



Wasserwirtschaft

## Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen



18/2006





# **Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen**

Redaktion

Dr. Andreas Meuser  
Norbert Demuth

Autor

Dr. Simon Scherrer,  
Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, Stockackerstraße 25, CH-4153 Reinach

## **Impressum**

Herausgeber: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft  
und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG)  
Amtsgerichtsplatz 1  
55276 Oppenheim

Titelbild: Oberflächenabfluss auf einem Waldweg im Pfälzer Wald  
Dr. Ulrich Steinrücken, SOILUTION GbR 2004

Herstellung: LUWG

Auflage: 75 Exemplare

© November 2006

Nachdruck und Wiedergabe nur mit Genehmigung des Herausgebers

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Ausgangslage	3
1.2 Ziele und Aufbau des Bestimmungsschlüssels	4
<b>2 Grundlagen zu den Abflussprozessen</b>	<b>5</b>
2.1 Einleitung	5
2.2 Oberflächenabflussprozesse (Overland Flow)	5
Hortonsche Abflussprozesse (HOF) <sup>1</sup>	5
Saturated Overland Flow und Return Flow (SOF und RF)	7
2.3 Fließprozesse im Boden (Subsurface flow SSF)	7
2.4 Intensität der Prozesse	8
2.5 Gegenseitige Beeinflussung der Abflussprozesse	9
<b>3 Vorgehensweise bei der Beurteilung von Flächen nach Abflussprozessen</b>	<b>10</b>
3.1 Einleitung	10
3.2 Vorerkundung	10
3.2.1 Zusammentragen von Grundlagendaten und Hilfsmittel	10
3.2.2 Geländebegehung und Auswertung von Grundlagen als Bestandteil der Vorerkundung	13
3.3 Detaillierte Geländeuntersuchungen	16
3.3.1 Planung und Durchführung von spezifischen Felduntersuchungen	16
3.4 Übertragung auf Fläche (Punkt–Hang–Einzugsgebiet)	17
3.5 Plausibilisierung des Ergebnisses	18
<b>4 Bestimmungsschlüssel zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen</b>	<b>19</b>
4.1 Einleitung	19
4.2 Prozessbeurteilungs-Schemata (PBS)	19
4.2.1 Einleitung	19
4.2.2 PBS für Wiesen und Weiden	20
4.2.3 PBS für Acker	30
4.2.4 PBS für Wald	30
4.3 Die Kriterien der Prozessbeurteilung und ihre Herleitung am Standort	30
4.3.1 Einleitung	30
4.3.2 Vegetations-Deckungsgrad des Bodens	30
4.3.3 Verschlammungsneigung des Bodens	31
4.3.4 Hydrophobizität	32
4.3.5 Oberflächenrauigkeit	33
4.3.6 Makroporosität am Beispiel von Wurmröhren	33
4.3.7 Packungsdichte (Dichte resp. Verdichtung der Matrix)	38
4.3.8 Matrixdurchlässigkeit	39
4.3.9 Laterale Fließwege	40
4.3.10 Hydromorphie <sup>17</sup>	42
4.3.11 Geologie	42

<b>5</b>	<b>Zusatzuntersuchungen im Feld zur Verifikation der hergeleiteten Prozesse</b>	<b>44</b>
5.1	Einleitung	44
5.2	Versuche mit Doppelringinfiltrrometer	44
5.3	Versuche mit Kleinberegnungsanlage	44
5.4	Einsatz von Tracern bei Infiltrrometer- und Kleinberegnungsversuchen	46
5.5	Tracerversuche an Hängen	47
<b>6</b>	<b>Beispiele der Prozessbeurteilung auf verschiedenen Raum-Skalen</b>	<b>48</b>
6.1	Einleitung	48
6.2	Die Prozessbeurteilung am Standort	48
6.2.1	Unterlagen zur Erhebung	48
6.3	Die Prozesse am Hang und im Einzugsgebiet des Idarbaches ,(Allenbach-Idaroberstein)	62
6.3.1	Einleitung	62
6.3.2	Prozess-Catena	62
6.3.3	Abflussprozesskarte des Idarbach-Einzugsgebiets	62
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>67</b>
	<b>Anhang</b>	<b>78</b>
	<b>Anhang 1: Grundlagen zu den Abflussprozessen auf verschiedener Landnutzung</b>	<b>81</b>
A:	Ackerbaulich genutzte Flächen	81
B:	Weinberg	82
C:	Grünland	83
D	Abflussprozesse im Wald	84
	<b>Anhang 2: Weitergehende Untersuchungen zur Vorerkundung (Sauer &amp; Harrach, 2002)</b>	<b>86</b>
	Vernässungsgrad	86
	Zeigerpflanzen auf Gründland	86
	Nutzungsgrenzen	88
	Befragung ortskundiger Personen	88
	Optimaler Zeitpunkt der Geländebegehung	88
	<b>Anhang 3: Abflussreaktionskurven</b>	<b>90</b>
	<b>Anhang 4: Fotodokumentation</b>	<b>91</b>
	<b>Anhang 5: Bestimmung der Packungsdichte (Harrach&amp;Sauer 2002, Kap. 4)</b>	<b>98</b>
	Erfassung von Gefügemerkmalen	98
	Für die Bestimmung der Packungsdichte wichtige Gefügemerkmale	101
	Ableiten der Packungsdichte aus Gefüge- und Durchwurzelungsmerkmalen	107
	<b>Anhang 6: Verschiedene Formulare zur Erfassung hochwasserrelevanter Kriterien</b>	<b>110</b>

## Vorwort

In nahezu allen Gemeindechroniken und Stadtgeschichten finden sich Beispiele extremer Hochwasserereignisse. Dies zeigt, mit Hochwasser ist überall und jederzeit zu rechnen. Wie die Historie aber auch zeigt, kommt in der Folge eines Ereignisses sofort die Diskussion auf, wie diese Hochwasser entstanden sind und von welchen Flächen im Einzugsgebiet besonders viel Abfluss stammt. Die scheinbar einfachen Fragen, wie viel Wasser infiltriert, wie viel Wasser hält der Boden zurück und wie viel Wasser fließt sofort ab, sind dabei für die Hochwasserentwicklung entscheidend. Nach wie vor ist es aber schwierig, verlässliche Aussagen hierüber zu treffen, um darauf aufbauend wirksame Maßnahmen abzuleiten.

Zur Versachlichung der Diskussion bedarf es eingehender hydrologischer Kenntnisse der Hochwasserentstehung vor Ort. Dies gilt in allen Maßstabsebenen, von kleinen bis hin zu komplexen, großen Einzugsgebieten. Um hier eine Lücke zu schließen wurde im Auftrag der Wasserwirtschaftsverwaltung Rheinland-Pfalz ein „Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen“ in kleinen Einzugsgebieten entwickelt. Mit Hilfe geologischer und bodenkundlicher Informationen und gestützt auf Untersuchungen im Gelände können Einzugsgebiete in Teilflächen unterschiedlicher Reaktionsweisen gegliedert werden. Basierend auf diesen Kenntnissen lassen sich Entstehungsweise und Größe von Hochwasser besser erklären. Diese räumlich differenzierten Informationen über die dominanten Abflussprozesse erlauben eine realistische Einschätzung der Abflüsse aus extremen Niederschlägen.

Im Rahmen eines Interreg III B Projektes WaReLa (**Water Retention by Land Use**) wurde das Verfahren in mehreren kleinen Einzugsgebieten erfolgreich getestet. Der Aufwand derartiger Untersuchungen lässt sich jedoch häufig nur für kleine Gebiete und konkrete Projekte rechtfertigen. Für meso-skalige Betrachtungen kommen vereinfachte Verfahren auf Grundlage vorhandener digitaler Daten (Boden, Relief etc.) zur Anwendung. Aber auch dafür werden die Ergebnisse regionaler Detailkartierungen nach der hier vorgestellten Methodik zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen benötigt. Diese flächenhaften Informationen über die dominanten Abflussprozesse werden die Grundlagen für die hydrologische Modellierung in Hinblick auf die Bewertung von extremen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen in komplexen Einzugsgebieten deutlich verbessern. Entsprechende Arbeiten hierzu sind im Gange.

Mainz, Oktober 2006



Sven Lütthje

Abteilung Wasserwirtschaft





## Zusammenfassung

Bei Starkregen tragen Flächen je nach ihrem Aufbau (Landnutzung, Geologie, Böden, Relief) unterschiedlich stark zum Abfluss und damit zum Hochwasser bei. Auf un- oder gering durchlässigen Flächen beispielsweise entsteht sofort oder leicht verzögert Abfluss, während auf Flächen mit durchlässigen und tiefgründigen Böden viel Wasser infiltriert und zurückgehalten werden kann. Das Zusammenspiel der Abflussreaktion von Teilflächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft entscheidet schliesslich, wie viel Wasser abfließt und wie groß die Hochwasser werden. Zu beurteilen, wie stark die Abflussreaktion einer (Einzugsgebiets-) Teilfläche ist, setzt die Kenntnisse über die bei Hochwasser ablaufenden Abflussprozesse voraus. Diese Kenntnisse ermöglichen zu entscheiden, ob eine Fläche hochwasserrelevant ist – also stark zum Hochwasser beiträgt – oder nicht. Der vorliegende “Bestimmungsschlüssel zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen” legt ein “Rezept” vor, wie solche Flächen zu ermitteln sind.

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen der Abflussprozesse bereitgestellt. Der Ablauf bei der Identifikation hochwasserrelevanter Flächen wird im Kapitel 3 aufgezeigt. Damit entschieden werden kann, ob eine Fläche im Hochwasserfall relevant ist oder nicht, müssen Kenntnisse über die dominanten Abflussprozesse durch Auswertung von vorhandenen Grundlagen und mittels Felduntersuchungen gesammelt und erarbeitet werden. Die Vorgehensweise sieht das Zusammentragen von Grundlagendaten, eine Vorerkundung mit ersten Geländeuntersuchungen und eine detaillierte Standortuntersuchung vor. Die Standortuntersuchungen befassen sich hauptsächlich mit den Böden und als Resultat wird ein dominanter Abflussprozesse ermittelt. Ein Vorschlag für die Übertragung dieser Standortuntersuchungen auf Hänge und schliesslich auf ganze Einzugsgebiete (Up-Scaling) wird diskutiert. Es werden Tips gegeben, worauf sich die Abgrenzung der Prozessflächen stützen sollte. Die identifizierten Abflussprozesse müssen am Ende einer Plausibilisierung unterzogen werden. Es werden Vorschläge unterbreitet, wie die Prozessbeurteilung geprüft und verifiziert werden kann.

Der Bestimmungsschlüssel wird im Kapitel 4 im Detail vorgestellt. Im Zentrum stehen die Prozessbeurteilungsschemata (PBS). Als Entscheidungsbaum aufgebaut, beinhalten sie die Prozesskriterien (key-points), welche die Abflussprozesse maßgebend beeinflussen. Die einzelnen Kriterien werden im Kapitel 4.3 detailliert aufgeführt und Vorschläge für deren Beurteilung gegeben. Die Beantwortung dieser Kriterien im PBS führt schliesslich zu dem an diesem Standort dominanten Abflussprozess. Damit lässt sich beurteilen, ob eine Fläche hochwasserrelevant ist oder nicht. Zusatzuntersuchungen (Kapitel 5) erlauben es, bestimmte Prozesse zu verifizieren. Im Kapitel 6 wird die Prozessbeurteilung auf verschiedenen räumlichen Skalen gezeigt (Prozessbeurteilung am Standort, an einer Hangsequenz und in einem ganzen Einzugsgebiet).

Der vorliegende Bestimmungsschlüssel versteht sich als Diskussionsgrundlage. Die praktische Anwendung wird zeigen, wo Ergänzungen nötig und Vereinfachungen in der Vorgehensweise möglich sind.

## 0 Summary

Intense field studies on runoff processes have been performed to improve the knowledge on flood formation. The measurements of overland, subsurface flow and soil water changes during sprinkler experiments yielded good information to identify the dominant runoff processes. Certain key-points could be recognised, which play a cardinal role in runoff formation. The combination of such key-points served to explain the runoff phenomena observed on the investigation sites. This knowledge provided the background to develop a general usable guide-line to define flood contributing areas and finally to estimate flood peak flows. The central part of this procedure consists of a process decision scheme to indicate the dominant runoff process on plot scale. With additional effort such information can be used to obtain a process map of entire catchments.

Chapter 1 gives insight into the goal and motivation for this guideline. A short introduction on runoff processes is given in chapter 2 and chapter 3 shows the procedure how to collect the necessary information on dominant runoff processes in a catchment. Details of the procedure are given in chapter 4. It's shown how the different key-points have to be evaluated. Then a set of additional hydrological experiments are shown, which can be used to improve the evaluation (chapt. 5). In chapter 6 examples of process identifications on different scale are given.

First applications of the guideline performed in micro- and meso-scale catchments in Rhineland-Palatinate (Germany) confirmed the suitability of this tool for practical use. This guideline for process identification can be considered as a proposal which may be discussed.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Nach einem großen Hochwasserereignis kommt oft die Diskussion auf, wie ist dieses Hochwasser entstanden und von welchen Flächen im Einzugsgebiet stammte besonders viel Abfluss. Diese Frage stellt sich in einer etwas anderen Form auch bei Hochwasserabschätzungen für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Die scheinbar einfachen Fragen, wie viel Wasser infiltriert, wie viel Wasser hält der Boden zurück und wie viel Wasser fließt sofort ab, sind dabei entscheidend.

Nach wie vor ist die Voraussage, wie viel Abfluss auf Einzugsgebietsflächen im Starkregenfall entsteht, schwierig. Der vorliegende „Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen“ soll mithilfe, Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft mit geeigneten Untersuchungen zu erkennen. Damit sollen ein Beitrag zur Versachlichung der Diskussion über Hochwasserentstehung geleistet und die Grundlagen für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen verbessert werden.

Umfangreiche Forschungsarbeiten im Themenbereich Abflussprozesse wurden in den letzten Jahren geleistet (PESCHKE ET AL., 2000; FAEH, 1997; SCHERRER, 1997; IHW, 2000; LEIBUNDGUT UND UHLENBROOK, 1997). Wenige Autoren haben bisher versucht (PESCHKE ET AL., 2000, LÖHMANNSRÖBEN, 2000; BOORMAN AT AL., 1995, IHW, 2000) von verfügbaren Informationen auf eine fundierte Aussage über die Abflussprozesse resp. die Abflussreaktion zu gelangen. Die Arbeiten von BOORMAN AT AL., 1995 (Hydrology of Soil Types) oder ERNSTBERGER, 2000 und CARSON, 2000 zeigen deutlich, wie schwierig es ist, von bodenkundlichen Informationen (Boden-genese resp. Bodenfruchtbarkeit) auf hydrologische resp. abflussrelevante Aussagen zu gelangen.

Der hier entwickelte Bestimmungsschlüssel baut auf den umfangreichen Untersuchungen des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft (IHW) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich auf. Darunter wurden eine Vielzahl von Einzugsgebieten nach ihrer Abflussreaktion kartiert (z.B. NAEF ET AL., 1999), so auch drei Einzugsgebiete in Rheinland-Pfalz (Idarbach bei Allenbach, Sulzbach/Sulzhof, Katzenbach bei St. Katharinen/Bad Kreuznach; IHW, 2000). Mit dem vorliegenden Bericht wird versucht, die verfügbaren Erkenntnisse über Abflussprozesse zusammenzufassen und Hilfsmittel für die Beurteilung von Flächen hinsichtlich Abflussprozesse und Abflussreaktion bereitzustellen.

Im zweiten Kapitel dieses Berichts werden in Anlehnung an IHW, 2000 die Grundlagen zu den Abflussprozessen dargelegt. Im dritten Kapitel werden die Arbeitsschritte bei der Anwendung des Bestimmungsschlüssels aufgeführt. Es wird gezeigt, welche Hinweise auf Abflussprozesse aus Grundlagen und einer ersten Feldbegehung gezogen werden können. Den Kern der Arbeit bildet das vierte Kapitel, in dem die Prozess-Beurteilungsschemata (PBS) für intensive und weniger intensive Niederschläge dargestellt und die einzelnen Kriterien (key-points) behandelt werden. Um eine objektive Beurteilung der Kriterien zu gewährleisten, werden dort methodische Hilfen aufgezeigt und diskutiert. Zusatzuntersuchungen zur Verifikation der Prozesse werden im Kapitel 5 aufgeführt und ihre Aussagekraft diskutiert. Beispiele der Prozessbeurteilung am Standort und ganzer Einzugsgebiete werden im sechsten Kapitel präsentiert.

## 1.2 Ziele und Aufbau des Bestimmungsschlüssels

Der Leitfaden dient der Ermittlung maßgebender Abflussprozesse (hochwasserrelevanter Flächen) in Einzugsgebieten. Damit lässt sich erkennen, welche Flächen in einem Einzugsgebiet stärker zum Abfluss beitragen und welche weniger. Diese Kenntnisse erlauben auch eine Beurteilung der Abflussbereitschaft von Einzugsgebieten als Grundlage für Hochwasserabschätzungen. Zudem lässt sich so die Wirkung von Landnutzungsänderungen auf Hochwasserschutzabflüsse (Verbesserung des Gebietsrückhalts, siehe NAEF ET AL., 2002) einschätzen.

Eine zentrale Rolle im Bestimmungsschlüssel spielen die Prozessbeurteilungsschemata (PBS). Diese erlauben, die je nach Bodenaufbau, unterschiedlichen Abflussprozessen zu ermitteln. Die auf die Nutzungsarten Wiese/Weide, Ackerland und Rebhänge ausgelegten PBS sind als Entscheidungsbäume aufgebaut, wobei die wichtigen Boden- oder Geländemerkmale (Prozesskriterien oder „key-points“) die Bausteine bilden. Bei der Anwendung der Schemata besteht die Aufgabe darin, zu entscheiden, welche Kriterien erfüllt sind. Grundlagen dazu sind Feldarbeiten mit dem Schwergewicht auf bodenkundlichen Feldaufnahmen. Mit zusätzlichen hydrologischen Felduntersuchungen (z.B. Infiltrometer- und Kleinberechnungsversuche mit und ohne Farb-Tracer) lässt sich die Beurteilung überprüfen.

Dieses Vorgehen erlaubt zu beurteilen, wie Abfluss entsteht und ob eine Fläche bei Starkniederschlägen sofort, leicht verzögert, stark verzögert oder sehr stark verzögert zum Abfluss beiträgt, d.h. in welchem Maß sie hochwasserrelevant ist. Zur Quantifizierung der tatsächlich bei Hochwasser auftretenden Abflüsse sind allerdings weitere Arbeiten notwendig. Die Umsetzung dieser räumlich differenzierten Information über die Abflussbildung in eine Abflussreaktion eines ganzen Gebiets kann mit Hilfe eines Niederschlag-Abflussmodells erfolgen. In IHW, 2000 und NAEF ET AL. (2002) wurden für drei Einzugsgebiete in Rheinland-Pfalz Abflussberechnungen auf der Basis der hochwasserrelevanten Flächen angestellt.

## 2 Grundlagen zu den Abflussprozessen

### 2.1 Einleitung

Abfluss kann auf verschiedene Arten entstehen. Im folgenden werden die wichtigsten Prozesse aufgeführt, die in natürlichen Einzugsgebieten zu Abfluss führen. Diese Prozesse sind in Abbildung 2/1 an einem Hang dargestellt. Dabei werden die englischen den deutschen Begriffen vorgezogen, da z.T. adäquate deutsche Übersetzungen fehlen. Die Grundlagen zu den Abflussprozessen wurde dem Bericht (IHW, 2000 resp. SCHERRER, 1997) entnommen und stellenweise ergänzt und auf die heutige Terminologie angepasst.

Der Infiltrationsprozess ist für die Art des Abflusses entscheidend. Kann nur wenig Wasser in den Boden infiltrieren, werden Oberflächenabflussprozesse in Gang gesetzt. Dringt Wasser in den Boden ein, kann es vorübergehend im Boden oder längerfristig im Grundwasser gespeichert werden oder aber relativ schnell als unterirdischer Abflussprozess zum Abfluss beitragen.

### 2.2 Oberflächenabflussprozesse (Overland Flow)

Hortonsche Abflussprozesse (HOF)<sup>1</sup>

Horton (1933) ging davon aus, dass Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität die momentane Infiltrationsrate des Bodens übersteigt (Infiltration Excess Overland Flow). Dies ist vor allem bei undurchlässigen oder schwach durchlässigen Böden der Fall. Hier werden in der Folge sofortiger (HOF1) und verzögerter (HOF2) Hortonischer Oberflächenabfluss unterschieden.

#### **Absolute Hortonian (HOF1) und Delayed Hortonian Overland Flow (HOF2)**

Wenn die Niederschlagsintensität hoch und der Boden wenig durchlässig ist, kann bereits kurz nach Niederschlagsbeginn kaum mehr Wasser in den Boden infiltrieren, und es bildet sich Oberflächenabfluss, der als Absolute Hortonian Overland Flow (HOF1) bezeichnet wird.

Wenn die Niederschlagsintensität geringer oder der Boden durchlässiger ist, so kann der Boden vorerst sämtliches Wasser aufnehmen. Aufgrund der zunehmenden Befeuchtung des Bodens nimmt die Infiltrationsrate jedoch ab, und es entsteht zeitlich verzögerter Oberflächenabfluss, der als Delayed Hortonian Overland Flow (HOF2) bezeichnet wird (Bergsma, 1983).

#### **Temporary Hortonian Overland Flow (THOF)**

Oberflächenabfluss, der aufgrund zeitweiliger Infiltrationshemmnisse im Oberboden entsteht, wird als Temporary Hortonian Overland Flow bezeichnet. Infiltrationshemmnisse können bei starker Austrocknung durch den Benetzungswiderstand der Bodenpartikel oder durch chemische Substanzen in hydrophoben Humusformen entstehen (Burch et al., 1989; Holzhey, 1969; Doerr et al., 2000).

#### **Abbildung 2/1: Abflussprozesse (nächste Seite)**

---

Fußnoten finden Sie im Anschluß an den Text auf Seite 84 ff

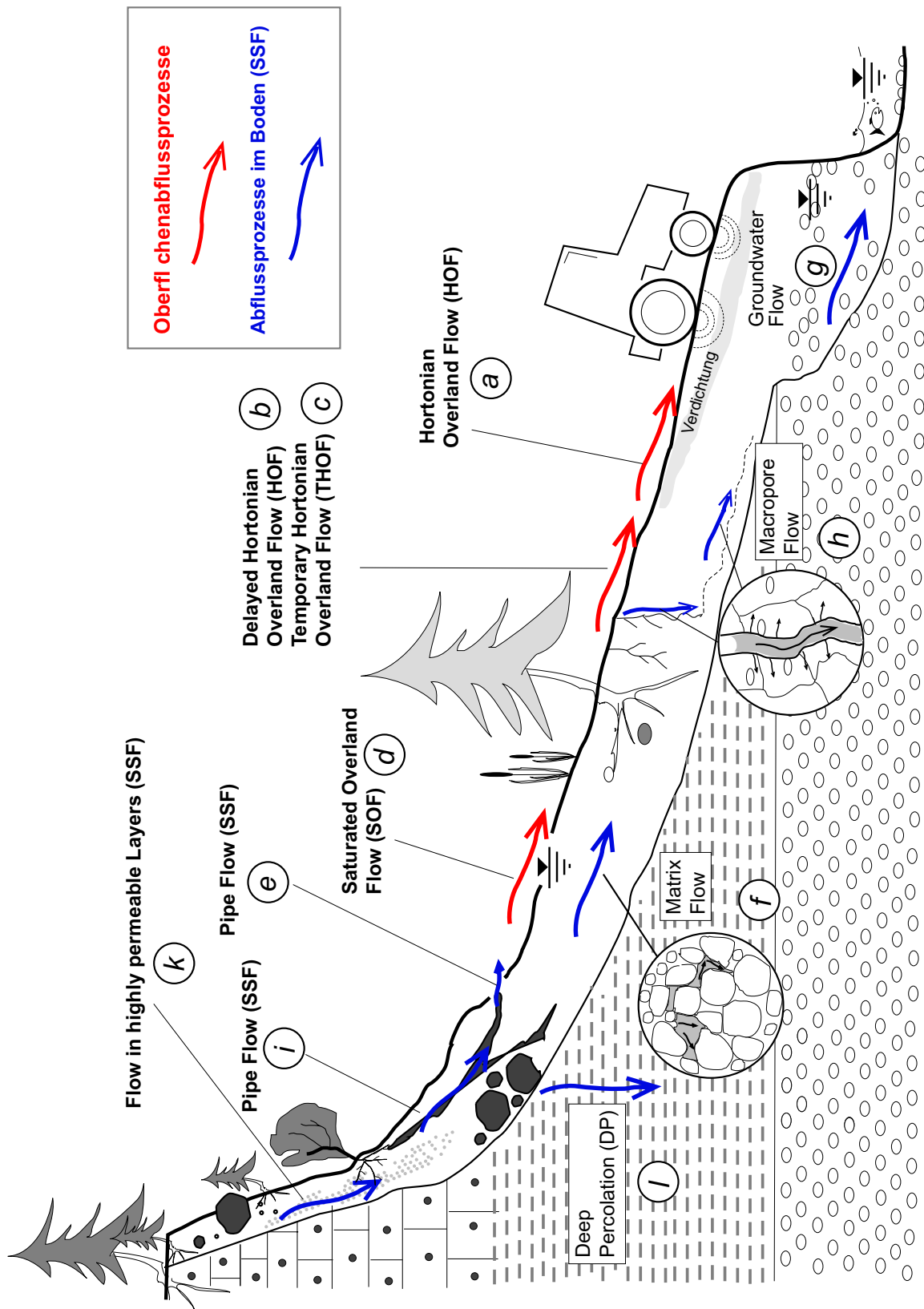


Abb. 2/1: Abflussprozesse an einem Hang (SCHERRER, 1997).

Saturated Overland Flow und Return Flow (SOF und RF)

### **Saturated Overland Flow (SOF), Gesättigter Oberflächenabfluss**

Diese Form des Abflusses entsteht, wenn nach Sättigung des Bodenprofils dessen Speicherkapazität erschöpft ist. Böden, die rasch gesättigt sind, lösen SOF1 aus, Böden mit größerem Sättigungsdefizit SOF2 oder SOF3. Jede weitere Wasserzugabe fließt unabhängig von der Niederschlagsintensität oberflächlich ab (Kirkby und Chorley, 1967).

### **Return Flow (RF)**

In den Boden infiltriertes Wasser, das nach einer kurzen Fließstrecke wieder an der Oberfläche erscheint, wird als Return Flow bezeichnet (Dunne und Black, 1970). Das Wasser kann konzentriert aus bevorzugten Fließwegen wie Pipes oder Makroporen austreten, oder diffus als Folge von Gefällewechselln im Hang oder als Folge des Ausstreichens von Verdichtungshorizonten.

## **2.3 Fließprozesse im Boden (Subsurface flow SSF)**

Durchdringt das Niederschlagswasser die Oberflächenschicht und dringt es in den Boden ein, so kann das Wasser in der Bodenmatrix gespeichert werden, oder es sickert bis zu einem allfällig vorhandenen Grundwasserkörper. Das Wasser bewegt sich entweder kapillar in den Poren der Bodenmatrix (Mikro- oder Feinporen ( $d < 0.2 \mu\text{m}$ ) und Meso- oder Mittelporen ( $d = 0.2 - 10 \mu\text{m}$ ) oder nichtkapillar in größeren Makroporen (Groporen). Böden bestehen aus verschiedenen Horizonten von unterschiedlicher Durchlässigkeit. So kann in einem gut durchlässigen Bodenhorizont, der über einer weniger durchlässigen oder gar undurchlässigen Schicht liegt, lateraler Abfluss entstehen.

Im Folgenden werden sechs verschiedene Formen des Wasserflusses im Boden unterschieden.

### **Matrix Flow, Matrixfluss**

Beim Matrix Flow bewegt sich das Wasser durch die Mikro- und Mesoporen der Bodenmatrix, beeinflusst durch die herrschenden Druckunterschiede und der Kapillarspannung. Die Geschwindigkeit der Wasserbewegung hängt von der lokalen Durchlässigkeit des Bodens ab, die von Körnung, Porosität und vom lokalen Potentialgradient bestimmt wird.

