

DVWV

SCHRIFTEN

57

**Einfluß der Landnutzung
auf den Gebietswasserhaushalt**

Verlag Paul Parey

Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für
Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.

(DVWK)

Heft 57

1983



SCHRIFTEN

57

Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt

Die Interzeption des Niederschlags
in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen
Dr. Jürgen Frhr. von Hoyningen-Huene

Einfluß land- und forstwirtschaftlicher Bodennutzung
sowie von Sozialbrache auf die Wasserqualität kleiner
Bachläufe im ländlichen Mittelgebirgsraum

Prof. Dr. Botho Wohlrab
Dipl.-Geogr. Volker Sokollek
Dr. Wilhelm Süßmann

Chemische Beschaffenheit und Nährstofftransport von
Bachwässern aus kleinen Einzugsgebieten unterschiedlicher
Landnutzung im Nordhessischen Buntsandsteingebiet

Dr. Friedrich Lehnhardt
Prof. Dr. Horst Michael Brechtel
Dr. Martin Boneß



13 28 822

Institut für Angewandte Geowissenschaften
T U Darmstadt

Standard *Abbildung*

Kommissionsvertrieb
Verlag Paul Parey
Hamburg und Berlin

1983

Herausgeber:
Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK)
Gluckstrasse 2, 5300 Bonn 1, Tel: 0228/631446

CIP — Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Einfluss der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt. —
Hamburg; Berlin: Parey, 1983.

(Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für
Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., DVWK; H. 57)
Enth. u. a.: Die Interzeption des Niederschlags in landwirt-
schaftlichen Pflanzenbeständen/Jürgen Frhr. von Hoynin-
gen-Huene. — Einfluss land- und forstwirtschaftlicher Bo-
dennutzung sowie von Sozialbrache auf die Wasserqualität
kleiner Wasserläufe im ländlichen Mittelgebirgsraum /
Volker Sokollek; Wilhelm Süssmann; Botho Wohlrab

ISBN 3-490-05797-X.

NE: Hoyningen-Huene, Jürgen von: Die Interzeption des...; Sokol-
lek, Volker: Einfluss land- und...; Süssmann, Wilhelm: Einfluss
land- und...; Wohlrab, Botho: Einfluss land- und...; Deutscher Ver-
band für Wasserwirtschaft und Kulturbau: Schriftenreihe des
Deutschen...

ISBN 3-490-05797-X

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesonde-
re die der Übersetzung, des Nachdruckes, des Vortrages, der Entnahme von Abbildun-
gen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugswei-
ser Verwertung, vorbehalten. Werden einzelne Vervielfältigungsstücke in dem nach § 54
Abs. 1 UrhG zulässigen Umfang für gewerbliche Zwecke hergestellt, ist die nach § 54
Abs. 2 UrhG zu zahlende Vergütung zu entrichten, über deren Höhe der Verlag Auskunft
gibt.

© 1983 Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, Anschriften: 2000 Hamburg 1, Spitaler-
straße 12; 1 Berlin 61, Lindenstraße 44-47.

Printed in Germany by R. Schwarzböld, 5305 Witterschlick bei Bonn
Umschlaggestaltung: Jan Buchholz und Reni Hinsch, Hamburg

ISSN: 0170-8147 · InterCode: SDVKDJ

V O R W O R T

Der DVWK-Fachausschuß "Nutzung und Erhaltung der Kulturlandschaft" befaßt sich u.a. auch mit dem Einfluß der Landnutzung auf das nutzbare natürliche Wasserdargebot. Aus diesem Arbeitsgebiet sollen drei Beiträge von Mitgliedern des Fachausschusses die Problematik und erste Ergebnisse von laufenden Untersuchungen darstellen.

Teil I: Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen

Dr. J. von Hoyningen-Huene.

Teil II: Einfluß land- und forstwirtschaftlicher Bodennutzung sowie von Sozialbrache auf die Wasserqualität kleiner Wasserläufe im ländlichen Mittelgebirgsraum

Prof. Dr. B. Wohlrab, Dr. W. Süßmann,
Dipl.-Geogr. V. Sokollek.

Teil III: Chemische Beschaffenheit und Nährstofftransport von Bachwässern aus kleinen Einzugsgebieten unterschiedlicher Landnutzung im Nordhessischen Buntsandsteingebiet

Prof. Dr. H.M. Brechtel, Dr. M.K.E. Boneß,
Dr. F. Lehnhardt.

Die Untersuchungen zum Teil III waren nur durch eine enge Zusammenarbeit des Instituts für Forsthydrologie der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt mit der Außenstelle Kassel der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, mit dem Hessischen Landesamt für Landwirtschaft in Kassel und mit dem Wasserwirtschaftsamt Kassel möglich geworden. Die Probeentnahme im Rautenbachgebiet (Gewässerkundliches Forschungsgebiet Ziegenhagen) erfolgte durch Herrn Förster vom Wasserwirtschaftsamt Kassel, und im Gießbachgebiet (Domäne Beberbeck) war hierfür Herr

Dr. Budig vom Landesamt für Landwirtschaft verantwortlich. Beiden Herren sei an dieser Stelle für die Durchführung dieser sehr arbeitsaufwendigen Aufgabe herzlich gedankt.

Besonderer Dank ist auch Herrn Rapp, dem Leiter der Sachgebietssgruppe "Auswertung" der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, zu sagen, mit dessen Hilfe die mathematisch-statische Auswertung des sehr umfangreichen Datenmaterials bewältigt werden konnte.

Zu danken ist auch dem ehemaligen KWK-Arbeitsausschuß "Nährstoffauswaschung" (jetzt DVWK-Fachausschuß "Bodenutzung und Nährstoffaustausch"), der sich mit den Ergebnissen vorliegender Untersuchung befaßt und auch alle Probeentnahmestellen bereist hat. Bei der Interpretation der Befunde haben die Autoren sehr viel durch die konstruktive Kritik dieses Fachausschusses profitiert.

Schließlich danken die Autoren insbesondere dem DVWK-Fachausschuß "Nutzung und Erhaltung der Kulturlandschaft" für die eingehende Beratung hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse und der daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen. Folgende Mitglieder des Fachausschusses haben daran mitgewirkt:

BAITSCH, B.	Prof.em. Dr.-Ing., Bonn
BRECHTEL, H.M.	Prof. Dr.rer.nat., Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Hann.Münden
EGGELSMANN, R.	Prof. Dr.rer.nat., Nieders. Landesamt für Bodenforschung, Bremen
HOYNINGEN-HUENE, J.	Frhr. von, Dr. ORR, Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorolog. Forschungsstelle, Braunschweig
PRÖBSTLE, E.	Dipl.-Ing., Ministerialrat, Oberste Baubehörde, München
WOHLRAB, B.	Prof. Dr., Institut für Mikrobiologie und Landeskultur, Gießen

ANSCHRIFTEN DER AUTOREN

BONESS, Martin, Dr., Chemieoberrat, Hessische Landesanstalt
für Umwelt, Außenstelle Kassel, Steinweg 6, 3500 Kassel

BRECHTEL, Horst Michael, Prof. Dr.rer.nat., Hessische Forst-
liche Versuchsanstalt, Institut für Forsthydrologie,
Prof.-Oelkers-Straße 6, 3510 Hann.-Münden

HOYNINGEN-HUENE, Jürgen Freiherr von, Dr. Dipl.-Met., Ober-
regierungsrat, Deutscher Wetterdienst, Zentrale Agrar-
meteorologische Forschungsstelle, Bundesallee 50,
3300 Braunschweig

LEHNARDT, Friedrich, Dr., Dipl.-Ing.agr., Hessische Forstli-
che Versuchsanstalt, Prof.-Oelkers-Straße 6, 3510 Hann.-
Münden

SOKOLLEK, Volker, Dipl.-Geog., Institut für Mikrobiologie und
Landeskultur, Justus-Liebig-Universität, Senckenberg-
straße 3, 6300 Gießen

SÜSSMANN, Wilhelm, Dr., Institut für Mikrobiologie und Landes-
kultur, Justus-Liebig-Universität, Senckenbergstraße 3,
6300 Gießen

WOHLRAB, Botho, Prof. Dr., Institut für Mikrobiologie und
Landeskultur, Justus-Liebig-Universität, Senckenberg-
straße 3, 6300 Gießen

I N H A L T

SEITE

TEIL I	DIE INTERZEPTION DES NIEDERSCHLAGES IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN PFLANZENBESTÄNDEN	1
	von J. von Hoyningen-Huene	
1.	EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG	3
2.	MATERIAL UND METHODEN	6
2.1	Versuchsanlagen und Meßmethoden	6
2.2	Statistische Methoden	12
3.	ERGEBNISSE	13
3.1	Ablauf der Interzeption und der Interzeptions- verdunstung	13
3.2	Meßergebnisse in verschiedenen Kulturen	20
3.2.1	Zuckerrüben	21
3.2.2	Getreide (Roggen, Hafer, Weizen)	23
3.2.3	Kartoffeln	25
3.2.4	Mais	26
3.2.5	Einfluß der Bestandsmorphologie auf die Größe der Niederschlagskomponenten	29
3.3	Modelluntersuchungen	32
3.3.1	Ergebnisse statistischer Untersuchungen	32
3.3.2	Aufbau und Diskussion des Modells	37
3.3.3	Prüfung des Modells	39
3.3.4	Modellrechnungen zur Bestimmung des Anteils der Interzeptionsverluste an der Niederschlagsbilanz	44
4.	SCHLUSSFOLGERUNGEN	50
5.	SCHRIFTTUM	51

TEIL II	EINFLUSS LAND- UND FORSTWIRTSCHAFTLICHER BODEN- NUTZUNG SOWIE VON SOZIALBRACHE AUF DIE WASSER- QUALITÄT KLEINER WASSERLÄUFE IM LÄNDLICHEN MITTELGEBIRGSRAUM	55
	von V. Sokollek, W. Süßmann und B. Wohlrab	
1.	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	57
2.	UNTERSUCHUNGSGBIETE UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN	60
2.1	Forschungsgebiet Edersee	60
2.2	Forschungsgebiet Krofdorf C	71
2.3	Untersuchungsmethoden	74
2.3.1	Hydrologische Ausgangsdaten	74
2.3.2	Wasserchemische Methoden	76
3.	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	78
3.1	Witterung und Abflußverhältnisse während des Untersuchungszeitraumes	79
3.1.1	Witterungsverlauf 1976 bis 1981	79
3.1.2	Abflußverhältnisse	81
3.2	Austrag wasserqualitätsbestimmender Stoffe aus land- und forstwirtschaftlichen sowie Brache- einzugsgebieten	92
3.2.1	Nitrat	94
3.2.2	Sulfat	104
3.2.3	Chlorid	107
3.2.4	Gesamt- und Karbonathärte	111
3.2.5	Natrium	114
3.2.6	Elektrolytische Leitfähigkeit	116
3.2.7	pH-Wert	119
3.2.8	Schwebstoffe	121
3.2.9	P-Verbindungen	125

SEITE

3.2.10	Kalium	134
3.2.11	Kaliumpermanganat-Verbrauch	137
3.3	Abhängigkeiten der Konzentrationen vom Abfluß und Beziehungen zwischen den Wasserqualitätsparametern	140
3.3.1	Konzentrierungseffekt, insbesondere bei Nitrat und Sulfat	142
3.3.2	Verdünnungseffekt in Verbindung mit den Parametern Gesamt- und Karbonathärte, elektrolytische Leitfähigkeit und pH	150
3.3.3	Beziehungen zwischen Abfluß und den überwiegend mit dem Bodenabtrag verbundenen Wasserqualitätsparametern	154
4.	ZUSAMMENFASSUNG	165
5.	SCHRIFTTUM	172

TEIL III CHEMISCHE BESCHAFFENHEIT UND NÄHRSTOFFTRANS-
PORT VON BACHWÄSSERN AUS KLEINEN EINZUGS-
BIETEN UNTERSCHIEDLICHER LANDNUTZUNG IM NORD-
HESSISCHEN BUNTSANDSTEINGEBIET

von F. Lehnhardt, H.M. Brechtel und M.K.E. Boneß

1.	EINLEITUNG	181
2.	LITERATURANALYSE NACH EINFLUSSFAKTOREN	183
2.1	Gestein und Boden	183
2.2	Bodennutzung	185
2.2.1	Stickstoff	189
2.2.2	Phosphor	191
2.3	Niederschlag	194
3.	MATERIAL UND METHODE	196
3.1	Standortverhältnisse	196

	SEITE
3.1.1 Forsthydrologisches Experimental-Einzugsgebiet Elsterbach	197
3.1.2 Gewässerkundliches Forschungsgebiet Ziegenhagen (Rautenbach)	203
3.1.3 Untersuchungsgebiet Gießbach (Domäne Beberbeck)	207
3.2 Messungen und Probeentnahme	210
3.3 Chemische Analysenmethoden	214
3.4 Auswertung	215
4. ERGEBNISSE	216
4.1 Niederschlag und Abfluß	217
4.2 Wassertemperatur	219
4.3 Chemische Parameter	219
4.3.1 Zeitliche Variation der Stichprobenwerte	221
4.3.2 pH-Wert	226
4.3.3 Gesamtfeststoff	229
4.3.4 Ammonium	233
4.3.5 Nitrat	236
4.3.6 Phosphor	240
4.3.7 Chlorid	246
4.3.8 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	251
4.3.9 Ergebnisse von Teileinzugsgebieten	254
4.4 Einfluß des Abflußregimes	258
4.5 Stoffausträge	267
4.6 Chemische Beschaffenheit des Niederschlages	273
4.7 Input und Output der Nährstoffe	277
4.8 Gesamtbeurteilung der Bachwasserqualität in den drei Untersuchungsgebieten	280
5. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE	283
6. SCHLUSSFOLGERUNGEN	288
7. SCHRIFTTUM	291

VERZEICHNIS DER BILDER UND TAFELN

TEIL I DIE INTERZEPTION DES NIEDERSCHLAGES IN
LANDWIRTSCHAFTLICHEN PFLANZENBESTÄNDEN

Bild	SEITE
1 Vorrichtung zum Auffangen des stammabfließenden Niederschlags in Mais	8
2 Meßeinrichtung zur Bestimmung des durchfallenden und durchtropfenden Niederschlags in Mais	8
3 Meßgefäß für den Stammabfluß und Rinnen für den durchfallenden und durchtropfenden Niederschlag in Getreide	10
4 Kragenförmige Zinkblechrinnen zum Auffangen des Stengelabflusses in Rüben	10
5 Verlauf der Interzeptionsverdunstung bei künstlicher Berechnung - berechnet aus der Differenz der Gewichtsänderungen zweier Lysimeter	15
6 Verlauf der Energieströme während der Interzeptionsverdunstung	18
7 Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption bei Zuckerrüben in den Jahren 1976, 1977 und 1978	22
8 Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption bei verschiedenen Getreidebeständen, Weizen, 1978, Hafer, 1979 und Roggen, 1980	24
9 Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption in Kartoffeln (1979)	25
10 Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption in Mais der Bestandsdichten 4 Pfl./m ² , 8 Pfl./m ² und 12 Pfl./m ²	27
11 Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption in Mais der Bestandsdichten 12 Pfl./m ² , 32 Pfl./m ² und 72 Pfl./m ²	28
12 Beziehungen zwischen Interzeption in Gras und Niederschlag nach Messungen verschiedener Autoren nach Rijtema (1965)	31

Bild	SEITE
13 Beziehung zwischen Interzeption und Niederschlag in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad bei Halm- und Blattfrüchten nach RENGER und STREBEL (1980, un- veröffentlicht)	31
14 Regressionsfläche der Abhängigkeit der Interze- ptionsverluste Ni von Blattflächenindex LAI und Freilandniederschlag für alle verwendeten Be- stände	35
15 Beziehung zwischen Freilandniederschlag, Blatt- fläche und Interzeption nach dem vorgestellten Modell	40
16 Jahresverlauf der Blattflächenindizes LAI ver- schiedener Kulturarten	45
Tafel	
1 Schema der multiplen Korrelationskoeffizienten zwischen durchfallendem Niederschlag, Stammab- fluß und Interzeption und den errechneten Reak- tionsflächen bei verschiedenen Selektionen der Einflußparameter Freilandniederschlag, Blattflä- che, Windgeschwindigkeit und relative Feuchte	33
2 Mittlere Differenz von Messung und Berechnung der Interzeption bei Hafer und gelbreifem Weizen	38
3 Vergleich von gemessener Interzeption bei Weizen, Futterrüben und Mais 1980 mit Modellrechnung in Millimeter	42
4 Vergleich der Interzeptionskapazität nach Messun- gen und Modell	43
5 Interzeptionsverluste in verschiedenen landwirt- schaftlichen Kulturen im Juli 1979 nach Modell- rechnung	46
6 Monats- und Jahressummen der absoluten Interze- ptionsverluste in mm und Anteil am Freilandnieder- schlag in % bei verschiedenen landwirtschaftli- chen Beständen 1979 nach Modellrechnung	47

TEIL II EINFLUSS LAND- UND FORSTWIRTSCHAFTLICHER BODEN-NUTZUNG SOWIE VON SOZIALBRACHE AUF DIE WASSER-QUALITÄT KLEINER WASSERLÄUFE IM LÄNDLICHEN MITTELGEBIRGSRAUM

Bild	SEITE
1 Lage der Untersuchungsgebiete in Hessen	59
2 Übersichtskarte Forschungsgebiet Edersee	61
3 Teil-Einzugsgebiet Vogelgraben, Saubach, Erleborn und Hünenburggraben mit Bodennutzung und Gewässern	67
4 Teil-Einzugsgebiet Sachsengraben mit Bodennutzung und Gewässern	68
5 Quelle Selbach mit möglichem Einzugsgebiet	68
6 Forschungsgebiet Krofdorf C mit Höhenlinien, Bodennutzung und wichtigsten Meßstationen	73
7 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum (hydrolog. Jahre 1976 bis 1981): Monatsmittel der Lufttemperaturen und monatliche Niederschlagshöhen - im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten	80
8 Quartalsmittel der Abflußspenden ($l/s \cdot km^2$) und Quartalssummen der Niederschläge (mm) im Forschungsgebiet Edersee, hydrolog. Jahre 1976 - 81	83
9 Quartalsmittel der Abflußspenden ($l/s \cdot km^2$) und Quartalssummen der Niederschläge (mm) im Forschungsgebiet Krofdorf C, hydrolog. Jahre 1978 bis 1981	84
10 Gang der Tages-Abflußspendenmittel ($l/s \cdot km^2$) am Pegel Vogelgraben ($A_{Eo} = 1,25 \text{ km}^2$, landwirtschaftliche Nutzung) im Zeitraum 1977 bis 1981	85
11 Verlauf der Nitrat-Konzentrationen und Ganglinie des Abflusses im Vogelgraben	98
12 Verlauf der Sulfat-Konzentrationen im Vogelgraben	107
13 Verlauf der Gesamthärte und der Karbonathärte im Erleborn	113
14 Verlauf der Leitfähigkeitswerte im Erleborn	118

