



Institut für Wildbach- und Lawinenschutz  
Universität für Bodenkultur Wien



# VORPROJEKT

## Beurteilung der Wirkung des Hochofensandes auf den Oberflächenabfluß von Skipisten und Almflächen in steilen Lagen

Projektleiter: Dipl.-Ing. Dr. HÜBL Johannes

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. BLAB Astrid  
Dipl.-Ing. PLATZER Matthias  
Ing. ZOTT Fritz  
HOLZINGER Gerhard

**Universität für Bodenkultur-Wien**  
**Institut für Wildbach und Lawinenschutz**  
**Peter Jordan Str. 82**  
**A-1190 WIEN**

Wien, im Mai 1998

# Inhaltsverzeichnis

<u>1 Einleitung</u> .....	<u>1</u>
<u>2 Literaturstudie: Einflußfaktoren auf Infiltrationsrate und Oberflächenabfluß in alpinen Steillagen</u> .....	<u>2</u>
2.1 Zieldefinition .....	2
2.1.1 Kriterienkatalog .....	3
2.1.1.1 Infiltrationsprozesse .....	3
2.1.1.2 Oberflächenabflußprozesse .....	3
2.1.1.3 Abflußprozesse im Boden .....	3
2.1.2 Gliederung der Einflußfaktoren.....	5
2.1.2.1 Primäre Einflußfaktoren.....	5
2.1.2.2 Sekundäre Einflußfaktoren .....	5
2.1.3 Beregnungsversuche.....	6
2.1.3.1 Einleitung.....	6
2.1.3.2 Methodik.....	6
2.1.3.3 Allgemeine Versuchsanordnung.....	7
2.1.3.4 Meßmethodik und Instrumentierung .....	8
2.1.3.5 Laboruntersuchungen.....	10
2.1.3.6 Vergleich: Groß- Kleinregenanlage .....	11
2.2 Einflussfaktoren auf Oberflächenabfluss und Infiltration in Steillagen .....	13
2.2.1 Primäre Einflußfaktoren.....	13
2.2.1.1 Höhenlage .....	13
2.2.1.2 Exposition .....	13
2.2.1.3 Hangneigung .....	14
2.2.1.4 Relief und Geländemorphologie .....	18
2.2.1.5 Geologie .....	19
2.2.1.6 Klima .....	20
2.2.1.7 Zusammenfassung.....	20
2.2.2 Sekundäre Einflußfaktoren .....	22
2.2.2.1 Bodenabhängige Einflußfaktoren .....	22
2.2.2.1.1 Kennwerte des Bodengefüges .....	22
2.2.2.1.2 Prinzip der Wasserbewegung.....	24
2.2.2.1.3 Makroporosität bzw. Makroporeninfiltration .....	26
2.2.2.1.4 Matrixinfiltration .....	27
2.2.2.1.5 Interaktion.....	30
2.2.2.1.6 Aggregatstabilität.....	30
2.2.2.1.6.1 Stabilisierende Stoffe.....	31
2.2.2.1.6.2 Organische Stoffe.....	32
2.2.2.1.6.3 Eisen- und Aluminiumoxide .....	32
2.2.2.1.6.4 Kationenbelag, CaCO <sub>3</sub> -Gehalt.....	33
2.2.2.1.6.5 Einfluß von anorganischer Düngung .....	33
2.2.2.1.6.6 Einfluß von synthetischen Stabilisatoren .....	33
2.2.2.1.7 Erodierbarkeit .....	34
2.2.2.1.8 Hydrophobizität des Bodens.....	35
2.2.2.1.9 Organische Substanz .....	36
2.2.2.1.9.1 Streu- bzw. Humusauflagen .....	36
2.2.2.1.10 Zusammenfassung .....	38
2.2.2.2 Vegetationsbedingte Einflußfaktoren.....	39
2.2.2.2.1 Wirkung der Vegetation auf Oberflächenabfluß und Infiltration .....	39

2.2.2.2.2 Die Bedeutung der Vegetation für den Wasserhaushalt.....	40
2.2.2.2.3 Einfluß der Pflanzen auf das Bodengefüge .....	40
2.2.2.2.4 Verbesserung und Erhaltung der Hochlagenvegetation durch Dün- gungsmaßnahmen .....	41
2.2.2.2.5 Interzeption.....	43
2.2.2.2.6 Zusammenfassung.....	44
2.2.2.3 Zeitbedingte Einflußfaktoren.....	45
2.2.2.3.1 Bodenfeuchte .....	45
2.2.2.3.2 Niederschlagsintensität .....	47
2.2.2.3.3 Niederschlagsverteilung .....	48
2.2.2.3.4 Schneeschmelze .....	49
2.2.2.3.5 Zusammenfassung.....	49
2.3 Starkregensimulationen als Grundlage der Abschätzung von Abfluß- und Infiltrationseigenschaften alpiner Böden bzw. Vegetationseinheiten .....	50
2.3.1 Beregnungsversuche SCHAFFHAUSER (1979) .....	51
2.3.2 Beregnungsversuche SCHWEIGHOFER (1989).....	52
2.3.3 Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985).....	54
2.3.3.1 Alpine Krummholz- und Zwergstrauchbestände.....	54
2.3.3.2 Grünland im alpinen Bereich .....	55
2.3.3.3 Alpine Skipisten .....	58
2.3.4 Beregnungsversuch LANG (1995) .....	60
2.4 Zusammenfassung.....	63
2.5 Literaturverzeichnis .....	64
2.5.1 Weitere Literatur zu diesem Thema .....	68
<b>3 Beregnungsversuche.....</b>	<b>71</b>
3.1 Beschreibung der Regenssimulationsanlage (RSA) .....	71
3.2 Methodik und Versuchsanordnung.....	75
<b>4 Einrichtung vegetationskundlicher Dauerbeobachtungs-flächen .....</b>	<b>80</b>
4.1 Skipisten und ihre Auswirkung auf die Vegetation.....	80
4.2 Sanierung von Schipisten.....	80
4.3 Vegetation als Indikator .....	81
4.4 Probeflächendesign.....	81
4.5 Literaturverzeichnis .....	82

# **1 Einleitung**

Der Oberflächenabfluß ist als Reaktion des Bodenkomplexes auf den auftreffenden Niederschlag zu verstehen. Ein Teil des Niederschlages dotiert den Boden und den Grundwasserspeicher, der andere Teil läuft auf der Bodenoberfläche ab. Die Vegetation beeinflusst nachhaltig diese Aufteilung. Das Wurzelsystem vergrößert das Porenvolumen des Bodens und die Transpiration der Pflanzen stellt diesen Porenraum dem infiltrierenden Wasser zur Verfügung. Diese komplexen Wirkungen lassen sich nur äußerst schwer einzeln simulieren. **Deshalb gelten Berechnungsversuche, die die Summenwirkung der beeinflussenden Parameter darstellen, als Stand der Technik.**

Hochfensand als Dünger auf Skipisten/Almflächen aufgebracht, kann sich auf die Qualität und den Deckungsgrad der Vegetation auswirken. Dadurch ändern sich maßgebliche Parameter des Infiltrationsverhalten der Böden. Zugleich kann der Dünger die Bodeneigenschaften selbst beeinflussen. Daraus resultiert eine kombinierte Versuchsanordnung aus Vegetationsaufnahmen und hydrologischen Untersuchungen. Um die Wirkung des Hochfensandes beurteilen zu können, ist vorerst eine einjährige Untersuchung (Frühjahr - Frühjahr) von Dauerflächen vorgesehen. Anschließend kann, je nach Erkenntnisstand des ersten Jahre, die Untersuchung für weitere Jahre durchgeführt werden. Die vorgesehenen Probeflächen werden deshalb dementsprechend eingerichtet.

Die Berechnungsversuche des ersten Jahres sind jeweils im Frühjahr (nach der Schneeschmelze) geplant. Begleitende Vegetationsaufnahmen werden im Sommer durchgeführt.

## **2 Literaturstudie: Einflußfaktoren auf Infiltrationsrate und Oberflächenabfluß in alpinen Steillagen**

### **2.1 Zieldefinition**

Ziel der Literaturstudie ist es, die Wirkung und Wirkungskombination der einzelnen Einflußfaktoren auf das Abflußverhalten alpiner Steillagen darzustellen und zu identifizieren.

Allgemeingültige Kriterien für bestimmte Abflußprozesse sollen aus der vorhandenen Fachliteratur abgeleitet werden, die dann unter gewissen Voraussetzungen zur Einschätzung der Gebiets- Abflußreaktion auf (Stark-) Niederschläge genutzt werden können. Dabei soll auch die Frage, in wieweit diese Prozesse anhand dieser Kriterien im Gelände identifizierbar sind, und ob die davon ausgehende Abflußreaktion quantifizierbar ist, berücksichtigt werden.

#### **Definitionen**

*Infiltration :*                    *Flächenhaftes Eindringen von oberirdischem Wasser in den Untergrund.*

*Versickerung:*                *Räumlich eng begrenztes, rasches Eindringen von oberirdischem Wasser in den Untergrund.*

*Versickerungs/Infiltrationsintensität:*

*Versickerungs/Infiltrationshöhe geteilt durch die Dauer der Versickerung/Infiltration [mm/h].*

*Infiltrationskapazität:*

*Maximale Wasseraufnahmefähigkeit eines Bodens in mm bei gegebenen Randbedingungen pro Zeiteinheit.*

*Oberflächenabfluß (Overland Flow):*

*Flächenhafter, an der Oberfläche sich direkt bildender Wasserabfluß [l/s].*

## 2.1.1 Kriterienkatalog

### 2.1.1.1 Infiltrationsprozesse

*Makroporeninfiltration (Macropore Flow):*

Das Wasser infiltriert über das sekundäre Porensystem (z.B. Trockenrisse, Wurzelhöhlen, Wurmgänge) in den Boden. Die Versickerungsgeschwindigkeit ist hoch, die Bewegungsrichtung hauptsächlich vertikal.

*Matrixinfiltration (Matrix Flow):*

Wenn das Speichervolumen der Makroporen erschöpft ist, verläßt das Wasser die Makroporen und beginnt die Bodenmatrix zu füllen (Interaktion).

### 2.1.1.2 Oberflächenabflußprozesse

*Hortonischer Oberflächenabfluß (Absolute Hortonian Overland Flow):*

Tritt dann auf, wenn bereits zu Beginn eines Niederschlags die Regenintensität die Infiltrationskapazität übersteigt.

*Verzögerter Hortonischer Oberflächenabfluß (Delayed Hortonian Overland Flow):*

Tritt auf, nachdem bei einem Niederschlagsereignis aufgrund idealer Infiltrationsverhältnisse ein Großteil des Niederschlags versickern kann.

*Zeitweiser Hortonischer Oberflächenabfluß (Temporary Hortonian Overland Flow):*

Tritt auf, wenn sich ein Oberflächenabfluß zu Beginn eines Niederschlagsereignisses einstellt und anschließend wieder versiegt.

### 2.1.1.3 Abflußprozesse im Boden

*Zwischenabfluß (Interflow, Subsurface Flow):*

Oberflächennaher (lateral) Abfluß im Boden bei Vorhandensein von wirksamen Fließstrukturen (Pipes, hochdurchlässige Schichten) im Boden sowie bei Auftreten von Stauhorizonten (Podsolierung, Verlehmung von Ah-C- Böden).

*Hangwasserzug, Grundwasserzug:*

Permanent oder periodisch auftretender Abfluß in meist größerer Tiefe, bedingt durch anstehendes Grundwasser oder undurchlässige Schichten (z.B. anstehender Fels).

*Trockenwetterabfluß, Basisabfluß (Baseflow):*

Abfluß der durch das in den Boden infiltrierte und kontinuierlich abgegebene Wasser gebildet wird.

## 2.1.2 Gliederung der Einflußfaktoren

### 2.1.2.1 Primäre Einflußfaktoren

1. Höhenlage
2. Exposition
3. Neigung
4. Relief (Hangausformung, Hanglänge)
5. Geologisches Substrat
6. Klima (Temperatur, Jahresniederschlag)

### 2.1.2.2 Sekundäre Einflußfaktoren

#### ***Boden:***

1. Größtporenvolumen (sekundäres Porensystem)
2. Grobporenvolumen
3. Gesamtporenvolumen (natürliche Feldkapazität, Welkepunkt)
4. Lagerungsdichte
5. Aggregatstabilität
6. Benetzungswiderstand (Hydrophobizität)
7. Oberflächenverschlämmung
8. Hangwasserzug
9. Organische Substanz

#### ***Vegetation:***

1. Deckungsgrad
2. Durchwurzelungstiefe
3. Interzeption
4. Evapotranspiration
5. Hydrophobizität

#### ***Zeit:***

1. Anfangsbodenfeuchte
2. Niederschlagsintensität (Regendichte)
3. Niederschlagsverteilung
4. Schneeschmelze



## **2.1.3 Beregnungsversuche**

### **2.1.3.1 Einleitung**

Um der Abhängigkeit von natürlichen Niederschlägen zu entgehen ist man schon bald dazu übergegangen, künstliche Beregnungen auf kleinen Testflächen durchzuführen. Diese Versuche ermöglichen die Untersuchung der Niederschlag-Abfluß-Beziehung unter verschiedensten Ausgangsbedingungen (z.B. Bodenzustand, Vegetationszustand, Niederschlagsdauer und Niederschlagshöhe). Die Mehrzahl der Testergebnisse bezieht sich dabei auf die mögliche Reaktion der Versuchsflächen auf Starkregenereignisse im Zusammenhang mit der Hochwasserbildung.

In Siedlungsbereichen nahe von Flüssen und im Ablagerungsbereich von Wildbächen wird fast selbstverständlich ein Schutz gegen 50-, 100-, oder gar 150-jährliche Hochwasser verlangt. Solche Ereignisse sind jedoch in den meisten Einzugsgebieten noch nie beobachtet worden, denn systematische Abflußmessungen werden erst seit Beginn dieses Jahrhunderts durchgeführt. So umfassen heute die längsten Niederschlags- bzw. Abflußreihen knapp hundert Jahre. Aus diesem Datenmaterial kann keine verallgemeinerte Aussage über seltene Hochwasser und die Veränderung ihrer Häufigkeit im Zusammenhang mit Klimaänderungen gemacht werden. Eine Möglichkeit, die Größe extremer Ereignisse zu kalkulieren, liegt in der Nachrechnung mittels physikalisch-numerischer Niederschlags-Abfluß-Modelle. Das Dilemma, daß die vorhandenen Abflußmessungen das für den Schutzwasserbau erforderliche Bemessungsspektrum oft nicht abdecken und die Modellvorstellungen über die Abflußbildung bei extremen Starkregen nicht überprüft werden können, läßt sich nur lösen, wenn zusätzliche Daten zur Verfügung stehen. Da extreme Starkregen ebenso selten sind wie die dadurch erzeugten Hochwasser, bleibt als Alternative nur der Einsatz von künstlich erzeugtem Starkregen. Es ist also nicht verwunderlich, daß die zitierte Literatur im Zusammenhang mit dieser Arbeit sich auf die oben genannten Beregnungsversuche stützt, d.h. die Identifikation der Abflußprozesse (Einflußfaktoren) durchwegs mittels künstlicher Niederschläge erfolgt.

### **2.1.3.2 Methodik**

*Freilanduntersuchungen (Großregenanlagen):*

Mit Freilandberegnungsanlagen werden vor allem die für das Gesamteinzugsgebiet repräsentativen Vegetationseinheiten (Weiderasen, Zwergsträucher, Waldstandorte) und Bodenserien erfaßt. Als Basis für die Auswahl der einzelnen Beregnungsflächen dienen in der Regel durchgeführte Boden- bzw. Vegetationskartierungen. In der Praxis hängt die Standortwahl natürlich auch von Faktoren wie Begehbarkeit, Verfügbarkeit von Wasser (Gewässer mit ausreichendem Wasserangebot) und oftmals auch von den Besitzverhältnissen (Privatbesitz, Genossenschafts- oder Gemeindebesitz) ab. Berücksichtigung bei der Auswahl der Versuchsfläche muß letztendlich auch der Versuchszweck finden. Bei Versuchsanlagen, welche im Zusammenhang mit Hochwasserstudien durchgeführt werden, müssen optimale Versuchsvoraussetzungen (Bilanzierbarkeit, Basisprozesse) in den Hintergrund treten. Priorität erlangen hierbei Hänge mit mäßig tiefgründigen bis flachgründigen Böden, die auf Starkregenfälle unmittelbarer reagieren.

### **2.1.3.3 Allgemeine Versuchsanordnung**

Das Grundkonzept der verwendeten Beregnungsanlagen unterscheidet sich im allgemeinen nur geringfügig. In den meisten Fällen wurde für die Simulation der Stark-niederschläge eine Beregnungsanlage ähnlich der von KARL & TOLDRIAN (1973) eingesetzt, um die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit Untersuchungen im In- und Ausland zu erhalten.

Die in der Abbildung 1 dargestellte Beregnungsanlage wurde von ZUIDEMA & KÖLLA (1983) für den Einsatz im Felde geplant und soll hier stellvertretend angeführt werden. Mittels dieser Anlage kann eine Fläche von 60 m<sup>2</sup> (4 m Breite und 15 m Länge) beregnet werden. Sie besteht aus drei Aluminiumrohrsträngen von je 15 m Länge, einem Verteilerstrang mit zwei Wasserfiltern, Durchlaufzählern, einer Wasseruhr, einem Druckschlauch für die Zuleitung des Wassers und einer Motorpumpe. Damit die beregnete Fläche möglichst rechteckig ist, werden Vollkreisdüsen auf dem mittleren Strang und Halbkreis- und Viertelkreisdüsen an den äußeren Strängen montiert.

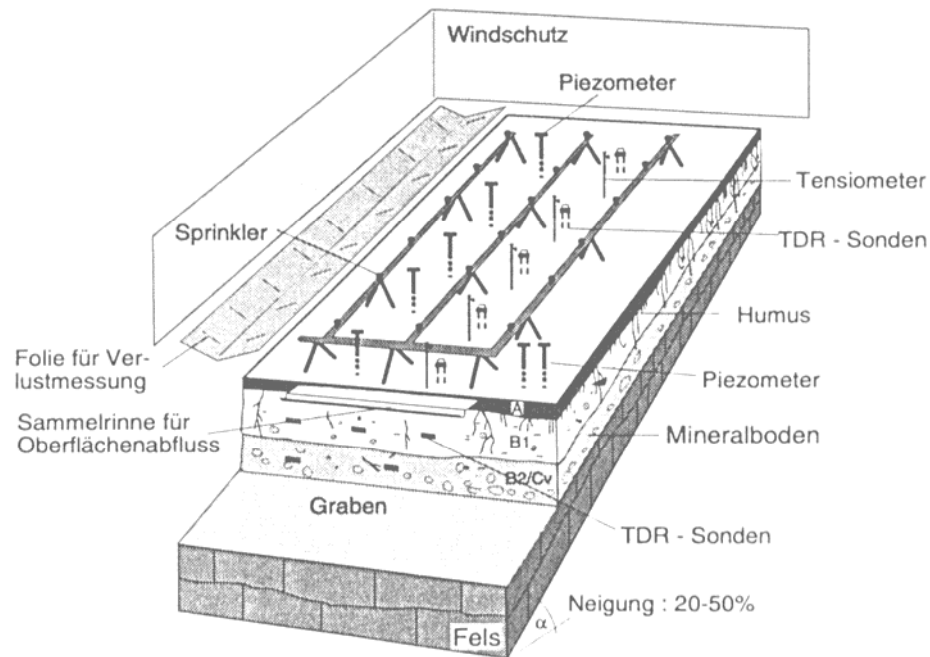


Abbildung 1: Beregnungsanlage: Schematische Darstellung mit Versuchsordnung und Meßinstrumenten (ZUIDEMA & KÖLLA, 1983)

### 2.1.3.4 Meßmethodik und Instrumentierung

Die aufzubringende Niederschlagsmenge kann über Anzahl und Art der Düsen gesteuert werden. Der anliegende Druck der Düsen wird bei allen Düsen durch einen Druckminderer auf Betriebsdruck ( $\cong 2$  bar) gebracht. Auf diese Weise wird im geneigten Gelände ein zu hoher Durchsatz an tieferliegende Düsen verhindert (MARKART & KOHL, 1995). Die angestrebte Niederschlagsintensität bei den durchgeführten Starkregensimulationen betrug bei den meisten Forschungsangaben 100 mm/h. Die Beregnungsdauer schwankt dabei zwischen 0.50 bis 3h (Abflußkonstanz). Die erzielte Niederschlagshöhe wird aus den Abmessungen der Versuchsparzelle und der im Zulauf zur Beregnungsanlage gemessenen Wassermenge (Durchlaufzähler) errechnet. Eine weitere Kontrollmöglichkeit bietet die Aufstellung von Auffangbehältern mit definiertem Querschnitt auf der Beregnungsfläche. Um die seitliche Verlagerung des Niederschlagswassers zu verhindern bzw. zu kompensieren und Verlusten durch Winddrift und seitlichem Abfluß vorzubeugen, wird die effektiv beregnete Fläche seitlich verbreitert. Niederschlag, der außerhalb dieser Beregnungsfläche niedergeht, wird mit Plastikfolien aufgefangen und vom Input abgezogen.

Am Fuß der Beregnungsanlage wird ein entsprechend langer Graben ausgehoben. In diesem Graben findet die Fassung der verschiedenen Abflüsse statt. Der Oberflächenabfluß wird durch Aluminiumplatten gefaßt, welche ca. 2-5 cm unterhalb

der Bodenoberfläche horizontal ins Bodenprofil getrieben werden. Das Wasser wird dann in einer Rinne gesammelt und zur Meßstelle (Kippschalenwippe, Meßkasten mit V-Überfall) geführt. Das Wasser des Abflusses aus dem Boden (Interflow) wird aus dem Graben geleitet und ebenfalls einer Meßstelle zugeführt (NAEF et.al., 1998).

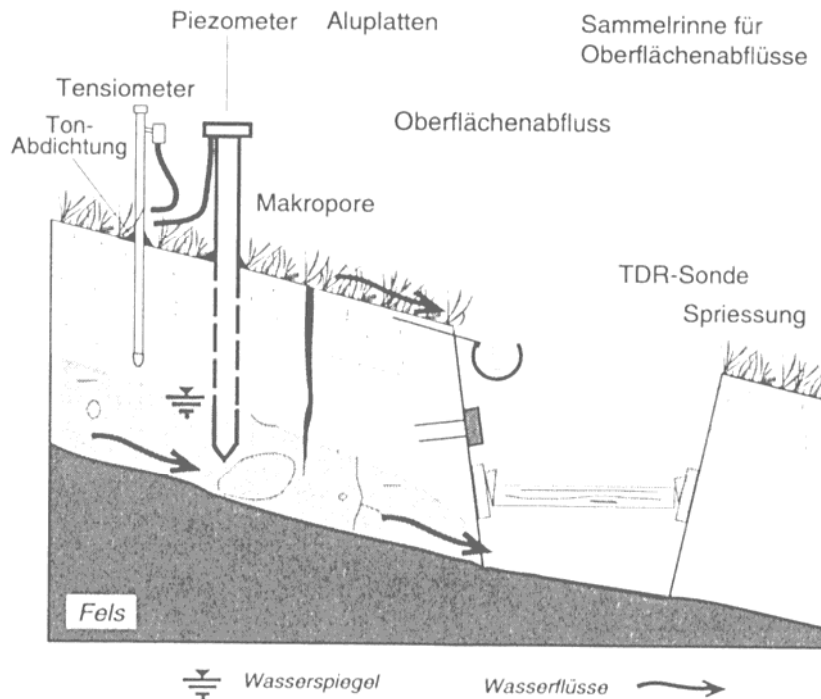


Abbildung 2: Detailansicht: Auffanggraben und Meßinstrumente (NAEF et.al., 1998). Um die beteiligten Prozesse genauer beschreiben zu können, werden zusätzliche Meßinstrumente installiert. Dabei kommen sog. TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry) zur Messung der Bodenfeuchte (Volumensfeuchte in definierten Tiefenstufen), Tensiometer zur Registrierung der Saugspannungen im Boden und Grundwasserstandrohre (Piezometer) zur Messung allfälliger Hangwasserspiegel zur Anwendung.

### 2.1.3.5 Laboruntersuchungen

Nach Abschluß der Berechnungen wurden vom jeweiligen Versuchsstandort Bodenproben zur Bestimmung der bodenphysikalischen Kennwerte entnommen. Die von den Forschungsteams bestimmten Kenngrößen umfassen im allgemeinen:

*Feststoffdichte (FD):*

$$\Rightarrow \text{Gesamtporenvolumen; GPV} = (1\text{LD}/\text{FD}) \cdot 100 \quad [\text{Vol}\%]$$

*Lagerungsdichte (LD):*

$$\Rightarrow \text{Substanzvolumen; SV} = 100 - \text{GPV} \quad [\text{Vol}\%]$$

*Korngrößenverteilung:*

$$\Rightarrow \text{Korngrößen als Anteil der mineralischen Substanz KG (in\%minSV)} \\ = \text{minSV} \cdot \text{KG}(\text{Gew}\%)/100 \\ [\text{Gew.\% vom mineralischen Substanzvolumen}]$$

*Organische Substanz in Gewichtsprozent des Feinbodens (OS):*

$$\Rightarrow \text{Organ. Substanz als Anteil am Substanzvolumen} \\ \text{org.SV} = \text{SV}/100 \cdot \text{OS} \quad [\text{Gew}\% \text{ vom Substanzvolumen}]$$

$$\Rightarrow \text{Mineral. Substanz als Anteil am Substanzvolumen} \\ \text{min.SV} = \text{SV} - \text{org.SV} \quad [\text{Gew}\% \text{ vom Substanzvolumen}]$$

*Wassergehalt (WG) bei Unter- bzw. Überdruck:*

$$\Rightarrow \text{Wasseranteil} \quad [\text{Vol}\%]$$

$$\Rightarrow \text{Max.- und minimale Wasserkapazität} \quad [\text{Vol}\%]$$

$$\Rightarrow \text{Permanenter Welkepunkt} \quad [\text{Vol}\%]$$

$$\Rightarrow \text{Gröbst,- Grob,- Mittel,- und Feinporen} \quad [\text{Vol}\%]$$

$$\Rightarrow \text{Feldkapazität} \quad [\text{Vol}\%]$$

$$\Rightarrow \text{Luftkapazität} \quad [\text{Vol}\%]$$

$$\Rightarrow \text{Maximales Luftvolumen} \quad [\text{Vol}\%]$$

*Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $K_f$ -Wert):*

$$\Rightarrow \text{Potentielle Infiltration bei Feldkapazität}$$

$$\text{INFpot} = (\text{LK} \cdot \text{Tiefe} \cdot \text{Kf})/2400 \quad [\text{mm/h}]$$

$$\Rightarrow \text{Summe der Infiltrationsraten über mehrere Tiefenstufen (in cm)}$$

$$\text{INFsum} = \text{INFpot}(t_1) + \text{INFpot}(t_n) \quad [\text{mm/h/t}]$$

$$t_1 \text{ bis } t_n = \text{Tiefenstufen; } t = \text{Gesamttiefe}$$

Die Bodenacidität wurde in den meisten Fällen vor Ort mit einem einfachen pH-Meter bestimmt.

