

Aus dem Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg,
Bereich Jena der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR

Beeinflussungsmöglichkeiten für eine Erhöhung der Wasserausnutzung im Boden und in der Pflanze

Von Klaus Schwarz, Hans Bergmann, Dieter Roth und Dietrich Werner

Mit 5 Abbildungen und 5 Tabellen

(Eingegangen am 2. November 1982)

1. Grundlagen

Die Dynamik des Wasserversorgungszustandes der Pflanzen ist vorrangig eine Funktion des jeweiligen Wasserpotentialgefälles innerhalb des Systems Boden – Pflanze – Atmosphäre, das vorherrschend durch das Wasserdampf-Sättigungsdefizit der Luft hervorgerufen wird sowie durch die Fließwiderstände, die dem Wassertransport und damit der Wassernachlieferung entgegenwirken. Von ihnen sind die Feuchtesaug-

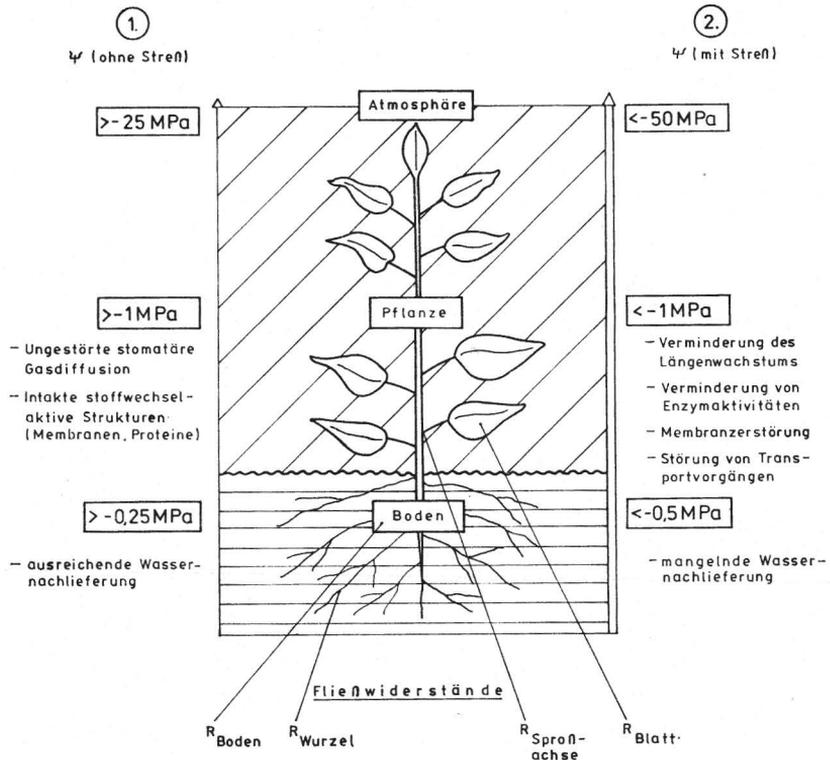


Abb. 1. Wasserpotentiale (ψ) und Fließwiderstände (R) im System Boden-Pflanze-Atmosphäre bei zwei stark unterschiedlichen Feuchteregimen und deren ökophysiologischen Effekte (vereinfachte Darstellung)

spannung des Bodens und die davon abhängigen Widerstände für die Wasseraufnahme durch die Wurzel sowie diejenigen bei der stomatären und kutikulären Wasserabgabe die wichtigsten (Abb. 1).

Die Abb. 1 kennzeichnet die Potentiale und Widerstände für den Wassertransport und ihre Ausprägung an zwei Beispielen. Einerseits in Form günstiger Potentialwerte im Fließprozeß zwischen Boden und Wurzel von $> -0,25$ MPa und zwischen Blatt und Atmosphäre von > -25 MPa (linke Seite), zum anderen Wasserstreß hervorrufende Bedingungen mit Bodensaugspannungen von $< -0,5$ MPa sowie einer Wasserdampfspannung der Luft von < -50 MPa und dementsprechend hoher Fließwiderstände bei der Wasseraneignung durch die Wurzel und weitgehend geschlossene Spaltöffnungen (rechte Seite).

