Mittel der Jahre jedoch vergleichsweise geringe staatliche Mittel beansprucht hat (vgl. Kapitel 4.2).
- Herausforderungen für einen angemessen Einsatz von Ad-hoc-Hilfen können sich im politischen Umfeld eines ‚katastrophalen' Ereignisses ergeben. Öffentlicher Druck und der (gefühlte) Zwang zum Handeln können zu Aktionismus und populären Entscheidungen führen, die zu nicht-optimalen Festsetzungen von Ausgleichsberechtigungen und Schadenserstattungen führen. Dieses Risiko ist auch in Deutschland weder für die Vergangenheit noch für die Zukunft auszuschließen, allerdings setzen EU und deutsche Rahmenrichtlinien zu Katastrophenhilfen gewisse Grenzen. Zudem führt auch die Beteiligung der EU an der Finanzierung bzw. die Genehmigungspflicht entsprechender Hilfen durch die EU-Kommission zu einer gewissen Kontrolle.
- Grundsätzlich besteht die Gefahr, dass die Aussicht auf Ad-hoc-Hilfen andere Risikomanagementinstrumente (inkl. die Entstehung von privatwirtschaftlichen Versicherungslösungen) be- oder verhindert. Im Hinblick auf Extremwetterereignisse in Deutschland darf bezweifelt werden, dass dieses Argument in den letzten Jahren eine besondere Relevanz hatte. So werden

inzwischen ‚versicherbare Schäden' von der Gewährung von Ad-hoc-Hilfen ausgenommen. Zudem sind Unsicherheit über Umfang und Bedingungen von Ad-hoc-Hilfen ex-ante groß, da über Ausmaß und Finanzierung von Ad-hoc-Maßnahmen spontan und unter Beteiligung mehrerer politischer Ebenen entschieden wird. Auch die häufige Wahrnehmung von staatlichen Hilfen als ‚zu spät' und ‚zu gering' reduziert das Potenzial einer Verdrängung von Versicherungslösungen. Demgegenüber birgt die Förderung von Versicherungslösungen eine größere Gefahr, dass andere (innerbetriebliche) Risikomanagementinstrumente verdrängt werden, da Entschädigungen planbarer sind. Trotzdem sollten potenzielle Verdrängungswirkungen von Ad-hoc-Hilfen durch glaubwürdige Selbstrestriktionen des Staates (ex-ante) sowie maßvollen Einsatz (ex-post) minimiert werden[9]. Die Bedeutung eines entsprechenden ‚good governance' für Ad-hoc-Maßnahmen steigt weiter an, falls aufgrund des Klimawandels die Bedeutung von ‚katastrophalen Wetterereignissen', die die Anforderungen für Ad-hoc-Hilfen erfüllen, zunimmt.

- Für die Landwirte besteht ex-ante erhebliche Unsicherheit über Umfang und Bedingungen von Ad-hoc-Entschädigungszahlungen, da diese auch von der aktuellen Haushaltslage und anderen politischen Rahmenbedingungen abhängen. Eine Versicherungslösung bietet über die vorab vertraglich vereinbarten Bedingungen eine bessere finanzielle Planbarkeit.
- Ad-hoc-Hilfen führen zu unregelmäßigen Belastungen für den Staatshaushalt. Eine Prämiensubvention führt dagegen zu vergleichsweise stabilen jährlichen Haushaltsbelastungen. Die Planbarkeit einer staatlichen Förderung von Rückversicherungssystemen hängt von der Ausgestaltung ab, kann bei katastrophalen Ereignissen u. U. aber zu höheren Haushaltsrisiken führen als Ad-hoc-Hilfen, die automatisch durch die Haushaltslage begrenzt werden.
- Im Hinblick auf staatliche Ad-hoc-Hilfen wird oft auf hohe Transaktionskosten verwiesen, insbesondere aufgrund des Bedarfs zur individuellen Schadensermittlung (Feil und Mußhoff, 2014). Zudem erfolgen staatliche Entschädigungszahlungen häufig nicht schnell genug (WBA, 2011), wobei die Erfahrungen zeigen, dass diesbzgl. sowohl international (OECD, 2011) als auch in Deutschland regionale Unterschiede bestehen. Die Transaktionskosten könnten im Rahmen einer Versicherungslösung u. U. geringer ausfallen, da diese bereits über einen großen Bestand an Schätzern und umfangreiche Expertise verfügen (WBA, 2011), und die Auszahlung entsprechend schneller erfolgen. Empirische Untersuchungen zu diesem Aspekt existieren jedoch nicht. Da es sich bei den unter die Ad-hoc-Hilfen fallenden Wetterereignisse jedoch um seltene, systemische Ereignisse handelt, dürften auch Versicherungen das Vorhalten einer ‚Überkapazität' an Infrastruktur scheuen, so dass ein Vergleich der Kosten und der Abwicklungszeit von staatlichen Ad-hoc-Hilfen mit denen der derzeit am Markt beobachtbaren Versicherungslösungen nur bedingt aussagekräftig ist. Regionale Unterschiede in der Kapazität zur Umsetzung weisen auf Verbesserungspotenzial hin.

[9] Hierunter fällt z. B. die vom WBFA (2011) empfohlene Fortführung oder Absenkung des maximalen Entschädigungssatzes von 50 %.

- Eine vergleichende Untersuchung der OECD im Hinblick auf die Wirksamkeit verschiedener Risikomanagementinstrumente vor dem Hintergrund des Klimawandels (Anton et al., 2012) zeigt, dass für die untersuchten Länder die Förderung individueller Ertragsversicherungen für den Staat in der Regel teurer ist als die Förderung von Wetterindexversicherungen oder Ad-hoc Hilfen, wobei die Bewertung je nach Land unterschiedlich ausfallen kann. Speziell für den Umgang mit katastrophalen Risiken erwiesen sich Ad-hoc-Hilfen in der Studie über verschiedene Szenarien hinweg als effektives Instrument.
- Die Erfahrungen zeigen (OECD, 2011b; Tangermann, 2011), dass die staatliche Förderung von Ertragsversicherungen nicht immer in erwartetem Umfang zur Reduzierung von Ad-hoc-Hilfen führt und nicht automatisch zur beabsichtigten Entwicklung des privatwirtschaftlichen Versicherungsmarktes beiträgt. Zudem weist die staatliche Förderung von Ertragsversicherungen häufig auf Dauer hohe Subventionswerte auf.

4.4 Fazit

Staatliches Handeln auf den Märkten für Risikomanagementinstrumente muss gut begründet sein. Politiken zum Risikomanagement sollten sich klar von Einkommenspolitiken abgrenzen. Grundsätzlich besteht eine erhebliche Gefahr, innerbetriebliche Anpassungsmaßnahmen sowie privatwirtschaftliche außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente zurückzudrängen und potenziell unerwünschte risikoreiche Anbausysteme zu fördern. Der Klimawandel kann unter Umständen zudem dazu führen, dass eine starke Zunahme der Ertragsvariabilität aufgrund von Extremwetterereignissen zu so hohen (Risiko-)Kosten führt, dass bestimmte Produktionssysteme oder Kulturen nicht mehr an die deutschen Standortbedingungen angepasst, d. h., wettbewerbsfähig sind. Gegen solche Entwicklungen ‚an-' zu subventionieren ist wenig erfolgsversprechend. So schlagen bspw. Ullrich et al. (2012) vor, die Sicherung guter Produktionsstandorte in den Vordergrund zu stellen, während Grenzstandorte, die schon mit den heutigen Bedingungen nur schwer ökonomisch und ökologisch sinnvoll zu bewirtschaften sind, eventuell anderen Nutzungen zugeführt werden sollten. Staatliche Aktivitäten im Hinblick auf Risikomanagement sind vor dem Hintergrund des Klimawandels daher in einer längerfristigen strategischen Perspektive zu beurteilen.

Viele der bestehenden Herausforderungen zum Einsatz von ex-ante Risikomanagementinstrumente für den Umgang mit Extremwetterereignissen sind auf fehlende oder asymmetrisch verteilte Informationen zurückzuführen. Prioritäre Aufgabe des Staates sollte es daher sein, die Informationslage und -verbreitung zur Relevanz (Häufigkeit und Schadenshöhe) und zukünftigen Entwicklung agrarrelevanter Extremwetterlagen sowie zu den Möglichkeiten und Kosten von betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten weiter zu verbessern. Die vorliegenden Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens liefern dazu einen wichtigen Beitrag und liefern gleichzeitig Hinweise für künftige Handlungsschwerpunkte im Bereich der Informationsunterstützung.

Für Deutschland lässt sich eine (zeitlich begrenzte) staatliche Förderung von Versicherungslösungen allenfalls für die systemischen Risiken Trockenheit und Hochwasser ableiten. Die Förderung sollte in diesem Fall nicht höher liegen als die Differenz von fairer Prämie und tatsächlicher Prämie. Da Hochwasser weite Bereiche der Wirtschaft und Gesellschaft betrifft, erscheint eine (weitere) sektorspezifische Förderung jedoch wenig effizient. Zur (zukünftigen) Bedeutung von trockenheitsbedingten Ertragseinbußen für die Einkommensstabilität und Liquidität landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland liegen derzeit keine ausreichenden Erkenntnisse vor, die ein stärkeres staatliches Engagement für die Verbreitung von Versicherungslösungen erzwingen würden. Sollten weitere Analysen in dieser Hinsicht entsprechende Anhaltspunkte liefern, so könnte eine Ausdehnung der Sonderregelung zur vergünstigten Besteuerung von Versicherungen auf das Wetterrisiko „Trockenheit“ die ökonomische Attraktivität entsprechender Versicherungsangebote erhöhen. Wirkungsgleich wäre eine Subventionierung in Höhe von ca. 17 % der Versicherungsprämien im Rahmen der 2. Säule der GAP. Die hierfür benötigten Finanzmittel sollten dann durch zusätzliche Umschichtung von Mitteln aus der 1. Säule bereitgestellt werden. Die Förderung von Versicherungslösungen steht damit potenziell in Konkurrenz zu anderen agrarpolitischen Zielen.

Eine konkrete Wettbewerbsverzerrung durch höhere Subventionen für Versicherungsprämien in anderen EU-Ländern ist aufgrund der Ausgestaltung und des im Vergleich zu anderen Agrarsubventionen insgesamt geringen Mittelvolumens derzeit als weniger bedeutsam einzuschätzen, insbesondere da diese Subventionen nicht losgelöst von staatlichen ad-hoc Zahlungen beurteilt werden können. Allerdings liegt keine quantitative Studie zu dieser Fragestellung vor, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Vor dem Hintergrund der hohen relativen Subventionsraten in anderen Ländern und einer möglicherweise neuen Dynamik innerhalb der aktuellen ELER-Förderperiode sollte die deutsche Politik sowohl auf EU- als auch auf WTO-Ebene für eine regelmäßige, rigorose Überprüfung der staatlichen Förderung von Risikomanagementinstrumenten im Hinblick auf potenzielle Wettbewerbsverzerrungen eintreten.

Die vorliegenden Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass es eine Vielzahl von Strategien zum Umgang mit diesen Risiken gibt, deren Eignung je nach Betriebssituation und Betriebsleiterpräferenzen unterschiedlich ausfällt und über deren optimalen Einsatz nur auf einzelbetrieblicher Ebene entschieden werden kann. Dies unterstreicht, dass staatliches Handeln eine einseitige Förderung ausgewählter Risikomanagementinstrumente vermeiden sollte und – bei Beschränkung auf die Handlungsfelder mit Marktversagen – vergleichbare Fördersätze für unterschiedliche Risikomanagementinstrumente anstreben sollte. Die Erfahrungen in anderen OECD-Ländern zeigen, dass auch bei staatlicher Förderung von Versicherungslösungen Ad-hoc-Hilfen ein wichtiges Instrument staatlichen Handelns bleiben. Um negative Nebenwirkungen von Ad-hoc-Hilfen zu reduzieren, sollte ein ‚good-governance‘ Rahmen für diese entwickelt werden, in dem wichtige Parameter ex-ante festgelegt werden (konkrete und glaubwürdige Abgrenzung der Definition von ‚Katastrophenfall‘, justiziable Abgrenzung von Ausschlusskriterien wie versicherbarer Risiken).

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Entwicklung von Extremwetterlagen

Die Anwendung von Stationsdaten und Klimaprojektion, agrarrelevante Extremwetterlagen zu definieren und Änderungen ihrer Häufigkeit und Intensität zu quantifizieren, hat sowohl die Möglichkeiten aber auch die derzeit bestehenden Grenzen aufgezeigt. Einschränkungen bestehen vor allem bei denjenigen Extremwetterereignissen, die in Deutschland die größten Schäden verursachen, und zwar Hochwasser, Sturm und Hagel (GDV, 2014), und von denen auch die Land- und Forstwirtschaft stark betroffen ist. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, wissenschaftlich basierte Klimadienstleistungen auf regionaler und lokaler Ebene insbesondere für die genannten Extremwetterlagen weiterzuentwickeln und hierbei stärker auf die Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu fokussieren als auf Mittelwerte.

Folgende Aspekte und Ergebnisse der Klimadatenauswertung sind hervorzuheben:

- Nach den Auswertungen der Stationsdaten sind bezüglich der meisten untersuchten agrarrelevanten Extremwetterlagen keine wesentlichen Veränderungen in der Vergangenheit erkennbar. Ausnahmen sind eine in den letzten 15 Jahren zunehmende Frühjahrstrockenheit in den Monaten März und April sowie eine signifikante Zunahme der Hitzetage.
- Für die Zukunft (die nächsten 20 Jahre) wird bei den meisten Extremwetterlagen ein Rückgang der Frostereignisse erwartet. Unklar ist jedoch, inwiefern sich der Temperaturanstieg auf das Risiko für Kahlfrost bzw. Spätfrost auswirkt. Wenn aufgrund höherer Wintertemperaturen tendenziell weniger Schnee fällt, können Kälteeinbrüche häufiger zu Kahlfrost führen. Infolge eines früheren Vegetationsbeginns erfolgt die Blüte ebenfalls früher, so dass die Gefahr für Spätfrost auch zunehmen kann.
- Die Klimaprojektionen weisen selbst nach einer Normierung der Mittelwerte auf diejenigen des Referenzzeitraums 1961-1990 eine erhebliche Streuung auf. Insbesondere die Abbildung und Modellierung des für die Landwirtschaft wichtigen Niederschlags und seines saisonalen Verlaufs bedürfen einer Weiterentwicklung. Beispielsweise bilden die Klimamodelle die in den letzten 15 Jahren zunehmende Frühjahrstrockenheit in den Monaten März und April nicht ab. Dies ist mit Blick auf die zukünftige Entwicklung zu berücksichtigen.
- Die Datenbasis ist für einige, insbesondere der lokal auftretenden Extremwetterlagen, wie Hagel und Starkregen, teilweise nicht vorhanden bzw. in der Fläche nur eingeschränkt repräsentativ. Dies muss bei der Interpretation der beobachteten Entwicklung berücksichtigt werden, insbesondere bei der regionalen Verteilung, die auf der Grundlage räumlich interpolierter Stationsdaten basiert.

5.2 Ackerbau

Aus den Analysen zur Entwicklungen der Anbaustruktur im Ackerbau sowie den räumliche differenzierten Auswirkungen ausgewählter extremer Wetterlagen auf betriebliche Winterweizenerträge lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten. Die Auswirkungen können mit Einschränkungen auf andere Winterkulturen übertragen werden:

- Änderungen der Flächennutzungsstruktur sind als Ursachen einer möglichen Zunahme der Ertragsvariabilität bei Winterweizen in Betracht zu ziehen, auch wenn sich dieser Effekt statistisch kaum belegen lässt. Dazu gehören die kontinuierliche Ausdehnung von Siedlungs- und Verkehrsflächen oft zu Lasten fruchtbarer Ackerflächen, die fortschreitende räumliche Spezialisierung des Anbaus sowie die Spezialisierung auf die Ackerkulturen Weizen, Mais und Raps. Mit Blick auf die Minimierung der Auswirkungen extremer Wetterlagen sind dies ungünstige Entwicklungen.
- Da eine Spezialisierung der Anbaustruktur auf wirtschaftliche Erwägungen und Entscheidungen der landwirtschaftlichen Betriebe zurückzuführen ist, leitet sich daraus keine Notwendigkeit für staatliches Handeln ab, um das mit der Spezialisierung einhergehende, steigende Risikos zu reduzieren. Dies würde Anreize zu einer Diversifizierung des Anbaus, wie sie im Rahmen des Greenings der GAP gesetzt werden, konterkarieren.
- Die Analyse der Wetterstationsdaten ergab eine Zunahme der Frühjahrstrockenheit in den Monaten März und April sowie eine Erhöhung des Hitzestresses während der Blütephase von Winterweizen. Laut den Klimaprojektionen wird eine weitere Zunahme des Hitzestresses erwartet. Hinweise für eine Änderung der frühen Frühjahrstrockenheit gibt es nach den Klimaprojektionen nicht. Darüber hinaus wurde keine signifikante Häufung der für Ackerkulturen relevanten Extremwetterlagen in Deutschland beobachtet und bis zur Mitte des Jahrhunderts auch nicht erwartet. Dies deckt sich mit den Ergebnissen jüngster anderer Studien (z. B. Trnka et al. 2014). Sollte die Zunahme der Frühjahrstrockenheit bzw. des Hitzestresses bereits in den nächsten 10-20 Jahren zu erheblichen Beeinträchtigungen der Wachstumsbedingungen für die derzeit in Deutschland angebauten Ackerkulturen führen, so sind Anpassungen der Anbaustruktur, z. B. andere Sorten oder Kulturen, in der Regel effizienter als staatliche Maßnahmen, die die Beibehaltung des Status quo unterstützen. Zur letzteren Maßnahmenkategorie zählen auch Förderungen von Versicherungslösungen, die Bestrebungen der Betriebe verringern, ihre Produktion langfristig an sich ändernde klimatische Bedingungen anzupassen.
- Für die beiden Extremwetterlagen, Frühjahrtrockenheit und Hitzestress während der Vegetationsperiode (Blütezeit), wurden regional unterschiedliche Wirkungen auf die Weizenerträge nachgewiesen. Nach den Ergebnissen der Analysen würde eine zukünftige Häufung dieser Ereignisse das Ertragsrisiko erhöhen, insbesondere in Ostdeutschland. Das Ausmaß des zunehmenden Ertragsrisikos erscheint jedoch nach derzeitigem Stand der Analysen beherrschbar. Beide Ereignisse gehören zur Gruppe der Extremwetterlagen mit systemischem Charakter, deren Auswirkungen große Räume betreffen können. Da die Auswirkungen insbesondere Ostdeutschland betreffen, dürfte sich ein überregionaler Risikoausgleich als problematisch gestalten.

5.3 Sonderkulturen

Die Bewertung der jeweiligen Vor- und Nachteile der derzeit verfügbaren Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterschädigungen in Sonderkulturen zeigt, dass viele Verfahren zwar wirksam, teils jedoch nicht wirtschaftlich sind, mit enormem Arbeitsaufwand einhergehen können oder nicht mit qualitativen Zielstellungen vereinbar sind. Hier zeigt sich weiterer Forschungsbedarf, um praktikable, d. h., funktionale als auch wirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen neu zu entwickeln bzw. bestehende Verfahren den Anforderungen anzupassen.

In allen Sonderkulturen birgt der Hagel das höchste Schadenspotenzial. Allerdings tritt er in aller Regel kleinräumig auf. Daher sind Hagelversicherungen weit verbreitet und gewinnen weiter an Bedeutung. Als Alternative zur Versicherung ist eine möglichst weite innerbetriebliche Streuung der Anbauflächen anzusehen, wodurch die von einem Schadensereignis betroffenen Flächen einen vergleichsweise kleinen Anteil an der Gesamtfläche erreichen.

Eine vergleichsweise hohe Gefährdung geht in den untersuchten Sonderkulturen ebenfalls von Spätfrösten aus. Obwohl die Häufigkeiten von Spätfrostereignissen zu ausgewählten Zeitpunkten im Jahr in Zukunft sinken werden, läuft ein immer früherer Blühbeginn bei den verholzten Dauerkulturen, z. B. Obst, dieser Entwicklung entgegen. Ähnliche Auswirkungen hat eine zunehmend frühere Bestellung der Flächen im Gemüsebau. Um diese Effekte genauer beurteilen zu können, sind ergänzende Forschungen erforderlich.

Versicherungen gegen Hagel und Spätfröste nehmen im Vergleich zu pflanzenbaulichen Maßnahmen zur Risikominderung bei Extremwetterereignissen eine Sonderstellung ein. Sie können die durch die Extremwetterschäden entstehenden direkten finanziellen Verluste der betroffenen Betriebe verringern. Im Gegensatz zu pflanzenbaulichen Maßnahmen sind Versicherungslösungen aber nicht in der Lage, physische Ertragsausfälle zu verhindern, so dass die Gefahr besteht, durch eine temporär unterbrochene Belieferung von evtl. langjährigen Abnehmern langfristig Absatzmärkte zu verlieren. Eine breitere Daten- und Wissensbasis, z. B. zu möglichen Verlusten und der Anzahl betroffener Betriebe, würde auch in Hinblick auf die Bewertung verfügbarer Versicherungslösungen einen großen Beitrag leisten.

