

## Niederschlagsverteilung von Regnern mit geradliniger oder kreisförmiger kontinuierlicher Vorwärtsbewegung

Prof. Dr.-Ing. habil. H.-G. Hummel, KDT, Universität Rostock, Sektion Meliorationswesen und Pflanzenproduktion

### Zwei Lösungswege eines neuen Grundprinzips

Der Beregnung kommt bei der weiteren sozialistischen Intensivierung der Pflanzenproduktion eine zunehmend Bedeutung im Hinblick auf die Absicherung der steigenden Wasseransprüche der Intensivkulturen zu. Insbesondere sind solche Beregnungsverfahren anzuwenden, die eine hohe Arbeitsproduktivität garantieren und einen hohen volks- und betriebswirtschaftlichen Nutzen sicherstellen. Durch komplexe Mechanisierung und Anwendung der Automatisierung läßt sich die Arbeitsproduktivität der Beregnung erheblich steigern.

Zur optimalen Erfüllung dieser Aufgabe sind neben ortsfesten Beregnungsanlagen besonders solche Verfahren und Geräte geeignet, bei denen ein Einzelregner oder eine Regnerleitung sich kontinuierlich über die Beregnungsfläche vorwärtsbewegt und dabei gleichzeitig das Wasser verteilt. Im Gegensatz zu den bekannten Beregnungsverfahren mit zeitlicher Trennung von Vorschub- und Beregnungstakt (wie z. B. bei den rollbaren Regnerleitungen) erlauben die vorgenannten Verfahren eine wartungsarme Beregnung im 24-h-Betrieb. Neben arbeitswirtschaftlichen Vorteilen ergeben sich dadurch Einsparungen in der Dimensionierung von Pumpen und Rohrleitungen und eine bessere Ausnutzung des zur Verfügung gestellten Wasserdargebots der fließenden Welle.

Zur Realisierung des Grundprinzips „Beregnung während des kontinuierlichen Vorschubs“ bieten sich z. Z. zwei Lösungswege an. Es sind dies die geradlinige und die kreisförmige Vorwärtsbewegung. Zu beiden Lösungswegen sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von mehr oder weniger geeigneten Gerätekonstruktionen entwickelt worden. Für die spezifischen Einsatzbedingungen in der DDR besonders geeignet ist aus der Gruppe „geradlinige Vorwärtsbewegung“ die Streifenberegnung mit Schlauchberegnungsanlagen (z. B. die Anlagentypen PP 67, PZ 90 oder SBZA aus der ČSSR) und aus der Gruppe „kreisförmige Vorwärtsbewegung“ die bekannte sowjetische Beregnungsanlage „Fregat“.

Bei der Streifenberegnung wird ein vorher ausgelegter, etwa 250 m langer PE-Schlauch mit Hilfe eines Hydromotors kontinuierlich auf eine Schlauchtrommel aufgewickelt. Der am Schlauchende angeschlossene Drehstrahlregner wird dabei geradlinig über das Feld in Richtung Schlauchtrommel gezogen, wobei er einen schmalen Streifen (daher auch die Bezeichnung „Streifenberegnung“) von etwa 250 m × 50 m beregnet. Anschließend wird die Maschine um das Vorschubmaß von 50 m versetzt. Insgesamt zeichnet sich die Streifenberegnung durch eine hohe Arbeitsproduktivität aus, die zwischen der von Kreisberegnungsanlagen und der von rollbaren Regnerleitungen liegt.

Von besonderer Bedeutung für die Qualität und Effektivität eines Beregnungsverfahrens ist die Verteilung des Niederschlags bzw. die Gleichmäßigkeit des Niederschlags auf der Beregnungsfläche. Die Aufgabe des Projektanten ist es, eine gute Gleichmäßigkeit durch Festlegung geeigneter Regnerverbände zu erreichen. Erschwert wird diese Aufgabe durch die Tatsache, daß die in der Feldberegnung fast ausschließlich zum Einsatz gelangenden Drehstrahlregner kreisförmige Auftreffflächen ergeben. Als Folge treten bei der Anordnung der Regner im Verband zwangsläufig unterschiedlich breite Überschneidungen der Wurfbereiche auf.

Im Gegensatz zu diesen in [1] für das Verfahren „Beregnung im Stand“ ausführlich beschriebenen Einflüssen und deren Auswirkungen bringt die „Beregnung während der kontinuierlichen Vorwärtsbewegung“ völlig neue Aspekte für die Erzielung einer gleichmäßigen Niederschlagsverteilung.