Bild	SEITE
15a Beziehung Abfluß - Nitratkonzentration beim Vogelgraben	144
15b Beziehung Abfluß - Nitratkonzentration beim Saubach	144
15c Beziehung Abfluß - Nitratkonzentration bei Krofdorf C	145
16 Nitrat-Konzentrationsverlauf und Abflußganglinie während des Hochwassers vom 3.6.1981 im Saubach	146
17 Beziehung Abfluß - Sulfatkonzentration beim Vogelgraben	149
18 Beziehung Abfluß - Karbonathärte beim Saubach	151
19 Ganglinie der Gesamt- und Karbonathärte, der elektr. Leitfähigkeit und des Abflusses während des Hochwassers vom 3.6.1981 im Saubach	154
20 Beziehung Abfluß - P_{ges} -Konzentration und Abfluß -o-Phosphat-Konzentration beim Vogelgraben	157
21 Abflußganglinie und Verlauf der Schwebstoffgehalte, der P_{ges} - und der o-Phosphat-Konzentrationen während des Hochwassers vom 3.6.1981 im Saubach	161
Tafel	
1 Morphometrische und hydrologische Kenngrößen der untersuchten Einzugsgebiete	62
2 Bodennutzung in den untersuchten Einzugsgebieten	66
3 Mittelwerte der Lufttemperaturen ($^{\circ}$ C) im Forschungsgebiet Edersee, hydrologische Jahre 1976 bis 1981	69
4 Niederschlagssummen (mm) in den Forschungsgebieten Edersee und Krofdorf C, hydrologische Jahre 1976 bis 1981	70
5 Gegenüberstellung von Abfluß-Mittelwerten (l/s), die aus wöchentlichen Einzelmessungen (Q_{dis}) bzw. kontinuierlichen Messungen (Q_{kont}) berechnet wurden	76

TAFEL	SEITE
6 Mittlere und niedrigste Abflußspenden ($l/s \cdot km^2$) in den hydrologischen Jahren 1976 bis 1981	82
7 Mittel der Abflußspenden ($l/s \cdot km^2$) der Quartale und der hydrologischen Jahre im Zeitraum 1976-81	87
8 Größte Hochwasserabflußspenden ($l/s \cdot km^2$) in den Winter- und Sommerhalbjahren der hydrologischen Jahre 1977 bis 1981	89
9 Mittelwerte der Nitratkonzentrationen der einzelnen Quartale und hydrologischen Jahre	95
10 Mittelwerte der Nitratkonzentrationen über die Quartale und den Gesamtuntersuchungszeitraum	96
11 Abfluß- und Konzentrationsmittelwerte der "Abflußtypen" im Winter- und im Sommerhalbjahr beim Vogelgraben	100
12 Abfluß- und Konzentrationsmittelwerte der "Abflußtypen" im Winter- und im Sommerhalbjahr beim Saubach	101
13 Nitrat-Frachten der hydr. Jahre und mittlere Quartals- und Jahresfrachten des Gesamtuntersuchungszeitraumes	103
14 Mittelwerte der Sulfat-Konzentrationen	106
15 Mittelwerte der Chlorid-Konzentrationen	109
16 Mittelwerte der Gesamt- und Karbonathärte	112
17 Mittelwerte der Natrium-Konzentrationen	115
18 Mittelwerte der Elektrolytischen Leitfähigkeit	117
19 Mittelwerte der pH-Werte	120
20 Mittelwerte der Schwebstoff-Gehalte	122
21 Schwebstoff-Frachten der hydr. Jahre und mittlere Quartals- und Jahresfrachten des Gesamtzeitraumes	124
22 Mittelwerte der hydr. Jahre, der Quartale und des Gesamtzeitraumes der P_{ges} -Konzentrationen	126

Tafel	SEITE
23 P_{ges} -Frachten der hydr. Jahre und mittlere Quartals- und Jahresfrachten des Gesamtzeitraumes	128
24 Mittelwerte der ortho-Phosphat-Konzentrationen	130
25 ortho-Phosphat-Frachten der hydr. Jahre und mittlere Quartals- und Jahresfrachten des Gesamtzeitraums	132
26 Mittelwerte der Kalium-Konzentrationen	135
27 Kalium-Frachten der hydr. Jahre und mittlere Quartals- und Jahresfrachten des Gesamtzeitraums	136
28 Mittelwerte des Kaliumpermanganat-Verbrauchs	139
29 Korrelationsmatrix aller Wasserqualitätsparameter und des Abflusses beim Sachsengraben	141
30 Ergebnisse der Korrelationsrechnung Abfluß - Nitrat-, Sulfat- und Chlorid-Konzentration	143
31 Ergebnisse der Korrelationsrechnung Abfluß - Gesamthärte, Karbonathärte, elektr. Leitfähigkeit und pH-Wert	152
32 Ergebnisse der Korrelationsrechnung Abfluß - Schwebstoffgehalt, $KMnO_4$ -Verbrauch, P_{ges} -, o-Phosphat-, Kalium- und Ammonium-Konzentration	155

TEIL III CHEMISCHE BESCHAFFENHEIT UND NÄHRSTOFFTRANSPORT
 VON BACHWÄSSERN AUS KLEINEN EINZUGSGEBIETEN
 UNTERSCHIEDLICHER LANDNUTZUNG IM NORDHESSISCHEN
 BUNTSANDSTEINGEBIET

Bild		SEITE
1	Lage der drei Untersuchungsgebiete	198
2	Experimental-Einzugsgebiet Elsterbach	199
3	Gewässerkundliches Forschungsgebiet Ziegenhagen (Rautenbach)	204
4	Untersuchungsgebiet Gießbach (Domäne Beberbeck)	208
5	Ganglinien der pH-Werte	227
6	Ganglinien der Gesamtfeststoffgehalte	230
7	Ganglinien der Ammoniumkonzentrationen	234
8	Ganglinien der Nitratkonzentrationen	237
9	Abnahme der Nitratkonzentrationen von den Drän- rohren bis zur Meßstelle B ₅ auf einer Fließ- strecke von ca. 2 km bei erhöhter Wasserführung, dargestellt am Beispiel zweier Meßtermine beim Gießbach	241
10	Ganglinien der Phosphorkonzentrationen	243
11	Ganglinien der Chloridkonzentrationen	248
12	Ganglinien des chemischen Sauerstoffbedarfs	252
13	Beziehung zwischen pH-Wert und Abfluß im Elster- bach (E ₁)	261
14	Beziehung zwischen pH-Wert und Abfluß im Rauten- bach (Z ₅)	262
15	Beziehung zwischen Ammoniumgehalt und Abfluß im Elsterbach (E ₁)	263
16	Beziehung zwischen Nitratgehalt und Abfluß im Elsterbach (E ₁)	264
17	Beziehung zwischen Nitratgehalt und Abfluß im Rautenbach (Z ₅)	265

Bild		SEITE
18	Beziehung zwischen Nitratgehalt und Abfluß im Gießbach (B_5)	266
19	Gegenüberstellung des Nährstoff-Inputs durch Niederschlag dem Nährstoff-Output durch den Elsterbach	279
Tafel		
1	Zusammenstellung von Literaturangaben über Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen von Bach- und Sickerwässern bei verschiedenartiger Bodennutzung	187
2	Zusammenstellung von Literaturangaben über Austräge von Stickstoff und Gesamt-Phosphor bei verschiedenartiger Bodennutzung	188
3	Standortverhältnisse der Untersuchungsgebiete	200
4	Niederschlags- und Abflußhöhen während des Zeitraumes von Juli 1972 bis April 1975	218
5	Mittlere Temperaturen von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	220
6	Variationskoeffizienten (%) des pH-Wertes, der Feststoff- und Nährstoffgehalte (mg/l) sowie des chemischen Sauerstoffbedarfs (mg/l) vom Elsterbach	222
7	Variationskoeffizienten (%) des pH-Wertes, der Feststoff- und Nährstoffgehalte (mg/l) sowie des chemischen Sauerstoffbedarfs (mg/l) vom Rautenbach	223
8	Variationskoeffizienten (%) des pH-Wertes, der Feststoff- und Nährstoffgehalte (mg/l) sowie des chemischen Sauerstoffbedarfs (mg/l) vom oberen Gießbach (B_5)	224
9	Arithmetische Mittel und Spannen der pH-Werte von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	228
10	Rahmen- und Mittelwerte der Feststoffgehalte (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	232

Tafel		SEITE
11	Rahmen- und Mittelwerte der Ammoniumkonzentrationen (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	235
12	Rahmen- und Mittelwerte der Nitratkonzentrationen (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	238
13	Rahmen- und Mittelwerte der Gesamt-Phosphor-Konzentrationen (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	244
14	Rahmenwerte der Konzentrationen an gelöstem Phosphor (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	247
15	Rahmen- und Mittelwerte der Chloridkonzentrationen (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	250
16	Rahmen- und Mittelwerte des chemischen Sauerstoffbedarfs (mg/l) von Bachwässern für den Zeitraum von Juli 1972 bis April 1975	253
17	Mittlere Konzentrationen von den Teilgebieten für den gesamten Untersuchungszeitraum (Juli 1972 bis April 1975)	255
18	Abhängigkeit der pH-Werte, der Feststoffgehalte und des chemischen Sauerstoffbedarfs vom Abfluß	259
19	Abhängigkeit der Ammonium-, der Nitrat- und der Chloridkonzentrationen vom Abfluß	260
20	Jährliche Austräge von Fest- und Nährstoffen durch Bachwässer	268
21	Austräge von Fest- und Nährstoffen durch Bachwässer in den Sommerhalbjahren	269
22	Austräge von Fest- und Nährstoffen durch Bachwässer in den Winterhalbjahren	270
23	Halbjährliche Austräge von Fest- und Nährstoffen durch Bachwässer aus zwei kleineren Einzugsgebieten unterschiedlicher Landnutzung	274
24	Rahmen- und Mittelwerte der Nährstoffkonzentrationen (mg/l) im Niederschlagswasser von der Klimastation Elsterbach	276

I.

Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen

Dr. J. Frhr. v. Hoyningen-Huene, Braunschweig

1. EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Wegen der intensiven Inanspruchnahme des Grundwassers durch die Wasserwirtschaft zur Sicherstellung des Wasserbedarfes von Industrie und Bevölkerung sind die Bodenwasservorräte in manchen Gebieten der Bundesrepublik in beängstigendem Maß zurückgegangen. Deshalb konzentrieren sich viele hydrologische Untersuchungen auf die Grundwassererneubildung, bei der sich neben dem Niederschlag auch die Gebietsverdunstung als wesentlicher Bestimmungsfaktor erweist. Im Mittel über die verschiedenen Klimabereiche der Bundesrepublik verdunsten nämlich etwa ca. 65 % des Niederschlages, die restlichen 35 % aber fließen ab oder versickern in den Untergrund und füllen die Grundwasservorräte auf. Veränderungen im Wasserverlust durch Verdunstung wirken sich deshalb besonders markant in der Grundwassererneubildung aus, und es ist besonders wichtig, die Verdunstungsvorgänge intensiv zu untersuchen und nach einer Möglichkeit Ausschau zu halten, die "Wasserverluste" in diesem Sinne so zu beeinflussen, daß eine höhere Grundwasserspende als "Wasserertrag" resultiert.

Nach Untersuchungen von BRECHTEL und v. HOYNINGEN-HUENE (1979) ist dies auch durch Auswahl und Art der Behandlung der Pflanzendecken durch pflanzenbauliche und forstwirtschaftliche Maßnahmen durchaus möglich. Die Transpiration verschiedenartiger Bestände ist nämlich je nach Vegetationsdauer und Jahreszeit sehr unterschiedlich. Da mit der Transpiration jedoch pflanzliche Produktionsvorgänge essentiell verknüpft sind und ohne negative Auswirkung auf die Ertragsbildung nur schwer reduziert werden können, sollte mehr Beachtung der "unproduktiven Verdunstung" und der Möglichkeit ihrer künstlichen Reduzierung durch pflanzenbauliche bzw. forstliche Maßnahmen geschenkt werden. Zu dieser unproduktiven Verdunstung müssen alle Evapotranspirationsvorgänge gerechnet werden, d.h. alle Verdunstungsvorgänge, bei denen das Wasser direkt aus dem flüssigen Zustand in den gasförmigen übergeht, ohne daß pflanzliche Regelvorgänge eine Rolle spielen. Zur Evaporation zählt nach DIN 4049 die Ver-

dunstung des nackten Bodens, der offenen Wasserflächen und an die Verdunstung der von Pflanzenbeständen aufgefangenen und zwischengespeicherten Niederschlagstropfen, die Interzeptionsverdunstung.

HAMILTON und ROWE (1949) definierten die Interzeption Ni als "den Prozeß", bei welchem der auf einen Bestand fallende ungestörte Niederschlag No von der Vegetationsdecke abgefangen wird und nur zum Teil als durchtropfender und abtropfender Niederschlag (Nf + Nt) und als Stammabfluß (Ns) den Erdboden erreicht. Die restliche Wassermenge, in der Literatur oft als "Interzeptionspeicherung" bezeichnet, evapiert direkt in die Atmosphäre und dient nicht zur Auffüllung der Bodenwasservorräte.

Man erhält also die Gleichung:

$$No = (Nf + Nt) + Ns + Ni \quad (1)$$

Nach DIN 4049 erfolgt die Zwischenpeicherung nur an lebender Pflanzenteilen, was in Fachkreisen zu kontroversen Diskussionen führte. Im hier vorgelegten Beitrag werden auch tote Pflanzenteile mit zur Interzeptionskapazität gerechnet, da abgestorbene Blätter etc. beim Interzeptionsvorgang durchaus wirksam sind und die hohen Werte der Interzeptionsverluste bei Nadelwald oder bei Sozialbracheflächen nicht zuletzt eben durch abgestorbene Blätter, Nadeln oder Zweige bedingt sind. Zudem ist eine meßtechnische Trennung der Verluste an lebenden und tote Pflanzenteilen nicht möglich. Eine darüber hinausgehende Einbeziehung weiterer wirksamer toter Gegenstände wie Zäune, Dächer, Straßen etc. stand hier allerdings nicht zur Debatte. Ihre hydrologische Wirksamkeit ist jedoch nicht bestreitbar.

Wegen des beträchtlichen Anteils der Interzeption an der Niederschlagsbilanz von Wäldern wurden dort bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (HEUVELDOP 1973, BRECHTEL und PAVLOV 1977, WEIHE 1979). Eine zusammenfassende Darstellung der älteren Untersuchungen zur Interzeption in Forstbeständen

in den USA gibt ZINKE (1967). In den viel weniger hohen landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen liegen dagegen, vor allem wegen der erheblich größeren meßtechnischen Probleme, nur sehr wenige Messungen vor.

Geradezu bezeichnend für den Informationsmangel bezüglich der Verhältnisse in landwirtschaftlichen Kulturen ist die Tatsache, daß die einzige umfassende und immer wieder zitierte Arbeit aus dem Jahre 1919 stammt (HORTON, 1919). Die wenigen Untersuchungen aus jüngerer Zeit (VAN EIMERN 1964, RIJTEMA 1965, FEDDES 1971, GUZMAN-LOPEZ 1974, BEESE und VAN DER PLOEG 1978) behandeln dagegen meist nur die Phänomene an einer Pflanzenart und sind kaum auf andere Bestände oder Bestandsdichten übertragbar. Eingehende Analysen der Vorgänge, insbesonders der thermodynamischen Prozesse während der Interzeptionsverdunstung finden sich allenfalls in speziellen Einzelarbeiten.

Auf diesen Mangel wurde auf der Budapester Konferenz der WMO 1977 über Gebietsverdunstung und der anschließenden Round Table Conference der International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) hingewiesen, und es wurden eingehende Untersuchungen zu diesem Problem im landwirtschaftlichen Bereich gefordert. Die genauere Kenntnis der Interzeptionsverluste ist bei der Aufstellung von Wasserbilanzen unbedingt erforderlich. Bei der Beregnungsberatung muß der tatsächliche Wassergewinn des Wurzelraumes durch natürliche und künstliche Niederschläge bekannt sein. Noch mehr erfordert die Ermittlung des Gebietswasserhaushalts und die Abschätzung des Einflusses der Landnutzung durch unterschiedliche Transpiration und Interzeptionsverdunstung der verschiedenen Pflanzendecken ein detailliertes Wissen um die Kausalzusammenhänge zwischen Landnutzungsart, Pflanzenmorphologie und thermo- bzw. hydrodynamischen Vorgängen. Deshalb wurden an der Zentralen Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes seit 1975 auf Anregung und mit finanzieller Förderung durch den DVWK umfangreiche Messungen zur Interzeption in den wichtigsten landwirtschaftlichen Bestandsarten durchgeführt.

2. MATERIAL UND METHODEN

Es gibt zwar Untersuchungen, in denen die Pflanzenteile künstlich befeuchtet und durch Wägung die maximale Wasserspeicherung direkt bestimmt wird, doch sind die so gewonnenen Ergebnisse mit den natürlichen Vorgängen nicht vergleichbar und daher wenig aussagekräftig für die Bestimmung der Interzeption als Funktion von Freilandniederschlag und Bestandsart. Da aber im Freilandversuch die Interzeptionsspeicherung kaum direkt gemessen werden kann, muß sie indirekt aus der Differenz von Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag nach Gleichung (1) bestimmt werden. Dazu müssen neben Ns auch die den Boden erreichenden Komponenten des Bestandsniederschlages gemessen werden. Dies sind der Stamm- oder Stengelabfluß Ns und der durch fallende Nf und abtropfende Anteil Nt, die meßtechnisch nicht zu trennen sind und deshalb im folgenden zu Nd zusammengefaßt werden.

2.1 VERSUCHSANLAGEN UND MESSMETHODEN

Wegen der völlig anderen Größenverhältnisse gegenüber Waldbeständen können die dort üblichen erprobten Meßmethoden nur selten in landwirtschaftlichen Beständen verwendet werden. Meist müssen völlig neuartige Verfahren entwickelt und erprobt werden. So pflanzten BEESE et.al. (1978) Getreidesamen durch eine am Boden aufliegende gelochte Plastikfolie. Nach Aufwachsen der Pflanzen dichteten sie die Lücken zwischen Folie und Stengel ab und erhielten durch Messung des von der geneigten Folie ablaufenden Wassers die Summe aus Nd und Ns. RIJTEMA (1965) bestimmte ähnlich wie viele amerikanische Autoren die Interzeptionsspeicherung durch Besprühen und Wägen eines definierten Grasbestandes unter Laborbedingungen.

Die eigenen Messungen wurden im Freiland auf den Versuchsflächen der Zentralen Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes in Braunschweig bzw. auf Flächen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL) durchgeführt. Sie lagen so nahe am Institutsgebäude, daß einwandfreie Betreuung und pünktliche Ablesungen gewährleistet waren.

Als Versuchspflanzen wurden die wichtigsten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen verwendet: Mais, Weizen, Roggen, Hafer, Kartoffeln, Zuckerrüben und Futterrüben. Bei Mais wurde in den Bestandesdichten 4, 5, 8, 10, 12, 32 und 72 Pflanzen pro Quadratmeter gemessen, um eine große Variationsbreite in der Zwischenspeicherkapazität zu erreichen. Bei allen Beständen wurden die Blattflächenindizes bestimmt und andere phänomatische und phänologische Beobachtungen durchgeführt (v. HOYNINGEN-HUENE 1976 und 1977, NASDALACK und v. HOYNINGEN-HUENE 1978, v. HOYNINGEN-HUENE 1979).

