

## Hydrologische Prozesse in Bodenstreu Einige experimentelle Befunde

Von PETER J. VOIGT, Kiel und RORY P. D. WALSH, Cambridge (GB)

Mit 11 Abb.

### Einführung

Absicht dieses Aufsatzes ist es, Art und Bedeutung von hydrologischen Prozessen in Buchenlaub- und Kiefernadelstreu<sup>1</sup> (L-Horizont in der Bodenkunde) näher zu untersuchen und diese Prozesse mit quantifizierbaren Eigenschaften der Vegetation in Beziehung zu setzen.

Die Bedeutung der Vegetation in hydrologischen und geomorphologischen Systemen wird schon seit langem hervorgehoben. Aber obwohl viele, durch Vegetation verursachte Wirkungen gemessen worden sind, so mangelt es bisher an systematischen Untersuchungen über Beziehungen zwischen den bislang bekannten Ergebnissen (Wirkungen) und den dafür verantwortlichen Eigenschaften der Vegetation. Mit anderen Worten wurden zwar die Wirkungen und Leistungen der Vegetation quantifiziert, nicht aber ihre Ursachen. Es sind zum Beispiel Interceptionsdifferenzen und unterschiedliche Mengen durchtropfenden Regens<sup>2</sup> unter verschiedenen Kronendächern des Waldes gemessen worden, die Eigenschaften der Vegetation, die für diese Unterschiede verantwortlich sind, wurden aber kaum ausreichend angegeben und mit den Interceptionsprozessen in Verbindung gebracht. Somit bestand eine unserer wesentlichen Aufgaben darin, Prozesse mit quantifizierbaren Größen der Vegetation in Beziehung zu setzen (—→ Ursachen).

Es ist bisher beträchtliche Arbeit hinsichtlich der Interception von Niederschlag durch die Pflanzenwelt über dem Waldboden geleistet worden (z. B.: FREISE 1936; BRECHTEL 1969, 1970, 1971; SWANK, GOEBEL und HELVEY 1972; THOMPSON 1972), jedoch erst relativ wenige Aussagen sind über die Interception durch Laubstreu auf dem Waldboden und über ihre resultierenden Wirkungen bekannt geworden. Mit Ausnahme eines Beitrages von LOWDERMILK (1930) sind die

<sup>1</sup>) Die beiden Begriffe „Laubstreu“ und „Bodenstreu“ sollen im Folgenden als Synonyme verwendet werden.

<sup>2</sup>) „Der durchtropfende Regen (engl.: throughfall) besteht aus den Freilandtropfen, die durch Zufall den Weg ungehindert durch die Kronen fanden, in der Hauptsache aber aus großen Tropfen, die von den Spitzen der Nadeln, Blätter oder Äste herabfallen.“ (GEIGER 1961, S. 344).

auf Bodenstreu bezogenen Aussagen rein qualitativ und sehr lückenhaft im Detail. Dennoch sind die Auswirkungen der Bodenstreu unter hydrologischem und geomorphologischem Aspekt weitreichend. So wurde zum Beispiel beobachtet, daß eine gleichmäßig dicht gepackte Bodenstreuendecke auf einem bewaldeten Hang durchaus oberflächlichen Abfluß (engl.: overland flow) und sogar Boden-erosion erzeugen kann (PIERCE 1967; RUXTON 1967). Gewöhnlich aber sind die hohe Speicherkapazität und die Schutzeigenschaften der Laubstreu für den Waldboden gegenüber dem Abfluß und der Regentropfenerosion (engl.: rain-splash erosion) betont worden (z. B.: BRECHTEL 1970). Bodenstreu ist weiterhin ein wesentlicher Faktor für die Beibehaltung der Bodenstruktur, hinsichtlich der Infiltrationsraten in den obersten Bodenhorizonten und sowohl für den Nährstoffkreislauf als auch für Verwitterungsvorgänge. Zuletzt, aber von größter Bedeutung im Zusammenhang dieses Aufsatzes, wurde die Rolle der Bodenstreu gegenüber dem Interceptionsvermögen in begrenztem Ausmaß untersucht. Deutsche, rumänische und tschechoslowakische Messungen in Wäldern hatten ergeben, daß 40% des Niederschlages von der Laubstreu festgehalten werden (ZINKE 1967; KREČMER 1969; BRECHTEL 1970; BRECHTEL und KREČMER 1971). Auf die Art der spezifischen Prozesse, die die Retention bewirken, ist jedoch nicht eingegangen worden, und die Eigenschaften von Vegetation und Laubstreu, die prozeßkontrollierend sind, wurden weder differenzierter behandelt noch erfolgten qualitative Aussagen. Es gibt somit viele Fragen, deren Beantwortung noch aussteht. Welcher Bodenstreubetrag (Gewicht/Fläche) hält 20%, 30% oder 40% des Niederschlages? Wie sind räumliche und jahreszeitliche Verteilungen verschiedener Laubstreuarten in unterschiedlichen Vegetations- und Klimazonen der Erde? Ist die Bodenstreu einer Pflanzenart hinsichtlich der Retention wirkungsvoller als die einer anderen? Ist dieses Retentionspotential bei einer alten, bereits zersetzten Laubstreuendecke größer oder kleiner als bei frisch gefallenem Laub? Das sind nur einige wenige Fragen, die unbeantwortet blieben. Es ist daher eine Absicht dieses Aufsatzes, mit einer Beantwortung zu beginnen.

### Ziele und Ausführungen der Untersuchungen

In diesem Aufsatz wird die Art der hydrologischen Prozesse in Bodenstreu unter experimentellen, kontrollierten Laborbedingungen untersucht. Zwei deutlich voneinander unterscheidbare Laubstreuarten wurden bei den Versuchen benutzt: Buchenblätter (*Fagus sylvatica*) und Kiefernadeln (*Pinus sylvestris*). Die Bodenstreuproben wurden im November 1974 in einem Buchenwald in Cambridgeshire (England) und in einem Kiefernwald nahe der Stadt Thetford, Suffolk (England) gesammelt.

Es galt nun die Basishypothese unserer Arbeit zu prüfen, daß die von Laubstreu zurückgehaltene Niederschlagsmenge von folgenden Faktoren kontrolliert wird:

1. Bodenstreueigenschaften wie etwa Pflanzenart, individuelle und aggregierte Blatt- und Nadeleigenschaften, Gewicht (pro Flächeneinheit) der Laubstreu.
2. Niederschlagscharakteristika: Dauer, Menge, Intensität.

Die experimentellen Ausführungen erfolgten in zwei unterschiedlichen Abläufen. In der ersten experimentellen Folge wurde versucht, die potentielle Retention von einzelnen Buchenblättern und Kiefernadeln zu bestimmen und zu geometrischen und Gewichtseigenschaften der individuellen toten Blätter und Nadeln in Beziehung zu setzen. Die zweite Reihe von Versuchen sollte Angaben zur aktuellen (tatsächlichen) Retention von Bodenstreu (Summe aller Blätter bzw. Nadeln) liefern. Die dabei abgelaufenen hydrologischen Prozesse wurden unter kontrollierten Niederschlagsbedingungen und definierten Mengen Laubstreu sowohl für Kiefernadeln- als auch für Buchenblätterstreu analysiert.

### Potentielle Retentionseigenschaften von Buchenblättern und Kiefernadeln

#### Experimenteller Ablauf

Die für die Untersuchungen herangezogenen Blätter und Nadeln wurden wahllos der im Gelände gesammelten Streu entnommen und in einem Ofen 12 Stunden bei 40 Grad Celsius getrocknet. Bei jedem Buchenblatt wurden danach folgende Größen gemessen:

1. Maximale Blattlänge (a).
2. Maximale Blattbreite (b); im rechten Winkel zur a-Achse gemessen.
3. Trockengewicht eines Blattes (Wd).

Aus den Meßwerten wurde das Blatt-Längenverhältnis ( $E = a/b$ ) und die Blattfläche (A) errechnet. Zur Berechnung der Blattfläche wurde eine einfache aber genaue Näherungsgleichung herangezogen:  $\frac{2}{3} a \cdot b$  (GRUBB et alia 1963). Blattgrößenklassen wurden unter Bezugnahme auf die folgende Klassifikation aufgestellt (RAUNKIAER 1934; überarbeitet von WEBB 1959):

Tabelle 1: Blattgrößenklassifikation

Klasse	Klassenkennziffer	Blattfläche (mm <sup>2</sup> )
Leptophylla - - - - -	1	< 25
Nonophylla - - - - -	2	25 — 225
Microphylla - - - - -	3	225 — 2 025
Notophylla - - - - -	4	2 025 — 4 500
Mesophylla - - - - -	5	4 500 — 18 225
Macrophylla - - - - -	6	18 225 — 164 025
Megaphylla - - - - -	7	> 164 025

Bei den Kiefernadeln wurden die folgenden Messungen an einzelnen Nadeln und nicht an der aus zwei Nadeln zusammengesetzten Einheit vorgenommen:

1. Nadellänge (a).
2. Trockengewicht einer Nadel (Wd).

Nach Beendigung der genannten Meßvorgänge wurde jedes Buchenblatt bzw. jede Kiefernnadel einzeln in dafür vorgesehene Wassergefäße eingetaucht. Die Temperatur des Wassers betrug 17 Grad Celsius. Nach 10 Minuten Wasserbad wurde jedes Blatt bzw. Nadel aus dem Behälter genommen, fünf Sekunden kräftig geschüttelt, um Wassertropfen zu entfernen und dann erneut gewogen. Das nun bestimmte Blattgewicht bzw. Nadelgewicht wurde als Naßgewicht ( $W_w$ ) bezeichnet. Durch Subtraktion ermittelten wir das Gewicht des von jedem Blatt und jeder Nadel zurückgehaltenen Wassers und bezeichneten es als Retention  $R_L$  ( $R_L = W_w - W_d$ ). Wir haben somit ein Maß für das potentielle Wasserspeichervermögen eines Blattes bzw. einer Nadel erhalten, wobei Wasser durch physikalische Kräfte wie Absorption, Adsorption und starke Oberflächenadhäsion gehalten wird. Insgesamt wurden 300 Buchenblätter und 150 Kiefernnadeln dem oben beschriebenen Verfahren unterzogen.

### Ergebnisse

Die charakteristischen Eigenschaften der Blätter und Nadeln sind in Tabelle 2 (Mittelwerte) und in Abbildung 1 a und 1 b (Histogramme, welche die Variabilität zeigen) dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung charakteristischer Eigenschaften von einzelnen Buchenblättern und Kiefernnadeln (Mittelwerte)

	Buche	Kiefer
Länge (mm) - - - - -	62,67	113,2
Breite (mm) - - - - -	44,39	
Blatt-Längenverhältnis - - -	1,41	
Blattfläche (mm <sup>2</sup> ) - - - - -	1 887,50	
Trockengewicht (g) - - - - -	0,116	0,035
Relativer Anteil der Blattgrößen:		
Micro (%) - - - - -	65,0	
Noto (%) - - - - -	32,5	
Meso (%) - - - - -	2,5	

Bei den Buchenblättern zeigt die Beziehung des Trockengewichtes  $W_d$  zur Blattfläche  $A$  eine relativ stramme Korrelation:

$$\text{Regression: } W_d = 0,044 + 0,00004102 A$$

mit  $r = 0,71$  und  $r^2 = 49,7\%$  auf einem Signifikanzniveau von 95%.

( $r = \text{Produkt} - \text{Moment} - \text{Korrelationskoeffizient}$ ).

Zwischen dem Trockengewicht  $W_d$  und der Nadellänge  $a$  liegt bei den Kiefernnadeln eine gute Korrelation vor, wie aus folgender Gleichung ersichtlich wird:

$$\text{Regression: } W_d = -0,02147 + 0,0004764 a$$

mit  $r = 0,70$  und  $r^2 = 49\%$  auf einem Signifikanzniveau von 95%.