Am Beispiel von Drehstrahlregnern mit rechteckigem, ellipsenförmigem und dreieckigem Niederschlagsverteilungsdiagramm nach Bild 1 (nachfolgend vereinfachend als Ausgangsdiagramm bezeichnet, da nur für die Beregnung im Stand zutreffend) sollen hier die bei kontinuierlicher Vorwärtsbewegung auftretenden Besonderheiten dargelegt werden. Dabei können die rechteckige und die dreieckige Form der Niederschlagsverteilung als Grenzfälle der in der Praxis zur Anwendung kommenden Regnertypen aufgefaßt werden, welche die Ellipsenform und viele weitere Verteilungsdiagrammformen entsprechend den Erläuterungen in [1] in sich einschließen.

### Kontinuierliche Wasserverteilung während des geradlinigen Vorschubs

Für den Fall eines Drehstrahlregners mit kontinuierlicher Wasserverteilung während des mit der konstanten Geschwindigkeit  $v$  (Bild 2) erfolgenden geradlinigen Vorschubs erhält man an

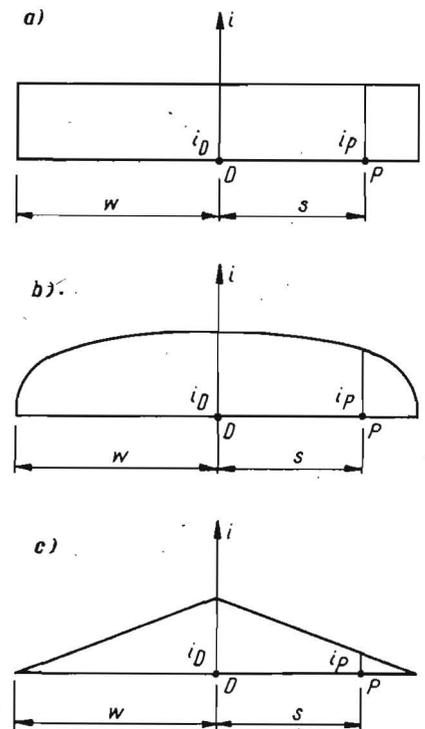


Bild 1. Schemata der Niederschlagsverteilung von Drehstrahlregnern bei „Beregnung im Stand“;

a) rechteckiges Verteilungsdiagramm

$$i_p = i_D$$

b) elliptisches Verteilungsdiagramm

$$i_p = \frac{i_D}{w} (w^2 - s^2)^{\frac{1}{2}}$$

c) dreieckförmiges Verteilungsdiagramm

$$i_p = \frac{i_D}{w} (w - s)$$

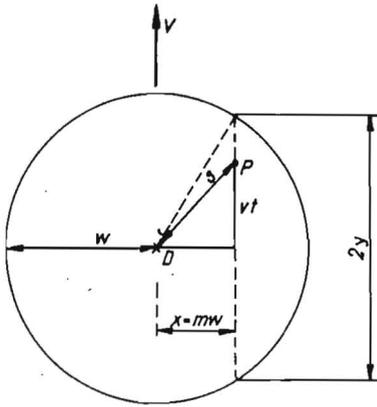


Bild 2. Drehstrahlregner mit kontinuierlicher Wasserverteilung während des geradlinigen Vorschubs mit der konstanten Geschwindigkeit v

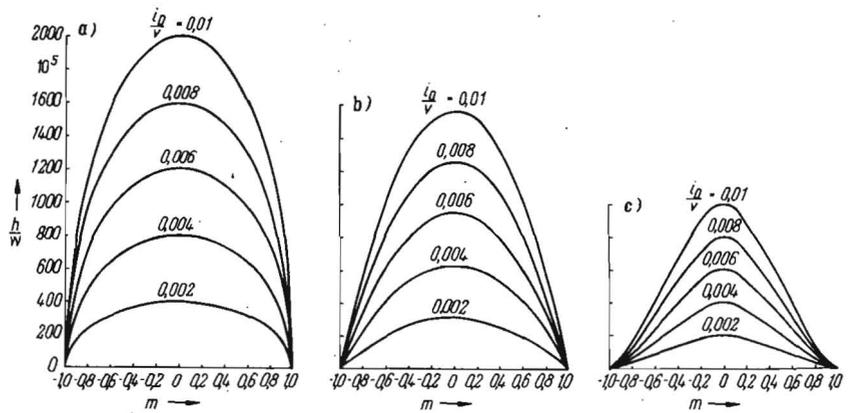


Bild 3. Verteilung der Niederschlagshöhe für verschiedene Regnerdiagramme bei geradliniger Vorwärtsbewegung;  
a) rechteckiges Regnerdiagramm (Gl. 2)  
b) elliptisches Regnerdiagramm (Gl. 4)  
c) dreieckiges Regnerdiagramm (Gl. 5)

