

Strömungstechnische Untersuchungen zur Berechnung von Tropfbewässerungsanlagen

Von Eberhard Moser und Helmut Sinn,
Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.347:532.5

Der steigende Bedarf an Trink- und Brauchwasser für den privaten Bereich, für die Industrie und für die Landwirtschaft zwingt auch in gemäßigten Klimagebieten zu Bewässerungsverfahren, die einen sparsamen und wirtschaftlichen Einsatz des Wassers erwarten lassen. Die Berechnung erbrachte hinsichtlich der Wassernutzung gegenüber der Oberflächenbewässerung bereits eine deutliche Verbesserung. Mit der Tropfbewässerung wurde ein Verfahren entwickelt, das diesem Ziel noch näher kommt. Solche Anlagen bedürfen zukünftig einer sorgfältigeren Planung unter Beachtung der Strömungsvorgänge, wenn Schwierigkeiten wie die der ungleichmäßigen Wasserverteilung und der Verstopfung der Tropfelemente vermieden werden sollen.

1. Einleitung

Die Tropfbewässerung hat in den letzten Jahren nicht nur in Gebieten mit aridem Klima und für Unterglaskulturen weltweite Verbreitung gefunden, sondern sie gewinnt auch in humiden Regionen für landwirtschaftliche Freilandkulturen immer mehr an Bedeutung. Dieses Bewässerungsverfahren bietet in der Bundesrepublik Deutschland vor allem für Kulturen mit hoher Flächenproduktion, wie hochwertige Intensiv-Dauerkulturen, ökonomische und technische Vorteile und großen Ertragserlös [1, 2]. Neben den bekannten Vorzügen dieses Verfahrens, wie etwa der optimalen Wassernutzung, der gezielten boden- und pflanzenspezifisch gesteuerten Wasser- und Nährstoffzufuhr, der geringen Energiekosten sowie der Möglichkeit zur Verwendung von salzhaltigem Wasser, kommen im Obst- und Weinbau weitere Vorteile zum Tragen [3]. Beispielsweise können bei mehrjährigen Pflanzen diese Anlagen fest verlegt werden, ohne damit die Pflege- und Erntearbeiten zu behindern. Außerdem ist bei Sträuchern, Bäumen, Weinreben und Hopfen eine punktförmige bzw. flächenmäßig eng begrenzte Wasser- und Düngegabe im Wurzelbereich der Nutzpflanze möglich. Dadurch kann beispielsweise bei Dauerbegrünung das Mulchen und bei offenem Boden die Unkrautbekämpfung reduziert werden. Die Wasserausbreitung und -verteilung von einem Punkt, dem Tropfelement, aus, ist bodenspezifisch und kann über die Ausbringmenge, die Tropfrate und den Abstand der Tropfer berechnet und optimal der Wurzelausbreitung der Pflanze angepaßt werden [4, 5, 6]. Die Erosionsgefahr im Weinbau wird in Steil- und Hanglagen stark vermindert. Im Erdbeer- und Feldgemüsebau wird die Bodenverschlammung weitgehendst verhindert. Daneben wird der Schädlingsbefall durch Trockenhalten der Pflanzen verringert. Gegenüber herkömmlichen, stationären Beregnungsanlagen ist mit einer Energieeinsparung infolge niedriger Betriebsdrücke und geringerer Wassergeschwindigkeiten und bei einem Pflanzabstand, wie er beispielsweise im Obstbau üblich ist, mit geringeren Festkosten zu rechnen.

*) Prof. Dr.-Ing. Eberhard Moser ist Leiter des Fachgebietes Verfahrenstechnik für Intensivkulturen des Institutes für Agrartechnik der Universität Hohenheim. Dipl.-Ing. Helmut Sinn ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in diesem Fachgebiet.

Intensivkulturen stellen im Vergleich mit anderen landwirtschaftlichen Kulturen erhöhte Anforderungen an Tropfbewässerungsanlagen. In hängigem Gelände wie auch bei unterschiedlichen Temperaturen ist eine konstante Wasserausflußrate je Tropfstelle zu fordern, um eine Über- oder Unterversorgung der Pflanze mit Wasser bzw. Dünger zu vermeiden. Außerdem muß wegen des hohen Wertes der einzelnen Pflanzen eine absolute Betriebs- und Funktionssicherheit der Tropfelemente gewährleistet und ein Verstopfen ausgeschlossen sein.

2. Tropfbewässerungsverfahren

Die Entwicklung der Verfahren ging von Israel und Dänemark, geht derzeit hauptsächlich von den Vereinigten Staaten von Amerika aus [7, 8, 9]. Hinsichtlich der gewünschten bzw. erforderlichen spezifischen Wassergaben an den Boden und an die Pflanze ist der Anwendungsbereich von Tropfbewässerungsanlagen sehr groß [10]. Die Kulturart, die Anbausysteme, die Bodenverhältnisse, die Qualität des Wassers und das Gelände bestimmen weitgehendst das zur Anwendung kommende Tropfbewässerungssystem bzw. die Konstruktion der Verteil- und Tropfelemente. Die Hauptbestandteile einer Tropfbewässerungsanlage sind, wie Bild 1 zeigt, die Pumpstation, die Steuer- und Regeleinheit, die Haupt- und Verteilleitungen, sowie die Tropfleitungen mit aufgesetzten oder auch eingebauten Tropfelementen.

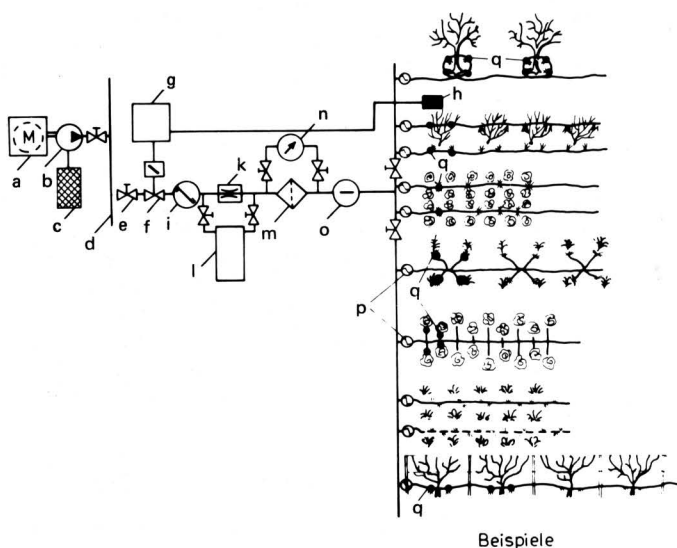


Bild 1. Aufbau und Anwendungsbeispiele von Tropfbewässerungsanlagen.

- | | |
|----------------|--------------------|
| a Motor | h Feuchtefühler |
| b Pumpe | i Druckminderer |
| c Saugkorb | k Drosselventil |
| d Hauptleitung | l Düngermischgerät |
| e Schieber | m Filter |
| f Magnetventil | n Manometer |
| g Steuergerät | o Wasserzähler |
| | p Druckregulator |
| | q Tropfer |

Die Versorgungseinheit mit der Steuer- und Regeleinrichtung dient der Reinigung des von der Pumpstation gelieferten Wassers, der Druckreduzierung und -regulierung, der Steuerung bzw. Regelung der Durchflußmenge sowie der Dosierung und Beimischung von Handelsdünger. Die größte Bedeutung kommt dabei der Reinigungseinrichtung bzw. dem Filter zu. Die Steuerung oder Regelung der Wassergaben kann über Bodenfeuchte- oder Verdunstungsmeßwertgeber vorgenommen werden.