Die Expertenworkshops und -befragungen verdeutlichten, dass Risikomanagement individuell maßgeschneidert auf Betriebsebene gehandhabt werden sollte. Die Politik könnte dabei unterstützende Maßnahmen ergreifen, indem weitere Forschung zur (Weiter-) Entwicklung neuer Anpassungsoptionen bei Extremwetterereignissen gefördert wird.

Generell ist die Verfügbarkeit von verwendbaren Daten für die Analysen der Relevanz und der Auswirkungen von Extremwetterlagen in Sonderkulturen, wie flächenbezogene Erträge, Qualitäten, Aufzeichnungen zur Betroffenheit und Wetterdaten, derzeit sehr lückenhaft. Eine der wichtigsten Aufgaben für die Zukunft ist es deshalb, umfassendere Daten zu sammeln, um konkretere Aussagen über das Schadpotenzial und die Relevanz von Extremwetterlagen im Sonderkulturan-

bau ableiten zu können. Diese Erkenntnisse sind für die Planung und Abwägung sowohl einzelbetrieblicher als auch großräumiger und politischer kurz- und langfristiger Anpassungsmaßnahmen von immenser Bedeutung. Denkbar wäre zum Beispiel ein Onlineportal zur Erfassung von Extremwetterschäden und notwendiger Metadaten in landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Kulturen, über welches umfangreiche Daten für wissenschaftliche Analysen gewonnen werden könnten.

5.4 Wald

Die wichtigsten (ökonomischen) Wirkungen von Extremwetterlagen auf Wälder betreffen Trockenheit, Sturmeinflüsse (Herbst- und Winterorkane) und ggf. Folgeschäden durch Schadorganismen. Trockenheit wirkt sich direkt auf ältere Bestände vorwiegend zuwachsmindernd aus, Jungpflanzen (Baumartenverjüngung) können durch starke Trockenheit (Dürre) absterben.

Trockenheitswirkung auf Waldverjüngungen (Jungbestände) und Anpassungen

- Waldverjüngungen geraten bei einem nutzbaren Rest-Bodenwasservorrat von unter 20 % der nFK in akuten Trockenstress, der zum Absterben der Bestände führt. Diese kritische Trockenheitsschwelle wurde für Buchen- und Fichtenverjüngung auf gleichem Niveau nachgewiesen.
- Ein für die Verjüngung aller Hauptbaumarten kritische Trockenheit (< 20 % nFK, bis 50 cm Bodentiefe) kann in weiten Teilen Ostdeutschland und vielen Gebieten Süddeutschlands zum Ende des Jahrhunderts (2070-2099) alle zwei bis fünf Jahre auftreten. Dies betrifft aber nur Verjüngungen unter Altbaumbeständen mit Kiefer und Fichte und kann zu stark erhöhten ökonomischen Schäden führen. Unter Buche steigen die Trockenheitsgefahr und das ökonomische Schadenspotenzial durch Trockenschäden dagegen nur geringfügig. Grund hierfür ist die deutlich geringere Interzeptions-Verdunstung von Buchen-Altbeständen im Vergleich zu Altbeständen mit Nadelbaumarten. Altbestände mit Mischungen aus Buche und Nadelbäumen (Fichte, Kiefer, Douglasie) wurden zwar nicht untersucht, die geringere Interzeptions-Verdunstung der Mischbestände bietet in abgeschwächter Form auch Vorteile gegenüber Nadelbaum-Reinbeständen.
- Der seit etwa drei Jahrzehnten laufende Waldumbau von reinen Nadelwäldern in Laub- und Mischwäldern stellt eine Anpassungsoption dar und wirkt zukünftiger kritischer Trockenheit entgegen. Obwohl in unserer Analyse nur die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche (als Reinbestände) enthalten waren, zeigen Ergebnisse zu Eichenbeständen und gemischten Kiefern-Buchenbeständen ähnliche (in abgeschwächter Form) Vorteilswirkungen gegenüber reinen Nadelwäldern. Waldumbauten von reinen Nadelwäldern in Laub- und Laub-Mischwäldern können sich aber auf Grundlage der vorliegenden Analysen insbesondere auf trockenheitsgefährdete Gebiete in Ostdeutschland und Süd(west)-Deutschland beziehen, in denen am schnellsten die Verjüngungsfähigkeit der Wälder gefährdet sein könnte. Dies betrifft in Ostdeutschland vorwiegend den Umbau von reinen Kiefernwäldern in Rein- oder Mischbeständen mit Buche, Eiche oder Winterlinde, in Süddeutschland reine Fichte oder Kiefernbestände

in Rein- oder Mischbestände mit Buche, Eiche oder anderen Laubwaldarten. Ein günstiger Zeitrahmen für diese Maßnahmen dafür scheint aber nur in den nächsten Jahrzehnten gegeben (bis zur Mitte des Jahrhunderts). Eine Verjüngung bzw. Neubegründung reiner Kiefern- und Fichtenbestände (und ggf. auch Douglasie) erscheint vor diesem Hintergrund ohne eine Abkehr von bisherigen Grundsätzen wie (Natur-)Verjüngung unter Schirm und keine Anwendung von Bewässerung fraglich.

- Die Gesamtsumme der hierdurch möglichweise abgewendeten Schäden durch Klimaextreme liegt deutschlandweit bei mehreren hundert Millionen Euro. Darin sind nicht eingerechnet mögliche hohe Schäden durch den Verlust der zukünftigen Verjüngungsfähigkeit der Standorte. Allerdings sind aus ökonomischer Sicht auch die sehr hohen Investitionssummen für den Waldumbau zu berücksichtigen. Geringer Handlungsdruck liegt im nordwestdeutschen Tiefland, in den höheren Lagen der Mittelgebirge und im Voralpenland vor.

Sturmwirkung auf ältere Bestände und Anpassungen

- Unter einer gegebenen Lage und Windexponiertheit wird die Vulnerabilität von Waldbeständen gegenüber Sturmschäden durch Winterorkane entscheidend von der Baumart (Fichte > Douglasie > Kiefer > Buche > Eiche) und der ansteigenden Dimension der Bäume (Höhe, Durchmesser) bestimmt. Bei den sturmempfindlichen Baumarten wie der Fichte oder der Douglasie nimmt die Vulnerabilität in jüngeren Beständen mit einem Brusthöhen-Durchmesser (BDH) unter 30 cm bei Fichten oder 40 cm bei Douglasien stark ab.
- Die potenziellen ökonomischen Einbußen durch Sturmschäden (Erwartungswert-Differenz zwischen schadfreiem und geschädigtem Bestand) sind stark vom schadfreien Erwartungswert (Douglasie > Fichte >> Kiefer > Buche >> Eiche) und von der restlichen Produktionszeit (Zeitraum bis zum Erreichen eines angestrebten Zieldurchmessers) abhängig. Lange Produktionszeiträume erhöhen das ökonomische Schadpotenzial insbesondere bei Douglasien- und Fichtenbeständen mit hohen Erwartungswerten. Unterschiedliche Sturmintensitätsstufen wirken sich dagegen weniger aus. Grundsätzlich sind die ertragsstarken Baumarten Douglasie und Fichte unter den heutigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen den anderen Baumarten weit überlegen. Aus wirtschaftlicher Sicht können sie hierdurch im Vergleich zu den anderen Baumarten ein deutlich höheres Schadniveau ökonomisch kompensieren.
- Die hohe Vulnerabilität von Fichte und Douglasie gegenüber Winterstürmen spricht zunächst für den Umbau von Reinbeständen beider Baumarten in gefährdeten Lagen (westexponierte Luv-Hanglagen, exponierte Kammlagen) in weniger anfällige Laub- und Mischwälder. Allerdings betrifft dieser Waldumbau ganz andere Standorte als der o. g. Waldumbau zur Anpassung an (zukünftige) Trockenheit. Die Aufgabe von solchen für den Nadelholz-Anbau gut geeigneten Standorten hätte erhebliche ökonomische Nachteile mit Erwartungswertunterschieden von über 10.000 € pro ha gegenüber Laubwaldanbau. Bei einer Waldfläche in Höhenlagen von über 600 m ü. NN von 1,5 Mio. ha und einem angenommenen Anteil von einem Drittel (0,5 Mio. ha) läge der Erwartungswertverlust deutschlandweit in einer Größenordnung von 5 Mrd. €. Zudem sind viele sturmexponierte Kammstandorte der Mittelgebirge derzeit für Buchen- und Eichenanbau nicht geeignet.

- Eine andere Option liegt in der Verkürzung der Zieldurchmesser bei der Beibehaltung von Nadelwäldern und Nadel-Mischwäldern. Bei Fichte könnte ein reduzierter Ziel-BHD in einer Größenordnung von 25 cm und bei Douglasie von 30 cm liegen. Dies bedeutet eine erhebliche Reduktion der Produktionszeiträume für wüchsige Baumarten wie Fichte und Douglasie sowie eine erhebliche Verminderung der Vulnerabilität. Zusätzlich könnte damit die hohe Nachfrage nach schwachen und mittelstarken Nadelholzsortimenten besser bedient werden.

Mischwaldbegründung

Eine wesentliche Komponente in der bisherigen Anpassungsstrategie der Forstbetriebe an den Klimawandel liegt in der Umwandlung von Reinbeständen in Mischwaldbeständen, um das Risiko von Schäden auf mehrere Baumarten mit unterschiedlichen Anpassungspotenzialen zu verteilen und dadurch zu vermindern. Mit den vorliegenden Analysen und Ergebnissen lassen sich diese allgemeinen Anpassungsansätze nicht direkt prüfen, aber die Übereinstimmung und Konflikte können diskutiert werden.

- Die Frage der Erhaltung eines verjüngungsfreundlichen Bodenwasservorrats kann in die Mischwaldstrategie problemlos integriert werden, indem in Mischwälder eine Laubwaldkomponente (Buchen- oder Eichenanteil) berücksichtigt wird. Hierbei können ökonomisch und anpassungsstrategisch erwünschte Nadelholzanteile (Kiefer, Douglasie und Fichte) ebenfalls erhalten werden.
- Schwieriger ist die Frage der Kombination von verminderten Zieldurchmessern bei Nadelbaumarten mit dem Mischwaldkonzept, da mögliche Laubwaldarten mit geringerer Produktivität meist deutlich längere Produktionszeiträume haben. Allerdings könnte bei einer Annahme von starker Sturmexposition auf etwa 0,5 Mio. ha (< 5 %) Waldfläche ein segregativer Ansatz verfolgt werden. Diese „Sonderstandorte“ könnten bewusst einer entsprechenden besonderen Produktionsform zugeordnet werden, um einerseits das Sturmschadensrisiko zu vermindern und andererseits stark nachgefragtes Nadelholz zu produzieren, dessen Anteil an der Gesamtwaldfläche ansonsten stark sinken wird (vgl. BWI, 2012).

Aus ökonomischer Sicht muss aber auch auf Nachteile eines Waldumbaus zu Mischwäldern hinzuweisen wie:

- Hohe Kosten für die Begründung der Mischwälder, insbesondere des Laubholzanteils,
- Höhere Kosten für die Mischungsregulierung sowie
- Verringerung des ökonomischen Werts der Waldbestände nach heutigen Maßständen.

5.5 Wassermanagement

Aufgrund der regional unterschiedlichen natürlichen Standortbedingungen, wie der Niederschlagsverteilung, der klimatischen Wasserbilanz, dem Boden einschließlich der nutzbaren Feld-

kapazität (nFk) sind in Deutschland regional unterschiedliche Maßnahmen des Wassermanagements etabliert. Mit diesen wird ein Übermaß bzw. Defizit an Wasser in der Vegetationsperiode durch End- bzw. Bewässerung ausgeglichen, vor allem mit dem Ziel, landwirtschaftliche Erträge zu stabilisieren. So werden in Deutschland rund 2 - 2,6 Mio. ha durch Drainagen oder Gräben entwässert. Der Umfang der Bewässerung beläuft sich etwa auf 3,8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands.

Eine Wasserknappheit ist in Deutschland, zumindest gegenwärtig und auf nationaler Ebene, nicht gegeben. Es lassen sich Defizitstandorte ermitteln, an denen die Verdunstung höher ausfällt als der Niederschlag, wie bspw. in Nordostdeutschland, und die Wirtschaftlichkeit des Anbaus einiger Fruchtarten durch Bewässerung verbessert werden könnte. Das benötigte Zusatzwasser kann durch Entnahme aus Grund- bzw. Oberflächenwasser, Wasserspeichern, Grundwasseranreicherung oder Wasserüberleitungen verfügbar gemacht werden.

Die Bewässerung gehört bei vielen Sonderkulturen zum Stand der Technik. Sie ist unerlässlich, um entsprechende Ertrags- und Qualitätsstandards in der Vermarktung zu erzielen und um Lieferverträge einzuhalten. Bei Ackerkulturen lohnen sich Investitionen in Beregnung derzeit nur in wenigen Regionen. Die erzielbare Ertragssicherung und -steigerung reicht bei den meisten Kulturen oft nicht aus, um die Beregnungskosten zu decken. Eine Zunahme der Nachfrage nach Beregnungstechnologie in den letzten 10 Jahren ist vorrangig im Zusammenhang mit einem Anstieg der Agrarpreise sowie der Biomasseerzeugung für Biogasanlagen zu sehen. Für einen Ackerbaubetrieb bedeuten Investitionen in Beregnung in der Regel einen Einstieg in den Anbau von Sonderkulturen wie Gemüse.

Die Auswertungen der Stationsdaten haben keine signifikanten Änderungen der räumlichen und zeitlichen Verteilung extremer Niederschlagsereignisse gezeigt. Eine Ausnahme bilden häufiger ausbleibende Niederschläge in der frühen Vegetationsperiode. Vor diesem Hintergrund leitet sich mit Blick auf extreme Wetterlagen kein akuter zusätzlicher Handlungsbedarf für das Wassermanagement ab.

5.6 Agrarpolitische Maßnahmen

Für die Agrarpolitik lassen sich auf Basis der Projektergebnisse folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Staatliches Handeln auf den Märkten für Risikomanagementinstrumente muss gut begründet sein. Grundsätzlich besteht eine erhebliche Gefahr, innerbetriebliche Anpassungsmaßnahmen sowie privatwirtschaftliche außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente zurückzudrängen und potenziell unerwünschte risikoreiche Anbausysteme zu fördern.
- Agrarpolitische Maßnahmen zur Unterstützung des Risikomanagements sollten sich klar von Einkommenspolitiken abgrenzen.

- Eine einseitige Förderung ausgewählter Risikomanagementinstrumente sollte vermieden werden.
- Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind staatliche Aktivitäten im Hinblick auf Risikomanagement in einer längerfristigen strategischen Perspektive zu beurteilen, um notwendige Anpassungen zu fördern statt zu verhindern.
- Die deutsche Politik sollte sowohl auf EU- als auch auf WTO-Ebene für eine regelmäßige, rigorose Überprüfung der staatlichen Förderung von Risikomanagementinstrumenten im Hinblick auf potenzielle Wettbewerbsverzerrungen eintreten.
- Prioritäre Aufgabe des Staates sollte es sein, die Informationslage und -verbreitung zur Relevanz (Häufigkeit und Schadenshöhe) und zur zukünftigen Entwicklung agrarrelevanter Extremwetterlagen sowie zu den Möglichkeiten und Kosten von betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten weiter zu verbessern. Hierzu gehören z. B. die Bereitstellung und Verbesserung regional differenzierter Wetterinformationen und -vorhersagen, insbesondere bzgl. regionaler Extremwetterereignisse sowie die Erforschung der kombinierten Wirkungen von Hitzestress und Trockenheit.
- Die Implementierung von Maßnahmen im Bereich des Wassermanagements erfordert in der Regel eine überbetriebliche Koordination. Hierbei ist staatliches Handeln gefordert, bestehende Rahmenbedingungen weiterzuentwickeln.
- Zur (zukünftigen) Bedeutung von trockenheitsbedingten Ertragseinbußen für die Einkommensstabilität und Liquidität landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland liegen derzeit keine ausreichenden Erkenntnisse vor, die ein stärkeres staatliches Engagement für die Verbreitung von Versicherungslösungen erzwingen würden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.
- Um negative Nebenwirkungen von Ad-hoc-Hilfen zu reduzieren, sollte ein ‚good-governance' Rahmen für diese entwickelt werden, in dem wichtige Parameter ex-ante festgelegt werden.

6 Zusammenfassung

Die Land- und Forstwirtschaft hängt wie kaum ein anderer Sektor von Klima, Witterung und Wetter ab. Extreme Wetterlagen wie Hitze, Dürre, Sturm, Überschwemmungen, Hagel oder Frost können den Betrieben erheblichen Schaden zufügen. Während die langfristigen und globalen Auswirkungen des Klimawandels intensiv erforscht werden, gibt es für die regional stark variierenden Extremwetterlagen infolge des Klimawandels bislang kaum belastbare Forschungsergebnisse.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse eines Verbundforschungsvorhabens im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zusammen, dessen Ziel es war, das künftige Auftreten von Extremwetterlagen und deren Auswirkungen auf die deutsche Land- und Forstwirtschaft abzuschätzen (Relevanzabschätzung) und Anpassungsmaßnahmen für die Wirtschaftsbetriebe und für die Politik zu untersuchen und vergleichend zu bewerten. Das Verbundforschungsvorhaben wurde vom Thünen-Institut und Julius Kühn-Institut (JKI) in enger Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bearbeitet. Darüber hinaus förderte das BMEL sogenannte Entscheidungshilfe(EH)-Vorhaben, die spezifische Aspekte untersuchten. Das Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz (Neustadt/Weinstraße) bearbeitete federführend den Bereich Sonderkulturen und wurde vom Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee (KOB) in Bavendorf, dem Obstbauzentrum “Esteburg“ in Jork und der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) in Hüll/Wolnzach unterstützt. Die Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) untersuchte die Anfälligkeit der Naturverjüngung unterschiedlicher Baumarten bei extremer Trockenheit. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) entwickelte ein Modell zur Abschätzung von Sturm für unterschiedliche Risikogebiete. Das Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) analysierte den Ist-Zustand und Perspektiven des Wassermanagements und die Universität Göttingen die Möglichkeiten des Risikomanagements in landwirtschaftlichen Betrieben. Der gesamte Forschungsverbund adressierte im Rahmen der Charta für Landwirtschaft und Verbraucher den Bereich „Prioritäre Forschung und Wissenstransfer“.

Das Vorhaben wurde in drei teilweise iterativen Teilschritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Daten der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes von 1961 bis 2013 sowie Klimaprojektionsdaten bis zum Jahr 2100 ausgewertet. Die Auswertung erfolgte für kulturartspezifische Extremwetterlagen, für die auf der Grundlage von Angaben aus der Literatur und mit Hilfe von Experten Schwellenwerte definiert wurden. In einem zweiten Schritt wurden Auswirkungen besonders relevanter Extremwetterlagen auf die Kulturen untersucht, wobei eine eingehendere Wirkungsanalyse oft durch mangelnde Verfügbarkeit belastbarer Informationen und Daten limitiert war. In einem dritten Schritt wurden Anpassungsoptionen an Extremwetterlagen untersucht, wobei ein Fokus auf den Möglichkeiten des Risikomanagements und einer Beurteilung agrarpolitischer Maßnahmen zur Unterstützung von Anpassungen an Extremwetterlagen lag.

6.1 Klimadatenauswertung

Mit den kulturartspezifischen Schwellenwerten für extreme Ereignisse wurden die Daten von bundesweit 132 Klimastationen des DWD, für die seit 1961 konsistente Messreihen vorliegen, sowie 21 Klimaprojektionen für das IPCC-Szenario A1B ausgewertet. Als Ergebnis lagen Deutschlandkarten und Deutschlandmittel für 30-Jahres-Zeiträume für die Vergangenheit und die Zukunft vor. Die zehn, sich überlappenden, 30-Jahres-Zeiträume des Deutschlandmittels gaben einen Hinweis auf beobachtete und erwartete Änderungen seit 1961-1990 bis 2071-2098. Mit Hilfe der Deutschlandkarten der Änderungstendenz für 2071-2098 gegenüber 1961-1990 wurden regional unterschiedliche Entwicklungen deutlich.

Die im Zuge des Klimawandels steigenden Temperaturen wirken sich auf die Extremwetterlagen Winterfrost und Hitze aus. Im Winter werden die Temperaturgrenzen (Tmin < -10°C, -15°C, -20°C, bzw. -25°C) immer seltener unterschritten. Die Anzahl an ‚Tagen mit tiefen Wintertemperaturen' geht zurück. Messungen können dies für die Vergangenheit bereits bestätigen und die Klimaprojektionen zeigen, dass sich diese Entwicklung weiter fortsetzt. Im Frühjahr und Sommer nehmen die Tage, an denen die Maximumtemperatur die Schwellenwerte für den Parameter Hitze überschreitet, zu. Dies gilt für alle untersuchten Zeiträume in der Vergangenheit und der Zukunft und für alle Grenzwerte (Tmax > 28°C, 30°C bzw. 35°C).

