

tion dieser Leistungsparameter sind derzeit ungenügend und beschränken sich auf Parallelschaltung von Pumpaggregaten.

Dieser Widerspruch führt zu einer schlechten Auslastung der installierten Leistung in den Pumpstationen und zu hohen Anpassungsverlusten. Eine deutliche Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlagen wäre durch den Einsatz von drehzahleregelten Elektromotoren zu erreichen. Damit verbunden ist allerdings das Problem der automatischen Regelung der Drehzahl der Elektromotoren in Abhängigkeit von unterschiedlichen Forderungen an Volumenstrom und Druck für determinierte Berechnungssituationen.

Gleichzeitig zeigen die Analysen vor allem Reserven in der hydraulisch optimalen Gestaltung und konstruktiven Auslegung des Druckrohrsystems. Perspektivisch muß neben den Investitionskosten für die Erstellung des Druckrohrsystems die energetisch optimale Nutzung für den Betrieb der Berechnungsanlage gleichermaßen berücksichtigt werden.

Grundsätzliche Überlegungen müssen verstärkt zur Senkung des notwendigen Betriebs-

drucks der Berechnungseinrichtungen angestellt werden. Bereits geringfügige Reduzierungen des notwendigen Betriebsdrucks am Eingang der Berechnungseinrichtungen würden Energieeinsparungen ermöglichen. Die dieser Forderung gegenüberstehende Abnahme der Wurfweiten und Verschlechterung der Verteilungsqualität der Regner sind weitere Ansatzpunkte besonders zur technischen Optimierung gegenwärtig eingesetzter konstruktiver Lösungen zur Beregnung.

## 6. Zusammenfassung

Die Lokalisierung und Quantifizierung der energetischen Verluste in Beregnungsanlagen ist die unmittelbare Voraussetzung für die Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen zur technischen Gestaltung von Beregnungsanlagen. Die Vielzahl der Einflußfaktoren fordert stets eine komplexe Betrachtung der gesamten Anlage.

Nur auf der Basis einer technisch-technologischen Analyse und unter Berücksichtigung geltender hydraulischer Gesetzmäßigkeiten lassen sich konstruktive Veränderungen zur

Minimierung des Energieeinsatzes vornehmen.

Die Definition von Wirkungsgraden dient der energetischen Charakterisierung der eingesetzten technischen Lösung. Die Allgemeingültigkeit dieser Wirkungsgrade ermöglicht einen Vergleich verschiedener Beregnungsanlagen und stellt somit einen Schritt zur Lösung energiewirtschaftlicher Aufgaben dar.

## Literatur

- [1] Rößner, H.: Zur Energieplanung im Landwirtschaftsbetrieb. Der Elektro-Praktiker (1978) H. 5, S. 171—173.
- [2] Frielinghaus, M.: Fortführung der energiewirtschaftlichen Prozeßanalysen zur Erfassung des Energieverbrauches in der Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft. Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Forschungsbericht 1979 (unveröffentlicht).
- [3] Queitsch, K.: Grafo-analytisches Verfahren zum Bestimmen des Arbeitspunktes von Beregnungsanlagen unter Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis. agrartechnik 30 (1980) H. 3, S. 130—133.
- [4] Wechmann, A.: Hydraulik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1966. A 2903

# Grundlagen der Gestaltung von kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen

Dozent Dr. H. Schinke, KDT  
Dr.-Ing. D. Voigt, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR



## Verwendete Formelzeichen

a, c	empirische Konstanten
$A_B$	beregnete Fläche
b	Wirkungsbreite der Beregnungsmaschine
h	Niederschlagshöhe, Regengabe
$h_{zul}$	zulässige Niederschlagshöhe
i	Niederschlagsintensität
$i_{zul}$	zulässige Niederschlagsintensität
I	Einsickergeschwindigkeit des Wassers in den Boden, Infiltrationsintensität
l	Wirkungslänge der Beregnungsmaschine
t	Beregnungszeit
$t_{zul}$	zulässige Beregnungszeit
v	Vorschubgeschwindigkeit
V	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom

## 1. Einleitung

Im Verlauf der Entwicklung der Beregnungstechnik wurde eine Vielzahl von Lösungen geschaffen, die das Ziel verfolgen, den Beregnungsprozeß technisch, technologisch und ökonomisch ständig zu verbessern.