einem beliebigen Punkt P der Auftreffkreisfläche die augenblickliche Niederschlagsdichte  $i_p$ . Bei Zugrundelegung eines Regners mit einem rechteckigen Verteilungsdiagramm (Bild 1 a) ist der Betrag von  $i_p$  gleich der augenblicklichen Niederschlagsdichte  $i_D$  unmittelbar an der Düse D des Drehstrahlregners. Infolge der geradlinigen und kontinuierlichen Vorwärtsbewegung des Regners summieren sich am Punkt P die augenblicklichen Niederschlagsdichten, die entlang der zum Geschwindigkeitsvektor v parallelen Kreissehne durch P von der Länge 2y auftreten, zur Niederschlagshöhe h. Da der Regner bei seiner geradlinigen Vorwärtsbewegung für die Überquerung der halben Sehnenlänge y die Zeit  $T = y/v$  benötigt, ergibt sich für die Niederschlagshöhe

$$h = 2 \int_0^T i_p dt = 2 i_p T \quad (1)$$

Nach Einsetzen von  $T = y/v$  mit  $y = (w^2 - m^2 w^2)^{1/2}$  (s. Bild 2) und von  $i_p = i_D$  erhält man für das rechteckige Verteilungsdiagramm

$$h = \frac{2 i_D w}{v} (1 - m^2)^{1/2}$$

bzw. in dimensionsloser Schreibweise

$$\frac{h}{w} = \frac{2 i_D}{v} (1 - m^2)^{1/2} \quad (2)$$

Analog hierzu lassen sich auch für Drehstrahlregner mit elliptischem und mit dreieckigem Verteilungsdiagramm die Niederschlagshöhen h in geschlossener Form ermitteln.

Nach Bittinger/Longenbaugh [2] ergibt sich für einen Regner mit elliptischem Verteilungsdiagramm (Bild 1 b) aus

$$i_p = \frac{i_D}{w} (w^2 - s^2)^{1/2}$$

$$s = (m^2 w^2 + y^2)^{1/2}$$

$$\text{und } y = vt$$

die Beziehung

$$i_p = \frac{i_D v}{w} \left( \frac{w^2 - m^2 w^2}{v^2} - t^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Nach Einsetzen in das Integral (1) und dessen Auflösung erhält man für das elliptische Verteilungsdiagramm

$$\frac{h}{w} = \frac{\pi i_D}{2 v} (1 - m^2)^{-1} \quad (4)$$

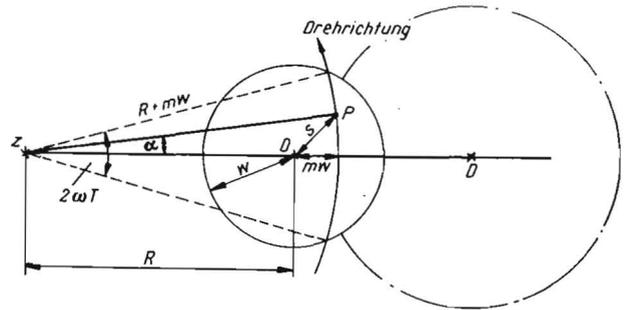


Bild 4. Drehstrahlregner D mit kontinuierlicher Wasserverteilung während des kreisenden Vorschubs mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  im Abstand R vom zentralen Drehpunkt Z

Schließlich ergibt sich nach [2] für ein dreieckiges Verteilungsdiagramm (Bild 1 c) unter Verwendung von

$$i_p = \frac{i_D}{w} (w - s) \quad \text{bzw.}$$

$$i_p = \frac{i_D}{w} [w - (m^2 w^2 + v^2 t^2)^{1/2}]$$

die Niederschlagshöhe in dimensionsloser Schreibweise zu

$$\frac{h}{w} = \frac{i_D}{v} \left[ (1 - m^2)^{1/2} - m^2 \ln \frac{(1 - m^2)^{1/2} + 1}{m} \right] \quad (5)$$

In Auswertung der Gleichungen (2), (4) und (5) ist im Bild 3 die Verteilung der relativen Niederschlagshöhe h/w in Abhängigkeit von m (Verhältnis der Abszisse x des Punktes P zur Wurfweite w des Drehstrahlregners) für verschiedene Werte von  $i_D/v$  dargestellt.