### **Macropore Flow, Fluss durch Makroporen**

Der Macropore Flow unterliegt nur der Schwerkraft und kann vertikal (Infiltration oder Tiefensickerung) oder lateral erfolgen. Makroporen entstehen durch Wurzelgänge, Aktivität von Bodentieren (Regenwürmer, Ameisen, Mäuse, Maulwürfe etc.), Schrumpfrisse und Klüfte infolge physikalischer Prozesse (Austrocknung, Verwitterung, Frost, etc.). Der Einfluss von Niederschlagsintensität, Vorfeuchte der Bodenmatrix und Wasseraustausch zwischen Makroporen und umliegender Bodenmatrix sind Gegenstand intensiver Forschungen. Sicher ist jedoch, dass die Makroporen, obwohl sie nur 0.2 bis 5% des Gesamtbodenvolumens ausmachen, aufgrund ihrer hohen hydraulischen Leitfähigkeit und der Ausbildung von Bypass Flow in kurzer Zeit bedeutende Wassermengen transportieren können. In den Makroporen ( $d = 0.01 - 10 \text{ mm}$ ) können Fließgeschwindigkeiten bis zu  $2 \text{ cm s}^{-1}$  auftreten (Mosley, 1982). Die Geschwindigkeiten hängen vom Aufbau der Böden, ihrer Feuchte und der Beschaffenheit der Makroporen (Durchmesser, Topologie sowie Interaktion mit der umgebenden Ma-

trix) ab. Der Fluss in den Makroporen kann im Gegensatz zum kapillaren Fließen in der Bodenmatrix bedeutend zur Abflussspitze in Vorflutern beitragen (Wilson et al., 1990; Mosley, 1979), da schnelle unterirdische Abflussprozesse induziert werden können. Makroporen können aber auch hochwasserermindernd wirken, wenn durch die Makroporen die Infiltration erhöht wird und das Wasser im Boden oder im geologischen Untergrunde gespeichert werden kann.

### **Pipe Flow, Fluss durch Bodenröhren**

Konzentrierter lateraler Abfluss im Boden kann in natürlich entstandenen Pipes (Röhren,  $d > 10$  mm) erfolgen. Die Entstehung solcher Hohlräume geht auf Feinmaterial-Auswaschungen, auf abgestorbene und verwesene Wurzeln sowie auf von Bodentieren (z.B. Mäusen) verursachte Hohlräume zurück. Eine klare Grenze zwischen Makroporen und Pipes gibt es nicht; oft werden Pipes auch zu den Makroporen gezählt. Wasserflüsse in Pipes entstehen, wie bei Makroporen, wenn der Niederschlagsinput größer als die Verluste an die Matrix ist. Ob Pipe Flow auftritt, hängt auch von Feuchte und Durchlässigkeit der umgebenden Matrix ab. Oft tritt das Wasser also aus Pipes an Unterhängen, Gefälleknicken und Stellen, wo ein Wechsel der Bodeneigenschaften auftritt, wieder an die Oberfläche. Diese Erscheinung wird Return Flow genannt.

### **Flow in Highly Permeable Layers, Fluss in hoch durchlässigen Schichten**

Über Fels oder schwach durchlässigen Substraten können durch flächigere Auswaschung von Feinmaterial hoch durchlässige Schichten entstehen. Mosley (1982) stellte solche Schichten in bewaldeten Hangböden fest. Im Zusammenwirken mit Hohlräumen verwesener Wurzeln vermögen diese gut durchlässigen Schichten das Wasser als Subsurface Flow schnell durch den Boden zu leiten.

### **Groundwater Flow, Grundwasserabfluss**

Auch das im Untergrund angesammelte, die Hohlräume der Lockersedimente und Gesteine füllende Grundwasser kann unter gewissen Umständen zum Hochwasserabfluss beitragen. Voraussetzung ist eine "ungehinderte" Verbindung zwischen Oberfläche, Grundwasser und Vorfluter. Zwei Konzepte wurden entwickelt, um diesen Abflussprozess zu verstehen: Groundwater Ridging und Piston Flow. Eine detaillierte Prozessbeschreibung und die Bedeutung der Mechanismen für die Hochwasserentstehung gibt Leibundgut und Uhlenbrook (1997).

### **Deep Percolation (DP), Tiefensickerung**

In den Boden infiltrierte Wasser kann, sofern die geologische Unterlage durchlässig ist, in diese weitersickern, entweder als Matrixflow oder auch als Flow along Preferential Pathways.

## **2.4 Intensität der Prozesse**

Tabelle 2/1 zeigt die verschiedenen Abflussprozesse im Überblick und ihre Einteilung in Abflusstypen. Analog zu den Oberflächenabflüssen wird auch der Fließprozess im Boden je nach Intensität und Einfluss auf die Hochwasserentstehung in verschiedene Klassen eingeteilt. Dies erfolgt aufgrund der Reaktionszeit und des Ansprechverhaltens des entstehenden Abflusses in sofortige, leicht verzögerte und stark verzögerte Abflussreaktion.

Die Intensitätsabstufung gilt nur innerhalb einer Prozessgruppe und ist zwischen den Gruppen nicht vergleichbar. Rascher Abfluss im Boden (z.B. als Folge von Pipe Flow, Bypass Flow oder Fluss in



hochdurchlässigen Schichten) wird als SSF1 eingestuft; leicht verzögerter Abfluss als SSF2 und stark verzögerter Abfluss als SSF3.

Je nach ihrer Stärke werden die Abflussprozesse in sog. Abflusstypen eingeteilt (Tab. 2/1). Die Stärke der Abflussbildung wird mittels Abflussreaktionskurven angegeben, die den Anteil des abfließenden Niederschlages in Abhängigkeit der Niederschlagssumme beschreiben (Anhang 3).

**Tab. 2/1: Aufteilung der Abflussprozesse in verschiedene Intensitätsklassen (IHW, 2000)**

Fließweg	Prozessgruppe	Abk.	Intensität des Abflussprozesses	Abflusstyp
	Hortonscher Oberflächenabfluss	HOF1	Sofortiger Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen	1
		HOF2	Leicht verzögerter Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen	1
Oberfläche	Gesättigter Oberflächenabfluss	SOF1	Sofortiger Oberflächenabfluss als Folge sich schnell sättigender Flächen	1
		SOF2	Verzögerter Oberflächenabfluss als Folge sich sättigender Flächen	2
		SOF3	Stark verzögerter Oberflächenabfluss als Folge sich langsam sättigender Flächen	4
Unterirdisch	Laterale Fließprozesse im Boden	SSF1	Rascher Abfluss im Boden	2
		SSF2	Verzögerter Abfluss im Boden	3
		SSF3	Stark verzögerter Abfluss im Boden	4
	Tiefensickerung	DP	Tiefensickerung in geologische Schichten	5

## 2.5 Gegenseitige Beeinflussung der Abflussprozesse

Gleiche Abflussprozesse benachbarter Standorte können zu einer größeren Fläche des gleichen Abflussprozesses zusammengefasst werden. Zu berücksichtigen sind jedoch gegenseitige Beeinflussungen. So können oben an einem Hang ablaufende Abflussprozesse die Vorgänge unten am Hang beeinflussen, vor allem, wenn im oberen Teil der Hänge stärker wirksame Abflussprozesse als im mittleren oder unteren Teil der Hänge stattfinden (SOF1, SSF1, HOF1). Damit ändert sich ein lokaler Abflussprozess durch die Beeinflussung von benachbarten Flächen.

## 3 Vorgehensweise bei der Beurteilung von Flächen nach Abflussprozessen

### 3.1 Einleitung

Abbildung 3/1 zeigt das Ablaufschema zur Ermittlung der maßgebenden Abflussprozesse.

Im ersten Schritt werden die **Grundlagendaten zusammengetragen** (Kap. 3/2 und IHW, 2000, Kap. 2.3). In der **Vorerkundung** erfolgt eine Gebietsbesichtigung und eine erste Auswertung von Grundlagendaten, die eine Abgrenzung hinsichtlich Boden, Geologie, Landnutzung und Relief ähnlich aufgebauter Gebiete ermöglicht. Je nach Güte der Grundlagendaten variiert der darauf folgende Arbeitsaufwand. Fehlt beispielsweise eine Bodenkarte in einem angemessenen Maßstab, muss zuerst ein bodenkundlicher Überblick erstellt werden. Da eine räumlich differenzierte Prozessbeurteilung das Ziel ist, sind Bodenkarten im Maßstab 1 : 25.000 oder in einem größeren Maßstab notwendig (Bodenkarten der Landesämter). Die Erfassung von Erscheinungen im Gelände (Geländebegehung), die unmittelbar oder im weiteren Sinne Hinweise auf Abflussprozesse liefern (Gerinne, Vernässungsareale, Quellen, Prozessspuren wie Erosions- und Ablagerungsspuren u.a.), ist auch im Arbeitsschritt der Vorerkundung sinnvoll (Kap. 3.2.2). Je nach Informationsdichte können provisorische Prozessareale abgegrenzt werden. Anhand der Resultate der Vorerkundung wird entschieden, wo detaillierte Standortuntersuchungen stattfinden sollen (Kap. 3.3.1.1).

Die **Untersuchungen im Feld** bestehen aus einer Standortkartierung sowie der Aufnahme von Bodenprofilen (Abb. 6/1). Dies ermöglicht eine erste Einschätzung des maßgebenden Abflussprozesses mit dem Prozessbeurteilungsschema (PBS). Sind die im PBS enthaltenen Kriterien eindeutig zu beurteilen, ist die Prozessevaluation am Standort abgeschlossen. Treten hingegen bei der Beurteilung Unsicherheiten auf, lohnt es sich zusätzliche Untersuchungen (Infiltrationsmessungen, Trauertests u.a.) vorzunehmen. Nach **Auswertung der Felduntersuchungen** wird dann eine definitive Prozessbeurteilung vorgenommen. Die Standortuntersuchungen werden dann auf die Fläche übertragen. Abschließend sollte die so erarbeitete Prozesskarte resp. Karten der abflussrelevanten Flächen einer **Plausibilisierung** unterzogen werden.

### 3.2 Vorerkundung

#### 3.2.1 Zusammentragen von Grundlagendaten und Hilfsmittel

Die Grundlagendaten und Hilfsmittel zur Prozessbeurteilung werden hier kurz aufgeführt. In IHW, 2000 (Kap. 2.3) wurde die Aussagekraft dieser Hilfsmittel ausführlich diskutiert.

- Bodenprofile,
- Bodenkarten,
- Bodenschätzung,
- Topographische und geomorphologische Karten,
- Pflanzensoziologische Karten,

- Geologische, hydrogeologische (Versickerungs- oder Grundwasserkarten), geotechnische und geoökologische Karten, Sondierprofile, Versickerungstests,
- Digitale Karten (ATKIS),
- Forstliche Standortkartierung,
- Luftbilder und Fernerkundungsdaten,
- Drainagepläne.

Je besser der Aufbau des Gebiets dem Bearbeiter oder der Bearbeiterin vertraut ist, desto rascher und fundierter werden die folgenden Beurteilungen ablaufen. Informationen über Vegetation und Landnutzung, Bodengeographie, wichtigste Bodenkennwerte, Geomorphologie und Geologie werden aus Grundlagendaten oder durch eigene Erhebungen zusammengetragen. Wichtig sind Informationen, die im Zusammenhang mit dem Abflussprozess resp. der Hochwasserentstehung stehen.

Die Tabelle 3/1 gibt eine Zusammenstellung von wichtigen Informationen aus verschiedenen Bereichen wieder.

**Tab. 3/1: Informationen für die Vorerkundung aus Grundlagendaten, welche für die Beurteilung von Flächen nach der Abflussprozessen wichtig sein können.**

Bereich	Informationen
Landnutzung	Räumliche Verteilung der wichtigsten Nutzungsarten (nach ATKIS), Angaben über Nutzungsintensität;
Vegetation	Räumliche Verbreitung von Pflanzengesellschaften mit Zeigereigenschaften (Feuchte- oder Nässezeiger);
Boden	Räumliche Verbreitung der Bodentypen, wichtige Bodenkennwerte wie Körnung, Gründigkeit, Feuchtegrad (z.B. aus Bodenschätzung extrahieren (Sauer und Harrach, 1999), Durchlässigkeit u.a.);
Geologie	Räumliche Verbreitung der geologischen Schichten, Eigenschaften wie Durchlässigkeit, Stellung im Schichtverband;
Relief	Ausgestaltung des Reliefs (extreme Steilhänge, sanfte Hänge, Flachbereiche), Spuren, welche auf hydrologische Prozesse hindeuten (Rutschungen, Gleitbewegungen an Hängen, Rinnen, Ablagerungen etc.);
Hydrogeologie, Hydrographie, Prozessspuren	Vorkommen von Grund- oder Hangwasser, Quellen, Nass- oder Feuchtareale, Gerinnedichte, ephemere, intermittierende Gewässer, Hinweise auf Fließwege, die bei Hochwasser aktiv sind, Spuren von fließendem Wasser (Auswaschungen, Erosionsspuren, Ablagerungen von Geröll oder Feinmaterial etc.), Entwässerungen (Dränagen) etc.

Mit diesen Informationen lassen sich im Gebiet unterschiedlich aufgebaute Flächen erkennen und erste Rückschlüsse auf die Abflussprozesse ziehen. Eventuell ist bereits die erste Abgrenzung von Prozessarealen möglich. Dies ist wichtig für die Festlegung der Untersuchungsstandorte.

**Abbildung 3/1: Vorgehensweise (nächste Seite)**

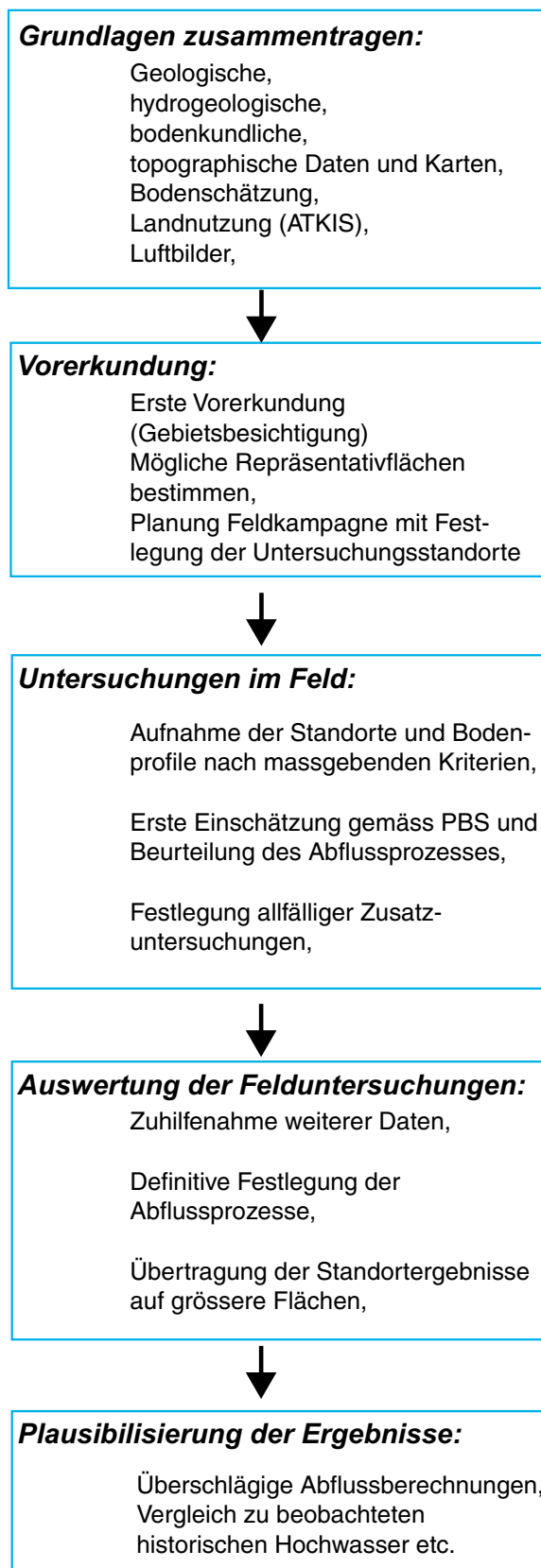


Abb. 3/1: Vorschlag für die Vorgehensweise bei der Anwendung des Bestimmungsschlüssels.

### 3.2.2 Geländebegehung und Auswertung von Grundlagen als Bestandteil der Vorerkundung

Im Rahmen der Vorerkundung sollte auch eine Geländebegehung durchgeführt werden, um mit verhältnismäßig geringem Aufwand wichtige hochwasserrelevante Phänomene oder Hinweise zu ermitteln. Sauer & Harrach, 2002 haben ein für diesen Bestimmungsschlüssel spezifisches Konzept einer standort-bodenkundlichen Geländebegehung vorgelegt. Teile dieses Konzepts sind im folgenden berücksichtigt. Der ideale Zeitpunkt für die Geländebegehung liegt eher im Frühling. Nach einem Winter mit Schneeschmelze und ausgiebigen Niederschlägen lassen sich Prozessspuren besonders gut beobachten (Anhang 4, Foto 21).

#### a) **Verschlämmung**

##### *Definition und hydrologische Relevanz*

Unter Verschlämmung versteht man das Zerfließen des Bodens aufgrund des Niederschlags, wodurch einerseits Strukturelemente (Aggregate und Makroporen) bei hohem Wassergehalt und bei geringer Gefügestabilität zerstört werden. Andererseits bewirkt die Wucht der Tropfen eines Gewitterniederschlags, dass ungeschützte Bodenaggregate zerschlagen werden (vgl. auch Anhang 1, Anhang 4 Foto 1-4). Der Benetzungsvorgang kann auch zur Luftsprennung von Aggregaten führen, wenn aufgrund des hohen Schluffgehalts der Zusammenhalt gering ist. Tonarme schluffreiche Böden, z.B. lessivierte Lössböden verschlammern leicht. Verschlämmungen können die Infiltration vermindern und führen zwangsläufig zu Oberflächenabfluss (HOF) und Bodenerosion.<sup>2</sup>

##### *Kartierung*

Die Beurteilung des Verschlammungsgrades ist im Abschnitt 4.3.3 abgehandelt.

#### b) **Erosion**

##### *Definition und hydrologische Relevanz aktueller und historischer Erosionsformen*

Bodenerosion durch Wasser ist die durch den Menschen ermöglichte und durch natürliche Prozesse ausgelöste Verlagerung von Boden durch Wasser (DVWK, 1996). Hydrologisch interpretierbare aktuelle Erosions- (Anhang 4, Foto 4) sowie Ablagerungsformen (Anhang 4 Foto 2) sind auf Acker- oder Weinbergflächen gut zu erkennen. Flächenhafte Abtragsformen können an Verspülungen (Abtragstiefe < 2 cm) erkannt werden. Lineare Abtragsformen zeigen sich als Rillen mit Tiefen von 2 bis 10 cm, als Rinnen mit Tiefen von 10 bis 40 cm und eigentlichen Gräben mit mehr als 40 cm Tiefe.

**Aktuelle Erosionsformen** sind Folge von Verschlämmung und Beweis für massiven Oberflächenabfluss (HOF oder SOF) oder Return Flow (RF). Rezente Erosionsformen bilden auf Ackerflächen oft die einzigen erfassbaren Hinweise auf Abflussprozesse. Allerdings ist es wichtig, die Ursachen von Oberflächenabfluss zu eruieren (z.B. Fahrspuren, Entwässerungswasser von Fahrwegen, etc.), um keine falschen Schlüsse zu ziehen.

##### *Kartierung*

Die kartierten Erosionserscheinungen (flächenhafte und lineare Abtragsformen sowie eindeutige Akkumulationszonen) sollten parzellenscharf in möglichst großmaßstäbliche Karten übertragen werden.

**Historische Erosionsformen** sind Hohlwege, Schluchten, Gerinne, Dellen oder Stufenraine und weisen auf früheren Oberflächenabfluss hin (vgl. Anhang 4, Foto 5). Historische Erosionsformen sind im Luftbild oder auf Karten gut zu erkennen. Besonders in Lößlandschaften lässt sich der Erosionsgrad der Böden auch schon im Rahmen einer Geländebegehung grob einstufen.

### c) Nassstellen

#### *Definition und hydrologische Relevanz*

Vernässte Böden zeichnen sich durch anhaltenden oder zeitweiligen Luftmangel im Wurzelraum aus. Bei starken, länger anhaltenden Vernässungen bilden sich im Boden Hydromorphie Merkmale. Der Luftmangel führt zu Wachstums- und Entwicklungsstörungen der Kulturpflanzen.

Großflächige, langanhaltend vernässte Böden werden nicht als Acker, sondern als Grünland genutzt, es sei denn, sie wurden durch geeignete Entwässerungsmaßnahmen melioriert. Das Ausstreichen undurchlässiger Schichten sowie abrupte Änderungen der Hangneigung können zu einem ganzjährigen oder temporären Wasseraustritt führen (Return Flow, RF). Bei Bächen mit natürlichen Ufern oder Flanken lassen sich z.T. Wasseraustrittsstellen beobachten, die auf SSF (od. RF) zurückzuführen sind. Nassstellen in Plateaulagen sind meist auf Staunässe zurückzuführen.

#### *Kartierung*

Folgende Hinweise können im Zusammenhang mit Vernässungen erfasst werden: Oberflächenwasser, Bodenfarbe (nur Acker), Konsistenz des Bodens (nur Acker), Befahrbarkeit, Begehbarkeit, Entwicklungsstörungen bei Kulturpflanzen (nur Acker), Pflanzengesellschaft, Zeigerpflanzen (z.B. Feuchtezeiger nach Ellenberg). Ein Beurteilungsschlüssel ist im Anhang 2 (Tab. 1) angegeben.

### d) Relief

#### *Definition und hydrologische Relevanz*

Aus dem Relief lassen sich z.T. direkt Hinweise über Abflussprozesse ersehen, oder indirekt sind aus dem Relief Gegebenheiten abzuleiten, die Voraussetzung für bestimmte Prozesse sind.

Zum einen lassen sich bevorzugte Fließwege von Oberflächenabfluss ermitteln (Mulden, Rinnen, Gerinnedichte etc.). Zum andern kann mit der Auswertung von topographischen Karten, aufgrund der Steilheit der Hänge und Kenntnissen über das Ausgangsgestein Hinweise über die mögliche Bodenmächtigkeit gewonnen werden (Voraussetzung für SSF). Es ist auch möglich aus den mit Höhenlinien dargestellten Geländeformationen in Kombination mit dem Gerinnenetz, Kenntnisse über rezent oder in der Vorzeit abgelaufene Abflussprozesse zu gewinnen.

#### *Kartierung*

Die Interpretation der Höhenlinien möglichst großmaßstäblicher Karten (z.B. TK 10 V) ermöglicht eine erste Übersicht über das Untersuchungsgebiet und eine Vorauswahl potenzieller, hydrologisch bedeutsamer Reliefpositionen. Die Interpretation von Neigungsstufenkarten (DHM) bzw. reliefanalytisch erarbeiteter geomorphografischer Karten (s.a. Leser & Klink 1988) kann u.U. dabei hilfreich sein. Die Tabelle 3/2 stellt eine Auswahl wichtiger Hinweise dar.

**Tab. 3/2: In großmaßstäblichen Karten vermerkte Reliefinformationen und daraus interpretierbare Hinweise auf Abflussprozesse.**

Phänomene	Hinweise
Mulden, Rinnen, Tälchen	Sie bilden bevorzugte Fließwege für oberflächlich abfließendes Wasser und weisen je nach Größe ihres Einzugsgebiets u.U. ein geringes Sättigungsdefizit (feuchte bis nasse Böden) auf. Aufgrund des Feuchtegehalts sind die Böden schlechter strukturiert (weniger Bodenlebewesen und daher weniger Makroporen) (SOF, HOF)
Allg. Reliefformen	Zerfurchtes Relief: Hinweis auf meist rasch reagierende Prozesse wie HOF, SOF1,2 und SSF1,2 (rezent oder historisch). Gleichmäßiges Relief, leicht kupiert, Muldentälchen: Hinweise auf eher „langsame“ Prozesse. Auf Ackerflächen werden allerdings durch die Bearbeitung Prozessspuren regelmäßig beseitigt. Wird eine Hangsequenz als Ganzes betrachtet, hinterlassen stark reagierende Flächen in unterhalb davon liegenden Flächen ihre Spuren.
Ablagerungen gravitativer Prozesse	Viele Fels-, Steinblöcke und fächerartige Ablagerungen gehen auf Bergsturz- oder Hangschuttbewegungen zurück, die mächtige Lockermaterialablagerungen bilden können. Je nach Korngrößenzusammensetzung dieser Ablagerungen weisen sie hohe Durchlässigkeit und Speichervermögen auf (DP) auf.
Fluviale Ablagerungsformen	Am Ausgang von Tälern und Kerben lagert(e) sich je nach Gefällsverhältnissen erodiertes Bodenmaterial oder sonstiges Schwemmgut ab. Je nach Korngrößenzusammensetzung, können solche Ablagerungen hohe bis sehr hohe Durchlässigkeiten und großes Speichervermögen aufweisen (DP, SOF3).
Hohe Gerinnedichte	Sie verweist auf oberhalb liegende Flächen mit starker Abflussreaktion (z.B. HOF, SOF, SSF1, 2).
Quellen	Sie deuten auf Speicher im Boden oder im tieferen Untergrund hin. Je nach Schüttcharakteristik können dadurch Rückschlüsse auf die Größe der Speicher gezogen werden. Ausdauernde Quellen sind ein guter Hinweis auf große Speicher (SOF3, SSF3, DP).
Episodisch oder periodische Austrittsstellen, Return Flow	Zeigen an, dass oberhalb der Austritte Wasser infiltriert und im Boden oder der Geologie abfließt (SSF1-3)
Rinnen ohne oberflächliche Fließspuren	Sie können u.U. auch auf laterale Fließwege verweisen. Solche Rinnen können in der Vorzeit entstanden sein aber auch durch das langsame Zusammensacken von durch SSF geschaffenen Hohlräumen.
Markante Geländekanten	Sie deuten einen lithologischen Wechsel der Geologie an und sind ein Indiz für flachgründige Böden (SSF1, 2 oder SOF1, 2).
Verlauf von Höhenlinien	Höhenlinien mit rundlichem Verlauf weisen auf mittleren bis großen Abstand des Fels zur Oberfläche hin. Kantige Höhenlinien zeigen, dass der Fels oberflächennah oder gar anstehend ist.

### e) Gebietsentwässerung

#### *Fließgewässer*

Fließgewässer und ihre Wasserführung lassen Rückschlüsse auf den Landschaftswasserhaushalt zu. Eine Begehung wasserführender Tiefenlinien oder auch temporärer Trockentälern (z.B. in Karstgebieten) ermöglicht die Identifikation weiterer hochwasserrelevanter Fließwege. Aufgrund der Gerinnemorphologie (Querschnitt, Fließspuren, Korngrößenzusammensetzung des Gerölls, Fließ-

spuren u.a.) können Kenntnisse über Häufigkeit und Größe des Abflusses ermittelt werden. Dies kann u.U. ein Hinweis auf die Art der Prozesse in einem Gebiet sein.

Oft ist man in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten mit der Problematik konfrontiert, dass ehemals natürliche Fließgewässer begradigt oder gar beseitigt und durch Eindolungen ersetzt wurden.

#### *Hydromeliorative Maßnahmen*

Dräne und Entwässerungsgräben dienen der Abfuhr von überschüssigem Bodenwasser im Interesse der landwirtschaftlichen Bodennutzung. Beim Fehlen von Dränplänen ist das Aufspüren der Dränauslässe durch Begehung der Vorfluter oder durch Befragung ortskundiger Landwirte hilfreich. Entwässerte Böden weisen oftmals nur noch reliktsche Hydromorphie Merkmale auf, die bei einer ausschließlich bodenkundlichen Kartierung zu Fehlinterpretationen führen können.

### **f) Bioindikatoren**

Die Beurteilung von Geologie, Relief und Boden lässt Rückschlüsse auf hochwasserrelevante Phänomene zu. In Kombination mit vegetationskundlichen Untersuchungen können weitergehende Kenntnisse über hochwasserrelevante Phänomene gewonnen werden.

#### *Zeigerpflanzen auf Grünland*

Die Ansprache von leicht erkennbaren Nässezeigern ermöglicht auch bei geringer Artenkenntnis die Identifikation von Nassstellen auf Grünlandstandorten resp. von grund- oder stauwasserbeeinflussten Böden.

Alle Pflanzen mit einer Feuchte-Zahl von  $\geq 6$  (Ellenberg, 1979) weisen auf einen Überschuss an Bodenwasser hin. Frische- bis Feuchtezeiger haben eine F-Zahl von 6, Feuchtezeiger eine F-Zahl von 7 und Nässezeiger eine F-Zahl von 9. Sie sind typisch für Pseudogleye und hydromorphe Böden. Tabelle 2 im Anhang 2 gibt einen Überblick über häufige Feuchte und Nässezeiger auf Grünland und korrespondierende F-Zahlen.

Auch für Ackerstandorte gibt es Zeigerpflanzen in der Artenzusammensetzung der Ackerbegleitflora (vgl. Anhang 2). Auch der Zustand von Kulturpflanzen gibt Hinweise auf z.B. periodisch auftretende Feuchtstellen in Äckern.