Hauptkriterien für die Beurteilung eines effektiven Wasserversorgungszustandes sind seine Auswirkungen auf die Ertragsbildung und der Grad der Wasserausnutzung. Bei Unterschieden im zeitlichen Wachstumsverlauf erstrecken sie sich vorrangig auf die Höhe der Biomasseproduktion, weiter spezifiziert aber auch auf die durch die Wasserversorgung beeinflusste Ausbildungsintensität der pflanzlichen Organteile (Blatt : Stengel-Korn : Stroh- bzw. Sproß : Wurzelverhältnis) sowie auf die Inhaltsstoffzusammensetzung (Abb. 2).

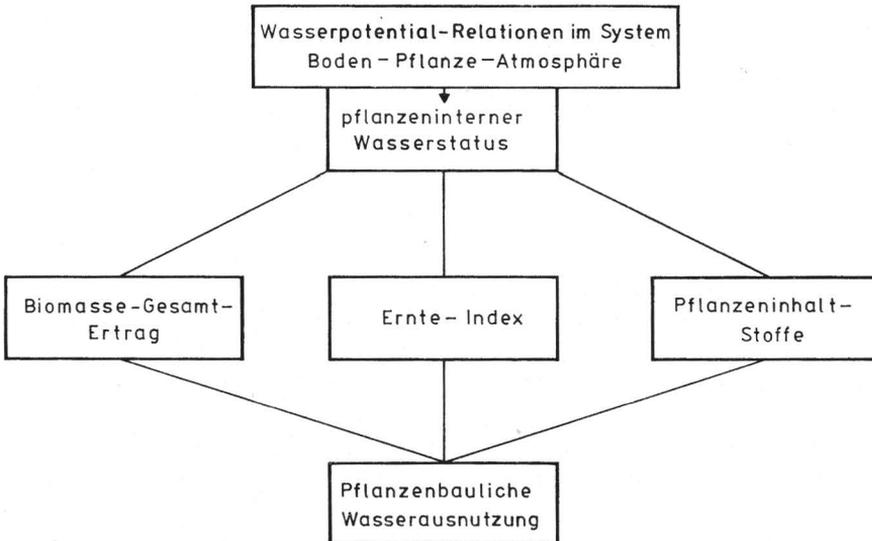
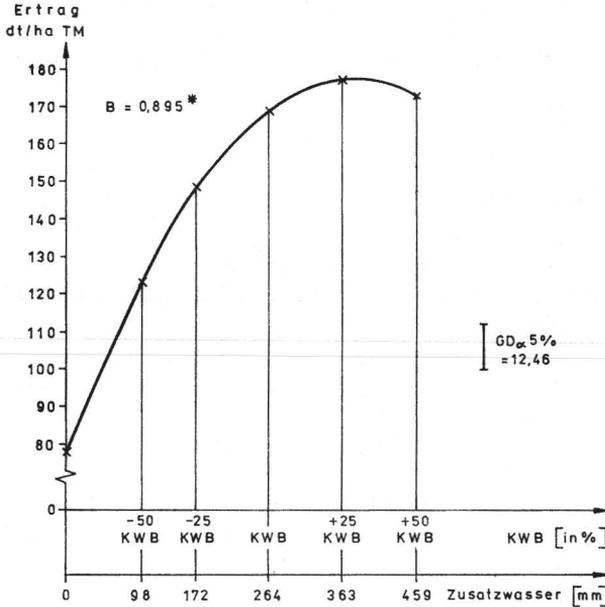


Abb. 2. Wasser-Ertrag-Beziehungen

Die ertragskundlich dominierende Rolle des Verhältnisses zwischen potentieller und aktueller Evapotranspiration wird von Roth, D. (1980) im Ergebnis neuer Versuche mit einer nach unterschiedlichen Stufen der klimatischen Wasserbilanz (KWB) gesteuerten Wasserversorgung deutlich nachgewiesen (Abb. 3). Mit Abnahme der Fließwiderstände ergibt sich ein zunächst steiler und dann abflachender Ertragsanstieg, dessen Optimum bei dem hier ausgewählten Welschen Weidelgras etwas oberhalb der ausgeglichenen KWB liegt. Bei Zuckerrüben und Getreide liegt das Optimum bezogen auf den Rüben- bzw. Kornenertrag deutlich darunter, was eine wichtige Teilursache in dem bei höherer Wasserversorgung vergrößerten Anteil an Rübenblatt bzw. Stroh hat. Hervorzuheben ist, daß entsprechend den unteren Zahlenwerten der günstigste Wert für die Wasserausnutzung je Kilogramm Trockensubstanz bedeutend unter den Ertragsoptima liegt und im ausgewählten Beispiel bereits bei 50 % der KWB liegt.