Die Entwicklung der Spätfrostgefährdung (Tmin < 0°C, -2°C bzw. -4°C) wurde für den Zeitraum Februar bis Mai untersucht. Für alle Grenzwerte nahmen die Tage mit Spätfrost für den Zeitraum 1971-2000 im Vergleich zu 1961-1990 ab und für 1981-2010 wieder etwas zu. Die Klimaprojektionen gehen von einem deutlichen Rückgang der Spätfrostgefährdung aus. Werden nur die Monate April und Mai betrachtet, ergibt sich für die Vergangenheit kein einheitlicher Trend. Zwischen einem leichten Rückgang (0°C), geringen Änderungen (-2°C) und einer leichten Zunahme (-4°C) ist alles vertreten. Mit den steigenden Temperaturen setzt auch die phänologische Entwicklung der Kulturpflanzen früher ein. Aus diesem Grund wurden alle Dekaden der Monate April und Mai einzeln untersucht. In jeder Dekade tritt der bereits angesprochene Rückgang der Spätfrostgefährdung in der Zukunft auf. Wird die Verfrühung der phänologischen Entwicklung berücksichtigt, so kann die Spätfrostgefährdung für frostempfindliche Entwicklungsphasen jedoch auch zunehmen.

Winterkulturen können durch Wechselfröste geschädigt werden. Der Boden taut tagsüber auf und gefriert in der Nacht wieder. Durch die Volumenänderung im Boden kann es zum Abreißen der Wurzeln kommen. Der Trend in der Vergangenheit zeigt eine Zunahme des Auftretens von Wechselfrösten. Dies ist auf Gebiete zurückzuführen, die früher durch zu kalte Temperaturen die Bedingungen für den Wechselfrost nicht erfüllt haben. Durch die steigenden Temperaturen liegen die Maximum- und Minimumtemperaturen nunmehr um den Gefrierpunkt und Wechselfrost tritt auf. Mit den weiter steigenden Temperaturen wird die Wechselfrostgefährdung in den betrachteten Zeiträumen in Zukunft zurückgehen.

Die Auswertung der berechneten Bodenfeuchte für die Vergangenheit zeigt für Tage mit hohen Bodenfeuchten einen Rückgang und für Tage mit geringen Bodenfeuchten eine Zunahme. Für die Zukunft ist das Bild nicht so einheitlich. Tage mit hoher Bodenfeuchte sollen bis 2060 leicht zunehmen. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gehen die Werte meist wieder etwas zurück. Für alle Kulturen bleiben die Tage mit geringer Bodenfeuchte in der nahen Zukunft erst konstant oder nehmen sogar ein wenig ab. Erst zum Ende des Jahrhunderts erfolgt eine weitere Zunahme. Nur für die Monate März und April ist bereits in der nahen Zukunft eine Zunahme zu verzeichnen. Nachfolgend gehen die Tage mit geringer Bodenfeuchte sogar zurück. Da die Klimaprojektionen das Auftreten der Frühjahrstrockenheit in der Vergangenheit nicht richtig wiedergeben, müssen die Aussagen über die Frühjahrsmonate für die Zukunft mit Vorsicht betrachtet werden.

Das höchste Risiko für Starkregen tritt in den Monaten Juni, Juli und August auf. In diesen Monaten ist im Deutschlandmittel alle zwei Jahre mit einem Starkregenereignis zu rechnen, wobei sich das Risiko von 1961-1990 bis 1981-2010 leicht vom Juni in den Juli verschoben hat. Nach den Klimaprojektionen wird überwiegend ein Anstieg der Starkregenereignisse erwartet, insbesondere in den Wintermonaten. Das deckt sich teilweise mit den beobachten Entwicklungen. Abgesehen von der in den Projektionen nicht abgebildeten Verlagerung der Häufigkeit des Auftretens von Starkregen vom Juni in den Juli soll das Risiko im Sommer eher konstant bleiben.

Die für eine Sturmauswertung notwendigen maximalen Böen sind in den Daten der Klimamodelle nicht enthalten. Maximale Böen treten während eines Sturmes nur zeitweise auf, zwischenzeitlich geht die Windgeschwindigkeit immer wieder etwas zurück. Um diesen Effekt zu berücksichtigen und einen Eindruck zur Entwicklung des Sturmrisikos zu bekommen, wurden Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 10m/s ausgewertet. Dieser Grenzwert wird am häufigsten in den Monaten November bis Januar überschritten. In der Vergangenheit haben die Tage mit hoher Windgeschwindigkeit nur für den Monat Januar zugenommen. In den Monaten November und Dezember ist ein starker Rückgang dieses Ereignisses zu verzeichnen. In den anderen Monaten treten deutlich weniger Tage mit hoher Windgeschwindigkeit auf. Der Trend für die Zukunft ist für die einzelnen Monate sehr unterschiedlich.

Strahlungsreiche Tage führen in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosynthese-Leistung. Die Tage mit hohen Globalstrahlungswerten (Rg > 2500 J/(m² d)) haben im Zeitraum April bis Juni in der Vergangenheit zugenommen. Die Klimaprojektionen zeigen über den gesamten Zeitraum für die Zukunft jedoch keinen eindeutigen Trend. Eine monatsweise Untersuchung ergibt eine Abnahme im April und Mai und eine Zunahme im Juni und Juli.

6.2 Ackerbau

Auf der Basis von Angaben aus der Literatur sowie mit Hilfe von Experten wurden zum einen für die Leitkulturen Weizen, Gerste, Raps, Mais und Zuckerrüben Zeiträume identifiziert, in denen

das Über- oder Unterschreiten bestimmter Schwellenwerte von Klimaparametern ein extremes Ereignis darstellt. Darüber hinaus wurde eine spezifisch auf biotische Auswirkungen ausgerichtete, systematische Literaturrecherche für den Zeitraum von 1945 bis zur Gegenwart parallel in verschiedenen Literaturdatenbanken durchgeführt. Obwohl Schaderreger unter gegenwärtigen Klimabedingungen Ertragsverluste von bis zu 40 % (ohne Pflanzenschutzmaßnahmen) verursachen können und es weltweit sehr viele Publikationen zum Einfluss des Klimawandels allgemein auf Schaderreger gibt, konnten nur 71 belastbare Arbeiten gefunden werden, die sich mit den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderreger in den in diesem Projekt untersuchten Acker- und Futterbaukulturen befassten. Die insgesamt lückenhafte Datenlage zu den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderregerauftreten und Schadwirkung ließ jedoch keine Schlussfolgerungen zu Risiken, Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen und für den Pflanzenschutz allgemein zu. Daher gingen die wenigen Daten nicht in die weiteren Auswertungen im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens ein. Um den für eine Folgenabschätzung erforderlich Bedarf an Primärdaten zu decken, besteht ein erhöhter Forschungsbedarf.

Die Auswirkungen extremer Wetterlagen auf den Ackerbau sind im Zusammenhang mit dem enormen technischen Fortschritt sowie dem Wandel der Ackernutzungsstruktur zu betrachten. Hervorzuheben sind die beträchtlichen Ertragssteigerungen, die seit den 1950er Jahren bis zum Jahr 2013 erzielt wurden. Während mit dem steigenden Ertragsniveau in der Regel eine Zunahme der absoluten Schwankungen der Erträge von Jahr zu Jahr einherging, war dies bei den relativen Änderungen nicht zu beobachten. Der Wandel der Ackernutzungsstruktur im Zeitraum von 1950 bis 2013 ist gekennzeichnet durch eine Zunahme des Ackerflächenanteils von 58 auf 71 % der LF zu Lasten des Grünlands. Auf der Ackerfläche wurden die Anbauanteile der wettbewerbsfähigsten Kulturarten Winterweizen, Winterraps und Mais (Silo- und Körnermais) kontinuierlich ausgedehnt. Diese strukturellen Veränderungen dürften die Verwundbarkeit des Ackerbaus gegenüber Extremwetterlagen tendenziell erhöht haben. Da sich hierbei vielfältige Effekte überlagern, sind die Einzelwirkungen nur schwer quantifizierbar.

Zur Abschätzung der Auswirkungen ausgewählter Extremwetterlagen auf den Ackerbau wurden die am Thünen-Institut vorliegenden Daten des Informationsnetzes landwirtschaftlicher Buchführungen (kurz: Testbetriebsnetz) verwendet und exemplarisch die Winterweizenerträge analysiert. Insgesamt wurde eine einzigartige, konsistente und regional sehr hoch aufgelöste Ertragsdatenbasis für 1995 bis 2013 zusammengestellt, die flächendeckend ca. 30.000 beobachtete Winterweizenerträge umfasste. Den heterogenen Standortbedingungen wurde mit einer Bodengütezahl, der berechneten nutzbaren Feldkapazität sowie mit der Höhe über Normal Null räumlich differenziert Rechnung getragen. Die Analyse der Auswirkungen von Extremwetterlagen auf den Winterweizen erfolgt mit Hilfe der Regressionsanalyse für möglichst homogene Anbaugebiete so genannte „Boden-Klima-Räume“.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Regressionsanalysen, mit denen beobachtete Ertragseinbußen plausibel reproduziert werden konnten, wurden erwartbare Schäden für einige Extremwetterlagen abgeschätzt. Dabei wurde auf der Basis der Standardabweichungen der Extremwet-

terlagen regionalspezifisch die Ausprägung der Variablen errechnet, die statistisch betrachtet alle 15 Jahre auftritt (Bezugszeitraum 1961-2013). Definitionsgemäß liegt diese Ausprägung um das 1,5-Fache der Standardabweichung über bzw. unter dem Mittel. Abweichend wurde für Kahlfrost eine Dauer von 7 Tagen unterstellt. Nach den Berechnungen liegen die Gesamtkosten für das betrachtete Kahlfrostereignis zwischen 30 und 45 Mio. Euro. Das Ergebnis hängt stark von den getroffenen Annahmen bezüglich des Anteils der ausgewinterten und neu zu bestellenden Fläche und dem Erzeugerpreis für Weizen, für den 200 Euro/t unterstellt wurden, ab.

Die Ertragsverluste infolge einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden hohen Anzahl an Tagen ohne Niederschlag in einer 30-tägigen Phase um den Vegetationsbeginn belaufen sich im sektoralen Durchschnitt auf rund 2 dt/ha. Der Minderertrag resultiert daraus, dass der ausgebrachte Dünger nicht gelöst und damit nicht pflanzenverfügbar wird. Regional sind erhebliche Unterschiede zu verzeichnen. Bundesweit würde die Weizenernte um 0,65 Mio. t geringer ausfallen und es würden 131 Mio. Euro weniger erlöst werden. Das Jahr 2003 fiel diesbezüglich etwas weniger extrem aus.

Die regional spezifischen Effekte einer statistisch alle 15 Jahre auftretenden Trockenheit in der Vegetationsperiode stellen im Vergleich zum Jahr 2003 eine extremere Trockenheit dar und führen nach den Berechnungen zu einem durchschnittlichen Ertragsrückgang um 3,2 dt/ha (2,7 dt/ha im Jahr 2003). Bezüglich der Anzahl an Hitzetagen (Tmit > 25 °C; 5. Mai bis 15. Juni) war das Dürrejahr 2003 extremer. Bundesweit waren es 14,4 Tage und damit mehr als die 10,7 Tage, die statistisch alle 15 Jahre zu erwarten sind. Für das Jahr 2003 errechnete sich ein Ertragsrückgang um durchschnittlich 3 dt/ha gegenüber 2 dt/ha bei einer Wiederkehrhäufigkeit alle 15 Jahre. Die regionalen Unterschiede sind jedoch beträchtlich. Die höchsten regionalen Ertragsrückgänge eines kombinierten Trockenheits- und Hitzestresses belaufen sich nach den Berechnungen auf bis zu 17 dt/ha. Dabei ist zu beachten, dass die Kombination dieser beiden Ereignisse nicht notwendigerweise statistisch alle 15 Jahre auftritt. Sie würde zu einem Ernteausfall bei Weizen in Höhe von 1,7 Mio. t führen, etwa 7 % der Erntemenge. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass beobachtete extreme negative Ertragsschwankungen in der Regel nicht auf eine singuläre Anomalie (Extremwetterlage) zurückzuführen sind. Sie waren oft das Ergebnis mehrerer extremer Wetterlagen. Beispielsweise kamen im Jahr 2003 Kahlfrost, Frühjahrstrockenheit sowie Trockenheit und Hitze während der Vegetationsphase zusammen.

6.3 Sonderkulturen

Im Rahmen des vorliegenden Verbundforschungsvorhabens konnten - in weiten Teilen erstmalig - die Relevanz von Extremwetterlagen im Sonderkulturanbau und mögliche zukünftige Herausforderungen zusammengefasst werden. Aufgrund der kurzen Laufzeit des Projektes und knapper Ressourcen wurden für Obst und Gemüse Leitkulturen ausgewählt und die Analyse auf bestimmte Anbaugebiete beschränkt. Im Gemüsebau wurde auf eine regionalisierte Betrachtung verzichtet.

Durch die Untersuchungen konnte ein umfassender Überblick der derzeit verfügbaren Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Extremwetterschädigungen in Sonderkulturen zusammengestellt werden. Dazu zählen beispielsweise Maßnahmen wie die Verwendung von Hagelnetzen, zusätzlicher Beregnung, verschiedener kulturtechnischer Maßnahmen sowie Standortwahl und Anlagengestaltung.

Aufgrund enger zeitlicher Vorgaben im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens bei gleichzeitig knappen Kapazitäten und oft erheblicher Datenlücken konnten nur für einige Sonderkulturen ökonomische Analysen möglicher Anpassungsmaßnahmen erarbeitet werden. Während für die Hopfenerzeugung keine und für den Anbau von Gemüse und Äpfeln nur sehr eingeschränkte und überwiegend qualitative Untersuchungen angestellt wurden, konnten für den Weinbau vergleichsweise weitreichende quantitative Analysen durchgeführt werden.

Apfel

Eine Analyse zur Relevanz von Extremwetterlagen wurde für den Apfelanbau exemplarisch in den beiden Anbaugebieten „Niederelbe“ und „Bodensee“ in enger Kooperation mit dem Esteburg Obstbauzentrum in Jork und dem KOB in Bavendorf durchgeführt. Mittels Expertenbefragungen und Literaturrecherchen ergab sich folgende Rangfolge für die fünf wichtigsten Extremwetterlagen: „Niederelbe“ (n = 18) 1. Hagel, 2. Spätfrost, 3. Überschwemmung/Staunässe, 4. Dauerregen, 5. Kahl-/Winterfrost und „Bodensee“ (n = 26) 1. Hagel, 2. Trockenheit, 3. Spätfrost, 4. Hitze, 5. Dauerregen. Hohe Schadenspotenziale identifizierten die Experten im Apfelanbau für Kahl- bzw. Winterfröste, Spätfrost, Hagel, Hitze, extreme Dürre und Dauerregen. Laut Expertenaussagen entstehen bei Hagel Ertragsverluste zwischen 30 bis 90 %. Exemplarische Auswertungen von Jahresberichten bestätigten die Einschätzung der befragten Experten an der „Niederelbe“. Eine Abfrage der im Rahmen der Untersuchungen definierten Schwellenwerte in Klimamodellen durch den DWD ergab, dass im Apfelanbau insbesondere das Risiko für Hitze (April-September), Dauerregen (März-April), Starkregen (März-Oktober) und deutlich erhöhter Abendtemperaturen (Mai-September) steigen kann. Für Hagel bieten die Klimamodelle keine Projektionen an. Vor allem in Bezug auf Hitze wird der östliche und südliche Teil Deutschlands stärker betroffen sein. Für Spätfrost könnte das Risiko nach DWD-Analysen abnehmen. Jedoch ist bereits heute ein deutlich früherer Beginn der Blüte im Apfelanbau zu beobachten, was dem aus meteorologischer Sicht sinkenden Spätfrostrisiko entgegen läuft. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Wein

Stellvertretend für den Weinanbau in Deutschland wurden im Rahmen der vorliegenden Studie in den Weinanbaugebieten „Pfalz“, „Rheinhessen“, „Franken“, „Nahe“ und „Rheingau“ Expertenbefragungen durchgeführt. Für die „Pfalz“ (n = 6), „Rheinhessen“ (n = 7) und „Franken“ (n = 6) konnten so regionale Ranglisten zur Relevanz von Extremwetterlagen generiert werden. Dabei zeigten sich zum Teil deutliche Unterschiede. In der „Pfalz“ und in „Rheinhessen“ wurde Hagel als relevanteste Extremwetterlage identifiziert, gefolgt von Spätfrost und Kahl- bzw. Winterfrost. In „Franken“ hingegen bewerteten die befragten Experten Trockenheit und Spätfrost als wichtigste Extremwetterereignisse, danach Dauerregen/Staunässe und Starkregen. Über alle Regionen ge-

mittelt geht ein starkes Schadpotenzial von Spätfrost, Hagel und Trockenheit aus. Für das Weinanbaugebiet „Pfalz“ konnte des Weiteren eine exemplarische Auswertung von Schadensmeldungen erfolgen, welche die Experteneinschätzungen weitgehend bestätigte. Analysen des DWD für den Weinbau ergaben für Hitze von Mai bis September, für Starkregen im April, Mai, September und Oktober, für Trockenheit im Juli und September sowie für zu hohe Herbsttemperaturen und zu hohe Wintertemperaturen (Eiswein) ein zunehmendes Risiko. Vor allem das laut Klimaprognosen abnehmende Risiko für Spätfröste kann auf Grund der bereits messbaren Verfrühung in der Rebenentwicklung – wie im Apfelanbau – noch nicht hinreichend eingeschätzt werden. Es besteht ebenfalls Forschungsbedarf.

Die ökonomische Bewertung von Anpassungsoptionen im Weinbau erfolgte auf Grundlage von zwei typischen Betrieben in Rheinhessen und Franken. Ein Vergleich der Anpassungsoptionen in beiden Regionen erweist sich als schwierig, da von den Experten jeweils unterschiedliche Optionen als praxisrelevant und umsetzbar eingeschätzt wurden. Während in Rheinhessen Minimalschnitt im Spalier (MSS) bereits eine gängige Erziehungsmethode im Weinbau zu sein scheint, stehen fränkische Winzer der Methode skeptisch gegenüber, obwohl die Region klimatisch bedingt noch stärker von Spätfrost gefährdet ist. Abgesehen von der geringeren Anfälligkeit bei Hagel und Spätfrost wäre MSS auch mit geringeren Arbeits- und Direktkosten bei nahezu gleichbleibenden Erträgen verbunden. Befürchtungen einer minderen Mostqualität aus MSS stehen einer breiten Einführung dieses Systems allerdings entgegen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Frostversicherungen wurden von den Experten als praxisuntauglich eingeschätzt, da Versicherungsunternehmen diese nur unter der Bedingung anbieten, dass alle Rebflächen eines Betriebes gegen Hagel und Frost versichert werden. Eine bloße Absicherung der besonders Spätfrost gefährdeten Rebflächen soll so vermieden werden. Dennoch sind die Prämien für eine Versicherung gegen Frost relativ hoch. Erste Einschätzungen zur Nachfrage und dem Abschluss solcher Versicherungen sind noch nicht möglich, da das Produkt relativ neu am Markt ist. Hagelversicherungen stellen in beiden Regionen eine Liquidität erhaltende Absicherung dar. Eine Investition in Hagelschutznetze könnte für baden-württembergische Weinbaubetriebe - aufgrund des dort durch die Gebirgsnähe bedingten höheren Hagelaufkommens – im Gegensatz zu nördlich gelegeneren Weinbaugebieten wie Rheingau oder Franken durchaus rentabel sein. Windmaschinen zur Vermeidung von Spätfrost sollten von Weinbaubetrieben in Betracht gezogen werden, sofern die betroffenen Lagen besonders Spätfrost gefährdet und für den Einsatz solcher Maschinen geeignet sind (keine Steillagen). Allerdings stellt die Finanzierung solcher Windmaschinen die Betriebe oftmals vor Schwierigkeiten. Förderungen insbesondere von Zusammenschlüssen betroffener Winzer könnten von Nutzen sein. Während Flaschenweinproduzenten mit einer kleineren Rebfläche notfalls Frostkerzen gegen Spätfrost aufstellen könnten, eignet sich diese Methode bei großen Rebflächen, bspw. für Fassweinproduzenten, nicht. Je nach Windverhältnissen kann der Wirkungsgrad der Frostkerzen jedoch schwanken. Die Probleme bei der Reaktion auf Trockenheit liegen weniger an fehlenden technischen Möglichkeiten als an eingeschränkten Wassernutzungsrechten in den Weinbaugebieten. Hier besteht politischer Handlungsbedarf mit Blick auf die Bewässerungsrichtlinien.

Hopfen

Das Hopfenanbaugebiet „Hallertau“ ist das weltweit größte seiner Art und diente im Rahmen dieses Projektes als Beispiel für die Untersuchung des Einflusses von Extremwetterlagen auf den Hopfenbau, wobei eng mit der Bayerischen LfL kooperiert werden konnte. Wie für Apfel und Wein wurden auch in der „Hallertau“ Experten (n = 34) hinsichtlich deren Einschätzung zur Relevanz verschiedener Extremwetterlagen befragt. Für den Hopfenanbau in der „Hallertau“ ist extreme Dürre am bedeutendsten, gefolgt von Hagel, Trockenheit, Hitze und Sturm. Die höchsten Schadenspotenziale resultieren aus Überschwemmung/Staunässe und Hagel. Im Vergleich zu Apfel und Wein sind Frostschäden im Hopfenanbau eher von geringer Bedeutung.