### 2.1.3.6 Vergleich: Groß- Kleinregenanlage

- Eine geringere Anzahl von Messungen auf Großflächen (75 bis 100 m<sup>2</sup>) liefern aussagekräftigere Meßresultate als eine Vielzahl an Daten von Kleinflächen (YOUNGS, 1991).
- KAINZ et al. (1992) haben verschiedenste Groß- und Kleinregenanlagen verglichen. Ihren Ergebnissen zufolge kommen Großregenanlagen über 40 m<sup>2</sup> Fläche den natürlichen Abflußverhältnissen im Versuchsgebiet am nächsten. Bei Anlagen mit einer beaufschlagten Fläche kleiner als 10 m<sup>2</sup> ist eine Extrapolation der Ergebnisse nur sehr eingeschränkt möglich, denn je geringer die berechnete Fläche, um so schwieriger gestaltet sich die Auswahl an gebietstypischen Boden/Vegetationskomplexen.
- Kleinflächen provozieren weit größere Randeffekte als Großflächen, auch bei Beregnungsversuchen ist ein Minimalareal notwendig, um gebietsrepräsentative Meßwerte zu erhalten.
- Der Anteil an lateral verlagertem Abfluß und lateralen Sickerwasserverlusten ist bei Kleinflächen relativ größer.
- Bei gleichen Windverhältnissen sind auf der Kleinfläche größere Verluste durch Abdrift zu erwarten.
- Jeder Regentropfen legt in Abhängigkeit von seiner Größe nach dem Aufprall bis zur Einsickerung in den Boden einen bestimmten Fließweg zurück (GHADIRI & PAYNE, 1988). Besonders bei hohen Niederschlagsintensitäten erfährt diese Fließstrecke bei Kleinanlagen eine extreme Beschneidung. Bei der Wahl zu kleinen Beregnungseinheiten läuft man daher vor allem in geneigtem Gelände Gefahr direkt die Abflußmeßanlage mit Wasser zu versorgen und das Retentionsvermögen des Boden-/Vegetationskomplexes zu unterschätzen.
- KÖRNER et.al. (1980) quantifizieren auf einem gleichmäßig geneigten, 22 m<sup>2</sup> großen Geländestreifen in den Hohen Tauern, Bereich Großglocknerstraße, in ca. zweieinhalb Monaten 5% des in dieser Zeitspanne gefallenen Niederschlags als Oberflächenabfluß. Auf einer Kleinfläche (3 m<sup>2</sup>) wurden im selben Zeitraum wesentlich höhere Werte (20%) gemessen.

- Auch die Untersuchungen von GUGGENBERGER (1980) am Patscherkofel bei Innsbruck ergaben auf kleineren Versuchsfächen höhere Abflüsse. Als Hauptursache der geringeren Versickerungsleistung der Kleinflächen führt er ebenfalls den zu kurzen Fließweg an.
- Die Abflußmessung der Großregenanlagen ist meist mit großen Fehlern behaftet (z. B. Anfüllen und Leeren eines 300 Liter-Gefäßes). Diese zufälligen Fehler entfallen bei Kleinregenanlagen mit einer quantitativen Auflösung von 1 Liter.
- Kleinregenanlagen benötigen weniger Dotationswasser, es lassen sich daher mehrere Versuchszyklen durchführen. Dadurch läßt sich das Verhalten einer Probefläche unter verschiedenen Bedingungen besser beschreiben als bei einem Einzelversuch.
- Die Wahrscheinlichkeit, eine in sich homogene Versuchsfläche zu finden ist bei Kleinregenanlagen größer als bei Großregenanlagen.
- Durch die Anordnung mehrerer Kleinregenanlagen auf einer Versuchsfläche wird die Variabilität dieser Fläche deutlich. Ein einzelner Meßwert einer Großregenanlage stehen mehrere Meßwerte der Kleinregenanlage gegenüber. Diese können statistisch ausgewertet werden und zu einer genaueren Beschreibung der abflußbildenden Prozesse herangezogen werden.
- Die Niederschlagsaufbringung gestaltet sich bei Kleinregenanlagen wesentlich einfacher und läßt sich mit geringeren Fehlern realisieren.

Je nach Fragestellung wird man sich deshalb für den jeweiligen Anlagentyp entscheiden. Werden allgemeine Aussagen über größere Bezugsflächen benötigt, ist eine Großregenanlage von Vorteil. Will man jedoch Aussagen über einen speziellen Fragenkomplex auf einer Versuchsfläche mit großer Genauigkeit treffen, überwiegen die Vorteile der Kleinregenanlage.

## 2.2 Einflussfaktoren auf Oberflächenabfluss und Infiltration in Steillagen

### 2.2.1 Primäre Einflußfaktoren

#### 2.2.1.1 Höhenlage

Ein direkter Einfluß der Höhenlage in Bezug auf Oberflächenabfluß und Infiltrationsrate läßt sich nicht nachweisen. Vom Verlauf der Höhenlage der 0°C-Grenze hängt aber sowohl die Entwicklung der Schneedecke als auch die Form des Niederschlages (fest, flüssig) ab. So zeigte sich, daß die höchsten Abflußkoeffizienten (Verhältnis Direktabflußvolumen/Niederschlagsvolumen) in vergletscherten Einzugsgebieten (0.89) und in Einzugsgebieten mit Schneeschmelze (0.94) gemessen wurden (Mitteilungen des Eidgenössischen Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, 1991). Indirekten Einfluß auf das Abflußgeschehen übt die Höhenlage in Verbindung mit der vorkommenden Vegetationsdecke, mit dem Temperatur- und Strahlungshaushalt (Bodenwärme, Transpiration, Evapotranspiration) sowie über Bodenart und Bewindung aus.

#### 2.2.1.2 Exposition

Erwartungsgemäß nimmt die Exposition großen Einfluß auf die Bodenwärme. Die folgende Tabelle 1 (NEUWINGER, 1978) gibt beispielhaft für drei Standortgruppen die Sommer-Mitteltemperaturen für drei Bereiche an:

Standortsgruppen	[Ø Temperatur in 10 cm Bodentiefe in °C]		
	alpin	subalpin	montan
dichte Zwergstrauch- und Flechtenhaiden auf Podsolen, Rendsina mit organischer Auflage und Pechrendsinen	6,3	13,5	16,3
schütterere Zwergstrauchheiden auf Podsolkolluvien, <b>SE-Sw-Exposition</b>	8,6	14,6	k. A.
schütterere Zwergstrauchheiden und Rasen auf Braunerden, Braunlehm, Mullrendsinen	10,2	16,5	18,3
<b>E über S bis W-Exposition</b>			

Tabelle 1: Sommer-Mitteltemperaturen für drei Standortgruppen (NEUWINGER, 1978)



Die Untersuchungen ergaben, daß Böden mit Rohhumusbildung, Eisenhumuspodsole, Rendsinen mit organischer Auflage, aber auch Pechrendsinen, in alpinen Beobachtungsgebieten vorwiegend nordexponiert auftreten und in den oberen Humushorizonten (in 10 cm Tiefe) sehr niedrige Bodenmitteltemperaturen aufweisen. Ihnen steht die Gruppe von Standorten mit höheren Bodenmitteltemperaturen gegenüber (Podsolokolluvien unter Zwergstrauchheiden, Braunerden und Braunlehme unter Rasen und vergrastem Zwergstrauchheiden, mullartige und Mull- Rendsinen unter schütterem und vergrastem Zwergstrauchheiden), welche vorwiegend südexponiert auftritt. Die Standortsgegensätze verschärfen sich mit zunehmender Höhe. In subalpinen und alpinen Bereichen sind die Gegensätze zwischen den verschiedenen exponierten Standorten größer als im montanen Gelände.

Generell ist festzuhalten, daß die Exposition im Zusammenwirken mit der Bodenerwärmung Einfluß auf Humus- bzw. Bodenbildungsprozesse nimmt und dadurch den Wasserhaushalt und somit das Abflußgeschehen von Einzugsgebieten mitbeeinflußt.

### **2.2.1.3 Hangneigung**

Der Einfluß der Neigung auf den Abfluß unversiegelter Flächen ist weder als entscheidend anzusehen, noch ist ein mathematisch nachvollziehbarer Zusammenhang gegeben (LANG 1995). In seiner Gesamtschau der durchgeführten Versuche (1998 und 1990) wurde diese Aussage (sh. Abbildung 3) bestätigt.

Abgesehen von den beiden Abflußhöchstwerten (44 bzw. 42,5% bei einer zugehörigen Neigung von 60%), die von einer Weideparzelle stammen, weisen auch Meßflächen mit geringerer Neigung sehr hohe Abflüsse auf. Als Beispiel sei eine Pistenparzelle mit 32% Hangneigung und 36,7% Abfluß angeführt. Demgegenüber gab es auch Meßflächen mit großer Neigung, die in der Lage waren, die gesamte auf sie fallende Niederschlagsfracht aufzunehmen.

Auch durch die Einordnung der Meßflächen in die drei Bewirtschaftungsgruppen ist kein Zusammenhang (innerhalb der Bewirtschaftungsverhältnisse) zwischen Neigung und Abfluß festzustellen. Es zeigte sich vielmehr die Größe der Bandbreite der Abflüsse bei annähernd gleicher Hangneigung. Die Gruppe der Waldparzellen ragt besonders durch die große Zahl von Messungen heraus, die keinen bzw. nur geringen Abfluß aufweisen und zeigt dadurch die Fähigkeit großen Wasseraufnahmevermögens auch bei großen Neigungen. Die "deutlichste" Aussage

über einen möglichen "Zusammenhang" zwischen Neigung und Abfluß steuerte die Gruppe der Weideparzellen, auf Grund geringer Schwankungsbreite der Berechnungsflächen, bei. Bei Hangneigungen zwischen 57% und 60%, lagen die gemessenen Abflüsse zwischen 0 und 44%.

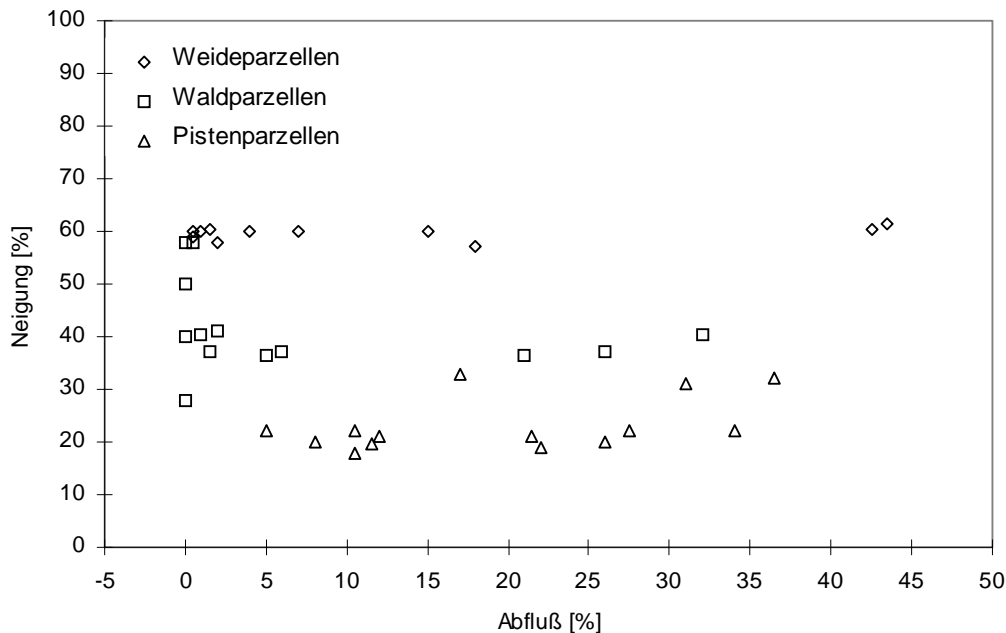
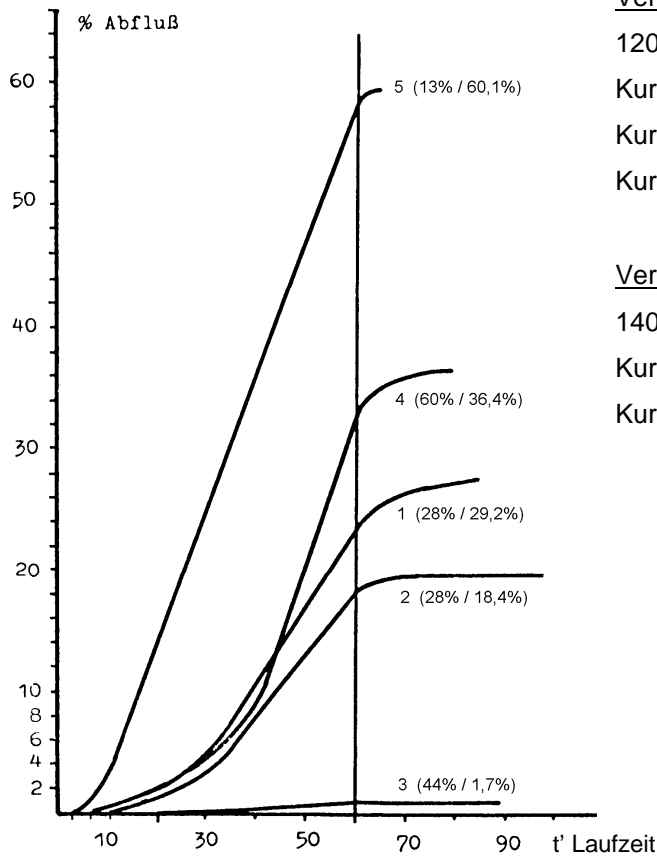


Abbildung 3: Gegenüberstellung von Abfluß - in Prozent des aufgetragenen Niederschlags- und Neigung der entsprechenden Meßparzellen (LANG 1995)

Zu ähnlichen Ergebnissen kam SCHAFFHAUSER (1982) im Zusammenhang mit den Untersuchungen in den Mustereinzugsgebieten der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien. Anhand von Beregnungsversuchen (100 l/m<sup>2</sup>) auf Untersuchungsflächen von 100 m<sup>2</sup> Größe wurde das Abflußverhalten verschieden bewirtschafteter Testflächen (Skipiste - Weide - Wald) mit unterschiedlicher Neigung untersucht.

In der nachstehenden Abbildung 4 sind die Untersuchungsergebnisse (Abflußganglinie, durchschnittliche Hangneigung, Abfluß in Prozent des aufgetragenen Niederschlags) abzulesen.



#### Versuchsreihe "Schipisten Schmittenhöhe"

1200 m ü. NN.

Kurve 1: Unbeweidete Piste

Kurve 2: Beweidete Piste

Kurve 3: Waldrand

#### Versuchsreihe "Projekt Neustift"

1400 m ü. NN.

Kurve 4: Beweidete Piste

Kurve 5: Waldweide - Blöße

Abbildung 4: Ergebnisse der Beregnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Schmittenhöhe und Neustift/Stubai (SCHAFFHAUSER 1982).

Die Ergebnisse lassen auf keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Abflußstärke und Hangneigung schließen. Auch die durchgeführten Untersuchungen auf den Steilhängen des Dürnbachs erbrachten den Nachweis, daß eine Zunahme der Steilheit der Hänge keinen entscheidenden Einfluß auf das Abflußverhalten ausübt. Als entscheidend wurden vor allem die standortspezifischen Faktoren (Bodentyp und Vegetation) erkannt. Die Ergebnisse der Versuchsreihe Dürnbach sind in Abbildung 5 dargestellt.

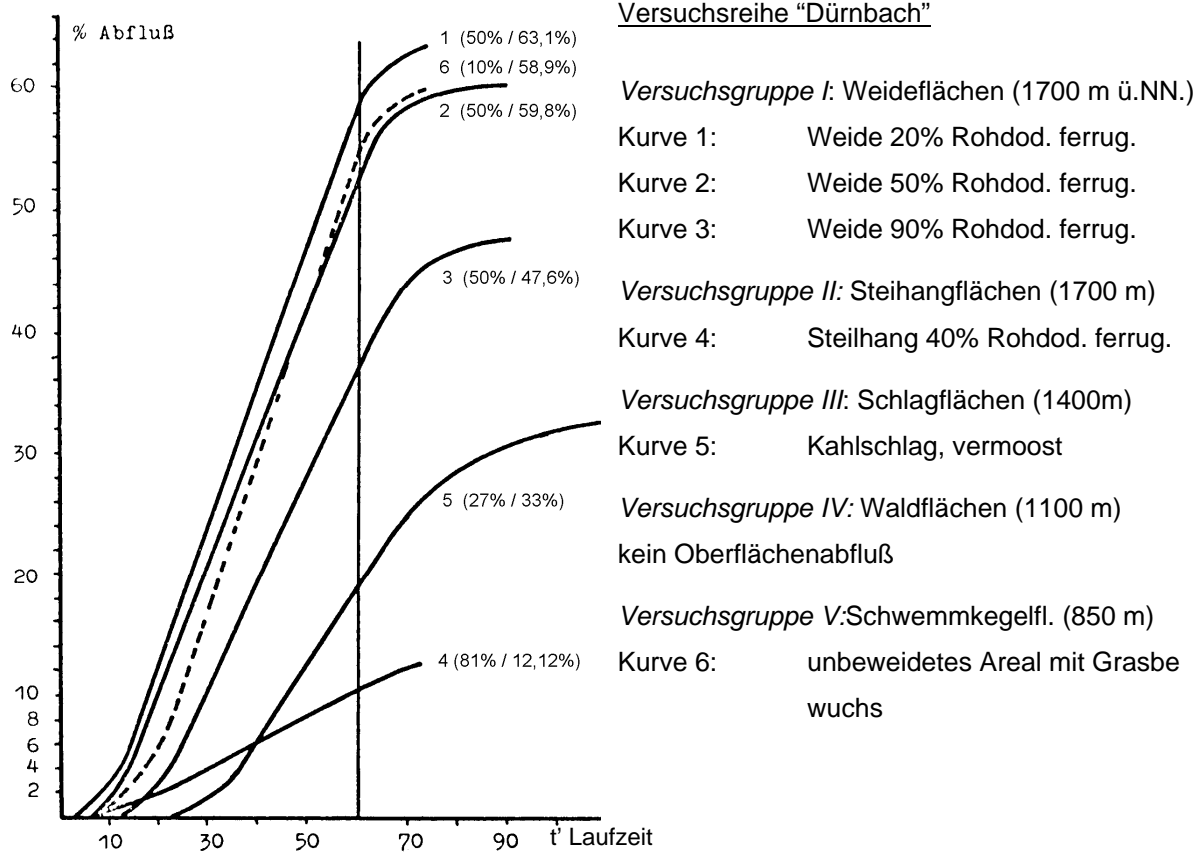


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Beregnungsversuche im Dürnbach (SCHAFFHAUSER 1982)

Die Abfluentstehung im Boden (Interflow) dauert in der Regel länger als an der Oberfläche. In Abbildung 6 sind deshalb die Abflußkoeffizienten nach zwei Stunden Beregnung angeführt:

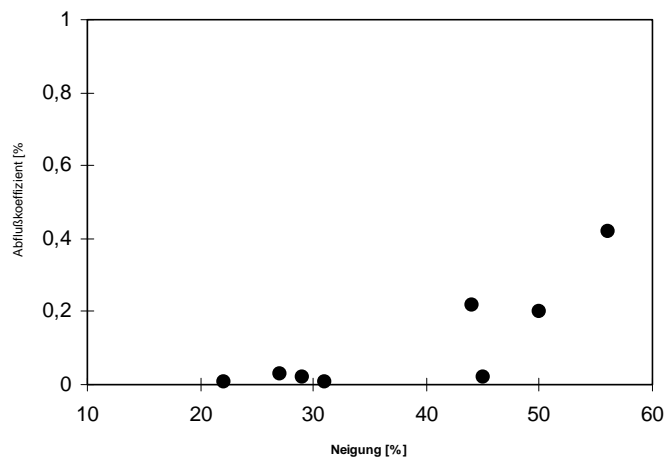


Abbildung 6: Interflow in Abhängigkeit von der Hangneigung (LANG 1995)

Es ist eine leichte Zunahme des Abflusses in Böden mit größerer Hangneigung ersichtlich. Die laterale Durchlässigkeit und das Drainagevermögen scheinen in steileren Hangböden größer zu sein als in flacheren (NAEF et. al., 1998). Diese Aussage bedarf aber noch einer genauen statistischen Absicherung.

#### **2.2.1.4 Relief und Geländemorphologie**

Reliefbezogene Faktoren wie Hanglänge, Hangrichtung, natürliche Gerinnetze, Ausbildung von Mulden (Hangrauhigkeit, Retentionsräume) sowie Fremdwassereinfluß (Anfangsbodenfeuchte) haben oft entscheidenden Einfluß auf das Abflußgeschehen von Einzugsgebieten.

Ursächliche Abhängigkeiten der Abflußbildung von morphodynamischen Prozessen müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Dabei spielen Laständerungen, Spannungsumlagerungen und das Auftreten von Massenselbstbewegungen eine große Rolle. Eine genaue Identifikation bzw. Quantifizierung dieser Einflußgrößen in Bezug auf das Infiltrations- und Abflußverhalten der Untersuchungsgebiete ist nicht möglich. Sie können nur im Zusammenhang mit den Standortseigenschaften verstanden werden bzw. lassen sie lediglich die Spannweite der festgestellten Abflüsse auf den Untersuchungsflächen erkennen. Erst durch Verdichtung des Datenmaterials aus Versuchen auf allen Einflußebenen (Boden-Vegetationskomplexen) wird es möglich sein, die angetroffenen morphologischen Einflüsse auf das Abflußgeschehen präziser zu gewichten um bei der Prognose von Abflußeigenschaften von Einzugsgebieten zunehmend an Sicherheit zu gewinnen.

##### *Der zeitliche Verlauf des Abflußvorganges:*

Der Beginn des Anstiegs jeder Abflußganglinie, egal aus welchem Abflußvorgang sie zustande kommt, zeigt eine gewisse Verzögerung gegenüber dem Niederschlagsbeginn. Zum einen kann der Abflußvorgang erst aktiviert werden, wenn die Sättigungsdefizite der entsprechenden Wasserwege aufgefüllt sind, zum anderen braucht das Regenwasser eine gewisse Fließzeit, die sogenannte Laufzeit, um zu einem bestimmten Querschnitt im Gerinne zu gelangen. Die jeweilige Laufzeit eines Einzugsgebietes ist demnach überwiegend von der Gebietsform und damit vom Relief abhängig. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 7 graphisch dargestellt.

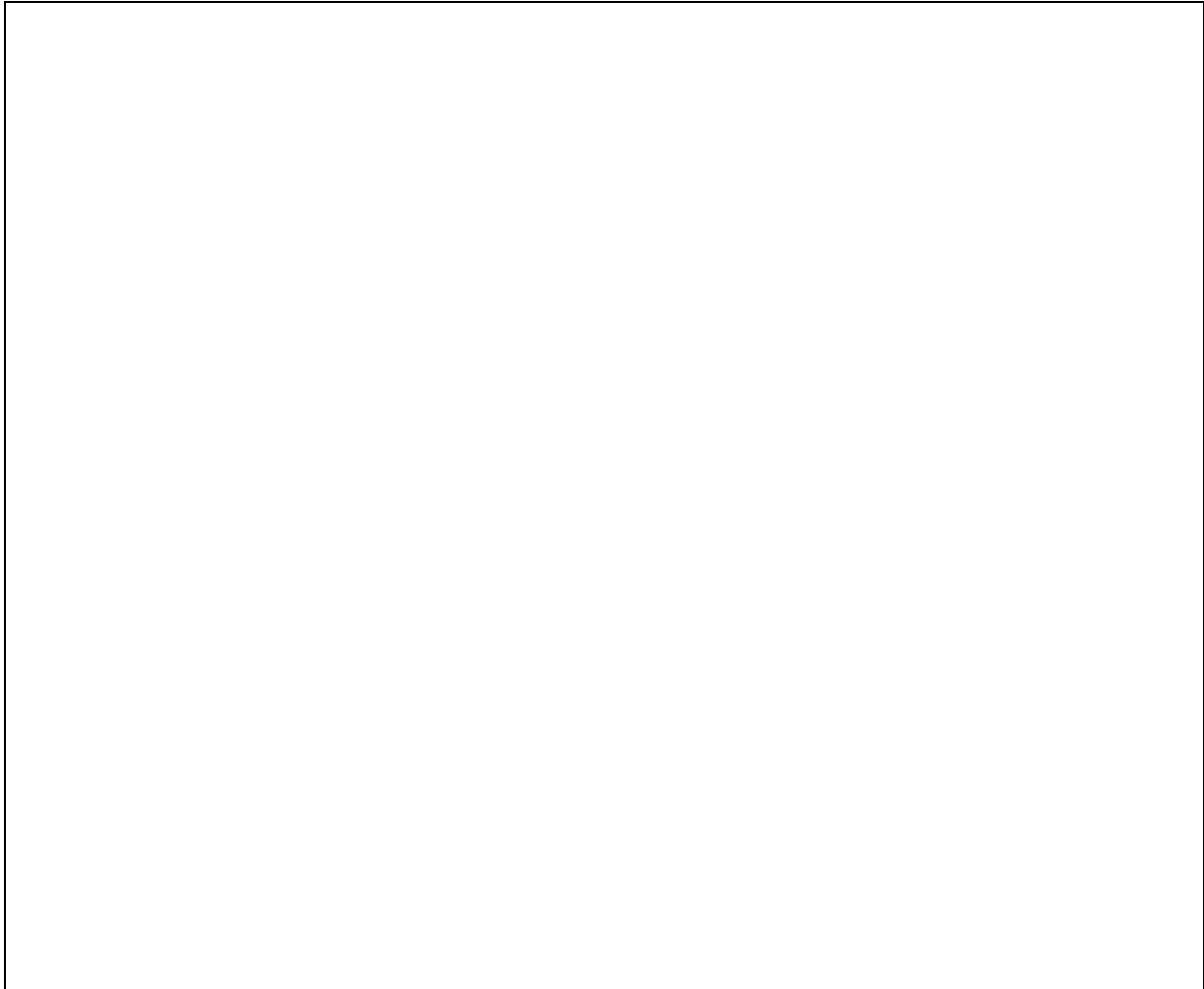


Abbildung 7: Einfluß der Gebietsform auf die Systemfunktion (OSTROWSKI G. & WOLFSCHUHMAN U., 1994)

### **2.2.1.5 Geologie**

Unter dem Komplex "Geologie" fallen alle im Zusammenhang mit Lithologie und Tektonik stehenden Primärursachen für die Abflußbildung. Die Lithologie umfaßt dabei im wesentlichen den petrographischen Inhalt der Sedimente (Fest- und Lockergesteine) und ihrer Verwitterungsprodukte sowie davon abhängige physikochemische Eigenschaften, die über das Auftreten von Labilitäten, Instabilitäten und Hangbewegungen Einfluß auf das hydrologische Geschehen nehmen. Darüber hinaus müssen zusätzliche Merkmale und Eigenschaften wie Verfestigungsgrad bei Lockergesteinen sowie die Wasserdurchlässigkeit bei der Identifizierung des Abflußgeschehens berücksichtigt werden.