Die Verteilung des Wassers auf die Tropfelemente erfolgt durch die Verteil- und Tropfleitungen, die meist aus glatten Kunststoffrohren bestehen. Der Abstand der Tropfleitungen wird durch die Kulturart und durch die Durchlässigkeit und Wasserhaltefähigkeit des Bodens bestimmt [11, 12].

Die Tropfkörper haben die Aufgabe, den verhältnismäßig niedrigen Wasserdruck im Tropfschlauch, der im Bereich zwischen 0,2 und 2,5 bar liegt, auf nahezu 0 bar abzubauen, so daß das Wasser in Einzeltropfen austreten kann. Diese Druckreduzierung erfolgt in Mikrokanaldüsen, in Schlitz- oder Lochdüsen und in porösen Schläuchen oder Platten, seltener in Wirbelkammerdüsen [13, 14]. Selbstverständlich sind auch Kombinationen dieser Bauarten möglich.

Seit geraumer Zeit wird in verschiedenen Staaten die Funktionstüchtigkeit von porösen Tropfschläuchen für die Unterflurbewässerung im Freiland verbessert, so daß diesen Verfahren in Zukunft mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muß [15]. Mit sogenannten Wegwerf-Tropfschläuchen, die nach einer Vegetationsperiode verrotten, wird versucht, den Arbeitszeitaufwand abzubauen und damit die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen zu erhöhen.

3. Theoretische Grundlagen

Für die Berechnung zur Auslegung einer Tropfbewässerungsanlage ist neben den boden- und pflanzen-spezifischen Kennwerten die Kenntnis der Strömungsvorgänge in den Leitungen und in den Tropfelementen notwendig. Insbesondere ist unter Berücksichtigung geringer Betriebsdrücke (etwa 1 bar) und großer Länge der Tropfrohren (> 200 m) der innerhalb der Verteilleitungen zu erwartende Druckverlust und das Ausflußverhalten eines Tropfelementes von entscheidender Bedeutung.

3.1 Strömung in Tropfrohren

Der Druckverlust Δp in Tropfrohrleitungen setzt sich aus der Summe der Druckverluste der einzelnen Abschnitte mit der Länge Δl zwischen zwei benachbarten Tropfstellen zusammen. Der Druckverlust eines einzelnen Abschnittes Δp_i ist auf das Widerstandsverhalten der Tropfrohrleitung beim Durchströmen Δp_{λ_i} , auf das Widerstandsverhalten der Tropfer in der Tropfrohrleitung Δp_{Tr_i} , auf die geodätischen Höhenunterschiede Δp_{geo_i} und auf das Widerstandsverhalten von Rohrformstücken und Armaturen Δp_{Ar_i} zurückzuführen:

$$\Delta p = \sum \Delta p_i = \sum [\Delta p_{\lambda_i} + \Delta p_{Tr_i} \pm \Delta p_{geo_i} + \Delta p_{Ar_i}] \quad (1)$$

Der Druckverlust infolge des Widerstandes beim Durchströmen läßt sich mit der Gleichung:

$$\Delta p_{\lambda_i} = c_1 \lambda \frac{\Delta l}{D^5} \frac{\rho}{2\pi^2} \dot{V}^2 \quad (2)$$

berechnen, worin ist:

p_{λ_i}	Druckabfall in bar	Δl	Länge der Leitung
c_1	= 1/81		in m
λ	Rohrreibungszahl	\dot{V}	Ausflußrate einer
D	Rohrinnendurchmesser in mm		Tropfstelle in l/h
		ρ	Dichte der Flüssigkeit in kg/m ³ .

Die Rohrreibungszahl ist mit $\lambda = f(Re, k/D)$ abhängig von der Reynoldszahl $Re = wD/\nu$, d.h. von der Strömungsgeschwindigkeit w , vom Rohrdurchmesser D , und von der kinematischen Zähigkeit des strömenden Mediums ν sowie von der Rauigkeit der Rohre k . Im laminaren Strömungsbereich und bei glatten Rohren auch im turbulenten Bereich wird die Rohrreibungszahl nur von der Reynoldszahl, im turbulenten Strömungsbereich bei rauhem Rohr nur von der relativen Rauigkeit bestimmt. Im Übergangsbereich zwischen hydraulisch glattem und hydraulisch rauhem Bereich wird die Rohrreibungszahl sowohl von der Reynoldszahl wie auch von der Rauigkeit beeinflusst.

Nimmt man vereinfachend an, daß für alle n Tropfstellen die gleiche Ausflußrate und trotz ständig abnehmender Strömungsgeschwindigkeit eine gleichbleibende Rohrreibungszahl vorliegt, berechnet sich der Druckverlust zu:

$$\Delta p_{\lambda, m.Tr.} = \sum \Delta p_{\lambda, m.Tr. i} = c_1 \lambda \frac{\Delta l}{D^5} \frac{\rho}{2\pi^2} \frac{\dot{V}^2}{n} \sum n^2 \quad (3)$$

Für Verteilrohre mit einer, entsprechend der Zahl der Tropfstellen, aus n Abschnitten bestehenden Leitung $n \Delta l$ und einem Gesamtvolumenstrom $n \dot{V}$ ergibt sich ein Druckverlust

$$\Delta p_{\lambda} = \sum \Delta p_{\lambda_i} = n^3 c_1 \lambda \frac{\Delta l}{D^5} \frac{\rho}{2\pi^2} \dot{V}^2 \quad (3a)$$

Durch Einführen eines Faktors c_2 kann aus dem Druckverlust einer Rohrleitung ohne Tropfstellen derjenige mit Tropfstellen wie folgt abgeleitet werden:

$$c_2 = \frac{\sum n^2}{n^3} \quad (3b)$$

Sind genügend Tropfstellen vorhanden ($n > 30$), kann näherungsweise mit $c_2 = 0,35$ gerechnet werden [8, 16]. Für eine poröse Tropfrohrleitung gilt entsprechend $c_2 = 0,33$ ($n \rightarrow \infty$).

Für eine exakte Berechnung des Druckverlustes muß jedoch die Rohrreibungszahl λ für jeden einzelnen Abschnitt Δl zwischen zwei benachbarten Tropfstellen gesondert aufgrund der jeweils vorliegenden Strömungsverhältnisse berechnet werden.

Die meisten Tropfrohrleitungen sind Kunststoffrohre, die als hydraulisch glatt angesehen werden dürfen. Deshalb kann im Fall der turbulenten Strömung zur Berechnung des Druckverlustes auch die empirische Gleichung von *Williams-Hazen* herangezogen werden [9, 10, 17, 18].

$$\Delta p_{\lambda} = c_3 \left(\frac{n \dot{V}}{R}\right)^{1,852} \frac{1}{D^{4,871}} n \Delta l \rho \cdot g \quad (4)$$

$$c_3 = 3,154 \cdot 10^{-2}$$

R Rauigkeit.

Für das hydraulisch glatte Rohr kann $R = 150$ gesetzt werden [9, 10, 17, 18].

Mit Tropfstellen gilt

$$\Delta p_{\lambda, m.Tr.} = \sum \frac{1}{n} c_3 \left(\frac{n \dot{V}}{R}\right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D^{4,871}} \cdot \Delta l \cdot \rho \cdot g \quad (4a)$$

Auch hier kann über einen Faktor c_4 der Druckverlust von Rohrleitungen mit Tropfstellen aus demjenigen ohne Tropfstellen abgeleitet werden.

$$c_4 = \frac{\sum n^{1,852}}{n^{2,852}} \quad (4b)$$

Als guter Näherungswert kann $c_4 = 0,37$ gesetzt werden [10, 17].