Gemüse

Für den Bereich des Gemüsebaus wurden Spargel (Bleichspargel), Speisezwiebeln, Möhren sowie Weiß- und Rotkohl aufgrund deren hoher Anbauumfänge in der deutschen Gemüseproduktion als Leitkulturen festgelegt. Zwar sind einige andere Kulturen stärker durch Extremwetterlagen gefährdet als die hier betrachteten, haben aber deutlich geringere Anbauflächen. So weisen Fink et al. (2009) und Expertenbefragungen DLR (2014) beispielsweise auf die besonders hohe Empfindlichkeit von Kopfsalat gegenüber Hitze und Hagel hin. Intensive Literaturrecherchen und Expertenbefragungen konnten zeigen, dass auch der Gemüsebau erheblich durch Schäden von Extremwetterlagen bedroht sein kann, im schlimmsten Fall bis hin zu Totalverlusten. Die Expertenbefragung (n = 47) ergab, dass im Gemüsebau Trockenheit, Hagel, Staunässe/Dauerregen, Starkregen und Hitze als besonders relevant einzuschätzen sind. Die Analysen des DWD zeigten, dass im Spargelanbau Hitze, Trockenheit, Dauer- und Starkregen (außer im Juli) sowie Sturm von März bis Mai und September an Bedeutung gewinnen können. Im Speisezwiebelanbau gilt das für Hitze, Trockenheit im März und Starkregen, im Möhrenanbau für Hitze, bei Weiß- und Rotkohl für Hitze und Starkregen.

Aufgrund des vorherrschenden Datenmangels konnten keine exemplarischen Analysen zu Ursache-Wirkungsbeziehungen im Gemüsebau erfolgen. Die Gewinnung geeigneter Daten wird aber als dringend notwendig erachtet, um die Zusammenhänge zwischen Extremwetterlagen und möglichen Verlusten im Gemüsebau quantifizieren und darauf aufbauend Anpassungskonzepte entwickeln zu können. Es besteht Bedarf an weiterführender Forschung.

6.4 Wald

Wälder bedecken in Deutschland mit 11,4 Mio. ha Fläche etwa 32 % der Landoberfläche und sind nach den landwirtschaftlich genutzten Flächen bundesweit die zweitgrößte Landnutzungsform. Mit ihren langen Bewirtschaftungszeiten von mehreren Jahrzehnten bis über einem Jahrhundert können Wälder besonders vom Klimawandel und der Verschärfung von Extremwetterlagen betroffen sein.

Anhand einer umfassenden Literaturrecherche konnten folgende relevanten Wetter- und Witterungsextreme identifiziert werden: Temperaturextreme mit den Komponenten Frost (Extremfrost), Spätfrost und Hitze, Wassermangel- bzw. -überschuss mit Nässe/Überflutung, Trockenheit, Dürre sowie Kahlfrost (Frosttrocknis) und mechanische Belastungen durch Sturm sowie Nassschnee/Eisanhang (Duftanhang). Zu den Extremereignissen mit hoher Bedeutung zählen Dürre (letale Trockenheit), die primär Jungpflanzen und Waldverjüngungen betrifft und Herbst- und Winter-Orkane, die ältere Waldbestände schädigen.

Trockenheitswirkung auf Jungbestände (Dürre)

Experimentalstudien an der Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) ergaben, dass Waldverjüngungen mit Buche und Fichte ab einem nutzbaren Rest-Bodenwasservorrat von unter 20 % (der nutzbaren Feldkapazität, nFK) in lebensbedrohlichen Trockenstress geraten. Auf diesem Schwellenwert aufbauende räumliche Modellierungen am Thünen-Institut für Waldökosysteme zeigten, dass kritische Trockenheit in weiten Teilen Ostdeutschland und vielen Gebieten Süddeutschlands zum Ende des 21. Jahrhunderts alle zwei bis fünf Jahre auftreten können. Dies betrifft aber nur Verjüngungen unter Nadelbaumbeständen mit Kiefer- und Fichte und kann nach Analysen des Thünen-Instituts für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie zu hohen ökonomischen Schäden führen. Unter Buche mit deutlich geringerer Interzeptionsverdunstung steigen die Trockenheitsgefahr und das ökonomische Schadenspotenzial dagegen nur geringfügig an. Ein geringeres Dürrerisiko der Verjüngung wird auch für Mischbestände mit Buchen und Nadelbäumen erwartet.

Sturmwirkung auf ältere Bestände

Nach Modellbetrachtungen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) wird die Vulnerabilität von Waldbeständen gegenüber Sturmschäden (Winterorkane) entscheidend von der Baumart (Fichte > Douglasie > Kiefer > Buche > Eiche) und der ansteigenden Dimension der Bäume (Höhe, Durchmesser) bestimmt. Bei den sturmempfindlichen Baumarten wie der Fichte oder der Douglasie nimmt die Vulnerabilität in jüngeren Beständen mit einem Brusthöhen-Durchmesser unter 30 cm (Fichte) oder 40 cm (Douglasie) stark ab. Forstökonomische Modellierungen (Thünen-Instituts für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie) ergaben unterschiedliche potenzielle ökonomische Einbußen durch Sturmschäden in Abhängigkeit vom schadfreien Erwartungswert (Douglasie > Fichte >> Kiefer > Buche >> Eiche) und von der restlichen Produktionszeit. Lange Produktionszeiträume erhöhen das ökonomische Schadpotenzial insbesondere bei Douglasien- und Fichtenbeständen mit hohen Erwartungswerten. Die ertragsstarken Baumarten Douglasie und Fichte können gegenüber Kiefer, Eiche und Buche ein deutlich höheres Schadniveau ökonomisch kompensieren.

Anpassungsoptionen

In Gebieten mit *Trockenheitsgefährdung* stellt der seit etwa drei Jahrzehnten laufende Waldumbau von reinen Nadelwäldern in Laub- und Mischwälder eine Anpassungsoption dar. Dies betrifft in Ostdeutschland vorwiegend den Umbau von reinen Kiefernwäldern in Rein- oder Mischbestände mit Buche, Eiche oder Winterlinde, in Süddeutschland reine Fichte- oder Kiefernbestände

in Rein- oder Mischbestände mit Buche, Eiche oder anderen Laubwaldarten. Die Gesamtsumme der hierdurch möglicherweise abgewendeten (zukünftigen) Schäden durch Klimaextreme liegt deutschlandweit bei mehreren hundert Millionen Euro. Geringer Handlungsdruck liegt im nordwestdeutschen Tiefland, in den höheren Lagen der Mittelgebirge und im Voralpenland vor.

In *sturmgefährdeten Gebirgslagen* (westexponierte Luv-Hanglagen, exponierte Kammlagen) kann die Verkürzung der Ziel-Brusthöhendurchmesser (BHD) bei der Beibehaltung von Nadelwäldern und Nadel-Mischwäldern eine Option sein. Bei Fichte könnte ein reduzierter Ziel-BHD in einer Größenordnung von 25 cm BHD, und bei Douglasie von 30 cm BHD liegen. Dies bedeutet eine erhebliche Reduktion der Produktionszeiträume für wüchsige Baumarten wie Fichte und Douglasie sowie eine erhebliche Verminderung der Vulnerabilität. Zusätzlich kann damit die hohe Nachfrage nach schwachen und mittelstarken Nadelholzsortimenten besser bedient werden. Die Alternative eines Umbaus von Reinbeständen beider Baumarten in weniger anfällige Laub- und Mischwälder wird durch einen zu erwartenden Erwartungswertverlust in einer Größenordnung von deutschlandweit 5 Mrd. € ökonomisch belastet. In die bestehende „Mischwald-Strategie“ vieler Forstbetriebe lassen sich beide Ansätze integrieren, wenn für die etwa 5 % stark sturmgefährdeten Gebirgsstandorte ein segregativer Ansatz gewählt wird und diese „Sonderstandorte“ bewusst einer entsprechenden besonderen Produktionsform zugeordnet werden. Ziel wäre einerseits, das Sturmschadensrisiko zu vermindern und andererseits stark nachgefragtes Nadelholz zu produzieren, dessen Anteil an der Gesamtwaldfläche stark sinkt.

6.5 Wassermanagement

Eine Wasserknappheit ist in Deutschland, zumindest gegenwärtig und auf nationaler Ebene, nicht gegeben. Die Niederschlagsverteilung, klimatische Wasserbilanz sowie die nutzbare Feldkapazität zeigen in Deutschland große regionale Unterschiede für die Vegetationsperiode. Es lassen sich Defizitstandorte ermitteln, an denen die Verdunstung höher ausfällt als der Niederschlag (Bsp. in Nordostdeutschland) und die Wirtschaftlichkeit des Anbaus einiger Fruchtarten durch Bewässerung verbessert werden könnte.

Auf der Basis der Landwirtschaftszählung 2010 wurden etwa 3,8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF) Deutschlands bewässert. Das größte geschlossene Beregnungsgebiet befindet sich in Nordost-Niedersachsen, weitere Beregnungsgebiete sind die Vorderpfalz, das Hessische Ried, das Niederrheingebiet sowie das „Knoblauchsland“. Den flächenmäßigen Hauptanteil der bewässerten Fruchtarten bildeten Getreide, gefolgt von Kartoffeln. Das verwendete Wasser wird vorwiegend aus dem Grundwasser entnommen, wobei große regionale Unterschiede bestehen. Zu etwa 80 % werden Beregnungsverfahren angewendet (20 % Tropfbewässerung).

Auf Standorten mit Gefahr zur Vernässung werden Entwässerungsverfahren angewendet. Diese können unter- sowie oberirdisch, als Dränung oder Grabenentwässerung, sowie frei oder reguliert erfolgen. Schätzungen nach werden in Deutschland 2 - 2,6 Mio. ha der LF durch Rohrdränung

entwässert, jedoch ist eine Ermittlung der tatsächlich existierenden Dränsysteme aufgrund der schlechten Datenlage kaum möglich. Stau- oder Grundwasser kann auf fast allen dafür in Frage kommenden Flächen abgeleitet werden. Der geltende Rechtsrahmen erlaubt in den meisten Fällen die Instandhaltung und Erneuerung bestehender Dränanlagen und Grabensysteme.

Sowohl Be- als auch Entwässerung dient in der Landwirtschaft zur Ertragssicherung sowie zur Abmilderung der Auswirkungen beim Eintreten von Extremwetterlagen. Die Ergebnisse verschiedener Bewässerungsversuche zeigen einen in bestimmten Grenzen linearen Verlauf der Mehrerträge durch Bewässerung. Auch durch Dränung kann eine Ertragszunahme erreicht werden. Die Rentabilität der Wassermanagementsysteme Bewässerung, Entwässerung, Wasserspeicher oder -überleitungen wird durch die dabei anfallenden Investitions-, Verfahrens- sowie Instandhaltungskosten bestimmt. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist die Gegenüberstellung des Nutzens (z. B. Erlöse durch Mehrertrag) entscheidend. Für Winterroggen und Silomais ist die Beregnung weder aktuell noch bei einem Preisanstieg um bis zu 20 % rentabel, während sie für Kartoffeln sogar bei einer Preisminderung um 20 % noch auf 97 % der aktuell rentablen Flächen bestehen bleibt.

In Deutschland werden einige großräumige Wasserüberleitungen zur Bereitstellung von landwirtschaftlichem Bewässerungswasser genutzt. Ausgehend von der technisch möglichen Verteilung des entnommenen Oberflächenwassers in einem Korridor von 2 km zu beiden Uferseiten ohne Inanspruchnahme weiterer Überleitungssysteme, könnten ca. 359.000 ha LF zusätzlich durch die Entnahme von Bewässerungswasser aus Kanalsystemen bewässert werden. Im Einzelfall ist das jedoch abhängig von den ackerbaulichen Voraussetzungen, den administrativen Anforderungen, der technischen Realisierbarkeit und schließlich der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit. Vor der Errichtung neuer Überleitungssysteme sollten zunächst alle Möglichkeiten, die regionalen Wasserressourcen besser zu bewirtschaften, sowie der Wasserbeschaffung und der Erhöhung der Effizienz der Wassernutzung im eigenen Einzugsgebiet beurteilt und ausgeschöpft werden. Die Planung für jede vorgeschlagene Wasserüberleitung muss sich nach den Grundsätzen einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung ausrichten, unter der aktiven Beteiligung aller Akteure auf lokaler, Landes- und Bundesebene.

Fördermöglichkeiten sollten sich auf ein Wassermanagement zur Abmilderung der Effekte von Extremwetterlagen, z. B. Trockenphasen, konzentrieren. Da schon heute in einigen Regionen der Wasserhaushalt durch die Bewässerung stark beansprucht wird, sollte sich eine Investitionsförderung zur Ausdehnung der Bewässerungsflächen an der regionalen Verfügbarkeit des Zusatzwassers orientieren (z. B. Gebietskulissen). Bewässerungsmaßnahmen sollten nur in den Gebieten mit einem ausreichenden Zusatzwasserdargebot gefördert werden und sich dort aus Gründen einer ressourcenschonenden Wassernutzung an bereits in Förderprogrammen einiger Bundesländer verfolgten Fokussierung auf wassersparende bzw. effizienzsteigernde Bewässerungsmaßnahmen konzentrieren. In Gebieten mit einem nicht mehr ausreichend verfügbaren Zusatzwasserdargebot böten sich Förderungen für eine Wasserbereitstellung aus anderen Gebieten an. Dabei sollte aber geprüft werden, ob der gesellschaftliche Nutzen die gesellschaftlichen Kosten

tatsächlich übersteigt, wenn Maßnahmen über die hier gezeigten Möglichkeiten der großräumigen Wasserüberleitung hinausgehen sollen. Die Förderung des Baus neuer, rein für die Bewässerung dienenden Wasserüberleitungssysteme ist ökonomisch und ökologisch fraglich. Unabhängig vom Zusatzwasserdargebot sollte eine Beratung zu wassersparenden Produktionsverfahren (Sortenwahl, Anbauweisen, Bodenbearbeitung) und Forschungsvorhaben zu wassersparenden Anbauverfahren bzw. Bewässerungstechnologien gefördert werden.

6.6 Beurteilung agrarpolitischer Maßnahmen

Die große Bedeutung von Wetterextremen für die Ertragssituation in der Landwirtschaft führt oft zu der Forderung nach (mehr) staatlicher Intervention. Grundsätzlich besteht jedoch eine erhebliche Gefahr, innerbetriebliche Anpassungsmaßnahmen sowie privatwirtschaftliche außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente zurückzudrängen und potenziell unerwünschte risikoreiche Anbausysteme zu fördern. Daher muss staatliches Handeln auf den Märkten für Risikomanagementinstrumente gut begründet sein und sollte sich zudem klar von Einkommenspolitiken abgrenzen. Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind staatliche Aktivitäten im Hinblick auf Risikomanagement in einer längerfristigen strategischen Perspektive zu beurteilen, um notwendige Anpassungen zu fördern statt diese zu verhindern.

In Deutschland wird staatliche Unterstützung für den Umgang mit Wetterextremen derzeit v.a. über einen stark ermäßigten Steuersatz für Versicherungen gegen ausgewählte Wetterrisiken, durch die Förderung von betrieblichen (z. B. Investition in Hagelnetze) und überbetrieblichen (z. B Hochwasserschutz) präventiven Maßnahmen sowie im Rahmen von Katastrophenhilfen in Form von Ausgleichszahlungen gewährt. Innerhalb der EU sind die öffentlichen Ausgaben für entsprechende staatliche Unterstützungsmaßnahmen im Zeitablauf zunächst deutlich angestiegen, haben sich dann aber in den letzten acht Jahren stabilisiert. Die Bedeutung der Förderung von Versicherungslösungen durch staatliche Prämienzuschüsse hat dabei in vielen EU- und nicht-EU-Ländern zugenommen. Auch wenn eine konkrete Wettbewerbsverzerrung durch höhere Subventionen für Versicherungsprämien in anderen EU-Ländern derzeit als weniger bedeutsam einzuschätzen ist, so sollte die deutsche Politik sowohl auf EU- als auch auf WTO-Ebene für eine regelmäßige, rigorose Überprüfung der staatlichen Förderung von Risikomanagementinstrumenten im Hinblick auf potenzielle Wettbewerbsverzerrungen eintreten.

Prioritäre Aufgabe des Staates sollte es sein, die Informationslage und -verbreitung zur Relevanz (Häufigkeit und Schadenshöhe) und zukünftigen Entwicklung agrarrelevanter Extremwetterlagen sowie zu den Möglichkeiten und Kosten von betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten weiter zu verbessern. Hierzugehören z. B. die Bereitstellung und Verbesserung regional differenzierter Wetterinformationen und -vorhersagen, insbesondere bzgl. regionaler extremer Wetterereignisse, sowie die Erforschung der kombinierten Wirkungen von Hitzestress und Trockenheit. Die Implementierung von Maßnahmen im Bereich des Wassermanagements erfordert in der Regel eine überbetriebliche Koordination. Hierbei ist staatliches Handeln gefordert, bestehende Rahmenbe-

dingungen weiterzuentwickeln. Zur (zukünftigen) Bedeutung von trockenheitsbedingten Ertragseinbußen für die Einkommensstabilität und Liquidität landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland liegen derzeit keine ausreichenden Erkenntnisse vor, die ein stärkeres staatliches Engagement für die Verbreitung von Versicherungslösungen erzwingen würden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die vorliegenden Ergebnisse des Verbundforschungsvorhabens zeigen, dass es eine Vielzahl von Strategien zum Umgang mit diesen Risiken gibt, deren Eignung je nach Betriebssituation und Betriebsleiterpräferenzen unterschiedlich ausfällt und über deren optimalen Einsatz nur auf einzelbetrieblicher Ebene entschieden werden kann. Dies unterstreicht, dass staatliches Handeln eine einseitige Förderung ausgewählter Risikomanagementinstrumente vermeiden sollte und – bei Beschränkung auf die Handlungsfelder mit Marktversagen – vergleichbare Fördersätze für unterschiedliche Risikomanagementinstrumente anstrebt werden sollten. Die Erfahrungen in anderen OECD-Ländern zeigen, dass auch bei staatlicher Förderung von Versicherungslösungen Ad-hoc-Hilfen ein wichtiges Instrument staatlichen Handelns bleiben. Um negative Nebenwirkungen von Ad-hoc-Hilfen zu reduzieren, sollte für diese Maßnahmen ein ‚good-governance' Rahmen entwickelt werden, in dem wichtige Parameter ex-ante festgelegt werden.

7 Literatur

AMI (2012) Warenstromanalyse Obst und Gemüse – Mengenbetrachtung. Unveröffentlichte Studie im Auftrag des Thünen-Instituts

Amtsblatt der Europäischen Union (2002) Verordnung (EG) Nr. 2012/2002 des Rates vom 11. November 2002 zur Errichtung des Solidaritätsfonds der Europäischen Union. 14.11.2002, L 311/3

Amtsblatt der Europäischen Union (2007) Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie HWRM-RL. Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. 6.11.2007, L 288/27-34

Amtsblatt der Europäischen Union (2013a) VERORDNUNG (EU) Nr. 1303/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Dezember 2013 mit gemeinsamen Bestimmungen über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung, den Europäischen Sozialfonds, den Kohäsionsfonds, den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums und den Europäischen Meeres- und Fischereifonds sowie mit allgemeinen Bestimmungen über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung, den Europäischen Sozialfonds, den Kohäsionsfonds und den Europäischen Meeres- und Fischereifonds und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1083/2006 des Rates.

Amtsblatt der Europäischen Union (2013b) VERORDNUNG (EU) Nr. 1308/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Dezember 2013 über eine gemeinsame Marktorganisation für landwirtschaftliche Erzeugnisse und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 922/72, (EWG) Nr. 234/79, (EG) Nr. 1037/2001 und (EG) Nr. 1234/2007.

Amtsblatt der Europäischen Union (2013c) vom 20.12.2013 L 347/487 Verordnung (EU) Nr. 1305/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2013 über die Förderung der ländlichen Entwicklung durch den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1698/2005.

Antón J et al. (2012) A Comparative Study of Risk Management in Agriculture under Climate Change. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 58, OECD Publishing. http://dx.doi.org/10.1787/5k94d6fx5bd8-en

Auerswald K (2002) Landnutzung und Hochwasser, In: Rundgespräche der Komission für Ökologie, Band 24 Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie, S. 67-76, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München

Bach M, Brandhuber R, Breitschuh T, Brunotte J, Bug J, von Chappuis A, Fröba, N, Henke W, Honecker H, Höppner F, Mosimann T, Ortmeier B, Schmidt W, Schrader S, Vorderbrügge T, Weyer T (2014) Gute fachliche Praxis - Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz, In: aid infodienst – Wissen in Bestform, Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V.(Hrsg.)

Backhaus GF (2005) Zwiebelanbau, Handbuch für Praxis und Wissenschaft. Fachverband Deutsche Speisezwiebel, Agrimedia, Bergen/Dumme, 282 S.

Bahrs E (2011) Diskussion und Bewertung der möglichen Einführung einer Risikoausgleichsrücklage zum Ausgleich von wetter- und marktbedingten Risiken in der Landwirtschaft. Abschlussbericht zum Projekt 514-06.01-2810HS002. Bonn: BLE. download.ble.de/10HS002.pdf

Basis-DLM (2013) Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM), Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.), 2013

Bauer K, Regner F & Schildberger B (2008) Weinbau, 8. überarbeitetete Auflage. Österreichischer Agrarverlag, Wien, 464 S.