Neben der Lithologie ist vor allem die Tektonik, d.h. die Raumlage und die Ausbildung von Diskontinuitäten im Einzugsgebiet von entscheidender Bedeutung. Diskontinuitäten sind makroskopische Grenz- oder Trennfächen (Kluft- und

Rißsysteme), die durch Art, Ausbildung und Raumlage wichtige hydrologische Verhaltensweisen des Einzugsgebietes repräsentieren. Ihr Verhalten und ihre Eigenschaften sind also weitgehend von den mechanischen und physikalischen Auswirkungen dieser Trennflächen, die Zonen verstärkter Infiltration und Versickerung darstellen, mitbestimmt. Ganzheitlich müssen daher die hydrologischen Prozesse in Verbindung mit dem Trennflächengefüge, großräumigen Diskontinuitäten sowie der tektonischen Beanspruchung der Gesteine betrachtet werden. Daneben üben auch Lagerung und Wechselfolgen von harten und weichen Gesteinen einen großen Einfluß auf das Abflußgeschehen aus.

Eng verbunden mit der Geologie sind letztendlich sämtliche Bodenbildungsprozesse und die daraus resultierenden Bodenserien mit den dazugehörigen Abfolgen von Vegetationseinheiten, ohne deren Betrachtung das komplexe Abflußsystem eines Wildbacheinzugsgebiets nicht ausreichend genau beschrieben werden kann.

#### **2.2.1.6 Klima**

Hier sind vor allem die Faktoren Niederschlag und Temperatur zu nennen, wobei die primäre Bedeutung dieser Kriterien wieder in ihrer Wechselwirkung mit anderen Systemfaktoren zu sehen ist.

So nimmt die Niederschlagsdisposition einer Region Einfluß auf den durchschnittlichen Wassergehalt (Anfangsfeuchte in Hinblick auf Starkregenereignisse) der Böden und bedingt hydrostatische und hydrodynamische Druckunterschiede. Daneben führt der Wechsel von Temperatur und Feuchtigkeit zu Spannungsverlagerungen, die im Lockergestein eine Auflockerung des Korngefüges sowie Rißbildung bewirken und im Festgestein vor allem die Klüftigkeit erhöhen. Diese Vorgänge gehen mit einer Vergrößerung des Porenvolumens einher, das eine ständige Änderung der Infiltrationskapazität der Böden bedingt.

Über die Jahresmitteltemperatur, Bewindung und Schneedeckendauer bestimmt das Klima die Länge der Vegetationsperiode und damit die Artenzusammensetzung in alpinen Regionen. Die Vegetation ihrerseits bestimmt maßgebende Standortseigenschaften in Hinblick auf Infiltration bzw. Oberflächenabfluß.

#### **2.2.1.7 Zusammenfassung**

Die Alpen weisen eine große Standortvielfalt auf. Neben der erdgeschichtlichen Vergangenheit, insbesondere den Auswirkungen der letzten Vereisungsperiode, ist diese Standortvielfalt das Ergebnis vieler verschiedener, zeitlich und örtlich

unterschiedlich stark auf das Ökosystem einwirkender Geo- und Biofaktoren. Zusätzlich greift seit Jahrhunderten der Mensch als Faktor mit steigender Intensität in das Ökosystem Alpen ein. So komplex die Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Faktoren (Klima, Geologie, Mensch, Zeit) sind, so vielfältig ist auch der Einfluß auf das Abflußgeschehen eines Einzugsgebietes.

Um einen Beitrag zur Klärung der komplexen Ursachen von Abfluß- und Abtragungsprozessen im Bergland leisten zu können, müssen sog. „Integrale Konzepte bzw. Methoden“ gefunden werden. Infiltration und Oberflächenabfluß und die daraus resultierende Abflußtätigkeit können nicht als isolierte räumliche Phänomene aufgefaßt werden. Eine solche eindimensionale Betrachtungsweise ist nicht ausreichend um die Systemzusammenhänge verstehen und identifizieren zu können.



## 2.2.2 Sekundäre Einflußfaktoren

### 2.2.2.1 Bodenabhängige Einflußfaktoren

Über sein Gefüge, das ein Produkt der Gesteinsverwitterung, organischer Substanz und des Bodenlebens darstellt, übt der Boden einen großen Einfluß auf den Wasserhaushalt eines Standortes aus. Ein ausgewogenes Verhältnis von Grob- und Gröbstporen einerseits und Mittel- und Feinporen (vgl. Tabelle 2) andererseits gewährleisten eine schnelle Infiltration und Versickerung von Niederschlagswasser sowie dessen Rückhalt und Speicherung.

Das Verhältnis von Gewicht zu Volumen ist bei verschiedenen Böden, aber auch bei ein und dem selben Boden in verschiedenen Tiefen nicht gleich. Es verändert sich im Verlaufe der natürlichen Bodenentwicklung, aber auch infolge von Eingriffen des Menschen. In beiden Fällen gibt es sowohl Lockerungs- als auch Verdichtungsvorgänge, die die Lagerung, also die Anordnung der einzelnen Feststoffpartikel im Raum verursachen. Die Art der Anordnung wird als Gefüge oder Struktur bezeichnet. Sie ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Dazu gehören: Korngrößenverteilung und Kornform der Mineralteilchen, Menge und Art der organischen Substanz, Wassergehalt, Wasserbindung und Verteilung des Wassers sowie äußere Einflüsse wie Lasten von Bodenschichten, Fahrzeugen oder Beweidung.

#### 2.2.2.1.1 Kennwerte des Bodengefüges

##### 1. Dichte des Bodens:

Bezieht man die Masse an festen Bestandteilen ( $m_f$ ) auf das gesamte Bodenvolumen ( $V_g$ ), so erhält man eine Verhältniszahl  $d_B$  ( $\cong \rho_B$ )

$$\frac{m_f}{V_g} = d_B \quad [\text{g/cm}^3]$$

die als Dichte des Bodens oder die Bodendichte bezeichnet wird. Weitere Bezeichnungen sind Raumgewicht, Volumengewicht, scheinbare Dichte, Schüttgewicht oder Lagerungsdichte.

## 2. Porenvolumen:

Anstelle der Masse der festen Bestandteile kann auch das Volumen der Poren ( $V_p$ ) auf das Gesamtvolumen ( $V_g$ ) bezogen und als Prozentzahl ausgedrückt werden. Man erhält dann das Porenvolumen bzw. den Porenanteil als:

$$PV = \frac{V_p}{V_g} * 100$$

Das Porenvolumen wird auch als Porosität bezeichnet und als Bruch angegeben (z.B. 0,45 anstelle von 45%). Die Verwendung des Parameters "Porenvolumen" ist dort angebracht, wo Vorgänge beschrieben werden, die volumenabhängig sind. Hierzu gehören unter anderem alle Vorgänge des Wasser-, Luft- und Wärmehaushaltes eines Bodens. In Fällen in denen Volumensveränderungen untersucht werden, ist dieser Parameter ungeeignet, weil die Bezugsbasis nicht konstant bleibt. Hier ist es notwendig, das Feststoffvolumen als Bezugsbasis zu nehmen.

## 3. Porenziffer:

Die Porenziffer ( $\epsilon$ ) gibt den Volumenanteil der Poren ( $V_p$ ), bezogen auf das Feststoffvolumen ( $V_f$ ) an.

## 4. Porengrößenverteilung (Porung):

Die Porengrößenverteilung stellt ein Kontinuum dar, das in konventionell festgelegte Bereiche unterteilt werden kann. Die Grenzen zwischen den Porengrößenbereichen sind an charakteristische Kennwerte des Wasserhaushalts angelehnt.

Porengrößenbereiche	Porendurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	Wassersäule (cm)	pF
Gröbstoporen	> 500	---	---
Grobporen, weite	50 - 500	1 - 60	0 - 1,8
Grobporen, enge	50 - 10	60 - 300	1,8 - 2,5
Mittelporen	10 - 0,2	300 - 15000	2,5 - 4,2
Feinporen	< 0,2	> 15000	> 4,2

Tabelle 2: Porengrößenbereiche

Die Äquivalentdurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  entsprechen der Entwässerungsgrenze bei verschiedenen Wasserspannungen der Feldkapazität und

0,2  $\mu\text{m}$  der Entwässerungsgrenze beim permanenten Welkepunkt (vgl. auch Matrixinfiltration).

Die Porengrößenverteilung ist hinsichtlich der Primärporen von Körnung und Kornform und hinsichtlich der Sekundärporen vom Bodengefüge und damit von der Bodenentwicklung abhängig. Deshalb ist der Anteil an Grobporen in der Regel um so größer, je grobkörniger (d.h. je sand- oder kiesreicher) die Böden sind. Der Anteil an Feinporen ist dagegen um so größer, je feinkörniger die Böden sind.

### 2.2.2.1.2 Prinzip der Wasserbewegung

Die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Boden ist nach DARCY (1856) vom Druckgefälle und von der Bodendurchlässigkeit abhängig.

$$v_f = k_f * I \quad [\text{m/s}]$$

mit

$$k_f = \text{Durchlässigkeitsbeiwert} \quad [\text{m/s}]$$

$$I = \text{Druckgefälle} \quad [\text{m/m} = 1]$$

Die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  ist ein Rechnungswert, bestimmt aus dem Durchfluß in der Zeiteinheit je Einheit der Bruttofläche, die rechtwinkelig zur Bewegungsrichtung steht ( $v_f = Q/A$ ).  $v_f$  entspricht der Geschwindigkeit, mit der sich offenes Wasser auf die Oberfläche eines Filters hin bewegt.

$$Q = v_f * A = k_f * I * A \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Durchfluß durch eine Bodenfläche A

Das Filtergesetz von DARCY gilt für  $v_f \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ . Darüber ist die tatsächliche Filtergeschwindigkeit etwas größer, als sie sich aus der Formel für  $v_f$  ergibt.

Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  ist von der Wichte und der dynamischen Viskosität  $\eta$  des strömenden Wassers abhängig. Beide Größen sind mit der Temperatur veränderlich. Das Filtergesetz von DARCY gilt für den Fall von gesättigtem Fließen bei nach allen Richtungen gleichbleibendem  $k_f$  - Wert.

Hört die Wasserzufuhr für das gesättigte Fließen auf, - das Gravitationspotential  $\psi_G$  wird null -, dann endet auch nach Entleerung der Grobporen der Ausfluß von Drainwasser. Das Wasser in der Bodensäule ist dann nur mehr als Kapillar- und Filmwasser vorhanden und steht unter Saugspannung ( $\psi_S$ ). Stellt sich aber unterhalb der Bodensäule ein luffterfüllter Raum ein, dann bilden sich tragende Minisken im Übergang zur Luft und die Bodensäule bleibt am unteren Ende wassergesättigt.

Dieser Zustand stellt sich vor allem beim Übergang von feinporigen zu grobporigen Bodenhorizonten ein. Dies führt häufig sogar zu reduzierenden Bedingungen. Für das ungesättigte Fließen in horizontaler Richtung ist der Gradient des Matrixpotentials entscheidend. Beim vertikalen Fließen ist immer auch noch die Gravitationskraft zusätzlich wirksam.

Für den Fall von ungesättigtem Fließen im Boden wurde die DARCY-Formel durch ein Kontinuitätskriterium erweitert. Die daraus resultierende Formel ist sowohl auf gesättigtes als auch auf ungesättigtes Fließen anwendbar und wird als Potentialtherm für zweidimensionales Fließen wie folgt dargestellt:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_v(\psi) \left\langle 1 - \frac{\partial \psi}{\partial z} \right\rangle \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left\langle -K_h(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\rangle$$

mit  $C(\psi)$  = Bodenwasserkapazität  
 $K_v(\psi)$  und  $K_h(\psi)$  = relative hydraulische Leitfähigkeiten, als Verhältnis von Wassergehalt und hydraulischem Potential ( $\psi$ ).

Hat der Niederschlag einmal die Vegetationsdecke und die Humusaufgabe durchdrungen, hängt die Infiltration primär von der Makroporenausstattung (sekundäres Porensystem) des Bodens ab (BURCH et al., 1989). Die mangelnde Einsehbarkeit in den Bodenkörper und die Vielzahl verschieden gearteter Makroporen erschweren aber die Erhebung und damit die Beurteilung des Einflusses dieser Strukturen auf die Abflußbildung.

### 2.2.2.1.3 Makroporosität bzw. Makroporeninfiltration

Zum sekundären Porensystem zählt ein großes Spektrum von möglichen Fließwegen im Boden. Die Spannweite reicht von kaum sichtbaren Aggregatgrenzflächen (HOSANG, 1995) bis hin zu mehreren Zentimeter messenden Hohlräumen (abgestorbene Pflanzenwurzeln, Tiergänge, Risse usw.). Da natürliche Böden kaum durchgehende Makroporen aufweisen, muß davon ausgegangen werden, daß in Makroporen fließendes Wasser immer wieder Strecken durch die Matrix überwinden muß, um in die nächste Makropore zu gelangen. Die Kapazität der Makroporen dürfte deshalb zu einem großen Teil durch die Wirksamkeit der Interaktion mitbestimmt sein. Ein weiterer Einfluß auf die Wasseraufnahmekapazität des sekundären Porensystems liegt wie von BOUMA (1990) beschrieben in den Eigenschaften der Bodenoberfläche sowie in der Geometrie der Makroporen selbst. Dies bedeutet, daß abhängig von den jeweiligen Bedingungen, das Abflußgeschehen über die Makroporen verschiedene Ausprägungen zeigen kann. Der allgemeine Infiltrationsprozess kann wie folgt zusammengefaßt werden:

Zu Beginn infiltriert sämtliches Wasser durch die Streu/Humusaufgabe und sättigt diese. Nach Sättigung der Bodenbedeckung beginnen sich die Makroporen zu füllen. Ein zu diesem Zeitpunkt einsetzender Oberflächenabfluß kann Indiz dafür sein, daß das Infiltrationsvermögen des Makroporensystems etwas geringer ist als die Niederschlagsintensität. Das infiltrierte Wasser füllt hauptsächlich die Makroporen, nur wenig Wasser wird an die Matrix abgegeben. Ist das Speichervermögen der Makroporen erschöpft, beginnt sich das Matrixvolumen zu füllen. Da die Interaktion mit zunehmenden Matrixwassergehalt abnimmt, steigt der Oberflächenabfluß kontinuierlich an.

Bevorzugte Fließwege wie sie Makroporen darstellen, lassen das Wasser einerseits rasch zu den Speichern vordringen (Bodenspeicher, geologischer Speicher), andererseits kommt es zu einer schnelleren Abflußbildung (Interflow), wenn die Bodenmatrix auf diesen Wegen umgangen wird und lateral wirksame Fließwege in kurzer Zeit erreicht werden.

Die Frage ob das Makroporensystem nun abflußmindernd wirkt, oder ob es zur Verkürzung der Zeit bis zur Abflußbildung beiträgt, ist für natürlich gewachsene Böden nur untergeordnet von Bedeutung. Bei stark anthropogen beeinflussten Standorten (Beweidung, Verdichtungshorizonte durch Bewirtschaftung) kann sie aber in Zusammenhang mit verstärkten Zwischenabflüssen an Einfluß gewinnen. Wie bei

allen hier gesondert beschriebenen Einflußparametern darf auch der Einfluß der Makroporeninfiltration nur im Gesamtzusammenhang gesehen werden. Jeder Faktor für sich betrachtet läßt keinen Schluß auf das gesamte System zu. Nur bei Betrachtung der Gesamtzusammenhänge ist eine Identifikation und Quantifikation der Abflußgeschehnisse in einem Einzugsgebiet möglich.

#### 2.2.2.1.4 Matrixinfiltration

##### *Begriffe:*

Ein Boden hat die "volle Wassersättigung" erreicht, wenn sein "gesamtes Volumen" (*Gesamtporenvolumen = GPV*) mit Wasser gefüllt ist. Wenn ein Teil dieses Wassers in den schnell dränenden Grobporen (Äquivalentdurchmesser der Poren  $>50 \mu\text{m}$ ) innerhalb kurzer Zeit (zwei bis drei Tage) aus dem Boden abzieht, werden diese Bodenporen mit Luft gefüllt (*Luftkapazität = LK*). Die dann zurückbleibende Wassermenge wird als *Feldkapazität (FK)* bezeichnet. Die hierbei mit Wasser gefüllten Poren haben in der Regel einen Äquivalentdurchmesser von  $< 50 \mu\text{m}$ , in denen das Wasser mit einer Saugspannung von  $p_f > 1,8$  festgehalten wird. Von diesem Wasser ist ein Teil für die Pflanzen nutzbar (*nutzbare Feldkapazität = nFK*). Es wird in der Regel mit Saugspannungen zwischen  $p_F 1,8$  und  $4,2$  zurückgehalten. Daneben wird noch das Kapillar- und Sickerwasser in den langsam dränenden Grobporen (Äquivalentdurchmesser  $50$  bis  $10 \mu\text{m}$ , entspricht  $p_F 1,8$  bis  $2,5$ ) und in den Mittelporen (Äquivalentdurchmesser  $10$  bis  $0,2 \mu\text{m}$ , entspricht  $p_F 2,5$  bis  $4,2$ ) abgegrenzt. Wasser, das mit Saugspannungen  $> p_F 4,2$  in Poren mit einem Äquivalentdurchmesser  $< 0,2 \mu\text{m}$  zurückgehalten wird, ist für die meisten Pflanzen nicht mehr verfügbar (*Welkepunkt*) und wird daher als Totwasser bezeichnet.

Die Wasserbindung bzw. die daraus ableitbare Porengrößenverteilung eines Bodens wird im Labor meist über den Wassergehalt bei der jeweiligen Saugspannung des Bodens ermittelt. Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität, sowie Gesamtporenvolumen können bei Mineralböden im Feld näherungsweise aus Bodenart und Lagerungsdichte mittels Tabellen hergeleitet werden. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 8 graphisch dargestellt (OSTROWSKI, WOLF-SCHUHMANN 1991).

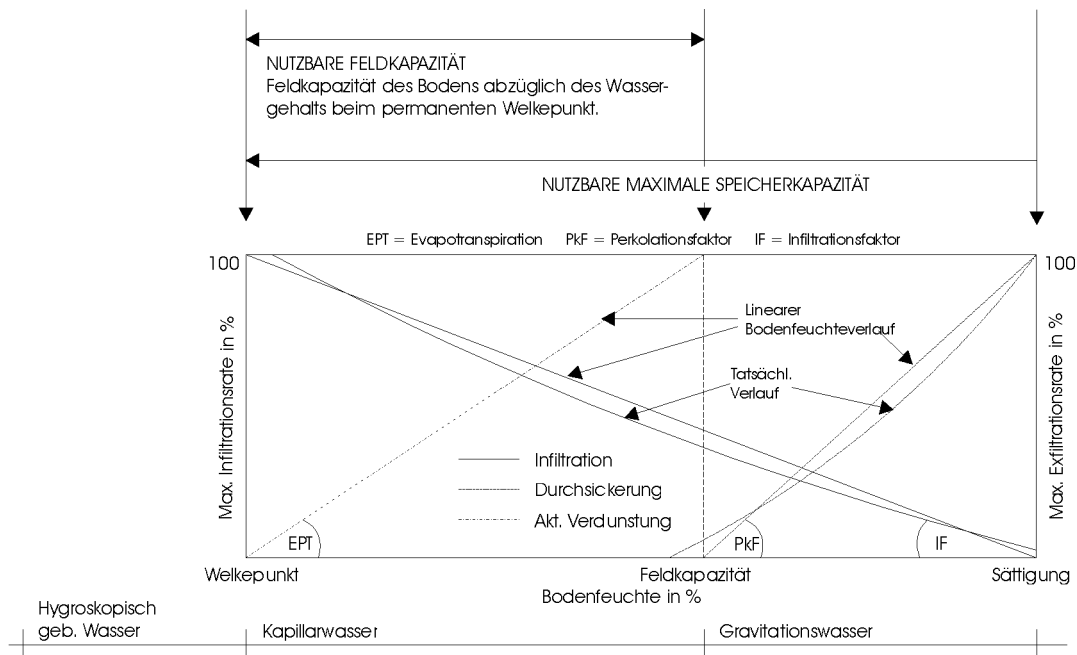


Abbildung 8: Annahmen zur Simulation der Wasserbindung bzw. Bodenfeuchte (OSTROWSKI G. & WOLF-SCHUHMANN U., 1994)

Die Matrixinfiltration ist jener Rechnungswert, der sich ergibt, wenn von der Gesamteinfiltration des Bodens die Makroporeninfiltration subtrahiert wird. Aus den standortspezifischen, bodenphysikalischen Charakteristika wie Korngrößenverteilung (Texturdreieck), Skelettanteil, Porenvolumen, Lagerungsdichte und gesättigte Leitfähigkeit sowie Art und Anteil der organischen Substanz ergibt sich für jeden Boden eine bestimmte Infiltrationsrate. **Unter Infiltrationsrate wird dabei die Wassermenge, die in einem Boden unter den gegebenen Bedingungen je Zeit- und Flächeneinheit versickern kann verstanden.** Die Infiltrationsrate nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte ab und erreicht schließlich bei voller Wassersättigung des Bodens einen mehr oder weniger konstanten Wert, der als *minimale Infiltrationsrate* bezeichnet wird. Diese wird häufig als Maß für die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens angesehen. Wird diese infolge von Starkniederschlägen oder Schneeschmelzen überschritten, kommt es zu Oberflächenabfluß. Ein Vergleich der minimalen Infiltrationsraten mit den maximal möglichen Niederschlägen ermöglicht daher eine gute Abschätzung der Hochwassergefährdung eines Einzugsgebietes.

Die Bestimmung der minimalen Infiltrationsrate kann mittels Doppelring-Infiltrimeter nach SCHAFFER & COLLINS (1966) erfolgen. Diese Methode führt aber wegen der großen räumlichen Variabilität der Durchlässigkeit der Standorte, verbunden mit der geringen Meßfläche des Infiltrimeters zu nicht uneingeschränkt verwendbaren

Ergebnissen. Um einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten müßten daher sehr viele Einzelmessungen durchgeführt werden.

Eine zweite Methode, die minimale Infiltrationsrate festzustellen, sind Beregnungsversuche. Bei Beregnungsversuchen zeigte sich immer wieder, daß der Oberflächenabfluß in Abhängigkeit vom Standort nach einer unterschiedlich langen Beregnungsdauer beginnt, sich dann verstärkt und schließlich bei voller Wassersättigung des Bodens einen konstanten Wert annimmt. Diese konstante Abflußspende dauert so lange an, wie die Beregnung mit gleicher Intensität fortgesetzt wird. Unmittelbar nach dem Beregnungsende verringert sich diese Abflußspende und hört allmählich auf. Diese Erscheinung kann genutzt werden, um die minimale Infiltrationsrate von Böden zu bestimmen. Dem Verfahren liegen folgende Überlegungen zu Grunde:

Wenn eine konstante Niederschlagsspende ( $N$ ) auf einen wassergesättigten Boden eine konstante Oberflächenabflußspende ( $A$ ) hervorruft, muß die Differenz  $N - A$  die Wassermenge sein, die in die Tiefe absickert ( $I_{\min}$ ) und damit der minimalen Infiltrationsrate entsprechen. Diese vereinfachte Wasserbilanzgleichung  $N - A = I_{\min}$  ist zulässig, weil angesichts der großen verregneten Wassermengen (meist 100 mm) die Verdunstung während der Versuchsdauer (1 bis 2 Stunden) vernachlässigbar klein ist und eine Wasservorratsänderung im Boden nicht stattfindet.

Versuchsflächen Nummer	Bodentyp Standortseinheit	Ermittelt nach	
		Infiltrometermessung	Beregnungsversuch
1	Braunerde Pelosol Tonboden	80	60
2	Phänoparabraunerde Decklehm	103	52
3	Zweischichtbraunerde Lehmkerf	141	63
4	Pseudovergleyte Braunerde Sandkerf	178	79
5	Braunerde Sandkerf	123	79
6	Braunerde Tonboden	183	58

Tabelle 3: Die minimale Infiltrationsrate [mm/h] verschiedener Standorte nach SCHWARZ (1982)



### 2.2.2.1.5 Interaktion

Die Infiltration des Niederschlagswassers kann entweder über das Makroporensystem erfolgen oder direkt über die Bodenmatrix stattfinden. Diese Modellkonzeption basiert auf dem Ansatz der doppelten Porosität, d.h. Wasserbewegungen in Makroporen und Matrix werden als unabhängig angenommen. In der Realität sind diese beiden Systeme aber eng miteinander verbunden. Der Wasseraustausch, als Interaktion bezeichnet, geschieht dabei in Abhängigkeit des Druckunterschiedes zwischen diesen zwei Fließsystemen. Die Größe des allgemein als eindimensional in horizontaler Richtung angenommenen Wasseraustausches zwischen den beiden genannten Systemen ist zum einen abhängig von der Geometrie der Makroporen und zum anderen von einer möglichen Hydrophobizität der Porenwände.

Einen Überblick über die an der Abflußbildung beteiligten Infiltrations- und Fließprozesse gibt die Abbildung 9 wieder:

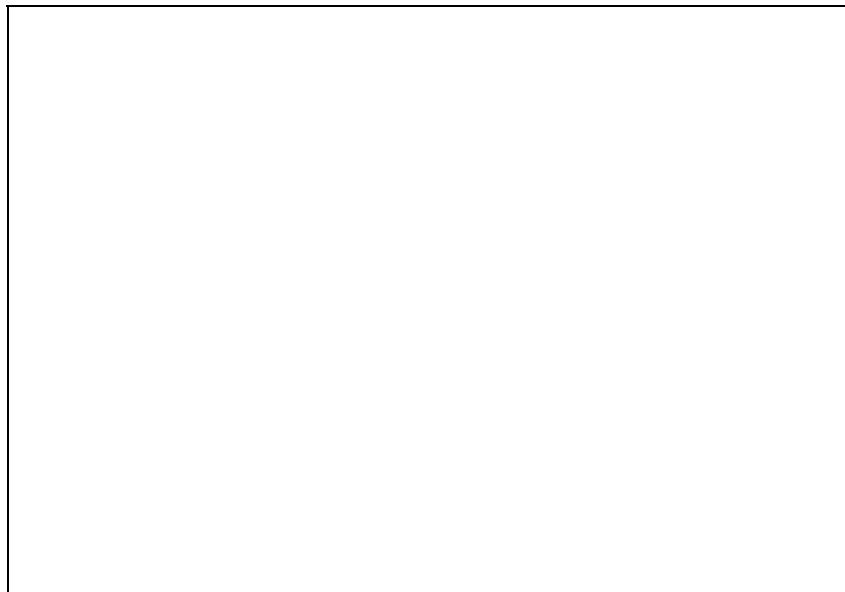


Abbildung 9: Abflußbildung und Retention im Boden. Überblick der maßgeblich beteiligten Prozesse (NAEF et.al., 1998).