Der Druckverlust Δp_{Tr_i} aufgrund des Widerstandsverhaltens der Tropfer in der Tropfrohrleitung hängt von der Verbindungsart zwischen Tropfer und Tropfrohrleitung – eingebaut oder aufgesetzt – und von seiner Form und Größe im Vergleich zum Leitungsquerschnitt ab:

$$\Delta p_{Tr} = \Sigma \Delta p_{Tr_i} = c_5 \cdot \zeta_{Tr} \cdot \frac{1}{D^4} \cdot \frac{\rho \dot{V}^2}{2 \pi^2} \cdot \Sigma n^2 \quad (5)$$

$$c_5 = 1/81 \cdot 10^{-3}$$

ζ_{Tr} Widerstandszahl für den Tropfer.

Die Größe der Widerstandszahl ζ_{Tr} liegt je nach Bauart zwischen 0 und 2 [8].

Falls die empirische Gleichung von *Williams-Hazen* zur Berechnung des Druckverlustes herangezogen werden kann, kann das Widerstandsverhalten der Tropfer in der Tropfrohrleitung über den Rauigkeitsbeiwert R erfaßt werden. Je nach Art des Tropfelements, Größe von Leitungsquerschnitt und Tropferabstand variiert der Wert im Bereich $60 \leq R \leq 150$ [9].

Je nach Geländebeschaffenheit ist ein Anteil Δp_{geo_i} als Druckverlust oder aber als Druckgewinn zu berücksichtigen.

$$\Delta p_{geo} = \Sigma \Delta p_{geo_i} = c_6 \Delta h \rho g \Sigma n \quad (6)$$

$$c_6 = 10^{-5}$$

Δh Höhenunterschied zwischen den Tropfstellen in m.

Bleibt das Gefälle oder die Steigung über die gesamte Leitungslänge $L = n \Delta l$ konstant, dann ist:

$$\Delta p_{geo} = c_6 h \rho g = c_6 L \sin(\arctan \frac{S}{100}) \rho g \quad (6a)$$

L Leitungslänge in m

S Gefälle oder Steigung in %.

Rohrformstücke und Armaturen, wie beispielsweise Schieber, Manometer und Filter, werden wie die Tropfelemente über eine Widerstandszahl ζ_{Ar} bei der Berechnung des Gesamtdruckverlustes berücksichtigt. Werte für ζ_{Ar} liegen meist in tabellarischer Form vor [19].

3.2 Strömung in Tropfelementen

Die Strömungsvorgänge müssen entsprechend der Art des Druckabbaues, der durch die Konstruktion des Tropfelementes gegeben ist, behandelt werden.

Der Druckabbau in Mikrokanal-Tropfern ist dem Druckverlust in Rohren ähnlich, so daß auch hier Gl. (1) herangezogen werden kann.

$$\Delta p_{M.-Tr.} = c_1 \lambda \frac{1}{d^5} \frac{\rho \dot{V}^2}{2 \pi^2} \quad (7)$$

l Mikrokanallänge in m

d Innendurchmesser des Mikrokanals in mm.

Je nach Strömungsart, Mikrokanalausbildung und -querschnitt ist für die Rohrreibungszahl λ wiederum die entsprechende Größe zu berücksichtigen.

Für einen geraden, kreisförmigen Mikrokanal berechnet sich beispielsweise bei laminarer Strömung die Rohrreibungszahl zu

$$\lambda = 64/Re \quad (8)$$

$$Re = c_7 \cdot \frac{\dot{V}}{\pi d \nu} \quad (9)$$

$$c_7 = 1/9 \cdot 10^{-2}$$

ν kinematische Zähigkeit des strömenden Mediums in m^2/s

und der Druckabbau zu

$$\Delta p_{M.-Tr.} = c_8 \frac{1}{d^4} \frac{\rho \dot{V}}{2 \pi} \nu \quad (10)$$

$$c_8 = 6400/9.$$

Bei sehr stark turbulenter Strömung, d.h. bei sehr großen Reynoldszahlen, wird $\lambda = \text{const.}$

Ist der Mikrokanal gekrümmt, dann ändert sich die Rohrreibungszahl in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis d/D_0 und die kritische Reynoldszahl, als Grenzwert zwischen laminarem und nichtlaminarem Strömungsverhalten, berechnet sich nach der empirischen Formel [20, 21]:

$$Re_{kr} = 2 \cdot 10^4 (d/D_0)^{0,36} \quad (11)$$

D_0 Krümmungsdurchmesser.

Bei Mikrokanälen, die von der Kreisform abweichende Querschnittsformen besitzen, kann die Rohrreibungszahl mit Hilfe von Korrekturfaktoren oder näherungsweise mittels des hydraulischen Durchmessers berechnet werden

$$d = d_h = 4 \frac{A}{U} \quad (12),$$

d_h hydraulischer Durchmesser in mm

A Querschnittsfläche des Mikrokanals in mm^2

U Umfang des Mikrokanals in mm.

Für düsenartige Tropfelemente gilt die bekannte Ausflußgleichung

$$\Delta p_D = c_9 \frac{1}{a^2 A_D^2} \frac{\rho \dot{V}^2}{2} \quad (13),$$

$$c_9 = 1/3,6^2 \cdot 10^{-5}$$

a Ausflußzahl

A_D Düsenfläche in mm^2 .

Porös-Tropfer besitzen ein ähnliches Strömungsverhalten wie Düsen-Tropfer.

Aus einer allgemeinen Darstellung des Druckabbaues in Tropfelementen

$$p \sim \dot{V}^{1/m} \quad (14)$$

bzw.

$$\dot{V} \sim p^m \quad (14a)$$

m charakteristischer Exponent für eine Tropferbauart

lassen sich folgende Tendenzen ableiten:

Der Wert des Exponenten m liegt bei Mikrokanal-Tropfern zwischen 0,5 (turbulente Strömung) und 1,0 (laminare Strömung), bei Düsen-Tropfern bei 0,5 und bei ideal druckunabhängigen Tropfern wegen $\dot{V} = \text{const.}$ bei 0.

Je nach Strömungsart ändert sich die Ausflußrate von Mikrokanal-Tropfern mit der Wassertemperatur aufgrund der kinematischen Zähigkeit

$$\dot{V} \sim \nu^{1-2m} \quad (15).$$

Bei laminarer Strömung ist demnach die Ausflußrate $\dot{V} \sim 1/\nu$, bei turbulenter Strömung unabhängig von ν .

Eine Temperaturabhängigkeit der Ausflußrate bei Düsen-, Porös- und druckunabhängigen Tropfern ist hauptsächlich auf die Konstruktion und das Ausdehnungsverhalten der Tropferwerkstoffe sowie auf die Materialelastizität zurückzuführen.

4. Experimentelle Untersuchungen an Tropfelementen

Die Untersuchungen, die am Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Verfahrenstechnik für Intensivkulturen, durchgeführt wurden, hatten zum Ziel, den Einfluß der Großen Druck, Temperatur, Beschaffenheit des Wassers und Fertigungsgenauigkeit auf die Ausflußrate, aber auch weitere technische Kenndaten von 20 verschiedenen, derzeit auf dem Markt befindlichen Tropfern zu bestimmen. Die Versuche wurden im Labor unter reproduzierbaren, konstanten Bedingungen mit mehreren Wiederholungen an mindestens 6 bis 30 Tropfelementen jeder Bauart durchgeführt.