Für die meisten Pflanzenarten mußten neue, der Morphologie angepaßte Meßtechniken entwickelt werden. Nur die Auffangvorrichtungen für den Stammabfluß Ns bei Mais wurden von GUZMAN-LOPEZ (1974) übernommen. Wie in Bild 1 zu sehen ist, wurden seitlich gelochte Trichter so um den Stamm gelegt und mit flexiblem Fugendichtungsmasse abgedichtet, daß der gesamte Stammabfluß sich im Trichter sammelte und durch die Tülle in eine Kunststoffflasche gelangte. Je Parzelle wurden zwischen 8 und 15 Meßstellen eingerichtet. Der durchfallende und durchtropfende Niederschlag Nd wurde mit Hilfe von Kunststoffrinnen mit ca. 0,25 m² Oberfläche aufgefangen und in vergrabene Sammelgefäße geleitet (Bild 2). Die Rinnen wurden mit einer Neigung von ca. 1 : 5 unterhalb des Blattapparates aufgestellt, mit Wachs behandelt und häufig gereinigt, so daß ein sicheres Ablaufen der Tropfen gewährleistet war. Je Parzelle wurden 3 - 6 Rinnen aufgestellt.

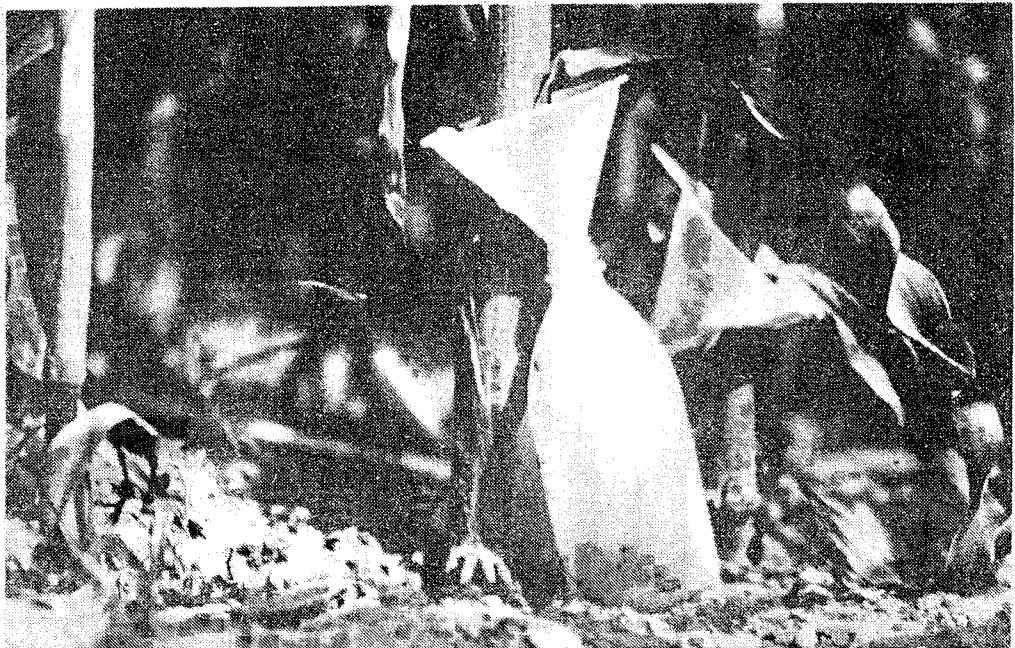


Bild 1: Vorrichtung zum Auffangen des stammabfließenden Niederschlags in Mais



Bild 2: Meßeinrichtung zur Bestimmung des durchfallenden und durchtröpfenden Niederschlags in Mais

Im Getreide (Bild 3) wurden je 8 kleinere Rinnen mit einer Breite von ca. 5 cm verwendet. Je nach Bestandshöhe hatten sie eine Länge von 50 cm bei Weizen und Gerste bzw. 100 cm bei Roggen und Hafer. Die Rinnen durften sich einerseits nicht oberhalb der aktiven Blätter befinden, andererseits mußte die Neigung eine rasches Abfließen gewährleisten. Deshalb konnte mit den Messungen auch meist erst nach dem Ährenschieben begonnen werden. Die Bestimmung des Stengelabflusses war relativ schwierig. Es wurden nach längeren Vorversuchen jeweils 8 abgeschnittene Halme wie Sträuße in Weithalsflaschen gesteckt und durch Maschendraht so fixiert, daß die Stengel einzeln in der Öffnung standen und das Wasser nicht seitlich ablaufen konnte. Durch die große Halmdichte über der Flaschenöffnung konnte ein direktes Auffangen des durchfallenden Niederschlages durch die Flaschenöffnung kaum Fehler verursachen. Nach oben erreichte der Strauß die normale Bestandsdichte. Die abgeschnittenen Halme der 4 Sträuße waren sehr empfindlich gegen mechanische Beschädigung und mußten häufig ausgetauscht werden.

Besonders schwierig waren die Messungen in Kartoffelbeständen wegen der Inhomogenität und der während der Meßperiode sich häufig ändernden Pflanzenhaltung. Der Stengelabfluß wurde mit Hilfe kleiner Trichter - ähnlich wie bei Mais - gemessen, während der durchtropfende Niederschlag in großen Kunststoffschaalen aufgefangen wurde. Mit fortschreitendem Alter senkten sich die Stengel jedoch, und der stammabfließende Niederschlag tropfte an den Biegungen ebenfalls in die Wannen.

Sehr gute Erfahrungen wurden bei den Messungen des Stengelabflusses an Zuckerrüben und Futterrüben gemacht. Hier bewährten sich kragenförmige Zinkblechrinnen, welche auf den jungen Rübenkörper dicht aufgesetzt wurden und allmählich etwas einwuchsen (Bild 4). Durch ein Abflußrörchen gelangte das Wasser in eine seitlich eingegrabene Plastikflasche. Um die Streubreite der Pflanzenformen auszugleichen, wurden jeweils mindestens 10 solcher Vorrichtungen aufgebaut. Der durchtropfende Niederschlag wurde wie bei den Kartoffeln in unregelmäßig im Bestand verteilten Plastikschalen mit einer Gesamtfläche von 1 m² Oberfläche aufgefangen.



Bild 3: Meßgefäß für den Stammabfluß und Rinnen für den durchfallenden und durchtropfenden Niederschlag in Getreide



Bild 4: Kragenförmige Zinkblechrinnen zum Auffangen des Stielabflusses in Rüben

Der Freilandniederschlag No wurde mit einer Reihe von Hellmann-Regenmessern und -schreibern neben bzw. im Bestand gemessen. Dabei zeigte sich, daß windgeschützte, bodengleiche und bestands-höhengleiche Geräte die verlässlichsten Ergebnisse erbrachten. Die Niederschlagsverteilung oberhalb der Bestände wurde mit Hilfe einer Reihe einfacher Regenmesser in Bestandshöhe erfaßt.

Im Vergleich zu forstlichen Beständen sind die nach geometrischem Muster angelegten landwirtschaftlichen Bestände, deren Saatgut zudem aus sehr homogenem Material stammt, wesentlich gleichförmiger. Das erleichtert die Messungen erheblich; insbesondere ist die Anzahl der notwendigen Wiederholungen geringer als im Forstbestand. So wichen z.B. bei Mais die Einzelmessungen des durchtropfenden Niederschlages an 6 Auffangrinnen (siehe Abschnitt 3.2) nur bis zu 6 % vom Mittelwert ab. Wesentlich schwieriger waren die Messungen in den doch sehr inhomogenen Rüben- und Kartoffelbeständen, bei denen die mittlere Standardabweichung bei 5 Wannen bzw. 4 Rinnen jeweils etwa 30 % erreichte. Trotzdem sind diese Streuungen doch deutlich geringer als bei Forstbeständen. Die Meßwerte des Stengelabflusses streuten zwar stärker als die des durchtropfenden Niederschlages, doch ist ihr Anteil am Bestandesniederschlag meist so gering, daß die Qualität der Ergebnisse bei der Berechnung der Interzeption dadurch nicht zu sehr beeinträchtigt wurde.

Entsprechend dem Ziel der Untersuchungen, den kausalen Zusammenhang zwischen Speicherkapazität und Niederschlagsmenge je Ereignis und weiterer Faktoren einerseits und den Interzeptionsverlusten andererseits zu ermitteln, mußten die Niederschlagsereignisse einzeln erfaßt werden, d.h. die Ablesungen wurden jeweils 1/2 bis 1 1/2 Stunden nach dem Ende eines Niederschlagsereignisses durchgeführt. Dicht aufeinander folgende Schauer wurden nicht gewertet. In längeren Trockenperioden wurden auch Messungen mit künstlicher Beregnung durchgeführt, wozu ein Präzisionsviereckregner verwendet wurde.

Für detailliertere Untersuchungen zur Interzeptionsverdunstung standen Wärmehaushaltsstationen zur Messung der Energieströme

und Berechnung der aktuellen Verdunstung, wie sie an anderer Stelle beschrieben sind (v. HOYNINGEN-HUENE 1980) und zwei grwägbare Präzisionslysimeter (v. HOYNINGEN-HUENE und BRAMM 197 zur Verfügung.

2.2 STATISTISCHE METHODEN

Zur statistischen Analyse der Einflüsse meteorologischer und pflanzlicher Faktoren auf die Interzeption wurde die von ATANASIU und SCHNEIDER (1965) beschriebene Methode der "Wechselwirkungskomponenten" verwendet. Bei ihr werden außer den linearen Beziehungen auch die nichtlinearen Wirkungen der Einzelfaktoren und darüber hinaus auch gemeinsame Wirkungen berücksichtigt. Dies ist gerade bei meteorologischen Untersuchungen notwendig, da die Einflußparameter nur selten isoliert, meist aber in Kombination mit anderen wirksam werden. Die allgemeine Form der Regressionsbeziehung lautet:

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ik} x_i x_k + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (i \neq k) \quad (2)$$

Bei der Analyse der Wirkungskomponenten kann die Reaktion der Zielgröße Y - hier der Interzeption - auf einen Einflußfaktor x_i mathematisch durch den partiellen Differentialquotienten errechnet werden, da damit die Steigung der Reaktionsfläche in dieser Koordinatenrichtung beschrieben wird. Die Wirkung jede Komponente lässt sich nun in drei additive Terme zerlegen, wobei man die Koeffizienten a_i bzw. a_{ii} oder a_{ik} des linearen Glieds x_i , eines quadratischen Gliedes x_i^2 , sowie eines gemischten Gliedes $x_i x_k$ erhält. Das letzte Glied beschreibt dabei die Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren.

Geometrisch lassen sich diese Funktionen durch eine n -dimensionale Hyperfläche im $n + 1$ -dimensionalen Raum darstellen. Wenn statt des quadratischen Terms die Darstellung durch einen logarithmischen Term oder durch eine Wurzelfunktion erfolgt, dann

ist die Ausgleichsfläche statt eines Hyperboloids eine andere symmetrische geometrische Figur, welche mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt wird. Das Bestimmtheitsmaß B bzw. der multiple Korrelationskoeffizient $R = \sqrt{B}$ zwischen Meßwerten und Ausgleichsfläche ist ein Maß für die Güte der Regressionsbeziehung.

3. E R G E B N I S S E

Ziel der hier vorgelegten Untersuchung war eine umfassende Analyse der Interzeptionsvorgänge, welche auf der Basis von Messungen in 7 verschiedenen Kulturarten mit den unterschiedlichsten Bestandsdichten Rückschlüsse auch auf die Interzeptionsverluste in anderen landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen zumindest im mitteleuropäischen Klimabereich erlaubt. Dazu waren nicht nur einfache Meßreihen in diesen Beständen notwendig, sondern auch statistische und physikalisch-thermodynamische Untersuchungen, welche die Entwicklung von weiterführenden Modellen und Extrapolationen auf beliebige Zeiträume und Pflanzenarten ermöglichen.

Zu einer eingehenden Kausalanalyse der Niederschlagsinterzeption war außerdem eine Untersuchung der Vorgänge während des Auffangens der Wassertropfen und ihrer Evaporation notwendig, um bei Unterschieden zwischen den Einzelmessungen deren Ursache ermitteln zu können.

3.1 ABLAUF VON INTERZEPTION UND INTERZEPTIONSVERDUNSTUNG

Erhalten Pflanzenbestände natürlichen oder künstlichen Niederschlag, wird ein Teil an Blättern, Stengeln und anderen Pflanzenteilen aufgefangen. Deshalb ist zu erwarten, daß die Interzeptionsspeicherkapazität, d.h. die maximale speicherbare Was-

sermenge je Niederschlagsereignis primär von der Oberfläche dser Pflanzenteile abhängt. BARFIELD et al. (1973) fanden bei I borversuchen durch Besprühen verschiedener Pflanzen mit Wasse nebel, daß außer bei Tröpfchen mit einem Durchmesser unter 1 die Tropfengröße keinen Einfluß hat. Das Verhalten normaler Tropfen mit etwa 1,5 μm und großer Tropfen über 3 μm Durchmes ser dagegen unterschied sich nicht wesentlich. Auch der Winkel zwischen dem Blattstengel und der Horizontalen zeigte nur ein geringen Einfluß. Lediglich bei Winkeln über etwa 70° nahm we gen der abperlenden Tropfen die Speicherkapazität bei Regentropfen ab. Die sicher sehr wesentliche Wirkung von Adhäsions und Kapillarkräften bei behaarten Blättern und zwischen Grann Rispen und ähnlichen engstehenden Pflanzenteilen wurde von de Autoren leider nicht untersucht.

Erschöpft sich die Speicherkapazität der obersten Bestands stockwerke, perlt zunehmend das Wasser ab und erreicht als ab tropfender Niederschlag niedrigere Bestandsschichten oder zu sammen mit dem Stammabfluß den Boden. Durch zunehmende Windgeschwindigkeit beschleunigt sich dieser Vorgang. Es werden da her mit zunehmender Niederschlagsmenge auch die unteren Be standsschichten benetzt, wenn auch deren Kapazität wegen der Schutzwirkung durch die oberen Blätter meist nicht voll ausge nutzt wird. Gleichzeitig mit dem Abtropfen und Abfließen ver ringert sich die gespeicherte Wassermenge durch die Interzeptionsverdunstung. Mit abnehmender Wärmespeicherung in Bestand luft, Pflanzenteilen etc. und gleichbleibender Luftfeuchte geht die Intensität der Evaporation zurück, bis die Luft wie der abtrocknet oder neue Energie z.B. durch wieder zunehmende Sonneneinstrahlung vorhanden ist. Der Wind fördert einerseits durch Austausch die Interzeptionsverdunstung, verstärkt anderseits aber durch das Bewegen der Pflanzenteile den ab tropfenden Niederschlag Nd. Als Folge dieser gegenläufigen Wi kung ist der Einfluß des Windes auf die Interzeptionsverluste gering.

Es ist schwierig, den geschilderten Ablauf der Interzeption und der Interzeptionsverdunstung durch Messungen im einzelnen

zu verfolgen, insbesondere Transpiration und Interzeptionsverdunstung zu trennen. Trotzdem wurde dies versucht, um zugleich auch den Einfluß des Energiehaushalts auf die Interzeptionsverdunstung deutlich zu machen. Dazu wurden die Verdunstungswerte eines künstlich berechneten und eines unberechneten Lysimeters miteinander verglichen. Außerdem wurden während zweier natürlicher Schauerniederschläge sämtliche Energiehaushaltskomponenten mit hoher zeitlicher Auflösung verfolgt. In Bild 5 sind die Differenzen der Verdunstung zwischen den Lysimetern während des Berechnungsvorganges aufgetragen.

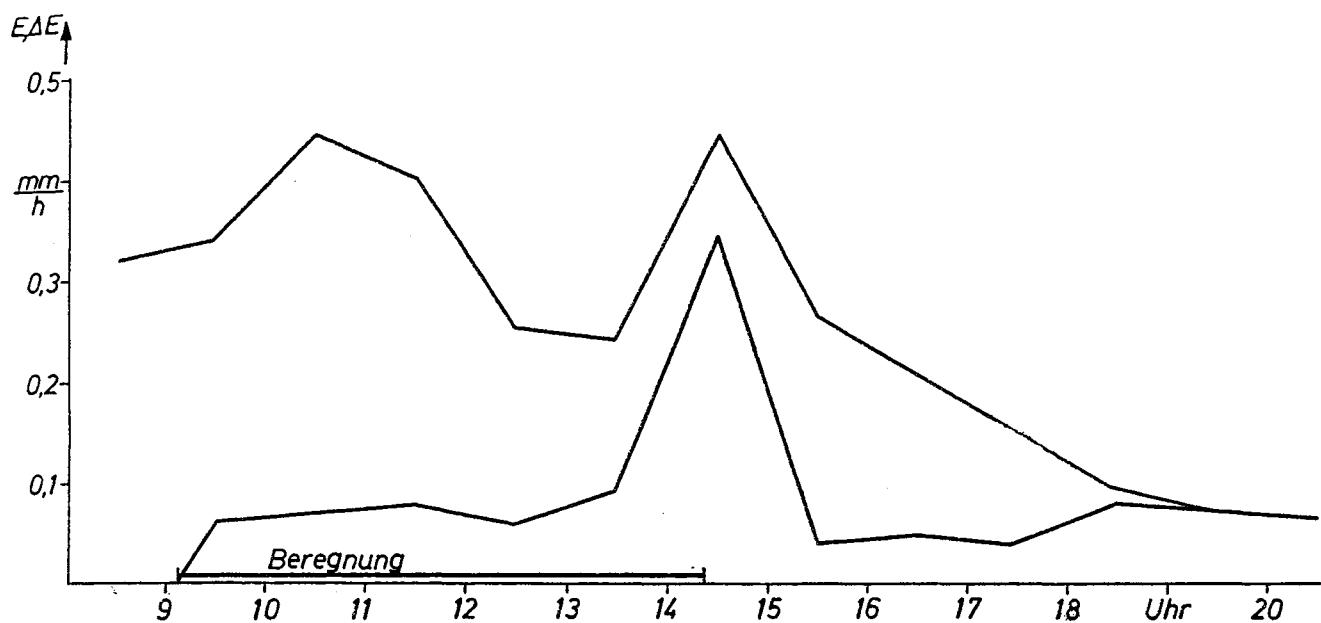


Bild 5: Verlauf der Interzeptionsverdunstung bei künstlicher Berechnung - berechnet aus der Differenz der Gewichtsänderungen zweier Lysimeter.

Obere Kurve: Gesamtverdunstung

Untere Kurve: Interzeptionsverdunstung

Die obere Kurve zeigt die Summe aus Interzeption und der aufgrund besserer Wasserversorgung im Boden erhöhten Transpiration der berechneten Variante. Um nun die Transpirationsintensität vom Interzeptionseffekt zu trennen, wurde der Transpirationsunterschied zwischen den beiden Lysimetern am Folgetag, welcher ähnliche meteorologische Bedingungen aufwies, von der Verdunstungsdifferenz bei künstlicher Beregnung subtrahiert. Daraus resultierte die untere Kurve, eine grobe Abschätzung der Interzeptionsverdunstung während und nach dem Beregnungsvorgang. Danach steigt von der Nulllinie ausgehend die Interzeptionsverdunstung auf 0,07 mm/h nach Beginn der Beregnung an, fällt danach ab und wächst nach Abschalten des Regners nochmals markant auf 0,34 mm/h an. Bereits eine Stunde später fällt sie wieder auf einen Wert von etwa 0,04 mm/h ab.