| Wasserausnutzung [kg/mm] | | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|--------------|
| — | 46,2 | 41,0 | 34,5 | 27,5 | 20,7 | Zusatzwasser |
| 32,2 | 36,2 | 35,8 | 33,4 | 29,4 | 24,7 | Gesamtwasser |

Abb. 3. Beziehungen zwischen klimatischer Wasserbilanz und Ertrag bei Welschem Weidelgras (nach Roth)

Die Beeinflussungsmöglichkeiten einer bedarfsgerechten Wasserversorgung mit einer günstigen Wasserausnutzung basieren einerseits auf einer rationellen Anpassung der Umweltbedingungen an die Wasser-Potentialanforderungen und zum anderen auf einer verbesserten Anpassung der Pflanze an Wasserstreßsituationen (Abb. 4).

2. Exogene Beeinflussungsmöglichkeiten

Die exogenen Möglichkeiten bestehen in der Verbesserung der Wasserbereitstellungsfunktion des Bodens, der Erhöhung der Durchwurzelungsintensität, der rationellen Bemessung des Zusatzwassers und wassersparenden acker- und pflanzenbaulichen Kombinationseffekten. Dabei werden letztere vor allem von der Bodenbearbeitung, der Versorgung mit organischer Substanz, der N-Düngung sowie einer günstigen Pflanzenbestandsdichte bestimmt.

Der Einfluß der Wasserbereitstellung aus dem Boden auf die Stoffproduktion wird durch die differenzierten Auswirkungen einer zunehmenden Saugspannung des Bodens (Angabe auf der Abszisse) auf die Intensität der Transpiration und der Photosynthese verdeutlicht (Abb. 5).

Neben dem Bestimmtheitsmaß der Regression zwischen Photosynthese und Transpiration von 0,74, welches das Vorhandensein von engen Wasser-Ertragsbeziehungen bestätigt, ergibt sich aus dem ausgewählten Zuckerrübenbeispiel, daß nach einem zunächst gleichbleibenden Verlauf der Stoffbildungsvorgänge bei Überschreitung der Bodensaugspannung von 0,45 MPa ein deutliches Absinken der Photosynthese- und Transpirationsleistung eintritt.