Die Ergebnisse aus den Messungen zur potentiellen Retention sind wie folgt kurz dargestellt (Graphische Zusammenfassung in Abb. 2):

Abbildung 1: Variabilität der Blatt- und Nadeleigenschaften

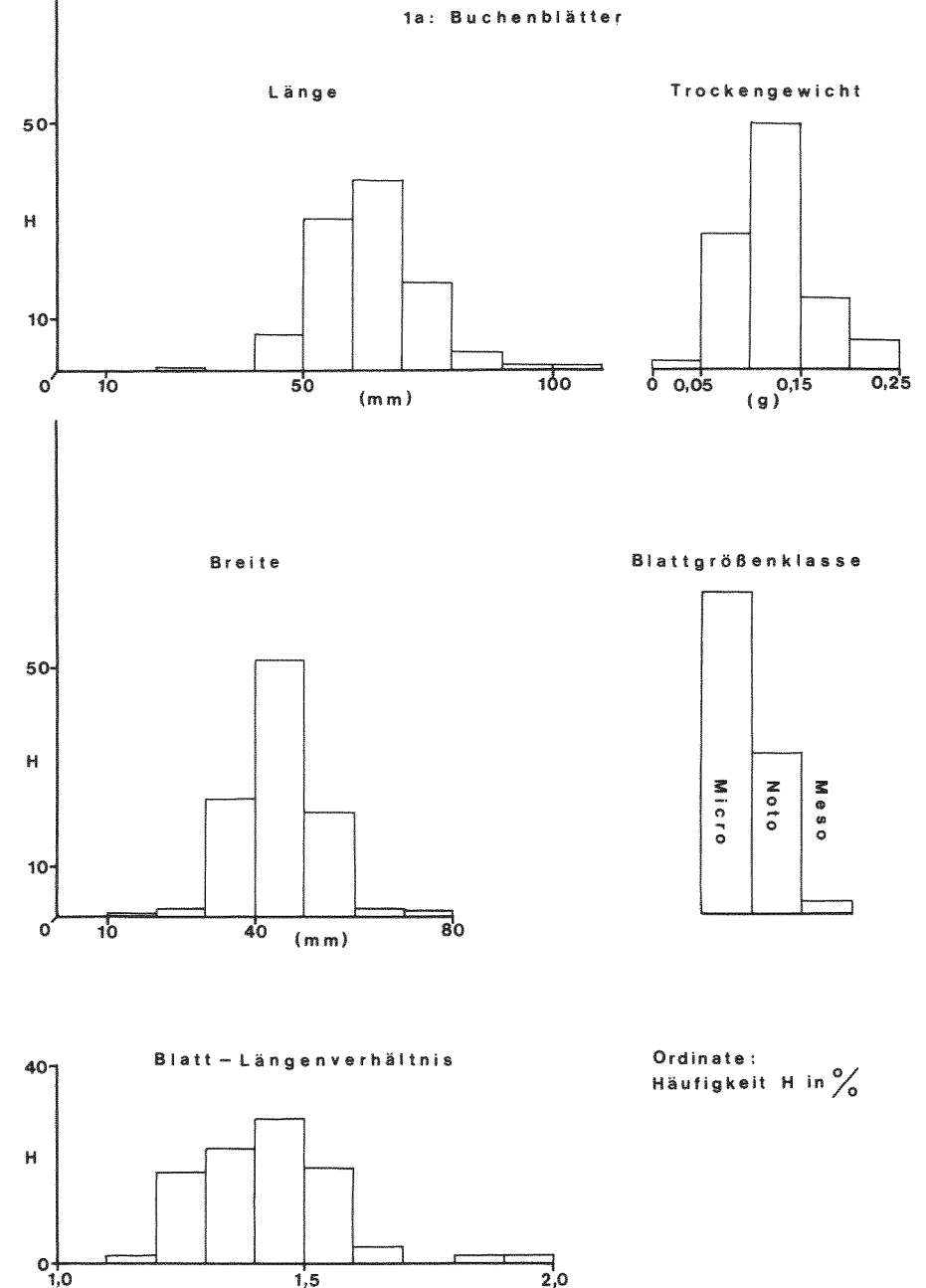


Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses Retention : Trockengewicht

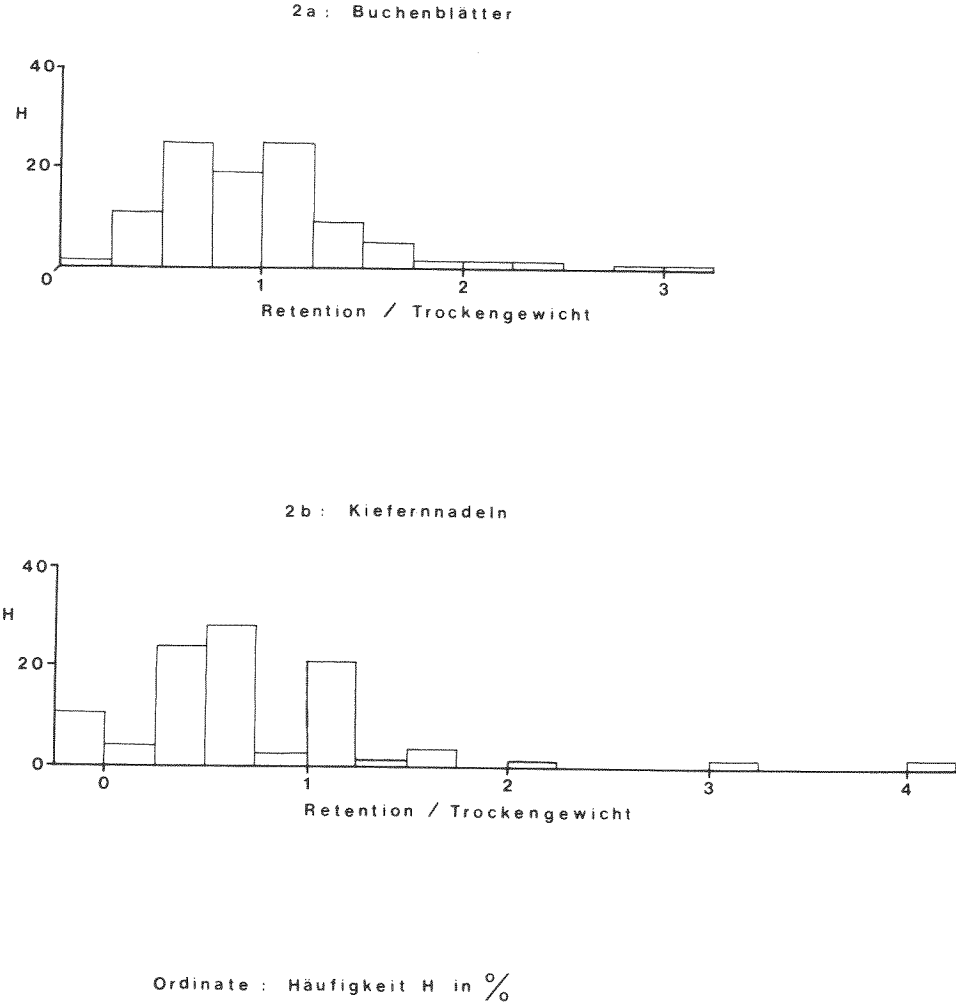
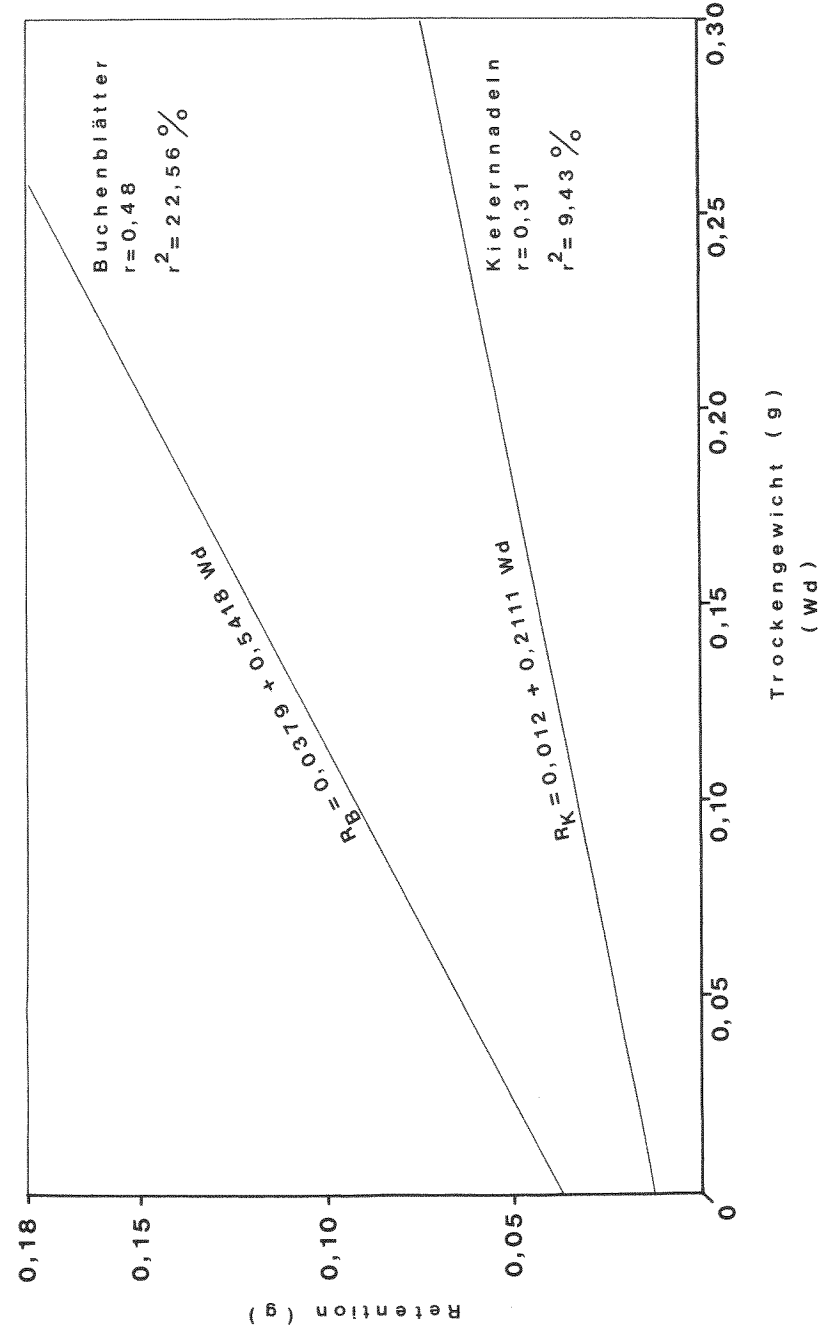
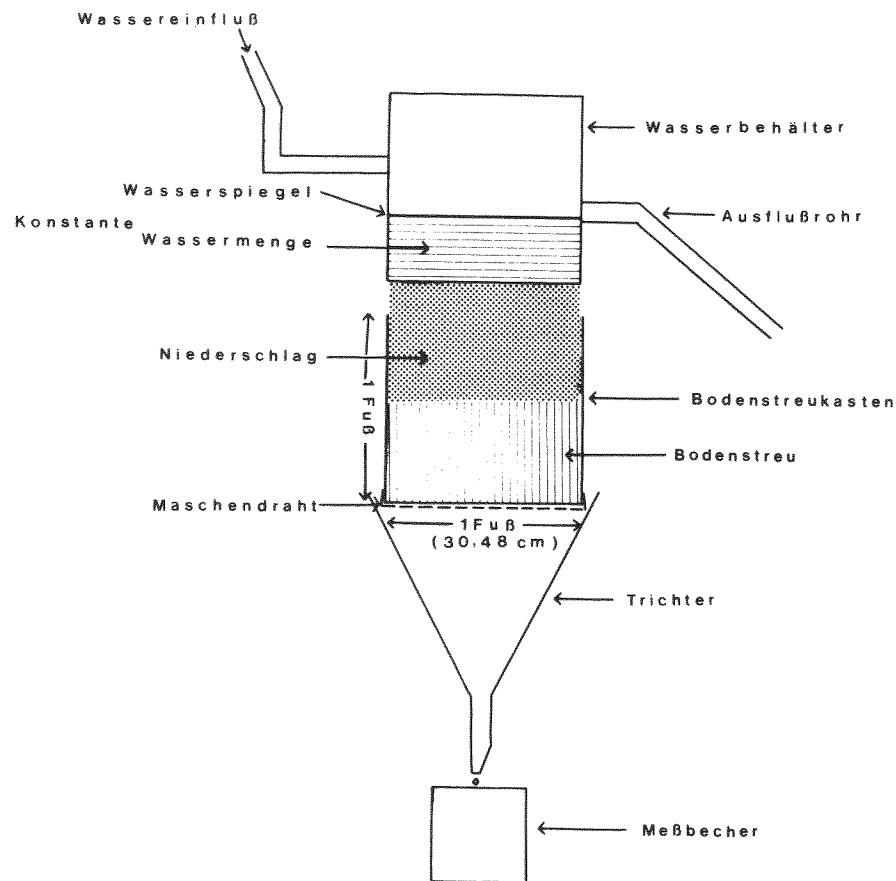


Abbildung 2c: Regressionen: Trockengewicht - Retention





**Abbildung 3 : Versuchsanordnung zur Bestimmung der Retention in Bodenstreu**

Buchenblätter speichern bei Betrachtung gleicher Gewichtseinheiten mehr Wasser als Kiefernadeln. Erstere haben ein mittleres Retentionsvermögen pro Blatt von 0,100 Gramm Wasser; im Vergleich dazu sei das mittlere Trockengewicht der Blätter von 0,115 Gramm zu sehen! Die mittlere Retentionsrate beläuft sich somit auf 0,87. (Retentionsrate = Gewicht des gespeicherten Wassers/ Gewicht des trockenen Blattes).