Bauernverband (2013) Schätzung der Hochwasserschäden in der deutschen Landwirtschaft 2013, vom 18. Juni 2013, http://media.repro-mayr.de/34/574034.pdf. (Zugriff im April 2015)

Baumgarten C, Christiansen E, Naumann S, Penn-Bressel G, Rechenberg J, Walter AB (2011) Hochwasser - verstehen, erkennen, handeln, Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), Dessau-Roßlau

Becker P und A Hüttl (Hrsg.) (2014) Forschungsfeld Naturgefahren. DWD / GFZ – Publikation. Potsdam und Offenbach www.naturgefahrenforschung.de

Bender A (2015) Die ökonomische Bewertung von Anpassungsmaßnahmen im Weinbau an agrarrelevante Extremwetterlagen. Master-Arbeit Humboldt-Universität zu Berlin, in Kooperation mit dem Thünen-Institut für Betriebswirtschaft und der Vereinigten Hagelversicherung VVaG.

Beurton S, Thieken AH (2009) Seasonality of floods in Germany, Hydrological Sciences Journal, 54:1, 62-76

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014). Persönliche Übermittlung eines Datenlayers für die nutzbare Feldkapazität.

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014a) Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der Bundeswaldinventur. Bonn, 52 S.

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Versch. Jgg.

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014) Förderung Landwirtschaftlicher Unternehmen ab 2014. www.bmel.de, Abruf 21.05.2015.

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2015a) Nationale Strategie für nachhaltige operationelle Programme der Erzeugerorganisationen für Obst und Gemüse in Deutschland. www.bmel.de, Abruf 19.05.2015.

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2015b) Statistischer Monatsbericht. Versch. Jgg.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008) Deutsche anpassungsstartegie an den Klimawandel, Beschluss vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 in Berlin, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf

Bolte A, Czajkowski T, Kompa T (2007) The north-eastern distribution area of European beech - a review. Forestry 80:413-429.

Bolte A, Eisenhauer DR, Ehrhart HP, Groß J, Hanewinkel M, Kölling C, Profft I, Rohde M, Röhe P, Amereller K (2009) Klimawandel und Forstwirtschaft - Übereinstimmungen und Unterschiede bei der Einschätzung der Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungsstrategien der Bundesländer. Landbauforsch 59(4):269-278.

Bolte A, Hilbrig L, Grundmann B, Kampf F, Brunet J, Roloff A (2010) Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a Southern Swedish spruce–beech forest, Eur J Forest Res 129:261–276.

Brombach H, Jüpner R, Müller U, Patt H, Richwien W, Vogt R (2013) Hochwasserschutzmaßnahmen. In: Patt H (ed) Hochwasser-Handbuch, Auswirkungen und Schutz. 7 Berlin[u.a.]: Springer Vieweg, pp 313-433 XXIV, 696 S.

Büchele M (2015) Persönliche Mitteilung. Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee.

Bundesregierung (2014) Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Sven-Christian Kindler, Peter Meiwald, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/1889 – Mittelabfluss aus dem Fluthilfefonds 2013

für Aufbaumaßnahmen. Deutscher Bundestag Drucksache 18/2124. 18. Wahlperiode 15.07.2014

Cordier J (2014) Comparative analysis of risk management tools supported by the 2014 US Farm Bill and the CAP 2014-2020. Study IP/B/AGRI/IC/2014-044, December, Brussels, European Parliament.

Crüger G (1991) Pflanzenschutz im Gemüsebau, 3. Auflage. Ulmer, Stuttgart, 344 S.

Crüger G, Backhaus GF, Hommes M, Smolka S, Vetten HJ (2002) Pflanzenschutz im Gemüsebau, 4. Auflage. Ulmer, Stuttgart, 320 S.

Czajkowski T, Schill H (2013) Ableitung von Absterbewahrscheinlichkeiten der Baumartenverjüngung bei Buchen und Fichten durch Trockenheit im Zusammenhang mit dem Auftreten von Extremwetterereignissen in Deutschland. Schlussbericht vom Entscheidungshilfe-Vorhaben (EH2) FKZ 2813HS003, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung (HNE) Eberswalde (nicht publ.).

Davis RM, Raid RN (2002) Compendium of Umbelliferous Crop Diseases. American Phytopatholo-gical Society, St. Paul, USA, 110 S.

Deutschländer T, Dalelane C (2012) Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderungen des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Abschlussbericht eines Forschungsvorhabens der ressortübergreifenden Behördenallianz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Bundesanstalt Technisches Hilfswerk. Deutscher Wetterdienst. Umweltbundesamt. Offenbach am Main, 2012.

Disse M (2013) Kap. 3 Hydrologische Grundlagen, In: Hochwasser Handbuch – Auswirkungen und Schutz, Patt, J, Jüpner, R. (Hrsg.), Springer Verlag Berlin und Heidelberg, S. 17-88, 2. Auflage

DüngeVO (2006) Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2012) Klimastatusbericht 2012. www.ksb.dwd.de. ISSN 1616 - 5063 (Internet)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2015) www.deutscher-klimaatlas.de. Erläuterungen zu den Klimaszenarien: Perzentile (Internet)

Ehret U, Bárdossy A. (2003) Hochwasser – Sattsfeind Nr. 1, Origonalveröffentlichung in: Wechselwirkungen, Jahrbuch aus Lehre und Forschung der Universität Stuttgart (2002), S. 52 – 64, http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2003/1575 (Zugriff im April 2015)

EU-Kommission (2015) Die GAP bis 2020 Umsetzung der Politik zur Entwicklung des ländlichen Raumes. Aktueller Stand der EPLRs. Inoffizielle Übersetzung. Präsentation von Mihail Dumitru (Stellvertretender Generaldirektor) Generaldirektion für Landwirtschaft und ländliche Entwicklung. Schriftliche Mitteilung. Stand 15.2.2015

European Forest Genetic Resources Programme [EUFORGEN] (2009) Distribution map of *Fagus sylvatica*. Online unter:http://www.euforgen.org/fileadmin/www.euforgen.org/Documents/Maps/JPG/Fagus_sylvatica.jpg. (Zugriff am 13.04.2015).

Expertenbefragung OVR (2014) Expertenbefragungen am Obstbauversuchsring des Alten Landes e.V. in Jork.

Expertenbefragungen DLR (2014) Expertenbefragungen am Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz in Neustadt/Weinstr. und Rheinhessen-Nahe-Hunsrück in Bad Kreuznach.

Expertenbefragungen KOB (2014) Expertenbefragungen am Kompetenzzentrum Obstbau- Boden-see in Bavendorf.

Expertenbefragungen LfL Bayern (2014) Expertenbefragungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau, Arbeitsbereich Hopfen.

FAOSTAT (2014) Produktionsstatistik zu Hopfenanbau in der Welt 2012. Online: http://faostat3.fao.org/home/E Zugang: 17.11.2014

Federer CA (2002) BROOK 90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. Online unter: http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm (Zugriff am 13.04.2015).

Federer CA, Vörösmarty C, Fekete B (2003) Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. J Hydrometeorology 4:1276-1290.

Feil JH, Mußhoff O (2014) Abwendung bzw. Reduzierung negativer wirtschaftlicher Folgen von Extremwetterereignissen für die Landwirtschaft in Deutschland - Bewertung von Versicherungslösungen und anderen Instrumenten des Risikomanagements. Abschlussbericht FKZ 2813HS006

Feller C (2013) Bewässerung im Freilandgemüsebau, Vortrag bei der Veranstaltung „Feldbewäs-serung unter dem Aspekt von Klimawandel und Wirtschaftlichkeit, Görlitz 27.06.2013, http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/03_Bewaesserung_Gartenbau_Feller.pdf.

Fischer M (2002) Apfelanbau – integriert und biologisch. Ulmer, Stuttgart, 224 S.

Freier B, Sellmann J, Schwarz J, Klocke B, Moll E, Gutsche V, Zornbach W (2012) Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz – Jahresbericht 2011 – Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2011. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 166, 104 S.

Fricke E, Riedel A (2011) Erträge durch Beregnung absichern. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. http://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/185,da174b08-237d-eebf-5e2f59f7f94d9228~pdf.html.

Friedrich G (1993) Handbuch des Obstbaus. Neumann Verlag, Radebeul, 621 S.

Frielinghaus M, Deumilch D, Funk R, Helming K, Thiere J, Völker L, Winnige B, Gelfort F, Rohlfs W, Schäfer H, Speer R (2002) Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern, Bodenerosion, 2. überarbeitete Auflage, Herausgeber: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/bodenerosion.pdf

Frietsch M (2014) Deutsche Kohlsorten. https://www.planet-wissen.de/alltag_gesundheit/essen/kohlgemuese/kohlsorten.jsp. April 2015

Gause (2010) Ernte-Mehrgefahrenversicherungen als Teil der Klima-Anpassungsstrategie. In: Ländlicher Raum 03/2010, S. 53.

GDV – Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2014) Online-Serviceteil zum Naturgefahrenreport 2014. Tabellen, Grafiken und Karten. www.gdv.de/naturgefahrenreport2014.

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadensituation in der deutschen Versicherungswirtschaft, Kurzfassung Hochwasser, Studie im Auftrag des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Auftragnehmer: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Freie Universität Berlin (FUB), Universität zu Köln (UK), Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG), http://www.gdv.de/wpcontent/uploads/2012/01/Klimakonferenz_2011_PIK_Studie_Hochwasser.pdf

GDV – Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2008) Konzept einer umfassenden und nachhaltigen Mehrgefahrenversicherung für landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland.

Geiger B, Stephani-Pessel H, Steinhardt U (2010) Zwischen Trockenheit und Überflutung – die Notwendigkeit einer raumbezogenen Gesamtstrategie zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels, In: Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen; Kaiser, K. Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), Scientific Technical Report STR 10/10, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Projekte/Laufende_Projekte/Georessource_Wasser/STR10-10.pdf

Gerstengarbe FW, Werner PC (2007) Der rezente Klimawandel. In Endlicher W und Gerstengarbe FW (Hrsg.) (2007) Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. ISBN-Nr. 978-3-9811871-0-6. Berlin und Potsdam, 2007

Geßler A, Keitel C, Kreuzwieser J, Matyssek R, Seiler W, Rennenberg H (2007) Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L,) in a changing climate, Trees – Structure and Function 21:1–11.

Gömann H (2015) How much did extreme weather events impact wheat yields in Germany? A regionally differentiated analysis on the farm level. Oral Presentation. International Conference on "Agriculture and Climate Change", February 15th to 17th, 2015, Amsterdem (NL).

Gömann H, Witte T de, Peter G, Tietz A (2013) Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landwirtschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 78 p, Thünen Rep 10

Graw M (2005) Hochwasser - Naturereignis oder Menschenwerk? In: Schriftenreihe Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. (Hrsg.) Bonn, Band 66, 3. Auflage

Haensch J, Weigel HJ, Manderscheid R (2014). Resultate eines Klimakammerexperiments zur Wirkung von Hitzestress während der Anthese auf das Kornwachstum bei Weizen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 26, 194-195

Hattermann FF, Huang S, Burghoff O, Willems W, Österle H, Büchner M, Kundzewicz ZW (2014) Modelling flood damages under climate change conditions - a case study for Germany. - Natural Hazards and Earth System Sciences, 14, 12, S. 3151-3168

Hennegriff W, Kolokotronis V, Weber H, Bartels H (2006) Klimawandel und Hochwasser, Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim hochwasserschutz, In KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall, S. 768-779, 19.07.2006 (53) Nr. 8, http://www.kliwa.de/download/klimawandel_hochwasser.pdf

Hickler T, Bolte A, Hartard B, Beierkuhnlein C, Blaschke M, Blick T, Brüggemann W, Dorow WHO, Fritze M-A, Gregor T, Ibisch PL, Kölling C, Kühn I, Musche M, Pompe S, Petercord R, Schweiger O, Seidling W, Trautmann S, Wellbrock N, et al (2012) Folgen des Klimawandels für die Biodiversität in Wald und Forst. In: Mosbrugger V, Brasseur GP, Schaller M, Stribnry B (eds) Klimawandel und Biodiversität : Folgen für Deutschland. Darmstadt: Wiss Buchges, 164-220.

Hochwasserschutzfibel (2013) Hochwasserschutzfibel – Objektschutz und bauliche Vorsorge, Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 5. Auflage, Juli 2013, http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/hochwasserschutzfibel_2.pdf?__blob=publicationFile

Hoppmann D (2010) Terroir – Wetter, Klima, Boden, 1. Auflage, Ulmer, 224 S.

Hornemann C, Rechenberg J (2006) Was Sie über vorsorgenden Hochwasserschutz wissen sollten, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, https://www.ufz.de/export/data/1/26724_Hochwasserschutz.pdf (Zugriff im April 2015)

Hortipendium (2014) Hortipendium – Das Grüne Lexikon, http://www.hortipendium.de /Portal:Pflanzenschutz.

Hov Ø, Cubasch U, Fischer E, Höppe P, Iversen T, Kvamstø NG, Kundzewicz ZW, Rezacova D, Rios D, Duarte Santos F, Schädler B, Veisz O, Zerefos C, Benestad R, Murlis J, Donat M, Leckebusch GC, Ulbrich U (2013) Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation. ISBN 978-82-7144-100-5. www.dnva.no

Huang S, Krysanova V, Hattermann FF (2015) Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. Reg Environ Change 15(3): S. 461-473. DOI: 10.1007/s10113-014-0606-z

Hydrotec (2001) Hochwasser-Aktionsplan Angerbach, Teil 1: Bericht und Anlagen (Im Auftrag des StUa Düsseldorf), Aachen

IPCC (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

Jaeckel A, Voigt M, von Tümling W (2009) Schadstoffbelastungen durch Hochwasser - Deichvorländer und Auen - ein ökonomisches Problem?, In: Neue Landwirtschaft, 12/ 2009, S. 30-31

Jakob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, De´que´ M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B, Yiou P (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg Environ Change (2014) 14:563–578

Janssen W (2009a) Beschreibung des Interpolationsverfahrens. Abteilung Agrarmeteorologie, DWD intern. Unveröffentlichtes Manuskript.

Janssen W (2009b) Definition des Vegetationsanfanges. Abteilung Agrarmeteorologie, DWD intern. Unveröffentlichtes Manuskript.

Katzenberger B (2012) Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen, 5. KLIWA-Symposium Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft am 06. Und 07. Dezember 2012 in Würzburg, Kurzfassungen der Vorträge S. 12, http://www.kliwa.de/download/symp2012/KLIWA-Symp-5.pdf

KELLER JK (2010) Ernteversicherungen als Risikomanagementinstrument. Eine Analyse von Versicherungstypen und Tarifierungsmodellen. Dissertation am Institut für Agrarpolitik und Marktforschung der Justus-Liebig-Universität Giessen.

Klein W (2011) Mitteilungen des Obstbauversuchsrings, Der Verlauf des Jahres 2009- 2010 beim Kernobst an der Niederelbe: 8-13.

KLIWA – Klimaveränderungen und Wasserwirtschaft (2002) Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, Im KLIWA-Prokekt A. 2.1.3, Arbeitskreis KLIWA (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Deutscher Wetterdien KLIWA-Berichte), Heft 2, http://www.kliwa.de/download/KLIWAHeft2.pdf

KLIWA Monitoringbericht (2011) Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens

KLIWA, korrigierte Version vom 13.04.2012, http://www.kliwa.de/download/KLIWA_Monitoringbericht_2011.pdf

KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland (2015) Abschlussbericht des BMVI – Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnisen des Forschungsprogramms KLIWAS, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Rostock http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile

Knoke T, Ammer C, Stimm B, Mosandl R (2008) Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. Eur J Forest Res 127(2): 89-101.

Knoke T, Stimm B, Ammer C, Moog M (2005) Mixed forests reconsidered: a forest economics contribution on an ecological concept. For Ecol Manage 213(1): 102-116.

König S (2014) Bedeutung von Extremwetterlagen für den Obstanbau an der „Niederelbe“, Hoch-schule Osnabrück.

Köstner B, Kuhnert M (2011) Simulation von Wasserhaushaltskomponenten unter dem Wandel des regionalen Klimas, In: Globaler Wandel und regionale Entwicklung – Anpassungsstrategien in der Region Berlin-Brandenburg, Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Band 26, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

Krengel S, Louis F, Krauthausen HJ (2015) Agrarrelevante Extremwetterlagen – Sonderkulturen. Schlussbericht. Entscheidungshilfe-Vorhaben des BMEL FK 2813HS002. Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz.

Krug H, Liebig HP, Stützel H (2003): Gemüseproduktion, Ulmer, Stuttgart.

LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2014) Nationales Hochwasserschutzprogramm Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen sowie ein Vorschlag für die Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes beschlossen auf der Umweltministerkonferenz am 24. Oktober 2014 in Heidelberg. Ständiger Ausschuss der LAWA ”Hochwasserschutz und Hydrologie (AH)”. http://www.lawa.de

LfL (2015a) LfL- Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Speisezwiebeln (Sommeranbau). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. https://www.stmelf.bayern.de/idb/speisezwiebeln.html. April 2015

LfL (2015b) LfL- Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Weißkohl (Industrieware). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. https://www.stmelf.bayern.de/idb/weisskohl.html. April 2015

LfL (2015c) LfL- Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Karotten (Industrieware). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. https://www.stmelf.bayern.de/idb/karotten.html. April 2015

LfL Bayern (2009) Hopfen, Krankheiten – Schädlinge, Nichtparasitäre Schadbilder, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/p_33873.pdf.

LfL Bayern (2013) Grünes Heft Hopfen 2013, Empfehlungen zu Anbau, Sorten, Düngung, Pflan-zenschutz und Ernte. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau, Arbeitsbereich Hopfen, Wolnzach (Hrsg.), LfL.

Lilienthal H (2013) Konzeption einer „mehrdimensionalen Matrix“ sensitiver Vegetationszeiträume, Schwellenwerte und regionaler Differenzierung agrarrelevanter Extremwetterlagen. Unveröffentlichtes Manuskript.

Link H (2002) Lucas' Anleitung zum Obstbau, 448 S.

Lobell DB, Sibley A, van Ortiz-Monasterio JI (2012) Extreme heat effects on wheat senescence in India. Nature Climate Change 2, 186–189 (2012) doi:10.1038/nclimate1356

Löpmeier F-J (2013) Die Auswirkung der extremen Bodenfeuchte Ende Mai 2013, S. 14-16 in: Länderübergreifende Analyse des Juni-Hochwassers 2013. Bericht im BfG - 1797, 69 Seiten

Lüttger A, Dittmann B, Sourell H (2005) Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung. Brandenburg. Frankfurt (Oder).

Lutz A, Kneidl J, Seigner E & Kammhuber K (2009) Hopfenqualität - Ernte zum richtigen Zeitpunkt. In: LfL-Information, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.).

LWK-NI (2015) Kurzinformation AFP 2015, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/foerderung/nav/511.html, (Mai 2015)

Maniak U (2001) Wasserwirtschaft - Einführung in die Bewertung wasserwirtschaftlicher Vorhaben, Springer Verlag, Berlin, 304 S., ISBN 3-540-59206-7

Mathan C (2013) Hochwasser: natur- oder menschgemacht?, In LandInForm Magazin für Ländliche Räume, 4/2013

Merz B, Kreibich H, Rudolf B (2014) Hochwasser In: Becker, P, Hüttl, R. (Hrsg.) Forschungsfeld Naturgefahren, Deutscher Wetterdienst Offenbach, S. 14-23

Merz B, Maurer T, Kaiser K (2012) Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren?, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 56, 5, S. 244-255, http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:245736:1/component/escidoc:245735/19183.pdf

Meuser A (2012) Hydrologisches Monitoring – Langzeitverhalten der Wasserhaushaltsgrößen, 5. KLIWA-Symposium Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft am 06. Und 07. Dezember 2012 in Würzburg, Kurzfassungen der Vorträge S. 11, http://www.kliwa.de/download/symp2012/KLIWA-Symp-5.pdf

Meyer G (2004) Der Verlauf des Jahres 2003/2004 beim Kernobst an der Niederelbe. Mitteilun-gen des Obstbauversuchsrings: 469 ff.

MLR (2014) – Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) - Teil A. Ministerium Für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/MLR.Foerderung,Lde/Startseite/Foerderwegweiser/Agrarinvestitionsfoerderungsprogramm+_AFP_+_+Teil+A (April 2015)

MLR (2015) Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, http://www.landwirtschaft-bw.info/pb/,Lde/2030665 (Mai 2015)

MLU Sachsen-Anhalt (2013) Merkblatt über die Gewährung von Hilfen an vom Hochwasser betroffene landwirtschaftliche Unternehmen, Stand: 28.08.2013, vom Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt

Morton LW, Hobbs J, Arbuckle JG, Loy A (2015) Upper Midwest Climate Variations: Farmer Responses to Excess Water Risks. Journal of Environmental Quality. Vol. 44 no. 3. S.810-822. http://dx.doi.org/10.2134/jeq2014.08.0352

Müller E, Lipps HP & Walg O (2008) Der Winzer, 3. überarbeitete Auflage, Ulmer, Stuttgart, 567 S. 126 Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz, Neustadt a. d. Weinstr. BLE Verbundprojekt 2813HS002

Müller J (2011) Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands. Waldökol Landschaftsforsch Natursch 12:37-46.