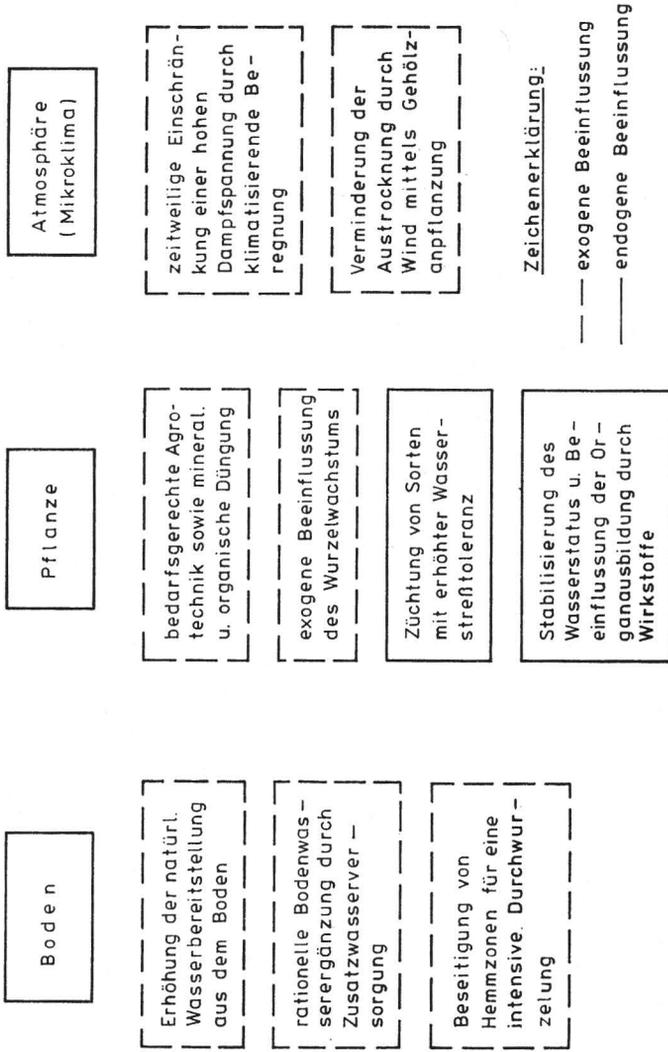


Abb. 4. Beeinflussungsmöglichkeiten der Wasser-Ertragsrelation sowie der Wasserausnutzung im System Boden-Pflanze-Atmosphäre

Die austrocknungsbedingte Erhöhung des Fließwiderstandes im Boden (Löß-Parabraunerde) kann dabei anteilig durch die meliorative Vergrößerung des Wurzelraumes und der Durchwurzelungsintensität hinsichtlich ihrer negativen Wirkung auf die Ausschöpfbarkeit ausgeglichen werden. Untersuchungen über die Wechselbeziehungen zwischen Bodenwasserausschöpfung, Durchwurzelungsintensität und Ertragsbildung bestätigen dieses (Tab. 1). Ausschlaggebend für die günstige Wirkung der Gefügemelioration (auf der unteren Hälfte der Tabelle) ist die verbesserte Ausschöpfung tieferer Bodenbereiche durch die Pflanzenwurzel als Ergebnis der Vergrößerung der Wurzel-Boden-Kontaktzone bzw. der Verringerung der Fließstrecke zwischen der Bodenmatrix im unmittelbaren Kontaktbereich und den weiter entfernten Partien (Werner 1980).

Für die zur Senkung höherer Saugspannungswerte unter Beregnungsbedingungen zum Einsatz gelangende Zusatzwasserversorgung bildet die gezielte Erfassung von Zeiträumen in der Pflanzenentwicklung mit stärkerem Wasseranspruch bzw. Wasserstref-

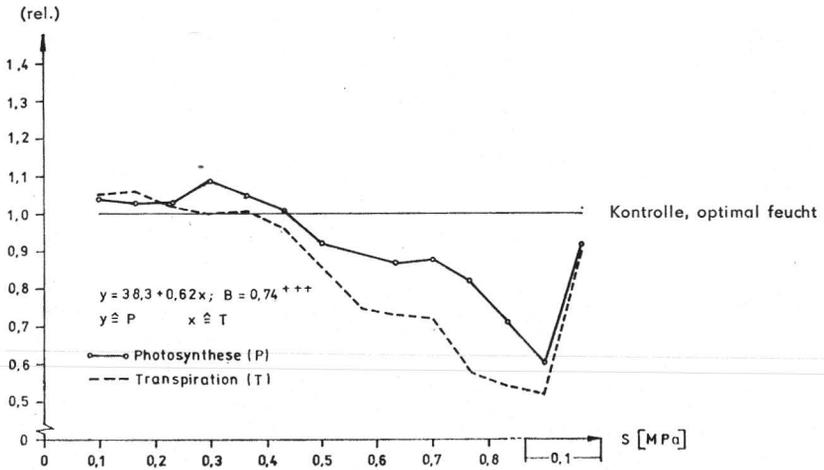


Abb. 5. Der Einfluß der Wasserbereitstellung aus dem Bodensubstrat auf die Stoffproduktion (P) und die Transpiration (Tr) von Zuckerrübenpflanzen (Großgefäße, URAS-Messungen in Klimakammer) (nach Bergmann)

