



**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](mailto: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.*

---

Doppler, Dr. W.: Simulationsmodell für die Wasserverteilung und Anwendungsprobleme. In: Langbehn, C., Stamer, H.: Agrarwirtschaft und wirtschaftliche Instabilität. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Band 13, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag (1976), S. 521-541.

---



# SIMULATIONSMODELLE FÜR DIE WASSERVERTEILUNG UND ANWENDUNGSPROBLEME

von

Dr. Werner Doppler, Hohenheim

---

1	Problemstellung	521
2	Das Allokationsproblem und seine modellmäßige Erfassung	522
2.1	Das Problem der Wasserverteilung	522
2.2	Modellmäßige Erfassung der Wasserverteilung	523
3	Ein Simulationsansatz zur Wasserverteilung	526
3.1	Ermittlung der intrasaisonalen Wasserverteilung	527
3.2	Intrasaisonale Wasserverteilung, Betriebsorganisation und regionale Wasserverteilung	529
4	Anwendung und Probleme	531
4.1	Empirische Ergebnisse	531
4.2	Möglichkeiten und Grenzen des Ansatzes	537
5	Schlußbetrachtung	538

---

## 1 Problemstellung

Der Einsatz von Bewässerungswasser in der Agrarproduktion hängt in hohem Maße von unsicheren Klimaerwartungen ab und er ist in der Regel gekennzeichnet durch eine begrenzt verfügbare Wassermenge. Ein knapper Produktionsfaktor wirft die Frage nach seiner Allokation auf. Bei der Verteilung von Bewässerungswasser entsteht dieses Problem auf verschiedenen Ebenen:

- a) regional, d.h. zwischen den Betrieben,
- b) innerbetrieblich, d.h. zwischen den Produktionsverfahren eines Betriebes.

Im Zeitablauf ergibt sich die Frage, wann wieviel in einem gegebenen Produktionsverfahren bewässert werden soll.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es, die Problematik der Wasserverteilung herauszuarbeiten und vorliegende Ansätze auf die Möglichkeit zur Erfassung des Allokationsproblems zu überprüfen. Darauf aufbauend wird ein Simulationsansatz vorgestellt, der an einem Beispiel angewandt und auf seine Anwendungsprobleme hin untersucht wird.

## 2 Das Allokationsproblem und seine modellmäßige Erfassung

### 2.1 Das Problem der Wasserverteilung 1)

Die Knappheit von Bewässerungswasser resultiert aus dem Zusammenspiel von Wasserbedarf und verfügbarer Wassermenge und findet ihren Niederschlag in bestimmten Wasserverteilungsstrategien und Wasserpreisen. Auf die Knappheit des Wassers wirken die klimatischen Verhältnisse in verschiedener Weise:

- a) sie beeinflussen über die mengenmäßige Wasseranlieferung und Verdunstungsverluste bei Speicherung und Transport die regional verfügbare Gesamtwasserkapazität, die jahreszeitlich schwanken kann;
- b) über Niederschlag und Verdunstung wirken sie direkt auf den Bodenwassergehalt ein;
- c) sie beeinflussen den Wasserkonsum der Pflanze.

Durch die Unkenntnis über die tatsächliche zukünftige Klimaentwicklung ergibt sich daraus sowohl für die Wasserangebots- als auch für die Nachfrageseite ein Unsicherheitselement.

Der ökonomische Entscheidungsspielraum bei der Wasserverteilung ist abgesteckt durch die technischen Bedingungen, die für den Wasserbedarf und die verfügbare Wassermenge gegeben sind. Das sind insbesondere die technischen Möglichkeiten der Wasserspeicherung, des Transportes und der Wasserausbringung, die Standort- und Erweiterungsflexibilität und der Wasserverlustquoten von Speicher- und Transportsystemen, die Wirkung verschiedener Ausbringungssysteme auf Boden und Pflanze und die technischen Voraussetzungen für die Verwendung eines bestimmten Ausbringungssystems 2).

Innerhalb dieses Entscheidungsspielraumes stehen folgende Problemkreise im Zentrum der Bewässerungsökonomie:

- a) Projekt- bzw. Regionsebene:
  - Welches Wasserverteilungssystem zwischen Betrieben und welche Wasserverteilungsordnung, welche Investitionen in Reservoirs, Pumpstationen und Verteilungssystemen sind notwendig zur Bereitstellung einer bestimmten Wassermenge in einem bestimmten Zeitabschnitt.
  - Wie läßt sich regionales Wasserangebot und Nachfrage zum Ausgleich bringen (Ermittlung des zweckmäßigen Wasserpreises, Anwendung und Durchsetzung des Wasserpreises).
- b) Einzelbetriebliche Ebene:
  - Ermittlung der intrasaisonalen Wasserverteilung, d.h. Zeitpunkt des Wassereinsatzes und Wassermenge für ein gegebenes Produktionsverfahren innerhalb einer Vegetationsperiode;
  - mengenmäßige und zeitliche Verteilung der Wasserverwendung zwischen den relevanten Produktionsverfahren eines Betriebes bei gleichzeitiger Ermittlung der Ausdehnung der Produktionsverfahren unter beschränkt verfügbarer Wassermenge. Einfluß einer begrenzten Wasserkapazität auf die Ausstattung mit Fläche und Arbeit;
  - zweckmäßiges Ausbringungssystem, dessen Kapazität und Auslastung im Zeitablauf; zweckmäßiger Zeitpunkt der Investition zur Kapazitätserweiterung.

Die Lösung des Allokationsproblems wird erschwert durch einen erheblichen Datenmangel, der insbesondere in semi-ariden und ariden Gebieten einschneidend ist. Im nachfolgenden soll die weitere Problematik der modellmäßigen Erfassung der Wasserverteilung im Vordergrund stehen.

- 1) Bewässerung wird hier im Sinne des englischen Begriffs "irrigation" verwendet, schließt also die Beregnung mit ein.
- 2) Siehe dazu allgemein SCHROEDER (1968, 40), BAUMANN, SCHENDEL, MANN (1974, 7) und im speziellen NAGEL (1974, 34), CHRISTIANSEN und HARGREAVES (1969, 13), BLANEY und CRIDDLE (1950, 11), PENMAN (1956, 37) und WADLEIGH (1955, 44).

## 2.2 Modellmäßige Erfassung der Wasserverteilung

Zur modellmäßigen Erfassung wurden in den vergangenen Jahren mehrere Konzepte entwickelt 1), die sowohl analytisch-mathematischer als auch simulativer Natur sind 2) und von der speziellen Intensität bis zur Regions- bzw. Projektebene reichen. Sie behandeln sowohl die zeitliche als auch die räumliche Allokation. Im Mittelpunkt des Interesses steht die intrasaisonale Wasserverteilung für ein einzelnes Anbauverfahren und die Ermittlung der Betriebsorganisation unter Berücksichtigung der Bewässerungsbedingungen. In den letzten Jahren nahmen Ansätze zur Behandlung der Wasserallokation zwischen den Betrieben zu (Übersicht 1).

Im Bereich der intrasaisonalen Wasserverteilung für ein Produktionsverfahren, d.h. bei der Ermittlung der Bewässerungszeitpunkte und der jeweiligen Wassermenge bei unbegrenzter Wasserkapazität liegt in der Regel eine für alle Wachstumsphasen aggregierte Produktionsfunktion für den Wassereinsatz zugrunde. Ertragsreduzierungen bei Wassermangel schwanken in Abhängigkeit vom Wachstumsstadium der Pflanze, zu dem Wasser gegeben wird. Produktionsfunktionen, die die technische Beziehung differenziert zwischen dem Wassereinsatz in einzelnen Wachstumsphasen und dem Naturalertrag darstellen, beschreiben daher die Situation besser als solche, die aggregiert den Wassereinsatz in der gesamten Vegetationsperiode berücksichtigen 3). HALL und BUTCHER (1968, 21) ziehen daraus die Konsequenz bei der Erfassung der Wasserversorgung einer Pflanze und führen für jeden typischen Wachstumsabschnitt eine Wasserbilanzierung durch. Die einzelnen Wachstumsabschnitte werden rekursiv über die Variablen "Bodenwassergehalt" und "noch verfügbares Bewässerungswasser" miteinander verbunden. In den Ansätzen von BURT und STAUBER (1971, 12) und NAGEL (1975, 33) wird von der gleichen Überlegung ausgegangen, NAGEL (1975, 33) verwendet jedoch als rekursive Variable die Bodenwasserspannung, da diese sich unter Feldbedingungen (z.B. mit dem Tensiometer) sehr einfach ermitteln läßt. Die Bodenwasserspannung erscheint außerdem geeignet, da sie für jede Bodenart sich in den Bodenwassergehalt transferieren läßt.

Zur Bestimmung der Ertragsreduzierung bei Wassermangel wird davon ausgegangen (HALL und BUTCHER (1968, 21), NAGEL (1975, 33)), daß der maximale Naturalertrag erreicht wird, wenn der Boden bis zur Feldkapazität versorgt ist. Bei Abweichung von der Feldkapazität wird für jede Wachstumsphase ein experimentell ermittelter Ertragsreduzierungskoeffizient zur Ermittlung der tatsächlichen Ertragsabnahme verwendet 4). Durch das Problem der Verbindung der ertragsreduzierenden Wirkung zwischen den einzelnen Wachstumsphasen sehen sich BURT und STAUBER (1971, 12) gezwungen, eine Produktionsfunktion zu verwenden, die die Annahme impliziert, daß in keiner der jeweils vorangegangenen Wachstumsphasen der Pflanze ein Wasserdefizit bestand.