Wesentliche technische Faktoren zur Steigerung der Effektivität der Beregnung sind

- Erhöhung der Arbeitsproduktivität in Beregnungsanlagen durch Hebung des Mechanisierungs- und Automatisierungsgrades
- Erhöhung des Volumenstromes in Beregnungsanlagen bei Verbesserung der Flüssigkeitsverteilung und strenger Beachtung der Material-, Energie- und Kostenlimits.

Vor allem bei der Durchsetzung des zweiten Faktors sind einige Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu beachten, auf die im Beitrag eingegangen wird.

Im Sinne der formulierten Zielstellung wurden Beregnungsmaschinen entwickelt, die die Beregnungsflüssigkeit in kontinuierlich geradeaus verlaufender Bewegung verteilen. Beispiele dafür sind (Bild 1):

- Zweikonsole-Beregnungsmaschine DDA-100 M (UdSSR)
- vielstützige Beregnungsmaschine ZIMMATIC (USA)
- Schlauch-Beregnungsmaschine PP 67 (ČSSR).

Während der Beregnung wird die Flüssigkeit diesen Beregnungsmaschinen entweder über offene Wassergräben oder über flexible Druckschläuche zugeführt. Die Entnahme aus offenen Gräben erfordert eine mit der Beregnungsmaschine verbundene Pumpe. Bei der Zuführung mit Hilfe eines flexiblen Schlauches wird die zentrale Pumpstation der Beregnungsanlage für die Flüssigkeitsförderung genutzt. In den Beregnungsmaschinen wird die Flüssigkeit den Regnern zugeleitet, die sie über die Beregnungsfläche verteilen.

Durch den Einsatz von kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen wird der arbeitsaufwendige Prozeß des Umsetzens der Regner und Flügelleitungen rationalisiert und wesentlich vereinfacht. Gegenüber der mit zyklischen Umsetzungen verbundenen Beregnungstechnik konnten dadurch die Arbeitsproduktivität entscheidend gesteigert und die Arbeitsbedingungen spürbar verbessert werden.

Die Gleichmäßigkeit der Niederschlagsverteilung

läßt sich durch Regner mit kontinuierlichem Vorschub im Vergleich mit positionsweise arbeitenden Regnern ebenfalls erhöhen [1, 2].

## 2. Grundlagen und Anwendung der Gestaltungsmethode

### 2.1. Quantität und Qualität des künstlichen Regens

Ein wichtiges quantitatives Merkmal des künstlichen Regens ist die Niederschlagshöhe oder Regengabe (meistens je Regneraufstellung oder Maschinendurchgang), deren Ein- oder Mehrfaches die Beregnungsnorm (meistens je Beregnungsturnus) ergibt. Beregnungsmaschinen müssen es ermöglichen, die vorgesehene Beregnungsnorm in einer bestimmten Zeit auf die Beregnungsfläche auszubringen. Unter den Klima- und Bodenbedingungen der DDR werden Beregnungsnormen von 20 bis 30 mm verabreicht. Dies entspricht im Mittel der zu beregnenden Bodenarten einer nutzbaren Feldkapazität von 10 bis 20 % und ermöglicht es, bei Wahl eines geeigneten Beregnungsturnus (im Normalfall 8 bis 10 Tage) die nutzbare Feldkapazität in dem für das Pflanzenwachstum günstigen Bereich von 40 bis 60 % zu steuern. Das Überschreiten dieses Bereichs führt zu Gasmangel, das Unterschreiten zu Wassermangel in der Wurzelzone mit den in beiden Fällen auftretenden Wachstums- und Ertragsminderungen der Pflanzen. Durch Überbewässerung kann außerdem der Wasservorratswert (ent-