Resultieren aus einer Aufsummierung der so geschätzten Interzeptionsverdunstung nur 1,04 mm Gesamtverlust - gegenüber 1,70 mm nach der o.a. Meßmethode - , so ist daraus doch sehr eindeutig zu schließen, daß nach einem kleinen Maximum zu Beginn der Beregnung, das nur in der oberen Kurve deutlich wird die größte Intensität der Interzeptionsverdunstung direkt nach dem Ende des Niederschlages liegt. Es liegt nahe, die restlichen 0,66 mm als Reduktion der Transpiration durch den Interzeptionsvorgang zu erklären, bei dem wegen der anhaltenden Einstrahlung im Gegensatz zu natürlichen Niederschlagsereignissen die Stomata nicht geschlossen waren. Danach wären von der gesamten Interzeption in diesem Falle etwa 60 % als zusätzliche Verdunstung, also als reiner Verlust zu werten, während ca. 1/3 der Interzeptionsverluste durch reduzierte Transpiration in der gesamten Wasserbilanz des Bestandes ausgeglichen werden. Die Erklärung des zweigipfligen Verlaufes der Verdunstung (obere Kurve in Bild 5), der bei natürlichen Niederschlagsereignissen wegen des Verlaufes von Bewölkung und Wind wesentlich deutlicher sein dürfte, ist relativ einfach:

- Es stehen am Anfang eines Niederschlages relativ große Mengen für die Verdunstung zur Verfügung, die vor allem in der Pflanzenmasse und der Bestandsatmosphäre gespeichert sind.

- Am Ende der Verdunstung bei absinkender Luftfeuchtigkeit und Rückgang der Bewölkung steht ebenfalls wieder Energie aus der Strahlung für die Verdunstung zur Verfügung.

Bei natürlichen Niederschlägen ist eine derartige Darstellung nicht möglich. Andererseits aber fällt dann die Verzerrung weg, die sich durch das Anhalten der Strahlung während des künstlichen Beregnungsvorganges ergibt. Zur Beschreibung der energetischen Vorgänge wurden deshalb zwei kurze Niederschlagsereignisse an einem sonst sonnigen Tag, nämlich am 06. Juli 1977 ausgewählt. In Bild 6 ist der Verlauf der wichtigsten Energieströme vor und während der Niederschlagsereignisse dargestellt. Es sind dies die Strahlungsbilanz als Hauptenergiespender, der Strom fühlbarer Wärme und der Bodenwärmestrom. Außerdem wurde auch der Wärmestrom aus der Bestandsmasse aufgetragen und zusätzlich die Intensität der photosynthetisch aktiven Strahlung. Der Strom latenter Verdunstungsenthalpie ist mit negativem Vorzeichen aufgetragen und kann so direkt mit der Strahlungsbilanz verglichen werden. Der Verlauf der Wärmeströme ist bis 14.00 Uhr der übliche: auf der positiven Seite steht allein die Strahlung; alle anderen Energieströme sind negativ, der Hauptenergieverbraucher ist die Verdunstung (Transpiration). Mit Beginn des Niederschlages um 14.00 Uhr sinkt die Strahlungsbilanz wegen der zunehmenden Bewölkung erheblich ab. Gleichzeitig sinkt auch die Verdunstungsenthalpie ab, jedoch längst nicht so stark. Deshalb kann die für die Verdunstung verbrauchte Energie aus der Strahlung nicht mehr gedeckt werden. Die Differenz ist durch Schraffur deutlich gemacht. Die fehlende Energie wird vor allem durch den Strom fühlbarer Wärme, also durch Entzug von Wärme aus der Atmosphäre über dem Pflanzenbestand gefiert. Eine weitere Energiequelle ist diesmal der Wärmestrom aus Bestandsmasse und der Bestandsluft, der bis zu 60 W/m^2 ansteigt.

Der Bodenwärmestrom, der vorher negativ war, kehrt sich jedoch nicht ins Positive um. Bei diesem schwachen Niederschlag nämlich erreichte kaum Wasser den Boden, vielmehr blieb fast die gesamte Niederschlagsmenge im Pflanzenbestand hängen. Bei stärkeren Niederschlägen dagegen, die bis zum Bestandsboden

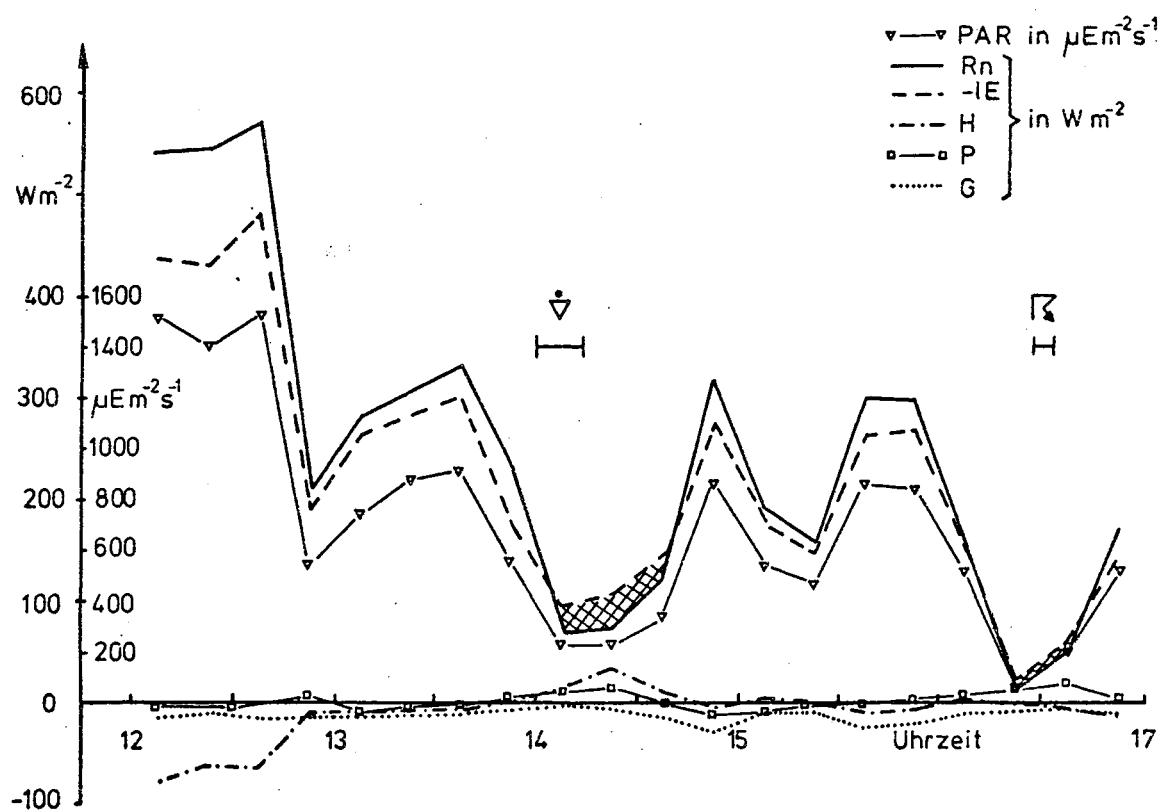


Bild 6: Verlauf der Energieströme während der Interzeptionsverdunstung. Strahlungsbilanz Rn, Verdunstungsenthalpie -IE, Strom fühlbarer Wärme H, Wärmestrom aus der Pflanzenmasse P, Bodenwärmestrom G und photosynthetisch aktive Strahlung PAR

durchfallen, kehrt sich regelmäßig auch der Bodenwärmestrom um. Der Gang der photosynthetisch aktiven Strahlung zeigt gleichzeitig, daß durch das Absinken auf ungefähr 200 Mikro-einstein je Quadratmeter und Sekunde die Stomata der Pflanzen weitgehend geschlossen sein mußten (v. HOYNINGEN-HUENE 1980). Die noch gemessene Verdunstung, welche einem Strom latenter Verdunstungsenthalpie von 90 bis 140 W/m^2 entspricht, beruhte also überwiegend auf der Interzeptionsverdunstung. Diese In-

terzeptionsverdunstung dauerte offensichtlich bis 14.45 Uhr, d.h. also bis 1/2 Stunde nach Beendigung des Niederschlages, an. Danach stellten sich wieder die ungestörten Verhältnisse unter den Energieströmen her, bis nach 16.15 Uhr ein weiterer Schauer auftrat. Dieser war kürzer und weniger markant, wie sich aus der geringeren Differenz zwischen Einstrahlung und Verdunstungsenthalpie zeigt. Die fehlende Energie wird in diesem Fall weniger durch den fühlbaren Wärmestrom kompensiert als vielmehr durch den Wärmestrom aus der Bestandsmasse, der wieder Werte bis zu 60 W/m^2 erreicht. Der Bodenwärmestrom bleibt auch diesmal negativ.

Die Schlüsse, die aus den Wärmeaushaltsmessungen mit hoher Zeitauflösung gezogen wurden, können lediglich qualitativer Art sein. Sie zeigen jedoch mit Sicherheit wichtige energetische Vorgänge beim Vorgang der Interzeptionsverdunstung.

Nach Wissen des Autors sind derartige Untersuchungen weltweit bisher noch nicht durchgeführt worden. Sie sind deshalb aber besonders wichtig und müssen fortgesetzt werden, weil z.Zt. eine lebhafte Diskussion geführt wird, ob die Interzeptionsverdunstung als unproduktive Verdunstung voll gerechnet werden darf. Es wird argumentiert, daß wegen der ansteigenden Luftfeuchte durch die Verdunstung des interziptierten Niederschlages, sowie durch die Benetzung der Blätter die Transpiration reduziert wird und damit Wasser aus Pflanze und Boden eingespart wird. Da die photosynthetisch aktive Strahlung während der Niederschlagsvorgänge auf 10 bis 5 % ihres vorherigen Wertes absinkt, ist aber sicher, daß im Gegensatz zu den Versuchen mit künstlicher Beregnung durch das fehlende Licht die Spaltöffnung auf den Blättern soweit geschlossen sind, daß ohnehin die Transpirationsverdunstung weitgehend eingestellt war. Das aber deckt sich mit der vorher beschriebenen Beobachtung, daß die noch vorhandene Verdunstung zum großen Teil auf die Interzeption zurückzuführen ist, die während des Niederschlages die ohnehin stark reduzierte Transpiration weiter vermindert, so daß bei natürlichen Niederschlägen die Interzeption zum größten Teil als direkter Verlust im Bodenwasserhaushalt anzusetzen ist.

3.2 MESSERGEBNISSE IN VERSCHIEDENEN KULTUREN

Von den insgesamt über 300 Gruppen von Einzelmessungen an jeweils einem Bestand bei einem Niederschlagsereignis in den Kulturarten Zuckerrüben, Weizen, Roggen, Hafer, Kartoffeln und Mais in den Jahren 1976 - 1980 wurden nur diejenigen zur weiteren Analyse verwendet, welche unter einwandfreien Bedingungen bezüglich Pflanzengesundheit und Bestandszustand, sowie Repräsentativität von Niederschlagszeit und Meßtechnik entstanden waren und bei denen auch phänologische und phänometrische Angaben vorlagen. Messungen bei Phytophtorabefall in Kartoffeln oder bei Lagergetreide mußten also ebenso eliminiert werden, wie solche bei nicht einwandfrei definierbaren Niederschlagsereignissen (z.B. bei dichter Aufeinanderfolge von Schauern) oder solche mit Störungen in den Meßeinrichtungen. Es blieben die Ergebnisse zum durchfallenden und abtropfenden Niederschlag, zum Stammabfluß Ns und zur Interzeption von ca. 170 Meßgruppen, welche jeweils aus einer Reihe von 4 - 12 Einzelmessungen je Niederschlagsereignis zu Mittelwerten zusammengefaßt wurden. Wegen des offensichtlich erheblichen Einflusses der Bestandsmorphologie wurden nur Jahresmeßserien mit ähnlichem Bestandshabitus und ähnlicher spezifischer Blattfläche zusammengefaßt. Einzelmessungen bzw. kurze Meßserien, welche nicht zu repräsentativen Serien zusammenzufassen waren, wurden zur Prüfung des in 3.3.2 dargestellten Modells verwendet.

Um die Meßergebnisse klar darzustellen, wurden nur bei 2 Jahresserien (Mais und Zuckerrüben 1978) die aus den Gruppen von Messungen ermittelten Einzelergebnisse in den Abbildungen eingetragen, während ansonsten nur die manuell ermittelten Ausgleichskurven dargestellt sind. Nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Regressionskurven wurden zusammen mit Aussagen über Streuung und Signifikanz im Abschnitt 3.3.1 diskutiert.

3.2.1 Zuckerrüben

In Bild 7 sind manuelle Ausgleichskurven (ausgezogene Linien) für die Niederschlagskomponenten als Funktion des Freilandniederschlages dargestellt, basierend auf 14 brauchbaren Niederschlagsereignissen des Jahres 1978. Die 14 Mittelwerte aus je 5 Einzelmessungen des durchtropfenden Niederschlages Nd und 10 Einzelmessungen des Stammabflusses Ns sowie der Interzeption Ni sind als Punkte eingetragen. Zum Vergleich sind die Ausgleichskurven für die Interzeptionsverluste der Jahre 1976 und 1977 dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, zeigen die Regressionslinien bei Nd und Ns nur eine leichte Krümmung nach oben und verlaufen ab $No = 8 \text{ mm}$ fast linear. Die Kurve des interzipierten Niederschlages als Restglied aus Gleichung (1) muß deshalb vor allem unterhalb $No = 8 \text{ mm}$ nach unten gekrümmkt sein. Das bedeutet, daß mit zunehmendem Freilandniederschlag sich die Zwischenspeicherkapazität des Bestandes erschöpft und die weiteren aufgefangenen Regentropfen gleich abperlen bzw. am Stamm abfließen.

Im Vergleich zu den im Folgenden beschriebenen Versuchen in anderen Beständen fällt auf, daß wegen der typischen Blattstellung aller Betarüben das überschüssige Wasser, welches von den Blättern nicht festgehalten werden kann, zu einem erheblichen Teil am Stengel entlang zur Pflanzenmitte hin abfließt. Es tropfen nur knapp 50 % des Freilandniederschlages ab oder fallen direkt auf den Boden, während immerhin ein Drittel als Stengelabfluß das Wurzelwerk in unmittelbarer Nähe des Rübenkörpers erreicht. Der Zusammenhang zwischen der Form des Wurzelwachstums und der Ableitung des Niederschlags wird hier besonders deutlich.

Die besprochenen Meßergebnisse des Jahres 1978 werden gut bestätigt durch diejenigen des Vorjahres 1977. Die Interzeptionsverluste von 1976 dagegen liegen deutlich niedriger. Das kann durch den Witterungsablauf erklärt werden. Im Trockenjahr 1976 wurde nämlich ein erheblicher Teil der Blattmasse aufgrund

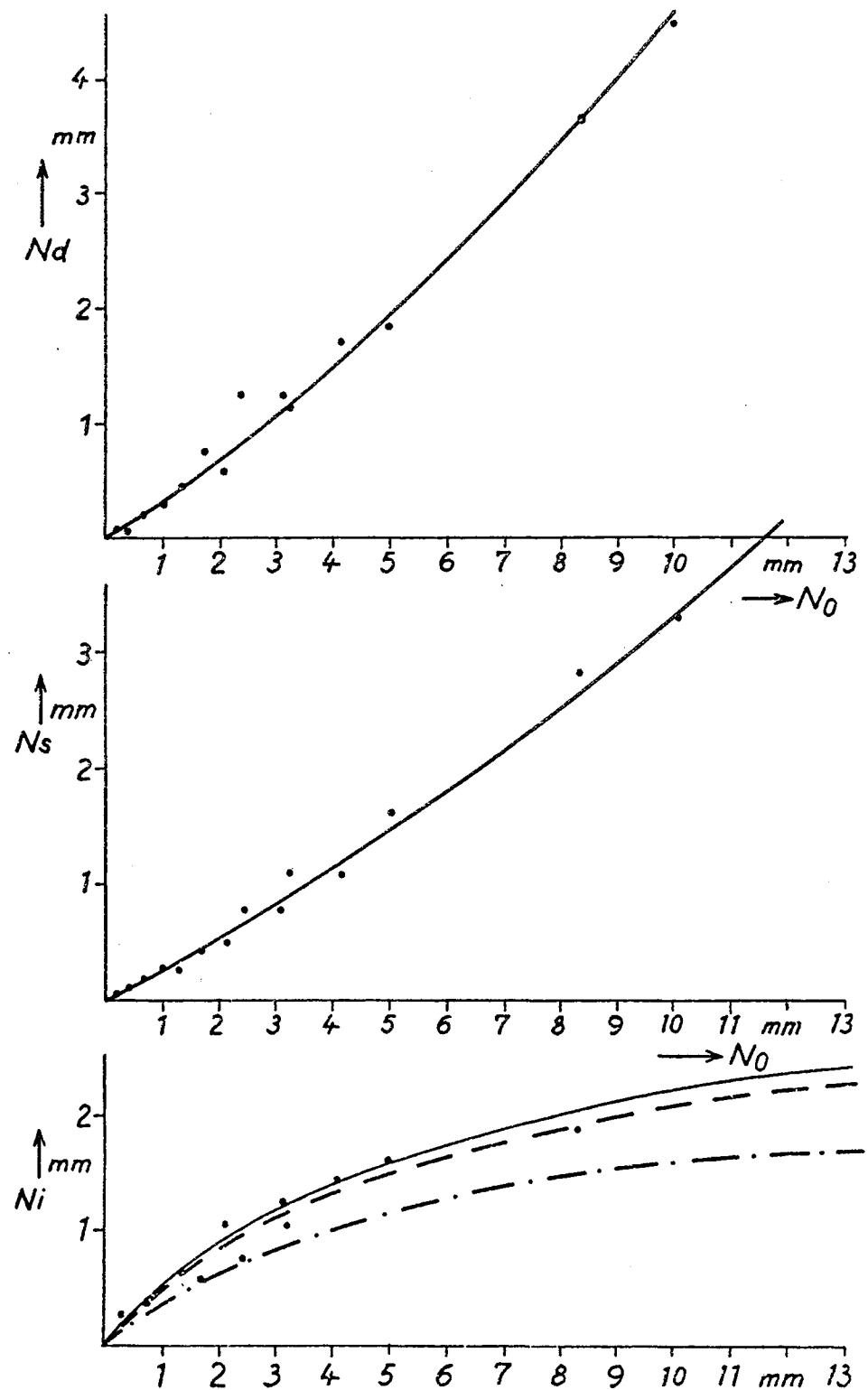


Bild 7: Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption bei Zuckerrüben in den Jahren 1976 (---), 1977 (- - -) und 1978 (—)

überhöhter Blattempemperaturen respiriert, vergilbt und mußte durch nachwachsende neue Blätter ersetzt werden. Die Blattfläche war deshalb während der Meßkampagne 1976 bei diesem Bestand mit LAI = 2,0 deutlich geringer als in den Rübenbeständen der feuchtkühlten Jahre 1977 und 1978, in denen während der Meßperiode die Blattflächenindizes zwischen 3,5 und 3,8 lagen. Die Speicherkapazität für Niederschlagswasser lag also im Trockenjahr 1976 deutlich unter derjenigen in den darauffolgenden feuchten Jahren. Sie beträgt etwa 1,9 mm und wird bei No = 13 mm erreicht. In den dichten Beständen der feuchten Jahre dagegen liegt die Sättigungskapazität über 2,5 mm und wird erst bei einem Freilandniederschlag von über 14 mm aufgefüllt.