4.1 Tropferbauarten

Die Vielzahl derzeitiger Bauarten von Tropfelementen läßt sich mit wenigen Ausnahmen funktionell auf die drei Grundformen Mikrokanal-, Düsen- und Porös-Tropfer zurückführen. In **Tafel 1** sind die von uns untersuchten und derzeit in der Praxis meist verwendeten Mikrokanal-Tropfer, in **Tafel 2** die entsprechenden Düsen-, Porös- und kombinierten Tropfer systematisch zusammengestellt. Diese Tropferbauarten bedingen je nach Ausflußrate, Art des Druckabbaues, Größe und Ausbildung der Austrittsöffnung unterschiedliche Strömungsverhältnisse und unterliegen deswegen, wie zuvor dargestellt, verschiedenen Strömungsgesetzen.

Der Druckbereich, in dem Tropfer betrieben werden können, liegt zwischen 0,05 und 5 bar, der Betriebsdruck in der Praxis meist bei 1 bar. Die Ausflußraten betragen bei den untersuchten Tropfern in den angegebenen Druckbereichen 0,24 bis 9,5 l/h. Die Größe der Wasseraustrittsöffnungen liegt bei Mikrokanal-Tropfern zwischen 0,8 und 3,0 mm², bei Düsen-Tropfern zwischen 0,12 und maximal 0,6 mm², bei Porös-Tropfern bei etwa 8×10^{-7} mm² und bei kombinierten Tropfern zwischen 0,05 und 0,8 mm². Die Wassergeschwindigkeiten berechnen sich damit bei Mikrokanal-Tropfern zu 0,06 bis zu etwa 1,5 m/s im Normalfall. In Ausnah-

mefällen wird dieser Wert weit überschritten. Die entsprechenden Werte für Düsentropfer liegen im Bereich zwischen 2 und 3 m/s, in Einzelfällen sogar bei etwa 10 m/s. Die Wasserfließwege für den Druckabbau haben bei Mikrokanal-Tropfern je nach Bauart eine Länge zwischen 0,3 und 28 m.

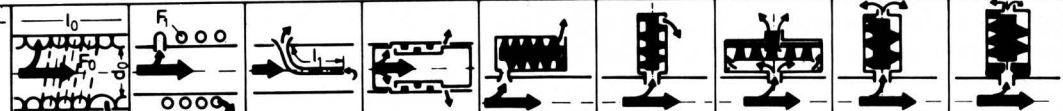









Es ergeben sich damit ohne Berücksichtigung der unter 3.2 angegebenen Korrekturfaktoren Reynoldszahlen für Mikrokanal-Tropfer, die zwischen 100 und 2500, und für Düsen-Tropfer, die bei etwa 6000 liegen. Die Werte für kombinierte Tropfer liegen im Bereich derjenigen von Mikrokanal-Tropfern.

Der für einen Tropfer charakteristische Wert des Exponenten m , der den Strömungszustand und damit das Verhalten des Tropfers kennzeichnet, liegt bei Mikrokanal-Tropfern zwischen 0,51 und 0,815, bei Düsen-Tropfern zwischen 0,35 und 0,645, bei Porös-Tropfern bei 0,884 und bei kombinierten Tropfern zwischen 0,643 und 0,81.

Eine konstante, druckunabhängige Wasserausflußrate wird bei Düsen- und Mikrokanal-Tropfern grundsätzlich durch eine elastische Verformung von Membranen oder Austrittsöffnungen erreicht, wobei unterschiedliche Mikrokanallängen (Tropfer 7) und unterschiedliche Düsenquerschnitte (Tropfer 13) entstehen. Der sogenannte Spüleffekt, die Erscheinung, daß mit fallendem Druck die Ausflußrate wesentlich ansteigt (Tropfer 12 und 16), ist grundsätzlich auf denselben Vorgang zurückzuführen.

Der Abstand der Tropfstellen entlang einer Tropfleitung ist bei den meisten Systemen variabel, nur bei einigen wenigen, die meist in Flächenkulturen Eingang finden, mit gewissen Abständen vorgegeben.

Nicht fest verlegte Tropfbewässerungsanlagen, wie sie beispielsweise im Kartoffel-, Mais-, Zuckerrüben- und Gemüsebau eingesetzt werden, sollten trommelbare Tropfleitungen haben. Die Tropfelemente müssen dann im Tropfrohr integriert sein, damit sie beim Auf- und Abbau nicht hindern.

Tropfbewässerungs-System										
	Mikrokanal-Tropfer									
Kenndaten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tropfer Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Firmenbezeichn.	Agro-Drip Gilead	Triklon	Mikro-Dripper	Netafim	Key-Clip Emitter	Cameron P34-2	Key Emitter M3	Sotradies Agrigid		
Druck p (bar)	0,25-2,50	0,1-1,0	0,1-1,5	0,1-2,5	0,1-2,5	0,08-1,00	>1,0	0,1-2,0	0,1-2,5	
Druckausgleich	bedingt	bedingt	bedingt	nein	nein	nein	ja	nein	nein	
Ausflußrate * V Tropfer (l/h)	0,5-3,2	1,5-7,5	1,3-9,0	1,2-7,5	0,55-6,50	1,4-9,3	~4,0	0,6-6,2	1,1-5,5	
geom. Abmess.	Tropfleitung d ₀ (mm)	21	9,4	16	16	16	16	13	16	16
	F ₀ (mm ²)	346,36	69,4	201,06	201,06	201,06	201,06	132,73	201,06	201,06
Tropfer	Form									
	F ₁ (mm ²)	1,2	0,8	0,8	1,0	1,0	1,1	0,8	3,0	3,0
Tropfer	l ₁ (m)	7,0-28	0,35	0,62	1,26	0,77	0,98	0,5	0,3	0,3
	Wassergeschw. (m/s)	0,12-0,74	0,52-2,60	0,45-3,13	0,33-2,08	0,15-1,81	0,35-2,35	~1,39	0,06-0,57	0,10-0,51
Tropfer	Strömungsber. Re-Zahl	100-640	420-2100	360-2500	260-1650	120-1430	330-2180	770	75-780	140-700
	Ausfluß-Druck m (V̇ = c · h ^m)	0,815	0,712	0,668	0,554	0,779	0,761	0,081	0,782	0,510
Tropfer	Abstand (m)	0,33-1,32	var.	var.	var.	var.	var.	var.	var.	var.
	trommelbar	ja	bedingt	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein
Hersteller - Lieferfirma	M. Drossbach 8852 Rain/Lech BRD	H. Hüdig 3100 Celle BRD	Ch. Metzger 7000 Stuttgart BRD	Wolny 6509 Bechtolsheim BRD	Ferrot 7260 Calw Brecht 7257 Ditzingen BRD			Agrigid 1012 Lausanne CH Bauer 7522 Philippsburg BRD		

* Wassertemperatur $t_w = 11 \pm 1^\circ\text{C}$

Tafel 1. Zusammenstellung der Systeme und technische Kenndaten von Mikrokanal-Tropfern.