### 2.2.2.1.6 Aggregatstabilität

Die Größe der Bodenpartikel und die Bildung von Bodenaggregaten sind von besonderer Bedeutung für das Infiltrationsverhalten der Matrix und das Abflußgeschehen an der Oberfläche. Die Textur der obersten Tiefenschichten der Böden bestimmt maßgeblich das Gesamtporenvolumen und damit die Wasserleitfähigkeit im Falle von Niederschlägen. Dabei kommt vor allem der

Aggregatstabilität eine besondere Bedeutung zu. Die Gefügestabilität des Oberbodens ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit der Bodenaggregate gegen die zerstörende Wirkung von Wasser. Sie hängt, abgesehen von den pedogenen Faktoren und von den jährlich wechselnden Witterungseinflüssen, entscheidend von der Bodenbehandlung (Beweidung, Befahrung) ab. In Abhängigkeit von der Bodenart (Anteile Sand - Schluff - Ton) sind die Bodenpartikel mehr oder weniger stark miteinander verbunden. Zur Aggregierung von Schluff- und Feinsandfraktionen dient vor allem Ton, sodaß allgemein angenommen werden kann, daß mit sinkendem Tongehalt die Dispersion- und Erosiondisposition des Bodens zunimmt. Gegenüber der erosiven Kraft der Regentropfen an der Bodenoberfläche sind erst Aggregate über 0,5 mm Durchmesser stabil (MORGAN, 1986). Solche Aggregatgrößen an der Bodenkrume sind zumeist Ergebnisse biologischer Prozesse.

Der Humusgehalt eines Bodens trägt wesentlich zur Bildung und Stabilisierung von Bodenaggregaten bei. AUERSWALD (1987) konnte nachweisen, daß die Erosionsstabilität von Böden durch humusbildende- bzw. abbauende Maßnahmen um 20% erhöht bzw. gesenkt werden kann (Angaben bezogen auf einen Humusgehalt von 2%). Laut WISCHMEIER et al. (1978) zeigt sich eine zunehmende stabilisierende Wirkung jedoch nur bis zu einem Gehalt von maximal 4%.

Eine höhere Aggregatstabilität wird auch über die sog. Lebendverbauung des Bodengefüges bewirkt. "Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Mikroorganismenaktivität und der Gefügestabilität, was daraus hervorgeht, daß im Jahresrhythmus das Maximum und das Minimum der Aggregatstabilität mit dem Maximum und Minimum der Mikrobenaktivität zusammenfallen. Daraus geht hervor, daß die Stabilisierung des Korngefüges überhaupt erst durch die Lebendverbauung gewährleistet wird" (MÜCKENHAUSEN, 1985).

#### **2.2.2.1.6.1 Stabilisierende Stoffe**

Die Stabilität des Bodengefüges und damit vor allem die Stabilität der Sekundärporen wird durch verschiedene Stoffe mit verklebender Wirkung, wie organische Stoffe, Aluminium- und Eisenoxide,  $\text{CaCO}_3$  u.a. gefördert. Ihre verklebende Wirkung ist besonders für die oberen Bodenhorizonte wichtig, weil hier die Bodenteilchen leichter gegeneinander verschiebbar sind als im C-Horizont und weil der Boden hier besonderen externen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Die Wirkung verklebender Stoffe kann als eine Erhöhung des Scherwiderstandes sowohl zwischen den Primärteilchen als auch zwischen den Aggregaten aufgefaßt werden.

### **2.2.2.1.6.2 Organische Stoffe**

Organische Stoffe haben einen sehr starken Einfluß auf die Stabilität der Aggregate in Oberböden. Die in Form von Vegetationsrückständen (und/oder organische Düngung) zugeführten organischen Stoffe begünstigen die Aggregatbildung auf indirektem Wege, indem sie die mikrobielle Aktivität erhöhen. Die hierbei als Zwischenprodukte beim mikrobiellen Abbau und als Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen (Schleimstoffe) auftretenden organischen Verbindungen - hauptsächlich Polysaccharide und Polyuronide - haben teilweise die Eigenschaft, anorganische Teilchen zu verkleben. Die Wirkung der organischen Substanz ist jedoch nicht auf die Aggregatbildung im engeren Sinne des Wortes begrenzt. In Sandböden ist schon eine Einlagerung von wenigen Prozenten organischer Stoffe mit einer Erhöhung des Scherwiderstandes verbunden.

Da die organischen Stoffe auch den kleineren Bodentieren (Insekten, Würmer) als Nahrung dienen, hat ein hoher Gehalt des Bodens an diesen Stoffen auch einen hohen Besatz an solchen Tieren, vor allem Regenwürmer, zur Folge. Die Kotaggregate dieser Tiere sind durch die gleichzeitige Aufnahme organischer und anorganischer Stoffe sowie die mechanische Durchmischung im Darmtrakt sehr resistent gegenüber der verschlammenden Wirkung von Wasser. Hohe Anteile an organischer Substanz können nicht nur stabilisierend, sondern auch abdichtend und stauend wirken.

Auch Pilzmycele, Bakterienkolonien und Haarwurzeln haben eine aggregierende Wirkung. Da sie nur eine kurze Lebensdauer haben, sind die auf diese Weise gebildeten Aggregate nur so lange beständig, wie die Lebenstätigkeit der Organismen anhält.

### **2.2.2.1.6.3 Eisen- und Aluminiumoxide**

Eisen- und Aluminiumoxide können andere Bodenteilchen miteinander verbinden. Der Zusammenhalt begründet sich, daß Fe und Al in die Poren und besonders zwischen den Kontaktstellen der Bodenpartikel einwandern und dort als Oxide auskristallisieren und so große Kontaktflächen ausbilden. Die Bildung kleiner, locker gelagerter Aggregate wird meist auf elektrostatische, aber auch auf nicht-elektrostatische Wechselwirkung zwischen den sehr kleinen positiv geladenen Oxidteilchen und den negativ geladenen Tonmineralen zurückgeführt. Da die positive Ladung dieser Oxide mit sinkendem pH zunimmt, ist die aggregierende Wirkung im sauren Bereich allgemein stärker (SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P., 1989).

#### **2.2.2.1.6.4 Kationenbelag, CaCO<sub>3</sub>-Gehalt**

Der Einfluß der austauschbaren Kationen auf die Gefügestabilität beruht auf ihrer Wirkung im Zusammenspiel mit dem Salzgehalt der Bodenlösung (Flockungsvermögen). Dieser Salzgehalt kann zur Verhinderung der Verschlämmung und damit bei der Stabilisierung des Aggregatgefüges in Böden eine große Rolle spielen. Werden die Salze ausgewaschen, so zerfallen Aggregate und Sekundärporen verschwinden.

Eine hohe Ca-Sättigung wirkt sich in einer erhöhten Aggregatstabilität infolge Bildung von Ca-Brücken zwischen den Bodenkolloiden, sowie indirekt durch eine Erhöhung der biologischen Aktivität aus. Sinkt die Ca-Sättigung, so kann infolge des nunmehr beginnenden stärkeren Aggregatzerfalls sogar eine Tonverlagerung eintreten. Die Konzentration an Ca-Salze steigt mit der Ca-Sättigung des Bodens, dem CO<sub>2</sub>-Partialdruck der Bodenluft und der Zufuhr starker Säuren durch die Niederschläge. Sie erreicht in CaCO<sub>3</sub>-haltigen Böden bei hoher biologischer Aktivität ihr Maximum. CaCO<sub>3</sub> kann außerdem auf die Aggregatstabilität noch dadurch wirken, daß es Primärteilchen verkittet.

#### **2.2.2.1.6.5 Einfluß von anorganischer Düngung**

Die leicht löslichen anorganischen Dünger wirken z.T. direkt auf die Gefügestabilität ein, indem sie den Salzgehalt der Bodenlösung erhöhen. Die indirekte Wirkung anorganischer Düngung beruht auf einer Ertragssteigerung und damit auf einer Erhöhung der Vegetationsrückstände und der biologischen Aktivität.

#### **2.2.2.1.6.6 Einfluß von synthetischen Stabilisatoren**

Das Bodengefüge kann auch durch synthetische Verbindungen stabilisiert werden. Diese vermögen infolge reaktionsfähiger Gruppen (COOH, OH, NH<sub>2</sub>) Mineralteilchen in ähnlicher Weise zu verbinden, wie die von Mikroorganismen gebildeten Polyuronide und Polysaccharide. Von den zahlreichen Verbindungen, die für die Stabilisierung verwendet werden, sind Derivate der Polyacrylsäure und der Polyvinylsäure am gebräuchlichsten.

Bei mangelnder Aggregatstabilität werden kleine, aus dem Gefügeverband herausgerissene Partikel mit dem infiltrierenden Wasser in die Poren und kleinen Vertiefungen eingespült, lagern sich dachziegelartig übereinander und führen so in Bereichen geringerer Durchlässigkeit in Folge Verschlämmung zur Bildung von Stauhorizonten. An der Bodenoberfläche kann ein ähnlicher Vorgang (Bodenaggregate werden durch die Wucht der aufprallenden Tropfen zerschlagen)

die Bildung eines wenige Millimeter dünnen Häutchens mit mehr oder weniger schlechter Wasserdurchlässigkeit ( => Oberflächenabfluß) bewirken.

Bodenbearbeitung (Skipistenbau, Planierarbeiten) erzeugt Aggregate unterschiedlicher Größe und Stabilität. Sie verändert die Rauigkeit der Oberfläche und das Wasseraufnahmevermögen des Bodens und nimmt dementsprechend Einfluß auf das Abflußverhalten in diesem Bereich. Ob der Einfluß im negativen oder positiven Sinne, in Hinblick auf die Hochwasserbildung eines Einzugsgebietes ausfällt, bleibt vor Ort zu prüfen.

### 2.2.2.1.7 Erodierbarkeit

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Widerstandsfähigkeit des Bodens oder seine "Erodierbarkeit". Zur Erfassung der Erodierbarkeit von Böden wurde in der Literatur meistens das Verfahren nach KURON & JUNG (1958) angewandt. Die Erodierbarkeit des Bodens ergibt sich aus der Beziehung

$$E = \frac{B}{St}$$

KURON & JUNG (1958) setzen in Anlehnung an ELLISON (1947) B für Beweglichkeit des Bodenmaterials und St für die Stabilität, wobei

$$B = \frac{1}{s} * (U + FS) \text{ und } St = (T + GS + H + AS) \text{ definiert sind.}$$

Dabei bedeuten (Angaben in %): U = Schluff, FS = Feinsand, T = TON, GS = Mittel- und Grobsand, H = organische Substanz und AS = Aggregatstabilität. Der Wert s ist für den Steingehalt des Bodens eingesetzt. Wie JUNG (1960) durch Versuche nachweisen konnte, bewirkt die Steinbedeckung eines Bodens eine wesentliche Verminderung der Erodierbarkeit.

Durch den Steingehalt eines Bodens ist die Bodenoberfläche je nach Form und Menge der Steine vor dem aufprallenden Regen geschützt. Es darf daher nicht nur der Steingehalt berücksichtigt werden, sondern auch der Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche.

Die Erodierbarkeit ist in Zusammenhang mit der Erosivität (erosive Kraft) eines Niederschlags zu sehen. Für die Erosivität eines Regenfalls ist seine kinetische Energie [J/m<sup>2</sup>] von Bedeutung. Die durchschnittliche Regenhöhe eines Standorts allein kann kein Kriterium für die Erosivität der Niederschläge sein. Es hat sich bei Messungen herausgestellt, daß eine bestimmte Regendichte oder Intensität notwendig ist, um Abfluß und Abtrag auszulösen. Für den mitteleuropäischen

Klimaraum kann nach JUNG & BRECHTEL (1980) ein Wert von 0,3 mm/min. (kritische Intensität) angenommen werden. Dieser Wert kann je nach Erosionsbereitschaft des Bodens im Augenblick des Regenfalls nach oben oder unten schwanken.

Das Produkt aus Erosivität und Erodierbarkeit ergibt jenen Wert, der die Gefährdung (Gefährdungsgrundzahl) bzw. Erosionsanfälligkeit eines Gebietes wiedergibt.

#### **2.2.2.1.8 Hydrophobizität des Bodens**

Bei stark ausgetrockneten Böden kann es im Falle von Niederschlägen zu transienter (zeitweiliger) Hydrophobizität kommen. Sie spielt aber allenfalls bei kurzen Gewittern eine Rolle bei der Abflußbildung. Die permanente Hydrophobizität dürfte laut der wenigen Untersuchungsergebnisse (BARRETT, SLAYMAKER, 1989), je nach Ausprägung, auch bei länger dauernden, weniger intensiven Niederschlägen Einfluß auf das Abflußgeschehen erlangen.

Hydrophobe Effekte können als Folge starker Austrocknung, durch das Vorhandensein wasserabstoßender Pflanzenmaterialien, die oberflächennahe Partikel bedecken, oder als Kombination dieser Faktoren auftreten.

Die Ausscheidung bzw. Abgrenzung von Bereichen mit hydrophoben Bodeneigenschaften dürfte sich aber im Gelände als sehr schwierig erweisen. Untersuchungen in diese Richtung scheinen nur zweckmäßig, wenn derartige Erscheinungen im Untersuchungsgebiet allgemein bekannt sind und nur dann wenn die Hydrophobizität von permanenter Natur ist.

### **2.2.2.1.9 Organische Substanz**

#### 2.2.1.9.1 Physikalische Wirkungen

Die organische Substanz begünstigt, wie bereits weiter oben erwähnt, in hohem Maße die Bildung und Stabilität eines grobporigen Aggregatgefüges. Dieses ist für Schluff-, Lehm- und Tonböden von Bedeutung, weil es deren Infiltrationsverhalten stark verbessert. Darüber hinaus besitzt Humus selbst eine hohe Wasserkapazität, er vermag etwa das 3 - 5fache seines Eigengewichtes an Wasser festzuhalten (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1989). Die Huminstoffe bewirken die dunkle Farbe im Ah-Horizont und begünstigen damit die Erwärmung der Böden im Frühjahr (längere Vegetationsperiode). Die Konsistenzgrenzen der Böden werden durch Humus zu höheren Wassergehalten verschoben, sodaß externe Beanspruchungen (Bearbeitung, Beweidung) in einem größeren Feuchtebereich der Böden ohne Gefügeschäden möglich ist.

#### **2.2.2.1.9.1 Streu- bzw. Humusauflagen**

Der Abbau der toten Phytomasse in terrestrischen Ökosystemen stellt eine Schlüsselrolle im Stoffkreislauf dar. Vom Menschen wenig oder nicht beeinflusste Ökosysteme zeichnen sich dadurch aus, daß die gesamte oder zumindest ein Großteil der oberirdischen Phytomasse letztlich als "Streu" auf den Boden gelangt und von den Bodenorganismen (mit den oben beschriebenen Auswirkungen) mineralisiert wird. Je nach Streutyp, Klima- und Bodenverhältnissen dauert dieser Abbau kurze Zeit bis viele Jahre, sodaß sich mehr oder weniger dicke Rohhumusauflagen bilden. In stabilen Ökosystemen (Klimaxökosysteme) bleibt die Rohhumusaufgabe gleich mächtig, da sich Streuanfall und Mikroorganismenaktivität die Waage halten.

Die Abbaurate der Humusauflagen ist abhängig von:

- Art, Struktur und chemischer Zusammensetzung der Streu
- Menge, Leistungsfähigkeit, Art und Zusammensetzung der Bodenmikroorganismen
- Klimafaktoren während der Expositionszeit (Bodentemperatur, Bodenwassergehalt)
- Anteile der leicht auslaugbaren, löslichen Streukomponenten
- physikochemische und strukturelle Eigenschaften des Bodens
- Lage der Streu im oder am Boden

Daraus läßt sich ableiten, daß eventuell durch Streuauflagen bedingte Infiltrationshemmnisse bzw. Oberflächenabflußbegünstigungen nur durch Veränderung der gerade genannten Einflußfaktoren auf den Streuabbau gesteuert

werden können. Hierbei wird sich das Hauptaugenmerk wohl auf die Art, Struktur und chemische Zusammensetzung richten. Über diese Faktoren lassen sich negative Einflüsse wie Hydrophobizität (Benetzungswiderstand), Lagerungsdichte und Lagerungsart der Auflage relativ leicht beeinflussen. Im Allgemeinen gilt, daß Koniferenstreu am langsamsten abgebaut wird. Die Ursache hierfür dürfte auf den höheren Harz- und Ligningehalt der Nadeln zurückzuführen sein. Es ist also nicht verwunderlich, daß die größten Rohhumusauflagen meist unter Nadelwaldstandorten zu finden sind. Es wurde aber auch festgestellt, daß die durch die Schneedecke gepreßte Laubstreu praktisch gleich hohe Oberflächenabflüsse wie nackter Boden oder eine mit Gras bewachsenen Schlagfläche aufweist. In gleichem Umfang wie sich dicht gelagerte, wasserabstoßende Auflagen negativ auf die Infiltrationsverhältnisse eines Standorts auswirken, so können lockere, interzeption- und infiltrationbegünstigende Streuauflagen das Abflußgeschehen positiv beeinflussen. Es sollten daher die spezifischen Eigenschaften der Humusauflage immer noch vor Ort untersucht werden.

SCHWARZ (1985) beobachtete bei seinen Versuchen im Schönbuch (Fichten-Kifern-Baumholz) Interzeptionsraten an der Streu (Mull- bis mullartiger Moder) von 0,7 bis 4,3 mm (im Mittel bei knapp 2 mm). Bei mächtigen Rohhumusauflagen dürften diese Werte noch etwas höher liegen. Angesichts der großen Niederschlagsmengen, die mit einem Starkregenereignis verbunden sind, können diese Anfangsverluste ähnlich der Oberflächenverdunstung und Evapotranspiration der Vegetation im Zusammenhang mit der Hochwasserbildung vernachlässigt werden.



### 2.2.2.1.10 Zusammenfassung

Über die Faktoren Bodengefüge, Aggregatstabilität, Porosität und Humus, die letztendlich die verschiedenen Bodentypen beschreiben, bestimmt ein Boden das für ihn typische Infiltrations und Abflußverhalten. Diese Einflußgrößen sind aber keinesfalls als konstant (Ort und Zeit) zu betrachten. Sie sind durch sich ändernde Einflüsse von außen - Klima, Vegetation, Mensch, Zeit - einem ständigen Wechsel unterworfen. Dabei kann die Änderung eines Parameters ausreichen um das ganze Systems zu beeinflussen. Kommt es z.B. durch stärkeren Weidetrieb zu einer Verdichtung im Oberboden, kann die Infiltrationskapazität des Bodens, bei gleichzeitigem Anstieg des Oberflächenabflusses, erheblich reduziert werden. Die verminderte Wasserversorgung im Unterboden kann durch chemisch- physikalische Prozesse die Aggregatstabilität beeinträchtigen und somit zu einer Veränderung der Lagerungsdichte bzw. in weiterer Folge der Porosität führen. Dieses Wechselspiel der einzelnen Einflußfaktoren kann beliebig lang fortgeführt werden.

Die Abhängigkeit des Oberflächenabflusses vom jeweiligen Bodentyp ist nicht als konstant anzunehmen und dadurch statistisch nicht absicherbar. Im allgemeinen zeichnen sich die Ah-C-Böden, insbesondere Ranker und Rendsinen, durch sehr geringe Oberflächenabflüsse (mit Ausnahme von Lehm- und Mullrendsinen) aus. Braunerden weisen ebenfalls eine sehr geringe Oberflächenabflußbereitschaft auf. Braunerde-Podsole lassen hingegen ein sehr breites Spektrum erkennen. Bei den Pseudogleyen und Gleyen wirkt sich die Hydromorphie der Böden in durchschnittlich höheren Oberflächenabflüssen aus.

Die Identifikation der Bodenkennwerte, ihre quantitative und qualitative Einflußnahme auf das Abflußgeschehen, hängt stark von den jeweilig herrschenden Ausgangsbedingungen (Geologie, Geomorphologie, Morphodynamik) sowie von externen Faktoren und anthropogenen Einflüssen, die zur erhöhten Instabilität des Systems führen, ab. Die Einschätzung der „Bodenprozesskriterien“ in Bezug auf die Abflußbereitschaft eines Einzugsgebietes anhand von allgemeingültigen Regeln ist fraglich und bedarf in jedem Falle eine Überprüfung vor Ort.

### **2.2.2.2 Vegetationsbedingte Einflußfaktoren**

Die Vegetation, insbesondere mehrschichtige Pflanzengesellschaften, üben durch Interzeption, Retention im Wurzelraum und Evaporation eine regulierende Wirkung auf den Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes aus. Im Zusammenhang mit dem Abflußgeschehen wirkt eine vitale, standortgerechte Vegetationsdecke stabilisierend. Der Oberflächen- und oberflächennahe Abfluß wird vermindert oder verzögert, extreme Hochwasserspitzen gekappt und die Auslösung von Muren und Geschiebeeinstößen aus Hangbewegungen werden verhindert oder begrenzt (BUNZA, SCHAUER, 1989).

#### **2.2.2.2.1 Wirkung der Vegetation auf Oberflächenabfluß und Infiltration**

- Der direkte Aufprall des Regens auf den Boden wird durch die Blattmasse verhindert. Die Struktur der Bodenoberfläche bleibt dadurch erhalten, denn eine schnelle Verschlammung des Bodens führt zu einer geringen Aufnahmefähigkeit des Bodens für Wasser, obwohl der Unterboden noch nicht gesättigt ist.
- Abfließendes Oberflächenwasser wird durch die Vegetation gebremst und erreicht damit keine hohe Abflußgeschwindigkeit welche zur Erhöhung der Schleppkraft führen würde.
- Das Wurzelwerk der Pflanzen hat eine Lebendverbauung des Bodens zur Folge, was einen guten Zusammenhalt bedingt. Die organische Substanz, die wesentlichen Anteil an diesem Zusammenhalt hat, wird durch die Vegetation erhöht. Durch Hohlrumbildung entlang abgestorbener Wurzeln wird das Porenvolumen und damit das Infiltrationsvermögen des Bodens entsprechend vergrößert. Sie wirkt sich damit günstig auf die Erodierbarkeit des Bodens aus.
- Die Schutzwirkung in Abhängigkeit vom der Vegetationsbedeckung. Die Wirkung läßt sich dabei durch den Bedeckungsgrad (Dichte und Dauer der Pflanzendecke) ausdrücken. Dieser stellt den prozentualen Anteil der Bodenoberfläche dar, den die Pflanzen bedecken und damit vor dem direkten Aufprall der Regentropfen schützen. Der Schutz der Oberfläche nimmt mit steigendem Bedeckungsgrad zu. Gleichzeitig trägt das sich ausdehnende Wurzelwachstum zur Stabilisierung und Durchlässigkeit des Oberbodens bei. Bei gleichem Bedeckungsgrad ist der Schutz um so stärker, je näher das Blattdach an der Bodenoberfläche ist, da die Fallgeschwindigkeit der Regentropfen von der Fallhöhe abhängt. Aus diesem

Grund ist die Schutzwirkung (Abflußbildung) bei gleichem Bedeckungsgrad vegetationspezifisch.

#### **2.2.2.2.2 Die Bedeutung der Vegetation für den Wasserhaushalt**

Sie ergibt sich aus den bereits genannten drei Faktoren:

- Evapotranspiration (gesamter Wasserverbrauch der Pflanzen)
- Interzeption (Niederschlagszurückhaltung an der Pflanzenoberfläche)
- Steigerung von Infiltration und Porosität durch Wurzeltracht

Zudem wird Bodenwasser über die Wurzeln entnommen (Speichermanagement). Die Tiefenwirkung der Wasseraufnahme geht aber nicht wesentlich über den durchwurzelten Raum hinaus (KIRWALD, 1969).

Diese Zusammenhänge zwischen Vegetation und Wasserhaushalt gelten im wesentlichen für länger andauernde Regenereignisse. Bei kurzandauernden Starkregenereignissen, wie sie auch bei Beregnungsversuchen angenommen werden, kann die Evapotranspiration der Vegetationsdecke zumeist vernachlässigt werden. Jedoch reicht, die infolge des Durchwurzelungsraumes vielfach erzeugte Verzögerung zwischen dem Regenende und dem Auftreten des oberflächennah abfließenden Wassers aus, um das Risiko extremer Hochwasserspitzen zu mindern.

#### **2.2.2.2.3 Einfluß der Pflanzen auf das Bodengefüge**

Der unterschiedliche Einfluß der Pflanzen auf das Bodengefüge beruht vor allem auf der verschiedenen Art der Wurzel Ausbildung und der Dichte der Vegetationsdecke. Er erstreckt sich in erster Linie auf den Bereich der Oberböden, weil dort die stärkste Durchwurzelung erfolgt.

Das stabile Krümelgefüge unter Grünland oder Wiese ohne Weidebetrieb beruht auf der hohen Intensität der Durchwurzelung des Oberbodens, der dauernden Vegetationsdecke und der laufend hohen Produktivität von Wurzelrückständen (intensive Mikroorganismen-tätigkeit). Durch die dichte Durchwurzelung wird die Frequenz der Reißbildung erhöht, sodaß kleinere Aggregate und ein sekundäres Porensystem entstehen. Auf Intensivweiden geht das Krümelgefüge bei nassen Wetterperioden unter dem Einfluß des Tritttes der Tiere leicht in ein sogenanntes Kohärentgefüge (die Primärteilchen werden durch die Kohäsionskräfte zusammengehalten und bilden eine ungegliederte Masse) mit geringerem Scherwiderstand über.

#### **2.2.2.2.4 Verbesserung und Erhaltung der Hochlagenvegetation durch Düngungsmaßnahmen**

Bei der Begrünung von Hochlagen bzw. Verbesserung (qualitativ als auch quantitativ) der Hochlagenvegetation durch Düngungsmaßnahmen denkt man in erster Linie fälschlicherweise vorwiegend an Schipisten. Nicht zu vergessen sind aber auch Flächen, die im Zuge der Errichtung von Forst- und Almwegen, in Zusammenhang mit der Wildbach- und Lawinenverbauung sowie der Planie von Almflächen zu rekultivieren sind und in einen funktionsgerechten Dauerzustand umgewandelt werden müssen. Schließlich geht es auch noch um die Rekultivierung, Verbesserung und Erhaltung der Vegetation von Flächen, die anlässlich von Naturereignissen (z.B. Vermurung) zerstört wurden.