- 1) Neben der Wasserverteilung im Agrarsektor wurden mehrere Modelle zur Planung von Wasserreservoirs und Bewässerungsregionen, die landwirtschaftliche und außerlandwirtschaftliche Verwendung des Wassers berücksichtigen, entwickelt und vor allem Simulationsmodelle im physiologischen Bereich der Wasseransprüche der Pflanzen und Wasserbereitstellung des Bodens. Zum ersten Komplex siehe MAASS et al. (1966, 29), NAGEL (1975, 33), ASKEW et al. (1971, 3), HALTER und MILLER (1966, 22), HUFSCHEMIDT (1963, 24), HUFSCHEMIDT und FIERING (1966, 25) und zum zweiten FLINN (1971, 18), VAN KEULEN (1975, 27), CHOW und KARELIOTIS (1970, 14) und die dort zitierte Literatur.
- 2) Simulationsmodelle lassen sich gegenüber den analytisch-mathematischen Modellen abgrenzen. Unter letzteren fassen WEINSCHENCK und WEINDLMYIER (1975, 45, S. 22 ff) alle analytisch und numerisch lösbaren Ansätze zusammen und unter den Simulationsmodellen die ausschließlich numerisch lösbaren.
- 3) Siehe zu diesem Problem die umfassende Literaturangabe in ANDERSON und MAASS (1974, 2, Appendix A, S. 44 ff), daraus vor allem FLINN und MUSGRAVE (1967, 19, S. 7 f) und FLINN (1971, 18, S. 125), TAYLOR (1972, 42 S. 222 ff) und zusätzlich BEHRINGER (1961, 10, S. 15 ff) und RAWITZ und HILLEL (1969, 38, S. 231 ff).
- 4) Zur Problematik siehe NAGEL (1975, 33, S. 19 ff).

Übersicht 1 Charakterisierung ausgewählter Modelle zur Wasserverteilung

Problemstellung	Modelltyp	stochastisch	dynamisch	linear	angewandt	Autoren
<b>1. <u>Intrasaisonale Wasserverteilung für ein Anbauverfahren</u></b>						
Bewässerungszeitpunkt, Wassermenge	analytisch	nein	Bodenwassergehalt, verfüg. Bewässerungswasser	nein	nein	HALL und BUTCHER ( 21 ), 1968
Bewässerungszeitpunkt, Wassermenge, Investition	analytisch	Niederschlag Temperatur	Wasserversorgung	nein	Central Missouri	BURT und STAUBER ( 12 ), 1971
Bewässerungszeitpunkt, Fläche je Anlage, Parzellenreihenfolge	simulativ	nein	Bodenwasserspannung	nein	Negev	NAGEL ( 33 ), 1975
<b>2. <u>Innerbetriebliche Wasserverteilung</u></b>						
Betriebsorganisation	analytisch	Niederschlag Regentage	Zielfunktion Produktionsverfahren	nein	Nördlicher Negev	ZUSMAN und AMIAD ( 47 ), 1965
Betriebsorganisation, intrasaisonale Wasserverteilung	simulative	Niederschlag Verdunstung	Bodenwassergehalt, verfüg. Bewässerungswasser	teilweise	hypothetisches Beispiel	WINDSOR und CHOW ( 46 ), 1971
Betriebsorganisation, Tag- und Nachtbewässerung	analytisch	nein	nein	ja	Nördlicher Negev	IRVIN ( 26 ), 1974
<b>3. <u>Regionale und innerbetriebliche Wasserverteilung</u></b>						
Regionale Anbaustruktur, Kapazität der Förder- und Verteilungsanlagen	analytisch	nein	nein	ja	hypothetisches Beispiel	ROGERS und SMITH ( 39 ), 1970
Regionale und innerbetriebliche Wasserverteilung	simulativ	nein	verfügbares Bewässerungswasser	nein	hypothetisches Beispiel	ANDERSON und MAASS ( 2 ), 1974

Das Kernproblem der intrasaisonalen Wasserverteilung, der Übergang vom verfügbaren Bodenwasser zur Ertragsbeeinflussung, wird komplexer durch den Umstand, daß bereits eingetretene Ertragsreduzierungen infolge Wassermangel sich durch nachfolgende höhere Wassergaben nicht mehr beseitigen lassen und alle vorherigen Wassergaben bei eintretendem Wassermangel vollständig oder teilweise hinfällig werden 1). Über den Einfluß des Zeitraumes, in dem Wassermangel besteht, auf den Naturalertrag sind weder pflanzenspezifische Angaben, noch Sensitivitätsuntersuchungen für Aussagen über die Bedeutung der Dauer der Mangelsituation zu finden.

Das aus der Unkenntnis über die zukünftige Klimaentwicklung resultierende Unsicherheitselement erfordert eine stochastische Erweiterung der Modelle. BURT und STAUBER (1971, 12) verwenden in ihrem Ansatz Niederschlagssumme und Temperatursumme für definierte Zeiträume der möglichen Bewässerung und bestimmen direkt den Ertrag und die Entwicklung der verfügbaren Wassermenge. WINDSOR und CHOW (1971, 46) hingegen verwenden Zufallsvariablen aus klimatischen Verhältnissen zur Erfassung eines erwarteten Wasserhaushaltes. Im allgemeinen zeigen die Ergebnisse, daß die Einbeziehung stochastischer Niederschlagsvariablen umso wichtiger ist, je ungünstiger die Niederschlagsverteilung und je höher die Niederschlagsmenge ist.

Bei den Ansätzen, die primär der Ermittlung der intrasaisonalen Wasserverteilung für ein Produktionsverfahren dienen, erweitern BURT und STAUBER (1971, 12) die Fragestellung und versuchen Investitionen in Wasserspeicher- und Wassertransportkapazitäten näherungsweise zu erfassen. Investitionskriterium ist die Differenz der Wasserverwertung des zusätzlichen Wassers aus der erhöhten Speicher- und/oder Transportkapazität unter den jährlichen Unterhaltungs- und Wiederbeschaffungskosten. NAGEL (1975, 33) schließlich erweitert seinen Ansatz um die Fragen nach der zweckmäßigen Bewässerungsfläche je Bewässerungsanlage und der zeitlichen Bewässerungsreihenfolge der Parzellen eines Betriebes. Beide Fragestellungen erscheinen relevant, wenn sich zum einen die Frage nach einer Investition für weitere Bewässerungsanlagen oder Erhöhung der Kapazität der vorhandenen anschließt und zum andern wenn eine Analyse des arbeitswirtschaftlichen Ablaufes unter besonderer Beachtung der Schlagkraft des Betriebes folgt.

Bei Ausdehnung der Frage nach der Intrasaisonalen Wasserverteilung auf den gesamten Betrieb (Mehrproduktbetrieb) entscheidet

- a) die Knappheit des verfügbaren Bewässerungswassers und
- b) die unterschiedliche Wasserverwertung der einzelnen Produktionsverfahren zu den jeweiligen Bewässerungszeitpunkten

über die Wasserverteilung zwischen den Produktionsverfahren, deren Ausdehnung und über die intrasaisonale Wasserverteilung. Die Möglichkeiten der Verwendung von linearen Prozeßanalysemodellen aus einzelbetrieblicher Sicht zur Lösung der innerbetrieblichen Wasserverteilung werden von IRVIN (1973, 26) aufgezeigt. Die Einschränkung bei der Anwendung für die vorliegende Problemstellung der gleichzeitigen Betrachtung der Wasserverteilung auf verschiedenen Ebenen innerhalb des Einzelbetriebes ergab sich zum einen daraus, daß sich stochastische Klimavariablen nicht einbeziehen lassen. ZUSMAN und AMIAD (1965, 47) versuchten bereits 1965 in einem nichtlinearen Ansatz die Unsicherheit der Niederschläge durch die stochastischen Variablen "Niederschlagsmenge" und "Zahl der Regentage" bei der Ermittlung der Betriebsorganisation zu berücksichtigen. Da sie nicht die Bewässerung miteinbezogen, entfiel die Frage nach der Allokation von Bewässerungswasser. Den wohl ersten Schritt zur komplexeren Erfassung der obigen Problemstellung gingen WINDSOR und CHOW (1971, 46) durch Dekomposition in Einzelprobleme. Zunächst ermitteln sie für jedes Produktionsverfahren die intrasaisonale Wasserverteilung, um dann die Lösungen in einem linearen Prozeßanalysemodell zur Ermittlung der Betriebsorganisation bei begrenzter Wasserverfügbarkeit zu verwenden. Die Trennung beider Lösungsprozesse verhindert allerdings die Erfassung von Interdependenzen zwischen der Wassergabe zu verschiedenen Zeitpunkten aller Produktionsverfahren und deren Ausdehnung. Es böte sich zumindest ein iterativer Rechenprozeß mit Rückkoppelung von der Lösung der Betriebsorganisation zur intrasaisonalen Wasserverteilung an.

1) Siehe dazu die Ergebnisse von DENMEAD und SHAW (1960, 16, S. 272 ff).