Mußhoff O, Hirschhauer N (2013): Risikomanagement wetterbedingter Erfolgsrisiken aus Sicht landwirtschaftlicher Unternehmen. agrarspectrum 46, S. 101-118, Frankfurt am Main: DLG-Verlag-GmbH.

Niedermeier E (2011) Witterung 2011. In Jahresbericht 2011, Sonderkultur Hopfen, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft(Hrsg.), Wolnzach-Hüll: 32.

Oberhofer J (2012) Strategien zur Verminderung von Spätfrostschäden. Tagungsband 65. Pfälzi-sche Weinbautage: 62 – 65.

OECD (2009) Managing risk in agriculture : a holistic approach.

OECD (2011a) Managing risk in agriculture : policy assessment and design.

OECD (2011b) Risk management in agriculture: what role for governments? http://www.oecd.org/agriculture/agricultural-policies/49003833.pdf

Otte U, Frühauf C (2011) Maisanbau im Klimawandel. Mais 3/2011, 132-135

OVA (2013) Arbeitstagebuch für das Obstjahr 2013. Obstbauversuchsanstalt Altes Land e.V., Jork.

Paeth H (2007) Klimamodellsimulationen. In Endlicher W und Gerstengarbe FW (Hrsg.) (2007) Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. ISBN-Nr. 978-3-9811871-0-6. Berlin und Potsdam, 2007

Patt H, Jüpner R (2013) Kap. 1: Einführung in die Thematik In: Patt H, Jüpner R (Hrsg.) Hochwasser – Handbuch Auswirkungen und Schutz, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1-9, 2. Neu bearb. Auflage

Petrow T (2009) Dissertation, Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002, https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/index/index/docId/3635

Petrow T, Merz B (2009) Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002, Journal of Hydrology 371 (2009), S. 129-141, Elsevier

Petrow T, Zimmer J, Merz B (2009) Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns.-Natural Hazards and Earth System Science (NHESS), 9,4, 1409-1423

Podbregar N, Lohmann D (2015) Im Fokus: Naturkatastrophen zerstörerische Gewalten und tickende Zeitbomben, In: Naturwissenschaften im Fokus, Springer Verlag Berlin, http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=4528479&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm (Zugriff April 2015)

Portner J (2009) Versuch zur Hopfenpflege nach dem Hagelsturm vom 26.05.2009. In: Jahresbe-richt 2009, Sonderkultur Hopfen, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): 65-68.

Quast P (1986) Düngung, Bewässerung und Bodenpflege im Obstbau: 181.

Rebschutzdienst (2014) http://www.rebschutzdienst.at/index.php?option=com_content &view=article&id=144&Itemid=127.

Richter A, Adler GH, Fahrak M, Eckelmann W (2007) Erläuterungen zur nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000. – Erläuterungsband mit 3 Karten; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Rimmer SR, Shattuck VI and Buchwaldt L (2007) Compendium of Brassica Diseases, American Phytopathological Society, St. Paul, USA, 117 S.

RL Hochwasserschäden Sachsen-Anhalt (2013) Richtlinie über die Gewährung zur Beseitigung der Hochwasserschäden 2013 (RL Hochwasserschäden Sachsen-Anhalt 2013) Gemeinsamer RdErl. StK, MF, MI, MLV, MWW, MLU, MK, MS, vom 02. August 2013

Röhrig M (2015) Persönliche Mitteilung. Zentrum für Betriebswirtschaft im Gartenbau e. V. Leibniz Universität Hannover

Roßberg D, Volker M, Graf R, Neukampf R (2007) Boden-Klima-Räume und An-baugebiete als Basis des regionalisierten Sortenwesens in Deutschland. Beiträge zum Sorten- und Versuchswesen und zur Biostatistik Heft 37:24-30.

Rotermund H (2010) Gutachterliche Abschätzung möglicher Schäden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im geplanten Hochwasserschutzpolder Bullenbruch, Landwirtschaftkammer Neidersachsen (Hrsg.), http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.nlwkn.niedersachsen.de%2Fdownload%2F52286%2FLandwirtschaftskammer_Niedersachsen_-_Gutachten.pdf&ei=ONcCVeCOI4PdUfrJgegI&usg=AFQjCNEccYzjPflOoOaS-BD9Okh99-coqA&bvm=bv.88198703,d.d24 , 2007 mit Nachtrag vom August 2010, (Zugriff April 2015)

Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger M, Appenzeller C. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. Nature 427:332-336.

Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Schuck A (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries, Global Change Biol 9:1620–1633. Schlyter P, Stjernquist I, Bärring L, Jönsson AM, Nilsson C (2006) Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce, Clim Res 31:75–84.

Schittenhelm S, Kraft M, Wittich K-P (2014) Performance of winter cereals grown on field-stored soil moisture only. Eur J Agron 52(Part B.):247-258

Schmidt M (2014) Analyse und Projektion der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern. Schlussbericht vom Entscheidungshilfe-Vorhaben (EH3) Agrarrelevante Extremwetterlagen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen (nicht publ.).

Schmidt M, Hanewinkel M, Kändler G, Kublin E, Kohnle U (2010) An inventory-based approach for modelling single-tree storm damage – experiences with the winter storm 1999 in southwestern Germany. Can J For Res 40:1636-1652.

Schober R (Hrsg,) (1975) Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung, Frankfurt, Sauerländers Verlag, 154 S.

Schönwiese (2007) Wird das Klima extremer? Eine statistische Perspektive. In Endlicher W und Gerstengarbe FW (Hrsg.) (2007) Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. ISBN-Nr. 978-3-9811871-0-6. Berlin und Potsdam, 2007

Schröder R, Auerswald K (2000) Modellierung des Jahresgangs der verschlämmungsinduzierten Abflussbildung in kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten, ZKL – Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, Heft 4/2000, Wissenschaftsverlag Berlin, 41: 167-172

Schwartz HF und Mohan SK (2008) Compendium of onion and garlic diseases and pests, 2nd Edition. American Phytopathological Society, St. Paul, USA, 127 S.

Seidel P (2014) Extremwetterlagen und Schaderreger – extreme Wissenslücken, 2. Apfel, Spargel, Wein und Hopfen. Gesunde Pflanzen 66: 93-101 .

Seidel P (2014a) Extremwetterlagen und Auswirkungen auf Schaderreger – extreme Wissenslücken ; 1. Weizen, Gerste, Mais, Raps, Kartoffel, Zuckerrübe, Ackerfutterpflanzen und Grünland. Gesunde Pflanzen 66, S. 83-92, DOI 10.1007/s10343-014-0319-8)

Seidel P (2014b) Extremwetterlagen und Schaderreger – extreme Wissenslücken ; 2. Apfel, Spargel, Wein und Hopfen. Gesunde Pflanzen 66, S. 93-101, DOI 10.1007/s10343-014-0323-z).

Seidel P (2014c) What do we know about impacts of extreme weather on plant pests - nearly noth-ing? Our Climate – Our Future. Regional perspectives on a global challenge. International REKLIM Conference, 6-9 October 2014, Umweltforum Auferstehungskirche Berlin, Ger-many Lemke, P.; Grosfeld, K.; Treffeisen, R.; Weigelt, M. (eds.) GeoUnion. Potsdam Heft: 2014/1, Seite(n): 98-99 TERRA NOSTRA : Schriften der GeoUnion Alfred-Wegener-Stiftung

SMUL (2012) Hochwasser geht alle an! Hochwasserrisikomanagement im Freistaat Sachsen, Referat Oberflächengewässer, Hochwasserschutz, Öffentlichkeitsarbeit, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) (Hrsg.), Dresden im Juni 2012, 2. Auflage, unverändert

Stahl H, Zacharias S, Röhricht C (2005) Veränderte Landnutzungssysteme in hochwassergefährdeten Gebieten, In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Heft 12 - 10. Jahrgang 2005

Statistisches Bundesamt (2012) Baumobstflächen 2012, Fachserie 3 Reihe 3.1.4

Statistisches Bundesamt (2013a) Gemüseerhebung 2012, Fachserie 3 Reihe 3.1.3

Statistisches Bundesamt (2013b) Wachstum und Ernte Obst 2012, Fachserie 3 Reihe 3.2.1

Statistisches Bundesamt (2014a) Betriebe mit Weinbau, Fachserie 3 Reihe 2.2.3

Statistisches Bundesamt (2014b) Weinerzeugung, Fachserie 3 Reihe 3.2.2

Statistisches Bundesamt (2014c) Rebflächen, Fachserie 3 Reihe 3.1.5

Statistisches Bundesamt (2015) Gemüseerhebung für das Jahr 2014 Fachserie 3 Reihe 3.1.3. Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (2015) https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/ Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/LandForstwirtschaft.html;jsessionid=CB0AFE4A5578546968A5CD297905C8AC.cae1.

Steffens M (2013) Rückblick auf die Sonnenbrandsituation in 2012 - Bericht aus Sicht der Bera-tung. Mitteilungen des Obstbauversuchsrings Jork e.V.: 119-121.

STMELF (2014a) Bayerisches Sonderprogramm Landwirtschaft (BaySL), Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, http://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/021130/index.php (Mai 2015)

STMELF (2014b) Bayerisches Programm zur Stärkung des Weinbaus – Teil A: Umstrukturierung und Umstellung von Rebflächen (WBA), Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, http://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/057013/index.php (Mai 2015)

Sturm K, Glaser R, Jacobeit J, Deutsch M, Brázdil R, Pfister C, Luterbacher J, Wanner H (2001) Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulati-on, Pettermanns Geographische Mitteilungen, 145, 2001/6, S. 14-23, Justus Perthes Verlag Gotha GmbH

Tangermann S (2011) Risk Management in Agriculture and the Future of the EU's Common Agricultural Policy. ICTSD, Issue Paper 34. http://www.ictsd.org/downloads/2011/12/risk-management-in-agriculture-and-the-future-of-the-eus-common-agricultural-policy.pdf

Thünen-Institut (2015) Dritte Bundeswaldinventur (2012) – Ergebnisdatenbank. Online unter: https://bwi.info (Zugriff 28.03.2015).

Tiedemann Av (2013) Stress und Abiotische Schadfaktoren, Temperatur – Hitze, Kälte, Frost: 41 ff. In: Lehrbuch der Phytomedizin, Poehling, H.-M. & Vereet, A.-J. (Hrsg.), Ulmer, Stuttgart, 600 S.

Topagrar (2013 a) Regionale Ertragseinbußen bei Mais zu erwarten, In: Topagrar.com, veröffentlicht am 05.06.2013 unter: http://www.topagrar.com/news/Acker-Wetter-Ackernews-Regionale-Ertragseinbussen-bei-Mais-zu-erwarten-1159135.html (Zugriff im April 2015)

Topagrar (2013 b) Wasser ohne Ende: Die Hochwasser-Zusammenfassung, In:Topagrar.com veröffentlicht am 23.06.2013 unter: http://www.topagrar.com/news/Home-top-News-Wasser-ohne-Ende-Die-Hochwasser-Zusammenfassung-1184559.html (Zugriff im April 2015)

Topagrar (2013 c) DSV: Zwischenfrüchte auf Hochwasserflächen, In: Topagrar.com veröffentlicht am 25.06.2013 unter: http://www.topagrar.com/news/Acker-Wetter-Ackernews-DSV-Zwischenfruechte-auf-Hochwasserflaechen-1185317.html (Zugriff im April 2015)

Topagrar (2014) Hagel Sturm & Co: So sichern Sie Ihre Ernte ab. 4/2104.

Trnka M, Rötter RP, Ruiz-Ramos M, Kersebaum KC, Olesen JE, Žalud Z, Semenov MA (2014) Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. Nature Climate Change 4, 637–643. doi:10.1038/nclimate2242

Ullrich F, Albert E, Böttcher F, Mellentin U, Völlings A (2012) Ertragsausfallrisiko für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion bis 2050 in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Vereinigte Hagel (2014) http://www.vereinigte-hagel.net/wissenswertes.html

Vereinigte Hagel (2014) Kundeninformation 01-2014.

Vereinigte Hagel (2014) Vorläufiger Geschäftsbericht der Vereinigten Hagel für 2014 vom 1. Dezember 2014.

Vogel G (1996) Handbuch des speziellen Gemüsebaues, Ulmer, Stuttgart, 1127 S.

Vogt E und Schruft G (2000) Weinbau, 8. überarbeitete Auflage, Ulmer, 453 S. Wonneberger, C

Walentowski H (2008) Ein Wald für das Hochwasser, In: LWF- aktuell 66/ 2008, Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Wald und Wasser, S. 30-31, 15. Jahrgang, Ausgabe 5 2008, http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/a66_ein_wald_f__r_hochwasser.pdf (Zugriff im April 2015)

WasserBlick/Bfg (2015 a) WasserBlick/Bfg und Zuständige Behörden der Länder; GeoBasis - DE/BKG 2014, Überflutungsszenarien der HWRM-RL; http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de (Zugriff 23.02.2015)

WasserBlick/Bfg (2015 b) Überflutungsflächen der Länder (APSFRPOLY.zip) sihe Mail von Busskamp vom 4.2.2015. Bund-Länder-Informations- und Kommunikationsplattform (WASSERBLICK) betieben von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG) im Auftrag der Wasserwirtschaftsverwaltungen des Bundes und der Länder

Weber H, Komischke H, Koloktronis V, Dietzer B, Klämt A (2008) KLIWA – Monitoringbe-richt , Klimawandel in Süddeutschland – Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Nieder-schlag und Hochwasserabfluss, Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, http://www.kliwa.de/download/KLIWA_Monitoringbericht_08.pdf

Wechsung F, Gerstengarbe FW, Lasch P, Lüttger A (2008) Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. Abschlussbericht einer Studie im Auftrag der BVVGmbH, PIK, Potsdam

Weigel H-J, Manderscheid R, Schaller M (2007) Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Ertrag und Qualität von Getreide. Getreidetechnol 61(3):142-149

Wendland F, Albert H, Bach M, Schmidt R (1993) Atlas zum Nitratstrom in der Bundesrepublik Deutschland. Springer-Verlag; Heidelberg.

WHG (2009) Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist

Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik (WBA) (2011) Stellungnahme zum Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft. http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/StellungnahmeRisiko-Krisenmanagement.html.

Wonneberger C, Keller F (2004) Gemüsebau, Ulmer, Stuttgart, 384 S.

WWF Deutschland (2007) Hintergrundinformation - Hochwasser in Deutschland und Europa, Fachbereich Süßwasser, Frankfurt, http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Hochwasser_in_Deutschland_und_Europa_01.pdf (letzter Zugriff April 2015)

Zang C, Hartl-Meier C, Dittmar C, Rothe A, Menzel A (2014) Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability, Glob Chang Biol 20(12): 3767-3779.

Ziche D, Seidling W (2010) Homogenisation of climate time series from ICP forests level II monitoring sites in Germany based on interpolated climate data. Ann Forest Sci 67(8):804/1-804/6.

Ziegler J (2010) Anbau- und Sortenempfehlungen zu Spargel. Neustadter Hefte, Anbau- und Sortenhinweise für den Gemüsebau 2009/2010, DLR Rheinpfalz, Neustadt/Weinstr.

8 Anhang

8.1 Ackerkulturen

Anhang 8.1: Schwellenwerte von Extremwetterlagen bei Kartoffeln

Agrarrelevante Extrem-wetterlage	Wertebereich	Indikator-einheit	Zeitraum	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost	Bodentemperatur < 0°C		1.2.-31.3.	Frost nach dem 1.2. verbietet die Ausbringung von Wirtschaftsdünger nach der Düngeverordnung (Kernsperrfrist).
Kahlfrost	Nicht relevant			Langandauernde Fröste ohne dämmende Schneedecke, führen zu Beeinträchtigung der Membranfunktionen. Auswachsen von Eiskristallen zerstören das Pflanzengewebe.
Spätfrost	T Min < 0°C, -2°C, -4°C	Anzahl der Tage	1.4.-30.5.	Erfrieren der Knolle und des Krautes (Wiederaustrieb möglich).
Wechselfrost	Nicht relevant			Wechselnde Perioden von Frost und höheren Temperaturen können zur Schädigung des Wurzelwerkes führen.
Frühfrost	Nicht relevant			Frost vor der Ernte führt zu Schäden.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	Anzahl der Tage	1.4.-1.10.	Der Boden ist wassergesättigt, weiterer Niederschlag führt zu Oberflächenabfluss. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel. Boden ist so aufgeweicht, dass die Pflanzen verfaulen. Hoher Infektionsdruck für Braun- und Nassfäule.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	Anzahl der Tage	1.4.-15.5. und 1.6.-1.10.	Der Boden ist so nass, dass ein Befahren mit Landmaschinen ohne Schäden nicht mehr möglich ist → Ausbleiben von Düngung, Pflanzenschutz oder Ernte.
Dauerregen	Niederschlag > 20 mm/d	Anzahl der Tage	1.4.-1.10.	Langanhaltende Niederschläge können zu Staunässe führen.
Dauerregen	Niederschlag > 5 mm zur Ernte		1.9.-30.9.	Wiederholte Niederschläge führen zur Unbefahrbarkeit der Flächen, die eine Ernte nicht ermöglichen.
Starkregen	Niederschlag > 20 mm/6 Std.		1.4.-30.5.	Durch starke Niederschlägen, können die Dämme abgespült werden und die Kartoffeln freilegen.
Nassschnee	Nicht relevant			Angetauter Schnee enthält so viel Wasser, dass Pflanzenteile unter dem Gewicht abbrechen.
Hagel	Anzahl schwerer Gewitter		1.5.-1.9.	Lokal begrenzte konvektive Niederschläge in den warmen Jahreszeiten, führen zum Abbrechen von Pflanzenteilen und irreversiblem Umlegen von Pflanzen.
Sturm	Wind > 8 Bf (> 17 m/s, > 60 km/h)		1.4.-30.6.	Winderosion kann im Jugendstadium die Pflanzen zerstören.
Sturm	Wind > 18.5 km/h		1.5.-1.9.	Hohe Windgeschwindigkeiten, lassen Pflanzen-schutzmaßnahmen nicht zu.
Trockenheit (Nieder-schlag)	Niederschlag < 0 mm	Anzahl der Tage	15.3.-15.4.	Aufgrund ausbleibender Niederschläge kann ausgebrachter Dünger nicht zu den Wurzeln der Pflanzen gelangen. Die Bodenfeuchte kann aber noch ausreichend sein.
Trockenheit (Boden-wasser)	nFK < 40 % (10 cm Tiefe)		1.4.-30.5	Kartoffeln haben Feuchtebedarf vom Auflaufen bis zur Blüte. Nach der Blüte treten keine Ertragseinbußen auf.
Dürre	Niederschlag < 250 mm	Summe	1.6.–31.8.	Wie Trockenheit (Bodenwasser), über einen längeren Zeitraum.
Hitze	T Max > 30° C	Ab Blüte	1.6.-31.8.	Einstellen des Knollenwachstums, ab 40°C Hitzetod der Kartoffelknollen.
Strahlung	Rad > 25 MJ/m² /d	Anzahl der Tage	1.5.- 30.6.	Strahlungsreiche Tage in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation führen zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosynthese-Leistung.

Anhang 8.2: Schwellenwerte von Extremwetterlagen bei Mais

Agrarrelevante Extrem-wetterlage	Wertebereich	Indikatoreinheit	Zeitraum	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost	Boden-temperatur < 0°C		1.2.-31.3.	Frost nach dem 1.2. verbietet die Ausbringung von Wirtschaftsdünger nach der Düngeverordnung (Kernsperrfrist).
Kahlfrost	Nicht relevant			Langandauernde Fröste ohne dämmende Schneedecke, führen zu Beeinträchtigung der Membranfunktionen. Auswachsen von Eiskristallen zerstören das Pflanzengewebe.
Spätfrost	T Min < 0°C, -2°C, -4°C	Anzahl der Tage	1.4.-30.5.	Frost im Frühjahr, nach Beginn der Vegetationsperiode, führt zu Schädigung der Pflanzen.
Wechselfrost	Nicht relevant			Wechselnde Perioden von Frost und höheren Temperaturen können zur Schädigung des Wurzelwerkes führen.
Frühfrost	Nicht relevant			Frost vor der Ernte führt zu Schäden.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	Anzahl der Tage	1.4.-31.10	Der Boden ist wassergesättigt, weiterer Niederschlag führt zu Oberflächenabfluss. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel. Der Boden ist so aufgeweicht, dass die Pflanzen umfallen
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	Anzahl der Tage	15.3.-15.4. und 1.9.-31.10	Der Boden ist so nass, dass ein Befahren mit Landmaschinen ohne Schäden nicht mehr möglich ist (Düngung, Pflanzenschutz oder Ernte).
Dauerregen	Niederschlag > 20 mm/d	Anzahl der Tage	1.9.-31.10	Langanhaltende Niederschläge können zu Staunässe führen.
Dauerregen	Niederschlag > 5 mm zur Ernte		1.10.-31.10	Wiederholte Niederschläge führen zu hohen Kornfeuchten in den Erntebeständen, die eine Ernte nicht ermöglichen.
Starkregen	Niederschlag > 20 mm		15.6.-31.10	Durch starke Niederschläge, oft in Kombination mit Windböen, kommt es zu irreversiblem Umlegen der Pflanzen (Lager) und/oder Kornverlust.
Nassschnee	Nicht relevant			Angetauter Schnee enthält so viel Wasser, dass Pflanzenteile unter dem Gewicht abbrechen.
Hagel	Anzahl schwerer Gewitter		1.4.-31.10	Lokal begrenzte konvektive Niederschläge in den warmen Jahreszeiten, führen zum Abbrechen von Pflanzenteilen und irreversiblem Umlegen von Pflanzen (Lager).
Sturm	Wind > 8 Bf (> 17 m/s, > 60 km/h)		1.4.-30.6.	Mais ist aufgrund der geringen Wurzellängen besonders empfindlich in der Jugendentwicklung. Winderosion kann im Jugendstadium die Maispflanzen zerstören.
Sturm	Wind > 18.5 km/h		1.6.-31.6.	Hohe Windgeschwindigkeiten, lassen Pflanzen-schutzmaßnahmen nicht zu.
Trockenheit (Nieder-schlag)	Niederschlag < 0 mm	Anzahl der Tage	15.3.-15.4.	Aufgrund ausbleibender Niederschläge kann ausgebrachter Dünger nicht zu den Wurzeln der Pflanzen gelangen. Die Bodenfeuchte kann aber noch ausreichend sein.
Trockenheit (Boden-wasser)	a) nFK < 40 % (10 cm Tiefe), b) Niederschlag ~ 150 mm		a) April, b) Jul. – Aug.	Mais hat einen Feuchtebedarf zum Auflaufen. Kurz vor und nach der Blüte ist der Wasserbedarf sehr hoch.
Dürre	Niederschlag < 80 mm	Summe	Mai – Jun.	Wie 3, über einen längeren Zeitraum. Wasserbedarf im Jungstadium.
Hitze	T Max > 28° C	während Blüte	15.7.-15.8.	Dauerwelken mit Leistungsminderung, Absterben von Assimilationsflächen. Ertragsausfälle bei Hitzeperioden während der Blüte.
Strahlung	Rad > 25 MJ/m² / d	Anzahl der Tage	Zeitraum: 1.4. - 30.6.	Strahlungsreiche Tage in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation führen zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosynthese-Leistung.