Bei den Kiefernadeln beträgt das mittlere Retentionsvermögen 0,019 Gramm, während das mittlere Trockengewicht der Nadeln mit 0,035 Gramm anzusetzen ist. Daraus ergibt sich die mittlere Retentionsrate von nur 0,54. Mit anderen Worten gesagt bedeutet das bei Buchenblättern eine durchschnittliche Retention (Wasser) von 0,87 mal des eigenen Gewichtes; eine durchschnittliche (statistischer Mittelwert) Kiefernadel hält dagegen nur das 0,54fache des eigenen Gewichts an Wasser zurück. Abbildung 2c zeigt die für das Trockengewicht der Blätter und Nadeln und die Retention (von Wasser) errechneten Regressionsgleichungen und Regressionsgeraden, die deutlich den Unterschied zwischen Buchenblättern und Kiefernadeln in Bezug auf das Wasserretentionspotential zeigen. Die Aussagen in Abb. 2c basieren bei den Buchenblättern auf einem Signifikanzniveau von 99,5% und bei den Kiefernadeln von 97,5%. Die Neigung der Regressionsgeraden (Abb. 2c) ist bei den Buchenblättern bedeutend größer als bei den Kiefernadeln, und damit nimmt die Differenz im Retentionspotential mit steigendem Blatt- und Nadelgewicht zu. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, da Buchenblätter hinsichtlich des Retentionsvermögens weitaus abhängiger von der Blattflächengröße sind, als es bei Kiefernadeln der Fall ist. Man sollte ebenfalls den besseren Korrelationskoeffizienten beachten, der diesbezüglich bei den Buchenblättern erhalten wurde. Auch das ist ein weiteres Zeichen dafür, daß bei den Kiefernadeln das Trockengewicht nicht der einzige wesentliche, das Retentionsvermögen steuernde Faktor ist. Die eben angeführten Überlegungen sollen nun zu einer Erörterung der Parameter führen, die die Fähigkeit der Nadeln und Blätter, Feuchtigkeit aufzunehmen, beeinflussen.

Die Retention von Wasser durch Buchenblätter und Kiefernadeln und deren Regulatoren

Die Tatsache, daß obige Regressionen zwischen Retention und Trockengewicht

a) relativ schwache Korrelationskoeffizienten aufweisen (wenn auch hochsignifikant) und

b) sich wesentlich von einer Art (Buche) zur anderen (Kiefer) unterscheiden, läßt offensichtlich werden, daß die Retention von Wasser nicht nur vom Trockengewicht der Blätter und Nadeln abhängig ist. Welche anderen Faktoren müssen Berücksichtigung finden, und welche Prozesse sind zu beachten?

Grundsätzlich erfolgte in diesen Experimenten die Retention von Wasser auf drei Arten: Absorption, Adsorption und starke Oberflächenadhäsion. Das Absorptionsvermögen wird größtenteils von der Porosität, dem Volumen und der Fähigkeit des Wassers, durch äußere Teile in innere Poren einzudringen gesteuert. Adsorption und Oberflächenadhäsion sind weitgehend mit der Oberflächengröße, dem Relief, der Nervaturdichte und deren Struktur, der Blatt- bzw.

Nadelgestalt und insbesondere mit dem Verhältnis von Oberflächengröße zu Trockengewicht in Verbindung zu bringen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die Art von „oberen“ und „unteren“ Oberflächen oftmals in vielerlei Hinsicht sehr unterschiedlich ist, und viele Eigenschaften der Blätter und Nadeln beruhen auf dem jeweiligen Verwesungsstadium. Drei der genannten Faktoren sollen im folgenden einer näheren, nach Buchenblättern und Kiefernadeln differenzierten Betrachtung unterzogen werden.

### 1) Das Verhältnis von Oberflächengröße zu Gewicht.

Je größer die Blatt- bzw. Nadelfläche, desto höher liegt das Adsorptions- und Adhäsionspotential und desto wahrscheinlicher ist eine größere Anzahl von Öffnungen für gesteigerte Absorptionsraten. Ein Buchenblatt hat in dieser Hinsicht mehr Vorteile als eine zylindrisch geformte Kiefernadel. Berechnungen für ein durchschnittliches Buchenblatt und eine durchschnittliche Kiefernadel zeigen (siehe Tab. 3) einen etwa dreimal höheren Wert des Verhältnisses von Oberflächengröße zu Gewicht beim Buchenblatt gegenüber der Kiefernadel. Die Bedeutung dessen liegt in der Tatsache, daß für gleiche Gewichtsanteile Buchen- und Kiefernstreu (zusammengesetzt aus jeweils durchschnittlich großen Blättern bzw. Nadeln) die zur Wasseraufnahme angebotene Oberfläche in Buchenstreu dreimal größer als in Kiefernstreu ist.

Tabelle 3: Das Verhältnis von Oberflächengröße zu Gewicht

	Mittleres Trockengewicht	Flächen- formel	Gesamt- oberfläche	Oberflächen- größe : Gewicht
Buchenblatt - - - -	0,115 g	2 · Blattfläche	3 774 mm <sup>2</sup>	32 817,4 mm <sup>2</sup> /g
Kiefernadel - - - -	0,035 g	2πrl + 2πr <sup>2</sup>	357 mm <sup>2</sup>	10 165,7 mm <sup>2</sup> /g

In der Flächenformel von Tab. 3 bedeuten: r = Radius und l = Länge.

### 2) Organische Zusammensetzung der Blätter und Nadeln.

Buchenblätter sind relativ wasserabsorbierend verglichen mit den harten externen und internen Wachsschichten (bis zu 10 Lagen) der Kiefernadeln. Der daraus resultierende Unterschied im Adsorptionspotential ist bereits für lebende Blätter und Nadeln bei Interception über dem Waldboden von GEIGER (1961, S. 349) hervorgehoben worden.

### 3) Oberflächengestalt (Relief).

Buchenblätter besitzen ungleichmäßigere Oberflächen, besonders an ihrer Unterseite (Nervaturstruktur usw.), als Kiefernadeln, die von harten und glatten Außenschichten umgeben sind. Der unter 1) genannte Oberflächeneffekt wirkt sich somit nur noch stärker zugunsten der Buchenblätter aus.

### Folgerungen

Unter Verwendung der gemessenen und errechneten Werte der potentiellen Retentionseigenschaften von individuellen Blättern und Nadeln ist man in der Lage, annähernde Voraussagen über die potentielle Retentionskapazität (= maxi-

males Wasseraufnahmevermögen) einer Bodenstreuerschicht als Ganzes zu geben. Die einfachste Methode ist die Erweiterung (Extrapolation) der Werte (Retentionseigenschaften) des durchschnittlichen Buchenblattes und der Kiefernadel zu Werten einer Bodenstreu, die aus vielen solcher Durchschnittsblätter bzw. Nadeln zusammengesetzt ist. Siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Extrapolierte potentielle Retention in Bodenstreu

Bodenstreugewicht	Potentielle Retentionskapazität	
	Buchenblätterstreu	Kiefernadelstreu
100 g/929 cm <sup>2</sup>	87 g	54 g
200 g/929 cm <sup>2</sup>	174 g	108 g
300 g/929 cm <sup>2</sup>	261 g	162 g

(Die Bezugsgröße 929 cm<sup>2</sup> in Tab. 4 ist die Abmessung des im nächsten Abschnitt genauer behandelten Perkulationskastens. 1 square foot = 929 cm<sup>2</sup>).

Ein durchschnittliches Buchenblatt (Trockengewicht 0,115 g; Retention 0,1 g; siehe auch Abb. 2) hat eine Retentionsrate von 0,87. Somit sollte eine 100 Gramm schwere Buchenstreu eine potentielle Retentionskapazität von 87 Gramm besitzen. Bei Kiefernadeln ist die Retentionsrate 0,54. Die daraus extrapolierte maximale Wasseraufnahmefähigkeit einer 100 Gramm schweren Kiefernstreu wäre demnach mit 54 Gramm anzugeben.

Tatsächliche (aktuelle) Perkulation und Retention in Buchen- und Kiefernstreu bei variierenden Niederschlagsbedingungen

Im vorausgegangenen Abschnitt wurden die Retentionseigenschaften von einzelnen Blättern und Nadeln untersucht. Aber wie weit lassen sich die gewonnenen Befunde auf die entsprechende Bodenstreu übertragen und anwenden? Welche hydrologischen Prozesse laufen in der Bodenstreu ab? Dieser Abschnitt sucht nach Erklärungen für Retention und anderen hydrologischen Vorgängen in Buchenblatt- und Kiefernadelstreu von unterschiedlicher Menge und unter variierenden Niederschlagsbedingungen.

### Methoden, Anlage und Ablauf der Experimente

Kiefern- und Buchenstreu von 100, 200 und 300 Gramm Gewicht wurden auf einer 929 cm<sup>2</sup> (1 square foot) großen Fläche ausgebreitet und Niederschlag unterschiedlicher Intensität von 5, 10 und 15 Minuten Dauer ausgesetzt. Die Versuche wurden mit Hilfe einer einfachen Anlage (siehe Abb. 3) durchgeführt. Der simulierte Niederschlag wurde von einem Wassertank mit gleichen Flächen von je 929 cm<sup>2</sup> erzeugt. Im weiteren Versuchsverlauf fiel der Regen in einen Behälter mit ebenfalls gleichen Flächen von je 929 cm<sup>2</sup>, der die Bodenstreu enthielt. Der Boden des Kastens bestand aus Maschendraht mit Maschenbreiten von 3,81 cm (1,5 inch) und war dazu bestimmt, sowohl die Streu zu halten, als auch weitgehend freien Fall des durchgesickerten Wassers zu gewährleisten. Das durchgetropfte Wasser wurde in Meßbehältern unter dem Bodenstreukasten aufgefangen.

Bei jedem der insgesamt 57 Versuchsabläufe wurde eine der vorher beschriebenen Mengen an trockener Buchen- oder Kiefernstreu in den dafür vorgesehenen Behälter „gelegt“. Die Streuanordnung war zufällig: Jedes Blatt und jede Nadel wurde aus einer Höhe von etwa 30 cm über dem Streubehälter fallengelassen, um auf diese Weise eine natürliche Bodenstreudecke grob zu simulieren. Aus diesem Vorgang resultierte u. a. eine relativ gleichmäßige Streuoberfläche. Die Bodenstreu wurde dann der Beregnung mit definierter Intensität und Dauer ausgesetzt. Die Messungen der perkolierten Wassermengen erfolgten alle 30 Sekunden nach dem Einsetzen des Niederschlages und wurden auch nach der Beregnung fortgesetzt, solange bis kein durchsickerndes Wasser mehr zu registrieren war.