## **3.3 Detaillierte Geländeuntersuchungen**

### 3.3.1 Planung und Durchführung von spezifischen Felduntersuchungen

#### **3.3.1.1 Planung**

Neben der Zugänglichkeit sind weitere Kriterien für die Festlegung der Untersuchungsstandorte wichtig. Flächenmäßig dominante Gebiete sollen erfasst werden. In Einzugsgebieten, die sich durch verzögerte Abflussreaktion auszeichnen, ist es wichtig, die flächenmäßig begrenzten, stark reagierenden Gebiete zu erkennen. Mit der geeigneten Wahl der Untersuchungsstandorte soll auch die Voraussetzung für die **Übertragung** (Up-Scaling) von Standortuntersuchungen auf größere Flächen gewährleistet werden (vgl. Kap. 3.4). Dafür gibt es kein standardisiertes Vorgehen. Folgendes Vorgehen hat sich bislang aber bewährt:



1. Die wesentlichen Gebietseigenschaften (Geologie, Böden, Landnutzung, Geomorphologie, Gerinnenetz, Dränagen, Vernässungen) sind aus der **Vorerkundung** und Geländebegehung bekannt.
2. Im Einzugsgebiet liegen Hangsequenzen, die aufgrund des Reliefs, der vorhandenen Böden mit der Landnutzung vergleichbar und typisch fürs Gebiet sind (**Vorerkundung**). Unterschiedlich aufgebaute, aber fürs Gebiet typische Hangsequenzen werden ausgewählt.
3. In diesen Hangsequenzen (Kap. 6.3.2) werden die Untersuchungsstandorte festgelegt, so dass die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Hangelemente erfasst und die dominanten Abflussprozesse beurteilt werden können. Überlegungen werden angestellt, inwieweit Abflussprozesse, die oben am Hang stattfinden, die Abflussprozesse weiter unten beeinflussen können<sup>3</sup> (**Untersuchungen im Feld und Auswertung der Resultate**).
4. Mit der Übertragung auf die Fläche (**Up-Scaling**) werden die punktuellen resp. linear im Einzugsgebiet erarbeiteten Prozessinformationen zu einer Karte „synthetisiert“. (Kap. 3.4)

### 3.3.1.2 Durchführung der Felduntersuchungen

Die Felduntersuchungen konzentrieren sich auf den Bodenaufbau und die im Kapitel 4.3 aufgeführten Kriterien (key-points), die an Bodengruben erfasst werden<sup>4</sup>. Die einzelnen Kriterien sind auf dem Feldblatt (Abb. 6.1) ausgewiesen. Es empfiehlt sich, die Bodenuntersuchungen bei trockenen Witterungs- und Bodenverhältnissen durchzuführen, da mit Grabarbeiten im feuchten oder nassen Zustand wichtige Bodenstrukturen wie Makroporen teilweise zerstört werden.

Zusätzliche Felduntersuchungen sind ratsam, wenn die Prozessevaluation bei verschiedenen Kriterien wesentliche Unsicherheiten zeigt. So können beispielsweise Infiltrationsversuche aufzeigen, ob der vorhandene Boden tatsächlich so (un-) durchlässig ist, wie die Beurteilung der Kriterien ergeben hat. Für die Erhebung der Makroporen (Kap. 4.3.6) wird der Boden horizontal freigelegt. Sind Makroporen im Bodenprofil resp. an Horizontalschnitten schlecht sichtbar, kann dem Infiltrationswasser Farbstoff (Tracer) zugefügt werden, um die Fließstrukturen aber auch die Ausbreitungsmuster des Wassers im Boden (Interaktion Makroporen – Bodenmatrix) besser zu erkennen. Nach Auswertung der Felduntersuchungen können alle, in den PBS, aufgeführten Kriterien beurteilt und die Abflussprozesse evaluiert werden.

## 3.4 Übertragung auf Fläche (Punkt–Hang–Einzugsgebiet)

Die Übertragung von Punktinformationen auf die Fläche wird oft mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) getätigt. In der Hydrologie ist bis heute dieser Art des „Up-Scalings“ noch kein großer Erfolg beschieden<sup>5</sup>. Bis heute liegen keine brauchbaren Ansätze in der Literatur vor, wie solche Übertragungen erfolgen könnten. Im Kapitel 3.3.1.1. wurde das dazu notwendig Vorgehen bereits angesprochen. Unser Vorschlag des Up-Scaling gliedert sich in vier Schritte.

1. Nachdem in der Falllinie liegende Standorte einzeln nach Abflussprozessen beurteilt worden sind, muss eingeschätzt werden, inwieweit am Hang weiter unten liegende Prozessareale durch oberhalb liegende Standorte beeinflusst werden können.
2. Ausgehend von solchen Catenen<sup>6</sup> kann dann aufgrund von Analogieschlüssen auf die Abflussprozesse vergleichbarer Catenen geschlossen werden. Das Verständnis der Abflussprozesse an verschiedenen Catenen im Einzugsgebiet ermöglicht dann die Beurteilung der übrigen Flächen. Eine

wesentliche Voraussetzung für das Up-Scaling ist jedoch, dass die Prozessevaluation am Standort fundiert und zutreffend ist<sup>7</sup>.

3. Um von den Catenen auf die Fläche zu gelangen, ist zu überlegen, inwieweit die Standorte ausserhalb der Catenen ähnliche Eigenschaften haben. Wenn tatsächlich typische Catenen zur Untersuchung ausgewählt wurden, sollte dies der Fall sein. Wichtige Kriterien zur Übertragung der Information sind ähnliche Reliefeigenschaften wie Geländeneigung, Lage im Relief, Bodeneigenschaften, Geologie und Nutzung. So lassen sich viele Punkte im Gebiet beurteilen.
4. Die untersuchten Catenen und die übertragenen Punkte liefern ein Netz an Prozessinformationen, das sich schliesslich zu einer Karte verdichten lässt

### 3.5 Plausibilisierung des Ergebnisses

Das Endprodukt ist eine Prozesskarte (Kap. 6.3.3), die zeigt, wo im Gebiet welcher Prozess zu erwarten ist. Die Plausibilität dieser Prozessbeurteilung resp. Prozesskarte muss untersucht werden. Wie weit dieser Arbeitsschritt geht, richtet sich nach dem Verwendungszweck des Resultats. Folgende Fragen können zur Plausibilisierung der Resultate beitragen:

- Deckt sich die Einschätzung des Gebiets mit den Beobachtungen, welche bei vergangenen Starkregen oder Hochwassern gemacht wurden?
- Wurden rasche Abflüsse oder Spuren davon (z.B. viel Oberflächenabfluss, Return Flow, Erosionsspuren etc.) auf den betreffenden Flächen tatsächlich beobachtet?
- Wenn die beurteilten Flächen einen Großteil an rasch beitragenden Flächen aufweisen, stellt sich die Frage, ob im Vorfluter auch tatsächlich die entsprechenden Abflüsse aufgetreten sind.
- Bestätigt sich die Beurteilung anhand von Abflussmessungen oder Beobachtungen bei historischen Hochwassern?
- Ausgehend von der Prozessbeurteilung können für das Einzugsgebiet des Gewässers Abflusschätzungen oder detaillierte Abflussberechnungen mit einem Niederschlag-Abflussmodell vorgenommen werden. Zeigen diese Abschätzungen ein ähnliches Bild wie vergangene Hochwasser?

## 4 Bestimmungsschlüssel zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen

### 4.1 Einleitung

Der Kern des Bestimmungsschlüssels zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen sind die Prozessbeurteilungs-Schemata. Um die darin enthaltenen Kriterien („key-points“) beurteilen zu können, wurde die Literatur nach Beurteilungshilfen (Methoden, Richtlinien) untersucht. Eine weitgehend objektive Beurteilung der Kriterien wird dadurch angestrebt. Bei der Auswahl der Kriterien und Richtlinien wurden folgenden Punkten Beachtung geschenkt.

- Die meisten Kriterien sind qualitativer Natur.
- Die Beurteilung der key-points können weitgehend im Felde an einer Bodengrube erfolgen. Auf aufwändige Laboruntersuchungen (Probenentnahme und Analysen) wird verzichtet.
- Nach Möglichkeit stützt sich die Beurteilung auf die Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN, 1994), auf DIN-Normen oder auf Werte und Angaben aus der Literatur.

### 4.2 Prozessbeurteilungs-Schemata (PBS)

#### 4.2.1 Einleitung

Die Zuordnung des Abflussprozesses eines Standorts lässt sich mit den nutzungsorientierten Prozessbeurteilungsschemata (PBS) vornehmen. Diese zeigen die Schlüsselstellen, die einen Abflussprozess auslösen resp. beeinflussen.

Abflüsse werden durch Gewitter, Landregen, oder Landregen in Kombination mit Schneeschmelze oder gefrorenen Böden ausgelöst. Damit ergibt sich eine Vielfalt von klimatisch-, bodenkundlich-, topographisch- und nutzungsbedingten Kombinationen. Im folgenden wird sowohl die Abflussbildung bei **intensiven Starkregen** ( $I > \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$ ) als auch die Abflussbildung durch ergiebige, aber **weniger intensive Landregen** ( $I < \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$ ) betrachtet.

Die PBS basieren auf den in Kap. 4.3 aufgeführten Kriterien. Das Hauptgewicht liegt auf der Landnutzung, der Vegetation und dem Boden. Relief (Hangneigung) und Geologie sind ebenfalls berücksichtigt.

Einige Kriterien beziehen sich auf (Boden-) Eigenschaften, die ereignisabhängig sind oder jahreszeitlichem Wandel unterliegen (Wasserspiegel, Deckungsgrad u.a.). Bei deren Beurteilung ist abzuwägen, wie wahrscheinlich solche Zustände sind.

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewähren, wurden für Grund- oder Stauwasser beeinflusste Standorte in gewissen Fällen eigene Schemata entwickelt. Sie weisen einen blauen Hintergrund auf. Da ackerbaulich genutzte Flächen auch auf hydromorphen Böden anzutreffen sind, wurde dieser Fall ebenfalls berücksichtigt. Weinberge hingegen beschränken sich auf unvernässte Böden. Die verfügbaren PBS sind in Abb. 4/1 – 4/9 dargestellt.

Die Grundlagen, der vorliegenden PBS sind im Anhang 1 ausführlich dargestellt. Die nötigen Überlegungen und fälligen Entscheidungen, die zu den dominanten Abflussprozessen führen, sind anhand des PBS für Wiesen und Weiden exemplarisch aufgeführt. Die Unterschiede zwischen den PBS

geringer und hoher Niederschlagsintensität ergeben sich hauptsächlich durch den unterschiedlichen Einfluss der Makroporosität (vgl. auch Kap. 4.3.6).

#### 4.2.2 PBS für Wiesen und Weiden

Die Prozessbeurteilung für Wiese- und Weidestandorte erfolgt aufgrund vergleichbarer struktureller Bodeneigenschaften (Regenwurmbesatz, Durchwurzelung, Verdichtungserscheinungen) mit demselben Schema. Zuerst wird der Entscheidungsprozess für weniger intensive Niederschläge ( $I < \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$ ) und dann für intensive Niederschläge ( $I > \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$ ) vorgestellt.

##### 4.2.2.1 PBS für „normale“ Böden und geringe Niederschlagsintensität ( $I < \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$ )

Die Ausführungen beziehen sich auf Abb. 4/1. Der **Deckungsgrad** des Boden bestimmt, ob eine potentiell **verschlämbbare Oberfläche** auch tatsächlich im Starkregenfall verschlämmbaar ist. Falls dies zutrifft, entsteht HOF1.

Liegt ein **Hydrophober Humus** vor, ist der **Hydrophobizitätsgrad** zu prüfen. Niederschlagswasser kann in einen stark hydrophoben Humus oder eine verdichtete oder wenig durchlässige Bodenmatrix nur über ein **gut ausgebildetes Makroporensystem** eindringen, andernfalls entsteht HOF1. Die **Gesamtmächtigkeit** des Bodens ist für die Speicherung des Niederschlagswassers von großer Bedeutung. Liegt ein **flachgründiger Boden** ( $< 0.5 \text{ m}$ ) über einer **durchlässigen Geologie** (durchlässiger Schotter, Schutt, Karst) und ist der Unterboden durch ein **wirksames Makroporensystem** und eine **gut durchlässige Matrix** ausgestattet, entsteht DP.

Fehlt ein gut entwickeltes Makroporensystem, ist die Matrix schwach durchlässig und ist der Unterboden bei Landregen für Speicherung von Wasser begrenzt nutzbar, entsteht HOF2. Ist das Gelände geneigt ( $J > \text{ca. } 10\%$ ), der Boden flachgründig und über undurchlässiger Geologie gelegen, die Matrix im Unterboden gut durchlässig und **leistungsfähige laterale Fließwege** vorhanden, wird leicht verzögerter Abfluss im Boden (SSF2) ausgelöst. Sind die Eigenschaften identisch, die Matrixdurchlässigkeit hingegen gering, ergibt sich nur ein geringer Austausch zwischen Makroporen und Matrix, und es entsteht rascher Abfluss im Boden (SSF1). Ist der Boden zwischen  $0.5 \text{ m}$  und  $1 \text{ m}$  mächtig und über einer gut durchlässigen Geologie gelegen, mit einem guten Makroporensystem und gut durchlässiger Matrix ausgestattet, entsteht DP. Bei gleichen Eigenschaften aber einer weniger durchlässigen Geologie entsteht SOF2, resp. bei Vorhandensein wirksamer lateraler Fließwege, SSF2.

Sind die Böden wesentlich mächtiger als  $1 \text{ m}$ , mit guter Makroporosität und gut durchlässiger Matrix ausgestattet, entsteht SOF3 oder sogar DP. Bei geringer Matrixdurchlässigkeit ermöglichen die Makroporen die Infiltration und verbessern die Verteilung des Wassers im Bodenprofil. Die Makroporosität wird mit der Frage „Makroporosität groß (Pd 1-2)“ abgefragt. Die Klammern bedeuten: „entweder ist Makroporosität groß oder Packungsdichte (Pd) 1-2“.

##### 4.2.2.2 PBS für „normale“ Böden und hohe Niederschlagsintensität ( $I > \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$ )

Bei intensiven Niederschlägen spielt die Makroporosität eine wesentliche Rolle für die Infiltration. Fehlt ein effizientes MP-System, ist die Infiltration begrenzt. In Abbildung 4/5 nimmt daher die Makroporosität im Oberboden eine wichtige Reglerfunktion ein. Ist der Oberboden arm an Makroporen, entsteht bei Gewitterereignissen HOF. Auch im Unterboden wird die Makroporosität vorrangig behandelt und ist bei intensiven Starkregen für eine effiziente Verteilung des Wassers im Boden verantwortlich.

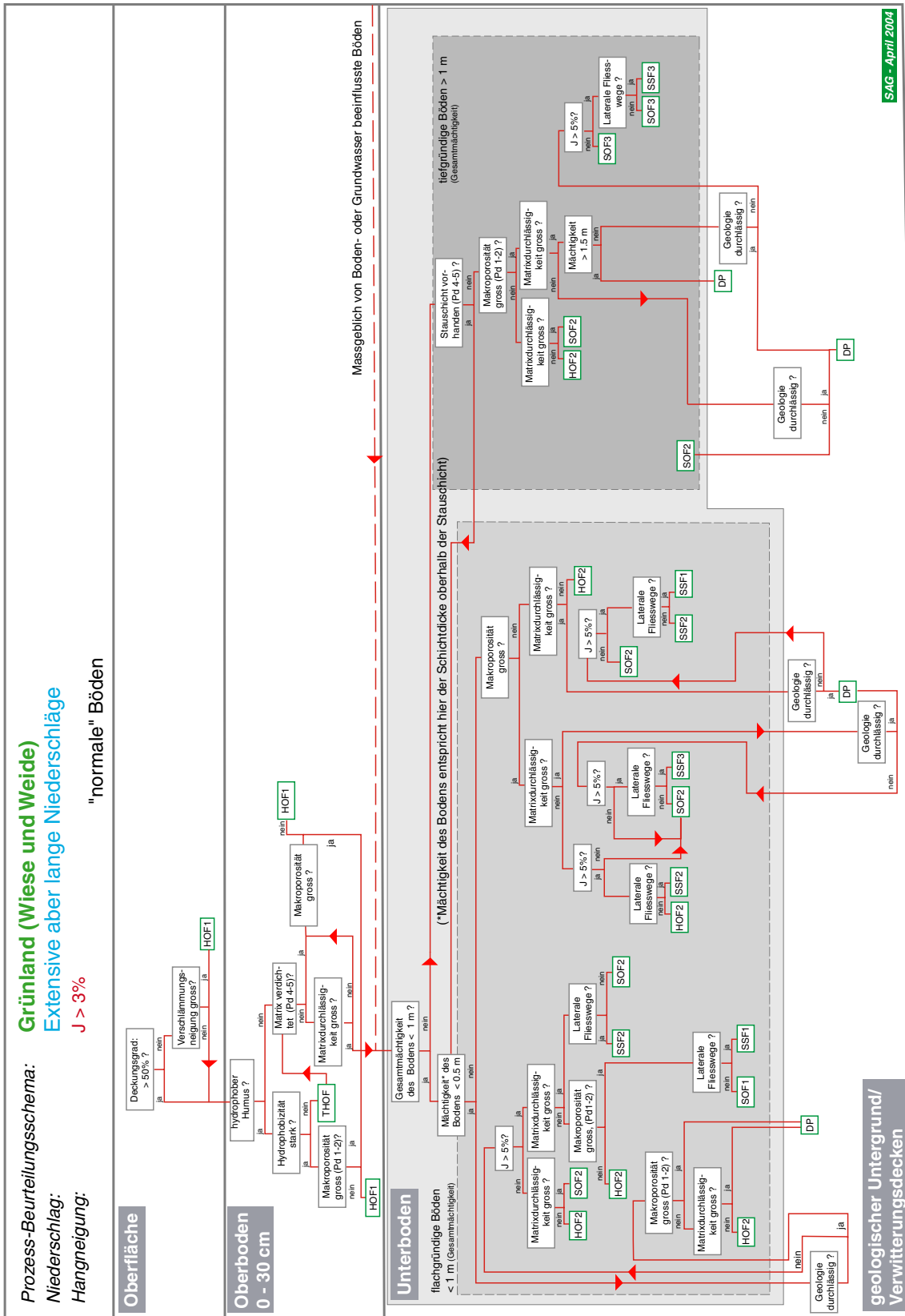


Abb. 4/1: Prozessbeurteilungsschema Wiese, Weide (niedrige Niederschlagsintensität)



Prozess-Beurteilungsschema: **Grünland (Wiese und Weide)**  
Niederschlag: **Extensive aber lange Niederschläge**  
Hangneigung: **J > 3%**

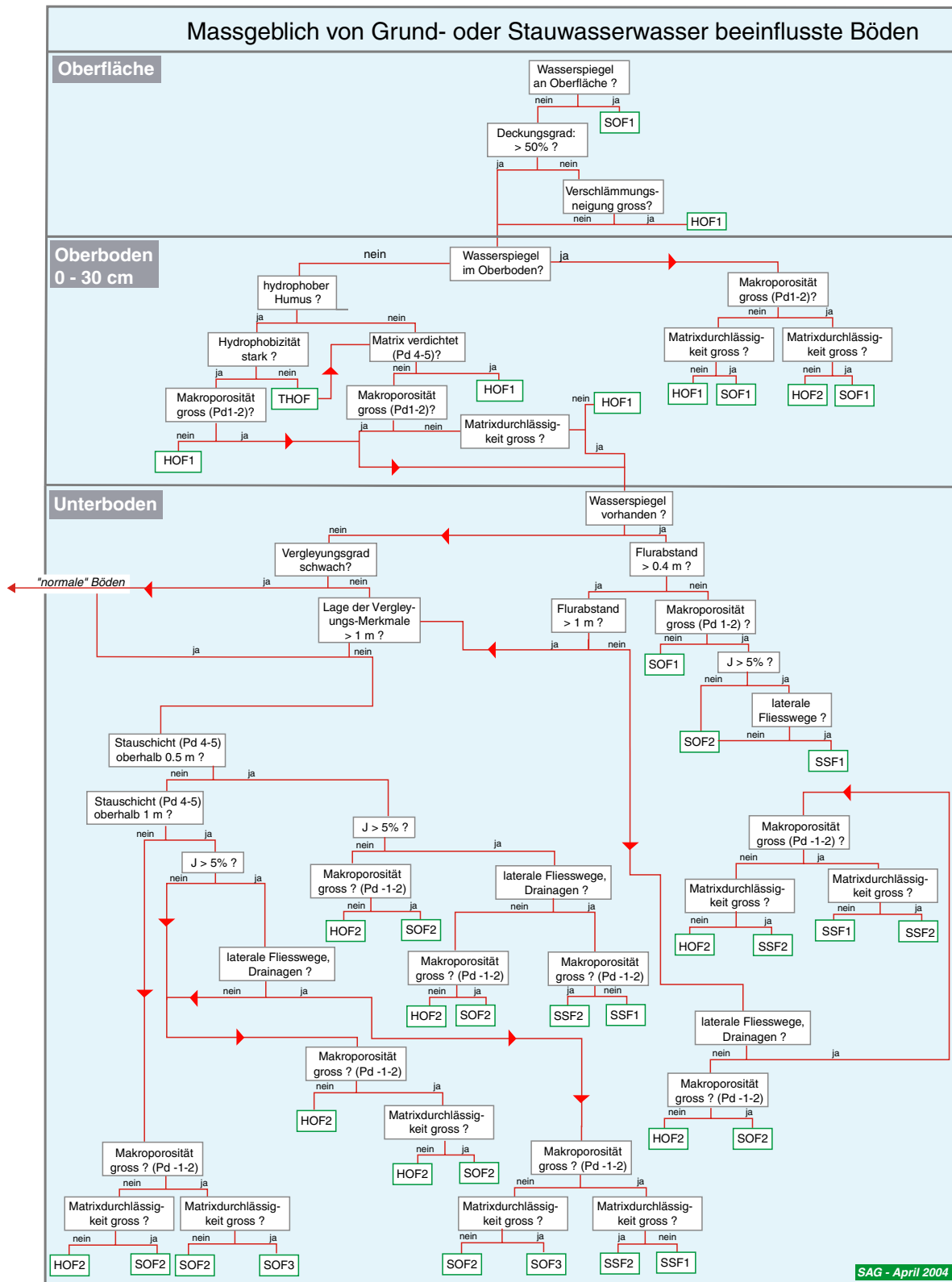


Abb. 4/2: Prozessbeurteilungsschema Wiese, Weide für stau- oder grundwasserbeeinflusste Böden (niedrige Niederschlagsintensität).

Prozess-Beurteilungsschema: **Acker**  
Niederschlag: **Extensive aber lange Niederschläge**  
Hangneigung: **20% < J < 3%**  
"Von Grund- und Stauwasser massgeblich beeinflusste Böden"

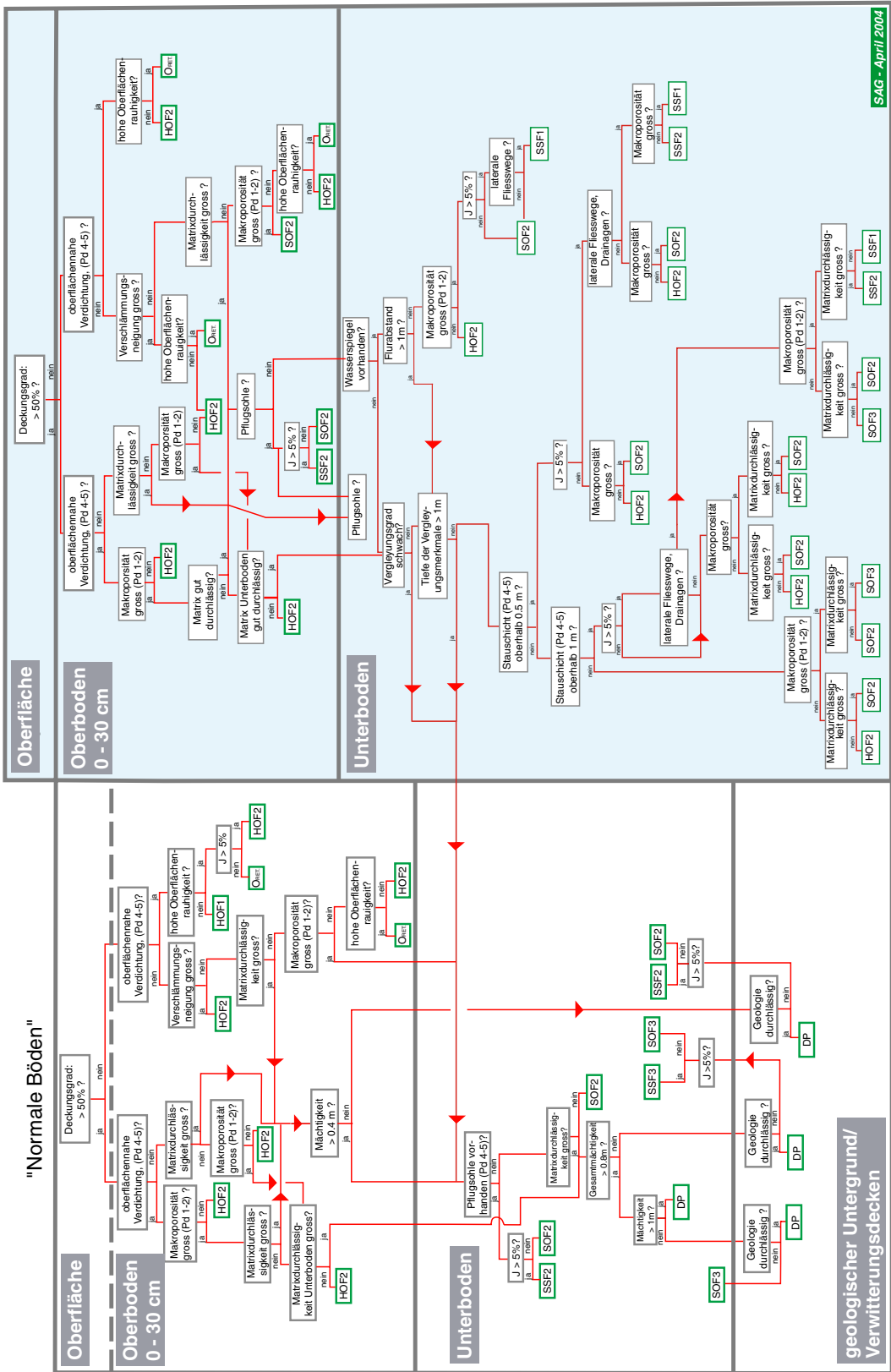


Abb. 4/3: Prozessbeurteilungsschema Acker (niedrige Niederschlagsintensität).



Prozess-Beurteilungsschema:  
Niederschlag:  
Hangneigung:

**Weinberge**  
**Extensive aber lange Niederschläge**  
**J > 3%**

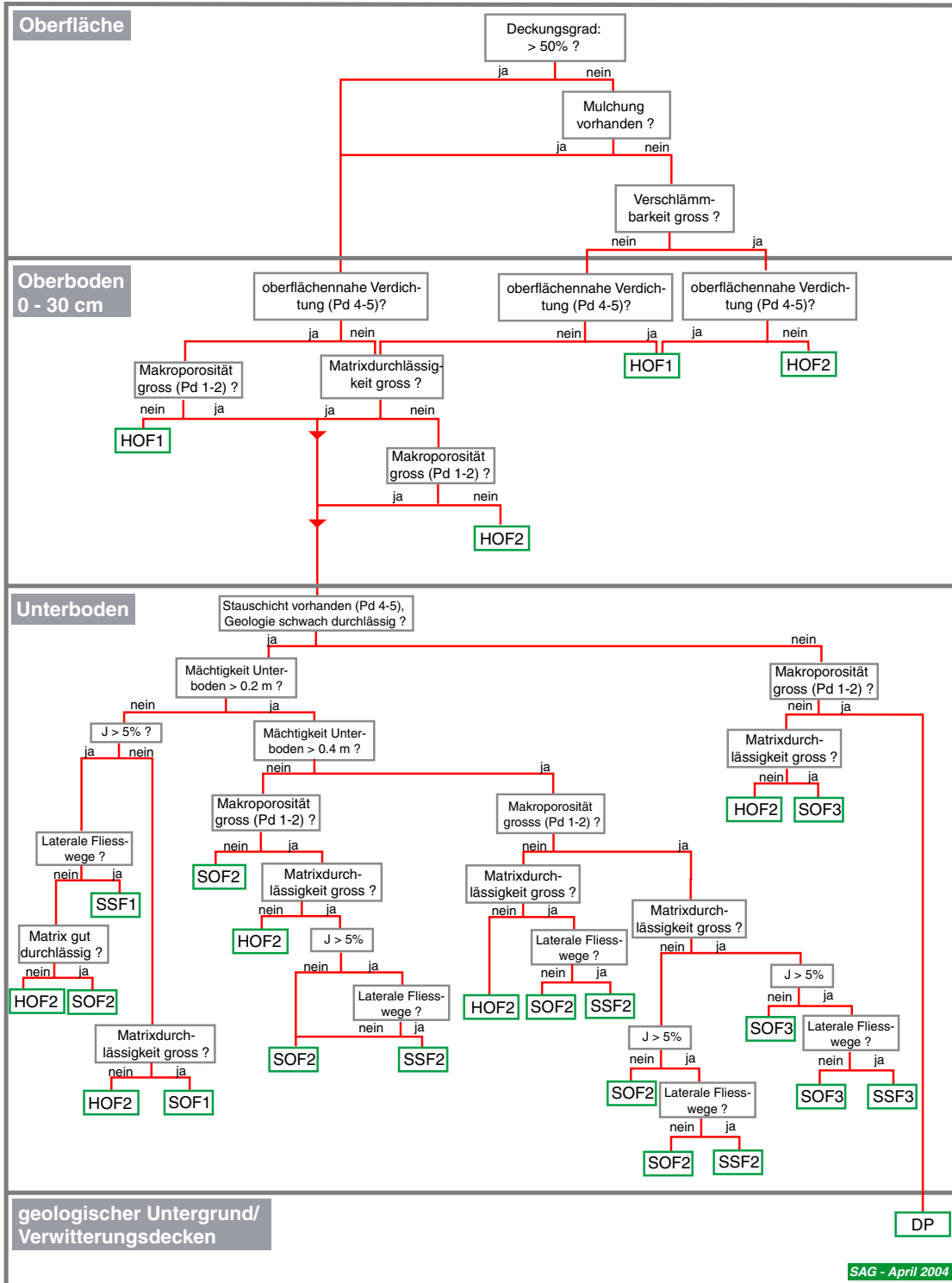


Abb. 4/4: Prozessbeurteilungsschema Rebberg (niedrige Niederschlagsintensität).