Tropfbewässerungs-System	Düsen-Tropfer											Porös-Tr.		Kombinierte Tropfer		
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
Kenndaten																
Tropfer Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
Firmenbezeichn.	Bywall	Müco	Komfort-technik	Etemomatic	Rebal-Weeper	Rain Bird TA 6	Rain Bird 1010	Viaflo	Agrotechnik	Agrotechnik	Meckel					
Druck p (bar)	0,1-2,5	0,5-3,0	1,5-3,0	>0,1	0,1-2,5	0,1-2,5	>0,3-2,5	0,05-0,30	0,05-0,50	0,05-1,00	0,5-5,0					
Druckausgleich	nein	nein	nein	ja	nein	nein	(ja)	nein	bedingt	bedingt	bedingt					
Ausflußrate*V Tropfer (l/h)	0,4-2,6	0,7-8,5	0,8-1,1	~4,0	1,4-6,4	0,8-6,5	1,9-4,4	0,35-1,80**	2,1-9,5	0,4-4,2	0,24-1,60					
geom.-Abmess.	Tropfleitung d ₀ (mm)	15	8	14	16	16	16	11	14	14	16					
	F ₀ (mm ²)	176,71	50,26	153,94	201,06	201,06	201,06	95,03	153,94	153,94	201,06					
Tropfer	Tropfer Form	●	✱	+	●	●	●	●	▲	▲	▲					
	F ₁ (mm ²)	0,198	0,6	-	0,4	0,12	0,194	>0,4	~8 · 10 ⁻⁷	~0,8	0,3					
	l ₁ (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,42					
Tropfer	Wassergeschw. (m/s)	2,24-4,59***	0,32-3,95	-	~2,78	1,62-7,41	1,15-9,31	1,32-3,06	-	0,73-3,30	0,37-3,89					
	Strömungsber. Re-Zahl	890-5790***	~50-600	-	1370	440-2020	450-3690	650-1510	-	460-2090	100-1090					
	Ausfluß-Druck m (V=c·h ^m)	0,591	-	0,434	0,062	0,474	0,645	0,350	0,884	0,643	0,796					
	Abstand (m)	0,31	0,25	0,12-0,60	var.	var.	var.	var.	ja	var.	var.					
trommelbar	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein					
Hersteller - Lieferfirma	Perrot 7260 Calw	H. Bahrs 4057 Brüggen	Tiedt 7555 Rastatt	Salen 1035 Wien A Western-International 1221 Wien A		H. Wieler 6720 Speyer Brecht 7257 Ditzingen		H. Bahrs 4057 Brüggen	Dr. Haronska 5303 Bornheim		Meckel 6221 Stephans- hausen					
	BRD	BRD	BRD	BRD		BRD		BRD	BRD		BRD					

* Wassertemperatur $t = 11 \pm 1^\circ\text{C}$, ** l/m-h, *** Düse (Tropfleitung - Verteiler)

Tafel 2. Zusammenstellung der Systeme und technische Kenn-
daten von Düsen-, Porös- und kombinierten Tropfern.

4.2 Ausflußrate

Neben dem strömungsbedingten Druckverlust und den Auswirkungen geodätischer Höhenunterschiede auf die Druckverhältnisse in den Tropfleitungen, sind die temperaturbedingten Materialveränderungen und Wassereigenschaften, die Verstopfungsanfälligkeit, die Fertigungsgenauigkeit und der Abrieb Faktoren, welche die Gleichmäßigkeit der Ausbringrate je Tropfer entlang der Tropfleitung beeinflussen.

4.2.1 Einfluß des Druckes

Die Wasserausflußrate in Abhängigkeit vom Druck ist für die untersuchten Tropfelemente in Bild 2 bis 4 in doppelt-logarithmischem Maßstab dargestellt. Das unterschiedliche Ausflußverhalten ist einerseits bauartbedingt, andererseits auf die Strömungsverhältnisse in den Tropfern zurückzuführen.

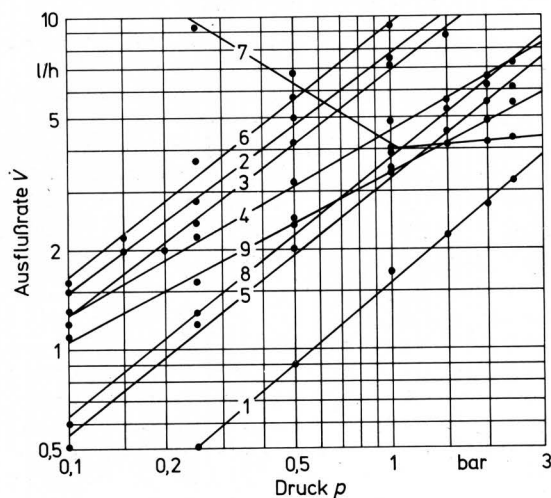


Bild 2. Ausflußraten von Mikrokanal-Tropfern in Abhängigkeit vom Druck.

In Bild 2 sind die Ergebnisse von neun Mikrokanal-Tropfern dargestellt. Die Steigung der Tropferkennlinien, ein Maß für die Druckempfindlichkeit, ist sehr einheitlich. Die tropfertypischen Exponenten liegen im Bereich $0,510 \leq m \leq 0,815$. Diese Werte, die auch in Tafel 1 aufgeführt sind, ergaben sich aufgrund einer regressionsanalytischen Auswertung der Versuchsergebnisse. Sie überdecken damit die in 3.2 errechneten theoretischen Werte. Der druckausgleichende Mikrokanal-Tropfer Nr.7 kommt mit einem Wert von $m = 0,081$ ebenfalls dem idealen Wert von $m = 0$ sehr nahe.

Grundsätzlich müßten Tropfer mit einem Wert m nahe 0,5 ein turbulentes ($Re \geq 2320$) und nahe $m = 1$ ein laminares ($Re \leq 2320$) Strömungsverhalten zeigen. Aufgrund unterschiedlicher Ausflußraten, Querschnittsformen und -flächen der Tropfelemente, wie Krümmungen, Kaskaden und Spiralen, muß, wie gezeigt wurde, mit Abweichungen gerechnet werden.

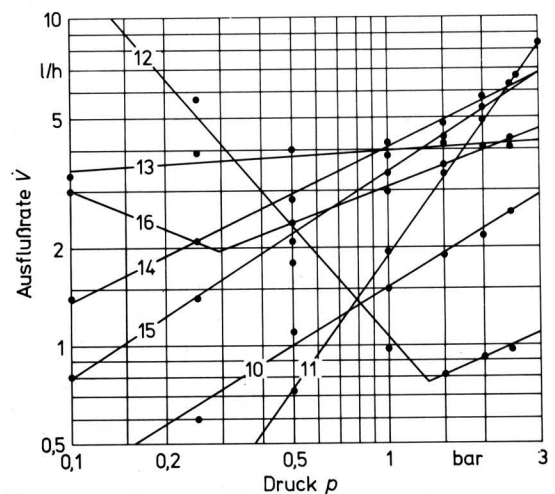


Bild 3. Ausflußraten von Düsen-Tropfern in Abhängigkeit vom Druck.

Der druckausgleichende Mikrokanal-Tropfer, bei dem ab einem Druck $p > 1$ bar die Wasserausflußrate \dot{V} nahezu konstant bleibt, zeichnet sich zudem durch den sogenannten Spüleffekt aus. Bei Drücken unterhalb 1 bar erfolgt kein Druckabbau mehr, weshalb die Wasserausstrittsrate \dot{V} erheblich zunimmt. Mit solchen Tropfer-Bauarten können zu Beginn und zum Ende eines jeden Bewässerungsvorganges im Tropfer abgelagerte Verunreinigungen herausgespült werden.