Der Übergang auf Regions- bzw. Projektebene bei Beibehaltung der bisherigen Problemstellung bei der Allokation von Bewässerungswasser bedingt die zusätzliche Berücksichtigung der Wasserverteilung zwischen den Betrieben. Von Interesse ist dabei die jeweilige Wasserverwertung, die Festlegung des Wasserpreises und seine Durchsetzung. Die Verwendung eines räumlichen Gleichgewichtsmodells unter Annahme eines freien Wassermarktes (GUISE und FLINN, 1970, 20) erscheint nur dann zweckmäßig, wenn zwischenbetrieblicher Wassertransfer möglich oder eine Wasserverteilungszentrale freie Entscheidung über die Wasserverwendung hat und nicht eine Produktion mit relativ niedriger Wasserverwertung aufrecht erhalten werden soll.

Sobald verschiedene Wasserverteilungsregeln bestehen oder möglich sind und/oder bestimmte Anbaukulturen Bewässerungspriorität haben, bietet auf Regionsebene das Simulationsmodell von ANDERSON und MAASS (1974, 2) eine Möglichkeit zur Ermittlung der Auswirkungen verschiedener Verteilungsregeln auf die regionale Einkommenssituation, das Produktionsvolumen und die einzelbetriebliche Bewässerungsstrategie. Deshalb werden der zwischenbetriebliche und teilweise der innerbetriebliche Wettbewerb um das Wasser berücksichtigt und die Betriebsorganisation simultan ermittelt. Die intrasaisonale Wasserverteilung wird nicht berücksichtigt. Einschneidende Annahmen dieses deterministischen Modells sind die für alle Betriebe gleichen Produktionsfunktionen und die Verwendung der Wasserverwertung als einziges Kriterium zur Bestimmung der Betriebsorganisationen. Die Erfassung eines komplexen Systems von Einzelbetrieb bis zur Regions- bzw. Projektebene bei ANDERSON und MAASS erscheint als ein gangbarer Weg zur Lösung des Gesamtproblems. Eine Erweiterung durch die Frage nach der zweckmäßigen Kapazität des Wasserverteilungsnetzes und der Wasserförderungsanlagen auf Regionsebene ermöglichen ROGERS und SMITH (1970, 39) in ihrem Ansatz, der die Region als Gesamtbetrieb beinhaltet 1).

Die modellmäßige Erfassung der beschriebenen Allokationsprobleme mit den Interdependenzen zwischen den verschiedenen Ebenen kann erst dann Anspruch auf näherungsweise Vollständigkeit erheben, wenn

- a) stochastische Elemente berücksichtigt werden, z.B. Niederschläge,
- b) Rückkoppelungs- und Kontrollabläufe formuliert sind; z.B. die Menge an Bewässerungswasser zum Zeitpunkt  $t_1$  wirkt auf den Naturalertrag zum Erntezeitpunkt und diese Wirkung entscheidet über eine weitere Erhöhung der Wassergabe in  $t_2$  oder z.B. beeinflusst die intrasaisonale Wasserverteilung bei knapper Wasserkapazität des Betriebes die Wasserverteilung zwischen den Produktionsverfahren und deren Ausdehnungsniveau und umgekehrt wirkt dies auf die intrasaisonale Wasserverteilung.

Daraus ergibt sich, daß zur Behandlung der Wasserallokation Simulationsmodelle besonders geeignet erscheinen 2). Im folgenden soll daher ein Simulationsansatz 3) diskutiert und angewandt werden, der einfach handhabbar ist und mit dem die Komplexität der angeführten Probleme näherungsweise abgebildet werden kann.

### 3. Ein Simulationsansatz zur Wasserverteilung

Mit dem Modell sollen folgende Probleme behandelt werden:

- a) intrasaisonale Wasserverteilung
- b) Wasserverteilung zwischen Produktionsverfahren und Ausdehnungsniveau der Produktionsverfahren
- c) regionale Wasserverteilung zwischen den Betrieben.

Fragen der regionalen und einzelbetrieblichen Investition werden nicht berücksichtigt.

- 1) Ähnlich gehen auch DUDLEY et al. (1972, 17) vor bei der Ermittlung der Gesamtfläche unter Bewässerung bei gegebenem Wasserreservoir. Zur Behandlung des Allokationsproblems auf regionaler Ebene siehe auch ASOPA (1971, 4) und LANDIS (1968, 28) und BEBEHANI (1972, 8).
- 2) Siehe DE HAEN (1972, 15; S. 21).
- 3) Zu Simulation, Systemanalyse, Systemtechnik und Systemforschung siehe WEINSCHENCK und WEINDLMAIER (1975, 45), SEUSTER (1975, 41), NAYLOR (1971, 35) und ORCUTT (1970, 36)

### 3.1 Ermittlung der intrasaisonalen Wasserverteilung

Die Arbeitsweise des Modells zur Ermittlung der intrasaisonalen Wasserverteilung eines Produktionsverfahrens konzentriert sich auf

- Ermittlung der Zufallsvariable für Niederschläge,
- Gegenüberstellung von Bodenwasser und Wasserbedarf der Pflanze und Ermittlung von Wasserdefizit für kleine Zeitabschnitte;
- tritt Wasserdefizit auf, wird überprüft, ob die daraus resultierende Erlösreduzierung größer ist als die zur Behebung des Wasserdefizits durch Bewässerung entstehenden Kosten (Schaubild 1).

Es wird nicht wie in vielen anderen Modellen das BELLMANN'sche Prinzip der dynamischen Programmierung (1953, 9) verwendet<sup>1)</sup>, sondern nach folgendem Arbeitsprozeß vorgegangen: Für jeden Tag wird aus den täglichen Niederschlägen mehrerer Jahre zufällig ein Niederschlagswert ausgewählt und für die tägliche Wasserbilanzierung verwendet. Als Maßgröße zur Abbildung des Wasserhaushaltes dient in Anlehnung an TAYLOR (1972, 42), FLINN (1971, 18) und NAGEL (1975, 33) die Bodenwasserspannung. Sie ist für eine gegebene Bodenart durch den Bodenwassergehalt gegeben<sup>2)</sup>. Da der Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt  $i$  bestimmt ist durch den Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt  $i - 1$  und den Zu- und Abflüssen, ergibt sich die Bodenwasserspannung aus

$$(1) \quad WS_i = f(WG_{i-1} + N_i + B_i - E_i - K_i^g),$$

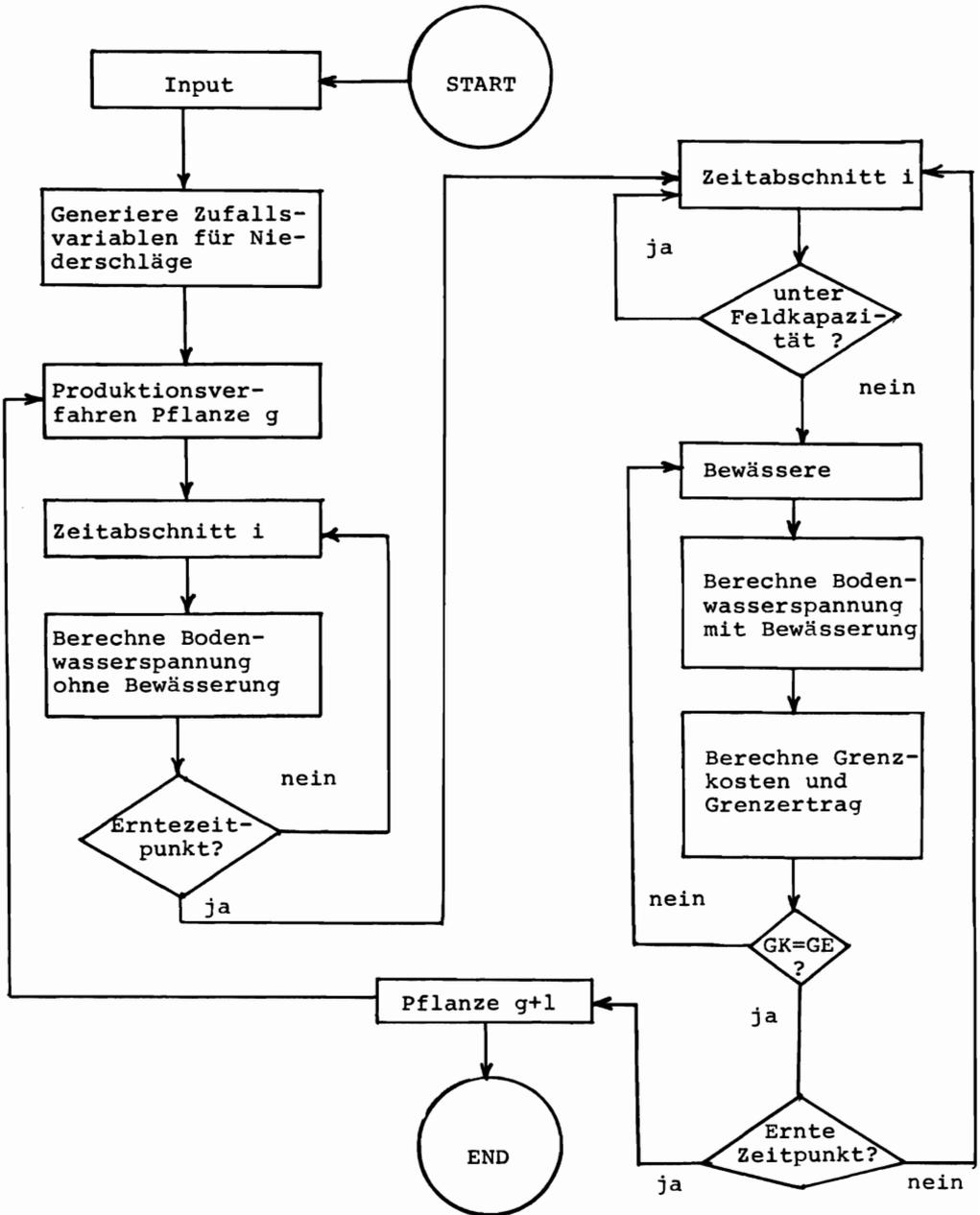
- wobei
- $i$  = Kleinste Zeiteinheit (= 1 Tag), für  $i = 1, 2 \dots n$ ;
  - $g$  = Pflanzenart, für  $g = 1, 2, \dots h$ ; 3)
  - $WS$  = Bodenwasserspannung;
  - $WG$  = Bodenwassergehalt;
  - $N$  = Netto-Niederschläge;
  - $B$  = Netto-Beregnung;
  - $E$  = Evaporation; 4)
  - $K$  = Wasserkonsum der Pflanze. 4)