#### Ergebnisse: A. Perkolation

Einzelheiten der Versuchsergebnisse sind in Tabelle 5a und 5b aufgeführt. Die Perkulationskurven, von denen vier Beispiele in Abbildung 4a, b, c, d zu sehen sind, neigen alle zu den im folgenden näher erläuterten sechs Besonderheiten:

#### 1. Schnelle Zunahme der Perkolation kurz nach dem Einsetzen des Niederschlages

Der rasche Anstieg erfolgte am schnellsten bei den kleineren Mengen der Kiefernstreu und verzögerte sich am meisten bei großen Buchenstreuemengen. Das erste Wasser war im Falle von 100 Gramm Kiefernstreu bereits zwei Sekunden nach Beregnungsbeginn durchgesickert, während bei einigen Buchenstreu- anordnungen diese Zeit bis zu 30 Sekunden ausgedehnt wurde. Die rasche Perkulationszunahme hielt ein bis zwei Minuten an und erfolgte bei der Kiefernstreu etwas schneller (steilerer Kurvenast), war aber von geringfügig kürzerer Dauer als in der Buchenstreu.

#### 2. Erster Fließgleichgewichtszustand

Diese Phase wurde entsprechend der Versuchsanordnung nach ein bis drei Minuten erreicht, früher bei kleinen Streumengen im allgemeinen und bei Kiefernstreu im besonderen und später bei dicken und/oder Buchenstrelagen. Der teilweise starken Schwankungen unterlegene Fließgleichgewichtszustand hielt weitere drei bis sieben Minuten an. Die durchschnittliche Perkulationsmenge blieb hierbei immer unter der Niederschlagsrate.

#### 3. Zweiter plötzlicher Perkulationsanstieg

Er erfolgte je nach Abhängigkeit der an anderer Stelle in diesem Aufsatz genannten Faktoren nach 3,5 bis 7,5 Minuten und ist deshalb in einigen Versuchen mit 5 Minuten Beregnung nicht beobachtet worden. Im allgemeinen kann man den Vorgang als ein plötzliches Anschwellen, das nicht länger als 0,5 bis 1 Minute dauerte, auf ein neues, höheres Perkulationsniveau bezeichnen.

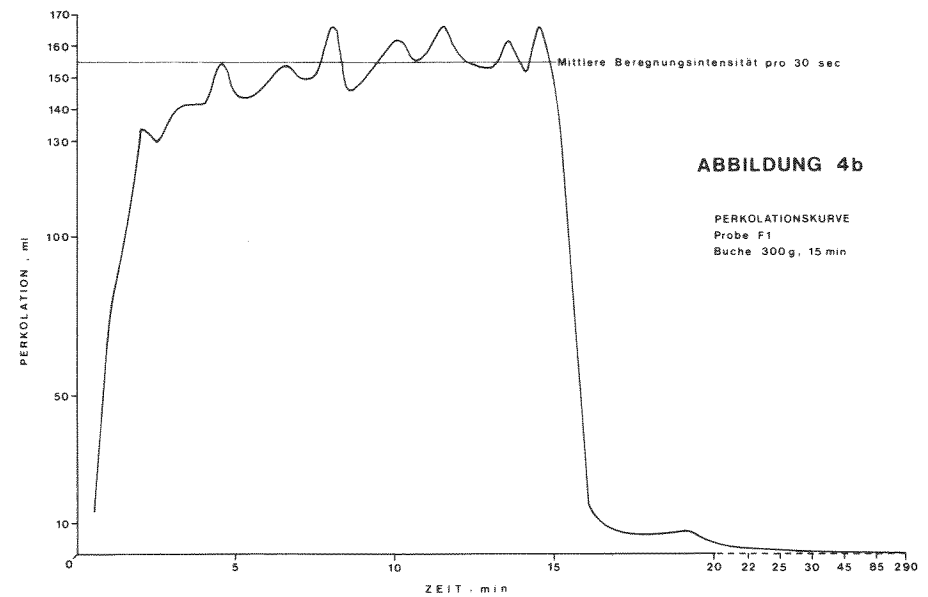
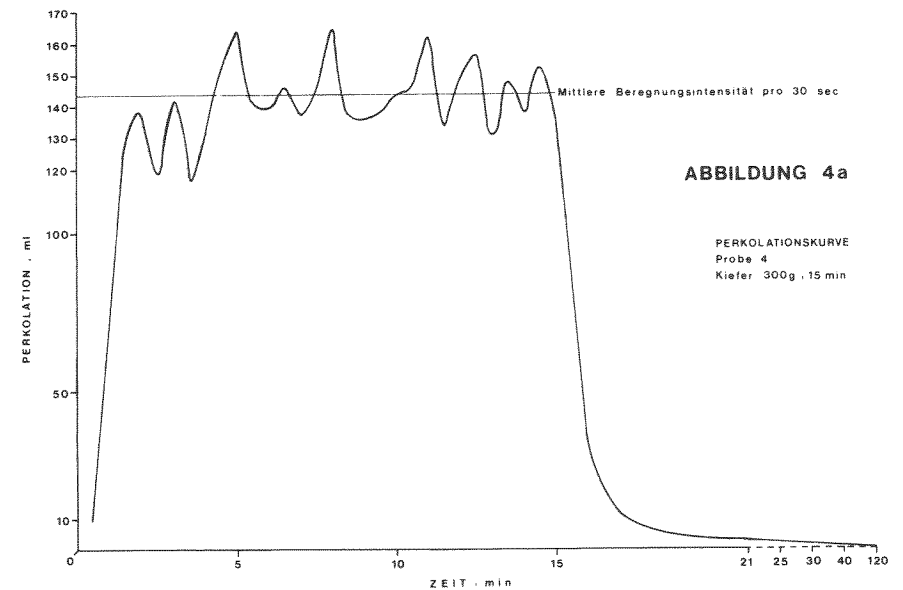


ABBILDUNG 4c

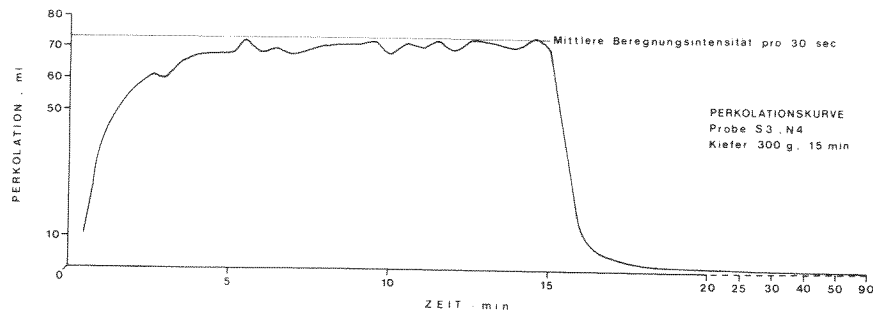


ABBILDUNG 4d

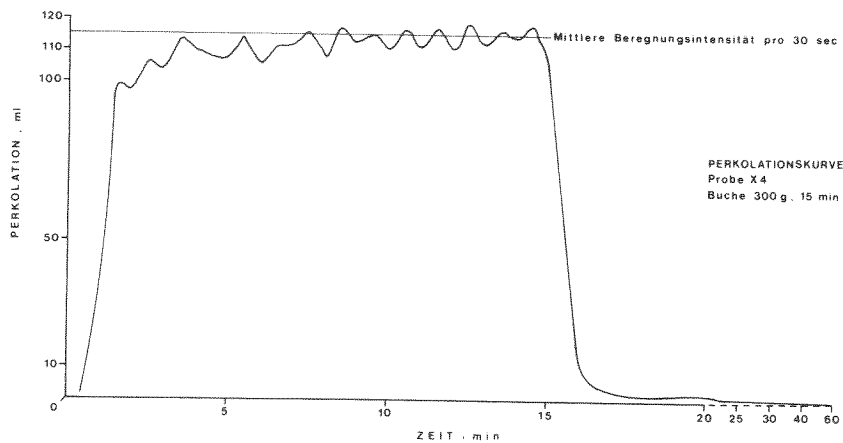


Abbildung 5a : Retention (%) während 5 Minuten Niederschlagsdauer

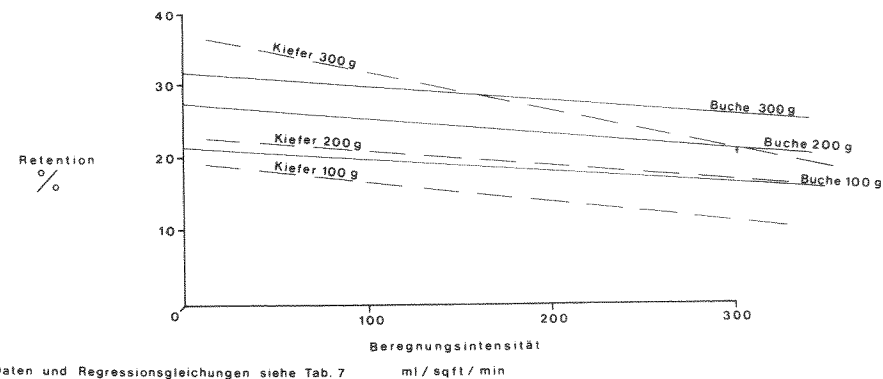


Abbildung 5b : Retention (%) während 10 Minuten Niederschlagsdauer

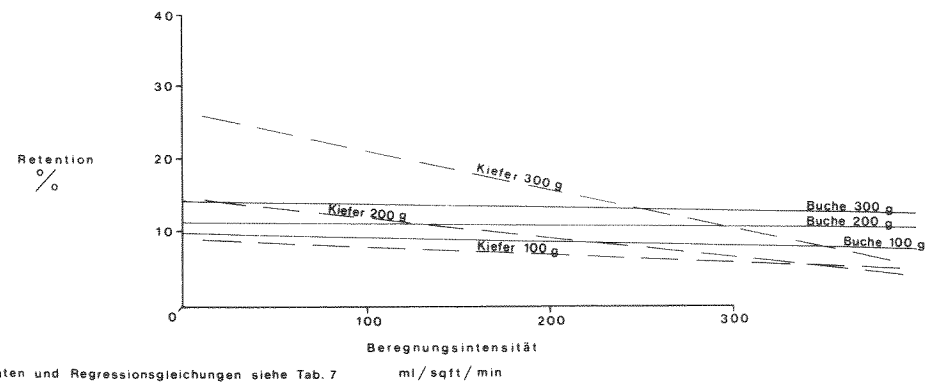


Abbildung 5c : Retention (%) während 15 Minuten Niederschlagsdauer

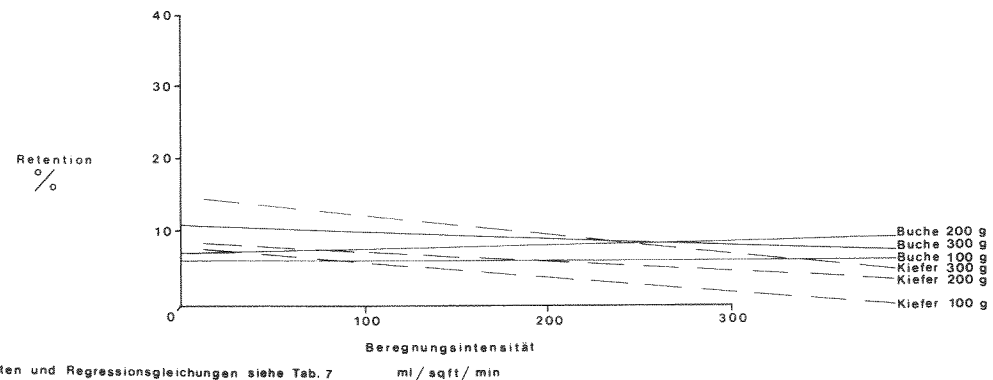




Tabelle 5a : Zusammenfassende Gegenüberstellung der Messergebnisse in Bezug auf die Retention von Niederschlagswasser in Bodenstreu.