3.2.2 Getreide

Beim Vergleich der Niederschlagskomponenten der Getreidearten Weizen, Hafer und Roggen (Bild 8) fällt auf, daß sich der durchtropfende Niederschlag im Weizen- und Roggenbestand ähnlich verhält und deutlich über dem von Hafer liegt, während sich die Verhältnisse beim Stammabfluß etwa umkehren. Die Interzeptionsverluste sind bei Hafer am höchsten. Während sie bei Weizen bei No = 14 mm mit etwa 2,1 mm der Speicherkapazität entsprechen, steigen sie bei Hafer noch weiter an und erreichen bei ca. 15 mm Freilandniederschlag eine maximale Interzeption von etwa 3,0 mm. Die Blattflächen in beiden Beständen lagen bei etwa 2,5. Während der Meßperiode 1980 nahm die Blattfläche von Roggen von 2,5 auf 1,5 ab. Infolgedessen streuten die Meßwerte sehr stark um die Ausgleichskurve, welche deshalb nur ein grobes Bild über die Interzeption in diesem Bestand liefert. Die Interzeptionswerte in Hafer dagegen beruhen auf den Mittelwerten von 13 Niederschlagsereignissen, diejenigen von Weizen auf 15 Ereignissen. Die Streuung um die Ausgleichskurve liegt in beiden Fällen unter 0,2 mm. Da die Blattflächenindizes mit ca. 2,5 bei beiden Beständen etwa gleich waren, müssen beim Hafer zusätzliche Speicherkapazitäten in anderen Pflanzenteilen angenommen werden.

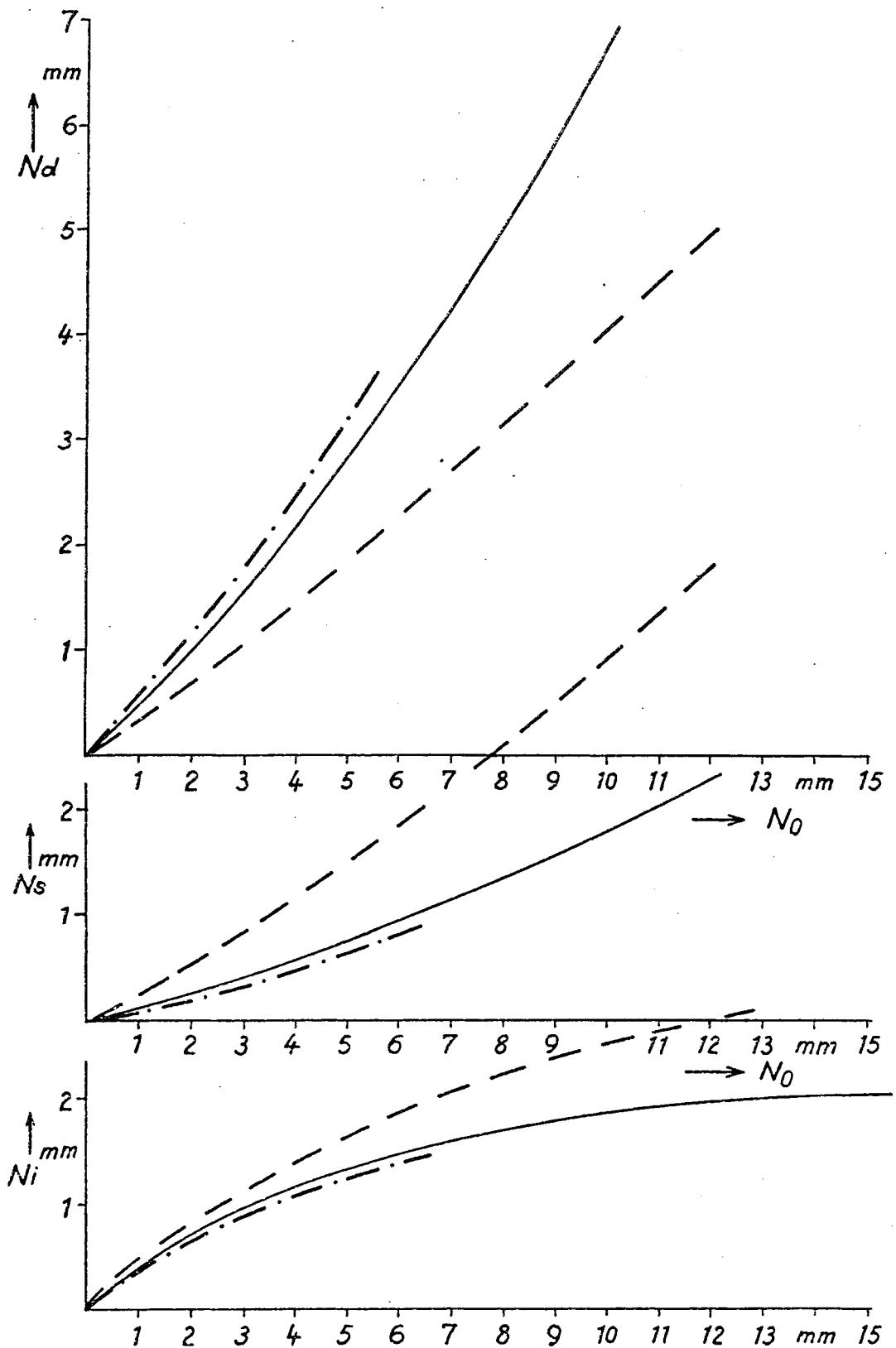


Bild 8: Durchtröpfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption bei verschiedenen Getreidebeständen, Weizen, 1978 (—), Hafer, 1979 (---) und Roggen, 1980 (-.-)

3.2.3 Kartoffeln

Wegen der Inhomogenität und der starken zeitlichen Veränderung im Habitus der Kartoffelbestände streuen hier die Mittelwerte bei den Einzelereignissen wesentlich stärker. Die Standardabweichung liegt bei 0,3 mm. Trotzdem lassen sich aus den auf 14 Niederschlagsereignissen beruhenden Kurven (Bild 9) wichtige Aussagen zu den Niederschlagskomponenten machen.

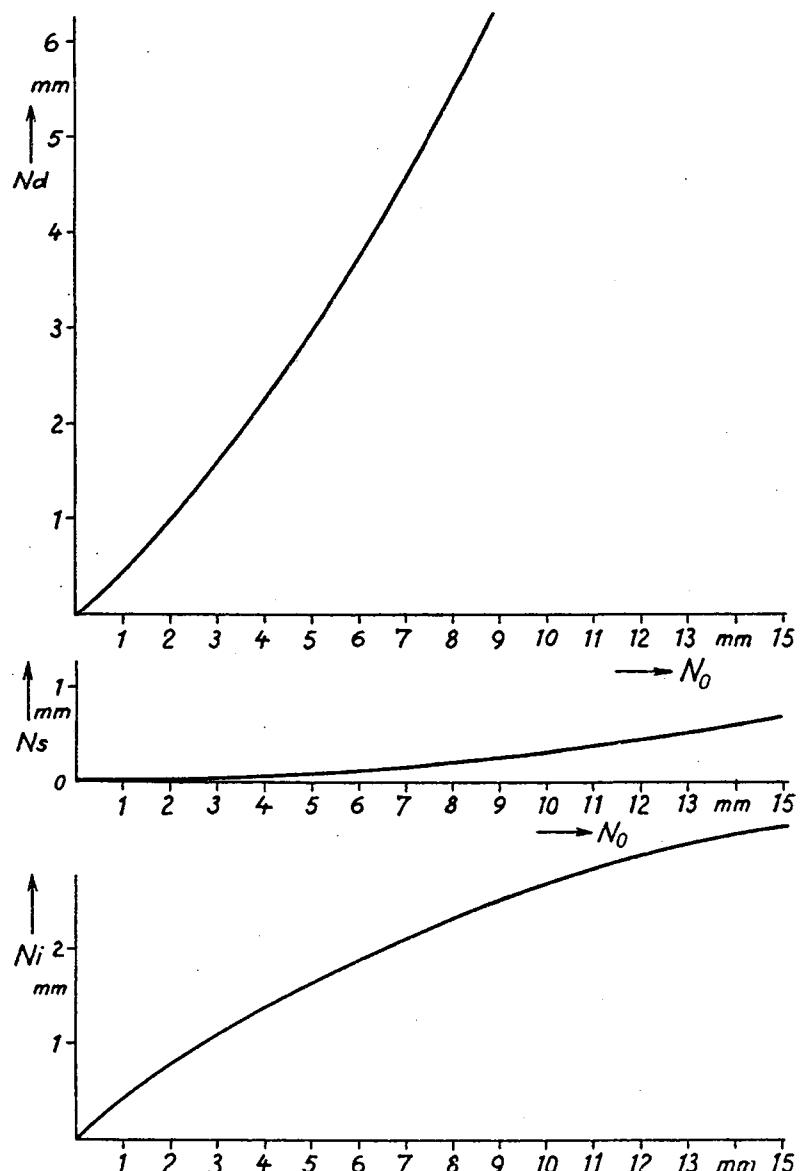


Bild 9: Durchtröpfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption in Kartoffeln (1979).
Blattflächenindex = 5.2

Fast der gesamte den Boden erreichende Niederschlag tropft von den Blättern ab oder fällt direkt durch den Bestand. Der Stammabfluß ist dagegen außerordentlich gering. Dies liegt zweifellos an der Form der Stengel, an deren Krümmungen das stammabfließende Wasser abtropft. Deshalb ist im Gegensatz zum Zuckerrübenbestand, bei dem das Niederschlagswasser zum Zentrum geliefert wird, hier die Verteilung des Wassers an der Bodenoberfläche zunächst sehr gleichmäßig. Da es zusätzlich dann aber in die Furchen abfließt, bleibt der Wurzelraum unter der Pflanzenmitte also im Bereich der Knollen, relativ trocken.

Die Interzeptionsmenge ist bei einem Blattflächenindex von 5, recht hoch. Sie erreicht bei etwa $No = 17 \text{ mm}$ ihr Maximum mit $3,4 \text{ mm}$, die Verluste sind also wesentlich höher als von VAN EIMERN (1964) angenommen.

3.2.4 Mais

Besonders intensive Untersuchungen wurden zur Interzeption an Maisbeständen durchgeführt. Wegen der großen möglichen Variationsbreite an Bestandsdichten und der präzisen Messbarkeit der Niederschlagskomponenten versprach diese Kulturart besonders wertvolle Ergebnisse vor allem auch bezüglich des Einflusses der Bestandsdichte. Von den Messungen aus 5 Versuchsjahren in 7 verschiedenen Bestandsdichten ($4, 5, 8, 10, 12, 32$ und 72 Pfl./m^2), die in den statistischen Untersuchungen in 3.3.1 verwendet wurden, soll hier besonders auf zwei Jahresserien mit Messungen in $4, 8, 12, 32$ und 72 Pfl./m^2 eingegangen werden.

So zeigt Bild 10 mit den Varianten $4, 8$ und 12 Pfl./m^2 bereits sehr deutlich den Einfluß der Bestandsdichte auf die Niederschlagskomponenten. Der durchtropfende Niederschlag ist erwartungsgemäß im lockeren Bestand am höchsten, im dichten wesentlich geringer, während sich der Stammabfluß bei den drei Varianten nicht sehr stark unterscheidet, wenn er auch bei hoher Dic-

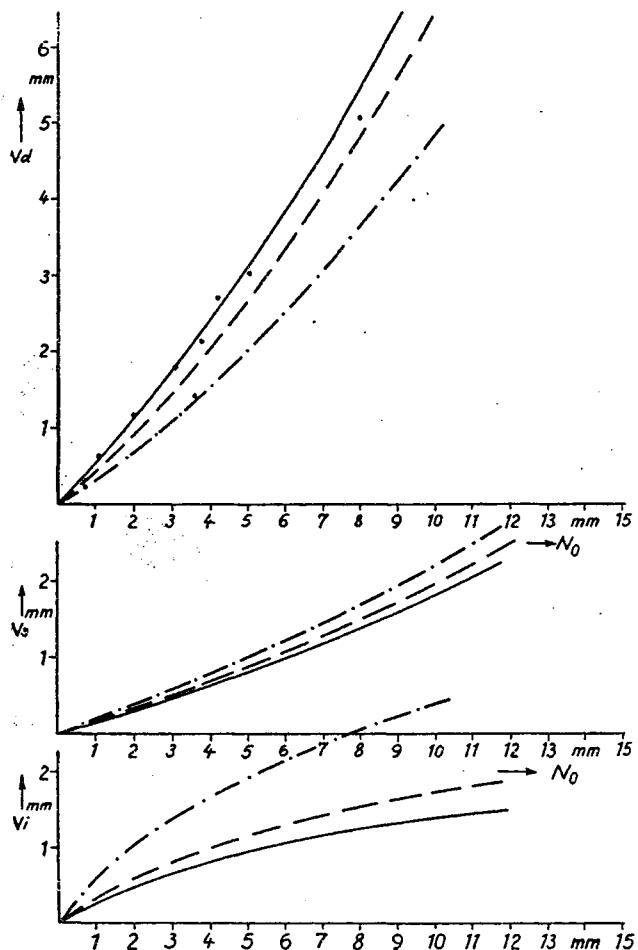


Bild 10: Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption in Mais der Bestandsdichten 4 Pfl./m² (—), 8 Pfl./m² (---) und 12 Pfl./m² (-.-)

te am größten ist. Die Interzeption erreicht bei 4 Pfl./m² (LAI = 1,2) bei N₀ = 10 mm seinen Höchstwert von 1,4 mm, bei 8 Pfl./m² (LAI = 2,4) oberhalb von N₀ = 12 mm ca. 2,0 mm, während im dichtesten Bestand (LAI = 3,5) die Sättigung bei den Versuchen nicht erreicht werden konnte. Nach dem Kurvenverlauf dürfte der Grenzwert bei etwa 3 mm liegen.

Da die Bestandsdichten von Körnermais in Norddeutschland üblicherweise bei 6 - 8 Pfl./m² und von Silomais bei 12 - 14 Pfl./m² liegen, gibt diese Meßserie gute Anhaltspunkte für die Praxis. Die Versuche mit den unüblichen hohen Bestandsdichten von 32 und 72 Pfl./m² sollen für statistische Untersuchun-

gen die notwendige große Variationsbreite der Eingangsparameter liefern. Darüber hinaus sind sie insofern von Bedeutung, als mit der Entwicklung der modernen Landwirtschaft in Richtung auf die Produktion von Industrie- und Rohstoffpflanzen teilweise hohe Biomasse angestrebt wurde. Das hat mit Sicherheit erhebliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, in welchem der Interzeptionsverlust eine wesentliche Komponente ist. Aufgrund der im Jahre 1979 angestellten Versuche (Bild 11) sind hier trotz Problemen mit der Standfestigkeit bei der Variante 72 Pfl./m² bereits Aussagen möglich. Der durchtropfende Niederschlag der hohen Bestandsdichte sinkt gegenüber dem Vergleichsbestand mit 12 Pfl./m² auf 55 - 65 % ab, der Stammabfluß dagegen wächst mit zunehmender Pflanzenzahl auf etwa das Doppelte an.

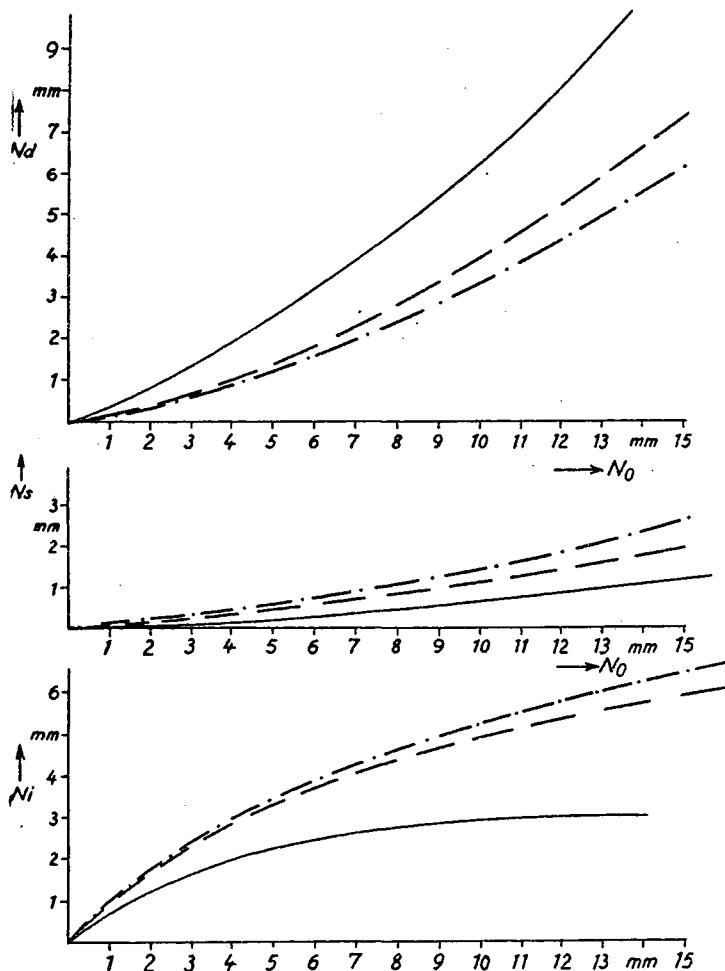


Bild 11: Durchtropfender Niederschlag, Stengelabfluß und Interzeption in Mais der Bestandsdichten 12 Pfl./m² (—) 32 Pfl./m² (---) und 72 Pfl./m² (-.-)

Die Interzeption erreicht bei 12 Pfl./m² (LAI 3,6 - 3,8) bei No = 15 mm fast 3,8 mm. Bei 32 Pfl./m² (LAI 8 - 10) steigt sie oberhalb von No = 15 mm noch auf Werte deutlich über 6 mm an. Ein Grenzwert konnte nicht ermittelt werden. Das gilt auch für den dichtesten Bestand, bei dem zwar wegen einiger umgefallener Pflanzen die hohe Blattfläche (LAI 14 - 17) nicht voll ausgenutzt wurde. Andererseits aber wird durch den relativ geringen weiteren Anstieg der Interzeption deutlich, daß wegen der gegenseitigen Abschirmung der Blätter die Interzeptionsspeicherung bei konstantem Freilandniederschlag nicht linear mit der Blattfläche zunimmt.

3.2.5 Einfluß der Bestandsmorphologie auf die Größe der Niederschlagskomponenten

Bei der Diskussion der vorgestellten Meßserien wurde deutlich, daß mit zunehmender Anzahl von Stengeln der Stammabfluß je Pflanze insgesamt größer wird, je Stengel jedoch abnimmt. Wichtiger jedoch scheint die Haltung der Stengel und Blattrippen zu sein. Gerade der Vergleich zwischen Zuckerrüben, Kartoffeln und Mais zeigt, daß die aufrechte Blatthaltung der unter vollem Turgor stehenden Rüben den Stammabfluß deutlich verstärkt. Er liegt hier bei etwa 30 % von No, bei Mais normaler Bestandsdichten bei etwa 20 %, während er bei Kartoffeln je nach Alter der Stauden nur etwa 3 - 6 % erreicht.