Bei einer Wasserversorgung des Bodens in Höhe der Feldkapazität, d.h. bei dem maximal der Pflanze zur Verfügung stehenden Wasser, wird der maximale Naturalertrag erzielt. Liegt die ermittelte Bodenwasserspannung ohne Bewässerung höher als die Wasserspannung bei Feldkapazität, d.h. muß mit Ertragsreduzierungen infolge ungenügender Wasserversorgung gerechnet werden, dann wird die Notwendigkeit einer Bewässerung überprüft. Mit Hilfe von Ertragsreduzierungskoeffizienten (NAGEL, 1974, 34, HALL und BUTCHER, 1968, 21) wird die Reduzierung des potentiellen Ertrages ermittelt, so daß sich der effektive Ertrag ergibt aus

$$(2) \quad Y_e^g = Y_o^g - \sum_{i=1}^N b_i^g (WS_i - WS_{FK,i})$$

- Wie beispielsweise bei HALL und BUTCHER (1968, 21), WINDSOR und CHOW (1971, 46).
- Zur Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Bodenwasserspannung siehe NAGEL (1974, 34, S. 292) und WADLEIGH (1955, 44, S. 359) und WADLEIGH und AYERS (43, S. 106).
- Mit der Pflanzenart soll gleichzeitig die Durchwurzelungstiefe gegeben sein.
- Zur Bestimmung der Evaporation und des Wasserverbrauchs liegen umfangreiche Untersuchungen vor. Siehe dazu CHRISTIANSEN und HARGREAVES (1969, 13) und NAGEL (1975, 33). Zur Ermittlung der Wasserverbrauchskoeffizienten der Pflanzen wurden verschiedene Methoden entwickelt von BLANEY und CRIDDLE (1950, 11), HARGREAVES (1968, 23) und PENMAN (1956, 37). Allgemein zum Problem BALOGH (1974, 5, S. 18 ff), BAIER und ROBERTSON (6) und NAGEL (1975, 33).

Schaubild 1 Simulation der intrasaisonalen Wasserverteilung



wobei  $Y_e$  = Naturalertrag zum Erntezeitpunkt;  
 $Y_o$  = Maximalertrag bei pflanzenoptimaler Wasserversorgung (Feldkapazität);  
 $b$  = pflanzenspezifischer Ertragsreduzierungskoeffizient;  
 $WS$  = Bodenwasserspannung;  
 $WS_{FK}$  = Bodenwasserspannung bei Feldkapazität.

Zur Reduzierung der Bodenwasserspannung und damit der Ertragsverminderung wird die Bewässerungswassermenge zum potentiellen Bewässerungszeitpunkt sukzessive erhöht und für jede Wassereinheit untersucht, ob die Grenzkosten des Wassereinsatzes dem Grenzertrag aus der Ertragsreduzierung entsprechen. Für die Ermittlung des Grenzertrages wird ausschließlich die Wirkung des Bewässerungswassers vom potentiellen Bewässerungszeitpunkt bis zum Erntezeitpunkt herangezogen. Der Grenzertrag zum potentiellen Bewässerungszeitpunkt ergibt sich aus

$$(3) \quad GE_i^{g,k} = P_g \cdot \sum_{j=i}^{n-1} b_j \cdot (WS_j - WS_{FK,j}), \quad \text{für } j=i, \dots, n-1;$$

wobei  $k$  = Bewässerungsniveau, für  $k=1, 2, \dots, r$ ;  
 $GE$  = Grenzertrag des Wassereinsatzes,  
 $P_g$  = Preis des Produktes  $G$ .

Ist die Optimumsbedingung erfüllt, wird für die weiteren Berechnungen die Realisierung der Bewässerung unterstellt. Da bei vielen Pflanzen und in bestimmten Wachstumsphasen der Pflanzen bei geringem Abweichen von der Feldkapazität immer noch ein Maximalertrag erzielbar sein wird und die Zunahme der Bodenwasserspannung nichtlineare Beziehungen zu den Ertragsreduzierungen haben kann, läßt sich eine Schwelle der Ertragschädigung und der Schädigungsgrad bei zunehmender Spannung und zunehmender Dauer eines schädigenden Spannungsniveaus exogen in das Modell vorgeben.

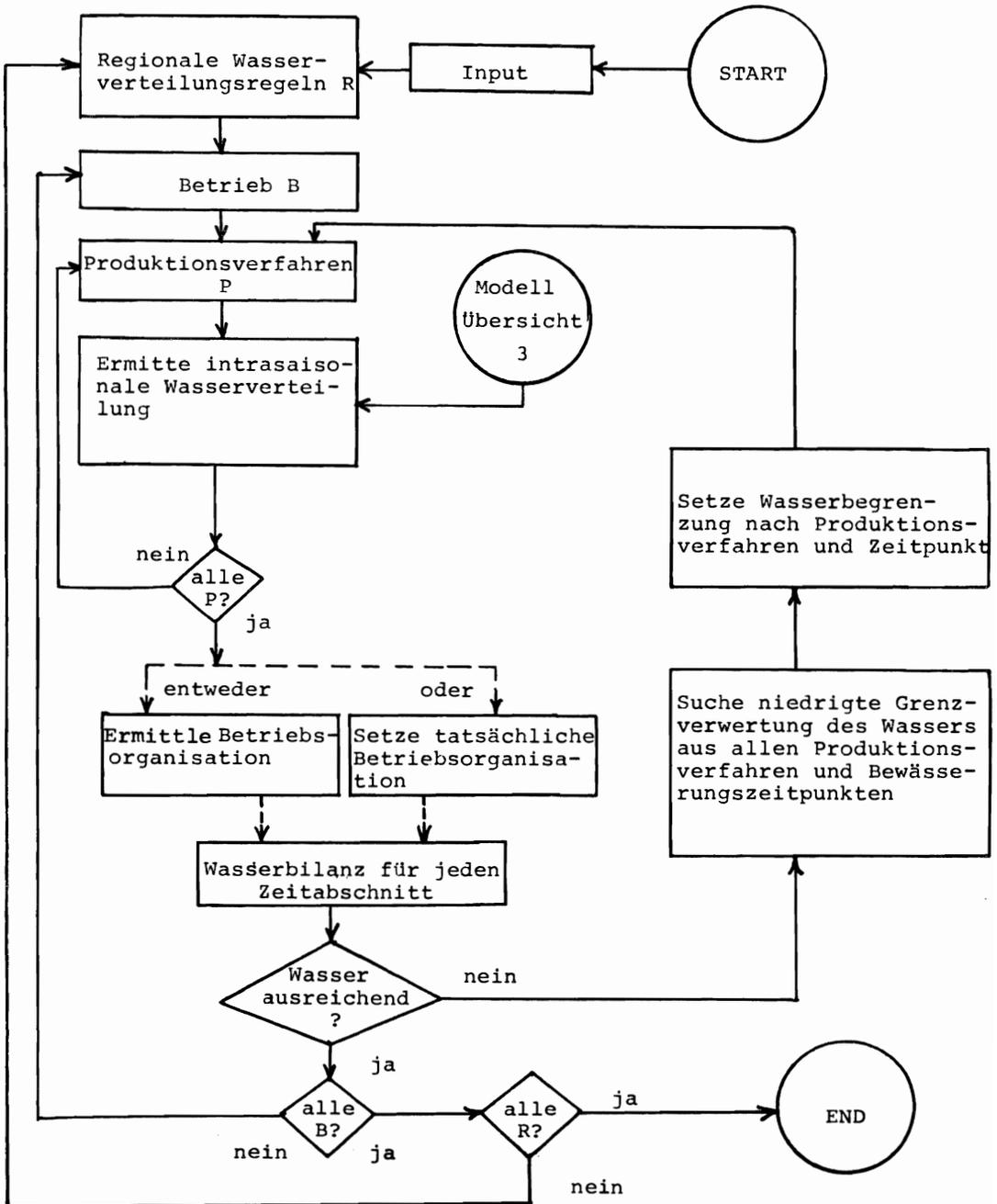
### 3.2 Intrasaisonale Wasserverteilung, Betriebsorganisation und regionale Wasserverteilung