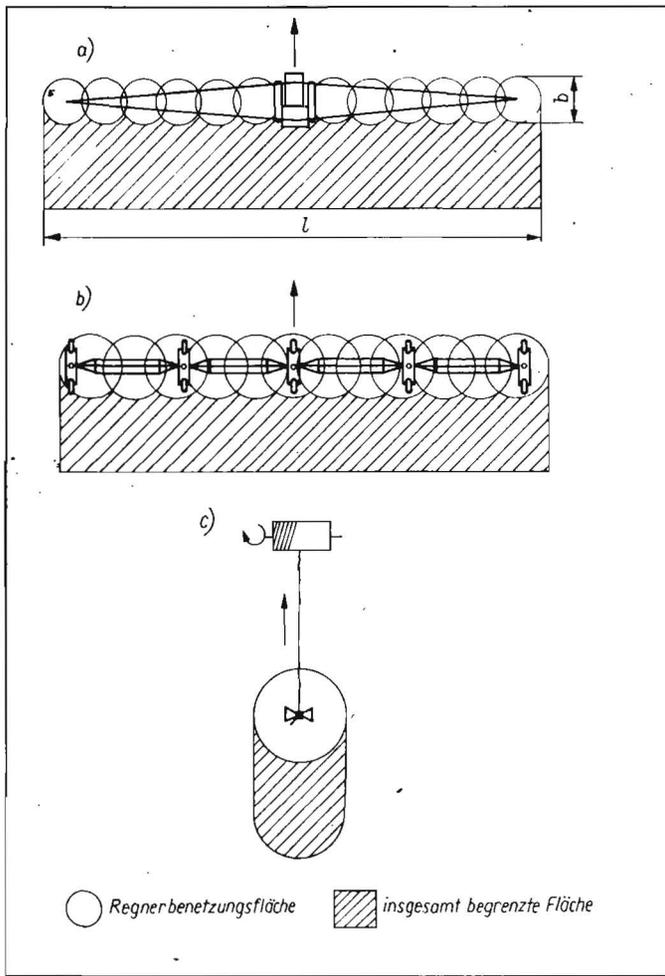


Bild 1. Prinzipdarstellung von Maschinenbeispielen für die Beregnung bei kontinuierlich geradeaus verlaufender Bewegung:  
 a) Zweikonsol-Beregnungsmaschine DDA-100 M    b) vielstützige Beregnungsmaschine ZIMMATIC    c) Schlauch-Beregnungsmaschine PP 67

spricht einer nutzbaren Feldkapazität von 100%) überschritten und die unproduktive Versickerung des Wassers in den Untergrund verursacht werden:

Wesentliche Qualitätsmerkmale des künstlichen Regens sind

— Gleichmäßigkeit der Niederschlagsverteilung

— Niederschlagsintensität

— Größe der Regentropfen.

Die Gleichmäßigkeit der Niederschlagsverteilung hängt, wie bereits erwähnt wurde, in hohem Maß vom Beregnungsverfahren ab. Darauf kann hier nicht näher eingegangen werden, jedoch sei in Erinnerung gebracht, daß als Maß für die Gleichmäßigkeit der Niederschlagsverteilung weltweit der Gleichförmigkeitskoeffizient nach Christiansen (CU-Koeffizient) angewendet wird. Diese statistische Maßzahl läßt bei Werten  $CU > 70 \dots 80\%$  auf eine ausreichende bis gute Niederschlagsverteilung schließen.

Niederschlagsintensität und Tropfengröße des künstlichen Regens müssen, damit meliorative Vorteilswirkungen entstehen, den zu beregnenden Boden- und Pflanzenverhältnissen angepaßt werden. Tropfengrößen von 0,5 bis 3,5 mm und einem Mittelwert (Zentralwert) von rd. 2 mm Durchmesser werden als günstig angesehen.