### Kontinuierliche Wasserverteilung während des kreisenden Vorschubs

Grundsätzlich lassen sich vorherliegende Überlegungen auch auf Drehstrahlregner anwenden, die sich während der kontinuierlichen Wasserverteilung (Bild 4) mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  im Abstand R um einen zentralen Drehpunkt Z kreisförmig vorwärtsbewegen [2] [3]. Wegen des vergleichsweise höheren mathematischen Aufwands sei hier nur der für die Zwecke der Praxis am meisten interessierende Fall eines Regners mit

dreieckigem Verteilungsdiagramm nach Bild 1 c vorgestellt.  
Aus der Beziehung des dreieckigen Verteilungsdiagramms

$$i_p = \frac{i_D}{w} (w - s)$$

und der aus Bild 4 mit Hilfe des Kosinussatzes abgeleiteten Größe s

$$s = [(R + mw)^2 - 2R(R + mw)\cos\alpha + R^2]^{1/2}$$

ergibt sich für die Niederschlagshöhe h nach Einsetzen in das Integral (1) der Ansatz

$$h = 2 i_D T - \frac{2 i_D T}{w} \int_0^T [(R + mw)^2 - 2R(R + mw)\cos\alpha + R^2]^{1/2} dt \quad (6)$$

Nach Substitution von

$$\alpha = \omega t; dt = da/\omega, n = R/w; k^2 = 4n(m+n)/(m+2n)^2$$

und einigen Umformungen gelangt man zu einem elliptischen Normalintegral 2. Gattung, dessen Lösung lautet:

$$h \frac{\omega}{2 i_D} = \omega T - 2(2n+m) \left[ E\left(K, \frac{\pi}{2}\right) - E\left(K, \frac{\pi}{2} - \frac{\omega T}{2}\right) \right] \quad (7)$$

Hierin läßt sich  $\omega T$  durch  $(1 - m^2)^{1/2} / (n + m)$  ersetzen.

Die komplexen Ausdrücke E als Funktion von K,  $\pi$  und  $\omega T$  sind in [4] tabellarisch dargestellt und können dort direkt abgelesen werden. Bild 5 zeigt die von Bittinger und Longenbaugh [2] vorgenommene graphische Auswertung von Gl. (7).

#### Diskussion der erhaltenen Ergebnisse

Die Gleichungen (1) bis (7) bzw. die zugehörigen Bilder 3 und 5 machen Aussagen über die Verteilung der Niederschlagshöhe h quer zur Vorschubrichtung ( $m = x/w = -1 \dots +1$ ) eines Einzelregners mit kontinuierlicher Wasserausbringung während der Vorwärtsbewegung. In Richtung der Vorwärtsbewegung, d.h. also senkrecht zur Bildebene der Bilder 3 und 5 findet keine Veränderung in der Verteilung der Niederschläge statt. Dies stellt gegenüber Berechnungsverfahren mit zeitlicher Trennung von Vorschub- und Beregnungstakt, bei denen sich die Niederschlagsverteilung sowohl in als auch quer zur Vorschubrichtung ständig verändert (Bild 6), einen entscheidenden qualitativen Vorzug dar. Weiterhin ist zu erkennen, daß eine Beregnung während der kontinuierlichen Vorwärtsbewegung des Regners zur Konzentration der Niederschlagshöhen längs der Regnerfahrspur (identisch mit dem Abszissenwert  $m = 0$  in den Bildern 3 und 5) führt. Der Betrag dieser Konzentrationsspitze wird vom Regnertyp bzw. dem zugehörigen Ausgangsdiagramm bestimmt und ist bei gleichen Ausgangswerten  $i_D$ , v und w für Regner mit dreieckigem Ausgangsdiagramm (Bild 3 c) geringer als für Regner mit rechteckigem Ausgangsdiagramm (Bild 3 a), obwohl gerade letztere bei Einsatz als Einzelregner und „Beregnung im Stand“ auf der kreisförmigen Auftrefffläche die ideale Niederschlagsgleichmäßigkeit (Bild 1 a) ergeben. Regner mit einem elliptischen Niederschlagsverteilungsdiagramm (Bild 3 b) nehmen diesbezüglich eine Mittelstellung ein.