Mit den Ergebnissen der intrasaisonalen Wasserverteilung für alle relevanten Produktionsverfahren wird in einem erweiterten Modell (Schaubild 2) die Betriebsorganisation ermittelt, wobei die Wasserverteilung zwischen den Produktionsverfahren mit deren Niveau und bei nicht ausreichender Wasserkapazität die unbewässerte aber bewässerbare Fläche gegeben ist. Die Ermittlung der Betriebsorganisation erfolgt über ein lineares Prozeßanalysemodell, in dem mehrere Faktorbegrenzungen berücksichtigt werden können. Reicht in einem Zeitabschnitt das Bewässerungswasser zur Bewässerung der gesamten Fläche nicht aus, dann wird über alle Produktionsverfahren für diesen Zeitabschnitt die bei der intrasaisonalen Wasserverteilung ermittelte niedrigste Grenzverwertung des Bewässerungswassers im Bewässerungsfall<sup>1)</sup> gesucht und die Bewässerung um eine bestimmte Einheit Wasser reduziert. Dadurch wird eine neue Ermittlung der intrasaisonalen Wasserverteilung für das betreffende Produktionsverfahren unter Maximalbegrenzung für den ausgewählten Zeitraum erforderlich. Es folgt eine neue Ermittlung der Betriebsorganisation. Dieser rücklaufende Korrekturprozeß erfolgt solange, bis sich die Einkommensituation des Betriebes nicht mehr wesentlich verbessert.

Dieser Rechengang wird für alle Betriebe einer Region oder eines Projektes durchgeführt. Die daraus abgeleitete Wasserverwertung nach Produkten und Betrieben im Zeitablauf gibt Hinweise für möglichen Wasser- oder Wasserkontingentsverkauf an andere Betriebe und für die Bildung des Wasserpreises, was durch Einbeziehung der Liquidität auf die finanzielle Durchsetzbarkeit

1) Das ist die niedrigste Wasserverwertung unter allen Fällen, die der Bedingung Grenzkosten gleich Grenzertrag genügen. Siehe Schaubild 4.

Schaubild 2 Simulation der intrasaisonalen, innerbetrieblichen und regionalen Wasserverteilung



des Wasserpreises erweitert werden kann. Für bestehende und mögliche Wasserverteilungsregelungen zwischen den Betrieben lassen sich die Auswirkungen auf die Wasserallokation auf verschiedenen Ebenen ermitteln. Zusätzliche Informationen für Wasserverteilungspolitische Entscheidungen können Beschäftigung und Arbeitsverwertung, Produktionsvolumen und Einkommenssituation liefern.

#### 4 Anwendung und Probleme

Der beschriebene Simulationsansatz soll im folgenden an einer vereinfachten realen Situation im nördlichen Negev/Israel angewandt werden. Die Datengrundlage wurde im wesentlichen NAGEL (1974, 34; 1975, 33) und IRVIN (1973, 26) entnommen. Die Ausgangssituation des Anwendungsbeispiels läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Vegetationsperiode liegt zwischen Oktober und Mai. Für diesen Zeitraum betragen die Durchschnittstemperaturen  $15,6^{\circ}\text{C}$ , die Niederschläge 228 mm. Es liegt Lößboden vor 1), dessen Feldkapazität bei 1,0 Bar liegt. Die täglichen Wasseransprüche (ACHTNICH, o.J. 1, BALOGH, 1974, 5) schwanken, ebenso wie die Ertragsreduzierungskoeffizienten, in Abhängigkeit von der Wachstumsphase der Pflanze (Übersicht 2). Mit der Bestimmung der Pflanze soll auch die berücksichtigte Wurzeltiefe gegeben sein.
- Die untersuchte Region besteht aus drei Kibbuzim. Flächenzupacht und Lohn-Arbeitskräfte sind nicht erlaubt. Es bestehen verschiedene Wasserbezugsquellen und monatlich unterschiedliche Wasserverfügbarkeit (Übersicht 3). Der Wasserpreis beträgt für Kontingentswasser aus der regionalen Wasserversorgung  $0,04 \text{ DM/m}^3$  und für Brunnenwasser  $0,03 \text{ DM/m}^3$ . Bei einer Übertretung des Kontingents von maximal 20 v.H. müssen  $4,- \text{ DM/m}^3$  bezahlt werden. Für die Verlegung und Inbetriebnahme der Beregnungsanlage werden Kosten in Höhe von DM 50,-- je ha unterstellt. Es wird davon ausgegangen, daß die Beregnungsanlagen vorhanden sind.
- Das Wasserkontingent der Betriebe orientiert sich überwiegend an der Flächenausstattung. Folgende Verteilungsregeln sind jedoch möglich:
  - a. Der Einzelbetrieb erhält von der verfügbaren Wasserkapazität einen bestimmten Prozentsatz; damit schwankt seine Wassermenge jahreszeitlich entsprechend der gesamten Gebietswassermenge; der Prozentsatz kann sich an der Betriebsgröße orientieren. Der Prozentsatz kann auf einem Kontingent oder auf einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge, in der eine bestimmte Wasserentnahmezeit gewährt wird basieren.
  - b. Die Betriebe unterliegen einer Rangfolge, nach der bestimmte Betriebe Vorzüge haben. Derartige Präferenzen (z.B. Wasserrechte) können sich orientieren an Standort (z.B. entlang eines Kanals), Siedlungszeit, Anbaukultur etc.

Bei der Anwendung des Simulationsmodells sind die empirischen Möglichkeiten und die Konsequenzen der Anwendungsprobleme für die Modellkonzeption von Interesse.

##### 4.1 Empirische Ergebnisse

Erwartungsgemäß wird dann bewässert, wenn die Niederschläge niedrig sind (Schaubild 3) und mit einer Wassermenge, die der Bodenwasserspannung und den Wasserbedürfnissen der Pflanze bei gegebener Preis-Kostenstruktur entspricht (Übersicht 6). Die Bodenwasserspannung weicht teilweise erheblich von der Feldkapazität ab, was bedeutet, daß offensichtlich der Maximalertrag nicht identisch ist mit dem ökonomisch optimalen Ertrag.

Die Bewässerungsstrategie ist zwischen den einzelnen Produktionsverfahren unterschiedlich und resultiert aus einer unterschiedlichen Verwertung des Wassers in den einzelnen Wachstumsabschnitten (Schaubild 4). Im allgemeinen nimmt die Wasserverwertung mit zunehmender Vegeta-

1) Zur hier verwendeten funktionalen Beziehung zwischen Bodenwasserspannung und Bodenwassergehalt für diesen Lößboden siehe NAGEL (1974, 34, S. 292) und RAWITZ und HILLEL (1969, 38, S. 232).

## Übersicht 2

Datengrundlage für die Produktionsverfahren

Produktions- verfahren	Wurzel- tiefe in cm	täglicher Wasserbe- darf <sub>3</sub> in m	b-Koeffizient					Produkt- preis in DM / dz	
			Dez.	Jan.	Febr.	März	April		Mai
Weizen 1	40	31 - 38	6	57	13	6	5	2	15.--
Weizen 2	40	27 - 34	4	38	8	5	4	1	14.--
Hirse	50	22 - 31	2	10	16	4	2	1	12.--
Baumwolle	70	49 - 82	4	5	8	6	5	1	65.--
Zuckerrüben	60	78 - 92	21	27	33	35	18	11	3.--
Tomaten	40	84 - 110	17	50	50	40	40	30	9.--

## Übersicht 3

Datengrundlage der Betriebe

Kapazitätsausstattung	Betrieb A	Betrieb B	Betrieb C
Ackerfläche in ha	440	387	720
Wasserkontingent in 1000 m <sup>3</sup>			
Mekoroth-Wasser			
Dez.	56	0	92
Jan.	44	0	101
Febr.	52	0	90
März	48	0	96
April	43	0	88
Mai	41	0	82
Reservoir-Wasser			
Dez.	70	92	108
Jan.	74	84	115
Febr.	76	86	107
März	76	100	105
April	75	84	105
Mai	75	84	101
Brunnenwasser monatlich	101	167	233
Durchschnittliche Bewässerungs- kapazität in mm / ha	303	395	359

Schaubild 3 Zufällig ausgewählte Niederschläge und Entwicklung der Bodenwasserspannung bei Weizen 1