Buchenstreu

Bodenstreu- Gewicht (g)	Dauer (min)	N I E D E R S C H L A G S W E R T E		Intensität cm/Std	Intensität ml/sqft/min	Intensität ml/sqft/min	Intensität cm/Std	RETENTION (%)			Absol. RETENTION (ml) Berechnungs- ende	Gesamt
		Menge ml/sqft	Menge cm					5 min	10 min	15 min		
100	5	1528,75	1,65	19,75	305,75	19,75	15,0	9,1			229	124
100	5	1540,00	1,66	19,89	308	19,89	18,0	11,3			277	174
100	5	510,70	0,55	6,60	102,15	6,60	22,5	16,1			115	82
100	10	3030	3,26	39,57	606,3	39,57	8,5	3,7			257	112
100	10	3020	3,25	39,50	604	39,50	8,3	4,8			251	145
100	10	1385	1,49	18,94	313,5	18,94	9,5	7,0			132	97
100	15	4200	5,06	58,40	1161	58,40	5,7	3,1			268	146
100	15	3906	4,21	52,57	1051,5	52,57	5,6	8,5			357	235
200	5	1537,5	1,66	19,86	307,5	19,86	23,0	3,6			203	141
200	5	1555	1,67	20,09	311	20,09	21,7	12,6			354	194
200	5	493,5	0,53	6,37	98,7	6,37	29,8	13,1			337	204
200	10	3030	3,26	39,57	606,3	39,57	11,9	19,7			147	99
200	10	2980	3,21	39,25	584	39,25	7,0	6,3			360	191
200	10	1454	1,57	19,59	311,5	19,59	11,5	2,1			208	63
200	15	4320	4,65	58,20	1161	58,20	8,0	8,0			164	116
200	15	4455	4,80	60,07	1201,5	60,07	14,9	10,3			644	445
200	15	3523,5	3,79	47,87	757,5	47,87	3,9	0,2			174	9
300	5	1590	1,71	20,54	318	20,54	30,9	5,7			275	201
300	5	1500	1,62	19,38	300	19,38	23,9	15,2			491	242
300	5	444,5	0,48	5,74	88,9	5,74	34,7	25,2			154	112
300	10	3105	3,34	40,05	621	40,05	15,9	9,3			358	204
300	10	3033	3,27	39,33	606,6	39,33	11,1	5,7			494	289
300	10	1465	1,58	19,59	311,5	19,59	14,3	10,1			337	173
300	15	4245	4,57	58,20	883,5	58,20	10,4	4,8			209	148
300	15	4650	5,01	60,07	901,5	60,07	8,0	3,2			441	204
300	15	3445,5	3,71	47,87	757,5	47,87	9,1	6,0			313	207
100	15	1167	1,26	15,75	232,5	15,75	5,03	15,0			175	140
200	15	2863,5	3,08	39,74	594,7	39,74	12,33	8,2			235	177

Tabelle 5b : Zusammenfassende Gegenüberstellung der Messergebnisse in Bezug auf die Retention von Niederschlagswasser in Bodenstreu.

Kiefernstreu

Bodenstreu- Gewicht (g)	Dauer (min)	N I E D E R S C H L A G S W E R T E		Intensität cm/Std	Intensität ml/sqft/min	Intensität ml/sqft/min	Intensität cm/Std	RETENTION (%)			Absol. RETENTION (ml) Berechnungs- ende	Gesamt
		Menge ml/sqft	Menge cm					5 min	10 min	15 min		
100	5	1517,5	1,63	19,60	303,5	19,60	9,5	1,7			144	26
100	5	1550	1,67	20,02	310	20,02	12,5	5,6			194	87
100	5	550	0,59	7,10	110	7,10	20,4	14,9			112	82
100	10	3360	3,62	45,70	714	45,70	10,5	7,2			353	242
100	10	3100	3,34	40,05	668	40,05	6,4	3,2			198	99
100	10	1386	1,49	18,94	313,5	18,94	10,0	6,4			139	89
100	15	4466,25	4,81	60,07	963,25	60,07	0,9	0,9			40	40
100	15	4515	4,86	60,07	963,25	60,07	2,7	2,7			121	40
100	15	2448	2,64	36,04	528,6	36,04	4,8	4,8			71	71
200	5	1520	1,64	19,60	304	19,60	20,7	11,6			315	176
200	5	1550	1,65	19,60	304	19,60	20,6	12,3			278	166
200	5	1247	1,34	16,10	249,4	16,10	19,8	9,7			297	121
200	10	3050	3,28	39,57	605	39,57	5,1	0,1			156	3
200	10	2900	3,12	38,70	574	38,70	6,3	0,9			183	26
200	10	1347,9	1,42	18,73	311,5	18,73	12,9	7,3			174	98
200	15	5100	5,49	66,07	1301,5	66,07	6,5	3,4			331	173
200	15	4545	4,89	58,20	1172,25	58,20	4,0	0,6			181	27
200	15	2641,5	2,84	36,04	568,3	36,04	7,3	4,2			193	111
300	5	1520	1,64	19,60	304	19,60	20,5	9,2			312	134
300	5	1480	1,59	19,12	296	19,12	23,7	12,8			351	189
300	5	413	0,44	5,33	82,6	5,33	30,8	21,1			127	87
300	10	3080	3,32	41,66	616	41,66	8,7	1,7			268	52
300	10	2970	3,20	39,25	584	39,25	12,9	5,8			385	172
300	10	1234	1,33	16,10	249,4	16,10	23,2	17,8			286	220
300	15	4505	4,64	58,20	901,5	58,20	6,4	1,3			295	56
300	15	4575	4,93	60,07	907,5	60,07	8,6	4,3			393	197
300	15	2190	2,36	29,52	472,5	29,52	11,5	7,0			252	153
300	5	488	0,53	6,30	97,6	6,30	31,7	25,3			155	123

ANALYSE DER BODENSTREUDATEN

**Tabelle 7 :** Niederschlag (%), der während der Beregnung zurückgehalten wurde.

Abhängige Variable : R : Retention (%) während der Beregnung.  
 Unabhängige Variable : I : Beregnungsintensität (ml/sqft/min).  
 Konstante Größen : V : Vegetationsart (Buchenblätter, Kiefernadeln).  
 D : Niederschlagsdauer (5, 10, 15 Minuten).  
 W : Bodenstreugewicht (100, 200, 300 Gramm).

V	W	D	Regressionsgleichungen	r	r <sup>2</sup> (%)	$\bar{R}$	$\bar{I}$
Buche	100	5	R = -0,0165 I + 21,45	-0,42	17,3	17,22	257,0
Buche	200	5	R = -0,0210 I + 27,55	-0,34	11,4	22,22	253,7
Buche	300	5	R = -0,0202 I + 31,99	-0,44	19,1	26,90	254,4
Kiefer	100	5	R = -0,0273 I + 19,62	-0,63	39,3	12,70	252,2
Kiefer	200	5	R = -0,0205 I + 23,14	-0,50	25,3	17,70	263,2
Kiefer	300	5	R = -0,0507 I + 36,87	-0,89	79,3	24,80	238,8
Buche	100	10	R = -0,0049 I + 10,19	-0,20	4,0	8,9	266,2
Buche	200	10	R = -0,0014 I + 11,66	-0,02	0,1	11,3	261,1
Buche	300	10	R = -0,0038 I + 14,61	-0,14	0,2	13,6	263,8
Kiefer	100	10	R = -0,0104 I + 9,47	-0,29	8,5	6,8	257,8
Kiefer	200	10	R = -0,0263 I + 15,17	-0,77	8,4	8,4	257,6
Kiefer	300	10	R = -0,0541 I + 27,11	-0,89	78,9	13,9	244,4
Buche	100	15	R = -0,0004 I + 6,56	-0,005	---	6,5	284,5
Buche	200	15	R = -0,0053 I + 7,42	-0,03	0,2	8,9	273,3
Buche	300	15	R = -0,0084 I + 11,46	-0,29	8,1	9,2	274,2
Kiefer	100	15	R = -0,0218 I + 8,33	-0,88	77,0	2,8	254,0
Kiefer	200	15	R = -0,0103 I + 8,75	-0,52	26,5	5,9	273,0
Kiefer	300	15	R = -0,0251 I + 15,00	-0,85	72,9	8,8	246,0

Die dazugehörigen Regressionsgeraden sind in Abb. 5 (a,b,c) dargestellt.

r : Regressionskoeffizient

sqft : square foot

1 sqft = 929,5 cm<sup>2</sup>

**Tabelle 8**

Gesamtretention (%) des Niederschlages durch die Bodenstreu : Nettoretention (%).

**Tab. 8a** Abhängige Variable : R : Gesamtretention (%) = Nettoretention (%) = Summe aller Daten während und nach der Beregnung.

Unabhängige Variablen : I : Beregnungsintensität (ml/sqft/min).

W : Bodenstreugewicht (100, 200, 300 Gramm).

Konstante Größen : V : Bodenstreuart (Buchenblätter, Kiefernadeln).

D : Niederschlagsdauer (5, 10, 15 Minuten).

V	D	Regressionsgleichungen	R <sup>2</sup>	Korrelationskoeffizienten			$\bar{W}$	$\bar{R}$
				I - R	W - R	I - W		
Buche	5	R = 17,92 - 0,038 I + 0,030 W	92,76	-0,81	+0,53	-0,01	237,8	14,99
Buche	10	R = 7,64 - 0,018 I + 0,017 W	60,90	-0,55	+0,53	+0,03	250,0	6,33
Buche	15	R = 13,90 - 0,033 I - 0,00003 W	47,88	-0,69	-0,17	+0,25	251,3	5,52
Kiefer	5	R = 17,10 - 0,052 I + 0,036 W	88,65	-0,83	+0,62	-0,23	232,7	12,42
Kiefer	10	R = 13,23 - 0,039 I + 0,011 W	47,58	-0,67	+0,23	-0,09	248,8	5,60
Kiefer	15	R = 4,75 - 0,017 I + 0,012 W	58,56	-0,59	+0,45	+0,05	252,7	3,08

**Tab. 8b** Abhängige Variable : R  
 Unabhängige Variablen : I und D  
 Konstante Größen : V und W

V	W	Regressionsgleichungen	R <sup>2</sup>	Korrelationskoeffizienten			$\bar{D}$	$\bar{R}$
				I - R	D - R	I - D		
Buche	100	R = 21,01 - 0,032 I - 0,056 D	77,00	-0,67	-0,55	-0,03	339,1	7,53
Buche	200	R = 24,53 - 0,028 I - 0,873 D	62,69	-0,43	-0,70	+0,08	247,4	8,42
Buche	300	R = 31,57 - 0,037 I - 1,192 D	89,23	-0,59	-0,84	+0,20	254,4	10,34
Kiefer	100	R = 17,36 - 0,028 I - 0,550 D	57,94	-0,56	-0,50	-0,02	246,5	5,35
Kiefer	200	R = 18,42 - 0,017 I - 0,849 D	63,69	-0,23	-0,76	-0,01	263,2	5,57
Kiefer	300	R = 33,17 - 0,058 I - 1,003 D	91,03	-0,81	-0,69	+0,24	224,7	10,63

Tab. 8c

Abhängige Variable : R : Gesamtretention (%) = Nettoretention (%) = Summe aller Daten während und nach der Beregnung.  
 Unabhängige Variablen : A : Niederschlagsmenge (ml/sqft).  
 W : Bodenstreuergewicht (100, 200, 300 Gramm).  
 Konstante Größe : V : Bodenstreuart (Buchenblätter, Kiefernadeln).  
 Variablen, die nicht beachtet wurden : D : Niederschlagsdauer.  
 I : Beregnungsintensität.

Laut Definition ist natürlich  $A = D \cdot I$ .

V	Regressionsgleichungen	R <sup>2</sup>	Korrelationskoeffizienten			$\bar{A}$	$\bar{W}$	$\bar{R}$
			A - R	W - R	W - A			
Buche	$R = 14,19 + 0,016 W - 0,0033 A$	68,61	-0,80	+0,21	+0,03	2575	196,6	8,71
Kiefer	$R = 10,44 + 0,026 W - 0,0035 A$	64,89	-0,74	+0,34	-0,03	2385	207,4	7,38

Tabelle 9 : Potentielle und aktuelle absolute Retention in Kiefernadeln- und Buchenblätterstreu : ein Vergleich

Bodenstreu- gewicht (g)	B u c h e n b l ä t t e r s t r e u		K i e f e r n n a d e l n s t r e u		
	Pot.Ret. (g)	RE Akt.Ret. (cm)	Pot.Ret. (g)	RE Akt.Ret. (cm)	RE Differenz Akt.R.-Pot.R.
100	87	0,09	140	0,15	+ 53
200	174	0,19	170	0,18	- 4
300	261	0,28	192	0,21	- 69
			54	0,06	82
			108	0,11	100
			162	0,17	138
					+ 28
					- 8
					- 22

RE = Entsprechender Retentionswert (Pot. Ret. oder Akt. Ret.) in äquivalenten Niederschlagshöhen (cm).