Die Bilder 3 und 5 zeigen schließlich, daß auch bei kontinuierlicher Vorwärtsbewegung der Regner eine zufriedenstellende Niederschlagsgleichmäßigkeit ohne entsprechende seitliche Überschneidung der in Vorschubrichtung entstehenden Beregnungstreifen unmittelbar benachbart arbeitender Regner nicht zu erzielen ist. Dies gilt auch für den Grenzfall eines Regners mit rechteckigem Ausgangsdiagramm (Bilder 1 a bzw. 3 a). Die für eine gewählte Überschneidung mittels Superposition der zugehörigen Verteilungskurven zu entwickelnde Gesamtniederschlagsverteilungskurve aller parallel vorwärtsbewegter Regner soll dem Idealfall einer horizontalen Geraden so nahe wie möglich kommen. Voraussetzung hierfür sind somit Regner, deren auf kontinuierliche Vorwärtsbewegung bezogene Niederschlagsverteilungskurven lineare Anstiegs- und Abstiegsflanken aufweisen. Wie die Bilder 3 und 5 zeigen, entsprechen unter den möglichen Drehstrahlregnertypen solche mit dreieckigem Ausgangsdiagramm dieser Forderung am weitestgehenden. Der zugehörige günstigste

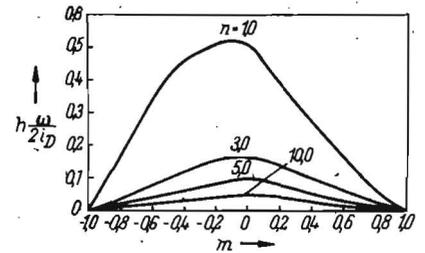


Bild 5. Verteilung der relativen Niederschlagshöhe  $h/2i_D$  für ein dreieckiges Regnerdiagramm bei kreisender Vorwärtsbewegung nach Gl. 7

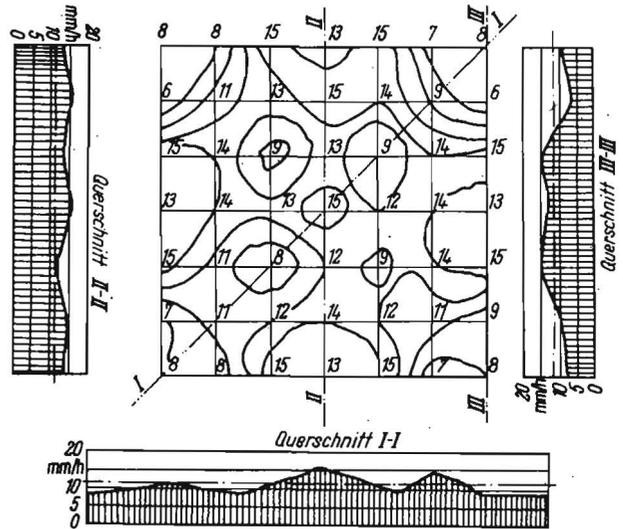


Bild 6. Verteilung der Niederschlagshöhe für Quadratverband bei zeitlicher Trennung von Vorschub- und Beregnungstakt, dargestellt als Isohyetenplan mit ergänzenden Querschnitten

seitliche Regnerabstand bzw. das Überschneidungsmaß liegt bei diesem Regnertyp angenähert bei 1,0 w.

Bei Drehstrahlregnern mit kreisendem Vorschub ist bei der Einschätzung der Gleichmäßigkeit der Niederschlagsverteilung noch zusätzlich die auftretende Unsymmetrie der Niederschlagshöhenkurve (Bild 5) zu beachten. Als Folge der gekrümmten Bewegungsbahn (Bild 4) sind die Niederschlagshöhen auf der Innenseite der Bahn, d.h. in Richtung auf den zentralen Drehpunkt zu, größer als auf der Bahnaußenseite. Am stärksten sind hiervon die inneren Regner betroffen, während für die vom Drehpunkt weiter außen liegenden Regner, etwa ab einem Wert  $n = R/w = 5$ , eine Verzerrung der Verteilungskurve nicht mehr nachweisbar ist. Für die Genauigkeitsanforderungen der Praxis genügt es daher, bei Regnern mit kreisendem Vorschub und Werten  $n > 5$  die Untersuchung der Niederschlagsverteilung mit den einfacheren Gleichungsansätzen (1) bis (5) bzw. den zugehörigen Bildern 3 a bis 3 c vorzunehmen.

#### Literatur

- [1] Drupka, S.: Technische Betriebsparameter für Drehstrahlregner. Wiss.-techn. Information für das Meliorationswesen, H. 17. VEB Ing.-Büro für Meliorationen, Bad Freienwalde 1972.
- [2] Bittinger, M. W.; Longenbaugh, R. A.: Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. Transactions of the ASAE (1962) H. 3, S. 26.
- [3] Heermann, D. F.; Hein, P. R.: Performance characteristics of self propelled center-pivot sprinkler irrigation system. Transactions of the ASAE (1968) H. 1, S. 11.
- [4] Janke; Emde: Tafeln höherer Funktionen. Leipzig 1948.

A 9875