Von zentraler Bedeutung ist bei allen Geländeeingriffen die Erhaltung des Oberbodens (Humus bzw. Biomasse). Nur dieser lebt und ist auf Grund seiner Struktur und dem Gehalt an organischer Substanz Nährboden und Lebensraum für Pflanzen und Lebewesen. Es sollte also niemals, besonders in Hochlagen, der natürlich gewachsene Oberboden unüberlegt zerstört werden.

Böden und Vegetation der Hochlagen haben sich in Jahrhunderten entwickelt. Selbst die beste Begrünungstechnik kann dies nicht in wenigen Jahren schaffen. Ein allfälliger Schibetrieb stellt alljährlich eine Belastung bodenphysikalischer Eigenschaften, des Bodenlebens und der Vegetation dar. Abgesehen von den Bodenverdichtungen, die beim Pistenbau zwangsläufig entstehen, kommt es weiters durch den Pistenbetrieb alljährlich zu einer Schwächung der Vegetation. Neben Auswinterungsschäden sind geringe Wasserkapazität, niedriges Porenvolumen, schwache Bodenaktivität und langsame Bodenerwärmung die Folge.

Für das Gelingen einer dauerhaften Begrünung bzw. Stabilisierung der Vegetationsbedeckung ist Humuskonservierung unerlässlich. Es wurde bereits darauf verwiesen, daß insbesondere auf Schipisten, aber auch bei Lawinenschutzbauten oder Rekultivierungen nach Murenabgängen die Nährstoffversorgung im Boden von vornherein sehr schlecht ist und bei fehlender Nährstoffzufuhr die Einsaaten förmlich verhungern. Während auf Dauergrünland Humusgehalte zwischen 5 und 7% keine Seltenheit darstellen, liegen sie auf Ackerböden oder Ackergrünland zwischen 3 und 5%. Humusgehalte auf planierten Schipistenflächen von 1% und darunter sind bei weitem keine Seltenheit (KASPAR & PARTL 1996). Dabei gilt es zu bedenken, daß gerade in Hochlagen auf unbeeinträchtigten Böden die Humusgehalte

ausgesprochen hohe Werte annehmen können. Durch kalte (nasse) Böden oder Wassermangel ist oft kaum eine Zersetzung der organischen Substanz (Mineralisierung) mehr gegeben, sodaß eine extrem starke Humusanreicherung bis über 30% erfolgt.

Die Phosphatversorgung ist sowohl auf Sedimentationsgestein (Kalk, Dolomit) als auch im kristallinen Bereich (Urgestein) sehr schlecht. Etwas anders verhält sich das Kali. Während auf Urgesteinböden damit zu rechnen ist, daß die Kaligehalte einigermaßen ausreichen, liegen sie auf Kalkböden in der Regel sehr niedrig. Der Kalkgehalt liegt bei Urgesteinsböden in der Regel unter 0,1%, während verständlicherweise auf Kalkböden insbesondere bei hohem Skelettanteil der Kalkgehalt sehr hoch liegt.

Die Hochlagendüngung kann sowohl mittels Wirtschaftsdünger (Stallmist, Mistkompost, Gülle, Jauche) oder auch durch Ausbringung von Handelsdüngern erfolgen. Die Nachteile bei Verwendung von Wirtschaftsdüngern liegen vor allem in der fehlenden Erschließung für den Transport der großen Mengen sowie der unterschiedlichen Qualität im Hinblick auf die Nährstoffzusammensetzung. Die Anwendung von Wirtschaftsdüngern ist häufig auch teurer als jene von Handelsdüngern, bringt aber im Vergleich auch dementsprechende Ergebnisse.

Durch gezielte Düngungsmaßnahmen kann selbst bei ungünstigsten Standortbedingungen innerhalb weniger Jahre eine deutliche Verbesserung des Vegetationszustandes erreicht werden. Je ungünstiger die Standortverhältnisse sind, umso notwendiger ist es, organische Produkte zu verwenden. Vor allem der Stickstoff als Wachstumsmotor wird bei wasserlöslichen Mineraldüngern unabhängig von der Temperatur freigesetzt und kann ausgewaschen werden. Bei organischen Düngern hingegen wird er nur bei entsprechender Temperatur und Feuchtigkeit freigesetzt, der Stickstoff steht dann zur Verfügung, wenn er von der Pflanze benötigt wird. Bei Urgesteinsböden kann es zweckmäßig sein eine zusätzliche Kalkdüngung durchzuführen. Auf einen Nenner gebracht, muß ein alter Ausspruch bestätigt werden: Null-Düngung bedeutet insbesondere bei ungünstigen Standortverhältnissen und auf stark strapazierten Flächen auch ein Null-Wachstum.

Insbesondere bei Rekultivierungen in Hochlagen ist sowohl ein Aushungern des Pflanzenbestandes als auch eine Überdüngung abzulehnen. Ziel der Düngungsmaßnahmen muß es sein, so viel an Nährstoffen auszubringen, daß die eingesäten Pflanzenarten nicht verhungern, die standortgemäßen Arten bzw.

Biotypen bei ihrer Einwanderung jedoch möglichst wenig behindert werden. Nur auf diese Weise ist es möglich, einen ausreichenden Erosionsschutz durch eine stabile Pflanzendecke bei optimaler Bodenaktivität und Aggregatstabilität zu gewährleisten.

### 2.2.2.2.5 Interzeption

Folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die mögliche Größe des Interzeptionsspeichers verschiedener Pflanzenbestände:

Vegetationsart	Alter Jahre	MANIAK (1988) [mm]	MITSCHERLICH (1990) [mm]	SCHRÖDER (1988) [mm]	ZINKE (1990) [mm]
Fichte	15		0,6		
Fichte	23		1,5		
Fichte	28		3,1		
Fichte	30		2,7		
Fichte	59		3,0		
Fichte	60		4,0		
Fichte	80		4,0		
Fichte	90	4,7			
Fichte	120	1,8			
Fichte	120+	3,5			
Douglasie	36		2,4		
Douglasie	36		2,6		
Douglasie	36		1,2		
Weymouth-Kie.	24			2 - 4	
Kiefern	--	3,5	3,0		0,3 - 3,0
Tannenarten	--				3,8 - 7,6
Laubbäume	--				0,2 - 2,0
Eichen-Buchen	16			1 - 2	
Weißbuche	--	0,6 - 1,5			
Hainbuche	60		0,6		
Buche	--	2,7			
Gräser					1,0 - 1,5
Winterweizen		1,4 - 2,7			
Sommerweize		2,7			2,1
Sommergerste		2			
Hafer		3			

Tabelle 4: Größe des Interzeptionsspeichers verschiedener Vegetationsarten (zit. nach BUNZA G., SCHAUER T., 1989)

KÖRNER, WIESER & GUGGENBERGER (1980) gaben im Zusammenhang mit Wasserhaushaltsuntersuchungen alpiner Rasen in den hohen Tauern für die maximale Benetzbarkeit von repräsentativen Beständen (2300 m) 0,9 mm an. Dies bedeutet, daß am Ende eines Niederschlags ca. 1 mm Interzeptionswasser als sog. "Anfangsverlust" in die Abflußrechnung eingeht. Auf die Bildung von Hochwasserabflüssen scheint die Interzeption also ähnlich wie die Streuauflage eines Bodens keinen Einfluß zu haben. Im Jahresgang spielt sie jedoch in

Verbindung mit der Taubildung ein wichtiges Glied im Wasserhaushalt der Vegetation.

#### **2.2.2.2.6 Zusammenfassung**

Gleiches wie für die bodenbedingten Einflußfaktoren gilt auch für die Vegetation eines Standorts. Die Betrachtung dieser einen Ebene zur Beschreibung von Abflußvorgängen von Wildbacheinzugsgebieten ist nicht zulässig. Das breite Spektrum der möglichen Artenzusammensetzungen bedingt eine große Bandbreite in der Abflußdisposition der alpinen Bodenbedeckungen. Eine eventuelle statistische Absicherung ist nur mittels weit gefaßter Vegetationsgesellschaften wie Zwergsträucher, Wiesen und Weiden oder alpine Rasen möglich. Dabei kann eine Differenzierung der Vegetation in Feuchtestufen mitberücksichtigt werden und dadurch die allgemeine Anwendbarkeit der Untersuchungsergebnisse vereinfacht werden. So besitzen naturnahe Wälder (sowohl Nadel- als auch Laubmischwälder) schwerpunktmäßig geringe Abflußwerte, die zwischen 0 und 10% liegen. Bei Wiesen und Weiden sowie Schlagflächen kann der Abflußwert 40 bis 50% betragen. Dieser Wert kann bei stark beweideten Sonderformen und Schipisten sogar noch übertroffen werden.

Trotz der grob gefaßten Vegetationseinheiten läßt sich eine große Streubreite der Oberflächenabflußreaktionen erkennen. Auch die Auswirkung der Vegetation in Hinblick auf physikalischen Eigenschaften des durchwurzelter Bodenraums (Makroporen, Lebendverbauung) ist jedoch noch weit vielfältiger und läßt sich schwer in eine Gebrauchsformel fassen. Es gilt also wieder, allgemeingültige Aussagen im Untersuchungsgebiet zu adaptieren.

### 2.2.2.3 Zeitbedingte Einflußfaktoren

Unter den zeitabhängigen Faktoren sind die Bodenfeuchte, die Regenintensität (Regendichte) und die damit in Zusammenhang stehende Niederschlagsverteilung zu nennen. Diese können von Ereignis zu Ereignis stark variieren und damit ein völlig unterschiedliches Abflußverhalten in ein und demselben Einzugsgebiet hervorrufen. Die Abflußreaktionen bei trockenem Boden im Sommer und feuchtem Boden im Frühjahr (Schneesmelze) zeigen große Unterschiede. Die bei trockenem Boden sich öffnenden Bodenrisse sind mit ein Grund für die höhere Infiltrationsrate in diesem Bodenstadium. Im Frühjahr oder nach vorangegangenen Niederschlägen, muß hingegen die Infiltration über eine kleinere Zahl von Makroporen und über die vergleichsweise weniger leistungsfähige, fast gesättigte Bodenmatrix erfolgen.

#### 2.2.2.3.1 Bodenfeuchte

Bereits im Zusammenhang mit den ersten Beregnungsversuchen (z.B. PREUSS, 1977) wird auf die Bedeutung der Bodenfeuchte vor dem abflußauslösenden Niederschlagsereignis bzw. der Beregnung (Vorfeuchte, Anfangsfeuchte) hingewiesen, u.a. auch auf einen deutlichen Einfluß der Vorfeuchte auf die Auslösung und den Verlauf des Oberflächenabflusses bei Versuchen auf tonreichen Substraten bei sonst gleichen Bedingungen (SEILER, 1981).

SCHWARZ (1985) beschrieb den Zusammenhang zwischen der Ausgangsfeuchte im Oberboden und dem Oberflächenabfluß sogar als hochsignifikant (vergl. Abbildung 10).



Abbildung 10: Beregnungsversuch: Beziehung zwischen der Ausgangsfeuchte im Oberboden (0 - 50 cm) und der A0 bewirkenden Niederschlagshöhe verschiedener Bodenarten (SCHWARZ 1985)



Schwarz (1985) stellte fest, daß die standörtlich bedingten Unterschiede in der Abflußbereitschaft vom Feuchtezustand der Böden abhängen. Die Unterschiede waren besonders groß, wenn die Böden ausgetrocknet waren. Bei der Beurteilung standörtlicher Unterschiede in der Abflußbereitschaft ist daher unbedingt die Ausgangsfeuchte zu berücksichtigen.

Wie erwähnt sind bei stark ausgetrockneten Böden die Unterschiede sehr groß. Sie verwischen sich mit zunehmenden Wassergehalt der Böden. Dies bedeutet, daß die Abflußbereitschaft bei stark unterschiedlichen Anfangsfeuchten auf ein und demselben Standort größeren Schwankungen unterliegt als bei hohen Bodenfeuchtwerten die Schwankungen von Standort zu Standort. Darin dürfte eine Hauptursache für das Entstehen von großen Hochwässern bei Starkniederschlägen liegen. Während nach Trockenwetterperioden nur ein Teil der Böden zu früher Abflußbereitschaft neigt, können bei hohen Ausgangsfeuchten nahezu alle Böden ziemlich gleichzeitig mit dem Abfluß auf Starkniederschläge reagieren.

Die Zeit, die verstreicht, bis Abfluß entsteht, wird als Anlaufzeit (Konzentrationszeit) bezeichnet. Voraussetzung für die Bildung von Oberflächenabfluß ist die ausreichende Benetzung der Oberfläche, die zumindest stellenweise (z.B. in Tiefenlinien des Mikroreliefs) die Ausbildung eines Wasserfilms bis zur Sammelrinne erlaubt. Bei feuchtem Bodenzustand sind die Anlaufzeiten kürzer als bei trockenem. Bei nassen Bedingungen dauert es jedoch auf manchen Standorten länger bis Oberflächenabfluß entsteht als auf Standorten mit trockenen Verhältnissen. Neben den Vorfeuchten sind folglich noch weitere Standortseigenschaften für die Bildung eines durchgehenden Wasserfilms bis zum Auffanggraben von Bedeutung. Bei sehr trockenen Verhältnissen (hohe Saugspannungen im Oberboden, hoher Benetzungswiderstand der Bodenoberfläche) können deshalb sogar längere Anlaufzeiten gemessen werden als bei feuchten oder gar nassen Situationen.

Im Zusammenhang mit der Bodenfeuchte eines Standorts ist immer sein Bewuchs zu sehen. Dieser nimmt entscheidend Einfluß auf die Bildung von Oberflächenabfluß und bildet in Kombination mit den Bodeneigenschaften das zu einem bestimmten Zeitpunkt maßgebende Abflußsystem.



Abbildung 11: Der Oberflächenabfluß auf Wiesen und Weiden differenziert nach Feuchtestufen (BUNZA, LÖHMANNSRÖBEN, 1996)

Feuchtere Vorbedingungen verkürzen die Abflußbildungszeit, wobei die Böden verschieden feuchtesensitiv reagieren können. Es ist jedoch wieder die Gesamtheit der Standorteigenschaften, welche die Abflußbildung prägen, wie durch das große Spektrum der Abflußreaktionen bei vergleichbaren Vorfeuchten zeigt.

#### **2.2.2.3.2 Niederschlagsintensität**

Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, daß Veränderungen der Niederschlagsintensität Änderungen der Abflußbildungsprozesse bewirken. Die Mechanismen Infiltration und Retention, welche die Abflußbildung im wesentlichen bestimmen, reagieren bei unterschiedlich starken Intensitäten nicht im gleichbleibenden Umfang und mit gleichbleibender Geschwindigkeit.

In einem Bodenprofil, das aus Matrix und vertikalen Makroporen besteht, treten bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten drei verschiedene Infiltrationsvorgänge auf:

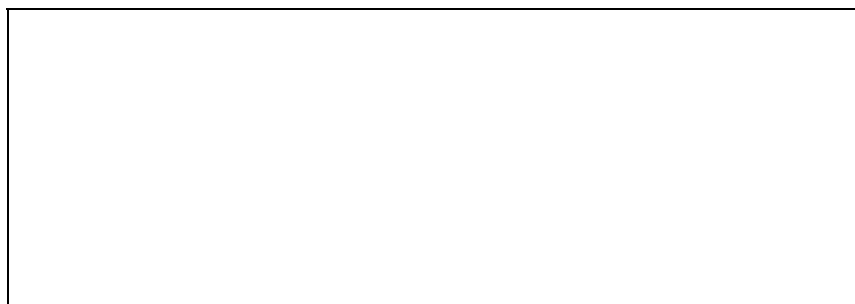


Abbildung 12: Unterschiedliche Zusammensetzung der Infiltrationsprozesse im gleichen Boden bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten (NAEF F. et al., 1998)

Bei kleineren Niederschlagsintensitäten ist die Bodenmatrix in der Lage, das gesamte aufgebrachte Wasser aufzunehmen, es entsteht weder Oberflächenabfluß noch Makroporenfluß. Ist die Niederschlagsmenge etwas höher als das Infiltrationsvermögen der Bodenmatrix, entsteht Makroporenfluß. Der Boden vermag dank Makroporeninfiltration das gesamte aufgebrachte Wasser aufzunehmen. Bei noch höherer Niederschlagsintensität wird sowohl die Matrix- wie auch die Makroporen- Infiltrationskapazität voll ausgeschöpft, und der Oberflächenabfluß entsteht aus dem Anteil des Niederschlagswassers, welches nicht infiltrieren kann.

Die Ausschöpfung des verfügbaren Bodenretentionsvolumens ist dafür verantwortlich, daß die Infiltrationskapazität während eines Ereignisses abnimmt. Die Vorseuchte des Bodens bestimmt nicht nur die Größe der initialen Matrix- Infiltrationskapazität, sondern auch die initiale Makroporen- Infiltrationskapazität. Diese wird durch die vorhandene Makroporenstruktur wesentlich bestimmt, die ihrerseits vom Feuchtezustand des Bodens abhängig ist (Schwundrisse sind z.B. unter trockenen Bedingungen häufiger als bei nassen).

#### **2.2.2.3.3 Niederschlagsverteilung**

Bei Ereignissen mit einer durchschnittlichen Intensität, kommt es häufig vor, daß während der Regendauer -zeitlich aber auch räumlich getrennt- höhere Intensitäten auftreten, oft nur für Sekunden oder Minuten. Diese kurzen Intensitätsanstiege genügen aber, um Abfluß auszulösen. Das Selbe kann aber auch dann passieren, wenn Niederschläge mit durchschnittlicher Intensität auf Flächen des Einzugsgebietes niedergehen die mit einer geringen Infiltrationskapazität ausgestattet sind oder durch andere Faktoren in ihrer momentanen Aufnahmefähigkeit eingeschränkt sind. Ist diese Auslösung einmal erfolgt, setzt sich der Abflußvorgang auch bei weiterem Regenfall geringerer Intensität und auf Bereiche höherer Aufnahmekapazität fort. Für die Hochwasserbildung reicht dabei aber das Niederschlagsvolumen solcher Ereignisse selten aus. Es können aber dadurch lokale Erosionsvorgänge verstärkt oder in Gang gesetzt werden, die beim nächsten Starkregenereignis zum Schwachpunkt im Abflußsystem werden können.

#### **2.2.2.3.4 Schneeschmelze**

Mit der Schneeschmelze eng verbunden ist die Dauer der Vegetationsperiode. Diese bestimmt die Artenzusammensetzung und die damit verbundenen vegetationsabhängigen Eigenschaften eines Einzugsgebietes mit. Im Frühjahr und z.T. auch noch in den Frühsommer hinein ist die Schneeschmelze mitverantwortlich für den Wassergehalt (Anfangsbodenfeuchte) eines Bodens. Bei Überlagerung von Regenereignissen mit der Schneeschmelze kann es bereits bei geringen Intensitäten zu Hochwasserereignissen kommen. Dabei spielt die geringe Retentionskapazität der schneebedeckten Oberfläche, der zum Teil noch gefrorene Boden sowie die additive Wirkung von Niederschlagwasser und Schmelzwasser eine wesentliche Rolle.

#### **2.2.2.3.5 Zusammenfassung**

Bei Starkregenereignissen kann die zeitliche Dauer und Verteilung des Niederschlags entscheidend für die Hochwasserbildung sein. Aber auch alle anderen Teilsysteme (Boden, Vegetation) und Prozesse (Verwitterung, Humifikation, Mineralisation) sind einer Veränderung durch die Zeit unterworfen.

## **2.3 Starkregensimulationen als Grundlage der Abschätzung von Abfluß- und Infiltrationseigenschaften alpiner Böden bzw. Vegetationseinheiten**

In diesem Kapitel sind einige der vielen Beregnungsversuche, die sich mit den Auswirkungen unterschiedlicher Vegetationsformen, Böden und Methoden der Landbewirtschaftung auf Oberflächenabfluß, Infiltration und Bodenabtrag sowie Erprobung erosionsmindernder Anbaumethoden befaßten, zusammenfassend dargestellt.

Um zu vergleichenden Ergebnissen zu kommen, wurde 1973 an der damaligen Bayrischen Landesstelle für Gewässerkunde von KARL und TOLDRIAN (1973) eine transportable Beregnungsanlage entwickelt, die bis heute im deutschen Sprachraum als Mutter der modernen Versuchsanlage gilt. Um statistisch vergleichbare Infiltrations- und Abflußraten zu erhalten, werden in der letzten Zeit Geräte für die Erzeugung künstlicher Starkniederschläge benutzt, die zeitlich eine beliebige Wiederholung von Experimenten und Beobachtungen erlauben. Der große Vorteil dieser Anlagen ist die Konstanz der einzelnen Niederschlagsereignisse und damit die unmittelbare Vergleichbarkeit ihrer Auswirkungen bei unterschiedlichen Standorten und Versuchsbedingungen. Ihr entscheidender Nachteil ist die geringe Ähnlichkeit mit natürlichen Starkregenereignissen. Dies gilt vor allem für die gleichbleibende Intensität während der Versuchsdauer, zum Teil auch für das Tropfenspektrum und die auf den Boden gebrachte Niederschlagsenergie. Auf vegetationsfreien Böden spielt die durch Starkregen auf den Boden aufgebrauchte kinetische Energie eine ganz wesentliche Rolle beim Lösen der Bodenpartikel, die dann vom oberflächlich abfließenden Wasser abgeschwemmt werden. Diese Energie wird durch die auftreffenden Regen- bzw. Niederschlagstropfen erzeugt und setzt sich aus dem Tropfengewicht und ihrer Auftreffgeschwindigkeit zusammen. Bereits bei schütterer Vegetationsbedeckung werden die Tropfen beim Auftreffen auf Pflanzenteile zerstört, so daß hier weder die ursprüngliche Tropfengröße noch die Regenenergie eine Rolle spielen.

Macht man sich von der Vorstellung frei, daß es möglich ist, natürliche Starkregen zu simulieren, dann hat jede der verschiedenen Anlagen andere systembedingte Schwächen und Stärken im Hinblick auf die Naturähnlichkeit der künstlichen

Starkniederschläge. Dies hat zur Folge, daß die Ergebnisse der verschiedenen Anlagen untereinander kaum zu vergleichen sind.

Im wesentlichen sind zwei Typen solcher Anlagen zu unterscheiden (SCHMIDT, 1983):

Die einen erzeugen einzelne Tropfen und lassen sie unter Druck oder im freien Fall auf die Versuchsfläche einwirken, die anderen versprühen aus Düsen Wasserstrahlen, die dann zu Tropfen zerfallen.

Gemeinsam ist allen diesen Geräten das Ziel, mit der auf den Boden gebrachten Niederschlagsenergie natürlichen Starkregen möglichst nahe zu kommen.

Die im folgenden ausgewählten Beregnungsversuche sollen vor allem einen Überblick über Infiltrations- und Abflußprozesse in Steillagen von alpinen Bereichen verschaffen bzw. das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Einflußfaktoren auf das Abflußgeschehen vor Augen führen.

### **2.3.1 Beregnungsversuche SCHAFFHAUSER (1979)**

Einzugsgebiet des Schmitzenbaches bei Zell am See

*Lage und Eigenschaften der Versuchsflächen:*

Die drei Versuchsfelder liegen auf einer Seehöhe von 1200 m in E-Exposition. Die von Schafen beweideten bzw. nicht beweideten Versuchsflächen weisen eine Hangneigung zwischen 20 und 35% auf. Die ehemals bestockte Versuchsfläche am Waldrand besitzt eine durchschnittliche Hangneigung von 45%. Der Rankerboden (A-C-Profil, Bodenmächtigkeit 45 cm) im Pistenanteil ist charakterisiert durch eine eher schwach ausgeprägte Profildifferenzierung, sehr flachgründige (10cm), aber dichte Durchwurzelung und einen mittleren Skelettanteil im C-Horizont, während der Boden der ehemals bestockten Fläche als Rohhumusranker (Ah-Profil, Profilmächtigkeit 80 cm) angesprochen wurde.

Die Beregnungsversuche erfolgten während einer H-Wetterlage im Frühherbst 1977. Die Beregnungsintensität der vorliegenden Versuche lag bei 100 mm/(m<sup>2</sup>·h). Die Beregnungsfläche betrug 50 m<sup>2</sup>, wobei die Schmalseite parallel zum Isohypsenverlauf zu liegen kommt.

Die unbeweidete Versuchsfläche wies eine geschlossene Grasnarbe auf. Die durch Schafe beweidete zweite Versuchsfläche besaß ebenfalls eine geschlossene Grasnarbe.

Abflußverhältnisse:

Versuchsfläche	Versuch Nr	t [min]	Abfluß [l]	%	t [min]	Nachlauf [l]	%
nicht beweidet	1	57	650	13,0	11	61,2	1,2
	2	96	921	18,4	45	160,0	3,2
beweidet	1	65	1316	26,3	14	65,0	1,3
	2	87	1459	29,3	25	11,0	2,2
ehem. bestockt	1	86	83,2	1,7	30	4,7	0,09

Tabelle 5: Abflußverhalten der Testflächen (SCHAFFHAUSER, 1979)

Ergebnis:

Der Vergleich von beweideten bzw. nicht beweideten Arealen am Beispiel dieser Versuchsflächen ergab auf der beweideten Fläche wesentlich höhere Abflußprozentanteile von 26,3% (29,2%) als auf der unbeweideten mit 13% (18,4%). Das Ergebnis des Parallelversuchs auf einem Waldrandstreifen spiegelte in eindeutiger Weise das Rückhaltevermögen mit einem Abflußbetrag von 1,7% der niedergegangenen Niederschlagsmenge eines mit Moos- und Farnvegetation bedeckten Nadelwaldbodens wider. Inwieweit durch mechanische Einflüsse, wie Sprengungen oder Planierungsarbeiten bei der Anlage der Schipiste das Porensystem beeinflusst wurde, konnte nicht festgestellt werden. Unter den gegebenen Verhältnissen scheint die Schafbeweidung von Schipisten zur Verdichtung des Oberbodens geführt zu haben. Hinzu kommt noch die Belastung durch den Schiläufer, so daß ein doppelter negativer Effekt wirksam wurde.

### 2.3.2 Berechnungsversuche SCHWEIGHOFER (1989)

Einzugsgebiet des Oselitzenbaches in der "Karnischen Schiregion" (Hermagor)

Die Versuchsflächen:

*Gruppe Weideflächen/Alpenrosenheideparzellen:*

Die Gruppe der Weideflächen lag auf einer Seehöhe von 1540 bis 1620 m, NO-exponiert mit einer Hangneigung von 45 bis 55%. Die Weiderasenböden waren von der Klassifikation in mittelgründige Braunerde über Moräne und Hangschutt aus Trogkofelkalken und Rattendorfer Schichten mit Profilstörung durch Hangrutschung einzureihen. Durch die einsetzende Beweidung wurden Zwergsträucher verdrängt. Es entwickelten sich kräuterreichere Rasendecken.