4. Zweiter Fließgleichgewichtszustand

3,5 bis 7,5 Minuten nach dem Einsetzen des Niederschlages war diese Phase erreicht. Besonders in Versuchen mit hoher Beregnungsintensität wurden bei der Kiefernstreu mittlere Perkulationsbeträge gemessen, die annähernd gleich der Niederschlagsmenge waren. Damit ist angedeutet, daß das Speichervermögen der Bodenstreu erreicht worden war. In anderen Fällen, besonders bei einigen Buchenexperimenten mit niedriger Beregnungsintensität, blieb der Gleichgewichtszustand noch unter dem Niederschlagsbetrag; diese Tatsache deutet auf fortgesetzte Retention hin. Das zweite Gleichgewichtsstadium wurde deshalb in einigen Fällen durch eine leicht ansteigende Tendenz der Perkulation gekennzeichnet.

Die Schwankungshöhe sowohl während des ersten als auch beim zweiten Gleichgewichtszustand war manchmal beträchtlich (siehe Abb. 4a: 28 ml/30 sek) aber in anderen Experimenten auch bedeutend geringer (siehe Abb. 4c: 5 ml/30 sek und Abb. 4d: 10 ml/30 sek).

Ein anderes wichtiges Phänomen muß ebenfalls in Betracht gezogen werden. Manche Perkulationsraten (vor allem die obersten Bereiche der Schwankungen, wie aus den Perkulationskurven in Abb. 4 ersichtlich) sind oftmals größer als der Niederschlagsbetrag. Gründe für dieses auf den ersten Blick eigenartige Verhalten und für die Oszillationen werden später in diesem Aufsatz einer Beleuchtung und Diskussion unterworfen.

5. Schnelle Perkulationsabnahme nach Beendigung der Beregnung

War das zweite Fließgleichgewichtsstadium erst einmal aufgebaut, so konnte es bis zum Niederschlagsende beobachtet werden. Sobald jedoch der Regen vorüber war, sank jedesmal in der folgenden Minute die durchsickernde Wassermenge schnell ab. Daß die Perkulationsraten während dieser Minute dennoch relativ hoch waren, ist mit der verzögernden Wirkung der Streu auf die Wasserperkulation zu erklären. Dabei gilt: Je größer die Bodenstreuemenge, desto länger ist die Verzögerungswirkung und desto höher sind die Perkulationsbeträge nach der Beregnungszeit. In dieser Hinsicht sind keine bedeutsamen Unterschiede zwischen Buchenstreu und Kiefernstreu gefunden worden. (Siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Mittlere Perkulationsmengen nach Beregnungseinstellung, ausgedrückt in % des Gesamtniederschlages

Beregnungsdauer	Buchenblätterstreu			Kiefernadelstreu		
	100 g	200 g	300 g	100 g	200 g	300 g
5 min	6,6%	9,7%	11,8%	6,7%	9,2%	10,6%
10 min	3,3%	4,6%	5,4%	3,4%	5,3%	6,5%
15 min	2,7%	3,5%	4,5%	1,5%	3,2%	4,6%

Wie aus den Tabellen 5 und 6 weiterhin ersichtlich ist, sinkt in jedem Fall der Prozentsatz an Perkulation nach dem Niederschlag mit zunehmender Beregnungsdauer und damit größerer Gesamtregenmenge. Daraus ergibt sich, daß bei

kurzen Regenfällen auf große Bodenstremengen ein hoher Anteil der Perkolation nach dem Niederschlag zu verzeichnen ist, wobei der größte Teil auf die erste Minute nach dem Aussetzen der Beregnung fällt.

## 6. Langsames Abflauen der verzögerten Perkolation

Verhältnismäßig niedrige aber unbedingt beachtenswerte Mengen perkolierendes Wassers folgten in einem langen, langsam ausdünnenden letzten Teil. Das Tropfen des Wassers von der Bodenstreu setzte sich lange nachdem der Niederschlag geendet hatte fort und dauerte hinsichtlich der auf den Wasserablauf günstigeren Eigenschaften der Kiefernadeln in derselben Streu mindestens 20 Minuten und wurde bei einigen dicken Bodenstreuungen (vor allem der Buchenblätter) mindestens eine Stunde, meist jedoch länger und bis zu fünf Stunden registriert.

Die eigentliche Wirkung der unter 5. und 6. dargelegten Vorgänge besteht in der Reduzierung der indirekten Niederschlagszufuhr auf die Bodenoberfläche, indem der Regen verhältnismäßig gleich pro Zeiteinheit verteilt wird. Dem steht die Tendenz der Bodenstreu gegenüber, durchsickerndes Wasser in bestimmten Bahnen zu konzentrieren, so daß auf diese Weise einigen Stellen der Bodenoberfläche ein Übermaß an Wasser zugeführt wird.

## Versuch einer Deutung der Fließgleichgewichtszustände

Bereits während der Durchführung der Experimente wurden Fluktuationen im rhythmischen Austritt des Wassers nach dem Durchgang durch die Streu festgestellt und später von den angefertigten Perkulationskurven (Abb. 4) bestätigt. Da wir konstante Beregnung voraussetzten, können intermittierende Wanderungsvorgänge des Wassers in der Bodenstreu nicht ausgeschlossen werden. Die dabei auftretenden physikalischen Prozesse wurden bei rhythmischen Tonabscheidungen bereits festgestellt bzw. als Erklärung der Wanderungs- und Ausfällungsvorgänge von peptisierten Tönen herangezogen (FOCKS und RIECKEN 1956; BREWER und HALDANE 1957; BARTELLI und ODELL 1960; HALLSWORTH 1963; FRÄNZLE 1969). Analog dazu können die im Bodenstreukörper ablaufenden Prozesse gesehen werden, und die physikalische Erklärung bei den Tonabscheidungsprozessen kann zum Teil auf die Perkulationsvorgänge in Bodenstreuungen übertragen werden. Zwei dieser Prozesse und zwei weitere, die für die Bodenstreu spezifisch sind und Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen darstellen sollen im Folgenden erläutert und zur Diskussion gestellt werden.

### 1. Theorie von Unstetigkeitsflächen

Dieser Prozeß basiert auf dem Konzept der Existenz einer Unstetigkeitsfläche oder mehrerer dieser Flächen als notwendige Voraussetzung für den rhythmischen Wasseraustritt. Die Fläche trennt liegende, leichter durchlässige Bodenstreu-schichten von hangenden, schwerer durchlässigen. Unter dieser Bedingung wird der Sickerwasserübertritt gehemmt und Wasser in der Hangendschicht solange angereichert, bis die Saugspannung auf eine Atmosphäre Druck gesunken ist. Die dann einsetzende vertikale Wasserbewegung erfolgt in der Regel nicht gleich-

mäßig, sondern konzentriert sich auf einzelne Bahnen, in denen das Wasser in liegende Streuschichten transportiert wird. In einer trockenen Bodenstreu sickert der größte Teil des Wassers zunächst schnell bis zum ersten Gleichgewichtszustand hindurch. Mit der Ausbildung des zweiten Gleichgewichtszustandes sollte man Anstauen des Wassers in der Streu und einen plötzlichen Abfall der Saugspannung erwarten. Wenn das Gleichgewicht erst einmal errichtet worden ist, kann das immer wiederkehrende Vorkommen von Perkulationserschüben als wiederholende Zu- und Abnahme der Saugspannung über und unter den Wert von einer Atmosphäre Druck angesehen werden.

### 2. Druckwellenprozesse

Diese beinhalten die möglicherweise in Form von Druckwellen erfolgende Sickerwasserbewegung, die pulsierende Variationen in der Perkolation erzeugen könnte. Obwohl dieser Vorgang durchaus in Erwägung gezogen werden sollte, dürften eventuelle Druckwellen als alleinige Erklärung für die hohen Amplituden und Schwankungen im Perkulationsoutput nicht ausreichend sein.

### 3. Zeitweilige Verstopfungseffekte

Die Autoren halten zwar das Konzept der Unstetigkeitsflächen in Bodenstreu wie es unter 1. dargelegt worden ist für durchaus plausibel, aber es ist bezogen auf eine Bodenstreuung nicht in dem Maße wirklichkeitsnah wie es bei der Betrachtung von Bodenhorizonten der Fall ist. In Bodenstreu treten Verstopfungen oder/und Flächen größerer Undurchlässigkeit wahrscheinlich nur vereinzelt auf. Es wurde festgestellt, daß das Sickerwasser definierten Abflußbahnen in der Streu folgte und nicht auf breiter Front die Streu durchdrang. Eine wahrscheinliche Ursache der aus den Perkulationskurven ersichtlichen Schwankungen ist deshalb in zeitweiligem Verstopfen der bevorzugten Abflußbahnen zu sehen, verursacht durch die Blatt- bzw. Nadelanordnung in der Bodenstreu. So vermag z. B. ein einziges, konkav gewölbtes Blatt einen derartigen Weg zu blockieren. Das Wasser wird darüber aufgestaut bis ein kritischer Schwellenwert erreicht ist und das Blatt mit dem angesammelten Wasser zusammenbricht, kentert oder fortgerissen wird. Der daraus resultierende Wasserstoß ergibt eine plötzliche Zunahme des gemessenen Perkulationsoutputs, der einen zusätzlichen Verstärkungseffekt zeigt, wenn mehrere dieser Vorgänge gleichzeitig auftreten. Sie erklären die Teile der Perkulationskurven, in denen pro Zeiteinheit höhere Perkulationsbeträge als eingegebene Niederschläge erhalten wurden. Weiterhin würden diskontinuierliche oder örtliche schwer wasserdurchlässige Lagen in der Bodenstreu das Wasser zum  $\pm$  horizontalen Ausweichen zwingen, das der Gravitation folgend neue Abflußwege in untere Teile finden wird.

### 4. Veränderung der Bodenstreu während des Niederschlages

Zu den unter 3. erwähnten Vorgängen sollte die Tatsache hinzugefügt werden, daß die Beschaffenheit der Laubstreu kontinuierlich als Ergebnis der fortschreitenden Befeuchtung während des Niederschlages verändert wird. In den Experi-

menten waren daher Perkolations- und Befeuchtung immer mit der Kontraktion von Streulagen verbunden, die sich in Buchenstreu durch höhere Setzungsbeträge als in Kiefernstreu widerspiegelte. So sank zum Beispiel eine 27,5 cm dicke Buchenstreu auf 23,5 cm nach 15 Minuten Beregnung zusammen, eine 18 cm dicke Lage auf 15,5 cm und eine 10 cm mächtige Lage auf 9 cm. (Die drei angegebenen Beispiele entsprechen der Reihenfolge nach Gewichten von 300 g, 200 g, 100 g Buchenblätterstreu). Die Speicher- und Blockeigenschaften einer Bodenstreu wurden somit im Verlauf der Beregnung fortwährend verändert. Die befeuchteten Blätter verloren die oft stark gekrümmte Trockenform und nahmen mit zunehmender Feuchte verhältnismäßig ebene und flache Gestalt an. Veränderungen dieser Art an einem Blatt können es zu einem wirkungsvollen Hemmnis in Sickerwasserbahnen werden lassen und nachfolgende Perkolationschwankungen einleiten. Derartige „zufällige“ Blockierungen dürften eher die Regel als die Ausnahme sein.

Sowohl die Ausbildung von Unstetigkeitsflächen und Druckwellenprozesse als auch durch Verstopfung und Setzung der Streu induzierte horizontale Bewegungen des Wassers und die damit verbundene Suche nach neuen Abflüssen sind mit größerem Zeitaufwand verbunden, so daß sie Erklärungen für die Schwankungen in den Abflußkurven liefern. Es sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig, um die relative Bedeutung der vier beschriebenen Vorgänge zunehmend aufzuhellen.

#### Ergebnisse: B. Retention

Das Niederschlagsrückhaltevermögen der Bodenstreu wird im Folgenden unter zwei Gesichtspunkten betrachtet:

1. Der Prozentsatz an Wasser, der von der Laubstreu nach 5, 10, 15 Minuten Beregnung zurückgehalten wurde.
2. Die Nettoretention des Niederschlages in relativen und absoluten Werten nach der Gesamtperkolationsdauer.