Der durchfallende Niederschlag nimmt bei allen Pflanzenarten mit zunehmendem Bestandsschluß ab. Dieser erfolgt jedoch bei Zuckerrüben erst Ende Juni, bei Mais sogar erst im Juli, so daß die im Frühsommer üblichen intensiven Schauerniederschläge leicht zu Erosion führen. Der abtropfende Niederschlag, welcher wegen seiner geringen Fallhöhe nur geringe Erosionswirkung hat, nimmt mit zunehmender Bestandsdichte ebenfalls ab, was besonders bei den Bestandsdichteversuchen in Mais (Bild 9 und 10) deutlich wird. Bei einem Freilandniederschlag von 8 mm liegt der abtropfende und durchfallende Anteil bei 4 Pfl./m² bei

knapp 70 %, bei 8 Pfl./m² nahe an 60 % und bei 12 Pfl./m² bei 45 %. Der durchfallende und abtropfende Niederschlag ist bei normalen Maisbeständen deutlich höher als bei Zuckerrüben. Erst die extrem dichten Maisbestände erreichen mit etwa 25 % von No Werte, die unter denen von Zuckerrüben liegen.

Das Verhältnis von abtropfendem zu stammabfließendem Niederschlag scheint wenig Einfluß auf die Interzeption zu haben, was die anfangs zitierte Arbeit von BARFIELD et al. (1973) bestätigt. Erst sehr steile Blatthaltungen verringern nämlich die Speicherkapazität der Pflanzenteile. Senkrechte Getreidehalme und welk herabhängende Blätter sind für die Speicherkapazität kaum relevant, was durch Einzeluntersuchungen an reifendem Weizen 1979 bestätigt wurde. Grannenbesetzte Ähren, Haferrispeln und ähnliche Organe dagegen erhöhen die Speicherkapazität markant. Den größten Einfluß aber hat offensichtlich die Bestandsdichte, was die Zuckerrübenversuche verschiedener Jahre und die Bestandsdichteversuche an Mais beweisen.

Ohne Berücksichtigung der Speicherkapazität der Bestände sind die Messungen offensichtlich nicht vergleichbar. Das wird besonders eindrucksvoll von RIJTEMA (1965) durch Gegenüberstellung der Meßergebnisse verschiedener Autoren in offensichtlich sehr unterschiedlichen Grasbeständen gezeigt (Bild 12), welche Sättigungswerte erreichen, die zwischen 1,8 und 6,2 m liegen. RENGER und STREBEL (pers. Mitteilung) schlagen aus diesem Grund die in Bild 13 dargestellte Berücksichtigung des Bedeckungsgrades des Bodens durch den Bestand bei der Ermittlung der Interzeptionswassermenge vor. Nach den hier vorgestellten Meßergebnissen muß darüber hinaus bei dichten Beständen der Grad der Mehrfachbedeckung berücksichtigt werden der durch den Blattflächenindex in Quadratmeter Blattfläche je Quadratmeter Bodenfläche definiert ist.

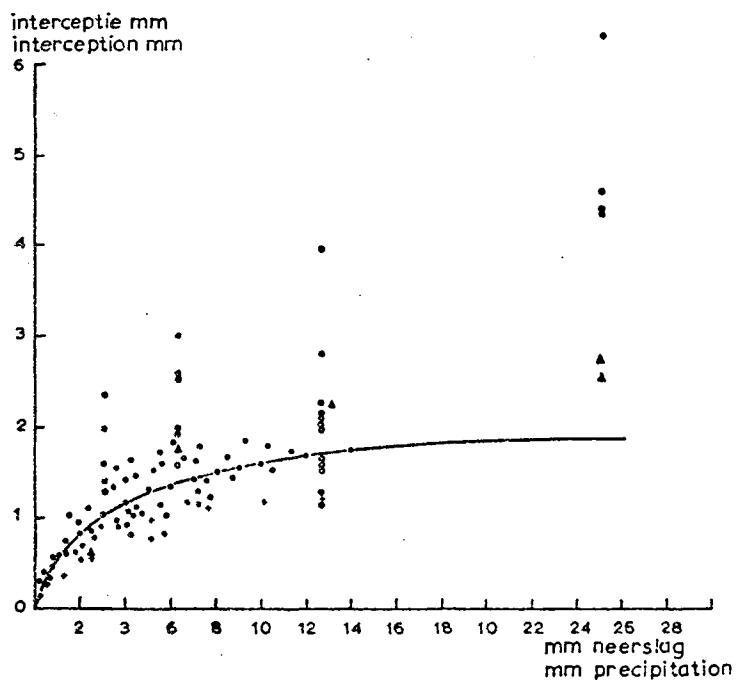


Bild 12: Beziehung zwischen Interzeption in Gras und Niederschlag nach Messungen verschiedener Autoren nach Rijtema (1965):
 RIJTEMA (1965)
 CLARK (1940)
 BEARD (1962)
 BURGY and POMEROY (1958)

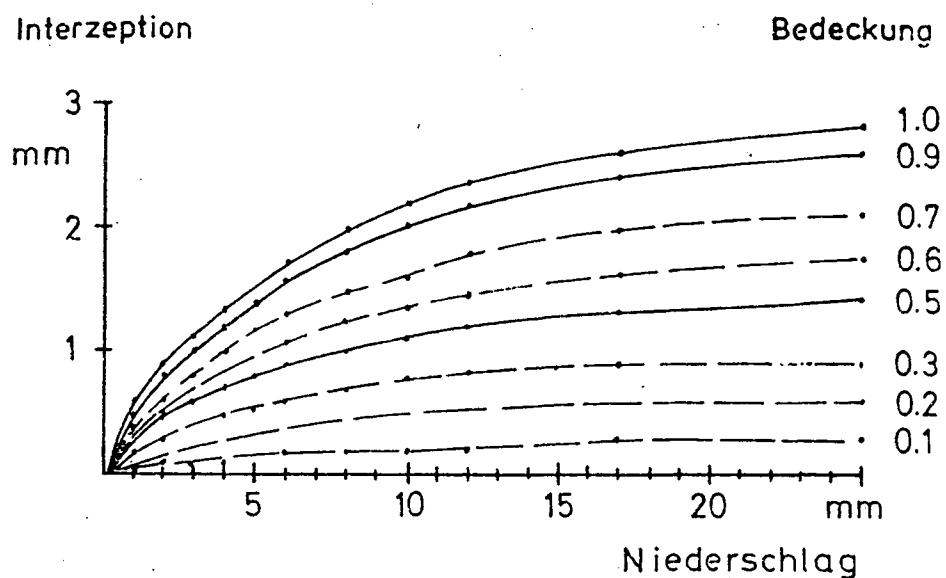


Bild 13: Beziehung zwischen Interzeption und Niederschlag in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad bei Halm- und Blattfrüchten nach RENGER und STREBEL (1980, unveröffentlicht)

3.3 MODELLUNTERSUCHUNGEN

Für die praktische Anwendung der Ergebnisse der Versuche müssen Modellvorstellungen erarbeitet werden, welche den Einfluß der meteorologischen und bestandsmorphologischen Parameter berücksichtigen. Dazu muß zunächst anhand statistischer Untersuchungen die Wirkungsintensität der Einflußparameter bezüglich ihrer Bedeutung für die Interzeption ermittelt werden.

3.3.1 Ergebnisse statistischer Untersuchungen

Aus den Einzeluntersuchungen ging hervor, daß weniger die Bodenbedeckung als die zur Verfügung stehende Blattfläche und weitere Speicherungsmöglichkeiten an anderen Pflanzenteilen für die Interzeptionsverluste ausschlaggebend sind. Dabei ist natürlich nicht zu erkennen, daß die Anordnung der Blattstocwerke eine Rolle spielt. Eine hohe Blattfläche bei Reihenkulturen mit großem Reihenabstand wie z.B. bei Wein wird ihre mögliche Speicherkapazität kaum voll zur Geltung bringen können. Da dies aber bei den üblichen landwirtschaftlichen Kulturen Ausnahmefälle sind, soll die Blattfläche zunächst als bestandstypischer Einflußparameter neben den meteorologischen Parametern verwendet werden. Dieser Einfluß auf die Interzeptionsverdunstung wurde mit Hilfe der in 2.2 beschriebenen statistischen Methoden untersucht. Dabei wurden zunächst quadratische Ansätze zur Beschreibung der nichtlinearen Vorgänge verwendet, so wie es auch von ATANASIU und SCHNEIDER (1961) vorgeschlagen wurde. Bei der Niederschlagsinterzeption spielen aber Speicherungsvorgänge bei begrenztem Speicherangebot eine Rolle. Deshalb ist zu vermuten, daß ähnlich wie bei der Lichtinterzeption ein logarithmischer Ansatz die tatsächlichen Verhältnisse besser als eine quadratische Regressionsfunktion beschreibt. Aus diesem Grunde wurden neben den quadratischen Ansätzen auch logarithmische und Wurzelfunktionen bezüglich ihrer Brauchbarkeit geprüft.

Die mikrometeorologischen Einflußgrößen Freilandniederschlag No, Windgeschwindigkeit, relative Feuchte wurden als unabhängige Variable neben dem Blattflächenindex als pflanzlichem Parameter in die Rechnung eingeführt. Als abhängige Variable wurden der durchtropfende und durchfallende Niederschlag Nd, der stammabfließende Niederschlag Ns und die Interzeption Ni verwendet. In Tafel 1 ist ein Korrelationsschema dargestellt, aus dem die Qualität der Regressionsflächen zu ersehen ist.

Tafel 1: Schema der multiplen Korrelationskoeffizienten zwischen durchfallendem Niederschlag Nd, Stammabfluß Ns und Interzeption Ni und den errechneten Reaktionsflächen bei verschiedenen Selektionen der Einflußparameter Freilandniederschlag No, Blattfläche LAI, Windgeschwindigkeit u und relative Feuchte r.F.

Sel.Nr.									Korrelations-Koeffizient		
	No ²	No ln No	LAI ²	LAI ln	LAI u	r.F. ²	r.F. ln	r.F.	Nd	Ns	Ni
1, 2, 3	+		+			+	+		0,95	0,79	0,91
4, 5, 6	+		+			+			0,95	0,79	0,91
7, 8, 9		+		+			+		0,95	0,83	0,90
10, 11, 12			+		+			+	0,94	0,78	0,89
13	+		+								0,89
14	+		+								0,88
15	+		+								0,88

Die multiplen Korrelationskoeffizienten zwischen den Reaktionsflächen des durchtropfenden Niederschlages und den Meßwerten sind besonders hoch. Die niedrigsten treten beim stengelabfließenden Niederschlag auf; diese Messungen sind also relativ unsicher. Da ihre Anteile jedoch im Vergleich zu den anderen Einflußgrößen klein sind, verschlechtern sie das Gesamtergebnis nicht wesentlich. Erstaunlich hoch sind die Korrelationskoeffizienten für den interzipierten Niederschlag Ni. Sie liegen durchweg über 0,88.

Betrachtet man die Ergebnisse im einzelnen, so erkennt man, daß zwar die höchsten Korrelationen auftreten, wenn alle genannten Einflußparameter berücksichtigt werden. Das Weglassen der Windgeschwindigkeit verschlechtert aber die Korrelation kaum. Der multiple Korrelationskoeffizient für den durchtropfenden Niederschlag bleibt bei 0,90, für den stammabfließenden bei 0,79 und für den interzipierten Niederschlag bei 0,91. Der Wurzelansatz bringt sogar eine leichte Steigerung des Korrelationskoeffizienten für den stammabfließenden Niederschlag auf 0,81. Bei den logarithmischen Ansätzen nimmt er dagegen etwas ab. Es liegt der Schluß nahe, daß weder die relative Feuchte, die sich ohnehin während eines Niederschlagsereignisses sehr stark verändert, und deren Messung daher unsicher ist, noch die Windschwindigkeit wegen ihres anfangs beschriebenen gleichzeitig verstärkenden und abschwächenden Einflusses einen wesentlichen Einfluß auf die Interzeptionsmenge haben.

Der Vorgang der Interzeption und insbesondere der Interzeptionsverdunstung wird zwar mit Sicherheit durch Strahlung, relative Feuchte, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit neben der Speicherkapazität der Blätter beeinflußt, doch wirkt sich der Einfluß dieser mikrometeorologischen Parameter weniger auf die Gesamtmenge der Interzeption aus. Bei schlechteren Verdunstungsbedingungen geht nämlich der Vorgang der Interzeptionsverdunstung nur langsamer vonstatten, während die Summe der Verluste sich kaum ändert.

Aus diesen Gründen erlauben die vorliegenden Ergebnisse eine Abschätzung der Niederschlagskomponenten aus nur zwei Eingangsparametern, der Blattfläche und dem Freilandniederschlag (v. HOYNINGEN-HUENE, 1980). Das hat neben der Erleichterung bei der praktischen Anwendung der Modellbeziehung auch den Vorteil höherer statistischer Signifikanz der Rechenergebnisse.

Die Regressionsbeziehung läßt sich darstellen durch die Gleichung

$$\begin{aligned} Ni = & 0,3 + 0,27 \cdot No + 0,13 \cdot LAI - 0,013 \cdot No^2 \\ & + 0,0285 \cdot No \cdot LAI - 0,007 \cdot LAI^2 \quad (R = 0,91) \end{aligned}$$

Die Reaktionsfläche der Interzeption ist in Bild 14 dargestellt. In dieser räumlichen Zeichnung wird die Grundfläche aus der X_1 -Achse, dem Freilandniederschlag No , von 0 bis 18 mm nach rechts hinten und der X_2 -Achse, dem Blattflächenindex, von 0 bis 18 mm nach links aufgespannt. Die Y-Achse zeigt die Interzeptionsverluste.

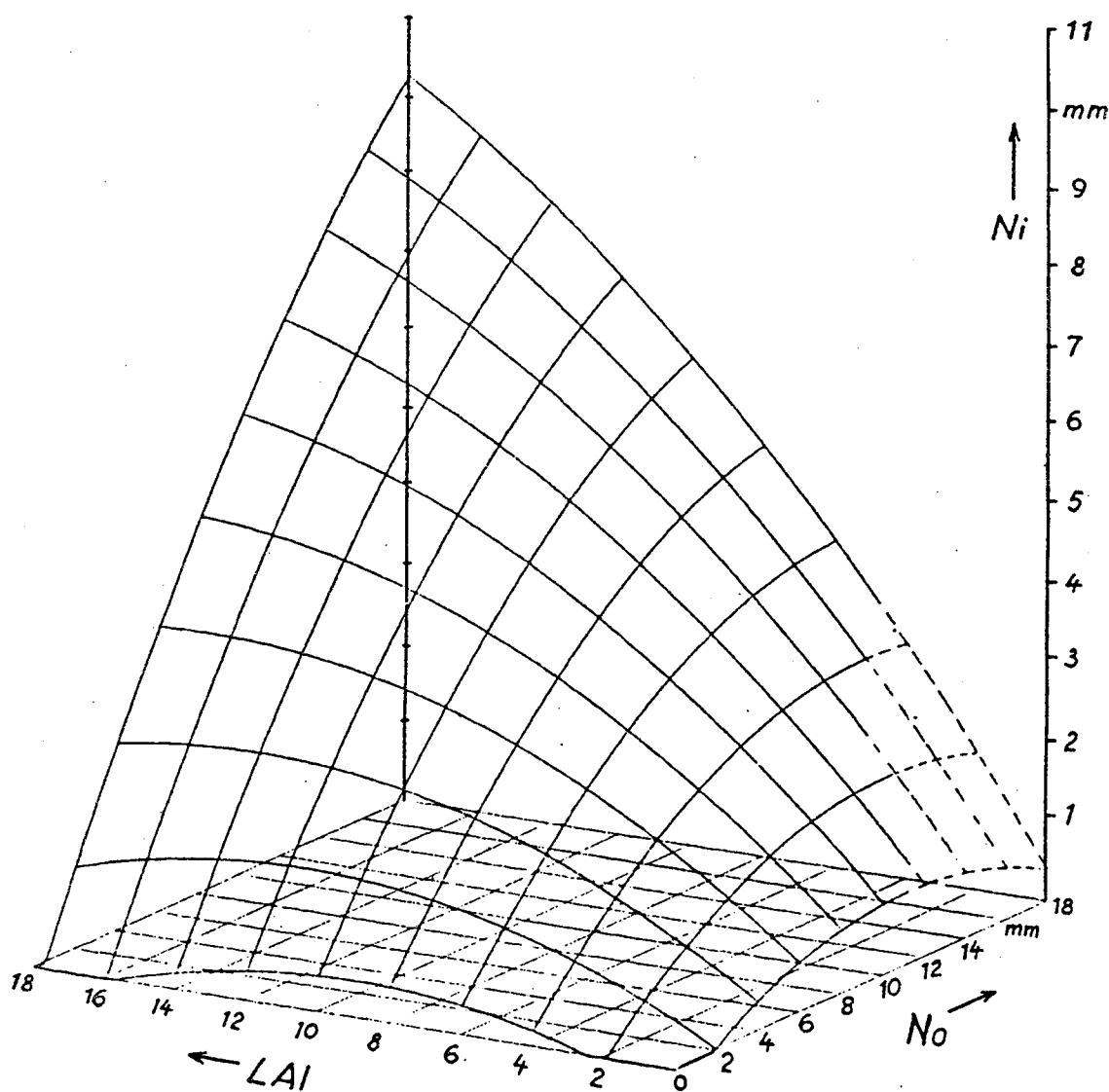


Bild 14: Regressionsfläche der Abhängigkeit der Interzeptionsverluste Ni von Blattflächenindex LAI und Freilandniederschlag für alle verwendeten Bestände

Dabei bestätigen sich die bei den Einzeluntersuchungen gemachten Erfahrungen:

- Mit zunehmendem Freilandniederschlag steigt die Interzeption anfangs deutlich, bei höheren Werten von No schwächt an.
- Sättigung erfolgt bei niedrigen Blattflächen bei etwa 10 mit zunehmender Blattfläche findet sich das Maximum der Kurven bei höheren Werten von No.
- Die Speicherkapazität steigt mit zunehmender Blattfläche und ist bei LAI 10 im Bereich der Darstellung ($No < 18 \text{ mm}$) nicht erschöpft.

Eine Zunahme der Blattfläche bewirkt anfangs eine große Zunahme der Interzeptionsverluste, bei hohen Blattflächen flacht die Kurve dagegen wegen der gegenseitigen Abschirmung der Blätter ab. Dabei wird eine wechselseitige Wirkung der Eingangsparameter No und LAI deutlich. Bei großen Blattflächen könnte auch hohe Freilandniederschläge noch zu einer erheblichen Steigerung der Interzeptionsverluste führen, während niedrige Blattflächen schon ihre maximale Speicherkapazität bei niedrigen Werten des Freilandniederschlages ausgeschöpft haben. Da bei $LAI = 0$, also fehlenden Blättern, auch eine Interzeptionsspeicherung errechnet wird, lässt sich durch die freie Speicherkapazität anderer Pflanzenteile erklären, wie sie bei Hafer bereits angesprochen wurde.

Das Abfallen der Regressionsfläche bei niedrigen Blattfläche und hohen Werten des Freilandniederschlages ist eine Folge des quadratischen Ansatzes und der relativ geringen Anzahl von Eingangsdaten in diesem Bereich, beschreibt also nicht die tatsächlichen Interzeptionsmengen. Ähnliches gilt für die negativen Werte von Ni im Bereich $No < 1 \text{ mm}$.