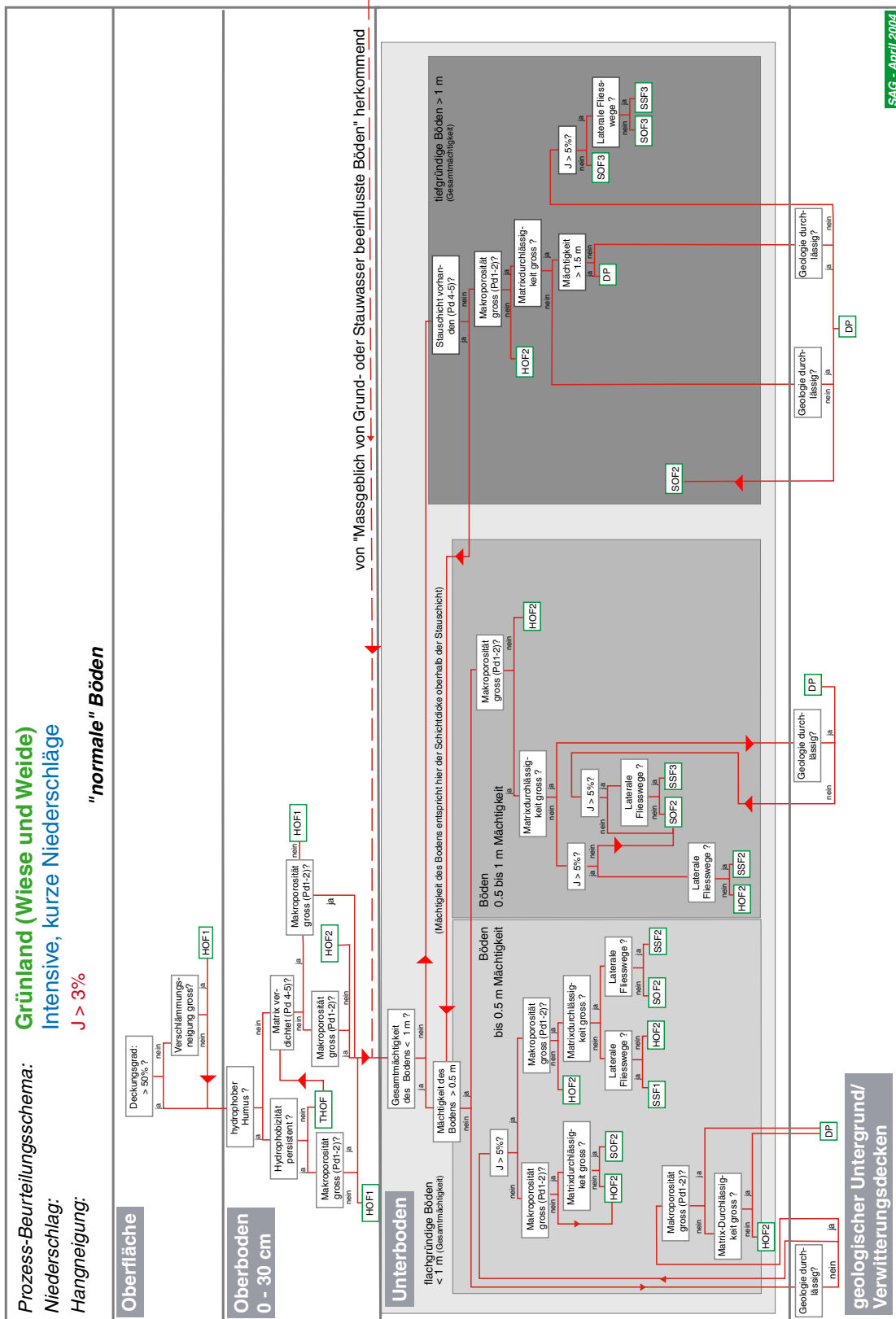


Abb. 4/5: Prozessbeurteilungsschema Wiese, Weide für "normale" Böden (hohe Niederschlagsintensität).



Prozess-Beurteilungsschema: **Grünland (Wiese und Weide)**  
Niederschlag: **Intensive, kurze Niederschläge**  
Hangneigung: **J > 3%**

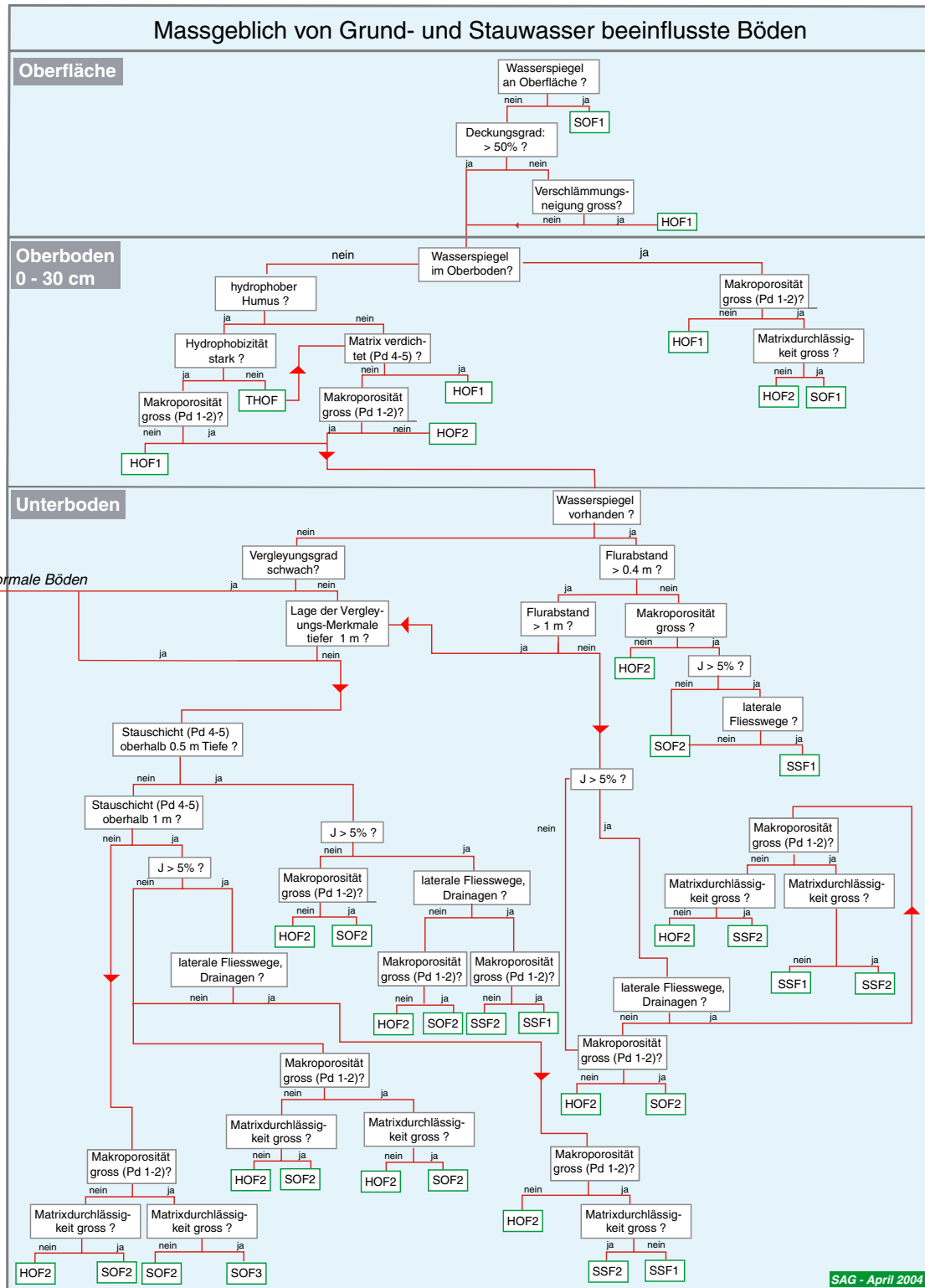


Abb. 4/6: Prozessbeurteilungsschema Wiese, Weide für stau- oder grundwasserbeeinflusste Böden (hohe Niederschlagsintensität).

Prozess-Beurteilungsschema: **Acker**  
 Niederschlag: **Intensive kurze Niederschläge**  
 Hangneigung: **20% < J > 3%**

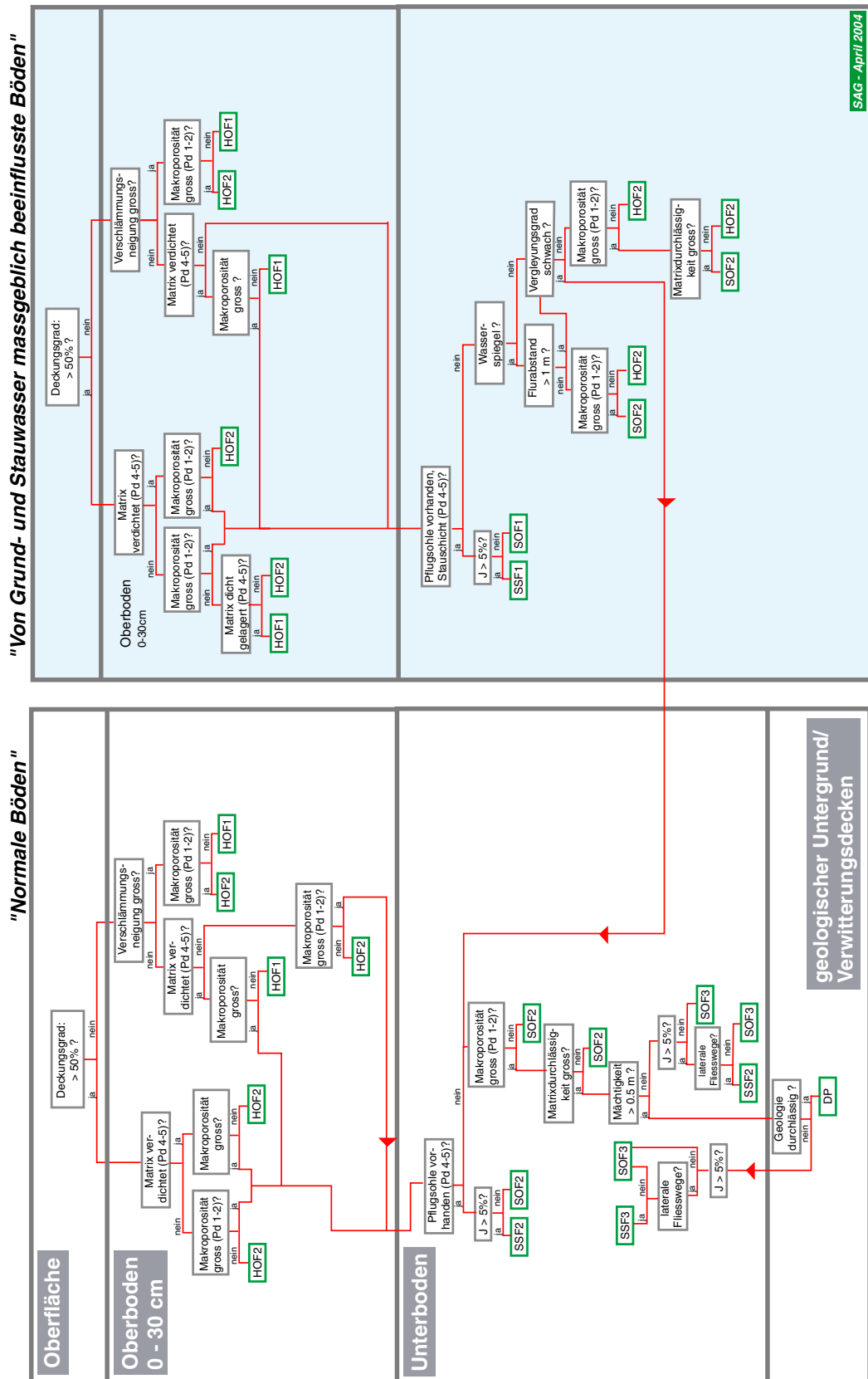


Abb. 4/7: Prozessbeurteilungsschema Acker (hohe Niederschlagsintensität).

Prozess-Beurteilungsschema:

Weinberge

Niederschlag:

Intensive, kurze Niederschläge

Hangneigung:

J > 5%

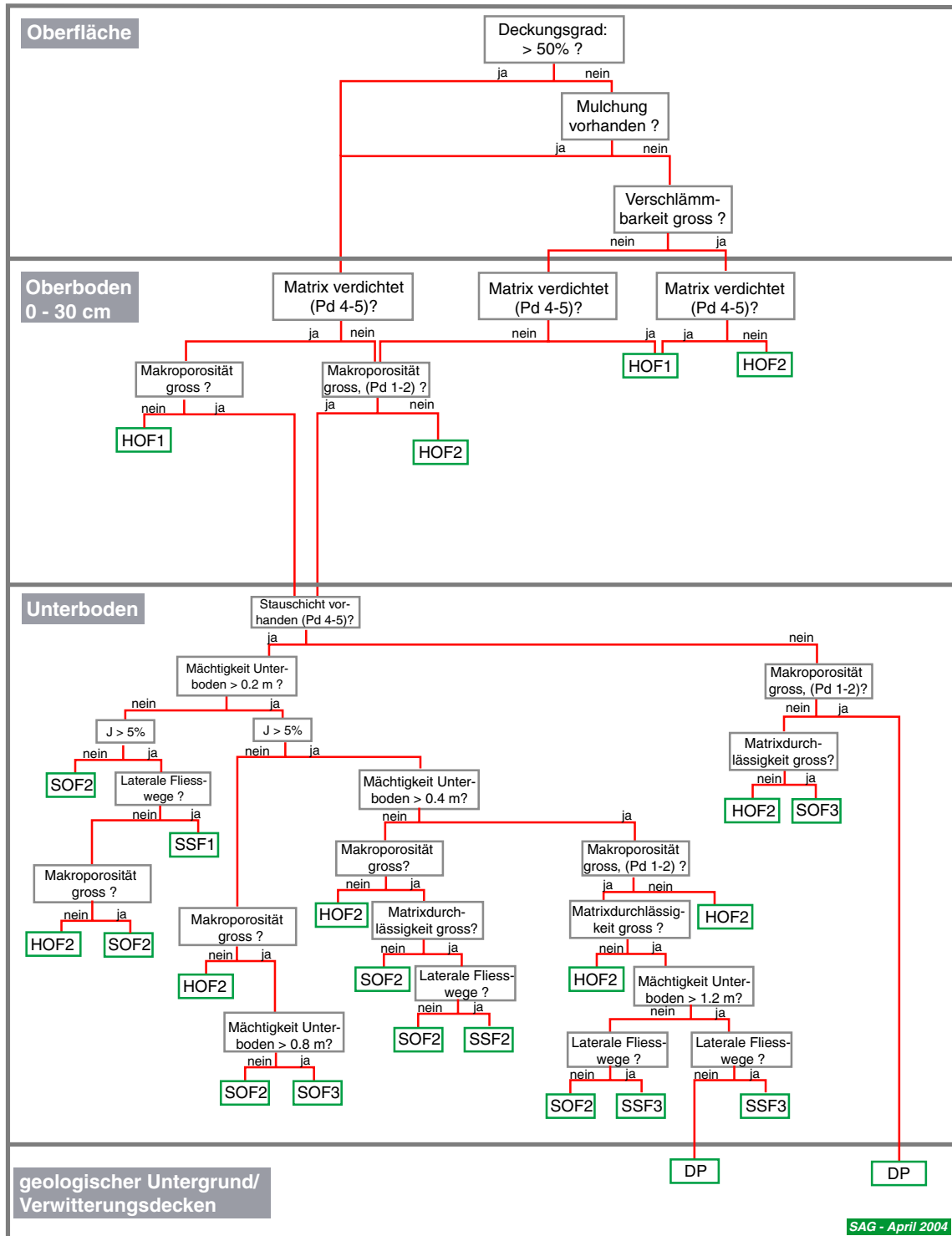


Abb. 4/8: Prozessbeurteilungsschema Rebberg (hohe Niederschlagsintensität).

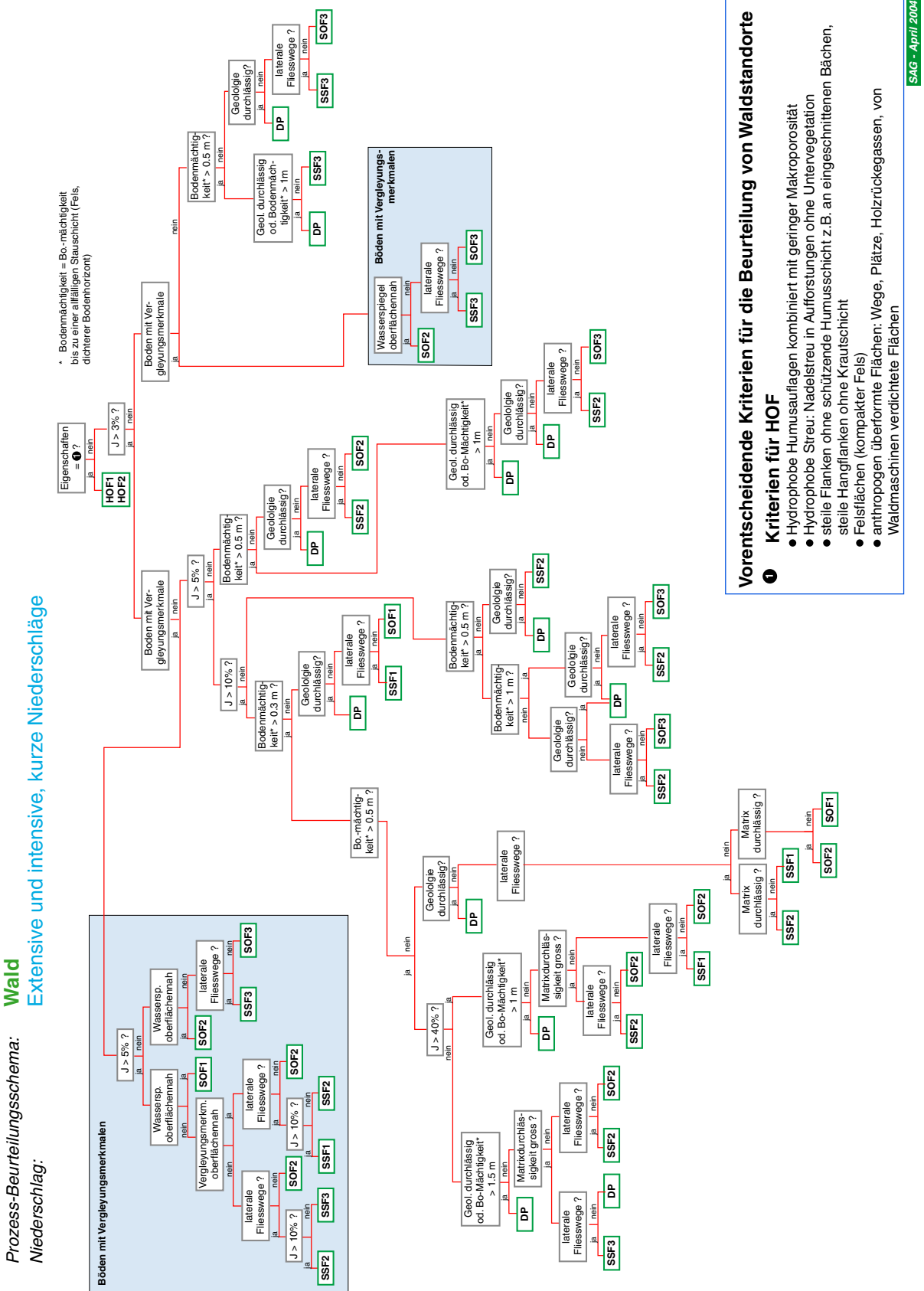


Abb. 4/9: Prozessbeurteilungsschema Wald (niedrige und hohe Intensität).

#### 4.2.3 PBS für Acker

Die PBS für Acker misst der Verschlammungsneigung durch Bodenverdichtung (Oberbodenverdichtung durch Landwirtschaftsmaschinen oder Unterbodenverdichtungen als Pflugsohle) größere Bedeutung zu.

#### 4.2.4 PBS für Wald

In Wäldern sorgen verschiedene Faktoren für eine große Standortvielfalt. Abgesehen von Bodentypen beeinflusst der Pflanzenbestand den Abfluss maßgeblich (Interzeption, Kronentraufe, Stammabfluss etc.).

Da der Niederschlag nicht unmittelbar auf die Bodenoberfläche fällt, sind also hydrologische Prozesse vorgeschaltet, welche eigentlich in die PBS einbezogen werden müssten. Die Vielzahl von Standortvarianten hat dazu geführt, dass ein stark vereinfachtes PBS entwickelt wurde, das sowohl geringe wie auch hohe Niederschlagsintensitäten berücksichtigt (Abb. 4/9).

Oberflächenabfluss, der auf Infiltrationshemmnisse zurückgeht, ist in Wäldern selten zu beobachten. Dieser Prozess wird zu Beginn der PBS abgehandelt.

### 4.3 Die Kriterien der Prozessbeurteilung und ihre Herleitung am Standort

#### 4.3.1 Einleitung

Im Bericht IHW, 2000 wurde ein Überblick der hochwasserrelevanten Phänomene bei den verschiedenen Nutzungsarten gegeben (Anhang 1). Hier werden nur noch die Kriterien behandelt, welche in den PBS enthalten sind.

**Tab. 4/1: In den PBS enthaltene Kriterien.**

Oberfläche	Oberboden	Unterboden und Geologie
Deckungsgrad	Matrix verdichtet	Pflugsohle
Hydrophobizität, hydrophober Humus	Makroporosität groß	Matrixdurchlässigkeit
Hangneigung	Verschlammungsneigung	Mächtigkeit
hohe Oberflächenrauigkeit	Packungsdichte	laterale Fließwege und Dränagen
		Flurabstand Grundwasser
		Stauschicht (in mächtigen bis sehr mächtigen Böden)
		Vergleungsgrad
		Lage der Vergleichungsmerkmale
		Packungsdichte
		Laterale Fließwege
		Durchlässigkeit (Geologie)

#### 4.3.2 Vegetations-Deckungsgrad des Bodens

Unter dem Deckungsgrad der Vegetation wird hier die senkrechte Projektion des Pflanzenbestandes auf die Aufnahme­fläche verstanden, wobei das Gesamtareal 100% beträgt. Der Deckungsgrad acker­baulicher Kulturen kann mit dem Schema von Rohr et al., 1990 eingeschätzt werden (Anhang 5/1).

#### 4.3.3 Verschlammungsneigung des Bodens

Unter Verschlammung versteht man das Zerfließen des Bodens, d.h. die Zerstörung von Strukturelementen (Aggregaten und Makroporen) durch Wasser an der Bodenoberfläche bei hohem Wassergehalt, wenn die Gefügestabilität gering ist. Der Aufprall des Niederschlags auf eine unbedeckte Bodenoberfläche und die Luftsprengung von Aggregaten, wenn schluffreiche trockene Aggregate befeuchtet werden, sind wichtige auslösende Prozesse. Tonarme schluffreiche Böden, z.B. lessivierte Lössböden oder Böden aus schluffreicher Hauptlage in Mittelgebirgslandschaften, verschlammern leicht.

Die Folgen der Verschlammung sind:

- Verschlammungskrusten mit dichtem Kohärentgefüge ohne Makroporen,
- stark behinderte Infiltration von Niederschlagswasser und daraus resultierende Neigung zu Oberflächenabfluss (HOF) und Bodenerosion,
- behinderte Durchlüftung durch die Verschlammungskruste im feuchten Zustand.

Verschlammte Flächen lassen sich aufgrund der deutlichen Entmischung von Schluff- und Tonteilchen sowie der helleren, wenige Millimeter mächtigen Schluffschicht an der Bodenoberfläche leicht erkennen (Anhang 4, Foto 6). Die Flächenanteile von Einzelaggregaten, Regenschlag- und Sedimentkrusten (vgl. Roth, 1992) kennzeichnen den Ausprägungsgrad der Verschlammung (Tab. 4/2):

**Tab. 4/2: Kartierschlüssel zur Beurteilung des Verschlammungsgrades (vgl. Foto 1,2 Anhang 4)**

Verschlammungsgrad	Flächenanteil in %		
	Einzelaggregate	Regenschlagkruste	Sedimentkruste
<b>Nicht verschlammte (V0)</b> Aggregate nicht oder kaum gerundet, nicht zusammenhängend, viele offene Aggregat-Zwischenräume	100	0	0
<b>Sehr schwach verschlammte (V1)</b> Aggregate etwas gerundet (abgetragen), etwas zusammenhängend, noch viele offene Aggregat-Zwischenräume, kaum Sedimentbildung	> 70	< 30	< 10
<b>Schwach verschlammte (V2)</b>	> 50	< 40	10 - 30
<b>Mäßig verschlammte (V3)</b> Aggregate deutlich gerundet, zum großen Teil zusammenhängend, nur wenige offene Aggregat-Zwischenräume, großer Sedimentkrustenanteil	< 50	< 70	30 - 50
<b>Stark verschlammte (V4)</b> Sedimentkrustenanteil überwiegt	< 30	< 50	50 - 70
<b>Sehr stark verschlammte (V5)</b>	0	< 30	> 70
<b>Extrem stark verschlammte (V6)</b>	0	< 10	> 90

Da die Verschlammungsneigung nicht nur von der Bodenart, sondern von Faktoren, wie dem C- und dem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt des Bodens abhängt, schlagen wir nebst der Beurteilung nach AG BODEN (1994) vor, weitere Faktoren zu berücksichtigen.

- Die visuelle Begutachtung der Bodenoberfläche nach einem Niederschlag gibt Hinweise auf die Verschlammungsneigung und ermöglicht nach Tab. 4/2 die Beurteilung. Ist die Bodenstruktur einer bearbeiteten Oberfläche nahezu intakt, ist die Verschlammungsneigung gering; sind keine kantigen Aggregate sichtbar, ist die Verschlammungsneigung groß.
- Böden mit einem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt nach AG BODEN (Tab. 12) von c0 (carbonatfrei) bis c2 (carbonatarm) können als potentiell verschlammbar betrachtet werden.
- Böden mit einem Humusgehalt nach AG BODEN (Tab. 10) von h0 (humusfrei, 0 % Masse) und h1 (sehr schwach humos, < 1% Masse) dürften verschlammungsanfällig sein.
- Ein vereinfachter „Nass-Siebungstest“ ermöglicht im Felde direkt die Aggregatsstabilität zu testen und die Verschlammungsneigung einzuschätzen. Ein Bodenstück von 5-10 cm Durchmesser wird in ein mit Wasser gefülltes Gefäss getaucht. Die Zeit wird gemessen, die verstreicht, bis das Stück Boden in kleinere Aggregate oder sogar in die einzelnen Bodenpartikel zerfallen ist. Zerfällt der Boden während 10 Minuten überhaupt nicht, ist die Verschlammungsanfälligkeit sehr gering; zerfällt es gänzlich (Sediment auf dem Gefässboden), ist die Verschlammungsneigung stark.

#### 4.3.4 Hydrophobizität

Besondere Verhältnisse liegen vor, wenn die Bodenoberfläche wasserabstossend (hydrophob) ist, und somit die Benetzung erschwert ist (Anhang 4, Foto 20). Hydrophobe Effekte können als Folge starker Austrocknung, durch das Vorhandensein wasserabstossender Pflanzenmaterialien (bestimmte Gräser, Pilze, Tannennadeln, Blätter), durch organische Stoffe auf Waldbrandflächen oder als Kombination dieser Faktoren auftreten. Während Austrocknung zu vorübergehender (transienter) Hydrophobizität führt, können die anderen Faktoren anhaltende (persistente) Hydrophobizität erzeugen. Dies hat Auswirkungen auf die Infiltration. Holzhey, 1969 und Doerr et al., 2000 geben eine umfassende Übersicht über das Wesen der Hydrophobizität von natürlichen Materialien. Doerr et al., 2000 zeigt ihr Einfluss auf die Abflussbildung. Ein ausgebildeter Wurzelfilz kann besonders im Sommer bei starker Austrocknung die Infiltration hemmen (Scherrer, 1997).