Tabelle 1. Feuchteentzug durch Weidelgras aus einer stark verdichteten und einer gefügemelierten Löß-Parabraunerde sowie Wurzelichte und Ertrag – Juli 1981 (nach Werner und Unger)

| Schicht [cm] | Feuchteentzug [l/m ²] | Feuchteentzug [%] | Mittlere Wurzelzahl pro cm ² Bodenfläche | Ertrag [TM dt/ha] Σ 1.-4. Schnitt |
|---|-----------------------------------|-------------------|---|--------------------------------------|
| Löß-Parabraunerde | | | | |
| 0 ... 20 cm | 43,0 | 39 | 1,39 | 150 |
| ... 40 cm | 27,0 | 25 | 0,53 | |
| ... 60 cm | 23,8 | 21 | 0,84 | |
| ... 80 cm | 16,4 | 15 | 0,68 | |
| Löß-Parabraunerde nach Gefügemelioration | | | | |
| 0 ... 20 cm | 39,0 | 32 | 2,03 | 167 + |
| ... 40 cm | 32,0 | 27 | 1,61 | |
| ... 60 cm | 29,4 | 25 | 1,81 | |
| ... 80 cm | 19,0 | 16 | 1,47 | |

Tabelle 2. Abhängigkeit der Wasserausnutzung bei Mais von der Wasserversorgung in verschiedenen Entwicklungsstadien (nach Roth, R.) (dargestellt durch das Bestimmtheitsmaß)

| Etappe | 1978 | 1979 | 1980 |
|--|----------|----------|----------|
| I. 3-Blatt- bis 6/7-Blattstadium | 0,22 × | 0,12 × | 0,24 ×× |
| II. 6/7-Blattstadium bis Beginn Fahnschieben | 0,81 ××× | 0,18 ×× | 0,44 ××× |
| III. Fahnschieben bis Anfang Blüte | 0,56 ××× | 0,21 ×× | 0,37 ××× |
| IV. Anfang Blüte bis Kolbenansatz | 0,31 ×× | 0,12 × | 0,24 ×× |
| V. Kolbenansatz bis Milch-Wachs-Reife | 0,40 ××× | 0,31 ××× | 0,59 ××× |
| gesamte Entwicklungsstapen | 0,92 ××× | 0,69 ××× | 0,94 ××× |

××× – signifikant ($\alpha = 0,001$) nach F- und multipl. t-Test
 ×× – signifikant ($\alpha = 0,01$) nach F- und multipl. t-Test
 × – signifikant ($\alpha = 0,05$) nach F- und multipl. t-Test

verträglichkeit für ein rationelles Vorgehen weitere Ansatzpunkte, die von Roth, R. (1982) untersucht wurden. Am Beispiel von Mais (Tab. 2) wird hieraus deutlich, daß die Entwicklungsetappen I und IV eine deutliche höhere Strefßverträglichkeit aufweisen als die Etappen II, V und III, wobei der geringere Wasseranspruch in der Etappe IV und der höhere in II sich trotz der erheblichen Schwankungen in den drei Untersuchungsjahren neue Ansatzpunkte für die effektivere Wasserausnutzung liefern können.

3. Endogene Beeinflussungsmöglichkeiten

Lösungswege für die ressourcensparende endogene Einflußnahme auf die Anpassungsfähigkeit der Pflanze an ein begrenztes Wasserdargebot sowie eine effektive Ausnutzung begrenzter Wasserdarangebote zeichnen sich durch Züchtung und Wirkstoffanwendung (Phytoeffektoren) ab.

Aus Untersuchungen über die Reaktion von Weizensorten mit unterschiedlichen Resistenzeigenschaften gegenüber zeitweiligen Trockenphasen ist ersichtlich, daß trockenresistentere Sorten auf einen Wasserstrefß in hydrologisch kritischen Perioden der Kornertragsbildung mit einer geringeren Ertragsdepression reagieren, als das bei feuchteanspruchsvolleren Sorten der Fall ist (Tab. 3). Die Wasserausnutzung (WUE) unter Strefßbedingungen bei der trockenresistenten Sortengruppe verringert sich dabei im Gegensatz zur feuchteanspruchsvollen Sortengruppe nur unwesentlich. Andererseits zeigt sich, daß bei günstigen Wasserdargebotsbedingungen die wasseranspruchsvollere Sortengruppe deutlich höhere Erträge bringt.