## 2.2. Technische Grundgleichung der Beregnung

Den Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom als Parameter des hydraulischen

Leistungsvermögens einer Beregnungsanlage und der Niederschlagsintensität bringt die technische Grundgleichung der Beregnung zum Ausdruck [3]:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{A_B h}{t} = A_B i \quad (1)$$

Die Erhöhung des Volumenstromes  $\dot{V}$  im Sinne der oben entwickelten Zielstellung führt gemäß Gl. (1) zur Vergrößerung der Beregnungsfläche  $A_B$  und/oder der Niederschlagsintensität  $i$ . Beide Größen lassen sich aber nicht beliebig erhöhen. So ist die Beregnungsfläche  $A_B$  durch die konstruktiv-technischen Parameter Wirkungslänge  $l$  und Wirkungsbreite  $b$  der Beregnungsmaschine eindeutig bestimmt (Bild 1). Unter der Beregnungsfläche  $A_B$  wird dabei jene Fläche verstanden, die von der Beregnungsmaschine gleichzeitig, also gleichsam in einem kurzen, dem Stillstand der Maschine entsprechenden Augenblick beregnet wird.

## 2.3. Niederschlagsintensität des künstlichen Regens und Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens

Die zulässige Niederschlagsintensität des künstlichen Regens  $i$  als Ausdruck für das Wasservolumen je Flächen- und Zeiteinheit oder, anders formuliert, als Ausdruck für die Geschwindigkeit der Wasseraufbringung hängt von der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens ab. Die Effektivität der Beregnung ist offensichtlich dann am größten, wenn die Einsickergeschwindigkeit des Wassers in den

Boden I von der Niederschlagsintensität des künstlichen Regens  $i$  maximal ausgenutzt wird. Als Grenzwert der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens gilt der Beginn der Bildung von Wasserpfützen und besonders von Wasserabfluß auf der Bodenoberfläche. Vom Grenzwert der Einsickergeschwindigkeit des Wassers in den Boden wird der Wert der zulässigen Niederschlagsintensität für den Boden  $i_{zul}$  abgeleitet.

Die Klärung der Beziehungen zwischen der Niederschlagsintensität des Regens und der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens für eine bestimmte Regengabe kann somit als Schlüssel zur effektiven Anwendung der Beregnungstechnik angesehen werden.

Die Infiltration des Regenwassers in den Boden erfolgt unter der Wirkung der Bodensaugkraft und der Erdschwerkraft und stellt eine sich mit der Zeit verlangsamende Bewegung dar [4], die sich näherungsweise durch folgende Potenzfunktion beschreiben läßt:

$$I = at^c \quad (2)$$

Zur effektiven Anwendung der Beregnungstechnik, vor allem der Beregnungsmaschinen mit kontinuierlichem Vorschub, ist die Kenntnis der Infiltrationseigenschaften der Beregnungsböden notwendig. Auf dieses Erfordernis wird in der ausländischen Fachliteratur seit längerem hingewiesen. Über vorliegende Ergebnisse wird aus der UdSSR [4, 5] und aus den USA [6] berichtet (Tafel 1, Bild 2). Für die Beregnungsböden der DDR konnten entsprechende Angaben nicht ermittelt werden.