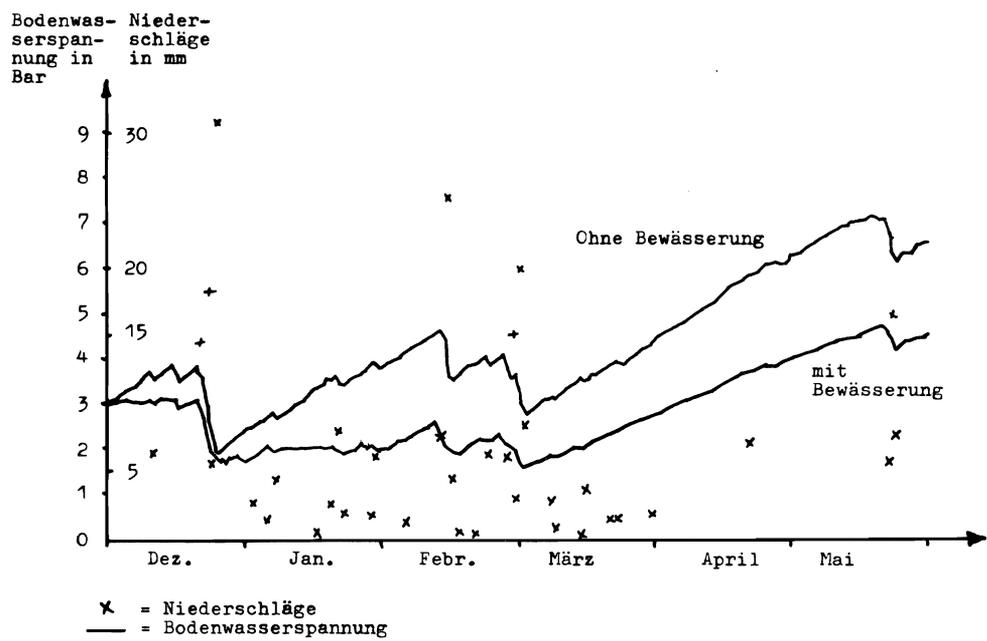
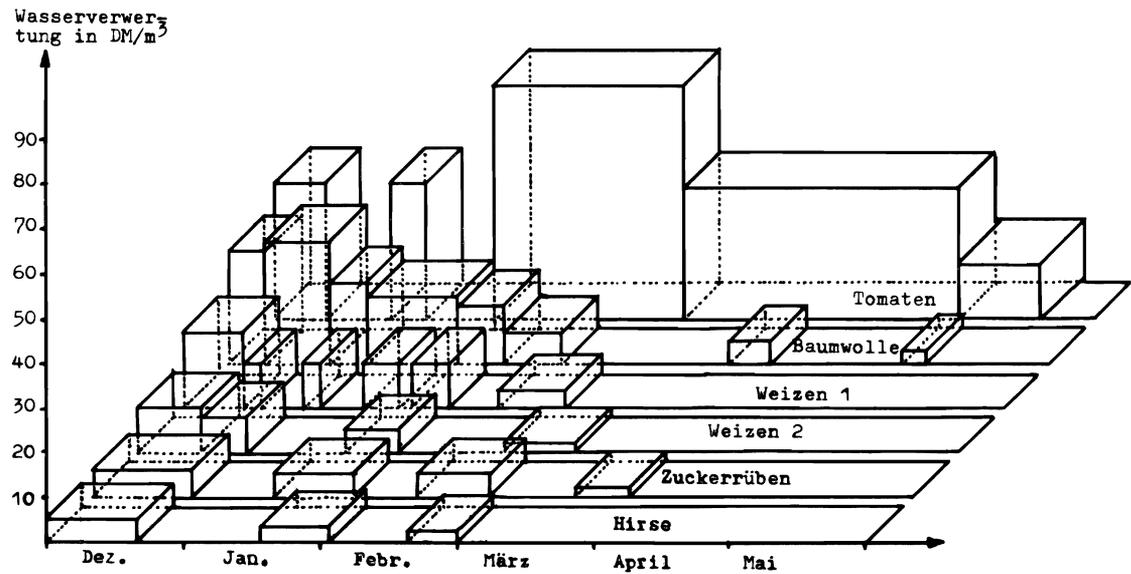


Schaubild 4 Die Verwertung des Wassers bei isolierter Betrachtung der Produktionsverfahren



## Übersicht 4

Der Einfluß der Kosten auf Bewässerungshäufigkeit  
und Wassermenge bei Weizen 1

Bereit- stellungs- kosten der Anlage je ha	Bewässe- rungs- häufig- keit	Wasser- menge in mm	mm je Bewäs- serung	Wasser- preis DM/m <sup>3</sup>	Bewässe- rungs- häufig- keit	Wasser- menge in mm	mm je Bewäs- serung
20.--	43	111	2,58	0,02	22	92	4,18
40.--	27	129	4,78	0,04	22	92	4,18
60.--	18	109	6,06	0,06	24	130	5,42
80.--	13	96	7,38	0,08	23	132	5,74
100.--	9	76	8,44	0,10	22	130	5,91
120.--	6	58	9,66	0,12	23	132	5,74

## Übersicht 5

Die Organisation der Betriebe

Betrieb	Erste Lösung			Endlösung		
	A	B	C	A	B	C
Weizen 1 in ha	122	0	330	95	84	330
Weizen 2 in ha	0	0	0	78	0	66
Hirse in ha	0	0	0	0	0	0
Baumwolle in ha	180 <sup>1)</sup>	200 <sup>1)</sup>	240 <sup>1)</sup>	180 <sup>1)</sup>	200 <sup>1)</sup>	240 <sup>1)</sup>
Zuckerrüben, ha	0	0	0	0	0	0
Tomaten in ha	39	78	84	39	78	84
Ungenutzte Fläche in ha	99	109	66	48	25	0
Deckungsbeitrag in 1000.-- DM	256	347	409	262	359	412
Deckungsbeitrag je m <sup>3</sup> Wasser in DM	0,21	0,24	0,17	0,22	0,25	0,17
Wasserknappheit in Periode	3	2	3	3,2	3,2	(3)

1) Die vorgegebenen Fruchtfolgebegrenzungen wurden erreicht.

Übersicht 6 Bewässerungsstrategie der intrasaisonalen Wasserverteilung für Betrieb C <sup>1)</sup>

3-Tages-Abschnitte	Weizen 1		Weizen 2		Wassergabe in mm							
	a <sup>2)</sup>	b <sup>2)</sup>	a <sup>2)</sup>	b <sup>2)</sup>	Hirse a <sup>2)</sup>	b <sup>2)</sup>	Baumwolle a <sup>2)</sup>	b <sup>2)</sup>	Zuckerrüben a <sup>2)</sup>	b <sup>2)</sup>	Tomaten a <sup>2)</sup>	b <sup>2)</sup>
1	3	3	5	5			6	6	20		8	8
2	8	8	8	8	10		8	8	20		12	12
3							8	8	10		11	11
4	9	9	9	9	10		8	8	10		11	11
5	5	5	7	7			8	8	10		10	10
6	6	6	8	8	8		8	8			10	10
7	5	5	9	9			7	7	10		9	9
8	5	5	10	10			7	7			11	11
9							7	7			11	11
10	5	5					9	9			10	10
11							9	9			9	9
12	5	5					9	9			9	9
13	5	5	5	5			9	9	10		9	9
14	5	5	5	5			10	10	10		9	9
15	5	5	5	5			10	10	10		9	9
16	4	4			6		11	11	20		10	10
17	4	4					11	11			10	10
18							11	11	10		10	10
19			6	6			10	10	15		11	11
20	5	5			7		9	9			11	11
21	5						18	18			15	15
22							21	21			16	16
23							25	25			18	18
24	5		5				24	24	8		19	19
25							22	22	10		21	21
26												
27												
28							8	8			16	16
29			9				12	12	10		21	21
30												
31		8		10								
32												
33												
34												
35												
36	4	4					5	5			10	10
37							8	8			11	11
38							9	9			14	14
39							10	10			18	18
40							9	9	7		20	20
41												
42	6	6	5	5			7	7			10	10
43											5	5
44							4	4			10	10
45												
46												
47							3	3	5		10	10
48												
49							5	5			10	10
50	3	3							5		5	5
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58												
59												
60												
Summe	97	99	91	92	41		365	365	200		449	449

1) Bereitstellungskosten der Beregnungsanlage DM 50.-- je ha; Wasserpreis DM 0,04 je m<sup>3</sup>

2) a = Ergebnis ohne Wasserbegrenzung

b = Ergebnis mit Wasserbegrenzung aus der Ermittlung der Betriebsorganisation nach der 6. Rückkoppelung von Betriebsorganisation zu intrasaisionaler Wasserverteilung.

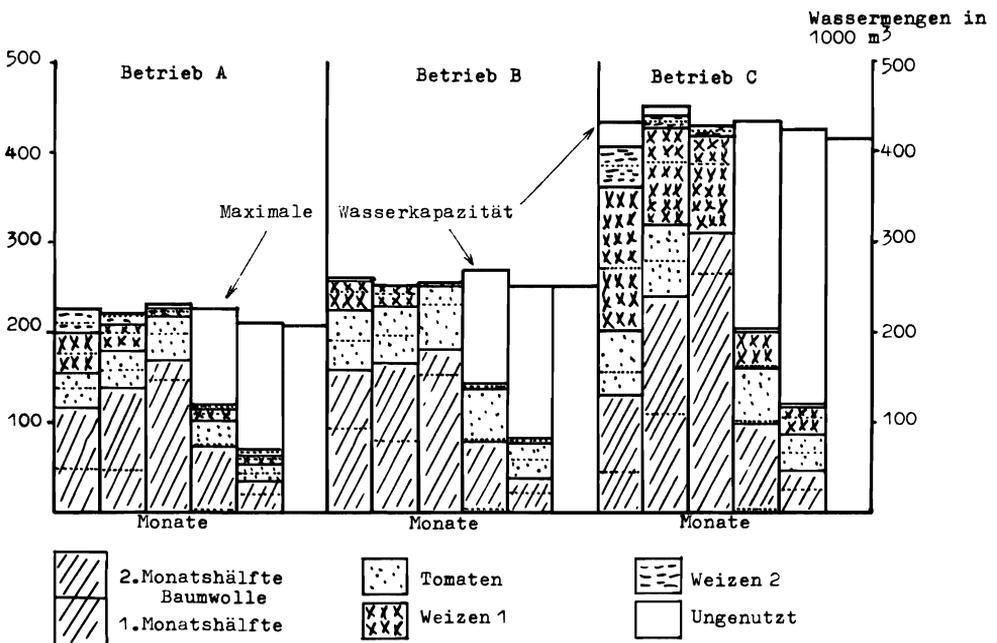
tionszeit ab, eine Folge der abnehmenden Bedeutung der Wasserversorgung der Pflanzen bis zur Reife- und Erntezeit und eine Folge der Wirkung einer früheren Bewässerung auf die nachfolgenden Vegetationsabschnitte.