3.3.2 Aufbau und Diskussion des Modells

Die in Gleichung (3) dargestellte Regressionsbeziehung zwischen Blattfläche und Freilandniederschlag einerseits und Interzeptionsmenge andererseits legt es nahe, sie als Grundgleichung für die Konstruktion eines handlichen Modells zur Abschätzung der Interzeptionsverluste in landwirtschaftlichen Beständen zu benutzen. Um die angesprochenen Nachteile der quadratischen Beziehung (3) im Modell zu vermeiden, müssen folgende zusätzliche Forderungen aufgestellt werden:

- negative Interzeption ist auszuschließen,
- bei $No = 0$ ist $Ni = Ns = Nd = 0$
- bei $LAI = 0$ ist $Nd = No$ und $Ns = Ni = 0$
- bei Überschreiten der Interzeptionsspeicherkapazität bleibt die Interzeption konstant, d.h. das in Bild 13 dargestellte Absinken der Fläche muß ausgeschlossen werden.
- zusätzliche Speicherkapazitäten müssen berücksichtigt werden, ebenso wie die Reduktion der Kapazität aufgrund bestandsmorphologischer Besonderheiten.

Die erste Forderung ist durch einen einfachen Befehl im Rechenprogramm leicht zu erfüllen. Gleiches gilt auch für die beiden weiteren Forderungen. Durch eine Anzahl von vorgegebenen Stellen in der Regressionsrechnung (Dummies) kann die Form der Reaktionsfläche noch etwas verbessert werden.

Die vierte Forderung kann realisiert werden, indem zunächst der Grenzwert von No , nämlich No_g gesucht wird. Dies erfolgt durch Bildung des partiellen Differentials der Formel (3) nach No , welches verschwinden muß:

$$\frac{\partial Ni}{\partial No} = 0. \quad (4)$$

Daraus ergibt sich eine Beziehung für die Abhängigkeit dieses Grenzwertes No_g von der Blattfläche:

$$No_g = b_1 + b_2 \cdot LAI. \quad (5)$$

Aus dem Modell lässt sich also eine einfache lineare Beziehung für die Freilandniederschlagsmenge ableiten, bei welcher die maximale Interzeptionsspeicherung erreicht ist. Diese ergibt sich aus (3) und (5) und hat die Form

$$Ni_g = c_1 + c_2 LAI + c_3 LAI^2 \quad (6)$$

und ist offensichtlich eine nur von der Blattfläche abhängige quadratische Beziehung.

Die letzte Forderung nach Berücksichtigung der tatsächlichen Speicherkapazität ist schwer zu erfüllen. Es wurde deshalb für die extremen Beispiele Hafer mit voll ausgebildeten Rispen und Weizen nach der Gelbreife und fast senkrecht gestellten Blättern die Interzeption gemessen und mit der Regressionsbeziehung (3) verglichen. Dabei ergab sich aus 15 Messungen die in Tafel 2 dargestellte Beziehung zwischen No und der Differenz aus gemessener und berechneter Interzeption.

Tafel 2: Mittlere Differenz von Messung und Berechnung der Interzeption bei Hafer und gelbreifem Weizen

No	0	1	2	3	4	5	6	7	n
ΔNi Hafer	0	-0,25	0,45	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	n
ΔNi Weizen	0	-0,40	-0,65	-0,80	-0,95	-1,05	-1,15	-1,20	n

Die Erhöhung bzw. Verminderung der Speicherkapazität kann als Werte um 1 mm erreichen. Die dargestellten Abweichungen verschwinden jedoch weitgehend, wenn die Erhöhung der Speicherur-

in der Rispe durch eine additive Vergrößerung des Blattflächenindex um 1,0 und die Verringerung bei hängenden Blättern durch Multiplikation der Blattfläche mit dem Faktor 0,65 berücksichtigt wird, was den Ergebnissen von BARFIELD et al. (1973) entspricht. Im Modell sollte deshalb ab der phänologischen Phase Gelbreife bis zur Totreife die tatsächliche Blattfläche mit einem kontinuierlich von 1,0 bis 0,65 absinkenden Faktor multipliziert werden.

Unter Berücksichtigung der genannten Vorgaben wurden die statistischen Berechnungen wiederholt. Es ergab sich eine Erhöhung der multiplen Korrelationskoeffizienten auf ca. 0,91 und eine geringfügige Änderung in den Regressionsparametern, so daß die Grundgleichung des Modells nunmehr lautet:

$$N_i = -0,42 + 0,245 N_o + 0,2 LAI - 0,0111 N_o^2 + 0,0271 N_o LAI - 0,0109 LAI^2; \quad (3a)$$

für den Grenzwert gilt somit statt (5)

$$N_{o_g} = 11,05 + 1,223 LAI \quad (5a)$$

und für die maximale Interzeption in (6)

$$N_{i_g} = 0,935 + 0,498 LAI - 0,00575 LAI^2. \quad (6a)$$

Mit diesen Parametern wurde das EDV-Programm für die weiteren Rechnungen erstellt. Für die Praktiker bietet die in Bild 15 gezeigte graphische Darstellung des Modells die Möglichkeit einer einfachen Abschätzung der Interzeption mit Hilfe von Meßwerten des Freilandniederschlages und Schätzungen der Blattfläche.

3.3.3 Prüfung des Modells

Die hohe Korrelation der Regressionsfläche mit den verwendeten Meßdaten läßt erwarten, daß die Übereinstimmung im Bereich der häufig vorkommenden Niederschlagsmengen bzw. Blattflächen be-

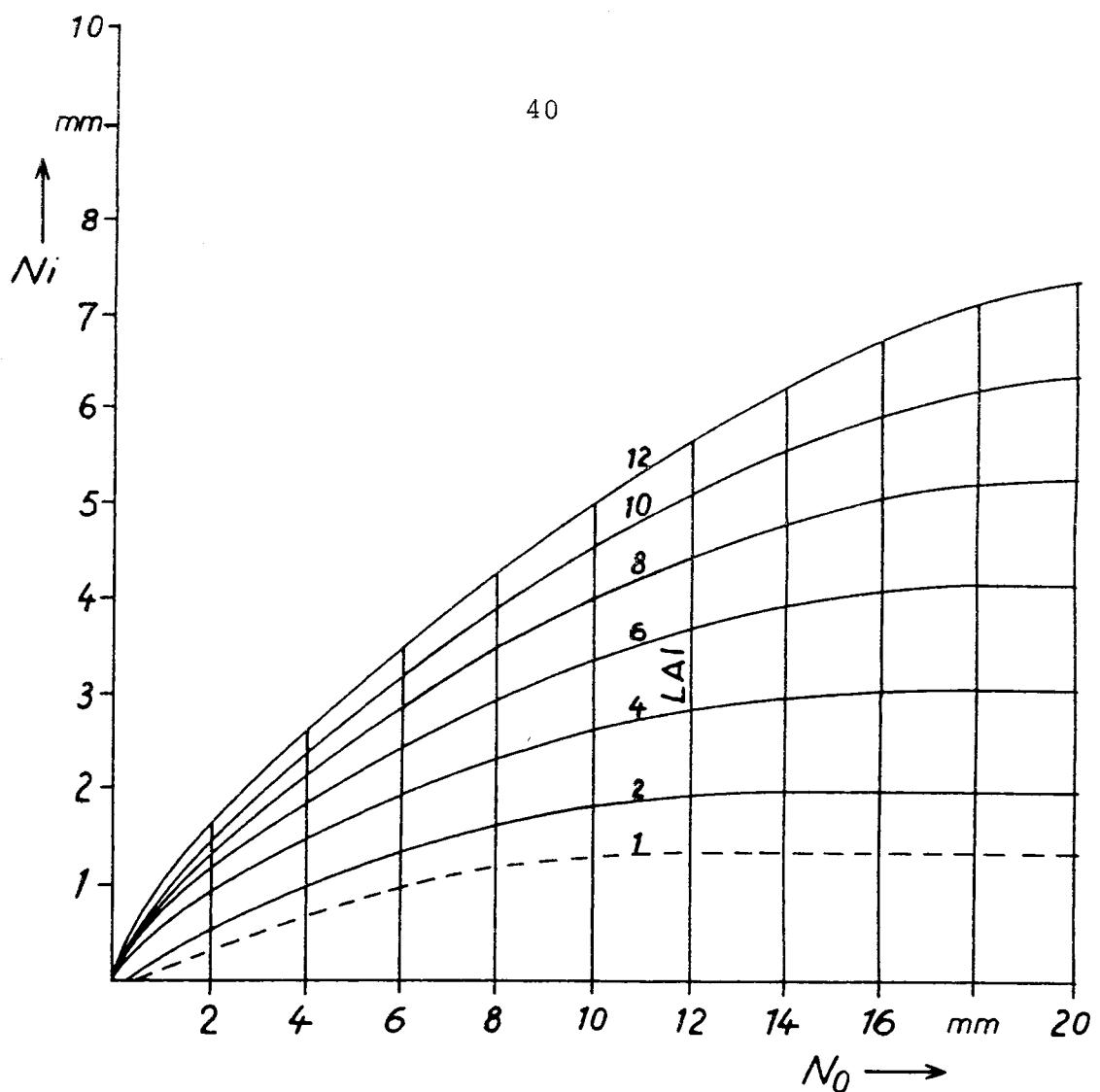


Bild 15: Beziehung zwischen Freilandniederschlag, Blattfläche und Interzeption nach dem vorgestellten Modell

sonders gut ist, während die Approximation durch die quadratischen Funktionen größere Abweichungen im Bereich extrem hoher und niedriger Niederschläge bzw. Blattflächen zur Folge haben muß, wenn auch die Annahme einer konstanten Interzeption oberhalb des Maximums die wahren Verhältnisse gut wiedergeben dürfte. Es ist deshalb zu prüfen,

1. wie genau das Modell die tatsächlichen Interzeptionsvorgänge bei Niederschlagsereignissen sowie in Beständen beschreibt, die nicht in die Regressionsrechnung einbezogen worden waren, bzw. erst nach Aufstellung des Modells beobachtet wurden.

2. wie genau das Modell extreme Niederschlagssituationen bei allen verwendeten Blattflächen darstellt, insbesondere wie zuverlässig der Grenzniederschlag No_g und die Interzeptions-speicherkapazität berechnet werden können.

Von den Messungen im Versuchsjahr 1980 war ein Teil wegen Schäden in den Beständen durch Phytophthora bei Kartoffeln oder Lager bei Getreide unbrauchbar. Für die übrigen Ereignisse wurde die Interzeption entsprechend No und LAI nach dem Modell berechnet und den Meßergebnissen gegenübergestellt. Wie aus Tafel 3 hervorgeht, lag der mittlere Fehler insgesamt bei 0,12 mm mit einem Minimum bei Weizen. Obwohl Futterrüben in den vorangegangenen Untersuchungen überhaupt nicht verwendet worden waren, zeigten diese zwar die höchste Standardabweichung ($\delta = 0,38$ mm), der mittlere Fehler betrug aber nur +0,11 mm. Bei Mais dagegen sind zwar große Einzelabweichungen festzustellen ($\delta = 0,37$ mm), aber auch besonders gute Treffer, was weniger gegen das Modell, als gegen die Qualität der Einzelmessungen sprechen dürfte.

Diese ermutigenden Resultate der Modellrechnungen wurden bei mittleren oder niedrigen Freilandniederschlägen gewonnen. Die Prüfung des Modells an extrem ergiebigen Niederschlagsereignissen wurde dagegen durch Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen der vergangenen Jahre vorgenommen. Hier wurde insbesondere die experimentell gefundene Speicherkapazität, d.h. der mittlere maximale Interzeptionsverlust Ni und der dazugehörige Grenzniederschlag No_g , als Kriterium herangezogen. In Tafel 4 werden die in Kap. 3.7 beschriebenen Ergebnisse aus den Feldversuchen denjenigen aus der Modellgleichung in 5a und 6a gegenübergestellt.

Danach unterschieden sich die Grenzwerte von No um ca. ± 1 mm (also um weniger als 10 %) und die Angaben zur Speicherkapazität Ni_g um $\pm 0,24$ mm. Nur bei Hafer liegt der Fehler von Ni_g zunächst bei 0,8 mm, er verringert sich allerdings durch die Korrektur entsprechend der Kapazität der Rispe auf 0,3 mm.

Die relativ genauen Bestimmungen der Grenzwertdaten durch das Modell und der Interzeptionsverluste in beliebigen Beständen

Tafel 3: Vergleich von gemessener Interzeption N_{i_m} bei Weizen, Futterrüben und Mais 1980 mit Modellrechnung N_{i_r} in Millimeter

Datum	Nr.	Weizen				Futterrüben				Mais			
		LAI	N_{i_m}	N_{i_r}	ΔN_i	LAI	N_{i_m}	N_{i_r}	ΔN_i	LAI	N_{i_m}	N_{i_r}	ΔN_i
04.07.	1.7	3.0	0.6	0.5	0.1								
09.07.	0.7	2.9	0.3	0.2	0.1								
11.07.	1.3	2.8	0.6	0.4	0.2								
11.07.	8.0	2.8	2.1	1.9	0.2								
17.07.	0.3	2.5	0.2	0.1	0.1								
18.08.	0.7	2.4	0.3	0.2	0.1								
06.08.	5.0	2.0	1.2	1.1	0.1								
20.08.	4.0	1.9	1.0	0.9	0.1	4.9	1.4	1.6	-0.2	3.4	1.1	1.3	-0.2
21.08.	11.2					4.9	3.6	3.1	0.5	3.4	2.5	2.5	0.0
29.08.	1.7					5.0	0.8	0.9	-0.1	3.6	0.6	0.7	-0.1
10.09.	3.0					5.1	-	1.3	-	3.6	1.5	1.0	0.5
11.09.	7.5					5.1	2.7	2.5	0.2	3.6	2.6	2.0	0.6
11.09.	2.5					5.1	-	1.1	-	3.6	1.4	0.9	0.5
18.09.	7.0					5.1	3.0	2.4	0.6	3.6	1.6	2.0	-0.4
25.09.	3.0					5.0	1.0	1.3	-0.3	3.5	1.1	1.0	0.1

Tafel 4: Vergleich der Interzeptionsspeicherkapazität nach Messungen und Modell.

No: Grenzwert des Freilandniederschlags, welcher noch zu Interzeption führt,

Ni_g: maximal speicherbare Niederschlagsmenge.

Bestandsart	Blattfläche m ² / m ²	Messung		Modell		ΔNi_g mm
		No _g mm	Ni _g mm	No _g mm	Ni _g mm	
Zuckerrüben	3,5-3,8	14	2,5	16	2,8	-0,3
Hafer	2,5	15	3,0	14	2,2	+0,8
Hafer korrigiert	3,5	15	3,0	15	2,7	+0,3
Weizen grün	2,5	14	2,1	13	2,2	-0,1
Kartoffeln	5,2	17	3,4	17	3,6	-0,2
Mais 4 Pfl./m ²	1,2	10	1,4	12	1,4	0,0
Mais 8 Pfl./m ²	2,4	12	2,5	14	2,2	0,3
Mais 12 Pfl./m ²	3,5	10	3,0	15	2,7	0,3
Mais 12 Pfl./m ²	3,6-3,8	15	3,0	16	2,8	0,3
Mais 32 Pfl./m ²	8,0-10,0	15	6,0	22	5,9	0,1

machen das Rechenmodell recht universell anwendbar sowohl für die Ermittlung aktueller wie langfristiger Interzeptionsverluste bei der Bilanzierung des Wasserhaushalts.

Im Winter konnten zwar die Interzeptionsvorgänge nicht untersucht werden, doch treten in dieser Jahreszeit alle Evapotranspirationsvorgänge gegenüber der Transpiration soweit in den Vordergrund, daß ihre exakte Aufgliederung in Bodenevaporation und Transpirationsverdunstung von geringem Interesse ist.

3.3.4 Modellrechnungen zur Bestimmung des Anteils der Interzeptionsverluste an der Niederschlagsbilanz

Die gestellte Aufgabe dieser Untersuchung, nämlich den Einfluß der Landnutzung auf die Interzeptionsverluste zu ermitteln, ist wegen der Vielzahl von Kulturpflanzenarten und Bestandsdichten und wegen des daraus folgenden enormen Aufwandes bei den ganzjährig durchzuführenden Messungen nicht durch experimentelle Feldversuche zu lösen. Erst die Verwendung des vorgestellten Modells erlaubt eine zuverlässige Abschätzung. Nunmehr können mit Hilfe der täglichen Niederschlagsmessungen beliebiger Jahre für beliebige Pflanzenbestände die Interzeptionsverluste berechnet werden, wenn die Blattfläche und die mögliche weitere Zwischenspeicherkapazität, sowie deren Entwicklung während der jeweiligen Vegetationszeit bekannt oder abschätzbar sind.

Um den Effekt der gebräuchlichsten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, ihrer Morphologie und Vegetationszeit zu ermitteln, wurde eine Modellrechnung für Zuckerrüben, Sommer- und Winterweizen sowie Sommergerste als Bestand mit besonders kurzer Vegetationszeit und neben dem normalen Maisbestand (12 Pfl./m^2) als Beispiel für extrem hohe Biomasse für einen Maisbestand mit 32 Pfl./m^2 durchgeführt. Der Verlauf des Blattflächenindex ist in Bild 16 dargestellt. Die Kurven wurden bei Mais 12 Pfl./m^2 und 32 Pfl./m^2 und bei Sommer- und Winterweizen aus eigenen Messungen, bei Zuckerrüben nach Angaben von SOMMER und BRAMM (1978) und bei Sommergerste nach KLAPP (1967) ermittelt. In Tafel 5 werden zunächst die berechneten Interzeptionsverluste vom Juli 1979 gezeigt, da in diesem Monat alle Bestände außer Mais voll entwickelt waren und die Streubreite der einzelnen Niederschlagssummen sehr groß war. Wie zu ersehen ist, wird in Sommergerste wegen seiner geringen Blattfläche bei schwachem Regen (31. Juli $0,4 \text{ mm}$) kaum, beim dichtesten Bestand (Mais, 32 Pfl./m^2) der gesamte Niederschlag vom Bestand aufgefangen. Von dem starken

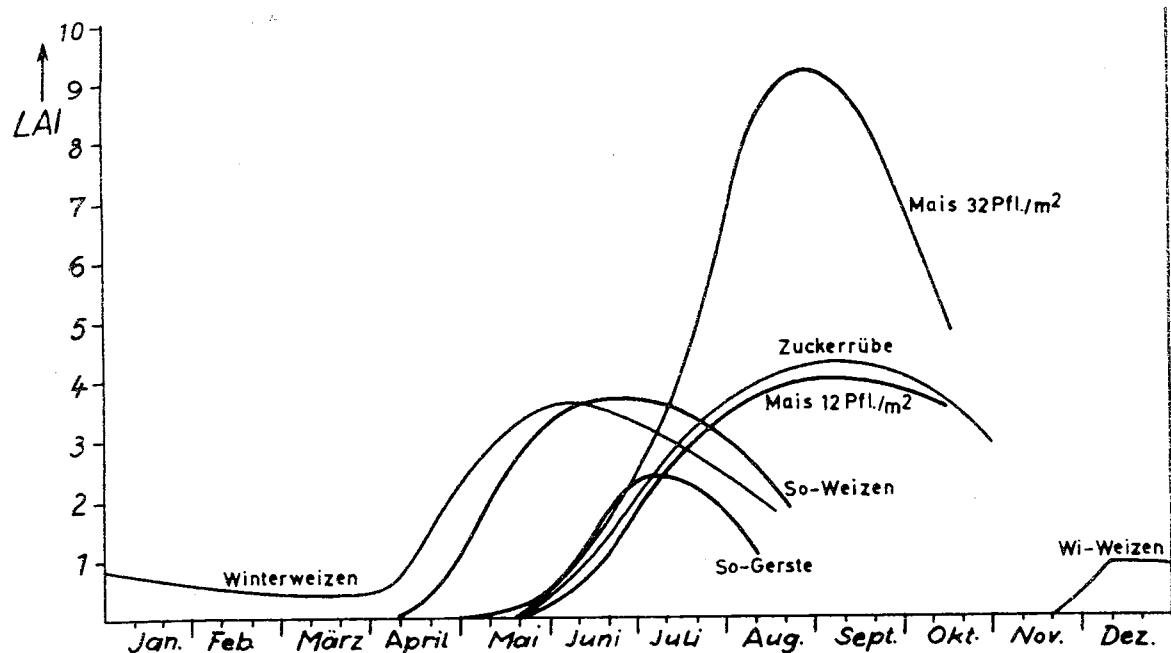


Bild 16: Jahresverlauf der Blattflächenindizes LAI verschiedener Kulturarten

Schauer am 18. Juli mit 22,3 mm wird dagegen in Getreide mit etwa 2 mm und beim noch jungen Maisbestand mit 3 mm Interzeption die gesamte Speicherkapazität ausgeschöpft.