Auf intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen in Rheinland-Pfalz dürften kaum hydrophobe Pflanzenarten vorkommen. Auf extensiv bewirtschafteten oder aufgelassenen Flächen hingegen ist dieses Phänomen schon eher zu erwarten. Beispielsweise Heidevegetation wie *Calluna Vulgaris*, *Erica arborea*, *Vaccinium spp* (Doerr et al., 2000) und das Borstgras; *Nardus stricta* (Markart und Kohl, 1996) erzeugen wasserabstossende Oberflächen. Auf Verdachtsflächen lässt sich die Hydrophobizität mit folgendem Test klassifizieren:

WDPT-Test (Water Drop Penetration Time) nach Letey (1969): Man bringt einen oder mehrere Tropfen Wasser auf die Bodenoberfläche auf, misst die Zeit, wie lange die Benetzung der Oberfläche dauert. Der Versuch wird wiederholt und der Mittelwert ermittelt. Bisdom et al. (1993) unterscheiden gemäss Benetzungstest 5 Hydrophobizitätsgrade (Tab. 4/3).



**Tab. 4/3: Die Klassifizierung von Böden nach ihrer Benetzungszeit (Bisdorn et al., 1993).**

Stufe	Hydrophobizitätsgrade	Benetzungszeit [sec.]
1	Nicht hydrophob	< 5
2	Leicht hydrophob	5-60
3	Stark hydrophob	60-600
4	Sehr stark hydrophob	600-3600
5	Extrem hydrophob	> 3600

Im PBS wird auch die Frage nach hydrophoben Humus gestellt. Dies lässt sich anhand der vorkommenden Pflanzenarten (vgl. oben), anhand des organischen Gehalts des Oberbodens (z.B. C-Gehalt > 5%) oder bei Vorhandensein eines Wurzelfilzes entscheiden. In einem weiteren Schritt wird die Frage gestellt, ob die Hydrophobizität persistent ist. Bei Stufe 4 und 5 (Tab. 4/3) ist von persistenter (andauernder) Hydrophobizität auszugehen. Bei kurzen Gewitterniederschlägen kann schon Stufe 3 (nicht persistent) zu vorübergehendem Oberflächenabfluss (THOF) führen<sup>8</sup>.

#### 4.3.5 Oberflächenrauigkeit

Bei der Beurteilung der Abflussbildung auf Ackerflächen kann der Bearbeitungszustand wichtig sein. Einem gepflügten Acker mit intakten Schollen wird eine hohe Rauigkeit zugeordnet, einem gepflügten Acker mit verschlammter Oberfläche eine mittlere und einer fein bearbeiteten Oberfläche eine geringe Rauigkeit. Bei mittlerer bis geringer Rauigkeit ist auch der Rückhalt in Mulden wenig relevant. Mit zunehmender Steilheit der Ackerfläche wird der Rückhalt in Unebenheiten und Mulden geringer.

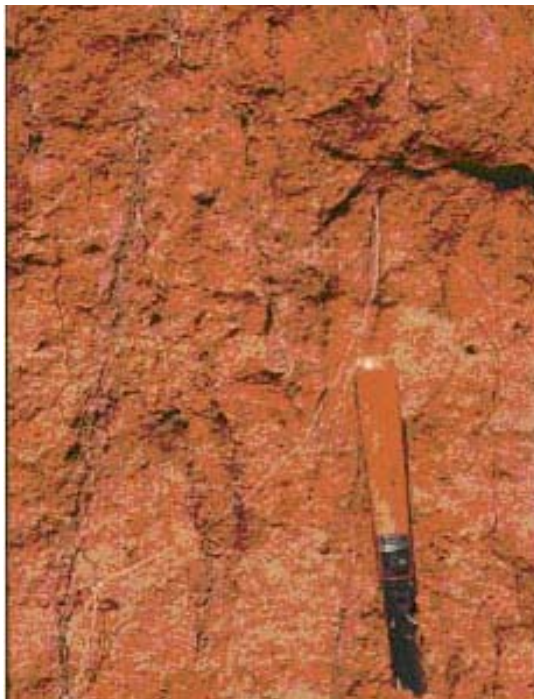
#### 4.3.6 Makroporosität am Beispiel von Wurmröhren

##### 4.3.6.1 Einleitung

Makroporen haben einen großen Einfluss auf die Infiltration (Ehlers, 1975; Germann, 1981; Syers et al., 1983; Bouma, 1991; Bouma et al. 1982; Booltink und Bouma, 1991) besonders bei intensiven Niederschlägen. Trotz intensiver Forschungstätigkeit gibt es bis heute keinen Ansatz, um den Einfluss von Makroporen auf die Infiltration auf einfache Weise einzuschätzen. Bei den Makroporen (Mp) unterscheidet man im wesentlichen Risse, die auf Schrumpfen und Quellen des Bodens zurückgehen oder entlang des Bodenskeletts auftreten und biogene Makroporen, wie Tiergänge oder Hohlräume erzeugt durch lebendes oder abgestorbenes Pflanzenmaterial. Die gefügebedingte Makroporosität ist schwierig zu quantifizieren, nicht zuletzt deshalb, weil sie einem jahreszeitlichen Gang unterliegt. Die Beurteilung der Makroporosität geht daher von den Wurmröhren aus (Foto 1 und 2) und nimmt die gefügebedingte Makroporosität anhand der Packungsdichte<sup>9</sup> ergänzend dazu.

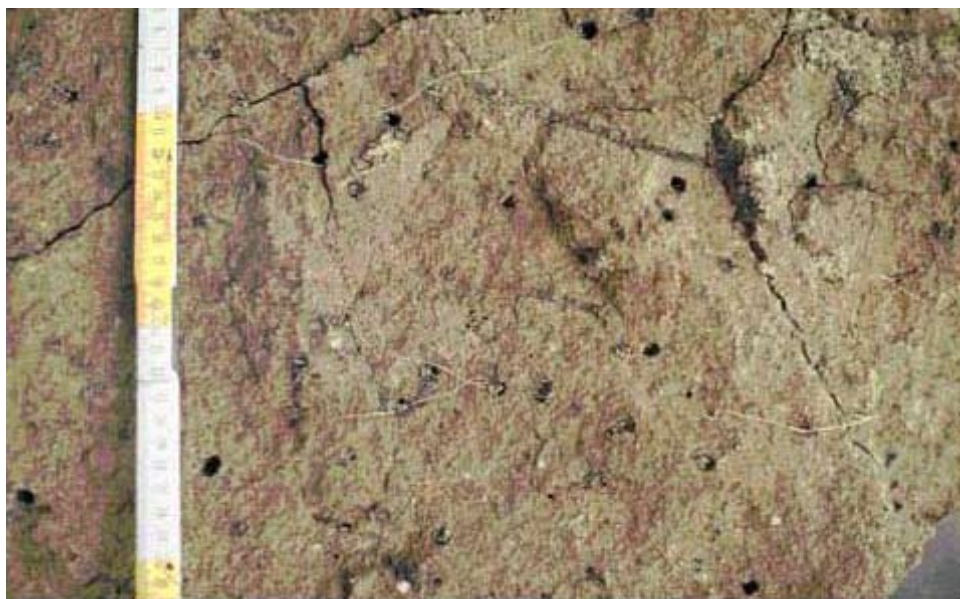
Auf Grün-, Ackerland und Weinbergen entsteht ein überwiegender Teil der Mp durch die Wühlaktivität von Regenwürmern. Ihre Röhren können bis zu 11 mm Durchmesser und Längen von bis zu 3 m aufweisen. Die Zahl der Kanäle wird nach Ehlers (1975) mit zunehmender Tiefe größer und erreicht ihr Maximum oftmals bei 50-60 cm. Viele Regenwurmartens legen vertikale Kanäle an, einige aber auch horizontale. Die durch Regenwürmer erzeugte Makroporosität ist natürlich von der Regenwurmdichte abhängig. Sie wird von verschiedenen Faktoren (pH, Klima, Bodenart, Bodenfeuchte,

Nutzung, Vegetation, organischer Gehalt, usw.) beeinflusst (Glasstetter, 1991). Da das Vorkommen von Regenwürmern von der Bodenchemie abhängig ist, kann sich die Erfassung von Mp auf sauren Böden nicht nur auf diese biogenen Mp stützen. Allerdings ist die Einschätzung der gefügebedingten Durchlässigkeit schwierig<sup>10</sup>. Neben der Zahl der Mp ist auch ihre Länge und Konnektivität wichtig. Weiler (2001) konnte zeigen, dass die Initiierung des Mp-Flusses an der Oberfläche aber auch im Ober- oder Unterboden erfolgen kann. Im Falle der Initiierung an der Oberfläche zeigte er, dass große Mp je nach Mikrorelief ein großes bis sehr großes Einzugsgebiet haben können. Damit sind einzelne Mp in der Lage die Infiltration einer Fläche von mehreren dm<sup>2</sup> zu dominieren.



**Foto 1:** Perforation eines Bt-Horizontes durch Regenwürmer (Profilwand)[Foto Dr. S. Sauer]

**Foto 2:** Perforation eines Bt-Horizontes durch Regenwürmer (Aufsicht) [Foto Prof. T. Harrach]



In der Literatur wurden unter Grünland 200-400 Individuen/m<sup>2</sup>, auf Acker zwischen 20-250 festgestellt. Für einen Ackerstandort wird hier der Zusammenhang zwischen Zahl und Durchmesser der Mp aufgezeigt (Tab. 4/4).

**Tab. 4/4: Zahl der Wurmgänge (Makroporen) pro m<sup>2</sup> auf einem Ackerboden aufgeteilt in zwei Klassen nach ihrem Durchmesser (verschiedene Autoren<sup>11</sup>).**

Klasse	Durchmesser d >2 mm	Durchmesser > 5 mm
Makroporen/m <sup>2</sup>	200-700	100-200

Bis 700 Mp mit einem Durchmesser >2 mm wurden pro m<sup>2</sup> festgestellt. Die maximale Anzahl für d > 5 mm lag bei etwa 200 Mp. Also bilden Mp zwischen 2 und 5 mm Durchmesser (100 bis 500 Mp/m<sup>2</sup>) die größte Gruppe.

Unter Grünland ist die Mp-Zahl um 50 bis 100 % größer als unter Acker. Dort konnten auch Ehlers, 1975 und Warner, 1998 60-80% der ausgezählten Mp der Klasse d = 2-5 mm und 20-40 % der Klasse d = 5-8 mm zuordnen.

#### 4.3.6.2 Herleitung des Zusammenhanges zwischen Wurmdichte und Infiltration

Mp sind für den raschen vertikalen Transport von Wasser in größere Tiefen und für die Verteilung des Wassers in die umgebende Bodenmatrix (Interaktion) verantwortlich (Weiler, 2001). Je besser dieses System funktioniert, um so mehr Wasser kann gespeichert werden.

Für die Infiltration ist die Beziehung zwischen Durchmesser und Zahl der Mp, ihre Kontinuität und Durchgängigkeit von der Oberfläche bis zum Unterboden wichtig. Je feinkörniger und damit weniger durchlässig die Matrix eines Boden ist, desto wichtiger sind Mp für den Infiltrationsprozess (weiler, 2001)

Zur Einschätzung der hydrologischen Wirksamkeit von Mp stützen wir uns auf die Untersuchung von Ehlers (1975), die folgende Resultate ergab (Tab. 4/5).

**Tab. 4/5: Zusammenhang zwischen Durchmesser der Makroporen, Anteil an der gesamten Makroporosität und Anteil an der Infiltration.**

Klasse (Durchmesser)	Anteil der Makroporosität	Anteil an der Infiltration
< 2 mm	50 %	1 %
2-5 mm	40 %	33 %
> 5 mm	10 %	66 %

Danach trägt die Klasse 0-2 mm kaum zur Infiltration bei, obwohl ihr Anteil an der Makroporosität sehr groß ist. Wurmröhren mit 5 bis 8 mm Durchmesser sind maßgebend für die Infiltration. Mit 10% der Makroporosität sind sie für 2/3 der Infiltration verantwortlich, ihre Infiltrationskapazität ist also im jenen Fall ca. 8 mal größer als die der Klasse 2-5 mm.

#### 4.3.6.3 Bewertung der Makroporosität

Tabelle 4/6 zeigt den verwendeten Ansatz für die Beurteilung der Wirksamkeit von Mp. Demnach ist bei weniger als 40 Mp/m<sup>2</sup> der Einfluss auf die Infiltration verhältnismäßig gering. Ab 70 Mp pro m<sup>2</sup> ist eine große und ab 150 eine sehr große Infiltration zu erwarten. Der Bereich 40 bis 70 Mp/m<sup>2</sup> ist kritisch. Zusätzlich zur Mp-Zählung werden hier Infiltrationsversuche bei trockenen Bodenver-

hältnissen in Kombination mit Tracer (z.B. Brilliant Blue) empfohlen, um die vorhandenen Mp besser sichtbar zu machen und die Infiltrationskapazität zu testen.

**Tab. 4/6: Beurteilung der hydrologischen Wirksamkeit der Makroporen anhand der Zahl der Makroporen.**

Makroporenzahl pro m <sup>2</sup>		Makroporosität
0-40	geringe Infiltration	klein
40-70	kritischer Bereich	mäßig
70-150	normale Infiltration	groß
ab 150	große Infiltration	sehr groß

Die Beurteilung der Makroporosität im Gelände muss jedoch der Tatsache Rechnung tragen, dass die großen Mp wesentlich mehr Wasser in die Tiefe leiten können als kleinere Mp. Um diesen hydrologischen Unterschied zu berücksichtigen, wird die Zahl der großen Mp > 5mm mit dem Faktor 5 multipliziert. Werden beispielsweise in einem Oberboden insgesamt 40 Mp/m<sup>2</sup> festgestellt, und weisen davon 10 Mp einen Durchmesser von 5 mm und mehr auf, so ergibt sich folgende Einschätzung: Die 10 großen Mp werden mit Faktor 5 multipliziert (5 x 10) was 50 Mp ergibt. 50 Mp + 32 kleine Mp ergeben insgesamt 82 Mp. Die Wirksamkeit aller Mp entspricht also 82 Mp. In der Tabelle 4/6 liegen wir damit (knapp) im Bereich „Makroporosität groß“ und können mit „normaler Infiltration“ rechnen.

#### 4.3.6.4 Erhebung der Makroporen im Felde

Die Zahl der Mp kann anhand von stichprobenhaften Feldzählungen erfasst werden. Diese Methode wurde bereits von Smettem und Collis (1985) für die Erfassung von biogenen Makroporen angewandt. Dabei werden an horizontalen (quadratischen) Bodenschnitten im Abstand von 20 cm die Mp ausgezählt. Mit einer Bürste muss dazu die Oberfläche der Schnittfläche von losen Bodenteilen befreit werden<sup>12</sup>. Dies gelingt nur, wenn der Boden verhältnismäßig trocken ist. Ist er feucht, werden die Hohlräume verstopft und etliche Mp werden so nicht erfasst. Abbildung 4/10 zeigt solche Horizontalschnitte.

Besonders Mp mit Durchmesser von weniger als 2 mm sind zwar weniger wichtig als große Mp, werden aber selbst bei sorgfältigem Arbeiten leicht übersehen. Man muss davon ausgehen, dass die so ermittelte Mp-Zahl schätzungsweise bis zu 30 % höher liegen kann, wenn sämtliche Mp erfasst würden. Die Regenwurmaktivität unterliegt auch einer saisonalen Schwankung, die Röhren dürften demzufolge nicht immer gleich gut sichtbar sein.

Ein **abgekürztes Verfahren der Mp-Erfassung** ist möglich, wenn sich anhand des Bodenprofils zeigt, dass sehr viele Makroporen vorhanden sind und daher der Boden keinesfalls kritisch hinsichtlich Makroporosität ist. Wenn ca. 5 – 8 Mp an einer ca. 50 cm breiten Profilwand in etwa gleicher Höhe angeschnitten sind, ist die Mp groß bis sehr groß, und es erübrigt sich eine detaillierte Mp-Untersuchung.

Zeigt sich an einem Bodenprofil, dass die Packungsdichte (Kap.4.3.7) bei 1-2 liegt, kann von einem sehr losen bis losen Bodengefüge ausgegangen werden. In solchen Böden bestehen ausreichend Räume zwischen den Bodenaggregaten, die ein präferentielles Fließen von Wasser gestatten.

**Abb. 4/10 nächste Seite**

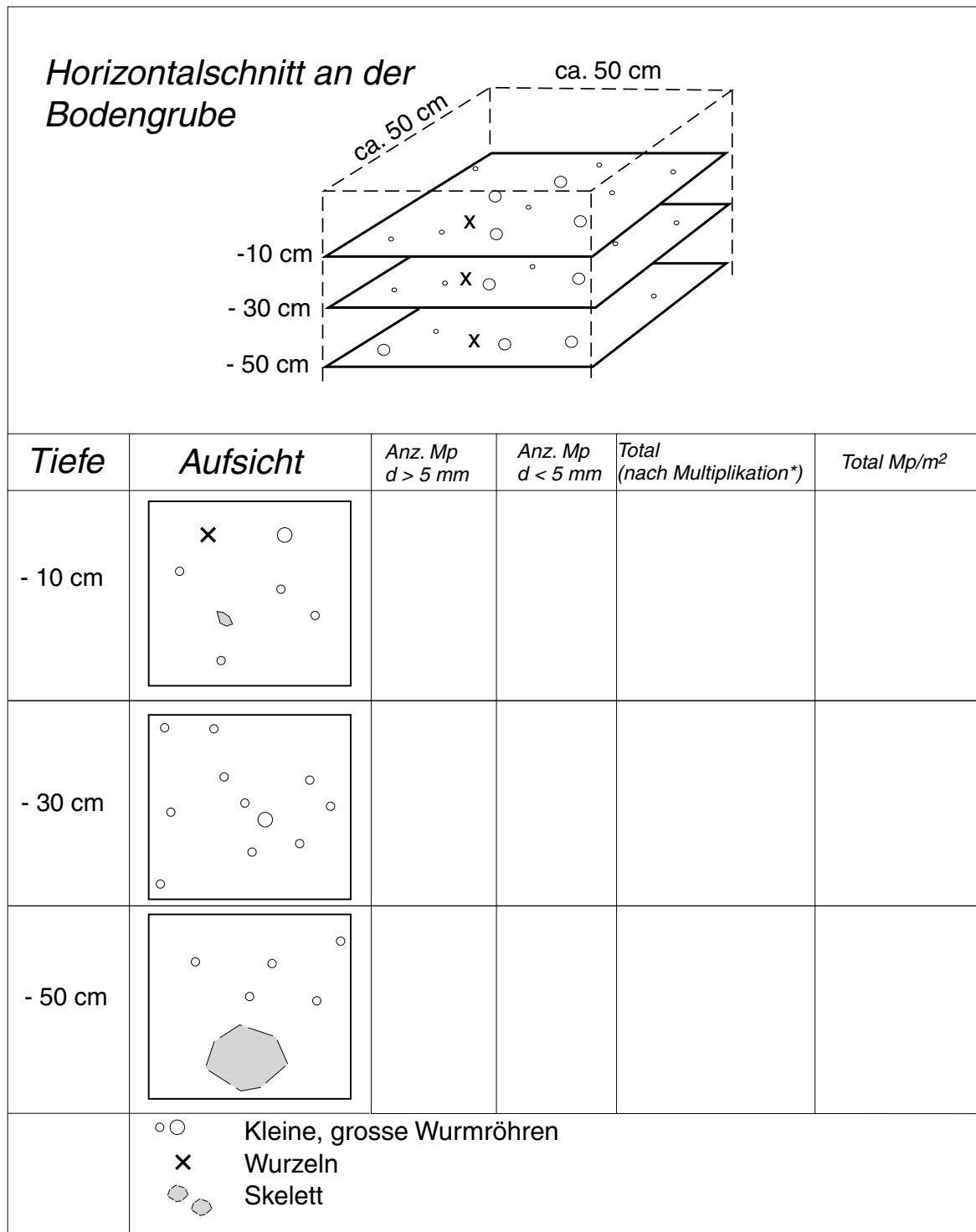


Abb. 4/10: Die Beurteilung der Makroporosität am Boden-Horizontalschnitt. (\*Die Zahl der grösseren Mp ( $d > 5 \text{ mm}$ ) werden mit Faktor 5 multipliziert).

#### 4.3.7 Packungsdichte (Dichte resp. Verdichtung der Matrix)

Die Verdichtung von Böden lässt sich durch verschiedene qualitative (Lagerungsdichte nach AG BODEN, 1994; Packungsdichte nach Harrach & Sauer, 2002 oder DIN, 1998) oder quantitative Größen (z.B. mit Stechzylinder ermittelte Lagerungsdichte, Eindringwiderstand mit Penetrometer<sup>13</sup>) beschreiben. Der Bestimmungsschlüssel bedient sich für die Beurteilung von Verdichtungen resp. der Dichte des Bodens des „integrativen“ Begriffs der Packungsdichte.

Die theoretischen Grundlagen zur Packungsdichte sind in Harrach & Sauer (2002) im Detail beschrieben. So wird unter **Packungsdichte (Pd)**<sup>14</sup> der mit gefügekundlichen Feldmethoden ermittelte Grad der Kompaktheit bzw. Lockerheit eines Bodenhorizontes verstanden, der einen fundamentalen Einfluss auf wichtige Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen wie Porengrößenverteilung, Wasserdurchlässigkeit, Durchlüftung, Durchwurzelbarkeit, Ertragsfähigkeit, Verdichtungsempfindlichkeit usw. ausübt. Diese Bodeneigenschaften bzw. Bodenfunktionen werden nicht durch die Packungsdichte allein, sondern durch die Kombination von Körnung (Textur), Packungsdichte und teils auch Wassergehalt bestimmt.

Bei Zunahme der Packungsdichte (Verdichtung des Bodens) oder bei ihrer Abnahme (Lockerung) ändert sich besonders der Sekundärporenanteil des Bodens. Unter Sekundärporen versteht man im Gegensatz zu den Korngrößenbedingten Primärporen die auf biogene Tätigkeit, Frost, Schrumpfung, mechanische Lockerung usw. zurückführbaren Grobporen. Die Packungsdichte ist folglich ein Ausdruck für den Sekundärporenanteil, der z.B. für die Luft- und Wasserdurchlässigkeit von besonderer Bedeutung ist. Der für die Infiltration wichtige Zusammenhang zwischen Packungsdichte Wasserleitfähigkeit (kf) wurde von Harrach&Sauer 2002 untersucht.

Die Packungsdichte wird in 5 Stufen eingeteilt: Pd 1-5 (Pd 1 sehr gering; Pd 2 gering; Pd 3 mittel; Pd 4 hoch; Pd 5 sehr hoch). Für die Bestimmung der Packungsdichte werden folgende Kriterien mit unterschiedlicher Gewichtung herangezogen:

**Tab. 4/7: Die Kriterien und ihre unterschiedliche Gewichtung zur Beurteilung der Packungsdichte nach Harrach & Sauer (2002).**

Kriterien	Gewichtung
Mechanischer Eindringwiderstand	mittlere Gewichtung
Aggregatgröße	mittlere Gewichtung
Zusammenhalt des Bodengefüges (Verfestigungsgrad)	mittlere Gewichtung
Lagerungsart der Aggregate	hohe Gewichtung
Anteil biogener Makroporen	hohe Gewichtung
Wurzelverteilung	sehr hohe Gewichtung

Tab. 4/8 zeigt den Zusammenhang zwischen den Gefügemerkmalen, Wurzelverteilung und ihre diagnostische Gewichtung. Sie zeigt, dass bei sehr hoher Packungsdichte Pd 5 ein hoher Eindringwiderstand zu beobachten ist, die Lagerungsart der Aggregate meist geschlossen und damit der Anteil biogener Makroporen gering ist. Dies führt dazu, dass sich das Wurzelwachstum v.a. an Rissen orientiert. Im Gegensatz dazu ist bei sehr geringer Packungsdichte Pd 1 der mechanische Eindringwiderstand gering, der Zusammenhalt des Bodens lose, die Lagerungsart der Aggregate sperrig und damit der Anteil der biogenen Makroporen recht hoch. Die Wurzeln können sich in einem solchen

Boden gleichmäßig und frei entfalten. Die Beurteilung der Packungsdichte kann weitgehend nach dieser Tabelle erfolgen. Im Anhang 5 ist die Bestimmung der Packungsdichte im Detail erklärt.

Im PBS erscheint das Kriterium „Matrix verdichtet“. Liegt die Packungsdichte bei 4 oder 5, gilt die Matrix als verdichtet, liegt sie bei 3, handelt es sich um einen Übergangsbereich und es sind u.U. weitergehende Untersuchungen notwendig.

**Tab. 4/8: Tendenzieller Zusammenhang zwischen Gefügemerkmalen, Wurzelverteilung und Packungsdichte sowie ihre diagnostische Gewichtung nach Harrach & Sauer 2002.**

Gefügemerkmale mittlerer Gewichtung			Gefügemerkmale hoher Gewichtung		Gefügeindikator sehr hoher Gewichtung	
Mechanischer Bodenwiderstand	Aggregatgröße	Zusammenhalt des Bodengefüges (Verfestigungsgrad)	Lagerungsart der Aggregate	Anteil biogener Makroporen	Wurzelverteilung	Packungsdichte (Pd)
sehr gering	sehr fein bis fein	sehr lose (nicht verfestigt)	sperrig	sehr hoch	gleichmäßig	Pd 1 sehr gering
gering	sehr fein bis mittel	lose (nicht verfestigt)	offen	hoch	gleichmäßig	Pd 2 gering
mittel	fein bis grob	mittel (schwach verfestigt)	halboffen	mittel	etwas ungleichmäßig	Pd 3 mittel
hoch	mittel bis sehr grob	fest (mittel bis stark verfestigt)	fast geschlossen	gering	starke Häufung in Rissen	Pd 4 hoch
sehr hoch	grob bis sehr grob	sehr fest (stark bis sehr stark verfestigt)	geschlossen	sehr gering	sehr starke Häufung in Rissen	Pd 5 sehr hoch

#### 4.3.8 Matrixdurchlässigkeit

Bei der Beurteilung der Abflussprozesse mit den PBS für intensive Niederschläge spielen die Makroporen eine zentrale Rolle. Bei weniger intensiven Niederschlägen (< ca. 20 mm/h) gelangt das Wasser weitgehend als Sickerfront durch die Matrix in den Boden<sup>15</sup>.

Weniger intensive Niederschläge bis zu 20 mm/h (20 mm/h entspricht  $5.5 \cdot 10^{-6}$  m/s) liegen im Bereich der gesättigten Leitfähigkeit einer gut durchlässigen Matrix. Sie können also weitgehend – zumindest über eine gewisse Zeit – durch die Matrix infiltrieren. Bei höherer Intensität ist die Infiltrationskapazität der Matrix nicht mehr ausreichend. Dann ist ein gut ausgebildetes Makroporensystem nötig, um eine gute Infiltration zu garantieren.

Rawls & Brakensiek (1989) haben die gesättigte Wasserleitfähigkeit von 2000 Bodenproben ausgewertet. Darauf basierend werden hier verschiedene Durchlässigkeitsbereiche vorgeschlagen (Abb. 4/11, Tab. 4/9). Zusätzlich sind auch die in der AG BODEN (1994) angegebenen Durchlässigkeiten für verschiedene Korngrößenklassen in der Abbildung eingetragen.

**Tab. 4/9: Die Bodenartenuntergruppen des Feinbodens eingeteilt in Durchlässigkeitsklassen.**

Durchlässigkeitsklasse	Korngröße
kaum durchlässig	Tt, TL, Tu2, Ts2, Ts3, Lts, Lt2, Lt3, Tu3
Übergangsbereich	Lu, Ls2, Ls3, Ls4, St3, Ts4, Ut4
gut durchlässig	uU, Us, Su4, Su3, Su2, St2, Sl2, Sl3, Sl4, Slu, Uls, Ut2, Ut3, (Ut4)
hoch durchlässig	Ss, (St2, Sl2, Su2)

Es wird empfohlen, im Übergangsbereich (kritische Durchlässigkeit) die Packungsdichte einzubeziehen. Horizonte mit Pd 1-2 dürften sicherlich und Pd 3 bedingt eine ausreichende Matrixdurchlässigkeit aufweisen. Zusätzliche Infiltrations- oder Klein-Beregnungsversuche verleihen der Beurteilung mehr Gewicht (Kap. 5).

#### 4.3.9 Laterale Fließwege

Im Kap. 2.3 wurden die Fließwege im Boden vorgestellt. Hier werden hinsichtlich Entstehung drei verschiedene Arten von Fließwegen (vgl. auch IHW, 2000) nochmals unterschieden:

##### **Geologisch-pedologisch bedingte Fließwege**

Über dem intakten Felsgestein liegt oft eine Verwitterungsschicht, die wesentlich höhere Durchlässigkeit als der darunterliegenden Fels resp. der darüberliegende Boden aufweist (Anhang 4, Foto17). Erreicht das infiltrierende Wasser solche hochdurchlässigen Schichten kommt es zu raschem lateralem Fließen (Scherrer, 1997<sup>16</sup>).