Düsen-Tropfer haben, wie Bild 3 zeigt, innerhalb des untersuchten Druckbereiches unterschiedliches Ausflußverhalten. Die Werte für den tropfertypischen Exponenten m betragen 0,350 bis 0,645. Die Abweichungen vom theoretischen Wert $m = 0,5$ lassen sich weitgehendst auf die geometrisch unterschiedlichen Formen der Düsen zurückführen. Der Tropfkörper Nr. 13 zeichnet sich durch seine große Druckunabhängigkeit ($m = 0,062$) aus. Tropfer Nr. 16 kann nur als bedingt druckkompensierend angesehen werden. Von den untersuchten Düsen-Tropfern zeigen zwei Bauarten (Nr. 12 und 16) den Spüleffekt.

Der Porös-Tropfer (poröswandiger Schlauch) ist, wie Bild 4 zeigt, nur mit relativ niedrigen Drücken zu betreiben. Die Ausflußrate ist sehr druckabhängig, was sich vor allem in dem relativ hohen Wert $m = 0,884$ ausdrückt.

Bei kombinierten Tropfelementen ist die Ausflußrate in ähnlichem Umfange druckabhängig wie bei Porös-Tropfern, Bild 4. Die tropfertypischen Exponenten m liegen zwischen 0,643 und 0,810 und sind mit denen von Mikrokanal-Tropfern vergleichbar. Bei diesen Tropfer-Bauarten erfolgt der Druckabbau im wesentlichen im Mikrokanal, weniger im düsenartigen Austrittsquerschnitt. Durch Veränderung des Mikrokanals (Einstecktiefe des Drosselstabes) ist bei diesen Bauarten nur bedingt ein Druckausgleich möglich.

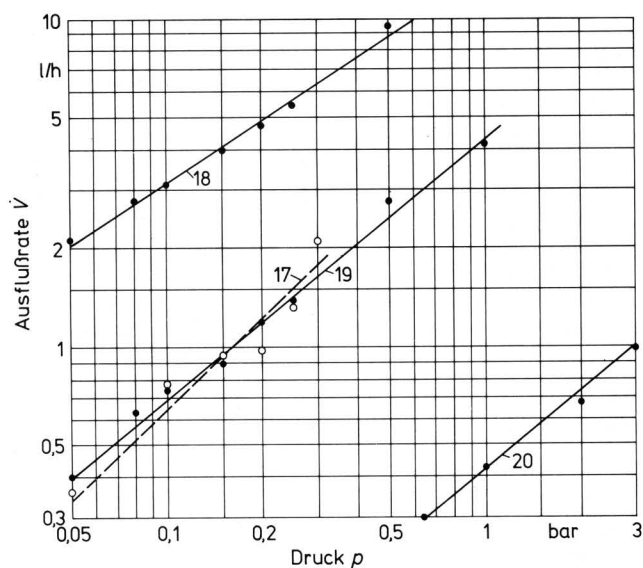


Bild 4. Ausflußraten von Porös- und kombinierten Tropfern in Abhängigkeit vom Druck.

4.2.2 Einfluß der Temperatur

Die Ausflußrate ändert sich, wie Bild 5 zeigt, je nach Tropferbauart mehr oder weniger stark mit der Temperatur. Düsen-Tropfer weisen meist eine nur geringe Temperaturabhängigkeit auf. Ausnahmen bilden nur diejenigen Düsen-Tropfer, deren Düsenöffnungen durch elastische Materialverformungen beeinflusst werden. Dabei kann es bei Temperaturerhöhungen sowohl zu einer Vergrößerung als auch zu einer Verminderung der Ausflußrate kommen.

Bei Mikrokanal-Tropfern nimmt bei einer Erhöhung der Temperatur von beispielsweise 8 °C auf 30 °C die Wasserausflußrate um etwa 17 bis 35 % zu. Porös-Tropfer sind sehr temperaturempfindlich. Die Ausflußrate kann hier bei der gleichen Temperaturdiffe-

renz sogar auf mehr als 230 % zunehmen. Dagegen sinkt die Ausflußrate des untersuchten kombinierten Tropfers bei Temperaturerhöhung.

Das unterschiedliche Verhalten ist in erster Linie auf die temperaturabhängige Veränderung der kinematischen Zähigkeit des Wassers zurückzuführen. Dies trifft insbesondere für Mikrokanal-Tropfer zu, bei denen laminare bzw. quasi-laminare Strömungsverhältnisse vorherrschen. Bei vielen Tropferbauarten ist dieses Verhalten aber vorwiegend den temperaturabhängigen Eigenschaften des Tropfermaterials, insbesondere der Elastizität, zuzuschreiben.

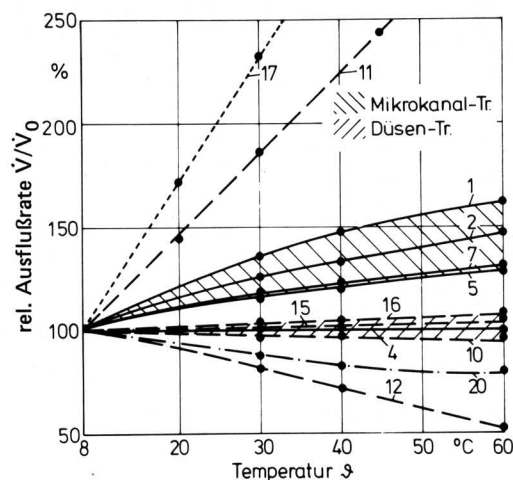


Bild 5. Relative Ausflußraten von verschiedenen Tropfern in Abhängigkeit von der Wasser- und Tropfertemperatur.

4.2.3 Einfluß der Wasserbeschaffenheit

Mineralische und organische Feststoffe, auch Mikroorganismen, und gelöste Inhaltsstoffe im Wasser sind Ursachen der Verstopfungen von Tropfern. Obwohl das Bewässerungswasser in der Versorgungs- und Steuereinheit durch Feinfilter von Feststoffen gereinigt wird, können sich die Tropfkörper nach mehr oder weniger langer Betriebszeit zusetzen. Die Verstopfungsgefahr durch Algen, Mikroorganismen oder Korrosions- und Oxidationsprodukte der gelösten Beimischungen ist dabei weitaus geringer als diejenige durch Feststoffe, die vom Filter nicht abgeschieden werden. Von diesen sind infolge der begrenzten Trennleistung der üblichen Filter nur die Schwebstoffe mit einer Korngröße von 0,003 bis 0,1 mm Durchmesser für eine Verstopfung von Bedeutung, nicht dagegen aber die Schwimm- und Sinkstoffe.

Zur Ermittlung der Verstopfungsneigung der Tropfer diente Wasser aus dem Versorgungsnetz als Bewässerungswasser. Diesem Wasser wurde als Feststoff Quarzmehl beigemischt, dessen Korngrößenverteilung derjenigen von in Flüssen vorgefundenen Schwebstoffen entspricht und das von einem bei der Tropfbewässerung meist verwendeten Feinfilter von 0,1 mm Maschenweite nicht abgesiebt wird, Bild 6. Die Schwebstoffkonzentration der Suspension betrug entsprechend der durchschnittlichen Belastung verschiedener mitteleuropäischer Flüsse 250 g/m³ Wasser. Durch 10 bis 15-maliges Ein- und Ausschalten der Versuchsanlage konnte entsprechend den Vorgängen in der Praxis ein gewisser Spül- und Reinigungseffekt nachvollzogen werden.