Als Parallelversuch wurden im Weideareal eingeschlossene Alpenrosenheideparzellen getestet.

*Gruppe Skipisten:*

Die Parzellen der Pistenbereiche lagen in einer Höhe von 1500 bis 1630 m, in N-Exposition. Die Hangneigung war der der Weideparzellen ähnlich. Vom Bodentyp waren diese als mittelgründiges Kolluvium aus B- und C- Horizonten einer Pseudogley-Braunerde aus Hangschutt und Moränen klassifiziert worden. Von den Gräserarten der Pistenbegrünung waren nur wenig erhalten geblieben, wobei vermehrt Anzeiger von Weide- und Trittrasengesellschaften festgestellt wurden. Der starken Bodenbeanspruchung und Verletzung der Vegetationsdecke durch Pistenraupen stand eine geringere Beweidung gegenüber.

Die Testflächen hatten ein Ausmaß von 4 × 25 m, wobei die Längsseite stets senkrecht zu den Isohypsen angelegt wurden. Die Regenintensität betrug annähernd 100 mm/h.

Versuchsf.	Berechnungsphase							Nachlauf			Σ Abfluß	
	Beginn min	konst. Abfluß		Abfluß dauer	i	%	N <sub>k</sub> mm	min	l	%	l	%
		min	l									
<b>Weideflächen</b>												
Weide 1	2	40	92,5	58	4402	45,2	97,7	32	526	5,4	4928	50,6
Weide 2	4	39	105,0	56	4667	46,9	99,5	39	532	5,3	5199	52,3
Alpenros.heide 3	3	31	47,2	57	1990	19,7	100,7	10	58	0,6	2048	20,3
Alpenros.heide 4	5	39	9,2	55	448	4,5	99,6	7	31	0,3	479	4,8
<b>Skipisten</b>												
Piste 5	5	41	142,5	55	7090	66,8	106,1	57	715	6,7	7805	73,5
Piste 6	8	32	80,5	52	3672	36,6	100,2	50	346	3,5	4018	40,1
Piste 7	3	43	56,5	57	2830	29,1	97,3	18	128	1,3	2958	30,4
Piste 8	5	43	74,2	55	3800	39,1	97,2	22	272	2,8	4072	41,9

Tabelle 6: Abflußverhalten auf den getesteten Weideflächen und Skipisten (SCHWEIGHOFER, 1989)



### *Ergebnisse:*

Auf den Versuchsflächen (1+2) mit geschlossener Rasendecke ohne Zwergstrauchbewuchs setzte der Oberflächenabfluß bereits nach zwei und vier Minuten ein. Trotz beträchtlicher Bodenwasserzunahme blieben die Versickerungsraten in den einzelnen Bodenschichten sehr gering. Der konstante Abfluß wurde ab 20. und 21. Minute ermittelt und lag bei 92,5 l/min und 105 l/min. Mit 50,6% und 52,3% des simulierten Niederschlags ( $N_k$ ) erreichten die Werte eine aussagekräftige Beurteilung für diese Versuchspartellen. Die Hangneigung mit 22° und 25° wurde nicht als entscheidender Faktor angesehen, sondern Bodentyp und Beweidung. Bei Zunahme des prozentuellen Anteils von Zwergsträuchern (Fläche 3+4) sank der Gesamtabfluß auf 20,3% und 4,8% ab. Der konstante Abfluß von 47,2 l/min und 9,2 l/min läßt auf eine hohe Infiltration bzw. Oberflächenretention schließen. Die Pistenflächen zeigten wie vermutet die höheren Abflußspenden. Die entscheidenden Faktoren für das Abflußverhalten wie mechanische Pistenpräparierung und Extremlastungen durch Skifahrer sind durch die langen Nachlaufphasen ersichtlich.

Der Vergleich des Abflußverhaltens der stark beweideten Versuchsflächen und der im Almbereich eingeschlossenen Alpenrosen- Zwergstrauchheide bringt hohe unterschiedliche Werte durch das Rückhaltevermögen der verschiedenen Vegetationstypen. Das Ergebnis der Parallelversuche an den Skipistenflächen im naturnahen (5, 6) und künstlich veränderten (7 + 8) Areal zeigte sehr große Unterschiede in den Abflußverhältnissen der untersuchten Testflächen.

### **2.3.3 Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)**

Im folgenden werden die Ergebnisse von Versuchen mit künstlichen Starkniederschlägen auf verschiedenen Standorten und unterschiedlichen Vegetationseinheiten kurz dargestellt. Die Beregnungsversuche wurden mit der modifizierten, transportablen Anlage von KARL & TOLDRIAN (1973) des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft durchgeführt.

#### **2.3.3.1 Alpine Krummholz- und Zwergstrauchbestände**

In den Hohen Tauern, auf Flysch und im Kalkalpin der Nordalpen, wurden Krummholz- und Zwergstrauchbestände der subalpinen Stufe untersucht. Dabei

zeigte sich, daß ähnlich wie in Wäldern und alpinen Rasen kaum Bodenabträge auftraten. Die Oberflächenabflüsse lagen zwischen 4,1% des künstlichen Niederschlags ( $N_k$ ) und 31,4%  $N_k$ , wobei die Zunahme des  $A_0$  (Oberflächenabfluß) mit der Abnahme von Erlen und Zwergsträuchern einher geht.

Allgemein konnte festgestellt werden, daß sich Krummholz- und Zwergstrauchbestände auf den Oberflächenabfluß moderierend und damit auf den Wasserhaushalt und die Stabilisierung der Hänge positiv auswirken.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 7 zusammenfassend dargestellt:

Vegetation	Bodentyp	Hangneigung	$A_0$ in % des $N_k$	Abtrag [kg/100 m <sup>2</sup> ]
Nardus-Rasen mit Rhododendron ferr. Vacc. uliginosum Vacc. myrtillus	Ranker mit Gleymerkmalen	55%	31,4%	--
Alnus viridis	Pseudogley	80%	16,36%	--
Pinus mugo Rododendron ferr.	Podsol	60%	15,3%	--
Alnus viridis juv. Rododendron ferr. Vacc. myrtillus	Ranker mit Gleymerkmalen	58%	11,0%	0,1
Nardus stricta Vacc. myrtillus	Braunerde- podsol	60%	5,0%	0,024
Alnus viridis Rododendron ferr. Vacc. myrtillus	Ranker mit Gleymerkmalen	65%	4,1%	0,03

Tabelle 7: Oberflächenabfluß und Bodenabtrag in alpinen Krummholz- und Zwergstrauchbeständen (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

### 2.3.3.2 Grünland im alpinen Bereich

Für Rasengesellschaften gilt, gleichgültig bei welcher artenmäßiger Zusammensetzung und Bewirtschaftung, daß bei künstlichen Starkniederschlägen nur sehr geringe bis keine Bodenabträge auftreten. Die  $A_0$  können hingegen erheblichen Umfang annehmen, wobei sich die Beweidung als deutlich abflußfördernd gezeigt hat. Daneben spielt der Bodenzustand eine wesentliche Rolle. Durchwegs hohe Oberflächenabflüsse traten bei alpinen Rasengesellschaften auf (KARL, PORZELT, 1976).

Seehöhe	Gesteins-	Boden-	Hang-	alpine	Nutzung	$N_k$	$A_0$	$A_0$ in
---------	-----------	--------	-------	--------	---------	-------	-------	----------

m ü. NN.	unterlage	typ	neigung	Rasen		[mm/h)	[l]	% A <sub>k</sub>
1250	pk	BR	25	bg	iw	96	3180	33,1
2300	gn	S	65	ks	sw	91	3470	38,2
2300 <sup>a</sup>	gn	S	35	ks	sw	90	3900	43,4
2100	gn	N	38	ks	sw	90	2102	46,5
2200	gn	S	68	ks	sw	68	4430	69,8
1930 <sup>b</sup>	dw	kB	23 - 35	bm	sw	92	5100	55,4
1410	pk	R	50	fw	iw	46	193	8,4
1400	pk	R	40	fw	PK	65	798	30,2

Tabelle 8: Oberflächenabfluß in Rasen der montanen, subalpinen und alpinen Höhenstufe (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

Bodentypen: BR Braunerde-Rendzina, S Pseudogley, N Ranker, R Rendzina, kB kolluviale Braunerde  
 Gesteinsunterlage: pk Plattenkalk, gn Gneis, dw Lokalmoräne  
 Alpine Rasen: bg Blaugrashalden, ks Krummseggenmatten, bm Borstgrasmatten, fw Fettweiden  
 Nutzung: iw Intensivweide, sw Standweide, PK mit Phosphor und Kali gedüngt  
 (a und b werden weiter unten genauer beschrieben)



**Versuch (a):** Hohe Tauern, Bundesland Kärnten

Wallackhaus, ca. 2300 m ü.NN.

Boden, Geologie: alpiner Pseudogley, durch Viehtritt verdichtet; Lokalmoräne auf Gneis.

Vegetation: alpines Curvuletum

Abbildung 13: Abflußganglinie des Beregnungsversuches Wallackhaus (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

**Versuch (b):** Sarntaler Alpen, Autonome Provinz Bozen

Meran 2000, ca. 1930 m ü. NN.

Boden, Geologie: Kolluvium mit hohem Humusanteil; Lokalmoräne aus Tonalit (Brixner Granit)

Vegetation: Borstengrasrasen, starker Viehtrieb, Rasenschollen bilden Höcker.

Deckungsgrad 80%

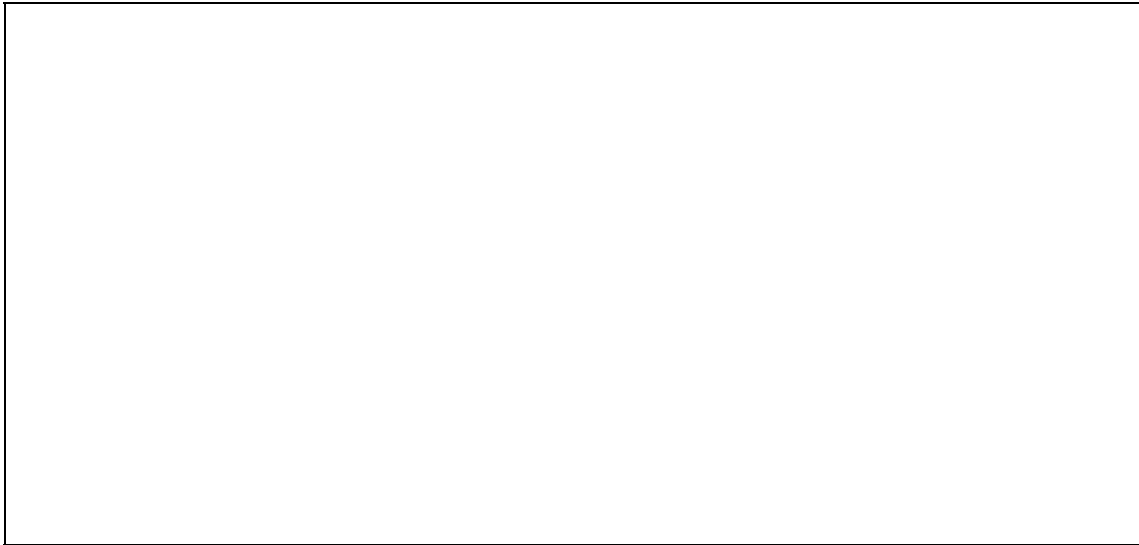


Abbildung 14: Korngrößenverteilung des getesteten Bodens (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

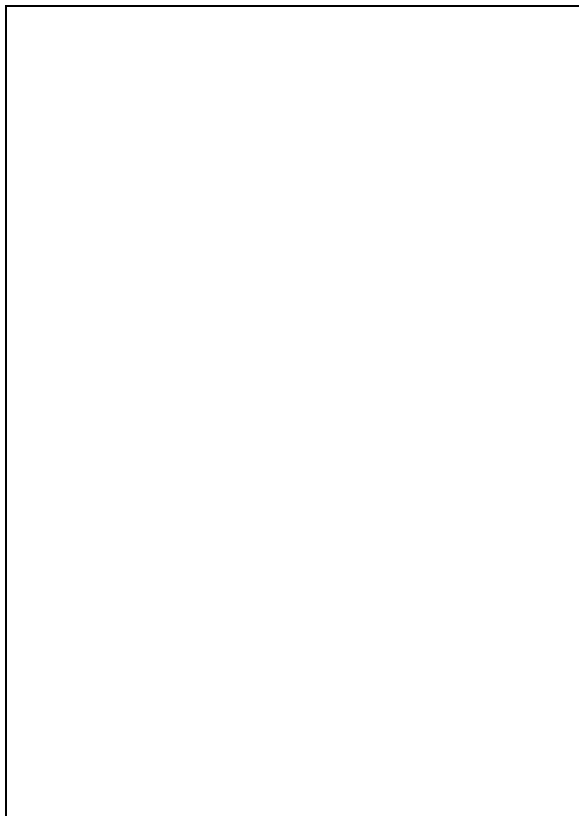


Abbildung 15:  
Abflußganglinie der Testfläche Meran 2000  
(KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

### 2.3.3.3 Alpine Skipisten

Bei den als Skipisten benutzten subalpinen bis alpinen naturnah beweideten Rasen wurden sowohl in zentralalpiner Gebieten der Hohen Tauern wie auf Flysch und Kalkalpen der Nordalpen hohe bis sehr hohe Oberflächenabflüsse, jedoch kaum Bodenabträge gemessen. Die  $A_0$  bewegten sich zwischen 16,6%  $N_k$ , als auffallend niedrigem Wert, bis zu 86,4%  $N_k$  als Spitzenwert, wobei der Durchschnitt aus 11 Versuchen mit 54,4%  $N_k$  deutlich über dem der nicht als Skipisten zusätzlich genutzten alpinen Rasen liegt.

Seehöhe m ü. NN.	Gesteins- unterlage	Boden- typ	Hang- neigung	Vege- tation	Nutzung	$N_k$ [mm/h]	$A_0$ 	$A_0$ in % $A_k$
2390	dw	S	31	Curvulet.	Aw, S	89	7340	82,5
1970	dw,ph	B,G	25	Rasenges.	Aw, S	90	3770	41,8
1980	dw,ph	B,G	25 - 40	Rasenges.	S	86	3520	40,9
2100	sf,gn,gl	B,G	21	Rasenges.	Aw, S	33	1470	44,5
1450	sf	G	18	Br.-Segges.	Aw, S	94	7050	75,0
1680	dw	B;G	35	Rasenges.	Aw	100	6310	63,1
1150	sk	G	23	Seggen	Aw, S	75	6480	86,4
1330	lf	B,G	50	Rasenges.	Aw, S	88	4250	48,3
1330	lt,tv	B,G	40	Rasenges.	Aw, S	80	3000	37,5
1980	dw,ph	N	38 - 40	Rasenges.	Aw, S	73	4430	60,7
1980	dw,ph	N	45	Rasenges.	Aw, S	70	1160	16,1

Tabelle 9: Oberflächenabfluß auf naturnahen Almweiden mit Nutzung als Skipisten (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

Auf planierten Skipisten der montanen bis alpinen Höhenstufe in den Hohen Tauern und auf Flysch und Kalkalpin wurden ähnlich hohe  $A_0$  gemessen.

Seehöhe m ü. NN.	Gesteins- unterlage	Boden- typ	Hang- neigung	Vege- tation	Nutzung	$N_k$ [mm/h]	$A_0$ 	$A_0$ in % $A_k$
1450	sf	O	34	Ansaat	Sp	97	8540	88,0
1650	dw	O	42 - 48	Ansaat	Sp	100	7940	79,4
1650	dw	O	48 - 50	Ansaat	Sp	100	7240	72,4
900	dw	O	38	Ansaat	Sp	81	5030	62,1
900	dw	O	25	Ansaat	Sp	78	3450	44,2
1250	dw	G	22 - 23	Ansaat	Sp	86	5800	67,4
1250	dw	O	14	Ansaat	Sp	85	6200	72,9
1130	dw	O	55	Ansaat	Sp	99	--	--
1150	dw	O	26	Ansaat	Sp	96	3080	32,0
1100	sk	O	51	Ansaat	Sp	100	--	--
1100	sk	O	43	Ansaat	Sp	100	--	--
1100	sk	O	34	Ansaat	Sp	100	4000	40,0
1800	dw,gl	O	35 - 45	Ansaat	Sp	63	2030	32,3
1940	gl,ph	N	32	Ansaat	Sp	88	3900	44,3
1950	gl,ph	O	22 - 24	Ansaat	Sp	80	4660	58,3
1950	gl,ph	O	15	Ansaat	Sp	83	5900	71,0
1440	gl,ph	O	10 - 13	Ansaat	Sp	65	4300	66,2
1150	dw	O	22	Ansaat	Ss	78	6100	78,2

Tabelle 10: Oberflächenabfluß auf planierten Skipisten (KARL, PORZELT & BUNZA, 1985)

Bodentypen: S Pseudogley, B Braunerde, G typischer Gley, N Ranker, O Rohboden

Gesteinsunterlagen: dw Lokal- (fern) Moräne, ph Quarzphylitt-Serie, sf Hangschutt (Flysch), gn Gneis ungegliedert, gl Glimmerschiefer Serie, sk Hangschutt (kalkalpin), lf Lias Fleckenmergel, tv Seeabsätze (Talverfüllung)

Nutzung: Aw Almweide, S Skipiste, Sp planierte Skipiste, Ss Schleppliftspur

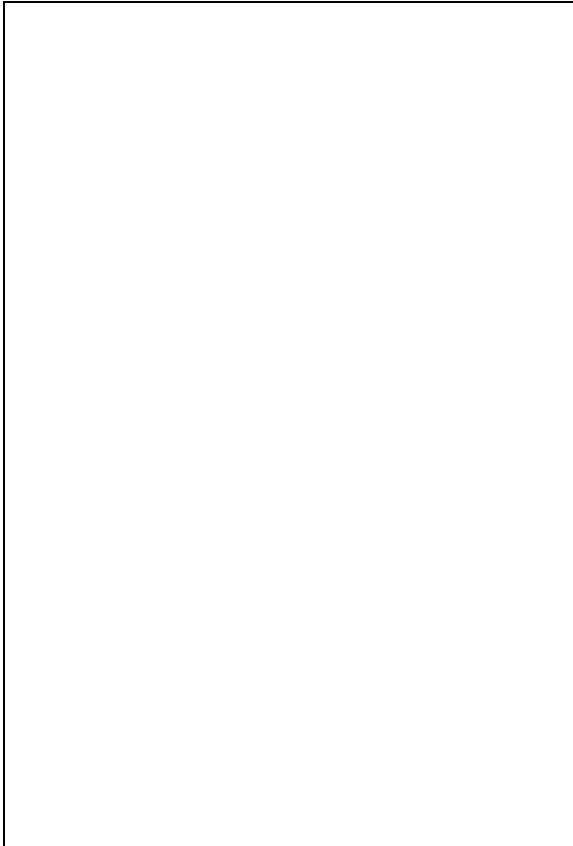


Abbildung 16: Beispiel für hohen Oberflächenabfluß auf einer planierten Skipiste nach BUNZA (1982)

### 2.3.4 Beregnungsversuch LANG (1995)

Einzugsgebiet des Oselitzenbaches in den karnischen Alpen (Kärnten)

Parzellensituation:

Die Testfläche liegt auf 1545 m ü. NN. Sie weist ein Gefälle von 20% bei ausgeglichenem Kleinrelief auf. Die Versuchsfläche wird als Skipiste genutzt. Für die Pistentrassierung waren Schlägerungsarbeiten notwendig, von denen noch einige bereits vermoderte und überwachsene Stöcke zeugen. Zahlreiche Trittsiegel, in denen teilweise Wasser stand, dokumentierten die stark verminderte Infiltrationskapazität. Besonders der obere Teil der Testfläche war kleinflächig (auf ca. 2 m<sup>2</sup>) völlig vernäßt.

Baumvegetation: keine

Bodenvegetation: beweideter Pistenrasen (Bedeckungsgrad 75 - 100%)

Bodentyp: mittelgründiger Gley

Humusform: Mull

Wasserhaushalt: feucht

Es wurden jeweils zwei Beregnungsversuche in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (1989 und 1990) durchgeführt.

Darstellung der Versuchsabläufe:



Abbildung 17: Abflußverhalten beim Erstversuch 1989 (LANG, 1995)

Niederschlag:	Beregnungsdauer:	60 min	Gesamtabfluß:	22,2% von N <sub>k</sub>
	Intensität:	98,50 mm/h	Vorlaufdauer:	3 min
			Abflußdauer:	91 min
	Parzellenfläche:	100 m <sup>2</sup>	max. Abflußspende:	0,009 l/s.m <sup>2</sup>



Abbildung 18: Abflußverhalten im Wiederholungsversuch 1989 (LANG, 1995)

Niederschlag:	Beregnungsdauer:	60 min	Gesamtabfluß:	25,9% von $N_k$
	Intensität:	101,8 mm/h	Vorlaufdauer:	5 min
			Abflußdauer:	101 min
	Parzellenfläche:	100 m <sup>2</sup>	max. Abflußspende:	0,008 l/s.m <sup>2</sup>



Abbildung 19: Abflußverhalten beim Erstversuch 1990 (LANG, 1995)

Niederschlag:	Beregnungsdauer:	60 min	Gesamtabfluß:	2,9% von $N_k$
	Intensität:	98,9 mm/h	Vorlaufdauer:	26 min
			Abflußdauer:	56 min
	Parzellenfläche:	100 m <sup>2</sup>	max. Abflußspende:	0,002 l/s.m <sup>2</sup>





Abbildung 20: Abflußverhalten beim Wiederholungsversuch 1990 (LANG, 1995)

Niederschlag:	Beregnungsdauer:	60 min	Gesamtabfluß:	11,3% von Nk
	Intensität:	98,3 mm/h	Vorlaufdauer:	12 min
			Abflußdauer:	86 min
	Parzellenfläche:	100 m <sup>2</sup>	max. Abflußspende:	0,005 l/s.m <sup>2</sup>

Es zeigt sich, daß die Ergebnisse beider Versuchsperioden (1989 und 1990) differieren, sowohl die Abflüsse als auch die zeitlichen Verläufe betreffend. Diese Unterschiede konnte LANG (1995) auch auf anderen Versuchsparzellen (insgesamt 9, auf unterschiedlichen Standorten) feststellen.

## 2.4 Zusammenfassung

Um eine Klärung der komplexen Ursachen von Infiltration- und Oberflächenabflußprozessen in alpinen Steillagen zu ermöglichen, muß ein integrales Konzept gefunden werden, das alle beteiligten Ursachen in Beziehung zueinander setzt. Darauf aufbauend können ursachenorientierte, d.h. integrale Sanierungs- und Schutzkonzepte für die betrachteten Einzugsgebiete entwickelt werden.

Oberflächenabfluß und Infiltration und die in weiterer Folge daraus resultierende Wildbachtätigkeit können nicht als isolierte naturräumliche Phänomene aufgefaßt werden. Sie sind im hohen Maße von Faktoren abhängig, die alleinestehend betrachtet, keine gültigen Aussagen über die davon ausgehende Abflußreaktion zulassen. Eine eindimensionale Betrachtung reicht daher nicht aus. Die Analyse des Infiltrations- und Abflußgeschehens muß sich auf das gesamte Ursachengebiet ausdehnen, wobei systemanalytisch und interdisziplinär vorgegangen werden muß. Der Forschungsansatz dieser Systemanalyse soll es ermöglichen, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktorsystemen (vor allem Geologie, Tektonik, Geomorphologie, Boden und Vegetation) sowie externen Faktoren wie anthropogenen Einflüssen zu erkennen und zu deuten. Die Datengrundlage für diese analytische Ursachenforschung kann mittels Beregnungsversuchen geschaffen werden. Zum einen kann durch derartige Versuche das Problem des seltenen Auftretens von Starkniederschlägen umgangen werden, zum andern wird die Vergleichbarkeit und damit die statistische Auswertbarkeit verschiedener Boden-Vegetationskomplexe ermöglicht. Auch der intertemporäre Vergleich (Versuchswiederholung) auf ein und dem selben Standort, der bei Sanierungsmaßnahmen (z.B. Düngung) von Bedeutung ist, wird dadurch ermöglicht. Die durchgeführte Literaturstudie gibt einen kurzen Überblick über die möglichen Einflußfaktoren auf Infiltrationsrate und Oberflächenabfluß in alpinen Steillagen. Die gewonnen Erkenntnisse können aber nicht ohne Einschränkung auf die Praxis übertragen werden. Dies muß durch Entwicklung eines „Leitfadens“ für das jeweilige Untersuchungsgebiet geschehen. Erst mittels eines solchen Leitfadens, der auf die jeweiligen Verhältnisse abgestimmt ist, kann dann eine flächenhafte, integrale und ursachenorientierte Sanierung und Prävention unterstützt werden.