##### **Pedologisch bedingte Fließwege**

Dichteunterschiede in Böden können zu Stauerscheinungen und zu lateralem Abfluss von Niederschlagswasser führen. Durch Auswaschung (Suffosion) von Feinmaterial oder durch die Wühlaktivität von Bodentieren (Anhang 4, Foto 18), abgestorbene (Baum-)Wurzeln können im Boden eigentliche Pipes entstehen.

In den PBS wird bei trockenen („normalen“) Böden davon ausgegangen, dass laterale Fließwege bei einer Neigung > 10% einen Hang entwässern können. Bei nassen Böden wird hingegen davon ausgegangen, dass dieser laterale Fluss schon ab 5% möglich ist.

##### **Dränagen**

Dränagen dienen der unterirdischen Entwässerung von Böden und gelten ebenfalls als präferentielle Fließwege im Boden. Untersuchungen von Stamm, 1999 haben gezeigt, dass das Zusammenwirken von vertikalen Makroporen und Dränagen zu raschem Abfluss führt. Dränagepläne, Aussagen von Landwirten, Schächte und Ausläufe am Bach sind wichtige Hinweise auf das Vorhandensein von Dränagen. Im Gegensatz zu lateralen Fließwegen im Boden, die nebst anderen Randbedingungen zur Aktivierung eine Geländeneigung von etwa 10% benötigen, können Abflüsse in Dränagen schon bei sehr kleinen Geländeneigungen erfolgen.

Laterale Fließwege lassen sich kaum an Bodenaufschlüssen beobachten oder direkt im Gelände kartieren. Sie können deshalb indirekt durch Auswertung von Luftbildern, Zurückverfolgen von Quell-



Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit Ks [m/s]

- A**
- 1 5.8 · 10<sup>-5</sup> (210 mm/h)
  - 2 1.7 · 10<sup>-5</sup> (61 mm/h)
  - 3 7.2 · 10<sup>-6</sup> (25 mm/h)
  - 4 3.6 · 10<sup>-6</sup> (13 mm/h)
  - 5 1.8 · 10<sup>-6</sup> (6 mm/h)
  - 6 1.2 · 10<sup>-6</sup> (4 mm/h)
  - 7 6.3 · 10<sup>-7</sup> (2 mm/h)
  - 8 4.1 · 10<sup>-7</sup> (1.5 mm/h)
  - 9 3.3 · 10<sup>-7</sup> (1.2 mm/h)
  - 10 2.5 · 10<sup>-7</sup> (0.9 mm/h)
  - 11 1.7 · 10<sup>-7</sup> (0.6 mm/h)
- B**
- Ss 4.0 · 10<sup>-5</sup> (145 mm/h)
  - Sl2 1.3 · 10<sup>-5</sup> (45.0 mm/h)
  - Sl3 5.4 · 10<sup>-5</sup> (19.6 mm/h)
  - Sl4 5.0 · 10<sup>-6</sup> (17.9 mm/h)
  - Slu 4.7 · 10<sup>-6</sup> (17.1 mm/h)
  - Sl2 1.1 · 10<sup>-5</sup> (37.9 mm/h)
  - Su2 1.8 · 10<sup>-5</sup> (65.4 mm/h)
  - Su3 8.7 · 10<sup>-6</sup> (31.3 mm/h)
  - Su4 4.7 · 10<sup>-6</sup> (17.1 mm/h)
  - Ls2 4.7 · 10<sup>-6</sup> (17.1 mm/h)
  - Ls3 1.5 · 10<sup>-6</sup> (5.4 mm/h)
  - Ls4 2.3 · 10<sup>-6</sup> (8.3 mm/h)
  - Lt2 1.5 · 10<sup>-6</sup> (5.4 mm/h)
  - Lt3 1.2 · 10<sup>-6</sup> (4.2 mm/h)
  - Lts 1.4 · 10<sup>-6</sup> (5.0 mm/h)
  - Lu 3.0 · 10<sup>-6</sup> (10.8 mm/h)
  - Uu 1.9 · 10<sup>-6</sup> (6.7 mm/h)
  - Uls 4.1 · 10<sup>-6</sup> (14.6 mm/h)
  - Us 2.5 · 10<sup>-6</sup> (9.2 mm/h)
  - Ut2 3.5 · 10<sup>-6</sup> (12.5 mm/h)
  - Ut3 4.4 · 10<sup>-6</sup> (15.8 mm/h)
  - Ut4 3.6 · 10<sup>-6</sup> (12.9 mm/h)
  - Tt 8.1 · 10<sup>-7</sup> (2.9 mm/h)
  - Tl 1.2 · 10<sup>-6</sup> (4.2 mm/h)
  - Tu2 2.3 · 10<sup>-6</sup> (8.3 mm/h)
  - Tu3 3.1 · 10<sup>-6</sup> (11.3 mm/h)
  - Tu4 3.9 · 10<sup>-6</sup> (14.2 mm/h)

Matrix-Durchlässigkeit

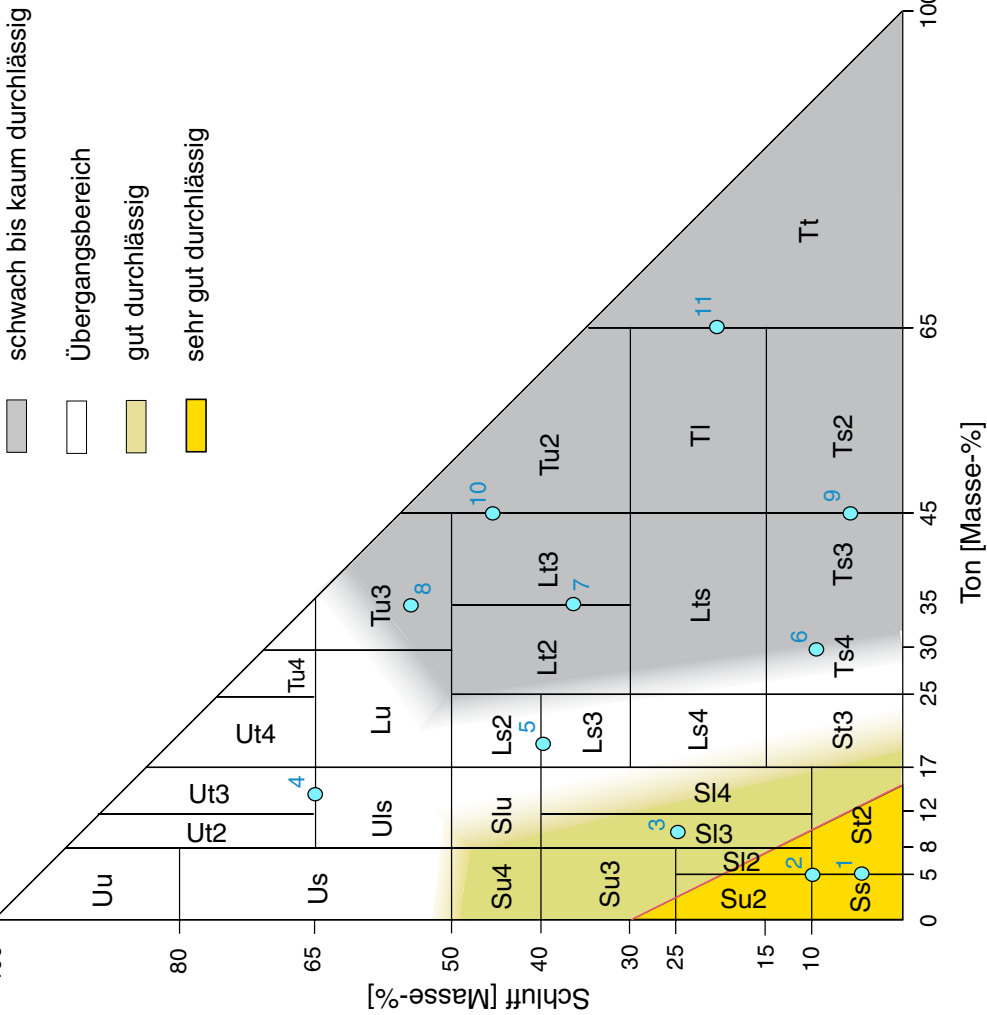


Abb. 4/11: Bodenartdiagramm der Bodenartenuntergruppen eingeteilt in 4 Durchlässigkeitsklassen. Ebenfalls eingetragen sind die analysierten Durchlässigkeiten nach RAWLS & BRAKEN-SIEK, 1989 (A) und die Werte der AG BODEN, 1994 (B).



wasser- oder Return Flow-Wasseraustritten, Erfassen von oberflächennahen Wühlgängen, Suchen von schmalen Rinnen ohne oberflächliche Fließspuren, welche auf unterirdische Auswaschungsvorgänge verbunden mit Nachsacken des Bodens hindeuten u.a., ermittelt werden (vgl. Kap. 3.2.2). Oft kann dabei weniger das effektive Vorkommen solcher Fließwege, als das Potenzial zu deren Bildung an einem Standort oder Hang eingeschätzt werden.

#### 4.3.10 Hydromorphie<sup>17</sup>

Rabenhorst et al. (1996) geben einen guten Überblick über Vernässungen in Böden und deren Erfassung. Die Hydromorphie wird auf zwei verschiedene Arten in den PBS berücksichtigt. Zum einen bei der Entscheidung, ob es sich um „normale“ Böden oder um „maßgeblich von Grund- und Stauwasser beeinflusste Böden“ handelt, und zum andern durch verschiedene Kriterien im PBS. Ob bei einem Standort von einem „maßgeblich von Grund- oder Stauwasser beeinflussten“ Boden auszugehen ist, kann anhand von Anzeichen für Hydromorphie oder eines vorhandenen Wasserspiegels beurteilt werden.

#### **Unterscheidung „normale“ Böden oder von Grund- und Stauwasser beeinflusste Böden**

- Wasserspiegel erzeugt durch Grundwasser: Unter diese Kategorie fallen sämtliche Grundwasserstufen gemäss Tab. 42 AG BODEN (GWS1-GWS6). Für die Prozessbeurteilung soll zuerst von einem mittleren Grundwasserabstand (MGW) ausgegangen werden. Je nach Fragestellung kann aber auch der mittlere Hochstand des Grundwassers (MHGW) von Belang sein.
- Wasserspiegel erzeugt durch Stauwasser sind oft vorübergehender Natur. Oberflächennahe Wasserspiegel verschwinden meist rasch beim Übergang von der Nass- zur Trockenphase (AG BODEN, 1994). Im Feld ist daher nur anhand der Vergleypungsspuren am Bodenprofil auf solche Stauwasserspiegel zu schliessen.

#### **Im PBS enthaltene Kriterien:**

- Als Flurabstand wird der vertikale Abstand des Grund- oder Stauwasserspiegels zur Oberfläche betrachtet.
- Mit der Lage der Vergleypungsmerkmale sind Oxidations- und Reduktionserscheinungen gemeint.
- Der Vergleypungsgrad wird über den Vernässungsgrad (AG BODEN, Tab. 44) beurteilt. Die Stufen Vn0 – Vn1 (KA 4, Tab. 44) werden dem „Vernässungsgrad schwach“ (Vergleypungsgrad) zugeteilt.

#### 4.3.11 Geologie

Die Geologie beeinflusst zusammen mit anderen Faktoren die Entstehung von Böden. Je nach Verwitterungsprodukt der Geologie entstehen durchlässigere und weniger durchlässige Böden. Aber auch der geologische Untergrund kann je nach Zusammensetzung der Schichten unterschiedlich durchlässig sein. Sandige Flussschotter oder stark verkarstete Kalke weisen extrem hohe Durchlässigkeiten bis zu 10<sup>-3</sup> m/s auf. Im Gegensatz dazu zeigt unverwittertes Kristallin Durchlässigkeiten von 10<sup>-11</sup> m/s. Bei großer Durchlässigkeit ist mit Tiefensickerung zu rechnen. Kenntnisse über die Durchlässigkeit der Geologie sind daher wichtig.

In Rheinland-Pfalz sind verschiedene geologische Karten (1 : 25 000, 1 : 50 000) verfügbar, die in den Erläuterungen Angaben über die Durchlässigkeiten beinhalten. Zudem existieren im Maßstab 1 : 200 000 Kartenwerke der Grundwasserlandschaften oder der Hydrogeologie.

## 5 Zusatzuntersuchungen im Feld zur Verifikation der hergeleiteten Prozesse

### 5.1 Einleitung

Anhand der im Kapitel 4.3 aufgeführten Kriterien und Beurteilungsrichtlinien lässt sich der dominante Abflussprozess identifizieren. Bei Unsicherheiten und zur Verifikation der Prozessidentifikation soll auf hydrologische Zusatzuntersuchungen zurückgegriffen werden. Tabelle 5/1 (IHW, 2000 leicht verändert) bewertet die Aussagekraft verschiedener Methoden.

Die Tabelle zeigt, dass Infiltrometer- und Kleinberegnungsversuche etliche Informationen hinsichtlich Infiltrationshemmnissen liefern. Für die Beurteilung von SOF sind Kleinberegnungsversuche besser geeignet als Infiltrometer. Die Durchführung von Infiltrometer- und Kleinberegnungsversuche mit und ohne Tracer werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Laterale Fließprozesse im Boden lassen sich mit diesen Hilfsmitteln nur in besonderen Fällen erfassen.

### 5.2 Versuche mit Doppelringinfiltrometer

Beim Doppelringinfiltrometer (Abb. 5/1) werden zwei Metallringe (Durchmesser 30 cm und 50 cm) in den Boden getrieben. Es wird vorsichtig Wasser eingefüllt und anschliessend im inneren Ring die Änderung der Wasserspiegelhöhe und damit die Infiltration in zeitlicher Auflösung gemessen. Der äussere Ring dient dazu, Randeffekte zu verringern. Bei Infiltrometerversuchen wird an der Bodenoberfläche ein Aufstau erzeugt, was bei einem Niederschlag normalerweise nicht vorkommt. Deshalb ist die gemessene Infiltrationsrate höher als bei natürlichen Niederschlägen. Dennoch bietet diese Methode eine Möglichkeit, verschiedene Standorte zu vergleichen und bei vorsichtiger Interpretation auch Aussagen über die natürliche Infiltrationsrate zu treffen.

### 5.3 Versuche mit Kleinberegnungsanlage

Abbildung 5/2 zeigt die vom IHW entwickelte Kleinberegnungsanlage. Andere Anlagen sind die von Bork und Bork, 1981 und Markart und Kohl (mündl. Mitteilung). Hier wird mit einer batteriebetriebenen Pumpe Wasser über einen Schlauch vom Vorratsbehälter zur Düse gepumpt und über einer kreisförmigen Fläche von 1 m<sup>2</sup> verregnet. Bei kontinuierlicher Beregnung lassen sich Intensitäten von 50 mm h<sup>-1</sup> bis 150 mm h<sup>-1</sup> erzeugen, mit Intervall-Beregnung solche von 1 mm h<sup>-1</sup> bis 50 mm h<sup>-1</sup>. Die Beregnungsfläche wird durch einen Metallring abgegrenzt, der 10 cm in den Humus abgeteuft wird. Der Übergangsbereich am Metallring wird mit Ton abgedichtet. Auftretender Oberflächenabfluss verlässt den Ring durch einen Auslass an der tiefsten Stelle und wird durch einen Schlauch zu einer Wippe geführt<sup>18</sup>.

Der Aufbau der Anlage, die mit sämtlichem Zubehör etwa 80 kg wiegt, dauert zwischen 30 und 45 min. Je nach Versuchsdauer können mit dieser Anlage 4 bis 6 Beregnungen pro Tag durchgeführt werden.



Abb. 5/1: Doppelringinfiltrrometer (IHW, 2000)

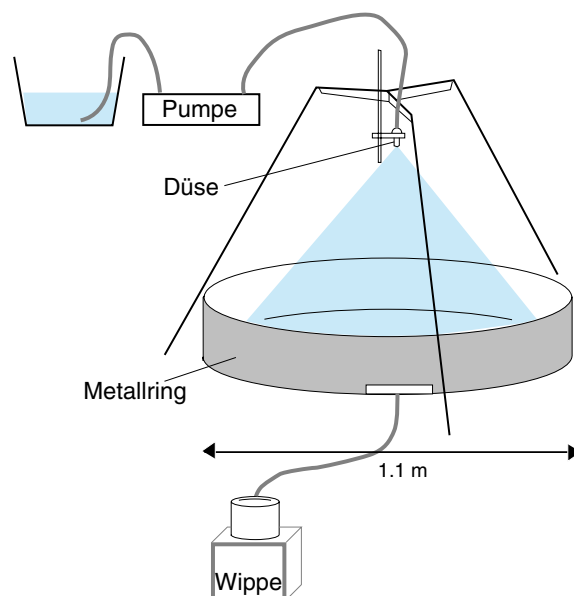


Abb. 5/2: Versuchaufbau Kleinberegnungsanlage (IHW, 2000)

**Tab. 5/1: Informationen und Hinweise, die Infiltrometer- und Kleinberegnungsversuche liefern.**

Abflussprozess	Beurteilungskriterium	Infiltrometer				Kleinberegnungsversuch			
		Wasser		Tracer		Wasser		Tracer	
		Ebene	Hang	Ebene	Hang	Ebene	Hang	Ebene	Hang
HOF	Max. Infiltrationsrate	D	z	D	z	z	z	z	z
	Konst. Infiltrationsrate	z	z	z	z	D	D	D	D
	Verschlämmungsneigung	b	z	z	z	z	z	z	z
	Bodenwassergehalt	z	z	z	z	D	D	D	D
SOF	Makroporosität	-	-	D	z	-	-	D	D
	Sättigungsdefizit	z	z	z	z	D	D	D	D
	Muldenrückhalt	-	-	-	-	D	D	D	D
SSF	Laterale Fließwege	-	-	-	D	-	b	-	D
	Laterale Durchlässigkeit	-	-	-	z	-	-	-	-
DP	Minimale Infiltrationsrate	z	z	z	z	z	z	z	z
	Vertikale Fließwege (Mp)	-	-	z	z	z	z	D	D
D	detaillierte Aussagen mit großem Informationsgehalt								
b	bedingt Aussagen möglich								
z	zum Teil Aussagen möglich								
-	keine Aussagen möglich								

#### 5.4 Einsatz von Tracern bei Infiltrometer- und Kleinberegnungsversuchen

Mit dem Einsatz von Tracern kann der Informationsgehalt der Infiltrometer- und Kleinberegnungsversuche deutlich erhöht werden (Ghodrati, 1990; Flury et al., 1994). Ein geeigneter Tracer zur Visualisierung von Fließwegen ist der Farbstoff Brilliant Blue FCF. Er stellt einen guten Kompromiss zwischen geringer Sorption, Sichtbarkeit und einer hohen Umweltverträglichkeit dar (Flury & Flühler, 1995). Der Tracer wird je nach Fragestellung dem Beregnungswasser kontinuierlich oder nach einer bestimmten Infiltrationsmenge zugegeben. Nach dem Beregnungsversuch werden auf der Versuchsfläche vorsichtig horizontale und/oder vertikale Bodenprofile präpariert und fotografiert. Mit dieser Methode lassen sich einzelne Fließwege und das Ausbreitungsmuster des Wassers im Boden untersuchen. Damit wird die Zuordnung von Flächen zu bestimmten Abflussprozessen erleichtert.

## 5.5 Tracerversuche an Hängen

Mit Fluoreszenztracern (Uranin, Eosin) oder anionischen Tracern (Chlorid, Bromid) lassen sich laterale Fließwege an Hängen untersuchen. Dazu wird an einer Stelle im Hang oberflächlich oder im Boden der Tracer eingespeist und hangabwärts das austretende Wasser oder das Wasser in der gesättigten Zone auf seine Tracerkonzentration hin getestet. Solche Versuche können unter stationären Bedingungen durchgeführt werden, was aber eine künstliche Beregnung voraussetzt, oder unter instationären Bedingungen, bei natürlichen Niederschlagsereignissen, was meist eine lange Versuchsdauer bedingt. Besonders in Gebieten, wo die Prozessevaluation ausgedehnte Areale mit lateralen Abflussprozessen im Boden ergibt, werden solche Versuche empfohlen.

## 6 Beispiele der Prozessbeurteilung auf verschiedenen Raum-Skalen

### 6.1 Einleitung

An dieser Stelle werden einzelne Beispiele der Prozessevaluation vorgestellt. Damit lässt sich die Vorgehensweise am praktischen Beispiel nachvollziehen. Zudem wird auch ein Feldformular zur Erfassung der Kriterien gezeigt und anhand zweier Standorte mit unterschiedlicher Landnutzung wird die Erfassung der Standorteigenschaften und die Evaluation der dominanten Abflussprozesse demonstriert. Am Einzugsgebiet Idarbach bei Allenbach werden an einer Prozess-Catena die unterschiedlichen Abflussprozesse präsentiert. Die flächendeckende Prozesskarte stellt das Endprodukt der räumlichen Übertragung der vom Standort ausgehenden Abflussprozess-Kartierung dar.

### 6.2 Die Prozessbeurteilung am Standort

#### 6.2.1 Unterlagen zur Erhebung

Die Untersuchungen der Standorte laufen nach einem einheitlichen Vorgehen ab, welches beispielhaft in der Abbildung 6/1, 6/4 und 6/5 dargestellt ist. Abbildung 6/1 zeigt das Formular zur Erfassung abflussrelevanter Kriterien. Neben den Standortdaten (Lage, Relief, Bodentyp, Geologie) sind die in den PBS enthaltenen Kriterien aufgeführt. Die Mp-Zahl kann in das Formular dem Bodenhorizont entsprechend eingetragen und anhand des Maßstabes die Makroporosität bestimmt werden. Für die Beurteilung der Matrixdurchlässigkeit besteht ein Korngrößen-Dreieck mit definierten Durchlässigkeitsbereichen. Allfällige Zusatzuntersuchungen (Infiltrometersuche und Kleinberregungsversuche mit und ohne Tracerzugabe) können als Graphen (Infiltrations- oder Oberflächenabflussmenge in Abhängigkeit der Zeit) oder einfach als Werte in die freie Fläche eingetragen werden. Basierend auf den Angaben auf diesem Formular können sämtliche Entscheidungsfragen im PBS beantwortet werden. An den Beispielen Massweiler P02 und P07 werden zwei Standortuntersuchungen und Prozessbeurteilungen vorgestellt.

#### 6.2.2 Die Prozessbeurteilung an zwei Standorten und Prozesskarte Massweiler-Kneispermühle

##### 6.2.2.1 Einleitung

Im September 2000 wurden in der Gegend von Massweiler nordwestlich von Pirmasens verschiedene Standorte nach Abflussprozessen untersucht. Das Untersuchungsgebiet Massweiler stellt eine typische Raumeinheit Saarländisch-Pfälzischen Muschelkalkgebiets dar. Das Untersuchungsgebiet ist im Kartenausschnitt (Abb. 6/2) dargestellt und die im Landwirtschaftsgebiet liegenden Untersuchungsstandorte (P01 bis P07) sind eingetragen. Die zertalte Plateaulandschaft wird zu einem überwiegenden Teil der Südwestpfälzischen Hochfläche zugeordnet und besteht aus Hochflächen um 350 m ü. NN und verzweigten Tälern mit einer Talsohle auf ca. 230 m ü. NN. Die steileren Abhänge weisen meist Wald auf, während die Hochflächen vorwiegend ackerbaulich aber, z.T. auch als Grünland genutzt werden.



### 6.2.2.2 Geologie

Die Angaben zu Geologie, Böden und Klima entstammen den Erläuterungen zur geologischen Karte Pirmasens-Nord (Konrad, 1975). In der Abbildung 6/3 ist die Verbreitung der geologischen Schichten dargestellt. Die höher gelegenen Gebiete bestehen aus dem triadischen **Unteren Muschelkalk** (mu2 und mu1). Der Wellenkalk (mu2) tritt kaum auf.

Hingegen sind die Muschelsandsteine und die mergeligen Schichten stark vertreten. Eine Wechselfolge von gelblichgrauen Sandsteinen und grüngrauen mehr oder minder sandigen Tonsteinen bauen diese Schichten auf. Gegen unten schliessen die Schichten des **Oberen Buntsandsteins** (so2 und so1) an. Die Schichten des Voltzien-Sandstein (so2) bestehen aus weniger durchlässigen Feinsandstein, während die anschliessenden Schichten des so1, die sog. Zwischenschichten, aus besser durchlässigen gröberem Sandsteinen bestehen.

### 6.2.2.3 Klima

Der jährliche Niederschlag liegt im Bereich zwischen 600 und 900 mm/a, die mittlere Jahrestemperatur bei 8.7 ° C.

### 6.2.2.4 Massweiler, Standort P02: Ackerstandort auf Muschelsandstein

Die Lage der Bodengrube PO2 ist aus der Karte und der Standortcharakterisierung ersichtlich (Abb. 6/2 und 3 und 6/4).

### Bodenansprache

Auf den Schichten des Voltzien-Sandsteins hat sich ein Pseudogley-Boden entwickelt. Unter dem 0.2 m mächtigen Ap-Horizont liegt ein beigebrauner Sw-Horizont mit grauen Flecken. Es handelt sich um einen regenwurmreichen sandigen Silt. In 0.6 m Tiefe folgt der ebenfalls beigebraune sandig-siltige Sd-Horizont. Jedoch tritt mit zunehmender Tiefe die beigebraune Farbe zu Gunsten von roten und grauen Flecken sowie starken Marmorierungen (25%) in den Hintergrund. Im ganzen Profil war kein Skelett feststellbar.

### Beurteilung der abflussrelevanten Kriterien

Die Abbildung 6/5 zeigt die Beurteilung abflussrelevanter Kriterien. Trotz ergiebiger Niederschläge im Vorfeld der Untersuchungen wurden kaum Hinweise auf Verschlammungen auf der Bodenoberfläche festgestellt. Zudem blieben beim Verschlammungstest (einfacher Nass-Siebungstest) die Bodenaggregate stabil. Die Makroporendichte wurde aufgrund der Auszählung als hoch angesprochen. Der Tracerversuch hingegen brachte aufgrund der hohen Bodenfeuchte nicht die gewünschten Resultate. An diesem Standort würde sich ein (nochmaliger) Infiltrationsversuch kombiniert mit Tracereinsatz bei weniger feuchten Bodenverhältnissen lohnen.

### Prozessbeurteilung

Die Abbildungen 6/6 (niedrige Intensität) und 6/7 (hohe Intensität) zeigen die Prozessbeurteilung. Bei niedriger Niederschlagsintensität erfolgt SOF3. Dank günstiger Infiltrationsbedingungen (für Ackerstandorte hohe Makroporosität) kann ein großer Teil des oft feuchten Bodenprofils gesättigt werden. Deshalb tritt Oberflächenabfluss erst verzögert auf<sup>19</sup>

**Beurteilung abflussrelevanter Kriterien**

Einzugsgebiet:  
 Landnutzung:  
 Bemerkungen:

Standort:  
 Relief:

Rechtswert:  
 Hangneigung:

Hochwert:  
 Bodentyp:

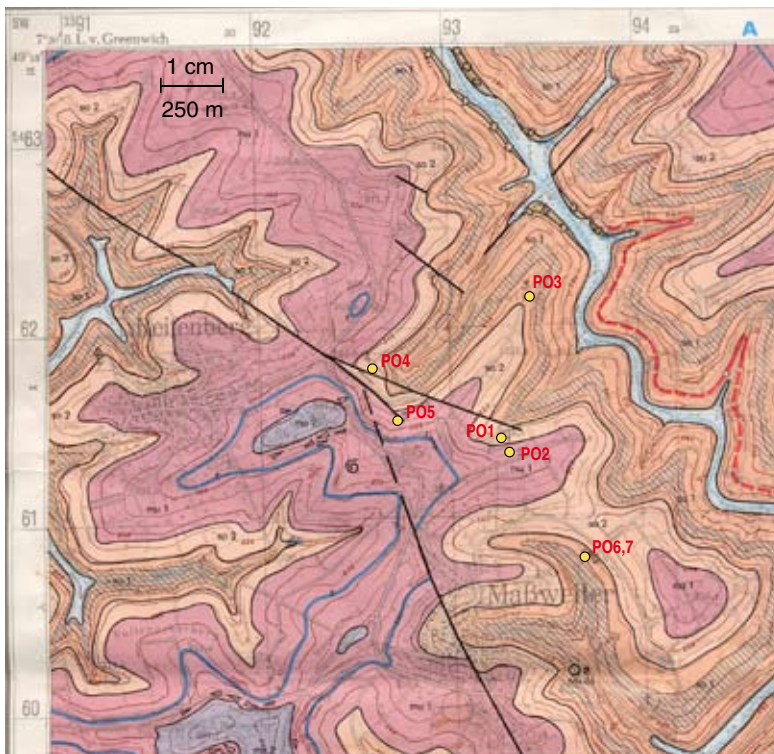
Höhe über NN:  
 Geologie:

<p><b>Beurteilung der Makroporosität</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Tiefe</th> <th>Aufsicht</th> <th>Aufz. Bl. (d &gt; 2,5 mm)</th> <th>Aufz. Bl. (d &gt; 5 mm)</th> <th>Wurzeln</th> <th>Sklett</th> <th>Wurzeln</th> <th>Sklett</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-10 cm</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>-30 cm</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>-50 cm</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Tiefe	Aufsicht	Aufz. Bl. (d > 2,5 mm)	Aufz. Bl. (d > 5 mm)	Wurzeln	Sklett	Wurzeln	Sklett	-10 cm								-30 cm								-50 cm								<p><b>Beurteilung der Matrix</b></p>	<p><b>Hydrologische Zusatzuntersuchungen</b></p> <p>Infiltrometersversuch (mit Tracer):</p> <p>Kleinberechnungsvers. (mit Tracer):</p>
Tiefe	Aufsicht	Aufz. Bl. (d > 2,5 mm)	Aufz. Bl. (d > 5 mm)	Wurzeln	Sklett	Wurzeln	Sklett																											
-10 cm																																		
-30 cm																																		
-50 cm																																		
<p><b>Laterale Fließwege</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Beobachtete Fließwege</th> <th>Beurteilung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>präferentielle Fließwege</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Potentielle Fließwege</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Beobachtete Fließwege	Beurteilung	präferentielle Fließwege		Potentielle Fließwege		<p><b>Oberfläche</b></p> <p>Deckungsgrad: _____</p> <p>Hydrophobizität: _____</p> <p>Hydrophober Humus: _____</p> <p>Oberflächenrauigkeit: _____</p> <p><b>Oberboden</b></p> <p>Matrix verdichtet (Packungsdichte): _____</p> <p>Makroporosität: _____</p> <p>Verschlämmungsneigung: _____</p> <p>Durchwurzelung: _____</p> <p>Matrix durchlässig: _____</p> <p><b>Unterboden</b></p> <p>Pflugsole, Matrix verdichtet, (Pd): _____</p> <p>Matrixdurchlässigkeit: _____</p> <p>Mächtigkeit: _____</p> <p>laterale Fließwege: _____</p> <p>Drainagen: _____</p> <p>Makroporosität: _____</p> <p>Vergleyungsgrad: _____</p> <p>Grundwasserstufe: _____</p> <p>Flurabstand Grundwasser: _____</p> <p>Lage der Stauschicht (in mächtigen bis sehr mächtigen Böden): _____</p> <p>Lage der Vergleyungsmerkmale: _____</p> <p>Laterale Fließwege: _____</p> <p>Durchlässigkeit Geologie: _____</p>	<p>hohe Niederschlagsintensität</p> <p>niedrige Niederschlagsintensität</p> <p>Prozessevaluation:</p>																										
Beobachtete Fließwege	Beurteilung																																	
präferentielle Fließwege																																		
Potentielle Fließwege																																		

Abb. 6/1: Feldblatt zur Erfassung der abflussrelevanten Kriterien.