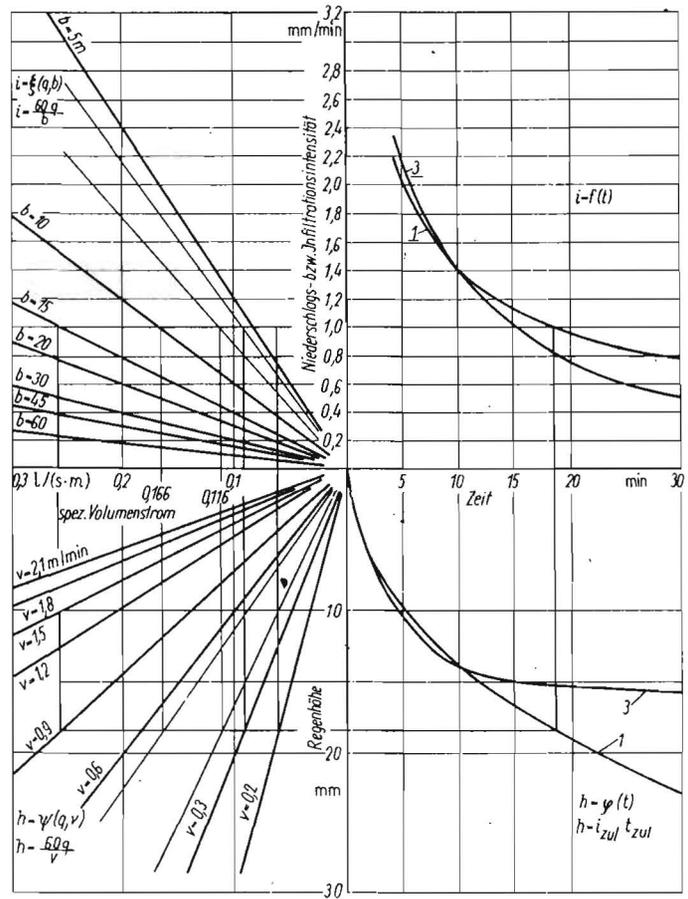


Bild 3. Nomogramm zum Bestimmen grundlegender Parameter von Beregnungsmaschinen mit kontinuierlich geradeaus verlaufender Bewegung

Tafel 1. Infiltrationseigenschaften verschiedener Beregnungsböden (s. a. Bild 2)

Nr.	Infiltrationsgleichung	Einheit	Erklärung	Quellenangabe
1	$I = 4,89 t^{-0,545}$	mm/min	Hüllkurve für verschiedene typische Beregnungsböden der UdSSR	[5]
2	$I = 1,065 t^{-0,279}$	mm/min	Lößboden (alter Ackerboden) Nähe Taschkent, Usbek. SSR	[4]
3	$I = 10,61 t^{-0,863}$	mm/min	Lößboden (Luzernfeld) Nähe Taschkent, Usbek. SSR	[4]
4	$I = 5,78 t^{-0,69}$	mm/min	Pullmann-Böden u. ä., USA	[6]
5	$I = 4,62 t^{-0,615}$	mm/min	Gruppe der 0,5-Infiltrationsböden, USA	[6]
6	$I = 0,704 t^{-0,284}$	mm/min	Gruppe der 0,3-Infiltrationsböden, USA	[6]

Im Hinblick auf den zunehmenden Einsatz kontinuierlich fahrender Beregnungsmaschinen in der Landwirtschaft der DDR ist es jedoch unerlässlich, die Infiltrationseigenschaften der Beregnungsböden zu erkunden.

#### 2.4. Technische Gestaltungsgrößen für kontinuierlich geradeaus fahrende Beregnungsmaschinen

Für die technische Gestaltung von kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen sind folgende Größen wichtig:

- Volumenstrom
- Wirkungslänge
- Wirkungsbreite
- Vorschubgeschwindigkeit
- Niederschlagshöhe (je Maschinendurchgang)
- Niederschlagsintensität.

Auf die Beziehungen zwischen diesen maschinentechnischen Größen und der Einsickerungsgeschwindigkeit des Wassers in den Boden hat Guber [5] hingewiesen und ein Verfahren für ihre zweckmäßige Koordinierung vorgeschlagen.

Gl. (1) läßt sich auch wie folgt schreiben:

$$A_B = \frac{V \cdot t}{h}$$

Unter Verwendung von  $A_B = l \cdot b$  und  $v = b/t$  lassen sich aus Gl. (1) die Größen  $v$ ,  $l$ ,  $\dot{V}$ ,  $h$  und  $i$  durch einfache Umstellung explizit darstellen.