Von erheblichem Einfluß auf die intrasaisonale Wasserverteilung bei Weizen sind die Kosten der Bereitstellung und Ingangsetzung der Beregnungsanlage für eine Bewässerung. Mit zunehmenden Kosten nimmt die Bewässerungshäufigkeit erheblich ab, die Höhe der Wassergabe je Bewässerung steigt (Übersicht 4). Das bedeutet beispielsweise beim Übergang von Tröpfchenbewässerung, mobiler Beregnungsanlage mit Aufrollen von Schläuchen, mit Verlegung durch Schlepper bis zum Handvorschub nimmt die Gefahr von Engpässen in der Wasserversorgung zu. Die Erhöhung des Wasserpreises brachte lediglich beim Übergang von DM 0,04 auf DM 0,06 je m<sup>3</sup> einen Einfluß auf die verbrauchte Wassermenge, im wesentlichen ergab sich jedoch eine Umstrukturierung bei den Anwendungszeitpunkten.

Mit den Ergebnissen der intrasaisonalen Wasserverteilung der einzelnen Produktionsverfahren (Schaubild 4, Übersicht 3) ergaben sich Betriebsorganisationen der drei Betriebe, die in Periode 2 und 3 nicht ausreichend Wasser hatten und infolgedessen bewässerbare Fläche ungenutzt blieb (Übersicht 5). Die darauf folgende Korrekturrechnung der intrasaisonalen Wasserverteilung führte in Betrieb A zu einer Reduzierung der Wassermenge bei Weizen 1 in Periode 3, wodurch die Organisation sich zugunsten des Anbaus von Weizen 2 verschob. In Betrieb C führte eine zeitliche Verschiebung der Bewässerung bei Weizen 1 zur Bewirtschaftung der gesamten Betriebsfläche. Die innerbetriebliche Wasserverteilung ist in Schaubild 5 wiedergegeben.

Die vorliegende regionale Wasserverteilung zwischen den Betrieben, bei der der Wasseranteil dem Flächenanteil entspricht, wird dahingehend verändert, daß der größte Betrieb (C) 20 v. H. seines bisherigen Wassers weniger erhält und die freigewordene Wassermenge zu gleichen Anteilen den beiden übrigen Betrieben zufällt. Es ergibt sich eine Veränderung bei den intrasaisonalen Wasserverteilung und den Betriebsorganisationen, die zu folgendem Gesamtergebnis führen:

Schaubild 5: Innerbetrieblicher Wasserverteilungsplan im Zeitablauf



	Betrieb A	Betrieb B	Betrieb C
Deckungsbeitrag in 1 000,-- DM/Betrieb	269	372	391

Deckungsbeitrag in DM/m <sup>3</sup> verbrauchtes Wasser	0,18	0,22	0,20
---	------	------	------

Die wichtigste Veränderung ergab sich bei Betrieb C, der vor allem den Baumwollanbau reduzierte und in Periode 3 weniger bewässerte. Betrieb A dehnte aus Gründen der AK-Knappheit den Weizenanbau aus, während Betrieb B Weizen- und Tomatenanbau erhöhte.

#### 4.2 Möglichkeiten und Grenzen des Ansatzes

Zielsetzung bei der Konzeption des vorliegenden Simulationsmodells war, ein Instrument zu schaffen, mit dem praktische Probleme in einfach handhabbarer Weise gelöst werden können. In einigen Bereichen wurde daher auf spezifische Problemformulierungen verzichtet.

Mit dem vorgestellten Simulationsansatz lassen sich unter Beachtung stochastischer Elemente intrasaisonale, innerbetriebliche Wasserverteilung und deren Interdependenzen erfassen und Auswirkungen von Entscheidungen der regionalen Wasserverteilung bestimmen. Das Modell geht über den Ansatz von ANDERSON und MAASS (1974, 2) hinaus durch die Einbeziehung der intrasaisonalen Wasserverteilung und stochastischer Klimavariablen, und es kann über die von WINDSOR und Chow (1971, 46) erfaßte Problematik hinaus den Wettbewerb und die Wasserverteilung zwischen den Betrieben erfassen. Als wesentlich für die praktische Anwendbarkeit des vorgestellten Simulationsmodells wird die relativ einfache Handhabbarkeit angesehen, die sich in einer relativ eingeschränkten Datengrundlage und einer vergleichsweise niedrigen Rechenkapazität 1) niederschlägt. Die relative Einfachheit des Ansatzes zur Lösung der vergleichsweise komplexen Problematik gilt sowohl für die erforderliche Datengrundlage als auch für die notwendige Rechenzeit und den Kernspeicherbedarf. Durch die Verwendung der Bodenwasserspannung, die in der Praxis leicht zu messen ist, unterliegt die Ermittlung der Wasserspannungsverhältnisse im Modell einer einfachen Kontrolle. Der Ansatz bietet sich daher auch in ariden und semi-ariden Gebieten als ein Handlungsinstrument für Entscheidungsträger auf regionaler und betrieblicher Ebene an

- a) zur Vorausplanung der Wasserverteilung nach Menge und Zeit (inklusive Festlegung des Wasserpreises),
- b) zur problemgerechten Korrektur der Planung während der Vegetationsperiode mit Hilfe bereits ermittelter tatsächlicher Beobachtungswerte.

Eine Problematik aus der Datengrundlage konnte auch hier nicht umgangen werden:

- die Ermittlung und Verwendung der Ertragsreduzierungskoeffizienten, da ihre Bestimmung in der Realität schwierig sein kann und
- die Festlegung der oberen Ertragsschädigungsschwelle der Bodenwasserspannung und der Zeitdauer, in der diese Schwelle überschritten sein muß, um zu Ertragsdepressionen zu führen.

Zur Ermittlung der Auswirkung von Fehlschätzungen der Ertragsreduzierungskoeffizienten wurden beim Weizenanbau verschiedene b-Werte verwendet. Es zeigte sich, daß bei einer Unterschätzung im Januar (b = 57) um 12,3 v.H. (auf b = 50) die Häufigkeit der Bewässerung um 1 Bewässerung (4,7 v.H.) anstieg und die gesamte Wassermenge etwa konstant blieb. Im Monat März dagegen (b = 6) führte eine Fehlschätzung von -33 v.H. (+ 33 v.H.) zu einer Abnahme (Zunahme) der Bewässerungshäufigkeit von 4,3 v.H. (22,7 v.H.) und der Wassermenge von 4,5 v.H. (34,4 v.H.).

Die offensichtlich stärkste Einschränkung bei dem Ziel, die Komplexität der Bewässerung und Interdependenz verschiedener Ebenen der Wasserverteilung zu erfassen, ergibt sich für das vorliegende Modell aus der Ausklammerung der Kapazitätsausdehnung durch Investitionen. Dies

1) 3 Betriebe mit je 6 Produktionsverfahren benötigten ca. 12 000 Kernspeicherplätze bei einer Turn Around Time von ca. 14 Minuten auf einer Rechenanlage ICL, 1 900 A.

ist auf regionaler Ebene vor allem deshalb gravierend, da hier durch die Inflexibilität der Anlagen bezüglich Standort, Kapazitätserweiterung und Wiederverkauf die Investitionsfrage besonderen Charakter hat.

Die Einbeziehung der betrieblichen und regionalen Investition würde eine Erweiterung auf die intersaisonale Betrachtung und die Einbeziehung mehrperiodischer Programmteile erfordern, wobei die Untersuchungen von BELLMANN (1953, 9), MOHN und HANF (30), BEBEHANI (1972, 8), IRVIN (1973, 26), ASOPA (1971, 4) und LANDIS (1968, 28) eine Ausgangsbasis dafür bieten.

## 5 Schlußbetrachtung

Zur Erweiterungsmöglichkeit des Ansatzes hat sich bei der Anwendung gezeigt, daß für die Bestimmung des Bewässerungszeitpunktes nicht ein Tag als kleinste Zeiteinheit gewählt werden muß, sondern es würde ausreichen, die Bewässerung für die Wochen festzulegen. Es böte sich dann an, die von NAGEL (33) behandelten arbeitswirtschaftlichen Probleme der Bewässerungsreihenfolge einzelner Parzellen mittels eines Netzplanes zu lösen. Die trotzdem noch vorhandene einfache Handhabbarkeit ließe es zu, die Fragestellung um die Investitionsproblematik zu erweitern und beispielsweise mehrperiodisch-dynamische Ansätze anzukoppeln.