Abb. 6/2: Topographische Karte (1:50'000, L6710, Pirmasens-Nord, Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, 1993) mit der Lage der Untersuchungsstandorte (P01-P07).



	Mergelige Schichten, Muschelsandstein Sand-, Schluff-, und Tonsteine, grau, teilweise karbonatisch, im oberen Teil Mergel mit Dolomitbänken, τ = Haupt-Terebratelbank		Wellenkalk Kalksteine, blaugrau, feinschichtig, an der Basis Karbonatbreccie
	Zwischenschichten, Hauptkonglomerat, Obere Felszone Sandsteine, im unteren Teil rötlichgrau, grob geröllführend; nach oben graurot, glimmerführend, geröllfrei, mit Karbonatnauren und Dolomitbröckelbänken; oberste Partien Sandsteine, mittel- und grobkörnig		Voltziensandstein Sandsteine, rot und gebleicht, mittel- bis grobkörnig, Tonsteine rot untergeordnet auch grüngrau

Abb. 6/3: Geologische Karte im Massstab 1 : 25'000 (Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz, 1974, Blatt 6711, Pirmasens-Nord).

### 6.2.2.5 Massweiler, Standort P06: Mähwiese auf Voltzien-Sandstein

An diesen Standort wurde eine lange Schürfgrube (Graben) angelegt, welche sowohl die Acker- als auch die Grünlandparzelle erfasste.

#### Bodenansprache

An diesem, 12% geneigten Standort wurde auf den Zwischenschichten (Ob. Buntsandstein) eine flachgründige Ranker-Braunerde aufgeschlossen (Abb. 6/8). Der lange Graben zeigte die variierende Gründigkeit des Bodens sehr eindrücklich. Die sandig-lehmige Bodenmatrix wies weder Verdichtungen, noch viele Mp im Oberboden aus (Abb. 6/9). Im Unterboden konnten etliche Mp beobachtet werden und mit der Tiefe nahm der Skelettgehalt auf ca. 10% zu. Die Zwischenschichten des ob. Buntsandsteins, die aus grobkörnigen Sandsteinen aufgebaut sind, zeigen bessere Durchlässigkeit als der Voltzien-Sandstein. Die Grabarbeiten brachten einen plattigen Sandstein mit etlichen Fugen zutage, die für infiltrierendes Wasser durchdringbar scheinen.

#### Prozessbeurteilung

Aufgrund der Beurteilung der abflussrelevanten Kriterien kann die Prozessbeurteilung in Abbildung 6/10 (niedrige) und 6/11 (hohe Intensität) vorgenommen werden. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit der Matrix und der (wahrscheinlich) guten Durchlässigkeit der Geologie dürfte sich bei ergiebigen, wenig intensiven Niederschlägen Tiefsickerung als dominanter Prozess einstellen. Ebenfalls eingetragen ist der Beurteilungsweg, wenn von stauendem Untergrund ausgegangen wird (SSF3).

Bei intensiven Niederschlägen stellt die Mp-Armut im Oberboden ein Hemmnis für die Infiltration dar. In jenem Fall stellt sich HOF 2 als dominanter Prozess ein. Die Erfassung der Mp in der Umgebung dieses Standorts und weitere Untersuchungen (Kleinberegnungs- und Infiltrationsversuche mit oder ohne Tracer) müssen hingegen Aufschluss über die Infiltrationsverhältnisse bei Gewitterniederschlägen geben.

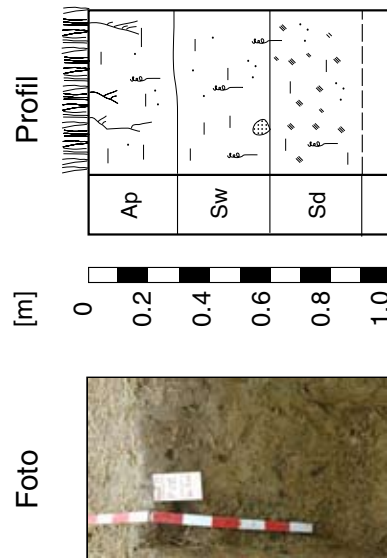
### Standort: Massweiler P02 (20.9.2000): Pseudogley Bodenansprache

**Standortcharakterisierung**

Häselbergernot  
 Bodentyp: Pseudogley  
 Geologie: Muschelsandstein  
 Hangneigung: 7 %  
 Landnutzung: Getreidefeld, abgeerntet  
 Topographie: Oberhang  
 Koordinaten: 93 300 / 61 340  
 Höhe: 355 m ü. NN  
 Exposition: N

Oberfläche und Vegetation			
Deckungsgrad	Vegetation (Zeigerpflanzen)	Aggregatsstabilität, Verschlämmungsneigung	Bemerkungen (Witterungsbedingungen, Bodenzustand)
25-30% im abgeernteten Zustand	Weizen (Stoppelfeld)	Aggregate stabil Verschlämmungsneigung mässig, Oberfläche leicht verschlämmt *	Witterung während der Untersuchung: sonnig, windig  * Nach Niederschlägen (> 50 mm in den letzten 10 Tagen) Bodenzustand feucht
>70% im Zustand vor der Ernte		Verschlämmungstest: kaum Zerfall	

### Bodenprofil P02



Farbe	pH	Kalkgeh.	Aggregate	Körnungsansprache	Pd Schätzwert	Durchwurzelung	Fallprobe	Makroporen allg.	Skelettgehalt	Bemerkungen
braun	6	-	Sub-Poly.	sU			Monolith bleibt kompakt*	einige	-	
beige-braun mit grünen Flecken	6	-	Sub-Poly.	sU			Monolith* bleibt kompakt	einige	-	
beige-braun Marmorflecken und rote Flecken				sU					-	

\* aufgrund der grossen Feuchte kaum Zerfall.

Abb. 6/4:

Die Bodenansprache am Standort Massweiler P02.



**Beurteilung abflussrelevanter Kriterien**  
 Einzugsgebiet: Massweiler Standort: P02    Rechtswert: 93300    Hochwert: 61340    Höhe über NN.: 355 m ü. NN  
 Landnutzung: Getreide    Relief: Oberhang    Hangneigung: 7 %    Bodentyp: Pseudogley    Geologie: Muschelsandstein  
 Bemerkungen: Aufnahme: 20.9.2000

### Beurteilung der Makroporosität

Tiefe	Aufsicht	Anz. Mp. > 2.5 mm	Anz. Mp. > 3 mm	Klein, grosse Wurmböhrn	Wurzeln	Stielst.
-10 cm		4	13	33	132	
-30 cm		6	12	42	168	
-60 cm		7	17	45	180	

0 20 40 60 80 100 Mp/m²  
 gering Makroporosität gross

### Beurteilung der Matrix

Matrix Durchlässigkeit:  
 - schwach bis kaum durchlässig  
 - Übergangsbereich  
 - gut durchlässig  
 - sehr gut durchlässig

Unterboden (●)  
 Oberboden (○)

### Oberfläche

Deckungsgrad: 25-30 % (\* >70 %)  
 Hydrophobizität: -  
 Hydrophober Humus: -  
 Oberflächenrauigkeit: fein

### Oberboden

Matrix verdichtet, Pd: nein  
 Makroporosität: gross - sehr gross  
 Matrix dicht gelagert: nein  
 Verschlammungsneigung: gering (Ver2)  
 Durchwurzelung: schwach  
 Matrix durchlässig: Übergangsbereich

### Unterboden

Pflugschle, Matrix verdichtet, Pd: keine  
 Matrixdurchlässigkeit: Übergangsbereich  
 Mächtigkeit: > 1 m  
 laterale Fließwege: keine  
 Drainagen: keine  
 Makroporosität: gross - sehr gross  
 Grundwasserstufe: -  
 Vergleichungsgrad: -  
 Flurbestand Grundwasser: -  
 Lage der Stauschicht (in mächtigen bis sehr mächtigen Böden): --  
 Lage der Vergleichungsmerkmale: 0,6 m  
 Laterale Fließwege: keine

Durchlässigkeit Geologie: gering  
 (\* vor der Ernte)

### Laterale Fließwege

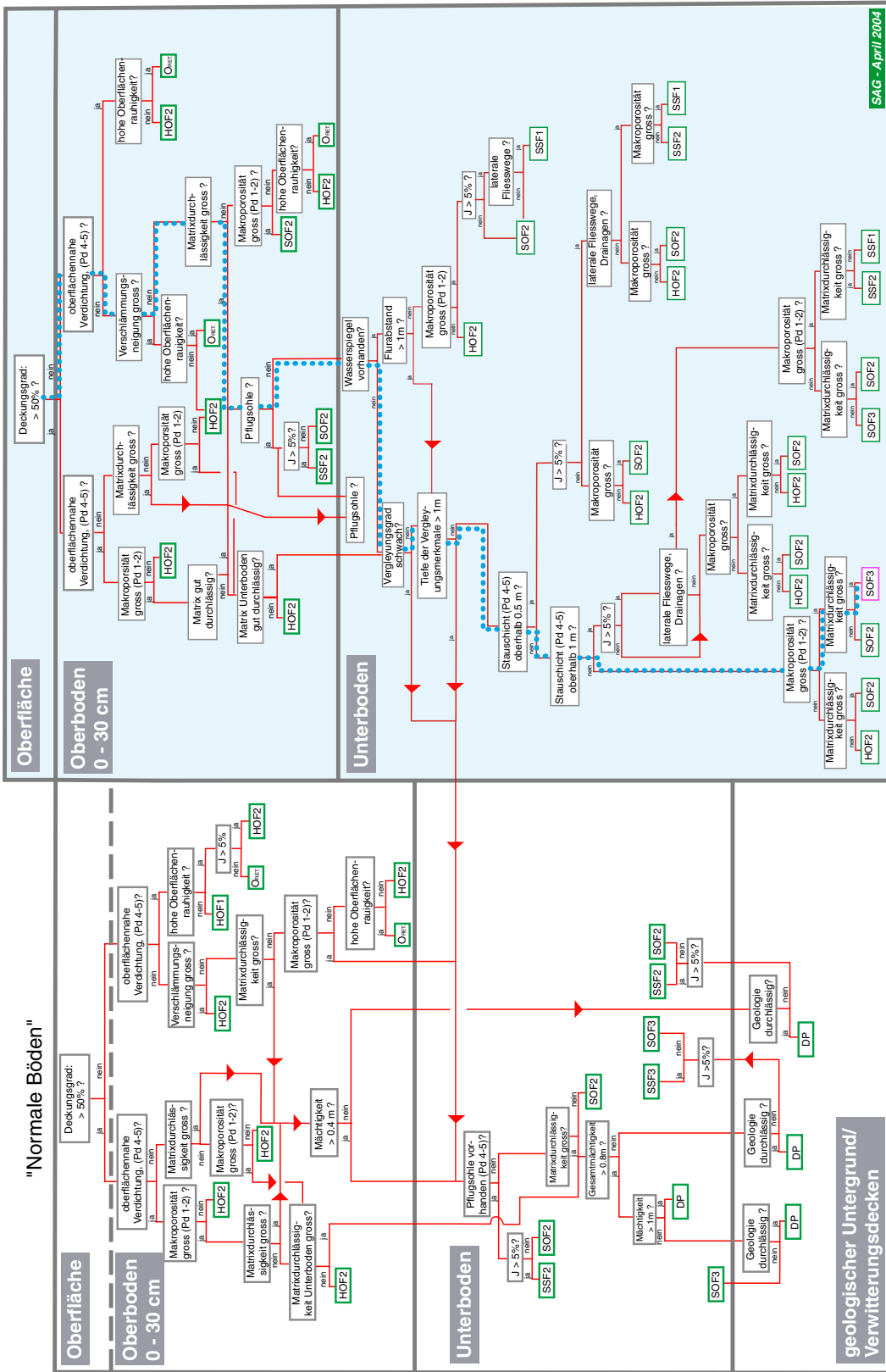
Beurteilung	Beurteilung
präferentielle Fließwege	
Beobachtete Fließwege	
Potenitielle Fließwege	

Hydrologische Zusatzuntersuchungen  
 Infiltrationsversuch (mit Tracer):  
 Kleinbereichungsvers. (mit Tracer):

hohe Niederschlagsintensität	SOF2
niedrige Niederschlagsintensität	SOF3
Prozessevaluation:	

Abb. 6/5: Feldblatt zur Erfassung der abflussrelevanten Kriterien aus Standort Massweiler (P02).

Prozess-Beurteilungsschema: **Acker**  
 Niederschlag: **Extensive aber lange Niederschläge**  
 Hangneigung: **20% < J < 3%**  
**"Von Grund- und Stauwasser massgeblich beeinflusste Böden"**



SAG - April 2004

Abb. 6/6: Prozessbeurteilung am Standort Massweiler P02 (niedrige Niederschlagsintensität).



"Von Grund- und Stauwasser massgeblich beeinflusste Böden"

Prozess-Beurteilungsschema:  
Niederschlag: **Acker**  
Hangneigung: **Intensive kurze Niederschläge**  
**20% < J > 3%**  
"Normale Böden"

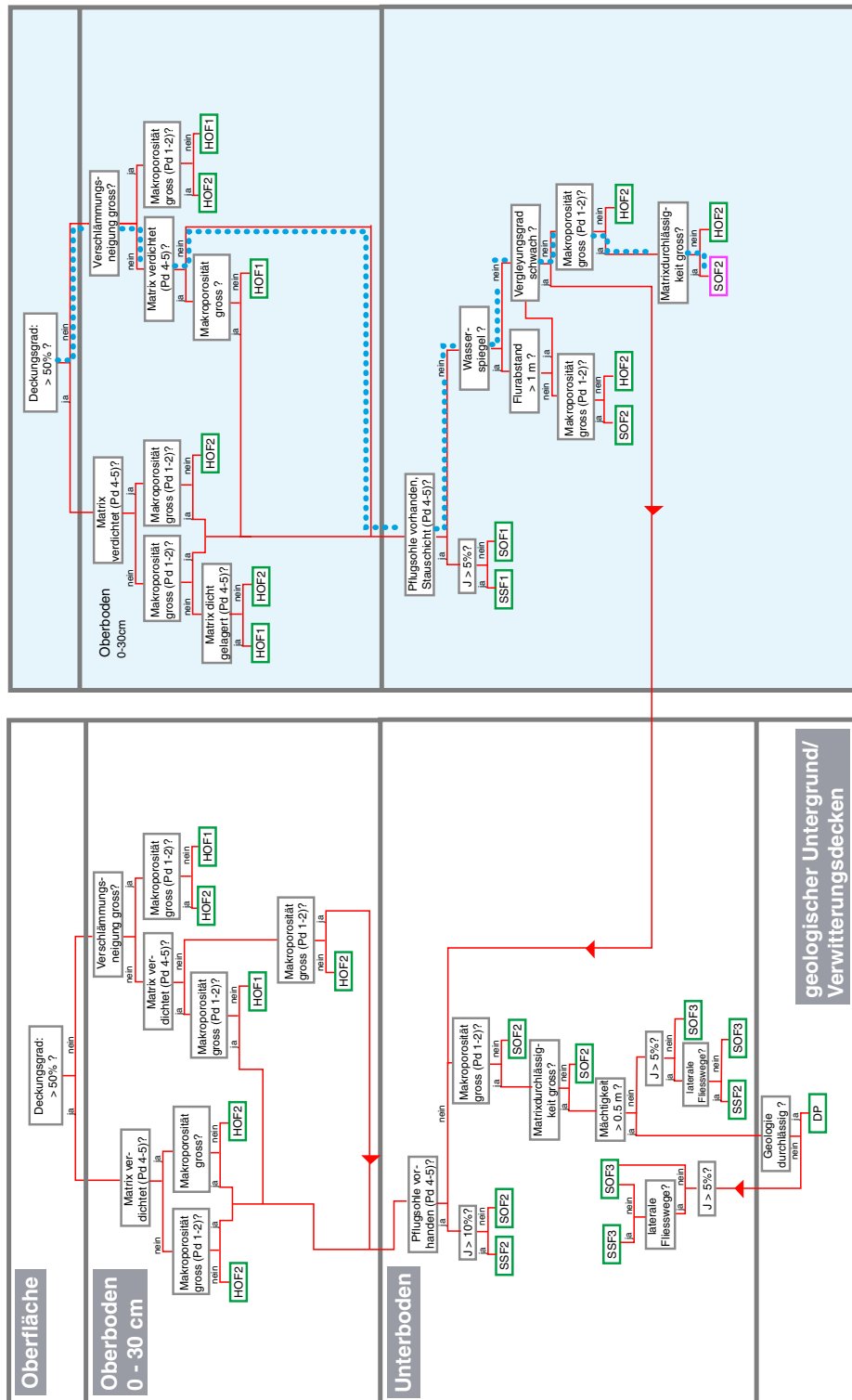


Abb. 6/7: Prozessbeurteilung am Standort Massweiler P02 (hohe Niederschlagsintensität). Die gepunktete Linie markiert den Entscheidungsgang.





**Standort: Massweiler P06 (21.9.2000): Ranker-Braunerde  
Bodenansprache**

**Standortcharakterisierung**

Borsberg  
 Bodentyp: Ranker-Braunerde  
 Geologie: Zwischenschichten  
 Hangneigung: 12 %  
 Landnutzung: Grünland, extensiv genutzt  
 Topographie: Unterhang  
 Koordinaten: 93 280 / 60 780  
 Höhe: 325 m ü. NN  
 Exposition: SW

NE P06,7 SW

Oberfläche und Vegetation			Bemerkungen (Witterungsbedingungen, Bodenzustand)
Deckungsgrad	Vegetation (Zeigerpflanzen)	Aggregatsstabilität, Verschlammungsneigung	
ca. 100%			Witterung während der Untersuchung: sonnig, windig  Nach Niederschlägen (> 50 mm in den letzten 10 Tagen) Bodenzustand relativ trocken.

**Bodenprofil P06**

Foto

Profil

Ah	Bv	Bv / Cv	R
----	----	---------	---

[m]

Farbe	pH	Kalkgeh.	Aggregate	Körnungs- ansprache	Pd. Schätzwert	Durchwur- zelung	Fallprobe	Makroporen allg.	Sklett- gehalt	Bemerkungen
braun bis dunkelbraun	5	-	Sub-Poly.	SI	Ld2	schwach	*	gering		*zerfällt in viele Teile ** zerfällt kaum
rotbraun				SI	Ld2		**		5-10%	
rötlich	6	-	Sub-Poly.	SI		schwach			10%	
grau-rot										

Abb. 6/8: Die Bodenansprache am Standort Massweiler P06.



**Beurteilung abflussrelevanter Kriterien**  
 Einzugsgebiet: **Massweiler Standort: P06**    Rechtswert: **93280**    Hochwert: **60780**    Höhe über NN.: **325 m**  
 Landnutzung: **Grünland**    Relief: **Unterhang**    Hangneigung: **12 %**    Bodentyp: **Ranker-Brauner**    Geologie: **Voltzien-Sandstein**  
 Bemerkungen:

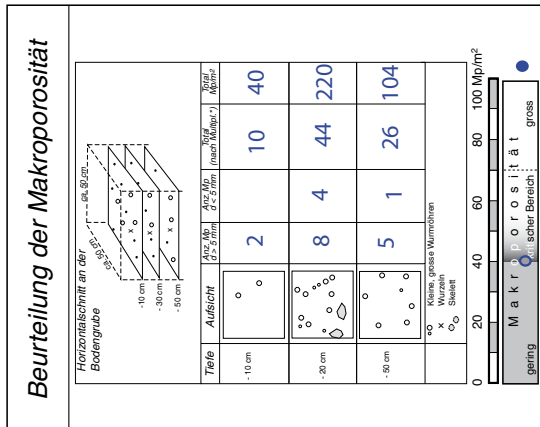
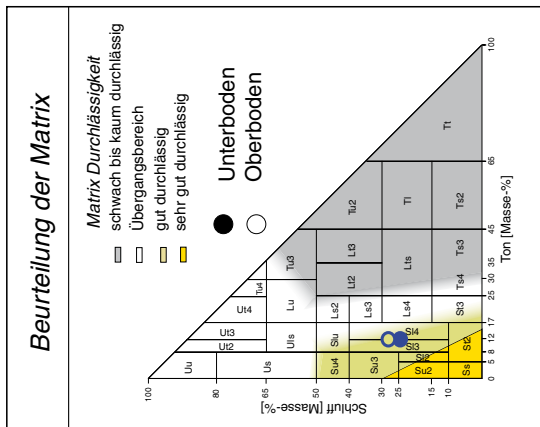
<p><b>Beurteilung der Makroporosität</b></p>  <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>Tiefe</th> <th>Aufsicht</th> <th><math>\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}</math> (nach 10 min)</th> <th><math>\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}</math> (nach 30 min)</th> <th><math>\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}</math> (nach 60 min)</th> <th><math>\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}</math> (nach 120 min)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-10 cm</td> <td></td> <td>2</td> <td>10</td> <td>40</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>-30 cm</td> <td></td> <td>8</td> <td>4</td> <td>44</td> <td>220</td> </tr> <tr> <td>-90 cm</td> <td></td> <td>5</td> <td>1</td> <td>26</td> <td>104</td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">             0 = kleine, grobe Wurmlöhren              x = Wurmlöhren              o = Stein              M a k r o p o r o s i t ä t              gering    grober Bereich    gross         </p>	Tiefe	Aufsicht	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 10 min)	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 30 min)	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 60 min)	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 120 min)	-10 cm		2	10	40	40	-30 cm		8	4	44	220	-90 cm		5	1	26	104	<p><b>Beurteilung der Matrix</b></p>  <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">             Matrix Durchlässigkeit              schwach bis kaum durchlässig              Übergangsbereich              gut durchlässig              sehr gut durchlässig         </p> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">             ● Unterboden              ○ Oberboden         </p>	<p><b>Oberfläche</b></p> <p>Deckungsgrad: <b>80 %</b>              Hydrophobizität: <b>-</b>              Hydrophober Humus: <b>-</b>              Oberflächenrauigkeit: <b>-</b></p> <p><b>Oberboden</b></p> <p>Matrix verdichtet, Packungsdichte: <b>nein</b>              Makroporosität: <b>gering- kritisch</b>              Matrix dicht gelagert: <b>nein</b>              Verschlammungsneigung: <b>nein</b>              Durchwurzelung: <b>schwach</b>              Matrix durchlässig: <b>gut durchlässig</b></p> <p><b>Unterboden</b></p> <p>Pflugsohle: <b>keine</b>              Matrixdurchlässigkeit: <b>gut durchlässig</b>              Mächtigkeit: <b>0.5 m</b>              laterale Fließwege: <b>potentielle</b>              Drainagen: <b>keine</b>              Makroporosität: <b>gross bis sehr gross</b>              Grundwasserstufe: <b>-</b>              Flurabstand Grundwasser: <b>-</b>              Stauschicht (in mächtigen bis sehr mächtigen Böden): <b>-</b>              Lage der Vergleichungsmerkmale: <b>-</b>              Laterale Fließwege: <b>potentielle (Felsoberfläche)</b></p>
Tiefe	Aufsicht	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 10 min)	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 30 min)	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 60 min)	$\frac{V_{\text{Wasser}}}{V_{\text{Probe}}}$ (nach 120 min)																					
-10 cm		2	10	40	40																					
-30 cm		8	4	44	220																					
-90 cm		5	1	26	104																					
<p><b>Laterale Fließwege</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Beobachtete Fließwege</td> <td style="width: 33%;">Beurteilung</td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td>präferentielle Fließwege</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Potentielle Fließwege</td> <td>Bv/Cv viele Skelett-grenzflächen</td> <td>potentielle laterale Fließwege</td> </tr> </table>	Beobachtete Fließwege	Beurteilung		präferentielle Fließwege			Potentielle Fließwege	Bv/Cv viele Skelett-grenzflächen	potentielle laterale Fließwege	<p><b>Hydrologische Zusatzuntersuchungen</b></p> <p>Infiltrometerversuch (mit Tracer):</p> <p>Kleinbereichsvers. (mit Tracer):</p>	<p>Prozessevaluation:</p> <p>niedrige Niederschlagsintensität</p> <p>hohe Niederschlagsintensität</p> <p>DP</p> <p>HOF2</p>															
Beobachtete Fließwege	Beurteilung																									
präferentielle Fließwege																										
Potentielle Fließwege	Bv/Cv viele Skelett-grenzflächen	potentielle laterale Fließwege																								

Abb. 6/9: Feldblatt zur Erfassung der abflussrelevanten Kriterien aus Standort Massweiler P06.