#### 1. Retention während des Niederschlages

Es ergab sich, daß der in der Bodenstreu gespeicherte Teil des Niederschlages eine Funktion von vier Variablen ist: Beregnungsintensität, Niederschlagsdauer, Streuart und Streugewicht. Regressionen der Retention (%) in Bezug auf die Beregnungsintensität für jede Niederschlagsdauer (5, 10, 15 Minuten) und jedes Bodenstreugewicht (100, 200, 300 Gramm) differenziert nach den beiden Streuartarten (Buche und Kiefer) wurden errechnet. Die sich aus Kombination der Faktoren ergebenden 18 Regressionen sind graphisch in Abbildung 5 (a, b, c) und in Tabelle 7 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die Retention (%) in Buchenstreu größere Werte als im Falle der Kiefernstreu annimmt und mit zunehmendem Bodenstreugewicht steigt. Je länger jedoch die Niederschlagsdauer und je höher die Beregnungsintensität ist, desto geringer ist die Retention von Wasser. So wurde die größte prozentuale Retention von 34,7% bei einem Versuch mit Buchenstreu erhalten, in dem die Niederschlagsdauer nur 5 Minuten

betrug, eine sehr niedrige Beregnungsintensität von 5,74 cm/Std vorgegeben war und die mächtige Blattstreu 300 Gramm wog. Die niedrigste prozentuale Retention von 0,9% wurde bei einem Kiefernstreuversuch gemessen, mit 15 Minuten Niederschlagsdauer, 19,23 cm/Std Beregnungsintensität und einer dünnen Nadelstreu von 100 Gramm Gewicht.

Aus den unterschiedlichen Neigungen der in den Abbildungen 5 (a, b, c) gezeigten Regressionsgeraden für Buchen- und Kiefernstreu ist ersichtlich, daß die prozentuale Retention in Kiefernstreu mit steigender Beregnungsintensität (und damit auch indirekt mit der Niederschlagsmenge) schneller abnimmt als es in Buchenstreu der Fall ist. Das legt den Gedanken nahe, daß die Speicherkapazität der Kiefernstreu rasch dem Maximum zustrebt und es erreicht, während infolge Ab- und Adsorption von Wasser durch die Blätter der Buchenstreu das Retentionsvermögen hier über eine längere Zeitspanne eine wichtige Rolle spielt. Der im folgenden Abschnitt geführte Beweis soll diese Hypothese bestätigen.

#### 2. Nettoretention von Wasser durch Bodenstreu

Zwar waren die nach Beendigung der Beregnung gefundenen Perkolationsbeträge noch beträchtlich groß, aber im Vergleich zu den Mengen, die während des Niederschlages gemessen wurden waren sie bedeutend kleiner. Die Nettoretention, ein Ausdruck für einen Retentionsprozentsatz vom Gesamtniederschlag, variierte in den Versuchen von Null im Falle eines 15minütigen Kiefernstreuexperimentes mit hoher Beregnungsintensität und geringem Streugewicht (100 g) bis immerhin 25,2% bei einem Buchenstreuversuch mit 5 Minuten Niederschlagsdauer, niedriger Beregnungsintensität und mächtiger Streulage (300 g). (Nähere Einzelheiten siehe Tab. 5a und 5b).

Um die wesentlichen, die Nettoretention kontrollierenden Variablen anzuschließen, wurden mit den Daten multiple Regressionen erstellt. (Siehe Tabelle 8). Beim ersten analytischen Verfahren sind die Experimente in sechs Kategorien hinsichtlich der Streuart und der Niederschlagsdauer eingeteilt worden. Die daraus resultierenden sechs Regressionsgleichungen bezeichnen die für die Nettoretention (abhängige Variable) unabhängigen Variablen Beregnungsintensität und Bodenstreugewicht. Die Ergebnisse stützen unsere Hypothese, wie aus den durch die Gleichungen (Tab. 8a) verständlich gemachten Varianzbeträgen ( $R^2$ ) hervorgeht. In der zweiten Analyse wurden die Versuche erneut in sechs Kategorien mit den beiden konstant gehaltenen Variablen Bodenstreuart und Bodenstreugewicht eingeteilt. Die erhaltenen sechs Regressionsgleichungen (Tab. 8b) erklären die Zusammenhänge zwischen der abhängigen Variablen Nettoretention und den beiden hier als unabhängig betrachteten Variablen Beregnungsintensität und Niederschlagsdauer. Bei näherer Betrachtung der Koeffizienten und der einfachen Korrelationskoeffizienten der Gleichungen in Tabelle 8a und 8b kommt man zu dem Schluß, daß die Nettoretention tatsächlich von den folgenden vier Faktoren wesentlich abhängt:

- a) Laubstreuart. Buchenblätterstreu hält größere Mengen Wasser zurück als Kiefernstreu.
- b) Bodenstreugewicht. Je größer die Bodenstreu, desto höher ist der Retentionsbetrag an Wasser.

- c) Niederschlagsdauer. Je länger der Niederschlag fällt, desto niedriger ist die Nottoretention.
- d) Beregnungsintensität. Je intensiver der Niederschlag, desto niedriger ist die Nottoretention.

Die beiden unter c) und d) genannten Variablen ergeben durch Multiplikation die Niederschlagsmenge.

Um die Regressionsergebnisse zu vereinfachen, wurde eine weitere multiple Regression durchgeführt, die die Abhängigkeit der Nottoretention von den beiden Variablen Bodenstreugewicht und Niederschlagsmenge klären sollte. Zwei Regressionen wurden hergeleitet, eine für Kiefernadelstreu, die andere für Buchenblätterstreu. Die erzielten Regressionen sind in Tabelle 8c abgebildet. Die Korrelationen können als gut bezeichnet werden, und die Varianz für Buchenstreu beträgt 68,61%, bei der Kiefernstreu sind es 64,89%. Die oben angeführten Beziehungen konnten also bestätigt werden.

Ein in diesem Zusammenhang interessanter Gesichtspunkt ist der für Kiefernadelstreu höher ausgefallene einfache Korrelationskoeffizient zwischen der Nottoretention und dem Streugewicht mit  $r = 0,34$  als für Buchenblätterstreu mit  $r = 0,21$ . Diese Feststellung kommt ebenfalls in dem jeweiligen Wert der Regressionskoeffizienten (Kiefer = 0,026 und Buche = 0,016) zum Ausdruck. Die Erklärung liegt in der Tatsache, daß die Nottoretention der Kiefernstreu in höherem Maße vom Streugewicht abhängt, als es bei der Buchenstreu der Fall ist. Diese unterschiedlichen Eigenschaften werden bei Betrachtung der Art von Retentions- und Perkolationsprozessen im Vergleich Buchenstreu zu Kiefernstreu erklärbar: Die Kiefernadelretention basiert hauptsächlich auf Adhäsion und Oberflächenadsorption von Wasser, während sich Buchenblätter viel mehr durch Adsorption und interne Adsorption auszeichnen. Außerdem erfolgt die Perkolations- und Perkolationsprozesse durch die Kiefernadelstreu sehr wahrscheinlich auf kürzeren Wegen als in Buchenblätterstreu, wobei implizit das Tropfen von Nadel zu Nadel und die Tatsache, daß von der Perkolations- und Perkolationsprozesse nahezu die gesamte Nadelstreu erfaßt wird, beachtet werden muß. Im Gegensatz dazu wird der größte Teil der Buchenstreu nicht am Perkolationsprozess beteiligt und bleibt also  $\pm$  trocken, da das Wasser in konzentrierter Form an definierte Bahnen gebunden ist. Daraus läßt sich der allgemeine Satz ableiten: Je mächtiger eine Bodenstreulage ist, desto geringer ist der Wasseranteil, der in Retention übergeht. Daher ist die Abhängigkeit der Nottoretention vom zunehmendem Bodenstreugewicht bei der Buchenstreu geringer (wenn auch dennoch stark) als bei der Kiefernstreu, die insgesamt in den Retentionsvorgang einbezogen wird.

Der genannte Unterschied zwischen Buchen- und Kiefernstreu in Bezug auf die Perkolationsart und den Retentionsvorgängen ist im Hinblick auf absolute Retentionswerte ebenfalls von großer Bedeutung. Die absoluten Retentionsmittelwerte (in Gramm) sind in Tabelle 9, unterschieden nach Laubstreuart und Bodenstreugewicht, aufgeführt. Hinsichtlich einzelner absoluter Werte der Retention, die ziemlich variabel vorliegen, sei auf Tab. 5 verwiesen. In Tab. 9 sind weiterhin die aus den Retentionseigenschaften einzelner Blätter und Nadeln (Tab. 4) errechneten theoretischen potentiellen Retentionswerte für die entsprechende Bodenstreu dargestellt.

Die Tabelle 9 zeigt unter Bezugnahme auf die absoluten Werte, daß Retention von Niederschlagswasser in Buchenstreu bedeutend wirkungsvoller als in Kiefernstreu in Erscheinung tritt. Es wird zudem erneut deutlich gezeigt, daß eine Zunahme des Bodenstreugewichtes mit größeren gespeicherten Niederschlagsmengen verbunden ist. Die wesentlichste Aussage, die aus Tab. 9 gewonnen werden kann, zeigt für beide Bodenstreuarten bei kleinen Gewichtsmengen eine Dominanz der aktuellen Retention über die potentielle Retention. Bei größeren Gewichtsmengen Bodenstreu dominiert jedoch die potentielle Retention über die aktuelle Retention. Es ist hierbei von zusätzlicher Bedeutung, daß die Mittelwertsabweichungen bei der Kiefernstreu geringer als bei der Buchenstreu sind. Wie weiterhin aus Tab. 9 hervorgeht, muß es bei gegebener Niederschlagsmenge und einem bestimmten Laubstreugewicht einen Gleichgewichtszustand zwischen potentieller und aktueller Retention geben, d. h. der Differenzbetrag (Aktuelle Retention — Potentielle Retention) nähme den Wert Null an.

Die Gründe für die Verschiedenheit zwischen der potentiellen (extrapolierten) Retention und der aktuellen (tatsächlichen) Retention sind verhältnismäßig einfach: Grundlegend wurden bei den Blatt- und Nadeleinzelmessungen zur potentiellen Retention die Absorption, Adsorption und starke Oberflächenadhäsion in Betracht gezogen. Nicht berücksichtigt wurden dabei folgende Vorgänge:

1. Zusätzliche Retention infolge Speicherung des Wassers auf der Blattoberfläche in konkaven Teilen oder allgemein auf und zwischen Nadeln und Blättern. Diese Art der Wasseraufnahme trat vor allem an der Bodenstreuoberfläche in Erscheinung.

2. Die in mächtiger Bodenstreu relativ niedrige Retention, die darauf zurückzuführen ist, daß nicht alle Blätter und Nadeln der Bodenstreu während der Perkolations- und Perkolationsprozesse befeuchtet wurden, da der Wasserverlauf (hauptsächlich in der Buchenstreu) konzentriert in bestimmten Bahnen verlief. Damit ist die Abweichung der aktuellen von der potentiellen Retention in Kiefernstreu viel kleiner als in Buchenstreu. Die Oberflächenspeicherung von Wasser kann somit hinsichtlich kleiner Streumengen als ein wichtiger Bestandteil der Retention relativ zu den in der Streu vorliegenden Absorptions-, Adsorptions- und Adhäsionsvorgängen angesehen werden. Daher dominiert bei kleinen Bodenstreumengen die aktuelle und nicht die potentielle Retention. Bei großen Laubstreumengen macht der Oberflächenanteil, obgleich er wahrscheinlich absolut zunimmt, nur einen relativ kleinen Teil der Gesamtretention aus. Diese relative Abnahme und die Nichtbefeuchtung größerer Bodenstreubereiche sind für das Überhandnehmen der potentiellen gegenüber der aktuellen Retention verantwortlich.

#### Randbedingungen der Experimente

Verschiedene, die Versuche einschränkende Erläuterungen sollen an dieser Stelle in Erwägung gezogen werden. Diese sind:

1. Niederschlagssimulation: Die Beregnungsintensitäten, die von 5,03 cm/Std bis 20,54 cm/Std variierten, waren höher als die in Natur vorkommenden. Die Niederschlagsmengen waren zwar mit 0,44 cm bis 5,49 cm ebenfalls ziemlich hoch, aber

denen in der Natur durchaus angemessen. Es ist sehr wahrscheinlich, daß bei Verwendung geringerer Berechnungsintensitäten und Regenmengen Niederschlagswasser größeren Ausmaßes von der Streu aufgefangen worden wäre. Die in diesem Aufsatz dargestellten Abbildungen mit Aussagen über die Retention sollten daher als Unterschätzungen gewertet werden.