Tabelle 3. Sortenbedingte Unterschiede im Wasserverbrauch (WV), in der Ertragsbildung und der Wasserausnutzung (WUE) bei Weizen (nach Grebner)

| Sortencharakteristik | Feuchteregime | WV [ml/G · d] ¹ | Kornertrag [g/G] | WUE [g Körner/kg H ₂ O] |
|---|----------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Sorten mit hoher Trockenresistenz | 80 % WK | 291 | 33,2 | 1,41 |
| | 80 % WK + Strefß ² | 190 | 20,5 | 1,33 |
| Sorten mit geringer Trockenresistenz | 80 % WK | 295 | 39,0 | 1,50 |
| | 80 % WK + Strefß ² | 185 | 11,0 | 0,70 |

¹ Mittlerer täglicher Wasserverbrauch in der Vegetationsperiode pro Mitscherlichgefäß

² 10tägige Wassermangelperiode während des Ährenschiebens

Die genetischen Potenzen für eine erhöhte Anpassungsfähigkeit an ein begrenztes Wasserdargebot und dessen effektive Ausnutzung können durch Phytoeffektoren offensichtlich effektiviert werden (Tab. 4). So wurde durch die Anwendung von 3 kg Ethanolamin zu Sommergerste im FEEKES-Stadium 7, insbesondere unter trockneren Bedingungen in der Vegetationsperiode, eine deutliche Ertragsstabilisierung (Erhöhung von 42,9 auf 52,6 dt/ha) und rationellere Wasserausnutzung (Erhöhung um 22,6 %) erreicht.

Dieser produktivitätsverbessernde Ethanolamineffekt beruht aus ertragsphysiologischer Sicht darauf, daß unter Wasserstrefß wirkstoffbehandelte Pflanzen eine höhere Nettophotosyntheserate und Transpirationsproduktivität gegenüber den Kontrollen auf-

Tabelle 4. Der Einfluß von Ethanolamin (Ea) auf die Transpirationsproduktivität (TP), die Photosynthese (P_n), die Transpirationsrate (Tr) sowie die Stabilität der biologischen Stoffproduktion ($\Delta P_n / \Delta \Psi$) von Sommergerstentpflanzen unter zeitweiligem Wasserstreß (nach Bergmann)

| Bestimmungsgrößen | Varianten ¹ | |
|--|------------------------|------------------------------------|
| | ohne Effektor | Ea [1 · 10 ⁻² mol/l] |
| 1. TP [mg CO ₂ /g H ₂ O] | (6,0 mg =) 100 | 119,9 (+) |
| 2. P_n [mg CO ₂ /dm ² · h] | (13,5 mg =) 100 | 119,5 (+) |
| 3. Tr [g H ₂ O/dm ² · h] | (2,26 g =) 100 | 99,7 |
| 4. $\Delta P_n / \Delta \Psi$ [mg CO ₂ /MPa] | (31 mg =) 100 | 78,7 (+) |

¹ Gefäßversuche; Effektoranwendung in Schoßperiode, 7 ml/Gefäß

wiesen (Relativ 100 auf 119). Parallel dazu sank bei behandelten Pflanzen mit zunehmender Bodensaugspannung um 1 MPa die Photosynthese nur um 79 %, wenn die Abnahme der Kontrollen gleich 100 gesetzt wird. Die ethanolaminbedingte Produktivitätsverbesserung beruht wahrscheinlich auf einem längerfristigen Schutz vor streßverursachter Membrandestruktion (Bergmann u. a. 1982).

Ebenso erscheint durch Wirkstoffe auf der makromorphologischen Ebene eine Produktionsverbesserung in Form der Umsteuerung des Rübe-Blatt-Verhältnisses bei Zuckerrüben erreichbar (Tab. 5). Es wird hieraus deutlich, daß durch eine Wirkstoffkombination auf Ethanolaminbasis das Rübe-Blatt-Verhältnis zugunsten der Rüben und zu ungunsten des transpirierenden Blattmaterials verändert werden konnte. Diese morphologischen Veränderungen waren mit einem höheren Rüben- und Rohzuckerertrag und einer verbesserten Wasserausnutzung verknüpft. Dabei festgestellte nur geringere Effekte bei der Weißzuckerausbeute können möglicherweise durch verminderte Wirkstoffaufwandmengen ausgeglichen werden.