#### 2.5. Grundmerkmal für kontinuierlich geradeaus fahrende Beregnungsmaschinen

Durch Verbindung der expliziten Ausdrücke für  $v$  und  $i$  läßt sich  $h$  wie folgt ableiten:

$$h = \frac{i \cdot b}{v} \quad (3)$$

Daraus ist das Grundmerkmal für kontinuierlich geradeaus fahrende Beregnungsmaschinen erkennbar, das sich folgendermaßen formulieren läßt:

*Bei kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen ist die Regengabe (je Maschinendurchgang) direkt proportional der Niederschlagsintensität und der Wirkungsbreite des künstlichen Regens sowie umgekehrt proportional der Vorschubgeschwindigkeit.*

Durch Variation der in Gl. (3) enthaltenen Größen lassen sich solche Werte finden, bei denen die Produktivität von kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen ein Maximum wird.

In der Praxis wird die Höhe der Regengabe durch die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens begrenzt, so daß folgende Bedingung gilt:

$$h \leq h_{zul} = i_{zul} \cdot t_{zul} \quad (4)$$

#### 2.6. Nomogrammdarstellung der technischen Gestaltungsgrößen

Im Zuge der konkreten Gestaltung der Beregnungsmaschinen lassen sich die folgenden interessierenden Abhängigkeiten grafisch darstellen:

- $i = f(t)$
- $h = \varphi(t)$
- $h = \psi(q, v)$
- $i = \xi(q, b)$ .

Zur Vereinfachung wurde dabei der Begriff des spezifischen Volumenstromes  $q = \dot{V}/l$  eingeführt. Da in o. g. Abhängigkeiten einige Parameter wiederholt auftreten, ist eine Nomogrammdarstellung zweckmäßig, die den Zusammenhang der technischen Gestaltungsgrößen  $i$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $q$ ,  $v$  und  $b$  in übersichtlicher Weise zum Ausdruck bringt (Bild 3). In dem dargestellten Beispiel sind die Infiltrationscharakteristika der Böden 1 und 3, die sich

durch den Infiltrationsverlauf über der Zeit merklich unterscheiden, vergleichsweise enthalten.

#### 2.7. Gestaltungsbeispiel

Soll eine Beregnungsmaschine einen Boden der Infiltrationscharakteristik 1 mit der Niederschlagsintensität  $i = 1 \text{ mm/min}$  beregnen, so steht für die pfützen- und abflußlose Beregnung die Zeit  $t \approx 18 \text{ min}$  zur Verfügung, die bei voller Ausnutzung eine Regenhöhe  $h \approx 18 \text{ mm}$  verursacht. Bei minimaler Vorschubgeschwindigkeit der Beregnungsmaschine  $v \approx 0,3 \text{ m/min}$  muß ihre Wirkungsbreite  $b \approx 5 \text{ m}$  sein, wobei ein spezifischer Volumenstrom  $q \approx 0,1 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  erreicht wird. Höhere Vorschubgeschwindigkeiten und damit Leistungssteigerungen der Beregnungsmaschine werden möglich, wenn der spezifische Volumenstrom  $q$  und entsprechend auch die Wirkungsbreite  $b$  vergrößert wird (z. B.  $v \approx 0,9 \text{ m/min}$ ,  $b \approx 15 \text{ m}$ ,  $q \approx 0,255 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ ).

Spezifische Volumenströme  $q_1 = 0,116 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  ( $\Delta \dot{V} = 70 \text{ l/s}$  für  $600 \text{ m}$  Arbeitsbreite) und  $q_2 = 0,166 \text{ l/s} \cdot \text{m}$  ( $\Delta \dot{V} = 100 \text{ l/s}$  für  $600 \text{ m}$  Arbeitsbreite) ermöglichen unter Zugrundelegung des gleichen Bodens und der gleichen Niederschlagsintensität Vorschubgeschwindigkeiten der Beregnungsmaschine  $v_1 \approx 0,35 \text{ m/min}$  bzw.  $v_2 \approx 0,55 \text{ m/min}$  bei Wirkungsbreiten  $b_1 \approx 6 \text{ m}$  bzw.  $b_2 \approx 10 \text{ m}$ .