Anhang 8.3: Schwellenwerte von Extremwetterlagen bei Weizen

Agrarrelevante Extrem-wetterlage	Wertebereich	Indikatoreinheit	Zeitraum	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost	Bodentemp. < 0°C		1.2.-31.3.	Frost nach dem 1.2. verbietet die Ausbringung von Wirtschaftsdünger nach der Düngeverordnung
Kahlfrost	T Min < - 20°C, -15°C, -10°C	Anzahl der Tage	1.10.-30.5.	Langandauernde Fröste ohne dämmende Schneedecke, führen zu Beeinträchtigung der Membranfunktionen. Auswachsen von Eiskristallen zerstören das Pflanzengewebe. Lückiger Bestand, Ertragsverluste,
Spätfrost	T Min < 0°C, - 2°C, -4°C			Frost im Frühjahr, nach Beginn der Vegetationsperiode, führt zu Schädigung der Pflanzen.
Wechselfrost	T Min <=-3°C und T Max >= 3°C	Anzahl der Tage	1.2.-30.4.	Wechselnde Perioden von Frost und höheren Temperaturen können zur Schädigung des Wurzelwerkes durch Abreißen der Wurzeln führen.
Frühfrost	Nicht relevant			Frost vor der Ernte führt zu Schäden.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	Anzahl der Tage	15.9.-30.3.	Der Boden ist wassergesättigt, weiterer Niederschlag führt zu Oberflächenabfluss. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel, Auswinterungsschäden. Absterben der Pflanzen, starke Ernteverluste
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	Anzahl der Tage	1.5.-15.10.	Der Boden ist so nass, dass ein Befahren mit Landmaschinen ohne Schäden nicht mehr möglich ist (Düngung, Pflanzenschutz oder Ernte).
Dauerregen	Niederschlag > 20 mm/d	Anzahl der Tage	Okt.-Aug.	Langanhaltende Niederschläge können zu Staunässe führen.
Dauerregen	Niederschlag > 5 mm zur Ernte		1.7.-31.8.	Wiederholte Niederschläge führen zu hohen Kornfeuchten in den Erntebeständen, die eine Ernte nicht ermöglichen.
Starkregen	Niederschlag > 20 mm		15.6.-31.8.	Durch starke Niederschläge, oft in Kombination mit Windböen, kommt es zu irreversiblem Umlegen der Pflanzen (Lager) und/oder Kornverlust.
Nassschnee	Nicht relevant			
Hagel	Anzahl schwerer Gewitter		1.4.-31.8.	Lokal begrenzte konvektive Niederschläge in den warmen Jahreszeiten, führen zum Abbrechen von Pflanzenteilen und irreversiblem Umlegen von Pflanzen (Lager).
Sturm	Wind > 8 Bf (> 17 m/s, > 60 km/h)		1.6.-31.8.	Hohe Windgeschwindigkeiten, lassen Pflanzen-schutzmaßnahmen nicht zu. höherer Unkrautdruck
Sturm	Wind > 18.5 km/h		1.6.-31.6.	Hohe Windgeschwindigkeiten, lassen Pflanzen-schutzmaßnahmen nicht zu. höherer Unkrautdruck
Trockenheit (Niederschlag)	Niederschlag < 0 mm	Anzahl der Tage	15.3.-15.5.	Aufgrund ausbleibender Niederschläge kann ausgebrachter Dünger nicht zu den Wurzeln der Pflanzen gelangen. Die Bodenfeuchte kann aber noch ausreichend sein. suboptimale Pflanzenentwicklung
Trockenheit (Boden-wasser)	nFK < 50 % (60 cm Tiefe)	Häufigkeiten: Monatsmittel in Dekaden	Okt. – Jul.	Aufgrund des zu geringen Bodenwassergehaltes ist eine Versorgung des Wurzelapparates der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen nicht mehr ausreichend gewährleistet. Suboptimale Pflanzenentwicklung, Qualitätseinbußen
Dürre	nFK < 50 % (60 cm Tiefe)	Anzahl der Tage	Okt. – Jul.	Wie Trockenheit, über einen längeren Zeitraum. Absterben der Pflanzen, Ertragsverluste, Qualitätsverluste (Kümmerkorn, Notreife)
Hitze	T Max > 30° C	±1 Woche um Blüte, oder 6 Tage in Folge	5.5.-15.6.	Dauerwelken mit Leistungsminderung, Absterben von Assimilationsflächen.
Strahlung	Rad > 25 MJ/m² /d			Strahlungsreiche Tage in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation führen zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosynthese-Leistung.

Anhang 8.4: Schwellenwerte von Extremwetterlagen bei Winterraps

Agrarrelevante Extrem-wetterlage	Wertebereich	Indikatoreinheit	Zeitraum	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost	Bodentemp. < 0°C		1.2.-31.3.	Frost nach dem 1.2. verbietet die Ausbringung von Wirtschaftsdünger nach der Düngeverordnung (Kernsperrfrist).
Kahlfrost	T Min < -20°C, -15°C	*Anzahl der Tage*	1.10.-30.5.	Langandauernde Fröste ohne dämmende Schneedecke, führen zu Beeinträchtigung der Membranfunktionen. Auswachsen von Eiskristallen zerstören das Pflanzengewebe.
Spätfrost	T Min < 0°C, -2°C, -4°C	*Anzahl der Tage*	1.2.-30.5.	Frost im Frühjahr, nach Beginn der Vegetationsperiode, führt zu Schädigung der Pflanzen.
Wechselfrost	T Min <=-3°C und T Max >= 3°C	*Anzahl der Tage*	1.1.-30.4.	Wechselnde Perioden von Frost und höheren Temperaturen können zur Schädigung des Wurzelwerkes durch Abreißen der Wurzeln führen.
Frühfrost	Nicht relevant			Frost vor der Ernte führt zu Schäden.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	*Anzahl der Tage*	15.8.-30.4.	Der Boden ist wassergesättigt, weiterer Niederschlag führt zu Oberflächenabfluss. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel, Auswinterungsschäden.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	*Anzahl der Tage*	15.3.-15.9.	Der Boden ist so nass, dass ein Befahren mit Landmaschinen ohne Schäden nicht mehr möglich ist. Ausbleiben/ Schwierigkeiten bei Düngung, Pflanzenschutz oder Ernte.
Dauerregen	Niederschlag > 20 mm/d	*Anzahl der Tage*	Aug.-Jun.	Langanhaltende Niederschläge können zu Staunässe führen und Auswaschung von Nährstoffen (Schwefel) führen.
Dauerregen	Niederschlag > 5 mm zur Ernte		1.7.-31.7.	Wiederholte Niederschläge führen zu hohen Kornfeuchten in den Erntebeständen, die eine Ernte nicht ermöglichen.
Starkregen	Niederschlag > 20 mm		15.5.-1.8.	Durch starke Niederschlägen, oft in Kombination mit Windböen, kommt es zu irreversiblem Umlegen der Pflanzen (Lager) und Aufbrechen der Schoten kurz vor der Ernte.
Nassschnee	Nicht relevant			Angetauter Schnee enthält so viel Wasser, dass Pflanzenteile unter dem Gewicht abbrechen.
Hagel	Anzahl schwerer Gewitter		1.4.-1.8.	Führt zum Abbrechen von Pflanzenteilen und irreversiblem Umlegen von Pflanzen (Lager). Aufbrechen der Schoten kurz vor der Ernte.
Sturm	Wind > 8 Bf (> 17 m/s, > 60 km/h)		15.5.-1.8.	Hohe Windgeschwindigkeiten, oft in Kombination mit Niederschlägen, führen zum Abbrechen und Entwurzeln von Pflanzenteilen (Lager). Zur Erntezeit platzen die Schoten vorzeitig auf.
Sturm	Wind > 18.5 km/h		1.9.-15.9., 1.4.-15.4.	Hohe Windgeschwindigkeiten, lassen Pflanzen-schutzmaßnahmen nicht zu.
Trockenheit (Niederschlag)	Niederschlag < 0 mm	*Anzahl der Tage*	15.2.-30.5.	Aufgrund ausbleibender Niederschläge kann ausgebrachter Dünger nicht zu den Wurzeln der Pflanzen gelangen. Die Bodenfeuchte kann aber noch ausreichend sein.
Trockenheit (Bodenwasser)	nFK < 50 % (60 cm Tiefe)	*Häufigkeiten*Monats-mittel in Dekaden	Apr. – Jun.	Aufgrund des zu geringen Bodenwassergehaltes ist eine Versorgung des Wurzelapparates der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen nicht mehr ausreichend gewährleistet.
Dürre	nFK < 50 % (60 cm Tiefe)	*Anzahl der Tage*	Apr. – Jun.	Wie Trockenheit, über einen längeren Zeitraum.
Hitze	T Max > 30° C		1.5.-30.5.	Dauerwelken mit Leistungsminderung, Absterben von Assimilationsflächen.
Strahlung	Rad > 25 MJ/m² /d	*Anzahl der Tage*	1.4. - 30.6.	Strahlungsreiche Tage in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation führen zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosyntheseleistung.

Anhang 8.5: Schwellenwerte von Extremwetterlagen bei Zuckerrüben

Agrarrelevante Extrem-wetterlage	Wertebereich	Indikatoreinheit	Zeitraum	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost	Bodentemp. < 0°C		1.2.-31.3.	Frost nach dem 1.2. verbietet die Ausbringung von Wirtschaftsdünger nach der Düngeverordnung (Kernsperrfrist).
Kahlfrost	Nicht relevant			Langandauernde Fröste ohne dämmende Schneedecke, führen zu Beeinträchtigung der Membranfunktionen. Auswachsen von Eiskristallen zerstören das Pflanzengewebe.
Spätfrost	T Min < -5°C	*Anzahl der Tage*	1.4.-30.5.	Frost im Frühjahr, nach Beginn der Vegetationsperiode, führt zu Schädigung der Pflanzen.
Wechselfrost	Nicht relevant			Wechselnde Perioden von Frost und höheren Temperaturen können zur Schädigung des Wurzelwerkes durch Abreißen der Wurzeln führen.
Frühfrost	T Min < -5°C	*Anzahl der Tage*	1.10.-1.11.	Frost vor der Ernte führt zu Verringerung des Zuckergehaltes.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	*Anzahl der Tage*	1.4.-15.10.	Der Boden ist wassergesättigt, weiterer Niederschlag führt zu Oberflächenabfluss. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel. Boden ist so aufgeweicht, dass die Pflanzen umfallen.
Nässe	nFK > 100% (60cm Tiefe)	*Anzahl der Tage*	1.3.-30.4. und 15.9.-15.11.	Der Boden ist so nass, dass ein Befahren mit Landmaschinen ohne Schäden nicht mehr möglich ist → Schwierigkeiten bei Düngung, Pflanzenschutz oder Ernte.
Dauerregen	Niederschlag > 20 mm/d	*Anzahl der Tage*	15.3.-31.10.	Langanhaltende Niederschläge können zu Staunässe führen.
Dauerregen	Niederschlag > 5 mm zur Ernte		1.10.-15.11.	Wiederholte Niederschläge führen zu verschlämmten Ackerflächen, die eine Ernte nicht ermöglichen.
Starkregen	Nicht relevant			Durch starke Niederschlägen, oft in Kombination mit Windböen, kommt es zu irreversiblem Umlegen der Pflanzen (Lager) und/oder Kornverlust.
Nassschnee	Nicht relevant			Angetauter Schnee enthält so viel Wasser, dass Pflanzenteile unter dem Gewicht abbrechen.
Hagel	Anzahl schwerer Gewitter		1.6.-31.10.	Lokal begrenzte konvektive Niederschläge in den warmen Jahreszeiten, führen zum Abbrechen von Pflanzenteilen.
Sturm	Wind > 8 Bf (> 17 m/s, > 60 km/h)		1.4.-31.5.	Winderosion kann im Jugendstadium die Zuckerrüben beschädigen.
Sturm	Wind > 18.5 km/h		1.6.-31.6.	Hohe Windgeschwindigkeiten, lassen Pflanzen-schutzmaßnahmen nicht zu.
Trockenheit (Niederschlag)	Niederschlag < 0 mm	*Anzahl der Tage*	1.5.-30.5.	Aufgrund ausbleibender Niederschläge kann ausgebrachter Dünger nicht zu den Wurzeln der Pflanzen gelangen. Die Bodenfeuchte kann aber noch ausreichend sein.
Trockenheit (Bodenwasser)	a) nFK < 50 % (10 cm Tiefe); b) Niederschlag ~ 80 mm pro Monat		a) März; b) Jun. – Sept.	Zuckerrüben benötigen ausreichend Feuchtigkeit zur Keimung (ab Mitte März). Nach dem Reihenschluß (Mitte Juni) steigt der Wasserbedarf an.
Dürre	Niederschlag < 80 mm	*Summe*	Jun. – Sept.	Wie 3, über einen längeren Zeitraum. Wasserbedarf nach Reihenschluß.
Hitze	Nicht relevant			Dauerwelken mit Leistungsminderung, Absterben von Assimilationsflächen. Entwicklungsstillstand.
Strahlung	Rad > 25 MJ/m² /d	*Anzahl der Tage*	1.4. - 30.6.	Strahlungsreiche Tage in frühen Entwicklungsstadien der Vegetation führen zu Verbrennungen der Blätter und so zur Reduzierung der Photosynthese-Leistung.

8.2 Sonderkulturen

Anhang 8.6: Schwellenwerte von Extremwetterlagen beim Apfelanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Dauerregen	≥ 10 mm Niederschlag/d	mm pro d; mm über ≥ 7 d	Mrz-Okt	↘ (Mrz-Jun) ↗ (Jul-Okt)	↗ (Mrz-Apr) ↘ (Mai-Okt)
Extreme Dürre	Saugspannung ≥ 600 mm (3-8 w)	mm pro 3 w	Mrz-Okt	keine Prognosemodelle vorhanden	
Frühfrost	Tmin ≤ - 4 bis - 10 °C	° C (Tmin) pro d	Sep -Nov	- 4 °C: → - 10 °C: ↘	↘
Hagel	ja/nein	Größe der Körner u. Dauer	Jan-Dez	keine Prognosemodelle vorhanden	
Hitze	Tmax ≥ 30 - 40 °C	°C (Tmax) pro d	Apr-Sep	30 °C: ↗ 40 °C: →	↑
Nassschnee	7 - 20 cm Schneedecke	Höhe (cm) & Dauer	Okt-Mai	-	-
Spätfrost	Grüne Spitzen: Tmin ≤ - 7 °C* Rote Knospe: Tmin ≤ - 2°C* Vollblüte: Tmin ≤ 0 °C*	° C (Tmin) pro d	Mrz-Jun	↓	↓
Starkregen	≥ 10 - 40 mm Niederschlag/h (d)	mm pro h (d)	Mrz-Okt	↗	↗
Sturm	≥ (4 -) 8 Bft**	mittlere Windstärke (u) pro d**	Feb-Nov	u ≥ 10 m/s: ↘ (Apr, Jul-Sep, Nov) → (Feb, Mrz) ↗ (Jun; Okt)	u ≥ 10 m/s: → (Feb, Jun-Aug, Okt) ↗ (Mrz-Mai, Sep, Nov)
Trockenheit	≤ 15 - 30 mm Niederschlag/Monat (≥ 2,5 - 5 w)	mm pro M	Mrz-Okt	→	→
Staunässe	nFK ≥ 90 - 100%	nFK (%) über ≥ 3 d	Jan- Dez	keine Prognosemodelle vorhanden	
Kahl-/Winterfrost	Tmin ≤ - 18 bis - 20 °C	° C (Tmin) pro d	Nov-Mrz	↘	↘
Zu hohe Temperaturen während der Blüte	Tmax ≥ 22 °C	° C (Tmax) pro d	Apr-Mai	↗	→ ↗ (Ende Mai)
Zu hohe Abendtemperaturen	Tmin ≥ 17 °C (ab 20 Uhr)	° C (Tmin) pro d	Mai-Sept	↗	↗
Schnelle Temperaturwechsel	+/- 15 °C	max. Temperaturdifferenz (° C) pro d	Mrz-Mai; Sep-Nov	keine Prognosemodelle vorhanden	

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatorein-heit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Verände-rungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Apfelanbau (rosa hin-terlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

Anhang 8.7: Schwellenwerte von Extremwetterlagen beim Weinanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Dauerregen	≥ 60 mm Niederschlag/Monat	mm pro M	Mrz-Okt (Jan-Dez)	→	→
Frühfrost	Tmin ≤ 0 °C bis – 4 °C (ältere Blätter/unreife Trauben)	°C (Tmin) pro d	Sep-Okt	0 °C: ↗ (Okt) - 4 °C: ↗ (Okt)	↘ (Okt) ↘ (Okt)
Hagel	ja/nein	Größe Körner u. Dauer	Apr-Okt	keine Prognosemodelle vorhanden	
Hitze	Tmax ≥ 35 °C	°C (Tmax) pro d	Mai-Sep	↗	↑
Spätfrost	Tmin ≤ 0 °C (bodennah) (≥ 1 h) Tmin ≤ 2 °C (2m-Werte) Tmin ≤ – 3 °C (Totalschäden mgl.)	°C (Tmin) pro d	Apr-Jun	0 °C: ↘** 2 °C: ↘ - 3°C: ↗(Apr)	0 °C: ↘** 2 °C: ↘ - 3 °C: ↘
Starkregen	≥ 10 mm Niederschlag/2 d	mm über 2 d	Apr-Okt	↘ (Apr, Mai) ↗ (Jun-Okt)	↗ (Apr, Mai, Sep, Okt) ↘ (Jun-Aug)
Sturm	≥ 8 - 10 Bft*	mittl. Windstärke pro d*	Apr-Okt	u ≥ 10 m/s: ↘ (Apr, Jul-Sep) → (Feb, Mrz) ↗ (Jun, Okt)	u ≥ 10 m/s: → (Feb, Jun-Aug, Okt) ↗ (Mrz-Mai, Sep)
Trockenheit	≤ 40 mm Niederschlag/Monat	mm pro M	Apr-Sep	↗ (Apr, Jun, Aug) ↘ (Jul, Sep)	→↘ (Apr - Jun, Aug) ↗ (Jul, Sep)
Staunässe	nFK ≥ 100% (≥ 1 w)	nFK (%) über ≥ 7 d	Jan-Dez	keine Prognosemodelle vorhanden	
Kahl-/Winterfrost	Tmin ≤ - 15 °C bis -20 °C (je nach Holzreife)	°C (Tmin) pro d	Dez-Mrz	↘	↘
Extreme Temperatursprünge	+/- 15 °C	max. Temperaturdifferenz (°C) pro d	k.A.	keine Prognosemodelle vorhanden	
Zu hohe Herbsttemperaturen	Tmax ≥ 10 °C (November)	°C (Tmax) pro d	Sep-Nov	→↗	↗
Minimale Wintertemperaturen (Eisweinproduktion)	Tmin ≤ - 7 °C	°C (Tmax) pro d	Dez-Jan	↘	↘

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatoreinheit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Veränderungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Weinbau (rosa hinterlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