## Literatur

- 1 ACHTNICH, W.: Cultivations of Plant under extreme climatic conditions through use of salty irrigation water. In: Plant Research and Development. Vol. 1, S. 12-21, Separate Print, ohne Jahr.
- 2 ANDERSON, R.L. and MAASS, A.: A Simulation of irrigation systems - The effect of water supply and operating rules on production and income on irrigation farms. Techni. Bull. No. 1431, USDA, Econ. Serv., Washington, D.C. 20250, 1974.
- 3 ASKEW, A.J., YEH, W.W.-G. and HALL, W.A.: A comparative Study of critical drought simulation. In: Water Resources Research, Vol. 7, Feb. 1971, S. 56-62.
- 4 ASOPA, V.: An Application of Mathematical Decision. Theorie to the Economic Evaluation of Water Use in Crop Production. Diss. Urbana, University of Illinois 1971.
- 5 BALOGH, J.: Water Consumption of Irrigated Crops. In: ICID-Bulletin, July 1974.
- 6 BAIER, W. and ROBERTSON, G.W.: A New Versatile Soil Moisture Budget. In: Canadian Journal of Plant Science, Vol. 46, S. 299-315.
- 7 BAUMANN, H. Schendel, U. und MANN, G.: Wasserwirtschaft in Stichworten. Kiel, 1974.
- 8 BEHBEHANI, E.: Möglichkeiten zur Steigerung der landwirtschaftlichen Einkommen in dem Bewässerungsgebiet VARAMIN in Persien; Diss. Fachber. Wirtschafts- u. Sozial-Wiss. Univ. Hohenheim, 1972.
- 9 BELLMANN, R.E.: An introduction to the theory of dynamic programming. Rep. R-245, Rand Corp. Santa Monica, California, 1953.
- 10 BERINGER, C.: An Economic Model for Determining the Production Function for Water in Agriculture. University of California, Giannini Foundation Research Report, No. 240, Febr. 1961.
- 11 BLANEY, H.F. and GRIDDLE, W.D.: Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA, Soil Conservation Service, Washington 25, D.C., 1950.
- 12 BURT, O.R. and STAUBER, M.S.: Economic analysis of irrigation in subhumid climates. In: American Journal of Farm Economics. Vol. 53, No. 1, 1971, S. 33-46.
- 13 CHRISTIANSEN, J.E. und HARGREAVES, G.H.: Irrigation Requirements from Evaporation. In: Seventh Congress on Irrigation and Drainage. International Commission on Irrigation and Drainage. Mexico City, 1969, Question 23, S. 570-596.
- 14 CHOW, V.T and KARELIOTIS, S.J.: Analysis of stochastic hydrologie Systems. In: Water Resources Research, Vol. 6, Dez. 1970, S. 1569-1582.
- 15 DE HAEN, H.: Landwirtschaftliche Strukturprojektionen mit Hilfe von Simulationsmodellen. Methodisches Konzept und Anwendungsmöglichkeiten. Manuskript zur Tagung der GeWiSoLa, Okt. 1972.
- 16 DENMEAD, O.T. and SHAW, R.H.: The Effects of Soil Moisture Stress at Different Stages of Growth on the Development and Yield of Corn. In: Agronomy Journal, Vol. 52 (1960), S. 272-274.
- 17 DUDLEY, N.J., HOWELL, D.T. and MUSGRAVE, W.F.: Irrigation planning 3. The best size of irrigation area for a given reservoir. In: Water Resources Research. Vol. 8, Nor. 1, Febr. 1972 S. 7-17.

- 18 FLINN, J.C.: The Simulation of crop irrigation system in: DENT, J.B. and ANDERSON, J.R. Systems analysis in agricultural management; New York (123-151), 1971.
- 19 FLINN, J.C. and MUSGRAVE, W.F.: Development and analysis of input-output relations for irrigation water; in: The Australian Journal of Agric. Econ., Vol. 11, No. 1, June 1967, S. 1-19.
- 20 GUISE, J.W.B. and FLINN, J.C.: The allocation and pricing of water in a river basin. In: American Journal of Agricultural Economics. Vol. 52, Nor. 3, Aug. 1970.
- 21 HALL, W.A. and BUTCHER, W.S.: Optimal timing of irrigation. In: Journal of Irrigation and Drainage Division. IR2 (94), Juni 1968.
- 22 HALTER, A.N. and MILLER, S.F.: River Basin planning: a Simulation approach. Oregon State University, Agricultural Experiment Station, Special report 224, Nov. 1966.
- 23 HARGREAVES, G.H.: Consumptive use derived from evaporation pan data. In: Journal of Irrigation and Drainage Division. IR1, Vol. 94, 1968, S. 97-104.
- 24 HUFSCHMIDT, M.M.: Simulating the behaviour of a multiunit, multi-purpose water-resource system. In: HOGGATT, A.G. (Hrsg): Symposium on simulation models: methodology and Applications to the behavioural Sciences. Cincinnati, Ohio, 1963, S. 203-226.
- 25 HUFSCHMIDT, M.M. and FIERING, M.B.: Simulation techniques for design of water resource systems. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1966.
- 26 IRVIN, C.W.: Irrigation planning at farm level using Linear programming techniques. Discussion paper no. 18, Institute of Development Studies, University of Sussex. Juli 1973.
- 27 KEULEN, VAN H.: Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Wageningen, 1975.
- 28 LANDIS, W.L.: Dynamische und lineare Programmierung zur optimalen Dimensionierung eines Bewässerungsprojektes; Diss. Zürich, 1968.
- 29 MAASS, A. HUFSCHMIDT, M.M. DORFMAN, R., THOMAS, H.A., MARGLIN, S.A. and FAIR, G.M.: Design of Water-resource systems. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1966.
- 30 MOHN, R. und HANF, E.: Ein Beitrag zu den Kriterien und Methoden der Beurteilung von Bewässerungsprojekten; In: Z.f.Bewässerungswirtschaft, Jg. 5, Heft 1, 1970, S. 8-27.
- 31 MARANI, A., SHIMSI, D. and AMIRAV, A.: The effect of time and duration of soil moisture stress on flowering, boll shedding, seed and lint development, yield and lint quality of cotton. Second and final Res. Rep., Vol. 2, Rehovet, 1971.
- 32 MIERNYK, W.H.: An interindustry forecasting model with water quantity and quality restraints. In: System analysis for great lakes water resources. Ohio State University, Okt. 1969.
- 33 NAGEL, F.W.: Die Ökonomik der Beregnung bei Weizen in semi-ariden Regionen Nordafrikas und des Nahen Ostens - untersucht für die Negev Israels, Diss., Hohenheim, 1975.
- 34 NAGEL, F.W.: Water-yield relations in wheat-growing in the Negev (Israel). Sonderdruck, ohne Ort, 1974.
- 35 NAYLOR, T.H.: Computer simulation experiments with models of economic systems, New York, 1971.
- 36 ORCUTT, G.H.: Simulation of economic systems. In: American Economic Review. Vol. 50, 1970, S. 843-907.

- 37 PENMAN, H.L.: Evaporation: an introductory survey. In: *Netherland Journal of Agricultural Science*. 1956, Vol. 4, S. 9-29.
- 38 RAWITZ, E. and HILLEL, D.I. Comparison of Indexes Relating Plant Response to Soil Moisture Status. In: *Agronomy Journal*, Vol. 61, March-April 1969.
- 39 ROGERS, P. and SMITH, D.V.: The integrated use of ground and surface water in irrigation project planning. In: *American Journal of Agricultural Economics*. Vol. 52, No. 1, 1970.
- 40 SCHROEDER, G.: *Landwirtschaftlicher Wasserbau*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, 1968.
- 41 SEUSTER, H.: *Unternehmungssysteme in der Landwirtschaft*. Manuskript, Gießen 1975.
- 42 TAYLOR, S.A.: Use of Mean Soil Moisture Tension to Evaluate the Effect of Soil Moisture Crop Yields. In: *Soil Science*, Vol. 74, No. 3, 1972.
- 43 WADLEIGH, C.H. and AYERS, A.D.: Growth and Biochemical Composition of Bean Plants as Conditioned by Soil Moisture Tension and Salt Concentration.
- 44 WADLEIGH, C.H.: Soil Moisture in Relation to Plant Growth. In: "Water", *The Yearbook of Agriculture*, 1955, Washington, US-Government Printing Office.
- 45 WEINSCHENCK, G. und WEINDLMAIER, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Systemforschung und Simulation in der Landwirtschaftlichen Sektoranalyse. Vorläufige Fassung. Manuskript. Hohenheim, Juni 1975.
- 46 WINDSOR, J.S. and CHOW, V.T.: Model for farm irrigation in humid areas. *Journal of the Irrig. and Drain. Div.*, Vol. 97, IR 3, S. 369-383, Sept. 1971.
- 47 ZUSMAN, P. and AMIAD, A.: Simulation: a tool for farm planning under conditions of weather uncertainty; *Journal of Farm Economics*, 1965, Vol. 47, S. 574-594.