Infolge seiner schlechteren Infiltrationscharakteristik ermöglicht der Boden 3 bei gleicher Niederschlagsintensität nur eine kürzere Beregnungszeit, in der eine geringere Regenhöhe ausgebracht wird. Bei gleichbleibenden Werten für  $q$  und  $b$  muß in diesem Fall die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend erhöht werden.

#### 3. Zusammenfassung

Die Effektivität von kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen läßt sich durch Steigerung des Volumenstromes erhöhen, wenn die Niederschlagsintensität des künstlichen Regens auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens abgestimmt wird. Dazu ist die Kenntnis der Infiltrationseigenschaften des Beregnungsbodens erforderlich. Auf der Grundlage gegebener Infiltrationscharakteristika von Beregnungsböden wird eine Methode zur Bestimmung wichtiger technischer Gestaltungsgrößen von kontinuierlich geradeaus fahrenden Beregnungsmaschinen entwickelt und anhand eines Gestaltungsbeispiels erläutert.

#### Literatur

- [1] Bittinger, M. W.; Longenbaugh, R. A.: Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. Transactions ASAE, St. Jos., Mich., 5 (1962) H. 1, S. 26—30.
- [2] Hummel, H. G.: Niederschlagsverteilung von Regnern mit geradliniger oder kreisförmiger kontinuierlicher Vorwärtsbewegung. agrartechnik 25 (1975) H. 10, S. 502—504.
- [3] Schinke, H.; Voigt, D.; Kreienbrink, H. J.; Streuber, D.: Zur Frage der Niederschlagsintensität des künstlichen Regens. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk., Berlin 24 (1980) H. 3, S. 181—189.
- [4] Tscherkassow, A. A.: Melioration und landwirtschaftliche Wasserversorgung. Berlin: Dt. Bauernverlag 1955.
- [5] Guber, K. V.: Nekotorye voprosy uveličenija proizvoditel'nosti doždeval'nych mašin (Einige Fragen der Erhöhung der Arbeitsproduktivität von Beregnungsmaschinen). Traktory i sel'chozmas. (1974) H. 10, S. 19—21.
- [6] Dillon, R. C.; Hiler, E. H.; Vittetoe, G.: Centripivot sprinkler design based on intake characteristics. Transactions ASAE, St. Jos., Mich., 15 (1972) H. 4, S. 996—1001.

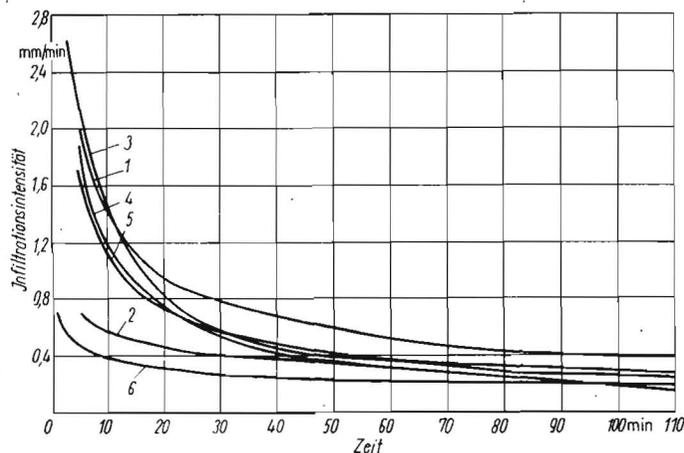


Bild 2 Infiltrationseigenschaften verschiedener Beregnungsböden (nach internationalen Angaben, s. Tafel 1)