Die Verstopfungsneigung bzw. Änderung der Ausflußrate von verschiedenen Tropfbewässerungssystemen während einer Betriebszeit von 50 Stunden ist in Bild 7 dargestellt. Nach verhältnismäßig kurzer Betriebsdauer beginnen die Tropfer sich zuzusetzen und eine geringere Wasserrate abzugeben. Mit einer Ausnahme neigen die untersuchten Düsen-Tropfer, obwohl größtenteils Turbulenz vorliegt, schneller zum Verstopfen als Mikrokanal-Tropfer. Das vorzeitige Verstopfen von Düsen-Tropfern ist den gegenüber Mikrokanal-Tropfern kleineren Austrittsquerschnitten zuzuschreiben.

Daß die Ausflußrate aber mit der Betriebszeit zunehmen kann, darf sicherlich auf eine Vergrößerung des Düsenquerschnittes durch Abrieberscheinungen zurückgeführt werden.

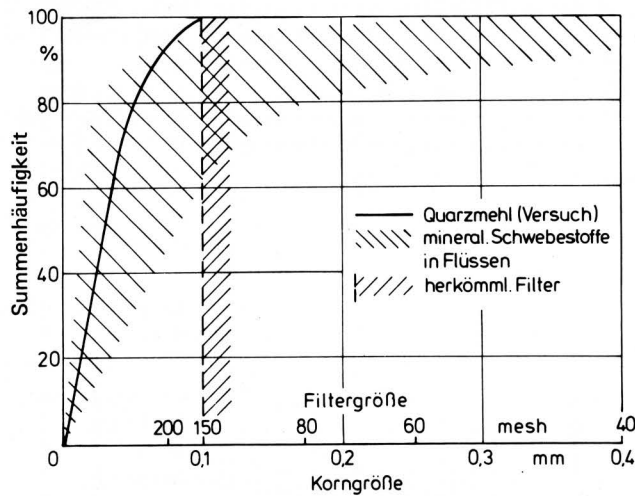


Bild 6. Korngrößenverteilung von Schwebstoffen in Flüssen und beim Versuch.

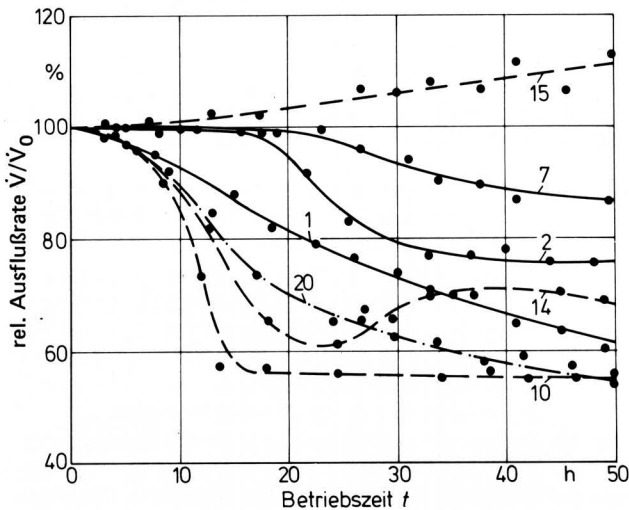


Bild 7. Relative Ausflußrate von Tropfern bzw. Tropfleitungen während der Betriebszeit bei einer durchschnittlichen Schwebstoffkonzentration von 250 g/m^3 und der Korngrößenverteilung nach Bild 6.

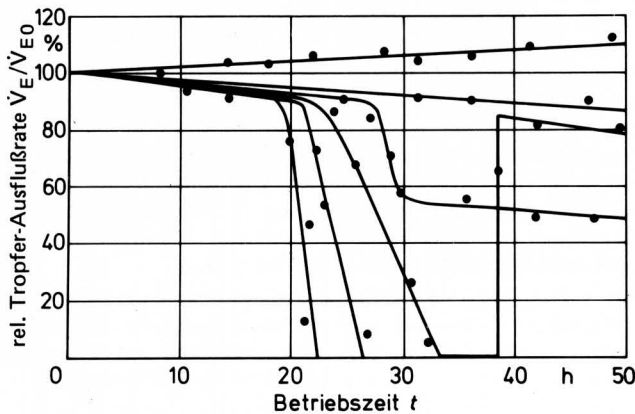


Bild 8. Relative Ausflußrate von Einzeltropfern während der Betriebszeit bei einer durchschnittlichen Schwebstoffkonzentration von 250 g/m^3 und der Korngrößenverteilung nach Bild 6.

Die Verstopfungsneigung von einzelnen Tropfern eines Systems entlang einer Tropfleitung ist insbesondere bei Dauerkulturen von vorrangiger Bedeutung. Wie die Untersuchungen zeigten, **Bild 8**, können sich die Tropferöffnungen während des Betriebes weiten (meist Düsen-Tropfer), geringfügig zusetzen (meist Mikrokanal-Tropfer), sowie nach einer bestimmten Betriebsdauer kurzfristig oder aber vollständig zusetzen (Düsen- und Mikrokanal-Tropfer). Eine Selbstreinigung während des Betriebes ist, wie einige Fälle zeigten, nicht auszuschließen. Tropfbewässerungssysteme, deren einzelne Tropfer ein uneinheitliches Verhalten gegenüber Verstopfungen zeigen, müssen in der Praxis laufend kontrolliert werden.

4.2.4 Einfluß der Fertigungsgenauigkeit

Bekanntlich muß für die gleichmäßige Wasserverteilung eine gewisse Toleranzgrenze der Wasseraustrittsrate je Tropfer eingehalten werden. Die Streuung der Ausflußrate infolge fertigungstechnischer geometrischer Abweichungen der untersuchten Tropferbauarten ist in **Bild 9 bis 11** dargestellt. In den meisten Fällen liegen bei Mikrokanal-Tropfern die Abweichungen vom Mittelwert der Wasserausflußrate bei etwa $\pm 3 \%$. Es können aber auch Abweichungen bis zu 10% auftreten. Bei Düsen-Tropfern schwanken die Werte meist um $\pm 4 \%$. Zwei Bauarten, die Tropfer Nr. 10 und

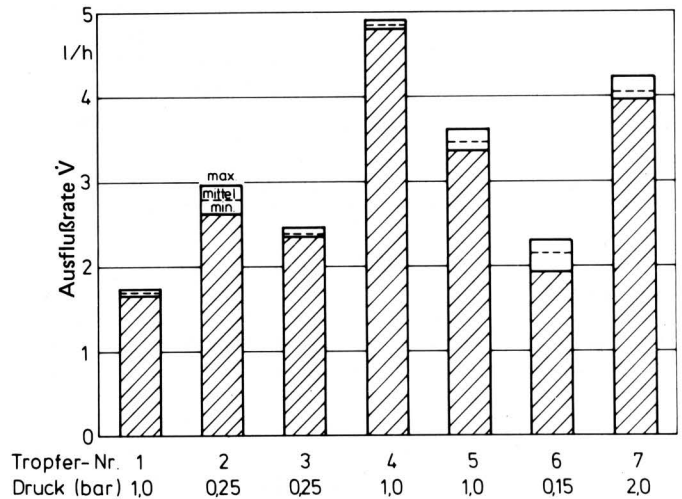


Bild 9. Streuungen der Ausflußraten bei Mikrokanal-Tropfern, Mittelwert, Maximal- und Minimalwert.