## 2.5 Literaturverzeichnis

- AUERSWALD K., 1987: Sensivität erosionsbestimmender Faktoren. Zeitschrift für Wasser und Boden, Nr.1
- BARRET G., SLAYMAKER O., 1989: Identification, characterization, and hydrological implications of water repellency in mountain soils. CATENA, 16, S.477-489
- BOUMA J., 1990: Influence of macroporosity on environmental quality. Advances in Agronomy, 46, S.1-37
- BOUMA J., 1992: Effects of soil structure, tillage and aggregation upon soil hydraulic properties. Interacting processes in soil science, Advances in soil science, Florida
- BOYLE M. FRANKENBERGER W.T., STOLZY L., 1989: The Influence of Organic Matter on Soil Aggregation and Water Infiltration. Journal of production Agriculture, Vol.2, No. 4
- BUNZA G., SCHAUER T., 1989: Der Einfluß von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluß bei künstlichem Starkregen in Wildbacheinzugsgebieten der Bayrischen Alpen. München. Informationsbericht 2/89 des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft
- BUNZA G., 1978: Vergleichende Messungen von Abfluß und Bodenabtrag auf Almflächen des Stubnerkogels im Gasteiner Tal. Veröffentlichungen des Österr. MaB-Hochgebirgsprogramms Hohe Tauern - Band 2, Innsbruck, Universitätsverlag Wagner
- BUNZA G., 1982: Oberflächenabfluß und Bodenabtrag in alpinen Graslandökosystemen. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie Bern, Band XII, 1982
- BUNZA G., DEISENDORFER H-E., KARL J., PORZELT M., RIEDEL J., 1985: Der künstliche Niederschlag der transportablen Beregnungsanlage nach Karl und Toldeian.
- BUNZA G., LÖHMANNSRÖBEN R., 1996: Abfluß- und Abtragungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten. Grundlagen für den integralen Wildbachschutz. Schriftenreihe des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 27
- BURCH G.J. et.al., 1989: Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. Hydrological Processes, 3, S. 211-222
- CZELL A., 1972: Wasserhaushaltsmessungen in subalpinen Böden. Mitteilungen der FBVA Wien, Bd. 98, S.1-109
- CZURDA K., XIANG W., 1993: Der Einfluß der kationenbelegung auf das Kriechverhalten von Tonen am Beispiel einer ostalpinen Großhangbewegung. Sonderheft zur 9. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie Garmisch-Partenkirchen, 1993, S.33-42
- DVWK-Schriften, 1985: Heft 71, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

- DVWK, 1985: Beiträge zu Oberflächenabfluß und Stioffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen
- EIDT M., LÖHMANNRÖBEN R., 1996: Zusammenfassung zwischen bodenkundlichen Standortfaktoren und Abtragungsformen. Intern. Symposium Interpraevent. Garmisch-Partenkirchen
- ELLISON W.D., 1947: Soilerosion studies - Part 1. Approach to the problem. Agricultural Engineering 28
- FAEH A.O., 1997: Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialogie nr.150
- FLÜGEL W-A., SCHWARZ O., 1988: Beregnungsversuchen zur Erzeugung von Oberflächenabfluß, Interflow und Grundwassererneuerung. Heidelberg, Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 66
- GHADIRI H., PAYNE D., 1988: The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil; Journal of Soil Science, Vol.39, S.563-575
- GUGGENBERGER H., 1980: Untersuchungen zum Wasserhaushalt der alpinen zwergstrauchheide am Patscherkofel. Dissertation an der Leopold-Franzens- Universität Innsbruck. S.165-200
- HORTON R.E., 1933: The role of infiltration in the hydrologic circle. Trans. Amer. Geophys. Union, Nr.14
- HOSANG J., 1993: Modelling preferential flow in soils - a two phase approach for field conditions. Geoderma, 58, S.149-163
- JUNG L., 1960: Über die Veränderung der Bodenoberfläche durch abfließende Niederschlagswässer. Sonderdruck Wasser und Boden 12,H.1
- JUNG L., BRECHTEL R., 1980: Messungen von Oberflächenabfluß und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des DVWK, H. 48
- KAINZ et.al., (1992): Comparison of German and Swiss Rainfall Simulators- Utility, Labour Demands and Costs; Z. Pflanzenernährung. Bodenk.,155
- KARL J., PORZELT M., 1976: Vergleichende Messungen von Abfluß und Bodenabtrag. Aus Wasser und Abwasser, bau-intern, 3/1976
- KARL J., TOLDRIAN H., 1973: Eine transportable Beregnungsanlage für die Messung von Oberflächenabfluß und Bodenabtrag. Hamburg, Wasser und Boden, Heft 3, März 1973
- KARL J., PORZELT M., BUNZA G., 1985: Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen. DVWK-Schriften 1985, Heft 71, Verlag Paul Paraey, Hamburg und Berlin
- KASPAR H., PARTL C., 1996: Verbesserungen und Erhaltung der Hochlagenvegetation durch Düngungsmaßnahmen. Sonderdruck aus „Der Alm- und Bergbauer“. Jg. 46, Folgen 4 und 5
- KIERWALD E., 1952: Der Einfluß des Waldes auf die Wasserwirtschaft des Landes. AFZ (München), 7 Jg., Nr. 43, S. 494-498

- KIERWALD E., 1969: Wasserhaushalt und Einzugsgebiet. Gewässerkundliche Untersuchungen im Einzugsgebiet der Ruhr in den Jahren 1951-1965. Bd.1, Vulkan-Verlag, Essen
- KÖLLA E., 1986: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern ohne Direktmessung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 87.
- KÖRNER C., WIESER G., GUGGENBERGER H., 1980: Der Wasserhaushalt eines Alpenen Rasens in den Zentralalpen. Veröffentlichung des Österr. MaB-Hochgebirgsprogramms hohe Tauern, Bd. 3: S.243-264
- KURON H., 1954: Landwirtschaft und Bodenerosion, Untersuchungen typischer Schadensgebiete. Mitteilungen des Institutes für Raumforschung Bonn
- KURON H., 1955: Arbeitsbericht des Ausschusses für Bodenerosion, zitiert nach BREBURDA J. (1983): Bodenerosion - Bodenerhaltung. DLG-Verlag, Frankfurt
- KURON H., JUNG L., 1958: Über die Erodierbarkeit einiger Böden. Int. Union f. Geodesie und Geophysik, Gen. Vers. Toronto I, 161-165.
- KURON H., JUNG L., SCHREIBER H., 1956: Messungen von oberflächlichem Abfluß und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden Deutschlands. Schriftreihe dae Kurat. Für kulturbauwesen, Heft 5
- LANG E., 1993: Starkregensimulation: Der Wald zeigt was er kann. Wien, Österreichische Forstzeitung, Jg. 104, Nr.1, S. 56-57
- LANG E., 1995: Starkregensimulation - Ein Beitrag zur Erforschung von Hochwasserereignissen. Berichte der FBVA Wien 90/1995
- LÖHMANNSRÖBEN R., SCHAUER TH., 1996: Ableitung hydrologischer Eigenschaften zur Beurteilung des Abfluß- und Abtragsgeschehen aus boden- und vegetationskundlichen Kriterien. Inter. Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen
- LÖHMANNSRÖBEN R., 1992: Die Bedeutung der Bodenkartierung für die Beurteilung morpho- und hydrodynamischer Prozesse in Wildbacheinzugsgebieten. Inter. Symposium Interpraevent, Bern. Bd. 6, S.237-250
- MARKART G., KOHL B., 1995: Starkregensimulationen und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluß- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten. Ergebnisse der Beregnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach in Salzburg. Wien, FBVA-Berichte 89
- MITTEILUNGEN des Eidgenössischen Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, 1991
- MORGAN R.P.C., 1986: Soil Erosion and Conservation. Longmann Scientific & Technical, Essex, England
- MÜCKENHAUSEN E., 1985: Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralischen und petrologischen Grundlagen. DLG\_Verlag, Frankfurt
- NAEF F. et.al.,1998: Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Größe

- extremer Hochwasser. Projektschlußbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", Schlubericht NFP 31. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich; vdf Hochschulverlag AG, 1998
- NEUWINGER I., 1978: Vergleichende Untersuchungen von Almböden. Veröffentlichungen des Österreichischen Mab-Hochgebirgsprogramms hohe Tauern. Band 2, S.241-251
- OSTROWSKI G., WOLF-SCHUHMANN U., 1994: Niederschlag-Abfluß-Modell NASIM, Firma HYDROTEC. Allgemeine Einführung
- PREUSS O., 1977: Über den Nährstoffab- und austrag aus landwirtschaftlich genutzten Flächen - dargestellt an einem definierten Wassereinzugsgebiet eines für die mitteldeutsche Gebirgslandschaft typischen Fließgewässers 3. Ordnung. Dissertation, Göttingen.
- RAWLS W.J., BRAKENSIEK D.L., 1985: Prediction of soil water properties for hydrologie modeling. Watershed managment in the eighties. E.B. Jones &T.J. ward (eds.), S.293-299
- SCHAFFER G., COLLINS H.J., 1966: Eine Methode zur Messung der Infiltrationsrate im Felde. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 7 Jg.
- SCHAFFHAUSER H., 1979: Beregnungsversuche auf Schipisten. Wien, Informationsdienst der FBVA, 179. Folge, Jänner 1979
- SCHAFFHAUSER H., 1982: Untersuchungen über das Abflußverhalten verschieden bewirtschafteter Versuchsflächen. Wien, Mitteilungen der FBVA, Nr. 144
- SCHAFFHAUSER H., 1983: Das Abflußverhalten verschieden bewirtschafteter Testflächen. Wien, Allg. Forstzeitung, Jg. 94, Nr. 12, S.344-345
- SCHMIDT R.G., 1983: Ein Regensimulator für Feldversuche. Wasser und Boden, a, S.179-182
- SCHAUER TH., 1996: Beispiele von Erosionsprozessen im zusammenhang mit den Standortfaktoren nutzung und Vegetation im Bayrischen Alpenraum. Beitrag zum Symposium der Bayrischen Akademie der Wiss. Münche, Nov. 1995
- SCHEFFER F., SCHACHTENSCHNABEL P., 1989: Lehrbuch der Bodenkunde. Enke, Stuttgart
- SCHERRER S., 1997: Abflußbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflußprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 147
- SCHREIBER H., 1955: Untersuchungen über den Einfluß von synthetischen Bodenverbessern auf verschiedene physikalische Bodeneigenschaften zitiert nach DVWK-Schriftreihe, Heft 48, 1980, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- SCHWARZ O., 1982: Ein Vorschlag zur Ermittlung der minimalen Infiltrationsrate von Waldböden. Allg. Forst- und Jagtzeitung, Jg.153, Heft 11, S. 208-212
- SCHWARZ O., 1985: Direktabfluß, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen - Messungen mit einer transportablen Beregnungsanlage in Baden Württemberg. DVWK Schriften Nr. 71, s.185-230

- SCHWARZ O., 1986: Zum Abflußverhalten von Waldböden bei künstlicher Beregnung. DFG - deutsche Forschungsgemeinschaft - Sonderdruck: forschungsprojekt naturpark Schönbuch, Forschungsbericht VCH 1986
- SCHWEIGHOFER W., 1989: Gegenüberstellung von Untersuchungen über das Abflußverhalten unterschiedlich bewirtschafteter Böden. Wien, Österr. Forstzeitung, Nr. 3/1989
- SEILER W., 1981: Der Einfluß der Bodenfeuchte auf das Erosionsverhalten und den Gesamtabfluß in einem kleinen Einzugsgebiet auf der Hochfläche von Anwil. Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Suppl.-Band 39, Berlin, S. 109-122
- SOKOLLEK V., SÜSSMAN W., 1981: Einfluß von Bodennutzung und standorteigenschaften auf Oberflächenabfluß, Bodenabtrag und Nährstoffaustrag bei simulierten Starkregen. Mitteilungen Dtsch. Bodenkundlichen Gesellschaft, Nr.30, S. 361-378
- WISCHMEIER W-H. et al., 1962: Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. Int. Assoc. of Scient. Hydrology Comm. of Landerosion, Symposium of Bari, Gentbrugge
- WISCHMEIER W-H. et al., 1978: Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agric. Handb. No. 537
- YOUNGS E.G., 1991: Infiltration Measurements- A Review; Hydrological Processes, 5, S. 303-306
- ZUIDEMA P.K., 1985: Hydraulik der Abflußbildung während Starkniederschlägen. Eine Untersuchung mit Hilfe numerischer Modelle unter Verwendung plausibler Bodenkennwerte. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr.79.
- ZUIDEMA P.K., KÖLLA E., 1983: Ein Niederschlags-Abfluß-Modell für kleine Einzugsgebiete. Wasser, Energie, Luft, 5/6, S. 124-125.

### 2.5.1 Weitere Literatur zu diesem Thema

- ASCHWANDEN H., 1989: Übertragungsfunktionen; Niederschlag-Abfluß in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Bern, 197 S., Mitteilung / Landeshydrologie und -geologie; 11
- BORK H.R., 1980: Oberflächenabfluß und Infiltration: qualitative und quantitative Analysen von 50 Starkregensimulationen in der Südheide (Ostniedersachsen) / H. R. Bork. Braunschweig, 94 S., Landschaftsentstehung und Landschaftsökologie; 6
- CATENA SUPPLEMENT: Rainfall simulation, runoff and soil erosion / Jan de Ploey (ed.). Cremlingen-Destedt: Catena-Verl., 1983. - 214 S.
- CERNUSCA A., 1979: Ökologische Auswirkungen von Schipisten und deren Berücksichtigung in Raumplanung und Umweltschutz: [MaB-6-Projekt "Pilotprojekt Alpine Ökosysteme"; Referat anlässlich der 27. Jahrestagung der Intern. Alpenkommission (CIPRA) am 24.9.1979 in Briançon, Frankreich]. Innsbruck, 1979. 38 S.

- CERNUSCA A., 1983: Schipisten: ökologische Auswirkungen des Baues und Betriebs von Schipisten; Tiroler Umweltschutzkonzept - Bestandsaufnahme / verfaßt von Alexander Cernusca. - Innsbruck: Amt der Tiroler Landesregierung
- DVWK, 1982: Anthropogene Einflüsse auf das Hochwassergeschehen ,Hamburg [u.a.]: Parey, 1982. 179 S., Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau; 53. Enth.: Modellrechnungen über den Einfluß von Regulierungsmaßnahmen auf den Hochwasserabfluß / von Peter Handel
- DVWK, 1985: Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen [Hrsg.: Dt. Verb. für Wasserwirtschaft u. Kulturbau e.V. (DVWK)]. Hamburg [u.a.]: Parey, 260 S., Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau; 71
- DVWK-Merkblätter, 1982: Katalog von Übertragungsfunktionen: Materialien für die "Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten" / [verantw. Hrsg. Dt. Verb. für Wasserwirtschaft u. Kulturbau e.V. (DVWK). Bearb. vom DVWK-Fachausschuss "Niederschlag-Abfluß-Modelle kleiner Einzugsgebiete". Bonn, [ca. 200] S., DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft
- EGGER A., 1991: Anwendung von Abflußmodellen in Einzugsgebieten der Tiroler und Salzburger Alpen / vorgelegt von: Artur Egger. Innsbruck, Univ., Dipl.-Arb.
- FELBERMAYER B., 1989: Geoökologische Untersuchungen an Schipisten im Gebiet der Silvretta-Nova, Montafon. Innsbruck, Univ., Dipl.-Arb.
- FRANZ H., 1980: Untersuchungen an alpinen Böden in den Hohen Tauern 1974 - 1978. Stoffdynamik und Wasserhaushalt. Österreichische Akademie der Wissenschaften. Innsbruck: Univ.-Verl. Wagner, 295 S., Veröffentlichungen des Österreichischen MaB-Hochgebirgsprogramms Hohe Tauern; 3
- HEGG C., 1996: Zur Erfassung und Modellierung von gefährlichen Prozessen in steilen Wildbacheinzugsgebieten. Bern: Geograph. Inst. d. Univ., 1996. 197 S., Geographica Bernensia: Reihe G, Grundlagenforschung ; 52. Zugl.: Bern, Univ., Diss.
- HENK U., 1989: Untersuchungen zur Regentropfenerosion und Stabilität von Bodenaggregaten. Braunschweig, 197 S., Landschaftsgenese und Landschaftsökologie; 15
- HOFMANN-SCHIELLE C., 1989: Bodenkundliche Untersuchungen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung des Mineralkörpers, 229 S.. München, Univ., Diss., 1988
- ILKA PFITZNER, 1998: Untersuchungen zu einem möglichen Zusammenhang von Hochwasser- und Vermurungsgefahr und großflächigen Schipistenerschließungen: Abschlußbericht der Projekts / Geographisches Institut der Universität Innsbruck. Projektdurchführung: Innsbruck, 1989
- JUNG L., 1980: Messungen von Oberflächenabfluß und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden der Bundesrepublik Deutschland: Ergebnisse von



- 1956 - 1968 / Ludwig Jung; Rainald Brechtel. Fachausschuss Bodenerosion im Dt. Verb. für Wasserwirtschaft u. Kulturbau. Hamburg [u.a.]: Parey, 139 S., Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau; 48
- KLUG-PÜMPEL B, 1996: Conservation in alpine ecosystems: the plant cover of ski runs reflects natural as well as anthropogenic environmental factors = Die Pflanzendecke von Schipisten als Spiegel natürliche und menschlich bedingter Einflüsse / B. Klug-Pümpel; Ch. Krampitz. Wien: WUV-Univ.-Verl.. S. 97 - 117
- KRONBICHLER A., 1989: Skipistenbegrünung: Pistenzustand, Gefahren u. Probleme, Verbesserungsmöglichkeiten u. Pflege. Bruneck: Dipdr. 35 S., zugl.: Florenz, Univ., Diss.
- LEINWEBER P, 1995: Organische Substanzen in Partikelgrößenfraktionen: Zusammensetzung, Dynamik und Einfluß auf Bodeneigenschaften. 1. Aufl.. Vechta: Vechtaer Druckerei u. Verl., 148 S., Vechtaer Studien zur angewandten Geographie und Regionalwissenschaft; 15
- LÜTSCHG O., 1926: Über Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge: Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes; ein Beitrag zur Fluß- und Gletscherkunde der Schweiz. Zürich: Sekretariat des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes. 479 S. Verbandsschrift / Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband; 14
- PECHER R., 1969: Der Abflußbeiwert und seine Abhängigkeit von der Regendauer München, 140 S., Berichte aus dem Institut für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Hochschule München; 2
- SCHIFFER G.R., 1992: Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen Karlsruhe. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe S.205-214. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1991
- SKIWELT UND UMWELT: eine Untersuchung von Pisten und Nicht-Pisten über Bodenzustand, Vegetation und Ertrag / [Hrsg.: Fachverband der Seilbahnen. Red. Beratung: Franz Solar]. Wien: Fachverb. d. Seilbahnen, 1992
- VALTINGOJER P., 1991: Entwicklung und Erprobung einer Methode zur Messung der Bodenatmung auf Schipisten. 142 S., Innsbruck, Univ., Dipl.-Arb.
- WIESBAUER H., 1993: Flächenwirtschaftliche Massnahmen zur Verminderung des Oberflächenabflusses und der Erosion im Einzugsgebiet des Wolfgrabens bei Krems an der Donau / Universität für Bodenkultur, Institut für Landschaftsgestaltung und Gartenbau. Wien: Univ. für Bodenkultur, Inst. für Landschaftsgestaltung u. Gartenbau, 1993. - 84 S.

### 3 Beregnungsversuche

#### 3.1 Beschreibung der Regensimulationsanlage (RSA)

Die Regensimulationsanlage wurde von Dipl.-Ing. Peter PERINGER in den Jahren 1989-1993 entwickelt und laufend verbessert. Sie dient der detaillierten Untersuchung des Niederschlag-Abfluß Geschehens und wurde bereits mehrfach eingesetzt, z. B. am Löhnersbach (Abbildung 21), Stubnerkogel, Glatzbach und Fuchsgießgraben.



Abbildung 21: Einsatz der RSA im Steilgelände (Löhnersbach 1993)

Die RSA setzt sich aus 5 Einheiten zusammen, die räumlich unterschiedlich kombiniert werden können. Jede Einheit kann eine Fläche von 4 m<sup>2</sup> beregnen, somit ergibt sich eine Gesamtberegnungsfläche von 20 m<sup>2</sup>.



Abbildung 22: Stahlrohrrahmen und Schlitten mit Antriebsmotor

Ein steckbarer Stahlrohrrahmen bildet das Grundgerüst, auf dem ein fahrbarer Schlitten mit einer Länge von 2 Meter aufgesetzt wird. Dieser beinhaltet die Wasserversorgung, ein Verteilerrohr mit Düsen und ein Abtropfgitter. Das von den Düsen zerstäubte Wasser fällt auf ein auswechselbares Gitter und bildet Tropfen unterschiedlicher Größe an den Gitterknoten, die letztendlich die Beregnung darstellen. Durch die Wahl des Gitternetzes ist somit die Tropfengröße einstellbar. Der fahrbare Schlitten wird mittels Elektromotor angetrieben, die Bewegungsumkehr wird durch Lichtschranken ausgelöst und durch Federn gedämpft (Abbildung 22). Die gewünschte Intensität des Regens je Einheit wird mittels Durchflußregler mechanisch gesteuert, die Vorgabe erfolgt über die Software. Somit ist es möglich, unterschiedliche Niederschlagsverläufe über eine Eingabemaske vorzugeben. Um genügend Druck in der Zuleitung für die Regelung vorzugeben (ca. 6 bar), werden zwei Pumpen in Serie angeordnet und ein Druckminderventil vor den Durchflußreglern angeordnet, um Druckschwankungen auszugleichen. Die Wasserversorgung erfolgt wahlweise aus naheliegenden Gerinnen mit einem Saugstrang oder über gefüllte Wasserbehälter (bis 10 m<sup>3</sup>).

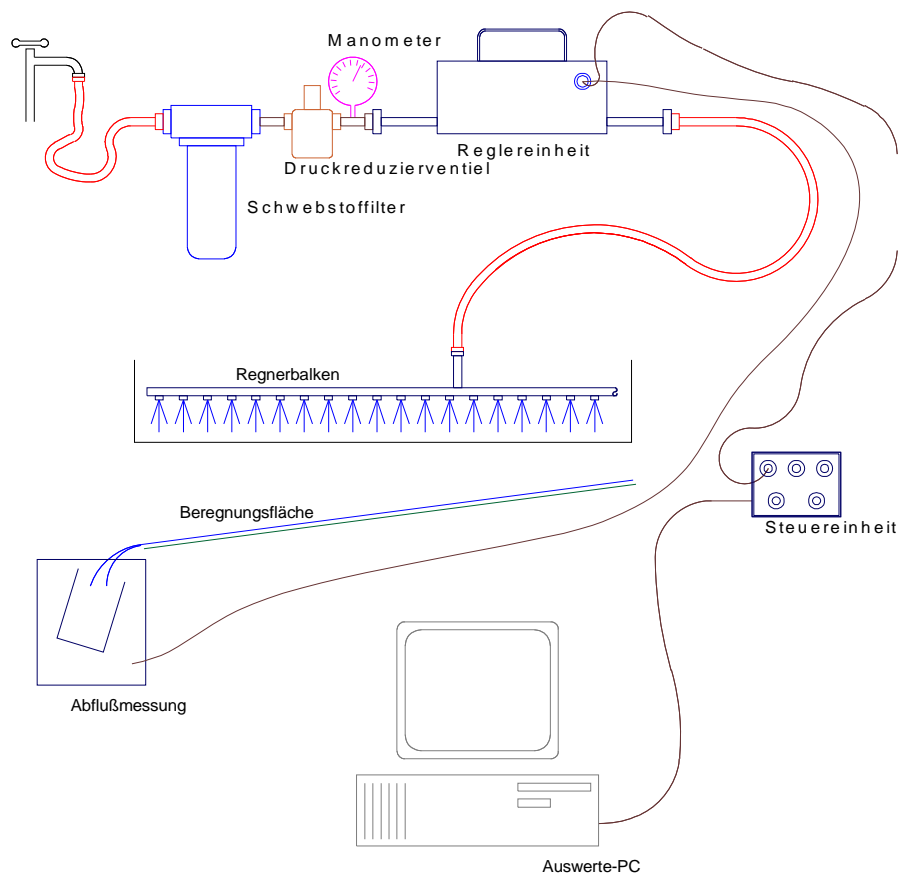


Abbildung 23: Anordnung der Teile der Regensimulationsanlage

Der Oberflächenabfluß von den Beregnungsflächen wird über Bleche, die in einer Tiefe von rund 5 cm horizontal in den Boden geschlagen werden, in einer Rinne gesammelt und in ein Kippelement mit einem Volumen von 1000 cm<sup>3</sup> eingeleitet (Abbildung 24).

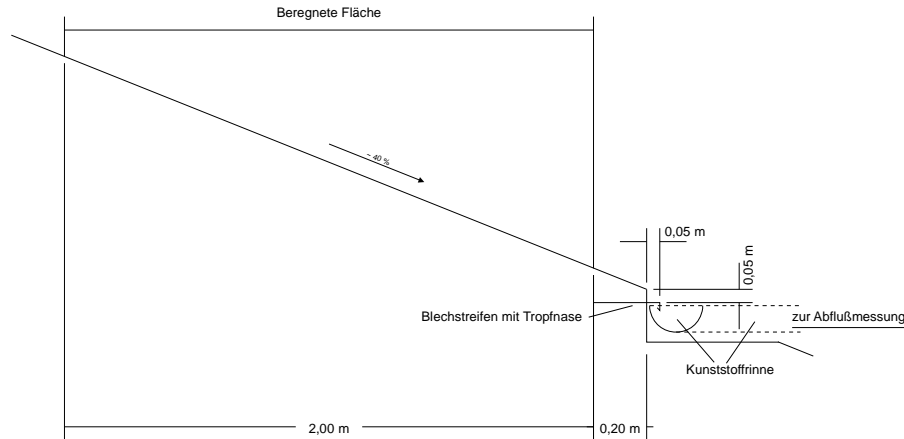


Abbildung 24: Detailskizze zum Auffangen des Oberflächenabflusses

Jede Kippung erzeugt einen Impuls, der im 6 Sekunden-Takt aufgezeichnet wird. Genau genommen wird jedoch nicht 1 Liter gemessen, sondern 1 Kilogramm. Da jedoch nur mit geringsten Feststoffmengen zu rechnen ist, kann dieser Fehler unberücksichtigt bleiben. Für genauere Analysen müssen Proben gezogen werden, um eine Rückrechnung auf den Reinwasserabfluß zu ermöglichen. Während der Kippung wird der Zulauf unterbrochen, um Verluste zu vermeiden. Die Dauer einer Kippung beträgt rund 0.5 Sekunden. Die Kippelemente werden durch Auslitern justiert. Dazu sind an den Auffangbehältern verschiebbare Gewichte angebracht, die die Schwerpunktlage der Behälter verändern (Abbildung 25).



Abbildung 25: Kippelement beim Entleerungsvorgang

Die Kontrolle der Durchflußregler erfolgte mittels einer verlustfreien Abflußwanne (Abbildung 26), das heißt, das aufgebrauchte Wasser mußte vollständig abfließen. Die ermittelten Schwankungen des Abflusses bei einer 90-minütigen Beregnung lagen bei -5 % bis +1 %. Diese lassen sich durch Verluste in der Anlage (Leitungsverluste, Abtropfverluste) und durch ungenaue Kippungsauslösung ( $\pm 30$  ml) erklären.



Abbildung 26: Eichung der Durchflußregler im Labor

Die Genauigkeit der Abflußmessung ist somit wesentlich größer als die zufälligen Schwankungen der abflußbeeinflussenden Parameter auf den einzelnen Probeflächen. Die Schwankungen auf den Probeflächen ergeben sich aufgrund der zufällig variierenden Interzeption der Bodenvegetation, der Streuauflage und den bodenphysikalischen Parametern wie Porenvolumen, Porengröße und Speicherkapazität des Bodens.