Der besonders wichtige Einfluß der Bestandsentwicklung wird deutlicher aus den Monatssummen in Tafel 6. Zur Zeit der besonders ergiebigen Sommerniederschläge sind die Bestände relativ dicht, so daß z.B. im Juli 1979 von den monatlichen Niederschlagssummen von $No = 81,2$ mm bei den normalen Beständen bis zu 20 mm durch Interzeption verloren gehen, während im Winterhalbjahr nur Wintergetreide wirksam ist, die Verluste aber wegen der geringen Blattfläche trotz der dann häufigen aber schwachen Niederschläge sehr gering bleiben. Nur im Dezember liegt die Interzeption wegen der ungewöhnlich hohen Niederschläge von $No = 94$ mm mit $Ni = 10,4$ mm recht hoch.

Tafel 5: Interzeptionsverluste in verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen im Juli 1979 nach Modellrechnung

Datum	No	Sommer- gerste mm	Winter- weizen mm	Sommer- weizen mm	Zucker- rüben mm	Mais (12) mm	Mais (32) mm
		LAI	LAI	LAI	LAI	LAI	LAI
7	3.6	2.4 .9	3.1 1.1	3.6 1.2	2.4 .9	2.1 .8	3.1 1.1
8	5.0	2.3 1.2	3.0 1.4	3.6 1.5	2.4 1.2	2.2 1.2	3.2 1.4
9	.6	2.3 .1	3.0 .2	3.6 .3	2.5 .1	2.3 .1	3.3 .3
16	3.3	2.2 .8	2.9 1.0	3.4 1.1	3.0 1.0	2.7 .9	4.2 1.2
17	1.0	2.2 .2	2.8 .3	3.4 .4	3.0 .3	2.8 .3	4.3 .5
18	22.3	2.2 2.0	2.8 2.2	3.4 2.5	3.1 2.4	2.8 2.2	4.4 3.0
21	8.4	2.1 1.7	2.7 1.9	3.3 2.1	3.2 2.1	3.0 2.0	4.7 2.6
22	1.5	2.1 .3	2.7 .4	3.3 .5	3.3 .5	3.0 .5	4.9 .8
23	4.3	2.0 1.0	2.6 1.1	3.3 1.3	3.3 1.3	3.0 1.2	5.1 1.7
24	4.0	2.0 .9	2.6 1.1	3.2 1.2	3.3 1.2	3.1 1.2	5.3 1.7
25	8.3	2.0 1.6	2.6 1.8	3.2 2.0	3.4 2.1	3.1 2.0	5.5 2.8
26	8.3	2.0 1.6	2.5 1.8	3.1 2.0	3.4 2.1	3.1 2.0	5.7 2.9
28	.8	1.9 .1	2.5 .2	3.0 .3	3.5 .4	3.2 .3	6.0 .6
29	7.6	1.3 1.3	2.4 1.7	3.0 1.9	3.5 2.0	3.2 1.9	6.2 2.8
30	1.8	1.8 .3	2.4 .5	2.9 .6	3.5 .7	3.3 .6	6.3 1.1
31	.4	1.8 .0	2.3 .0	2.9 .1	3.6 .2	3.3 .2	6.4 .4

Niederschlag (mm)	81.2
Interzeptionsverluste für Sommergerste (mm)	14.7
Interzeptionsverluste für Winterweizen (mm)	17.4
Interzeptionsverluste für Sommerweizen (mm)	19.8
Interzeptionsverluste für Zuckerrüben (mm)	19.4
Interzeptionsverluste für Mais (12) (mm)	18.3
Interzeptionsverluste für Mais (32) (mm)	25.7

Tafel 6: Monats- und Jahressummen der absoluten Interzeptionsverluste in mm und Anteil am Freilandniederschlag in % bei verschiedenen landwirtschaftlichen Beständen 1979 nach Modellrechnung

	No mm	Sommer- gerste %	Winter- weizen mm %	Sommer- weizen mm %	Zucker- rüben mm %	Mais (12) mm %	Mais (32) mm %
Jan.	29,2	0,0	2,3	4	0,0	0	0,0
Feb.	20,4	0,0	1,9	9	0,0	0,0	0,0
März	68,4	0,0	6,5	10	0,0	0,0	0,0
April	45,3	0,0	7,3	16	2,6	6	0,0
Mai	65,3	1,8	3	13,8	21	11,2	17
Juni	52,2	8,5	16	15,5	30	16,0	31
Juli	81,2	14,7	18	17,4	21	19,8	24
Aug.	45,7	3,6	8	4,9	11	9,3	20
Sept.	28,7	0,0	0	0,0	0	0,5	30
Okt.	25,9	0,0	0	0,0	0	0,0	7,6
Nov.	62,8	0,0	0	0,0	0	0,0	0
Dez.	93,9	0,0	0	10,7	11	0,0	0
Jahr	614,0	28,6	4,7	80,4	13,1	58,9	9,6
April- Okt.	344,3	28,6	8,3	59,0	17,1	58,7	17,0
Juni- Aug.	179,1	26,8	15,0	46,8	26,1	47,0	26,2
						42,4	23,7
						39,3	21,9
						58,8	32,8

Außerdem ist aus den Prozentangaben deutlich zu ersehen, daß eine häufige Anzahl von schwachen Niederschlägen relativ hohe Verluste zur Folge hat als eine geringe Zahl starker Schauer.

Im Juni 1979 erreichte die Interzeption in den voll entwickelten Getreidebeständen z.B. im Weizen mit 30 % die höchsten Werte, da in diesem Monat nur an einem Tag mit 12,4 mm mehr als 10 mm, an 2 Tagen zwischen 5 und 10 mm und an den übrigen Tagen 0 - 5 mm Regen fiel. Trotz der etwa gleichen Blattfläche des Sommerweizens ging im Juli dieser Prozentsatz auf 24 zurück, da - wie in Tafel 4 gezeigt - an 6 Tagen kräftige Schauer mit 5 mm und mehr fielen und dadurch auch die Monatssumme deutlich höher war.

Der Einfluß der Vegetationsentwicklung im Jahresverlauf tritt in dieser Tafel ebenfalls besonders hervor. So sind die Interzeptionsverluste bei Getreide, insbesondere bei Wintergetreide im späten Frühjahr und frühen Sommer, bei Zuckerrüben und Mais vom Hochsommer bis in den Spätherbst besonders hoch. Der Effekt von Vegetationsdauer und Bestandsdichte schließlich geht aus den Jahressummen bzw. deren Prozentanteil hervor. Von den gefallenen 614 mm Jahresniederschlag wurde der höchste Anteil mit 80,4 mm oder 13 % bei Winterweizen festgestellt. Selbst wenn die ungewöhnlichen Dezemberniederschläge nicht berücksichtigt werden, liegt diese Kulturart wegen ihrer langen Vegetationsdauer doch an der Spitze, gefolgt von Sommerweizen und Zuckerrüben mit fast 60 mm oder 9,6 %. Die späte Vegetationsentwicklung von Mais und die vor allem kurze Vegetationsdauer von Sommergerste sind die Gründe für die niedrigen Ergebnisse in diesen Beständen mit 8,3 bzw. nur 4,7 %.

Betrachtet man nur das Sommerhalbjahr, in dem der Wassermangel in der Landwirtschaft besonders gravierend ist, dann erhöhen sich die prozentualen Verluste natürlich ganz wesentlich. Weizen und Zuckerrüben stehen mit 17 % auch hier an der Spitze, dicht gefolgt von Mais (12 Pfl./m^2). Außer bei der Sommergerste, die mit nur 8,3 % wiederum die geringste Inter-

zeption zeigt, ist also die unproduktive Verdunstung bei allen Kulturarten im Sommerhalbjahr beträchtlich. Ihre Vernachlässigung führt aber zu noch größeren Fehlern, wenn Wasserbilanzen z.B. für die Feldberechnung in den Monaten Juni bis August aufgestellt werden müssen, da in dieser Zeit ca. 1/4 der Niederschläge durch Interzeption verloren geht. Die diskutierten Verluste betreffen nur Pflanzenbestände der herkömmlichen Art und sind sinngemäß nur auf ähnliche Bestände übertragbar. Der Anbau von Zwischenfrüchten z.B. nach Wintergetreide erhöht die gesamte Interzeption allerdings je nach Art der Zwischenfrucht und ihrem Aufgangstermin noch zusätzlich. Eine Abschätzung der Auswirkung des Zwischenfruchtabaus auf die Niederschlagsbilanz ist mit Hilfe des vorgestellten Modells relativ einfach, wenn die Bestandsdichten bekannt sind. Im allgemeinen dürften die zusätzlichen Summen der Interzeption etwas niedriger liegen als die Monatssummen bei Mais (12 Pfl./m²) im September und Oktober.

Die genannten hohen Raten unproduktiver Verdunstung bei dichten Beständen mit langer Vegetationszeit bekommen eine besondere Bedeutung, wenn in der landwirtschaftlichen Produktion neue Konzeptionen entwickelt werden mit dem Ziel der Erzeugung großer Biomasse als alternative Energieträger oder zur Bereitstellung von Industriegrundstoffen. Hier werden voraussichtlich Bestände mit großer Blattmasse angestrebt, die - ggf. mit mehreren Ernten im Jahresverlauf - zur optimalen Ausnutzung des meteorologischen Energieangebots nahezu ganzjährig die landwirtschaftlichen Nutzflächen bedecken. Dann aber muß die Auswirkung auf den Wasserhaushalt unter allen Umständen sorgfältig bedacht werden. Als Beispiel für die hydrologischen Folgen des Anbaus von Pflanzen mit langer Vegetationsdauer und hoher Bestandsdichte ist in Tafel 6 auch die Interzeption eines besonders dichten Maisbestandes mit 32 Pfl./m² entsprechend den Modellrechnungen dargestellt. Aus der letzten Spalte der Tafel geht hervor, daß von der Jahressumme des Niederschlags bei dieser (späten!) Kulturart immerhin 13 % des

Niederschlags verloren gehen. Im Sommerhalbjahr sind es 23 % und in der Zeit vom Juni bis August fast ein Drittel der Niederschläge. Dazu kommen noch die Verluste durch Transpiration, welche, wie anfangs gezeigt, nur zum Teil durch die Interzeption reduziert werden. Das genannte Beispiel eines dichten Maisbestandes erscheint wegen der hohen erzeugten Biomassen als durchaus typisch für mögliche zukünftige Entwicklungen.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Da die interzipierten Niederschlagsmengen direkt verdunsten und den Boden und die Pflanzenwurzeln nicht erreichen, und da die Reduzierung der Transpiration diesen Verlust nur zu einem sehr geringen Teil ausgleicht, ist die Interzeption in der Niederschlagsbilanz überwiegend als Verlust anzusetzen, der während der Vegetationsperiode zwischen 8 und 20 % liegt. Bisher wurde dieser Verlust vor allem deshalb stark unterschätzt, weil auch die Niederschlagsmessungen mit den herkömmlichen Geräten erheblich zu niedrig sind (KARBAUM, 1968). Erst bei genaueren Messungen z.B. mit windgeschützten Geräten, die für die Aufstellung genauerer Wasserbilanzen Verwendung finden, wurde das Ausmaß der Verluste deutlich. Zwar scheinen bei Betrachtung des Wasserhaushaltjahres diese Verluste wegen der begrenzten Vegetationszeiten der meisten landwirtschaftlichen Kulturen prozentual relativ gering zu sein, ihre Bedeutung für den Wasserhaushalt, insbesondere im Hinblick auf die Grundwasserneubildung, bleibt aber trotzdem besonders groß, da nur etwa 30 - 40 % des Niederschlags der Versickerung und dem Abfluss zugute kommen. Eine Änderung der Wasserverluste durch Interzeption um eine bestimmte Prozentzahl schlägt sich deshalb mit dem doppelten Gewicht in der Sickerung nieder.

Die errechneten Differenzen zwischen der Interzeption verschiedener Kulturarten aufgrund ihrer Blattflächen und Vegetationszeiten werden durch die unterschiedlichen Wasserverluste durc

Transpiration verstärkt und beeinflussen so die Unterschiede in der Wasserbilanz verschieden genutzter Böden. Diese Überlegungen sind wichtig für Planungsmaßnahmen bei Nutzungsänderungen, vor allem in Hinblick auf die wachsende Notwendigkeit, den Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen über die Nahrungs- und Futtermittelproduktion hinaus auf die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe und alternativer Energieträger auszudehnen. Dann nämlich werden zur Produktion hoher Biomassen besonders dichte Bestände benötigt, wie sie z.B. im beschriebenen Bestandsdichteversuch bei Mais erfaßt wurden. Das Beispiel der Variante mit 32 Pfl./m² zeigt aber, daß dann speziell auch durch die Interzeptionsverluste erhebliche Folgen für den Wasserhaushalt erwartet und in Rechnung gestellt werden müssen.

5. S C H R I F T T U M

ATANASIU, N., SCHNEIDER, B. (1965): Zur Frage der Erfassung von Wirkung und Wechselwirkung mehrerer Faktoren auf den Ertrag. - Z.Acker- und Pflanzenbau 123, 1. 11-30

BARFIELD, B.J., PAYNE F.A., WALKER, J.N. (1973): Surface water storage capacity of selected crop leaves under irrigation sprays. - Agric. Meteor. 12, 105-111

BEESE, F., van der PLOEG, R. (1978): Computermodelle in der Bodenhydrologie. - Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 26, 153-172

BRECHTEL, H.M., PAVLOV, M.B. (1977): Niederschlagsbilanz von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen in der Rhein-Main-Ebene. Vorläufige Schtztabellen zur Ermittlung des Nettoniederschlages und der Interzeptionsverdunstung des Waldes, auf der Basis örtlich gemessener Monatssummenwerte des Freilandniederschlages. - Arbeitspapier des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bonn

BRECHTEL, H.M., v. HOYNINGEN-HUENE, J. (1979): Einfluß der Verdunstung verschiedener Vegetationsdecken auf den Gebietswasserhaushalt. - Schriftenreihe des DVWK 40, 172-223

van EIMERN, J. (1964): Untersuchungen über das Klima in Pflanzenbeständen als Grundlage einer agrarmeteorologischen Beurteilung insbesondere für den Pflanzenschutz. - Ber. Deutsc Wetterd. 96

FEDDES, R.A. (1971): Water, heat and crop growth. - Meded. Landbouwhogeschoel Wageningen 71, 12

GUZMAN-LOPEZ, G. (1974): Phänologie und Reife des Körnermaises in der Bundesrepublik Deutschland in Abhängigkeit von Witterung und Klima. Unveröff. Diss. TU München

HAMILTON, E.L., ROWE, P.B. (1949): Rainfall interception by chaparral in California. - Calif. Dept. Nat. Resoure, 43 S.

HEUVELDOP, J. (1973): Untersuchungen über die Interzeptionsverdunstung in Nadelbaumkronen. - Forstarchiv 44, 129-136

HORTON, R.E. (1919): Rainfall interception. - Monthly Weather Review 47, 9

v.HOYNINGEN-HUENE, J. (1979): Untersuchungen zur Interzeption in landwirtschaftlichen und forstlichen Pflanzenbeständen. - Unveröff. Arbeitsbericht, DVWK

v.HOYNINGEN-HUENE, J. (1980): Mikrometeorologische Untersuchungen zur Evapotranspiration von bewässerten Pflanzenbeständen. - Ber. Inst. Meteorol. Klimatol. Univ. Hannover 19, 168 S.

v.HOYNINGEN-HUENE, J., NASDALACK, S. (1976 und 1977): Interzeption in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. - Unveröffentl. Arbeitsbericht, DVWK

v.HOYNINGEN-HUENE, J., BRAMM, A. (1978): Die wägbare Unterdrucklysimeteranlage in Braunschweig-Völkenrode. - Aufbau und erste Erfahrungen. - Landbauforsch. Völkenrode 28, 95-102

KLAPP, K. (1967): Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaues. - Parey Berlin, Hamburg

NASDALACK, S., v.HOYNINGEN-HUENE, J. (1978): Interzeption in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. - Unveröffentl. Arbeitsbericht, DVWK

RIJTEMA (1965): An analysis of actual evapotranspiration. - PUDOC, Wageningen /Niederl. 101 S.

SOMMER, C., BRAMM, A. (1978): Wasserverbrauch und Pflanzenwachstum bei Zuckerrüben in Abhängigkeit von der Wasserversorgung. - Landbauforsch. Völkenrode 28, 3, 151-158

WEIHE, J. (1979): Der Regenniederschlag im Wald. - Schriftenreihe des DVWK 41, 10-23

ZINKE, P.J. (1967): Forest interception studies in the United States. - In: W.J. Sopper and H. Lull (Editors), Forestry Hydrology. Proc. Int. Sympos. Pergamon, New York, 137-161

Wie wirkt sich die Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt aus? Welche Folgen hat z. B. die Zwischenspeicherung von Niederschlägen durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen, und wie beeinflussen Land- und Forstwirtschaft die Wasserqualität kleiner Fließgewässer? Antwort auf diese Fragen geben eine Reihe von Untersuchungen, denen die drei Beiträge dieses Heftes gewidmet sind.

In Beitrag I: "Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzengesellschaften", werden die durch Zwischenspeicherung bedingten Verdunstungsverluste einiger Landwirtschaftskulturen verglichen und Überlegungen angestellt, wie sich durch Nutzungsänderungen und andere pflanzenbauliche und forstliche Maßnahmen möglicherweise eine höhere Grundwasserspende erreichen lässt.

In Beitrag II: "Einfluß land- und forstwirtschaftlicher Bodennutzung sowie von Sozialbrache auf die Wasserqualität kleiner Bachläufe im ländlichen Mittelgebirgsraum", geht es vor allem um die Gewässerbefrachtung durch Bodenauswaschung, Bodenabtrag und Ausschwemmung und ihre Folgen für die Gewässerqualität.

In Beitrag III: "Chemische Beschaffenheit und Nährstofftransport von Bachwässern aus kleinen Einzugsgebiets unterschiedlicher Landnutzung im nordhessischen Buntsandsteingebiet", werden die standortspezifischen Basis- und Rahmenwerte der für die Wasserqualität von Bächen bedeutsamen chemischen Parameter ermittelt und die Auswirkungen landwirtschaftlicher Nutzung auf Nährstoffgehalt und -austragung den für bewaldete Gebiete charakteristischen Werten gegenübergestellt.