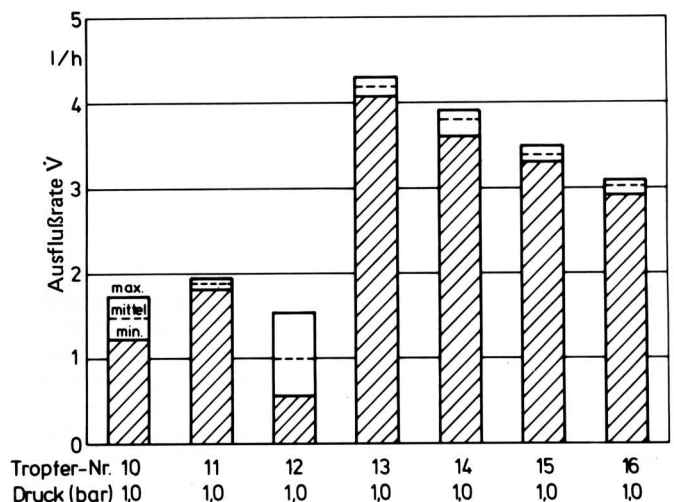


Bild 10. Streuungen der Ausflußraten bei Düsen-Tropfern, Mittelwert, Maximal- und Minimalwert.

12, fallen aus diesem Rahmen. Hier betragen die Abweichungen vom Mittelwert $\pm 17\%$ bzw. $\pm 50\%$. Porös-Tropfer zeigen Abweichungen um $\pm 30\%$. Bei dieser Bauart ist außerdem die Betriebszeit von erheblichem Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Ausbringrate. Kombinierte Düsen-Mikrokana-Tropfer weisen Abweichungen auf, die von $\pm 3\%$ bis $\pm 25\%$ reichen können.

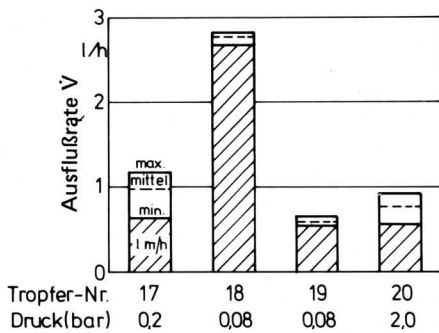


Bild 11. Streuungen der Ausflußraten bei Porös- und kombinierten Tropfern, Mittelwert, Maximal- und Minimalwert.

5. Zusammenfassung

Tropfbewässerungsverfahren werden wegen der optimalen Wassernutzung zukünftig auch in der Bundesrepublik Deutschland insbesondere in Intensiv-Dauerkulturen an Bedeutung gewinnen. Bei der Planung solcher Anlagen sind die Strömungsvorgänge und besonders auch der zu erwartende Druckverlust in den Leitungen und das Ausflußverhalten eines Tropfers unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu beachten. Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen haben ergeben, daß ein Großteil der Industrie durchaus in der Lage ist, mit entsprechenden Konstruktionen, Systemen und Verfahren Tropfbewässerungsanlagen zu erstellen, die auch schwierigen Bedingungen gerecht werden. Für hängiges Gelände und für Dauerkulturen sind nur druckausgleichende, weitgehendst temperaturunabhängige und nicht zum Verstopfen neigende Tropfelemente geeignet. Es bedarf dringend noch weiterer technisch-ökonomischer Untersuchungen und verstärkter Anstrengungen in der Konstruktion von billigen Tropfern, um den gestellten Aufgaben auch in der Zukunft gerecht zu werden.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Wolff, P.: Tropfbewässerung — ein modernes Bewässerungsverfahren im Zeitalter der zunehmenden Verknappung natürlicher Ressourcen. Kulturtechn. Information Nr. 2 (1977), Agrartechn. Beratungsdienst, Witzenhausen.
- [2] Rosegger, S., M. Dambroth, E. Siegert u. F.P. Sörgel: Ergebnisse des Einsatzes der Tropfbewässerung in Reihenkulturen. Landbauforschung Völknerode Bd. 27 (1977) H. 2, S. 81/96.
- [3] Richter, W.: Trickle-Irrigation — Eine neue Bewässerungsmethode mit salzhaltigem Wasser zur landwirtschaftlichen Erschließung grobsandiger Wüstenböden. Bericht über Landwirtschaft Bd. 53 (1973) S. 532/44.
- [4] Brandt, A., E. Bresler, N. Diner, I. Ben-Asher, J. Heller u. D. Goldberg: Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. Soil Science Soc. Amer. Proc. Bd. 35 (1971) Nr. 5, S. 675/83.
- [5] Bresler, E., J. Heller, N. Diner, I. Ben-Asher, A. Brandt u. D. Goldberg: Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. Soil Science Soc. Amer. Proc. Bd. 35 (1971) Nr. 5, S. 683/89.
- [6] Hachum, A. Y., J.F. Alfaro u. L.S. Willardson: Water movement in soil from a trickle source. Jour. Irrig. Drain. Division 6 (1976) S. 179/93.
- [7] Goldberg, D.: Irrigation methods and techniques in Israel. The citrus grower and sub-tropical fruit-journal. Nr. 457 (1972) S. 9/11.
- [8] Gilaad, Y. u. A. Marco: Erläuterung zur Bemessung von Drippern und Laterals. Israel center of water-works appliances. Tel Aviv (1976).
- [9] ● Karmel, D. u. J. Keller: Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Mfg. Corp. Glendora/Calif. (1975).
- [10] Branscheid, V.: Entwurfsgrundlagen der Tröpfchenbewässerung. Wasser und Boden 1 (1974) S. 4/7.
- [11] Keller, J. u. D. Karmeli: Trickle irrigation design for optimal soil wetting. Proc. Sec. Intern. Drip Irrig. Congr., San Diego, Calif. (1974) S. 240/45.
- [12] Keller, J. u. D. Karmeli: Trickle irrigation design parameters. Trans. ASAE (1974) ASAE-paper Nr. 73-234.
- [13] Supersperg, H.: Bewässerung — eine Möglichkeit. Der Winzer 3 (1976) S. 4/9.
- [14] Hege, H.: Tropfenbewässerung im Gewächshaus. Beitrag in: Unterpflanzenbewässerung im Gartenbau. Verlag Gesellschaft für Kunststoffe in der Landwirtschaft, Darmstadt-Kranichstein (1977) S. 7/15.
- [15] Benoit, E. u. N. Ceustermanns: Unterflurbewässerung von Gemüse unter Glas und im Freiland. Beitrag in: Unterpflanzenbewässerung im Gartenbau. Verlag Gesellschaft für Kunststoffe in der Landwirtschaft, Darmstadt-Kranichstein (1977) S. 45/55.
- [16] Greulich, H. u. A. Kleinschroth: Hydraulische Untersuchungen an einem Tropfrohr für die Bewässerung. Zeitschr. f. Bewässerungswirtschaft Bd. 12 (1977) H. 1, S. 61/68.
- [17] I-Pai Wu u. H.M. Gitlin: Design of drip irrigation lines. Hawaii Agric. Experim. Stat. Univ. of Hawaii (1974) Nr. 96, S. 1/29.
- [18] I-Pai Wu u. H.M. Gitlin: Drip irrigation systems design in metric units. Coop. Extens. Serv. Univ. of Hawaii (1977) Nr. 144, S. 3/19.
- [19] ● Richter, H.: Rohrhydraulik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer Verlag 1962.
- [20] Ito, H.: Friction factors for turbulent flow in curved pipes. Trans. ASME 2 (1959) S. 123/34.
- [21] ● Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Aarau und Frankfurt/Main: Verlag Sauerländer 1971.