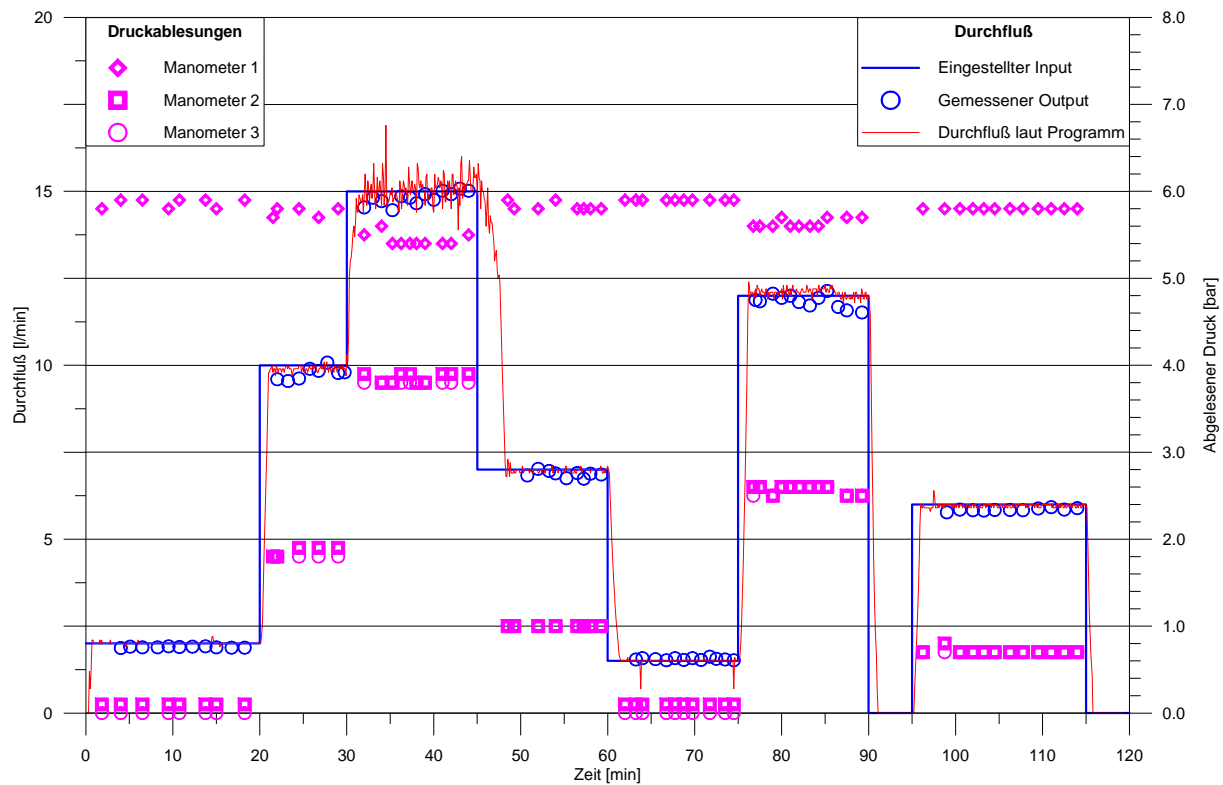


Abbildung 27: Protokoll Durchflußkalibrierung

Von der eingesetzten Software werden die Kippimpulse und der Durchfluß zu den einzelnen Einheiten in 6 Sekundenschritten gespeichert. Dadurch erhält man schon während der Regensimulation eine Kontrolle über die maßgeblichen Parameter.

Das Programm ermöglicht die Visualisierung des Verlaufs der aufgebracht zur abgeflossenen Wassermenge. Einerseits werden die Daten unkorrigiert abgespeichert, andererseits ermöglicht die Darstellung der Werte als gleitendes Mittel einen geglätteten Verlauf der Kurven.

### 3.2 Methodik und Versuchsanordnung

Insgesamt sind 6 Probeflächen vorgesehen, drei auf einer Skipiste, drei auf einer Almfläche. Jeweils eine davon dient als Referenzfläche (Nullvariante), die anderen zwei Flächen erhalten unterschiedliche Düngergaben. Pro Probefläche werden 5 Berechnungselemente mit jeweils einer Grundfläche von 4 m<sup>2</sup> eingerichtet, um die kleinräumige Variabilität des Bodens zu erfassen.

Bei der Auswahl der Probeflächen ist auf Homogenität innerhalb der Probeflächen und Vergleichbarkeit der Probeflächen untereinander zu achten. Die Probeflächen werden im Gelände mit Eisenrohren fix vermarktet und eingemessen, um die Wiederholungen am gleichen Standort zu gewährleisten.

Die Beregnungsflächen sind vor den Versuchen, aber nach der Vegetationsaufnahme, zu mähen, um etwa konstante Verluste durch die Vegetation (Interzeption) zu erhalten.

Der Windeinfluß soll durch seitlich angebrachte Planen möglichst gering gehalten werden.

Während der Regensimulation wird die Bodenfeuchte auf jeder Einheit mittels TDR-Sonden kontinuierlich und die Luft- und Wassertemperatur stichprobenartig gemessen. Weiters wird die Saugspannung mit Tensiometern aufgezeichnet.

Die aufgetragenen Intensitäten wurden analog zu den von der Hydrographie Niederösterreich für mittlere extreme Tagesniederschläge > 70 mm vorgegebenen Werten festgelegt (Abbildung 28).

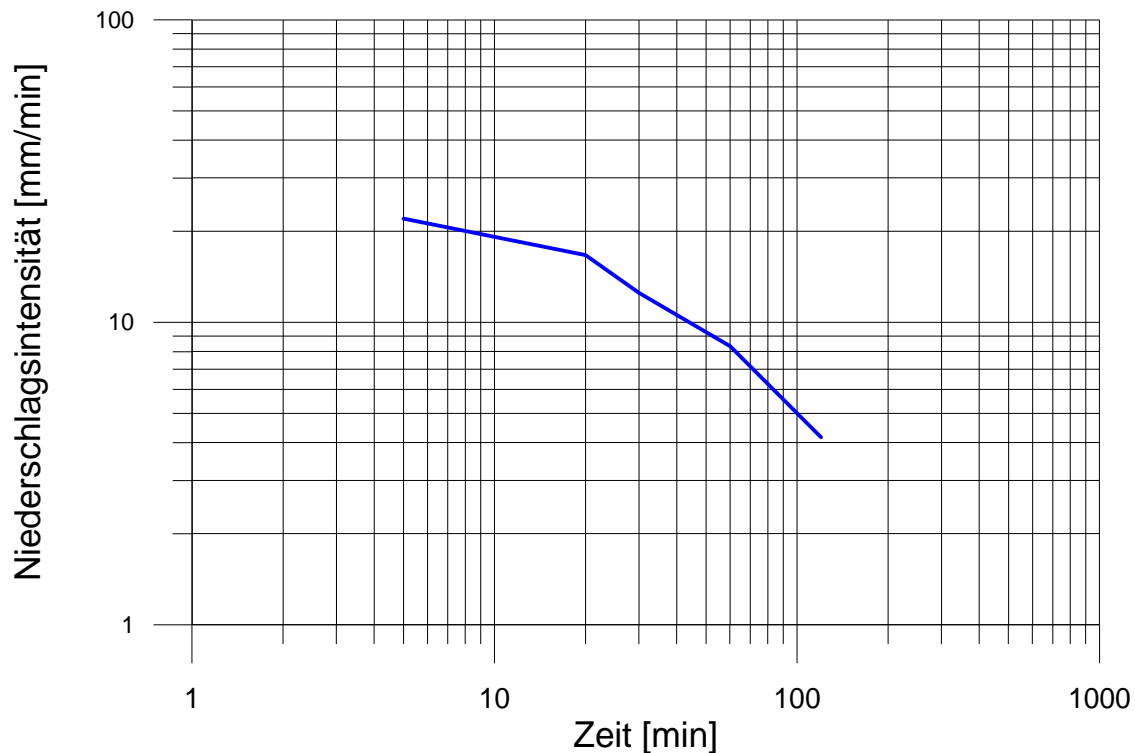


Abbildung 28: Niederschlagsintensitäten für Starkniederschläge

Die Regensimulation selbst zeigt folgenden Verlauf (Abbildung 29):

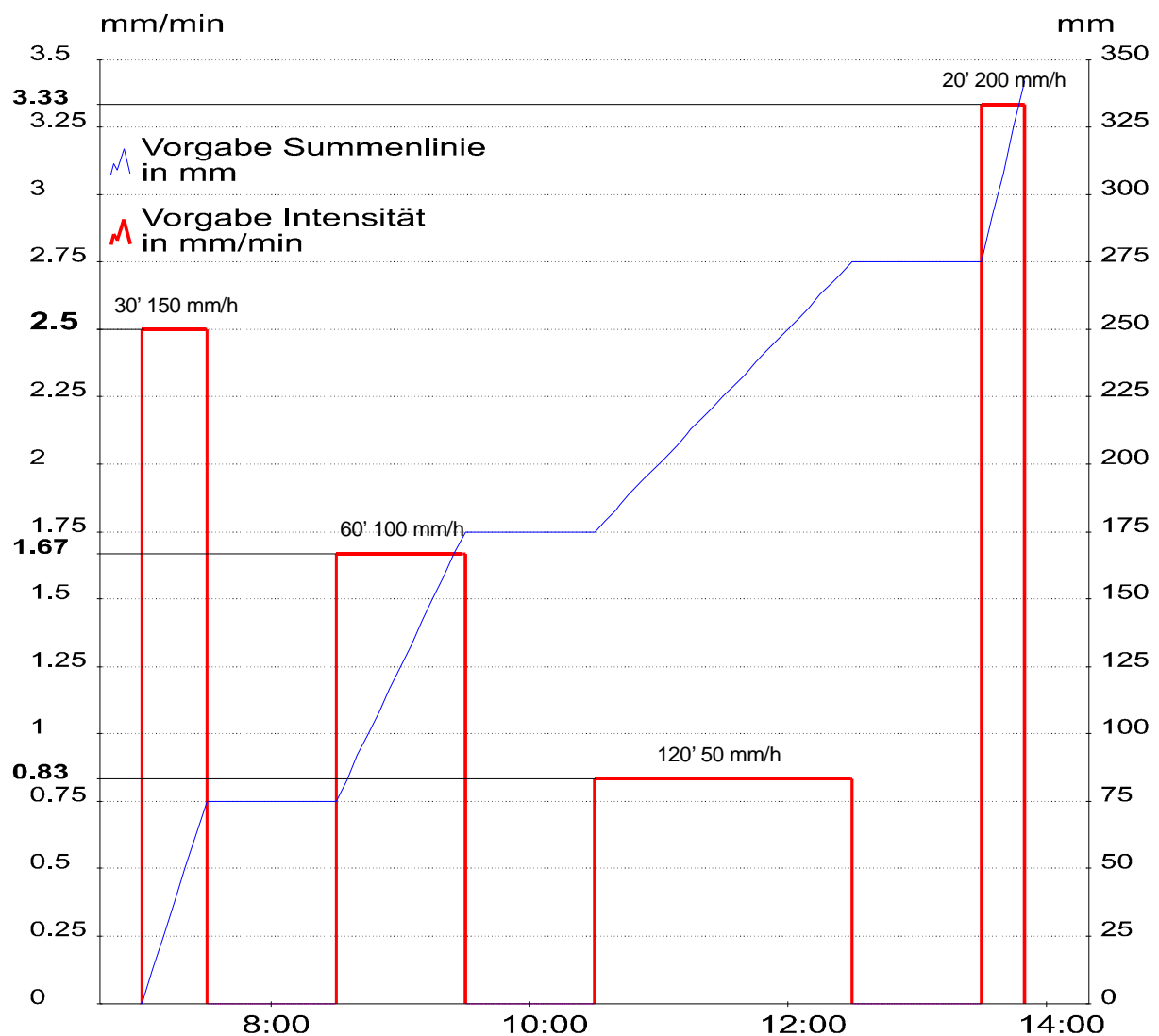


Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf der Regensimulation

Die Vegetationsuntersuchungen einer Probestfläche umfassen 2 Aufnahmen nach *Braun-Blanquet* (25 m<sup>2</sup>) und 4 Aufnahmen nach *Londo* auf Intensivprobestflächen (1 m<sup>2</sup>).

Entsprechend ist daher eine Probenflächengröße von mindestens 34 x 21 m erforderlich.



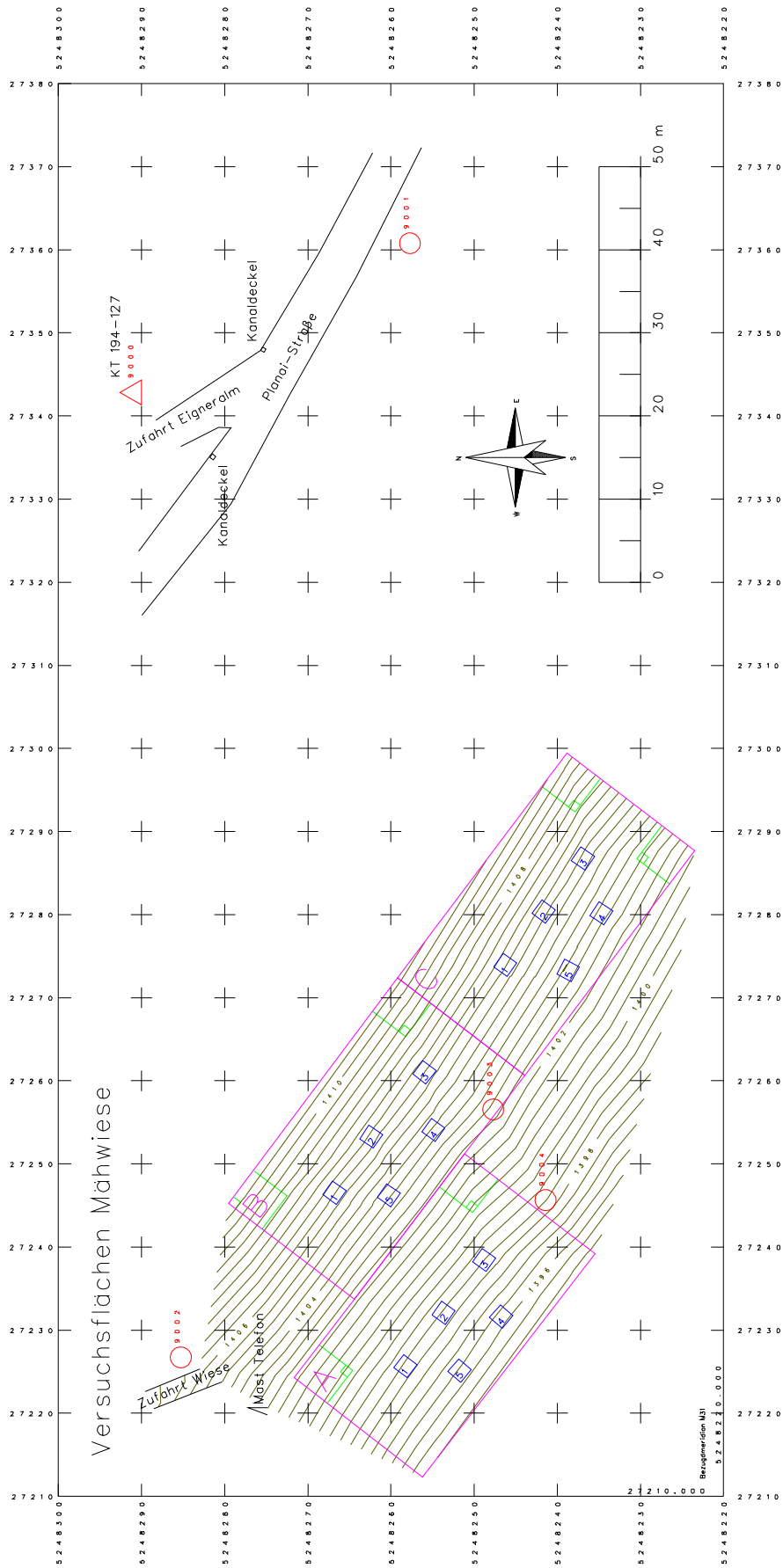


Abbildung 30: Meßanordnung für Almfläche

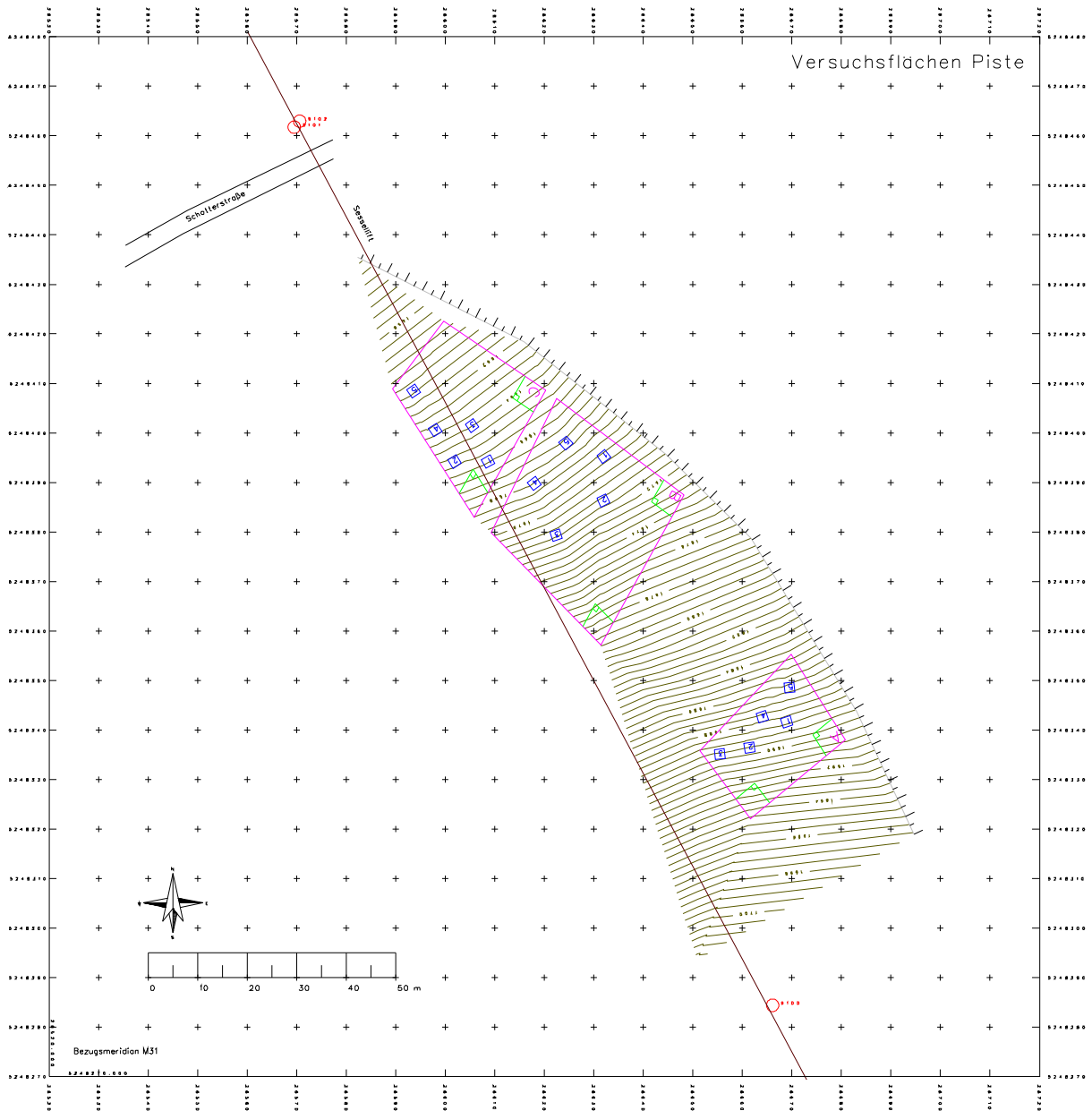


Abbildung 31: Meßanordnung Schipiste

## **4 Einrichtung vegetationskundlicher Dauerbeobachtungs-flächen**

### **4.1 Skipisten und ihre Auswirkung auf die Vegetation**

Durch die massiven menschlichen Eingriffe bei Pistenpräparierung und Schibetrieb (Schikantenschliff) ist die Vegetationsdecke von Pisten extremen mechanischen, chemischen und auch phänologischen (Verlängerung der Vegetationsruhe durch Kunstschnee) Veränderungen ausgesetzt (LAUTERWASSER, 1989).

Vor allem Planierungsmaßnahmen führen zu tiefgreifenden Schäden des Bodenprofils und in der Folge der darauf stockenden Vegetation. Durch die teilweise Entfernung der Humusdecke, die Verringerung des Feinerdeanteils und die Reduktion des Porenvolumens wird das Wasserspeichervermögen der Böden herabgesetzt. Der Oberflächenabfluß wird beträchtlich erhöht und erosive Kräfte können wirksam werden. Diese Degradierung bewirkt eine Veränderung des Nährstoffhaushaltes des Bodens – v. a. der Stickstoff- aber auch der Kohlenstoffgehalt werden beträchtlich verringert (SCHÖNTHALER, 1985).

Der Narbenschluß der Vegetationsdecke wird reduziert und die Durchwurzelungstiefe geht zurück. Neben der Verminderung des Erosionsschutzes bedeutet dies auch Einbußen für die Landwirtschaft durch eine Reduktion von Futterwert und -menge (PRÖBSTL, 1990).

### **4.2 Sanierung von Schipisten**

Gerade im Alpenraum, wo eine eigenständige Regeneration der Vegetation nur sehr langsam erfolgen kann (Einwanderung autochthoner Arten: 15-20 Jahre, n. PRÖBSTL 1990), ist die Rekultivierung der Schipisten von größter Bedeutung um Erosionsschäden hintanzuhalten.

Dabei sollte eine rasche Ausbildung einer dichten, tiefreichenden Wurzelmasse bei gleichzeitig dichtem Oberflächenbestand angestrebt werden.

Nachdem auf Schipisten vor allem nährstoffarme Rohboden- bzw. degradierte Standorte zu begrünt werden sollen, sind für eine möglichst zügige Bestandesentwicklung zusätzliche Nährstoffgaben unerlässlich. Auch zur Bildung und Erhaltung einer geschlossenen Grasnarbe sind wiederholte Düngungsmaßnahmen erforderlich (SCHÖNTHALER, 1985).

Darüberhinaus sollten die Rasen durch extensive Bewirtschaftungsmaßnahmen (Mahd oder Beweidung) möglichst kurz gehalten werden, da langes Gras die Bildung von Schneerutschen begünstigen kann (PRÖBSTL, 1990).

### **4.3 Vegetation als Indikator**

Bei einer vegetationskundlichen Untersuchung über die Eignung eines Düngemittels zur Sanierung von Schipisten sind v. a. die Artenkombination und ihre Zeigerwerte, die Dichte der Vegetation sowie Futterqualität und Standortstauglichkeit der Arten wesentliche Beurteilungskriterien.

Da die Auswirkung von Nährstoffgaben auf die Vegetation jedoch nur langfristig bewertet werden kann, ist es notwendig die Dynamik der Vegetation über einen längeren Zeitraum zu verfolgen – als geeignetes Untersuchungsverfahren bietet sich daher die Einrichtung von Dauerbeobachtungsflächen an (PFADENHAUER et al. 1986, DIERSCHKE 1994).

### **4.4 Probeflächendesign**

Auf einer Pistenfläche und einer vergleichbaren Weide sollen jeweils eine stark gedüngte, eine mäßig gedüngte und eine ungedüngte (Null-) Variante untersucht werden.

Pro Variante werden zwei Wiederholungen durchgeführt.

Bei der Auswahl der Probeflächen ist v. a. das Homogenitätskriterium zu beachten (PFADENHAUER et al., 1986).

Um die gesamte Artengarnitur der untersuchten Pflanzengesellschaften zu erfassen und um eine Zuordnung zu den entsprechenden Assoziationen treffen zu können, sowie für die Auswertung hinsichtlich der Zeigerwerte, sollen die Dauerquadrate in größere Aufnahmeflächen von 25 m<sup>2</sup> eingebettet werden.

Auf diesen Flächen werden pflanzensoziologische Aufnahmen nach der erweiterten Braun-Blanquet-Skala (WILMANNNS, 1989) durchgeführt.

Da diese Skala in den unteren Skalanteilen sehr weit gefaßt ist und bei der Schätzung der Abundanz zwei unterschiedliche Variablen (Deckung und Individuenzahl) verwendet werden, ist sie zur genauen Dokumentation von Vegetationsveränderungen jedoch nicht geeignet (PFADENHAUER et al., 1986). In den Dauerquadraten (Intensivflächen) wird die Vegetation daher nach der

Dezimalskala von LONDO (1975) aufgenommen – sie ist folgendermaßen definiert (DIERSCHKE, 1994):

<i>Skala</i>	<i>Deckung [%]</i>	<i>Mittelwert [%]</i>
0,1	<1	(1)
0,2	1-3	2
0,4	3-5	4
1	5-15	10
2	15-25	20
3	25-35	30
4	35-45	40
5	45-55	50
6	55-65	60
7	65-75	70
8	75-85	80
9	85-95	90
10	95-100	(100)

Tabelle 11: Dezimalskala von LONDO (1975) zur Vegetationsaufnahme

Die Schätzung der Deckungsgrade soll durch Frequenzbestimmungen (1 m<sup>2</sup>-Frequenzrahmen mit 10 cm-Unterteilung) ergänzt werden. Dabei wird für jedes Kleinstquadrat das Vorhandensein bzw. Fehlen einer Art bestimmt (PFADENHAUER et al., 1986).

Aus der Änderung der Häufigkeit der Arten über den Untersuchungszeitraum kann dann – bei Kenntnis ihres Indikatorwertes – auf die Qualität der Düngung rückgeschlossen werden.

In jeder Aufnahmefläche wird ein Kleinstquadrat mit einer Größe von 1m x 1m angelegt (also 6 pro Weide, 6 pro Schipiste).

Eine photographische Dokumentation soll die Auswertung und Interpretation der Vegetationsveränderungen unterstützen.

## 4.5 Literaturverzeichnis

DIERSCHKE, H., 1994: Pflanzensoziologie – Grundlagen und Methoden. Eugen Ulmer, Stuttgart.

LAUTERWASSER, E., 1989: Skisport und Umwelt. DSV-Umweltreihe, 1. Stöppel-Verlag, Weilheim.

LONDO, 1975: Dezimalskala für die vegetationskundliche Aufnahme von Dauerquadraten. – In: SCHMID, W. (Red.): Sukzessionsforschung. Ber. Int. Symp. IVV Rinteln 1973. Cramer, Vaduz.

- PFADENHAUER, J., PSCHLOD, P. & BUCHWALD, R., 1986: Überlegungen zu einem Konzept geobotanischer Dauerbeobachtungsflächen für Bayern. Ber. ANL, 10.
- PRÖBSTL, 1990: Skisport und Vegetation. DSV-Umweltreihe, 1. Stöppel-Verlag, Weilheim.
- SCHÖNTHALER, K. E., 1985: Auswirkungen der Anlagen für den Massenschisport auf die Landschaft. Die Bodenkultur Bd. 36, H. 2, Sonderdruck, Österr. Agrarverlag, Wien.
- WILMANN, O., 1989: Ökologische Pflanzensoziologie. 4. Aufl., UTB Quelle & Meyer, Heidelberg.