2. In den Versuchen wurde im Initialstadium der Beregnung nur trockene Streu verwendet. Wie wären Perkolation und Retention ausgefallen, wenn nasse oder teilweise befeuchtete Bodenstreu vorgelegen hätte? Denn in der Natur liegt Bodenstreu oft in diesem Zustand vor, wenn die Zeit zwischen zwei Niederschlagsereignissen für das Trocknen der Streu zu kurz war. Dieser Frage muß in folgenden Untersuchungen nachgegangen werden.

3. Mit 2. verbunden ist der Faktor Evaporation der Bodenstreu, der in den Experimenten ebenfalls nicht in Erwägung gezogen wurde. Es ist aber gewiß von Bedeutung, ob oder/und in welchem Ausmaß eine Bodenstreuaufgabe in der niederschlagsfreien Zeit austrocknet. Daraus kann die zu überprüfende Hypothese abgeleitet werden, daß Buchenblätterstreu eine längere Zeitspanne zum Austrocknen in Anspruch nehmen würde als die stärker belüftete Kiefernadelstreu.

4. In den Versuchen wurden ideale homogene Blatt- und Nadelstreulagen verwendet, die in Natur jedoch oft inhomogen sind. So ist die Laubstreu eines Mischwaldes aus Blättern und/oder Nadeln verschiedener Baumarten zusammengesetzt. Weiter sind in die Bodenstreuarten holzige Bestandteile (Äste, usw.), Früchte, Samen, usw. integriert. Zuletzt sei darauf verwiesen, daß die Beschaffenheit der Bodenstreu durch Verwesung, Zersetzung (Mazerationsvorgänge) und Alter mit der Zeit und innerhalb eines Bodenstreuprofiles beträchtlichen Veränderungen unterliegt. Retentions- und Perkolationseigenschaften der Streu werden ohne Zweifel von den genannten noch genauer zu untersuchenden Faktoren beeinflusst.

5. Randeffekte, die durch die Wände des Kastens entstanden, sind nicht bestimmbar gewesen. Einflüsse auf die Lage der Streu und vor allem auf das perkolierende Wasser sind ohne Zweifel vorhanden gewesen, ohne daß diese jedoch bis heute ausgeschaltet werden konnten oder zumindest annähernd quantitativ zum Ausdruck gebracht worden sind.

6. Hangneigungen sind nicht berücksichtigt worden. Wie aber bereits PIERCE (1967) und RUXTON (1967) beobachteten, kann ein parallel der Hangabwärtsrichtung folgender Wasserfluß auf, aber auch innerhalb und unterhalb der Laubstreuschicht nicht ausgeschlossen werden, wodurch implizit Perkolation und Retention Modifikationen erfahren.

#### Zusammenfassung

Die in diesem Aufsatz erläuterten Experimente haben gezeigt, daß Korrelationen zwischen Bodenstreuereigenschaften und den Niederschlagsmengen, die von der Laubstreu aufgefangen und zum Teil zurückgehalten werden, möglich und ausführbar sind. Für die beiden untersuchten Bodenstreuarten aus Buchenblättern und Kiefernadeln können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Große relative Anteile (bis zu 25%) und absolute Beträge (im Mittel 0,09—0,21 cm Niederschlagsäquivalente) des verhältnismäßig starken simulierten Niederschlages wurden von den Bodenstreulagen zurückgehalten. Buchenblätterstreu bewahrt mehr Wasser als Kiefernadelstreu. Je mächtiger die Bodenstreu, desto höher sind absolute und prozentuale Retention. Je kürzer und weniger intensiv die Beregnung, desto größer ist der Retentionsanteil in der Streu.

2. Die Perkulationskurven (Abb. 4a, b, c, d) zeigen deutlich sechs unterschiedliche Grundzüge während des Versuchsablaufes, darin enthalten die beiden Fließgleichgewichtszustände, das letzte der beiden höher als das erste. Die Schwankungen, die aus den Perkulationskurven ersichtlich werden, können mit zeitweiligen Blockierungen der Abflußbahnen, fortschreitenden und zufälligen Veränderungen der Bodenstreu und auch mit Unstetigkeitsflächen, die sich während der Befeuchtung in relativ undurchlässigen Streulagen ausbilden können, in Verbindung gebracht werden.

3. Die aktuelle Retention der Bodenstreu (Absolutwerte) weicht systematisch von den Werten der potentiellen Retention ab. Die Unterschiede haben gezeigt, daß die Speicherung von Wasser an den Oberflächen der Nadeln und Blätter und die vom perkolierenden Wasser bevorzugten Bahnen wichtige Faktoren sind, die sowohl die Retention durch die Bodenstreu, als auch die Absorptions-, Adsorptions- und Adhäsionsbeträge, die in den Experimenten 1 gemessen wurden, steuern. — —

Die Implikationen der vorliegenden Befunde sind für Hydrologie und Geomorphologie von großer Bedeutung. Die Laubstreu ist eine wichtige Auffangschicht des Regenwassers und muß deshalb in jeder Berechnung des hydrologischen Kreislaufes Beachtung finden. Die Tatsache, daß verschiedene Vegetationsarten Bodenstreu mit unterschiedlichen Retentions- und Perkolationseigenschaften erzeugen, sollte weitmehr als bisher in geomorphologische, hydrologische und pedologische Betrachtungsweisen eingeschlossen werden. Eine angemessene Auswertung der Bodenstreuleistungen muß Antworten auf eine Reihe hier nicht beantworteter sondern nur umrissener Fragen geben. Einer der Schwerpunkte, dem Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte, ist die räumliche und zeitliche Verteilung von Laubstremengen auf der Erdoberfläche. Zweifellos variiert die Bodenstreu von Klimazone zu Klimazone, von Vegetationsart zu Vegetationsart und mit den Jahreszeiten. Die Tatsache, daß die Retentionsbeträge sehr stark von der Laubstremenge abhängen, läßt diesen Forschungsgegenstand zu einem genaueren Untersuchungen wertigen Thema werden.

#### Anerkennung

An dieser Stelle möchten wir unseren herzlichsten Dank allen denjenigen aussprechen, die uns bei den Arbeiten und der Erstellung dieses Aufsatzes freundlichst geholfen haben. So gebührt unser Dank Dr. D. R. Stoddart für seine Starthilfe und Ermutigung am Beginn und während der Experimente. Weiterhin sei den Herren A. King und M. Diver, den Forschungsstudenten und den Studenten des „Part 1“ 1974/75 am „Department of Geography“ in Cambridge (GB) unser Dank für Hilfeleistungen bei der Konstruktion der Versuchsanlage und bei der Durchführung einiger Versuche ausgesprochen. Und schließlich schulden wir unseren Dank

Professor O. Fränze vom Geographischen Institut der Universität Kiel für kritische Stellungnahmen, wertvolle Anmerkungen und die Durchsicht des Manuskriptes.

#### Schriften

- BARTELLI, L. J. und ODELL, R. T.; 1960a: Field studies of a clay-enriched horizon in the lowest part of the solum of some Brunizem and Gray-Brown Podsolc soils in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24, S. 388—391, 1960.
- BARTELLI, L. J. und ODELL, R. T.; 1960b: Laboratory studies and genesis of a clay-enriched horizon in the lowest part of the solum of some Brunizem and Gray-Brown Podsolc soils in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24, S. 391—395, 1960.
- BRECHTEL, H. M.; 1969: Wald und Abfluß. Methoden zur Erforschung der Bedeutung des Waldes für das Wasserdargebot. *Sonderh. deutsche Gewässerkundl. Mittlg.*, S. 24—30, 1969.
- BRECHTEL, H. M.; 1970: Wald und Retention. Einfache Methoden zur Bestimmung der lokalen Bedeutung des Waldes für die Hochwasserdämpfung. *Deutsche Gewässerkundl. Mittlg.*, S. 91—103, 1970.
- BRECHTEL, H. M.; 1971a: Zur Bedeutung der gebietshydrologischen Forschung für die Landschaftsplanung. *Landschaft und Stadt*, 3. Jahrg., S. 97—109, 1971.
- BRECHTEL, H. M. und KRECMER, V.; 1971b: Die Bedeutung des Waldes als Hochwasserschutz. *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jahrg. 23, Heft 7/8, S. 166—177, 1971.
- BRECHTEL, H. M.; 1972: Increasing water yield through forest hydrology research. *European Forestry Commission*, 10th Session in Oslo, Nr. 7. 1. 2., 1972.
- BREWER, R. und HALDANE, A. D.; 1957: Preliminary experiments in the development of clay orientation in soil. *Soil Sci.*, 84, S. 301—309, 1957.
- DANSERAU, P.; 1957: *Biogeography: An Ecological Perspective*. Ronald Press, 1957.
- FOLKS, H. C. und RIECKEN, F. F.; 1956: Physical and chemical properties of some Iowa soil profiles with clay-iron bands. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20, S. 575—580, 1956.
- FRÄNZLE, O.; 1969: Untersuchungen zur altquartären Tonilluvation der Sables de Fontainebleau. *Etudes sur le Quaternaire dans le Monde*, VIII Congrès INQUA, Paris 1969, S. 351—358.
- FREISE, F.; 1936: Das Binnenklima von Urwäldern im subtropischen Brasilien. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 82, S. 301—307, 1936.
- GEIGER, R.; 1961: *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Die Wissenschaft, Bd. 78, 4. Auflage, Braunschweig 1961.
- GRUBB, P. J. und LLOYD, J. R. und PENNINGTON, T. D. und WHITMORE, T. C.; 1963: A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador: I. The forest structure, physiognomy, and floristics. *Journal of Ecology*, Vol. 51, S. 567—601, 1963.
- HALLSWORTH, E. G.; 1963: An examination of some factors affecting the movement of clay in an artificial soil. *Soil Sci.*, 14, S. 360—371, 1963.
- KOHNKE, H.; 1968: *Soil Physics*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- KRECMER, V.; 1969: *Wasserwirtschaftliche Einflüsse der Wälder*. Sammelreferat und Bibliographie, Tschech., Studijni Informace, Lesnictvi, Ustav vedecko techn. Informaci, Praha, Nr. 4/5, 1969.
- LOWDERMILK, W. C.; 1930: Influence of forest litter on runoff, percolation, and erosion. *Journal of Forestry*, Vol. 28, S. 474—491, 1930.
- MELTON, M. A.; 1957: An analysis of the relations among elements of climate surface properties and geomorphology. *Office of Naval Research Technical Report II*, Project Nr. 389—042, 1957.
- OVINGTON, J. D.; 1954: The forest floor. *Journal of Ecology*, Vol. 42, S. 71, 1954.
- PIERCE, S. P.; 1967: Evidence of overland flow on forest watersheds. In: W. E. SOPPER und H. W. LULL: *Int. Symp. on Forest Hydrology*, S. 247—253, 1967.
- RAUNKIAER, C.; 1934: *The life form of plants and statistical plant geography*. Clarendon Press, Oxford, S. 368—378, 1934.
- RICHARDS, P. W.; 1952: *The tropical rainforest*. Cambridge University Press, 1952.
- ROBINSON, H.; 1972: *Biogeography*. MacDonald and Evans LTD, London, 1972.
- RUXTON, B. P.; 1967: Slopewash under primary rainforest in Northern Papua. In: J. N. JENNINGS und J. A. MABBUTT: *Landform Studies from Australia and New Guinea*; Cambridge U. P., S. 85—94, 1967.
- SWANK, W. T. und GOEBEL, N. B. und HELVEY, D.; 1972: Interception losses in loblolly pine stands of the South Carolina Piedmont. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 27, S. 160—163, 1972.
- THOMPSON, F. B.; 1972: Rainfall interception by oak coppice. In: TAYLOR: *Research Papers in Forest Meteorology, an Aberystwyth Symposium*, S. 59—74, Aberystwyth 1972.
- WEBB, L. J.; 1959: A physiognomic classification of Australian rain forests. *Journal of Ecology*, Vol. 47, S. 551—570, 1959.
- WALSH, R. P. D. und VOIGT, P. J.; 1976: Vegetation litter: an underestimated variable in hydrology and geomorphology. *Journal of Biogeography*, 3, 1976. Im Druck.
- ZINKE, P. J.; 1967: *Forest Interception Studies in the United States*. Proc. of a Nat. Sc. Found. Adv. Sc. Sem., Ed. von W. E. SOPPER und H. W. LULL, Pergamon Press, Braunschweig 1967.