Anhang 8.8: Schwellenwerte von Extremwetterlagen im Hopfenanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Dauerregen	≥ 100 mm Niederschlag/Woche	mm über ≥ 7 d	Mrz -Sep	→	→
Extreme Dürre	nFK ≤ 35% + Tmax ≥ 30 °C; ≤ 1mm Niederschlag (≥ 1 w - 2 w) nFK ≤ 50%	nFK (%) pro d über ≥ 7 d Tmax (°C) pro d über ≥ 7 d mm über ≥ 7 d nFK (%) pro d	Apr- Sep	→↗*	↑*
Hagel	ja/nein	Größe der Körner u. Dauer	Mai-Sep	Keine Prognosekennwerte vorhanden	
Hitze	Tmax ≥ 28-30 °C (≥ 7 d)	° C (Tmax) über ≥ 7 d	Jun- Aug	↗	↑
Spätfrost	Tmin ≤ -5°C	° C (Tmin) pro d	Apr- Mai	↗	↘
Starkregen	≥ 25 mm Niederschlag/h (d)	mm pro h oder pro d	Mai -Sep	→↗	↗
Sturm	≥ 9 Bft	mittl. Windstärke (u) pro d***	Mai-Sep	u ≥ 10 m/s: ↘ (Jul-Sep) ↗ (Jun, Okt)	u ≥ 10 m/s: → (Jun-Aug, Okt) ↗ (Mai, Sep)
Trockenheit	≤ 30 mm Niederschlag/Monat < 1 mm Niederschlag/11 d	mm pro M mm über 11 d	Jun- Aug	→	↗
Staunässe	nFK ≥ 100% (≥ 1 w)	nFK (%) über ≥ 7 d	Mrz-Sep	→↘ (Jan-Jul)** →↗ (Aug-Dez)**	↗ (Jan-Mai)**
Kahl-/Winterfrost	Tmin ≤ -20 °C,-15 °C, -10 °C	° C (Tmin) pro d	Jan-Apr	↘→	↘ → (- 10 °C Jan)
Kältephasen	Tmax ≤ 5 °C	° C (Tmax) pro d	Apr-Jun	↘	↘
Wärmephasen	Tmax ≥ 15 °C - 20 °C	° C (Tmax) pro d	Mrz-Mai (Pflanze)	↗	↗
	Tmean ≥ 13 °C (Mai)	° C (Tmean) pro d	Apr-Mai (Schaderreger)	↗	↗

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatoreinheit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Veränderungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Hopfenbau (rosa hinterlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

Anhang 8.9: Schwellenwerte von Extremwetterlagen im Spargelanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Hitze	Tmax ≥ 30 °C	° C (Tmax) pro d	Mrz-Sep	↗	↑
Trockenheit	≤ 160 mm Niederschlag (Jul-Aug) ≤ 200-260 mm (Jun-Sep) nFK ≤ 50-60 %**	mm mm nFK (%) pro d und w**	 Feb-Sep	↘	↗
Dauerregen	≥ 30 mm Niederschlag/d ≥ 150 mm Niederschlag/Monat	mm pro d mm pro M	Jan-Dez	≥ 30 mm/d: ↗ (Jan, Mrz, Mai, Jul, Sep, Okt, Dez) ≥ 150 mm/M: ↗ (Jan, Mrz, Mai, Jul, aug, Sep, Okt)	≥ 30 mm/d: ↗ (außer Jul) ≥ 150 mm/M: ↗ (Okt-Mai) ↘ (Jun-Sep)
Starkregen	≥ 20 mm Niederschlag/h	mm pro d*	Jan-Dez	≥ 20 mm/d: ↗ (Jan, Mrz, Mai, Jul, Sep, Okt, Dez)	≥ 20 mm/d: ↗ (außer Jul)
Hagel	ja/nein	Größe der Körner u. Dauer (h/d)	Apr-Sep	Keine Prognosemodelle vorhanden	
Spätfrost	Tmin ≤ - 1 bis - 3 °C	° C (Tmin) pro d	Feb-Mai	→↘	↘
Sturm	≥ 60 km/h (ca. 7-8 Bft)	mittl. Windstärke (u) pro d***	Apr-Sep	u ≥ 10 m/s: ↘ (Apr, Jul-Sep) → (Feb, Mrz) ↗ (Jun)	u ≥ 10 m/s: → (Feb, Jun-Aug) ↗ (Mrz-Mai, Sep)

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatoreinheit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Veränderungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Spargelanbau (rosa hinterlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

Anhang 8.10: Schwellenwerte von Extremwetterlagen im Speisezwiebelanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Hitze	Tmax ≥ 30 °C	° C (Tmax) pro d	Apr-Aug	↗	↑
Trockenheit	nFK ≤ 40 - 50 % ** ≤ 400 bis 450 mm Niederschlag innerhalb Kulturzeit (Mrz-Sep) ≤ 50 mm Niederschlag/Monat (Mrz; Apr) ≤ 70-80 mm Niederschlag/Monat (Jun)	nFK (%)** mm pro M	Mrz-Sep	≤ 400-450 mm (Mrz-Sep): →↗ ≤ 50 mm (Mrz & Apr): ↘ (Mrz), ↗ (Apr) ≤ 70-80 mm (Jun): ↗	≤ 400-450 mm (Mrz-Sep): → ≤ 50 mm (Mrz, Apr): ↗ (Mrz), ↘ (Apr) ≤ 70-80 mm (Jun): →↘
Dauerregen	≥ 150 mm/Monat (Jul; Aug)	mm pro M	Jul, Aug	≥ 150 mm/M: ↗	≥ 150 mm/M: ↘ (bis 2040) →(2041-2098)
Staunässe	nFK ≥ 100% (1,5 w)**	nFK (%) über ≥ 10 d**	Jan-Dez	keine Prognosemodelle vorhanden	
Starkregen	≥ 20 – 30 mm Niederschlag/Ereignis (Verschlämmung) ≥ 50 mm Niederschlag/Ereignis (Erosion)	mm pro d*	Jan-Dez	≥ 20 mm/d: ↗ ≥ 30 mm/d: →↗ ≥ 50 mm/d: →	≥ 20 mm/d: ↗ (außer Jul) ≥ 30 mm/d: ↗ (außer Jul) ≥ 50 mm/d: →↗
Hagel	ja/nein	Größe der Körner u. Dauer (h/d)	Mrz-Sep	keine Prognosemodelle vorhanden	
Spätfrost	Tmin ≤ -3 bis - 9 °C (> 1 d)	° C (Tmin) pro d	Mrz-Jun	↗	↘
Winterfrost	Tmin ≤ -5 bis -20 °C	° C (Tmin) pro d	Dez-Feb	↘	↘
Frühfrost	Tmin ≤ -5 bis - 15 °C	° C (Tmin) pro d	Sep-Okt	- 5 °C: ↘ (1971-2010) - 15 °C: →	- 5 °C: ↘ (1971-2010) - 15 °C: →

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatoreinheit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Veränderungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Speisezwiebelanbau (rosa hinterlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

Anhang 8.11: Schwellenwerte von Extremwetterlagen im Möhrenanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Hitze	Tmax ≥ 25 bis 28 °C	° C (Tmax) pro d	Mai-Aug	↗	↘ (bis 2050) ↗ (2050-2098)
Trockenheit	≤ 300 - 500 mm Niederschlag (Jul-Sep) 0 mm (≥ 3 w)	mm mm pro 3 w	Mrz-Aug	Siehe Fachbericht Verbundprojekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen"	
Staunässe	nfK ≥ 100% (≥ 1 w) nFK ≥ 70 % (Befahrbarkeit während Aussaat- und Erntephase)	nFK (%) über ≥ 7 d mm pro M	Feb-Nov (Jan-Dez)	Siehe Fachbericht Verbundprojekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen"	
Starkregen	≥ 20 mm Niederschlag/Ereignis	mm pro d*	Feb-Jul (Jan-Dez)	→↗	↗
Hagel	ja/nein	Größe der Körner u. Dauer (h/d)	Apr-Sep	Keine Prognosemodelle vorhanden	
Spätfrost	Tmin ≤ 0 bis - 4 °C	° C (Tmin) pro d	Apr-Mai	≤ 0 °C: ↘ - 4 °C: ↗	↘
Winterfrost	Tmin ≤ - 20 °C (mit Abdeckung) Tmin ≤ - 10 °C (dauerhaft)	° C (Tmin) pro d	Nov-Feb	≤ - 10 °C: ↘ ≤ - 20 °C: →↘	≤ - 10 °C: ↘ ≤ - 20 °C: →

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatoreinheit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Veränderungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Möhrenanbau (rosa hinterlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

Anhang 8.12: Schwellenwerte von Extremwetterlagen im Weiß- und Rotkohlanbau

Extremwetterlage	Schwellenwerte	Indikatoreinheit	Zeitraum	Trend Vergangenheit	Trend Zukunft
Hitze	Tmax ≥ 30 - 35 °C Nachttemperaturen Tmin ≥ 25 °C	° C (Tmax) pro d ° C (Tmin) pro d	Apr-Sep	↗	↑
Trockenheit	≤ 50 % nFK (4 w)** ≤ 50 mm/Monat (Apr-Mai) ≤ 70-80 mm/Monat (Jun-Aug)	nFK (%) pro M** mm pro M mm pro M	Apr-Nov	≤ 50 mm (Apr-Mai): ↗ ≤ 70-80 mm (Apr-Mai): →↗	≤ 50 mm (Apr-Mai): → (Vgl. 1962-90) ≤ 70-80 mm (Apr-Mai): →
Staunässe	nFK ≥ 100% (1 w)**	nFK (%) pro w**	Jan-Dez	Keine Prognosemodelle vorhanden	
Dauerregen	≥ 120 mm/Monat (Apr-Mai) ≥ 150 mm/Monat (Jun-Sep)	mm pro M mm pro M	Jan-Dez	↘ (Vgl. 1962-90 vs. 1971-2000) ↗ (Vgl. 1971-2000 vs. 1981-2010)	≥ 120 mm/M: → ≥ 150 mm/M: →↘
Starkregen	≥ 20 – 50 mm/Ereignis	mm pro d*	Mrz-Aug (Jan-Dez)	≥ 20 mm: →↗ ≥ 50 mm: →↘	↗
Hagel	Ja/nein (≥ 20 min)	Größe der Körner u. Dauer (h/d)	Apr-Sep	Keine Prognosemodelle vorhanden	
Sturm	≥ 4 Bft	mittl. Windstärke (u) pro d***	Apr-Aug	u ≥ 5 m/s: ↘	u ≥ 5 m/s: ↗→ (Apr-Jul) ↘ (Aug)
Spätfrost	Tmin ≤ 0 bis - 12 °C	Tmin (°C) pro d	Mrz-Mai	≤ 0 °C: ↘ ≤ - 12 °C: ↗	↘
Winterfrost	Tmin ≤ - 6 bis - 20 °C	Tmin (°C) pro d	Nov-Feb	↘	↘
Frühfrost	Tmin ≤ - 2 bis - 6 °C	Tmin (°C) pro d	Sep-Nov	→	↘
Nassschnee	≥ 5 cm	Höhe (cm) & Dauer	Apr-Mai	Keine Prognosemodelle vorhanden	

Auf Basis von Litertaturrecherchen und Expertenbefragungen definierte Schwellenwerte, die entsprechende Indikatoreinheit, die sensitiven Zeiträume, der Trend Vergangenheit (1962-2010, Quelle: DWD) und der Trend Zukunft (Veränderungstendenz 2071-98 ggü. 1962-90 laut Abfragen Klimamodellprojektionen, Quelle: DWD) im Weiß- und Rotkohlanbau (rosa hinterlegt: Top 3 der relevantesten Extremwetterlagen)

8.3 Wald

Anhang 8.13: Schwellenwerte von Extremwetterlagen im Wald

Agrarrelevante Extremwetterlage	Wertebereich	Indikatoreinheit	Zeitraum	Häufigkeit (nach DWD)	Beschreibung des Problems der Extremwetterlage
Frost (Extremfrost)	**Min. Lufttemperatur T_{min}** (Altbestand/Verjüngung)< -60/-50 (Fichte), -35/-19 (Buche), -90/-70 (Kiefer), -30/-20 (Traubeneiche)	Anzahl Ereignisse	1.10.-31.3.	extrem selten	Absterben des Kambialgewebes, (Aufbrechen des Stammgewebes, „Frostrisse“, geringe Bedeutung, Eiche) Absterben von Einzelbäumen
Kahlfrost (Forsttrocknis)	**Blatttemperatur >10°C** bei Eistagen (Bodentemperatur <-2°C) ohne Schneedecke	Anzahl der Tage	1.10.-30.4.	selten	Gefrorener Boden bzw. blockierte Wasserleitungsbahnen und hohe Einstrahlung auf schneefreie Kronen führt zu Engpässen in der Wasserversorgung (nur Nadelbäume, geringe Bedeutung). Zuwachsverluste
Spätfrost	**Min. Lufttemperaturen <0°C** nach Beginn der Vegetationszeit (Tm > 10°C), (Schäden abhängig vom Austriebsstadium und Baumart)	Zeitpunkt nach Beginn Vegetationsperiode, Anzahl Ereignisse	01.04. bis 30.06.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Beschädigung/Absterben der frisch gebildeten Assimilationsorgane am Beginn der Vegetations-periode (sensitiv: Buche, Tanne, Douglasie, Jungpflanzen). Zuwachsverluste, Schädigung der Verjüngung
Wechselfrost	Nicht relevant				
Frühfrost	Nicht relevant				Frost zum Ende der Vegetationsperiode führt zu Schäden.
Nässe / Überflutung	**nFK > 100%** (stagnierende Nässe) bzw. Überflutung	%-Anteil an der Vegetationsperioden-länge >10 (Buche) bis >60 (Stieleiche)	01.04. - 31.10.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Der Boden ist wassergesättigt oder überflutet. Die Pflanzen leiden unter Sauerstoffmangel (fehlende Wurzelatmung). Absterben von Bäumen, Zuwachs- Verluste
Dauerregen	Nicht relevant				
Starkregen	Nicht relevant				
Nassschnee / Eisanhang (Duftanhang)	Tagesniederschlag **T-0,5 – 2°C > 50 mm**, Periodenniederschlag **T-0,5 – 2°C > 150 mm**	Summe Tages- bzw. Periodenniederschlag [mm]	01.10. bis 31.03.		Mechanische Beschädigungen von Baumkronen bis zum Wurf und Bruch ganzer Bäume (insbesondere Nadelholzbestände) Verluste Einzelbäume bis hin zum Bestandestotalausfall
Hagel	Nicht relevant				
Sturm (Gewitterstürme)	**Wind > 11 bis 20 m s^{-1}**	Anzahl Ereignisse	1.4.-31.8.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Wurf und Stammbruch von Bäumen (auch belaubte Laubbaumarten) Windwurf, Windbruch
Sturm (Herbst/Winter-Orkane)	[**Wind > 15 bis 20 m s^{-1}**], wird neu bestimmt EH-3	Anzahl Ereignisse	1.9.-30.4.	häufiger (infolge Klimawandel?)	Wurf und Stammbruch von Bäumen (insbesondere Fichte und andere flachwurzelnde Nadelbäume) Windwurf, Windbruch
Trockenheit (zuwachsmindernd)	**nFK <50 %** (im effektiven Wurzelraum) [vgl. Ackerkulturen]	Anzahl der Tage	01.04. - 30.10.	häufiger (infolge Klimawandel)	Aufgrund geringem Bodenwasser-angebot wird das Wachstum vermindert oder eingestellt. Zuwachsverluste
Dürre (lethal,hauptsächlich Verjüngung!)	**nFK < 20 %** (im effektiven Wurzelraum)	Anzahl der Tage	01.04. - 30.09.	häufiger (infolge Klimawandel)	Aufgrund des zu geringen Bodenwassergehaltes ist eine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit Wasser nicht mehr ausreichend gewährleistet (Verlust der Wasserleitfähigkeit und Embolien). Absterben der Verjüngung
Hitze (Strahlung / Ozonbelastung)	**Blattoberflächentemperatur TB> 40°C** (Buche) CL AOT40 > 2,4 ppm h (Buche), bis > 4,7 ppm h (Fichte, Kiefer)	*Anzahl Ereignisse*	01.03. bis 31.10.	häufiger (infolge Klimawandel)	Schädigung und Absterben des Blatt/Nadelgewebes (Ozon: nennenswerte Einschränkung der Photosynthese) Schädigung der Assimilationsoberflächen, Zuwachsreduktion

Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

8	Kurt-Jürgen Hülsbergen, Gerold Rahmann (Hrsg.) **Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme - Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben**
9	Holger Weimar und Dominik Jochem (Hrsg.) **Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“**
10	Horst Gömann, Thomas de Witte, Günter Peter, Andreas Tietz **Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landwirtschaft**
11	Bernhard Osterburg, Sebastian Rüter, Annette Freibauer, Thomas de Witte, Peter Elsasser, Stephanie Kätsch, Bettina Leischner, Hans Marten Paulsen, Joachim Rock, Norbert Röder, Jürn Sanders, Jörg Schweinle, Johanna Steuk, Heinz Stichnothe, Wolfgang Stümer, Johannes Welling, Anne Wolff **Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft**
12	Heinrich Becker und Andrea Moser **Jugend in ländlichen Räumen zwischen Bleiben und Abwandern – Lebenssituation und Zukunftspläne von Jugendlichen in sechs Regionen in Deutschland**
13	Bernhard Osterburg, Stephanie Kätsch und Anne Wolff **Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050**
14	Philipp Adämmer, Martin T. Bohl und Ernst-Oliver von Ledebur **Die Bedeutung von Agrarterminmärkten als Absicherungsinstrument für die deutsche Landwirtschaft**
15	Simon Walther **Determinants of competitiveness of agriholdings and independent farms in Ukrainian arable production**
16	Nicole Wellbrock, Andreas Bolte et al. **Kohlenstoff- und Nährelementspeicherung von Waldflächen des forstlichen Umweltmonitorings (BZE) in Rheinland-Pfalz**
17	Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Ulrich Dämmgen, Eike Poddey, Annette Freibauer, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Beate Bauer und Bernhard Osterburg **Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2012** **Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2012**
18	Patrick Küpper, Stefan Kundolf und Anne Margarian **Neue Beteiligungs- und Steuerungsprozesse in der ländlichen Entwicklung**
19	Frank Offermann, Claus Deblitz, Burkhard Golla, Horst Gömann, Hans-Dieter Haenel, Werner Kleinhanß, Peter Kreins, Oliver von Ledebur, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Norbert Röder, Claus Rösemann, Petra Salamon, Jürn Sanders, Thomas de Witte **Thünen-Baseline 2013 – 2023: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland**
20	Gerald Rahmann und Uygun Aksoy (Eds.) **Building Organic Bridges – Volume 1: Argentina – France** **Building Organic Bridges – Volume 2: Germany – India** **Building Organic Bridges – Volume 3: Indonesia – Sri Lanka** **Building Organic Bridges – Volume 4: Sweden – Viet Nam**

21	Claudia Heidecke, Ulrike Hirt, Peter Kreins, Petra Kuhr, Ralf Kunkel, Judith Mahnkopf, Michael Schott, Björn Tetzlaff, Markus Venohr, Andrea Wagner und Frank Wendland Endbericht zum Forschungsprojekt **„Entwicklung eines Instrumentes für ein flussgebietsweites Nährstoffmanagement in der Flussgebietseinheit Weser“** **AGRUM⁺-Weser**
22	Walter Dirksmeyer, Ludwig Theuvsen und Maike Kayser (Hrsg.) **Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie –** Tagungsband zum 1. Symposium für Ökonomie im Gartenbau
23	Karsten Mohr, Jerzy Suda, Hans Kros, Christian Brümmer, Werner L. Kutsch, Miriam Hurkuck, Elisabeth Woesner, Wim Wesseling **Atmosphärische Stickstoffeinträge in Hochmoore Nordwestdeutschlands und Möglichkeiten ihrer Reduzierung – eine Fallstudie aus einer landwirtschaftlich intensiv genutzten Region**
24	Raphael Albrecht **Ein Ansatz zur Abschätzung der interregionalen Wettbewerbsfähigkeit der Zuckerrübenproduktion – am Beispiel ausgewählter europäischer Regionen**
25	Ute Petersen, Hans-Joachim Weigel **Klimaresilienz durch Agrobiodiversität?** Literaturstudie zum Zusammenhang zwischen Elementen der Agrobiodiversität und der Empfindlichkeit von landwirtschaftlichen Produktionssystemen gegenüber dem Klimawandel
26	Mirko Liesebach (Hrsg.) **FastWOOD II: Züchtung schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb** – Erkenntnisse aus 6 Jahren FastWOOD
27	Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Annette Freibauer, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Beate Bauer, Bernhard Osterburg **Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2013** **Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2013**
28	Martin T. Bohl, Hervé Ott und Ernst-Oliver von Ledebur **Kurzfristige Dynamik von Preisbildungsprozessen deutscher Agrarrohstoffe -** Abschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung für das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
29	Kurt-Jürgen Hülsbergen, Gerold Rahmann (Hrsg.) **Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben,** Forschungsergebnisse 2013-2014
30	Horst Gömann, Andrea Bender, Andreas Bolte, Walter Dirksmeyer, Hermann Englert, Jan-Henning Feil, Cathleen Frühauf, Marlen Hauschild, Sandra Krengel, Holger Lilienthal, Franz-Josef Löpmeier, Jürgen Müller, Oliver Mußhoff, Marco Natkhin, Frank Offermann, Petra Seidel, Matthias Schmidt, Björn Seintsch, Jörg Steidl, Kathrin Strohm, Yelto Zimmer **Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen,** Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

THÜNEN

Thünen Report 30

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

www.ti.bund.de

ISBN 978-3-86576-136-1