Tabelle 5. Wirkstoffeinfluß auf das Rübe-Blatt-Verhältnis, den Rüben- und Zuckerertrag und die Wasserausnutzung (nach Bergmann)¹

| Bestimmungsgröße | Varianten | | |
|--|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| | ohne W. | mit W. [7,5 kg/ha] | mit W. [2,5 kg/ha] |
| Rübe-Blatt-Verhältnis | (0,73 : 1) 100 | 148,0 (++++) | 127,9 (+) |
| Rüben-ertrag [dt/ha] | (784 dt =) 100 | 116,3 (++++) | 115,8 (+) |
| Rohzuckerertrag [dt/ha] | (83,6 dt =) 100 | 114,7 (++++) | 116,0 (+) |
| Weißzuckerertrag [dt/ha] | (61,4 dt =) 100 | 109,1 (+) | 114,8 (+) |
| Wasserausnutzung [kg R.-Zucker/mm · ha] | (15,5 kg =) 100 | 115,1 (++++) | 117,4 (+) |

¹ Feldversuche; 4jährige Untersuchungen mit der hohen Wirkstoff- (W.) Dosis; 1jährige Untersuchungen mit der verminderten Wirkstoff-Aufwandmenge (zur vorläufigen Trendbewertung). (+++): s. Tab. 4 (+ Δ x)

4. Zusammenfassung

Im Rahmen einer Systembetrachtung der Dynamik des Wasserversorgungszustandes der Pflanzen in Abhängigkeit von dem Wasserpotentialgefälle Boden – Pflanze – Atmosphäre werden Kriterien für eine pflanzenbauliche Beurteilung sowie die möglichen Auswirkungen auf die Ertragsbildung dargestellt. Hierauf aufbauend werden Lösungswege und Ergebnisse über die exogene Verbesserung der Wasserbereitstellungsleistung und die Erhöhung der Durchwurzelungsintensität im Unterboden zur Vergrößerung der Wasserausschöpfung sowie die rationelle Bemessung von Zusatzwassergaben aufgeführt. In dem anschließenden Teil werden endogene Möglichkeiten zur Verbesserung der Wasserausnutzung über die Züchtungsforschung sowie die Anwendung von wasserstatusstabilisierenden Phytoeffektoren erörtert und durch ausgewählte Ergebnisse bei Ethanolaminoapplikation belegt.

5. Schrifttum

- Bergmann, H., H. Eckert, K. Kachel und D. Roth: Der Ethanolamin-Einfluß auf den Korn-
ertrag von Sommergerste bei unterschiedlichen klimatischen Wasserbilanzen. Archiv
Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde (Berlin) (im Druck).
- Grebner, H.: Untersuchungen über den Wasserhaushalt verschiedener dürreresistenter Som-
mergetreidesorten. Z. für Acker- und Pflanzenbau [Berlin (West), Hamburg] **119** (1964)
138–148.
- Roth, D., D. Krumbiegel und K. Weise: Nomogramme zur Abschätzung des Zusatzwasser-
bedarfes für die Beregnung aus der klimatischen Wasserbilanz und dem pflanzenverfü-
gbaren Bodenfeuchtevorrat bei unterschiedlicher Sicherheit in der Wasserbereitstellung.
Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde (Berlin) **25** (1982) 137–150.
- Roth, R., D. Roth und W. Weber: Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Wasser-
versorgung auf den Ertrag von Silomais. Archiv Acker- und Pflanzenbau und Boden-
kunde (Berlin) **26** (1982) 605–614.
- Werner, D.: Feuchtedynamik einer Löß-Fahlerde und Gefügemelioration. Archiv Acker- und
Pflanzenbau und Bodenkunde (Berlin) **24** (1980) 695–708.

Prof. Dr. sc. Klaus Schwarz
Dr. sc. Hans Bergmann
Prof. Dr. sc. Dieter Roth
Dr. sc. Dietrich Werner
Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg
Bereich Jena der Akademie
der Landwirtschaftswissenschaften der DDR
DDR - 6900 J e n a
Naumburger Straße 98 a