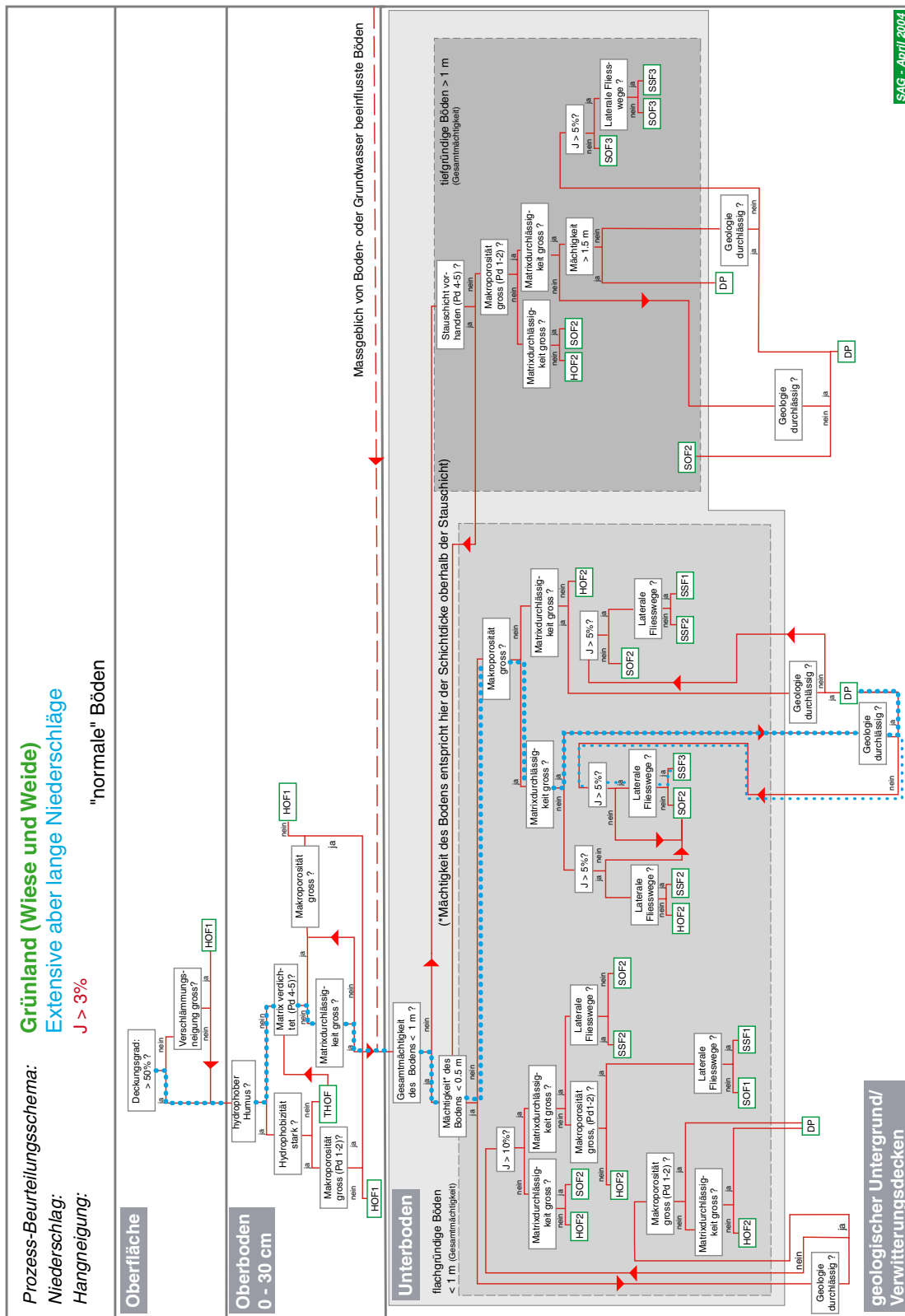
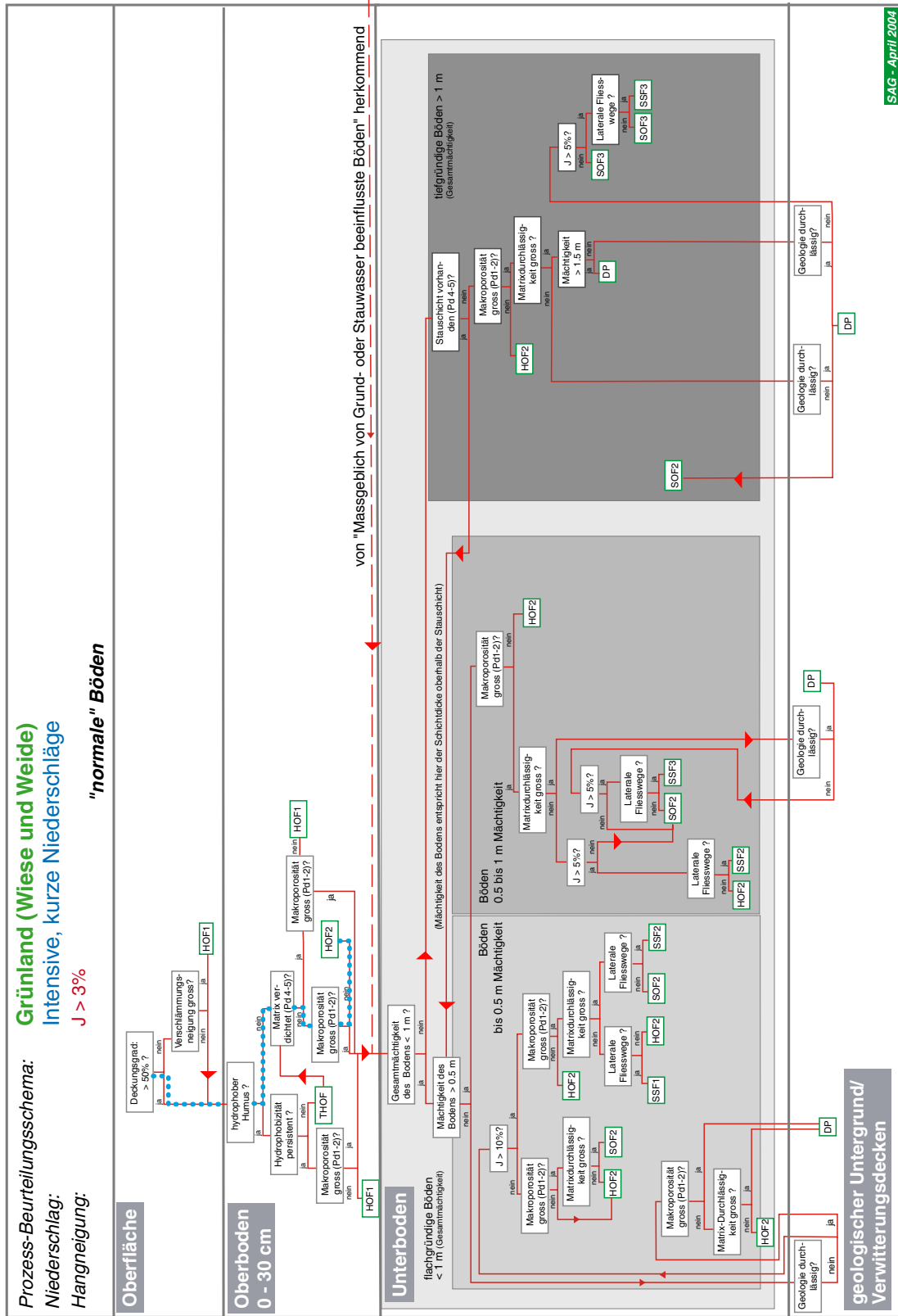


Abb. 6/10: Prozessbeurteilung am Standort Massweiler P06 (niedrige Niederschlagsintensität). Die gepunktete Linie markiert den Entscheidungsgang.



SAG - April 2004

Abb. 6/11: Prozessbeurteilung am Standort Massweiler P06 (hohe Niederschlagsintensität).



### 6.2.2.6 Prozesskarte Massweiler-Kneispermühle

#### Prozesskarte wenig intensive Niederschläge

Abb. 6/12 zeigt die Prozesskarte Massweiler für Niederschläge geringer Intensität. Im **landwirtschaftlich genutzten Gebiet** (oberer Gebietsteil) überwiegt SOF3 als dominanter Prozess. In den ebenen Flächen Müllkopf und Häselbergerhof ist trotz teilweise sehr flachgründiger Böden (P03) DP zu erwarten, da der Sandstein recht durchlässig ist. SOF2 ist lediglich auf schmale Muldenarealen begrenzt, wo sich die Bodenfeuchte länger hält und sich stellenweise pseudovergleyte Böden entwickelt haben. Beim Standort P02 (Pseudogley) wurde SOF3 (Grenzfall zu SOF2) als dominanter Prozess evaluiert. Allerdings ist dieses Band mit pseudovergleyten Böden im Gelände schmal (Breite: wenige Meter, Höhenlage: ca. auf 360 m ü. NN), so dass es als Prozessareale ohnehin nicht abgegrenzt werden muss.

Die **bewaldeten Hänge** liegen im Bereich des oberen Buntsandsteins. Die Böden sind sehr sandig und trotz teilweise beachtlicher Hangneigung recht tiefgründig. Fließgerinne, die auf Abflussbildung im Waldgebiet hindeuten, fehlen gänzlich. Allerdings hat es Gerinne, deren Ursprung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen liegen. Die begutachteten Aufschlüsse im Wald zeigen einzelne, meist kurze und wenig hohe Felskanzeln. Das Fehlen durchgehender Felsbänder deutet darauf hin, dass wahrscheinlich die Zwischenbereiche stärker verwittert sind und nicht nur in Gefällsrichtung sondern auch horizontal größere Unterschiede in der Durchlässigkeit dieser Felsformationen bestehen.

Aufgrund der sandigen, tiefgründigen und durchlässigen Böden dürfte in den Hängen meist DP, an wenigen Stellen SSF3 dominieren. Gebiete mit stärkerem lateralen Abfluss im Boden (SSF2) sind aufgrund des Fehlens von Stauschichten kaum wahrscheinlich, abgesehen von extrem steilen Waldflächen mit nahezu anstehendem Sandsteinfels.

In der Aue des Schwarzbachs (Grundwasserspiegel wenige dm unter Flur) dürfte auf den nassen Böden SOF2 auftreten. Mit SOF1 ist aufgrund der geringen Hangneigung kaum zu rechnen.

Als Gesamtbeurteilung kann festgestellt werden:

- Die verzögerten Abflussprozesse SOF3, SSF3 und DP sind flächenmäßig dominant im Gebiet.
- Rasche Abflussbildung sind auf wenige Muldenflächen begrenzt.
- Bei langen Niederschlägen dürften zuerst einzelne Strassenflächen (HOF) und Muldenflächen (geringeres Sättigungsdefizit) ansprechen.
- Die starke und rasche Abflussbildung konzentriert sich jedoch auf kleine Areale. Insgesamt wird in diesem Gebiet eine stark bis sehr stark verzögerte Abflussbildung bei anhaltenden Niederschlägen zu erwarten sein.

#### Prozesskarte intensive Niederschläge

Die Standortkartierung hat ergeben, dass sich aufgrund der guten Durchlässigkeit der Böden keine wesentlichen Unterschiede der Abflussprozesse resultieren. Von der Niederschlagsintensität abhängige Unterschiede im Abflussverhalten sind nur auf kleinen Arealen zu erwarten. Diese Areale liegen in Tiefenlinien des Reliefs, welche den Oberflächenabfluss sammeln und ihn abführen. Der Nieder-

schlag der auf diese Flächen fällt, fließt als HOF ab. Strassen und Wege, die in solchen Mulden verlaufen, nehmen den (marginalen) Abfluss der Äcker auf.

Dass Wege und Strassen als Wasserleitlinien dienen, zeigte sich auch auf dem Weg Kneispermühle-Häselberg, wo der Kiesbelag erhebliche Erosionsspuren aufwies.

Da bei kurzen, intensiven Niederschlägen kaum die Niederschlagsvolumen anfallen, die zum Auslösen von SOF3 oder SSF3 ausreichend sind, ist auf jenen Flächen DP zu erwarten. Auf nassen Böden der Bachaue (Schwarzbach) hingegen reicht die Infiltrationskapazität bei Starkregen nicht aus und es entsteht HOF 2 ( $J > \text{ca. } 3\%$ ).

**Abb. 6/12, 13 (nächste Seite)**

### **6.3 Die Abflussprozesse an verschiedenen Hängen und in einem Einzugsgebiet**

#### 6.3.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden Hangsequenzen (Catena) aus verschiedenen Einzugsgebieten dargestellt und erläutert. Die Prozess-Evaluation bezieht sich auf wenig intensive, ergiebige Niederschläge. Dies soll zeigen, wie die Prozessabfolge an Hängen aussehen kann und wie sich die verschiedenen Prozessareale an einem Hang beeinflussen können. Zudem wird die Prozesskarte des Idarbach-Einzugsgebiets vorgestellt (IHW, 2000).

#### 6.3.2 Beispiele einiger Prozess-Catena

##### **6.3.2.1 Prozess-Catena Idarbach 1 (Ringelkopf-Schwarzenbruch)**

Abbildung 6/14 zeigt ein Längsprofil des Hanges mit Geologie, Böden und Landnutzung (Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich, 2000). Der Hang weist im oberen Teil mittelgründige Böden auf, die im unteren Teil des Hanges über Gehängeschutt und Gehängelehm liegen und an Mächtigkeit zunehmen. Eine detaillierte Beschreibung der Bodenprofile befindet sich in IHW (2000). Über dem kompakten Quarzitsandstein liegt eine wenige Meter mächtige Verwitterungsschicht, die klüftig und durchlässig ist. Die aus dem Verwitterungsprodukt entstandenen Böden sind ebenfalls durchlässig. (s. Abb 6/14)

Daraus ergibt sich das folgende Prozessbild: Auf dem flacheren Ringelkopf und im obersten Teil des Hanges sickert Niederschlagswasser durch die durchlässige Matrix und entlang von Makroporen (Pflanzenwurzeln) in die Böden und weiter in den verwitterten Untergrund (Abb. 6/14a). Aufgrund des beachtlichen Speichervermögens der Böden und der darunterliegenden Verwitterungsschicht ist auf diesen Flächen Tiefensickerung (DP) zu erwarten. Im Mittelhang fließt infiltriertes Niederschlagswasser erst nach ausreichender Benetzung stark verzögert (SSF3) hangabwärts (Abb. 6/14b). Aufgrund der beachtlichen Bodenmächtigkeit dürften diese Böden kaum vollständig gesättigt werden. Im unteren Hangteil wird das Sättigungsdefizit mit zunehmender Gerinnenähe geringer, da Hangwasser kontinuierlich in diesen Bereich entwässert. Es entsteht verzögerter Abfluss im Boden (SSF2 und SSF1, Abb. 6/14c) entlang lateraler Fließwege (Pipes, hoch durchlässige Horizonte in der Verwitterungsschicht). In einem schmalen Saum entlang des Idarbachs liegt der Wasserspiegel nur wenige Zentimeter unter Flur, und es entsteht Oberflächenabfluss (SOF1) als Folge der raschen Bodensätti-

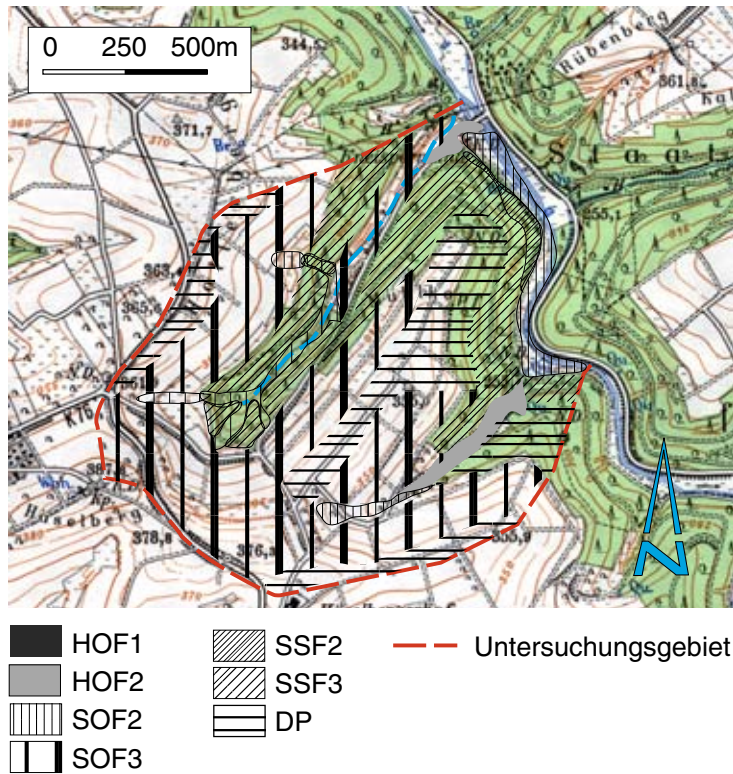


Abb. 6/12: Dominante Abflussprozesse bei langen, wenig intensiven Niederschlägen im Einzugsgebiet Massweiler-Kneispermühle.

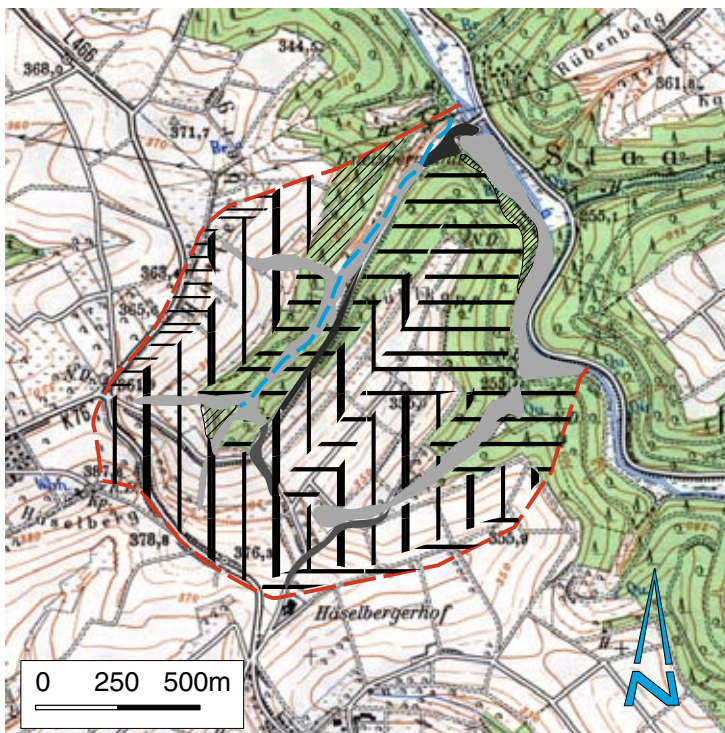


Abb. 6/13: Dominante Abflussprozesse bei intensiven Niederschlägen im Einzugsgebiet Massweiler-Kneispermühle.

gung. Trotz der beachtlichen Steilheit des Hanges ist die Abflussbildung infolge der verhältnismäßig mächtigen Bodenprofile und dem Fehlen einer dichten Stauschicht (Fels) verzögert.

#### **6.3.2.2 Prozess-Catena Idarbach 2 (Am Sand - Honigsack)**

Abbildung 6/15 zeigt eine Prozess-Catena des unbewaldeten Teils des Idarbach-Einzugsgebiets. Im Hang wechselt der Untergrund von Taunusquarzit zu Hunsrückschiefer. Der mittlere Teil des Hanges im Bereich der trockenen Böden wird ackerbaulich genutzt, der untere Teil mit feuchten bis nassen Böden dient als Mähwiese und Weide.

Im flacheren, obersten Teil des Hanges haben sich auf Quarzit tiefgründige, durchlässige Böden entwickelt. Dank guten Infiltrations- und Speichereigenschaften findet dort DP statt. Im bewaldeten Oberhang fließt das Wasser verzögert lateral im Boden ab (SSF3). Im Mittelhang sind über dem Hunsrückschiefer relativ mächtige Böden entstanden, die ackerbaulich genutzt werden. An der Bodenoberfläche besteht keine Verschlammungsneigung, sodass die sandig-lehmigen Böden günstige Infiltration zeigen. Sie sättigen sich daher langsam und es entsteht SOF3. Im steileren Teil des Mittelhangs sind die Böden flachgründiger und die Voraussetzungen für lateralen Abfluss im Boden günstig (SSF2). Dieses Wasser gelangt im flacher werdenden Unterhang wieder an die Oberfläche (RF) und sorgt für vernässte Böden in jenem Bereich. Dies ermöglicht SOF2, in Gerinnenähe sogar SOF1. (s. Abb 6/15)

#### **6.3.2.3 Prozess-Catena Ror (Kanton Zürich, Schweiz)**

Die Prozess-Catena Ror liegt in einem Kleineinzugsgebiet ca. 20 km südöstlich von Zürich, das von Schmocker-Fackel (2004) detailliert nach Abflussprozessen untersucht wurde. Abbildung 6/16 zeigt die Prozesscatena eines 500 m langen, landwirtschaftlich genutzten, NE exponierten Hanges. Der oberflächennahe Untergrund bildet die Moräne eines Drumlins und ein Kolluvium, der tiefere Untergrund besteht aus Sandsteinen und Mergeln der Oberen Süßwasser Molasse. Die Prozessevaluation stützt sich zusätzlich auf Messungen ab (Piezometer GW1, 3, 6, 8, 9).

Im Oberhang (GW9) bildet die schwach durchlässige Moräne ein Hindernis für die vertikale Sickerung und die laterale Durchlässigkeit des Bodens ist gering (SOF2). Beim abrupten Gefällewechsel bei GW8, tritt Wasser als Return Flow (RF) aus und sorgt kleinräumig für SOF1. Weiter unten liegt ein besser durchlässiges Kolluvium, das nur bei sehr ergiebigen Niederschlägen gesättigt wird (SOF3) und leichten lateralen Abfluss im Boden (SSF3) ermöglicht. Weiter unten liegt ein weiterer Gefällsknick bevor der Hang über der Molasse ausflacht. Beim Gefällsknick wurde austretendes Hangwasser beobachtet (RF) was kleinflächig SOF1 erzeugte. Dieses Wasser infiltriert wieder, sodass unterhalb davon auf den zeitweise feuchten bis gar nassen Böden SOF2 kartiert wurde. In der Nähe des Baches (GW1) wurde der Boden drainiert. Die häufige Sättigung des Bodens in jenem Bereich deutet auf eingeschränkte Funktionstüchtigkeit der Drainagen hin (SOF1). (s. Abb. 6/16)

#### **6.3.2.4 Prozess-Catena Grundsraben, Zemmer (Rheinland-Pfalz)**

Das Einzugsgebiet des Grundsrabens bei Zemmer liegt ca. 15 km nördlich von Trier. Dieses Gebiet wurde von Schobel detailliert nach Abflussprozessen untersucht (Steffen Schobel, 2004). Die dargestellte Catena basiert auf Scherrer AG (2005). Der Hang liegt im Bereich des Oberen Buntsandsteins, der aus den Sandsteinen der Zwischenschichten (so1) und den Wechsellagerungen aus Sand-, Schluff- und Tonsteinen des Voltziensandsteines (so2) aufgebaut ist. Die Böden des oberen, ackerbaulich genutzten Hangteils sind je nach Durchlässigkeit des Ausgangsmaterials Braunerden und Pseudogley. Im unteren, steileren und bewaldeten Bereich liegen Braunerden und Regosole.



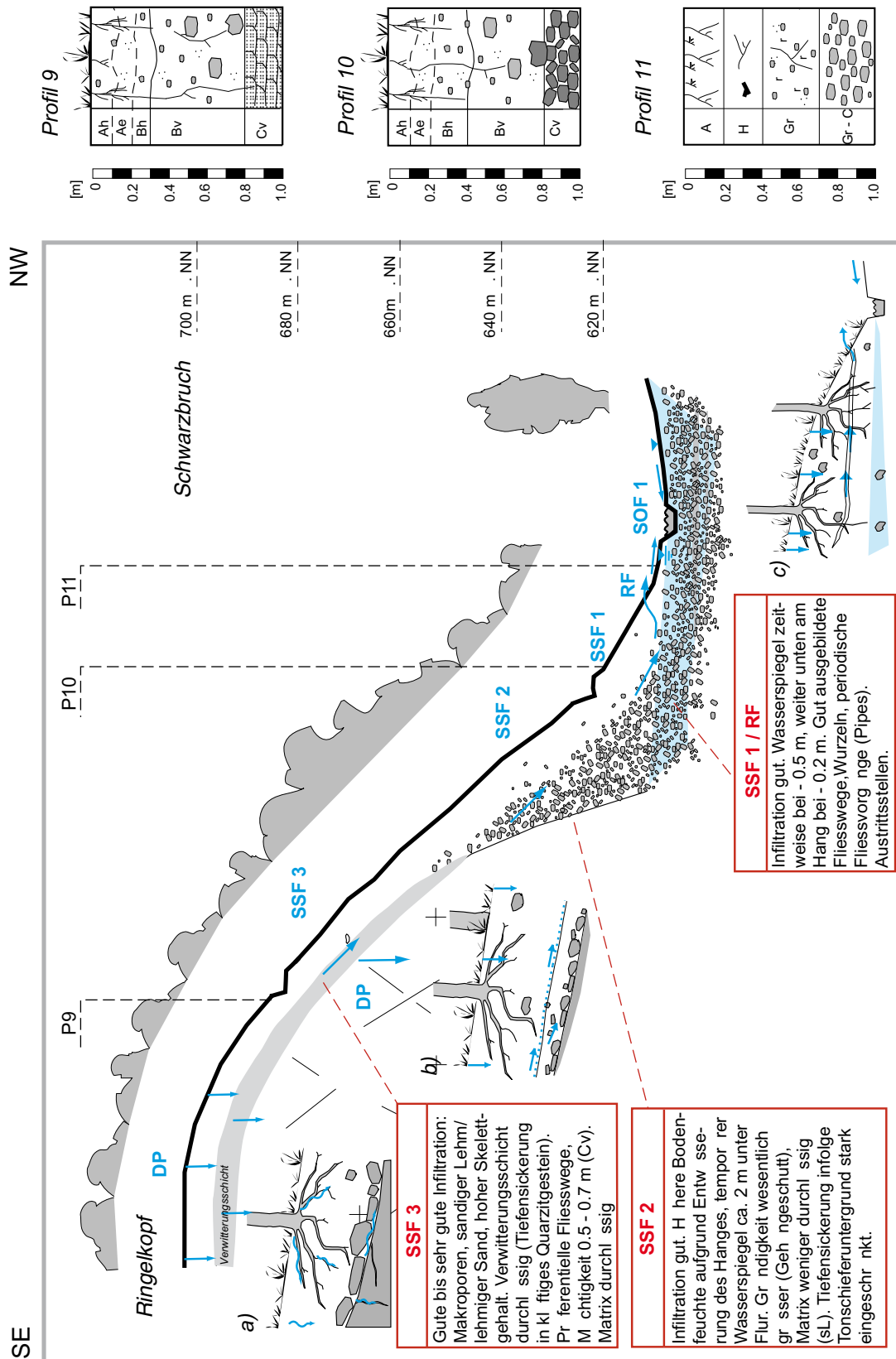


Abb. 6/14: Prozess-Catena Idrabach 1 (Ringelkopf-Schwarzenbruch) nach HW (2000) leicht verändert.



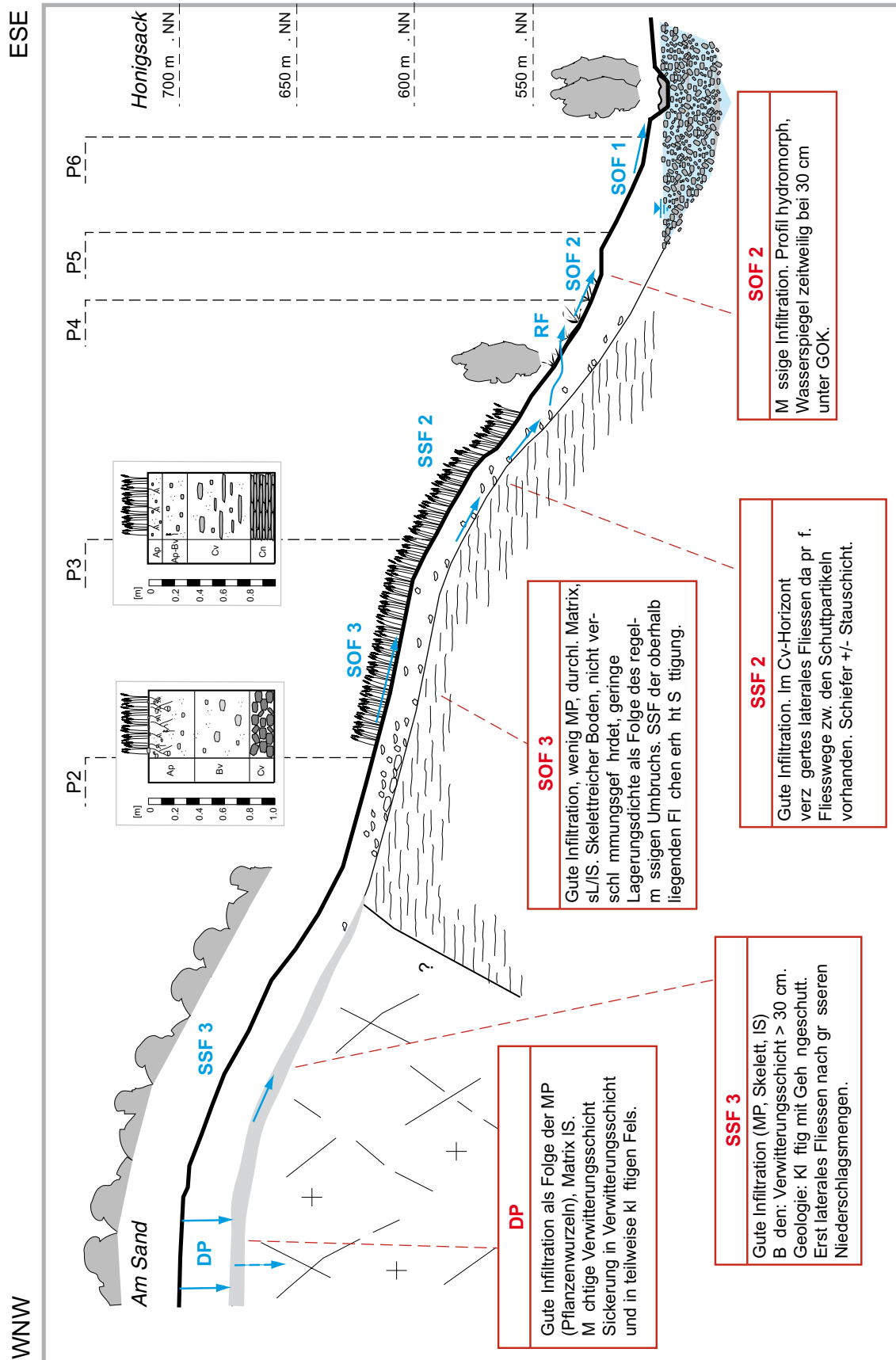


Abb. 6/15: Prozess-Catena Idarbach 2 (Am Sand - Horigsack) nach IHW (2000) leicht verändert.

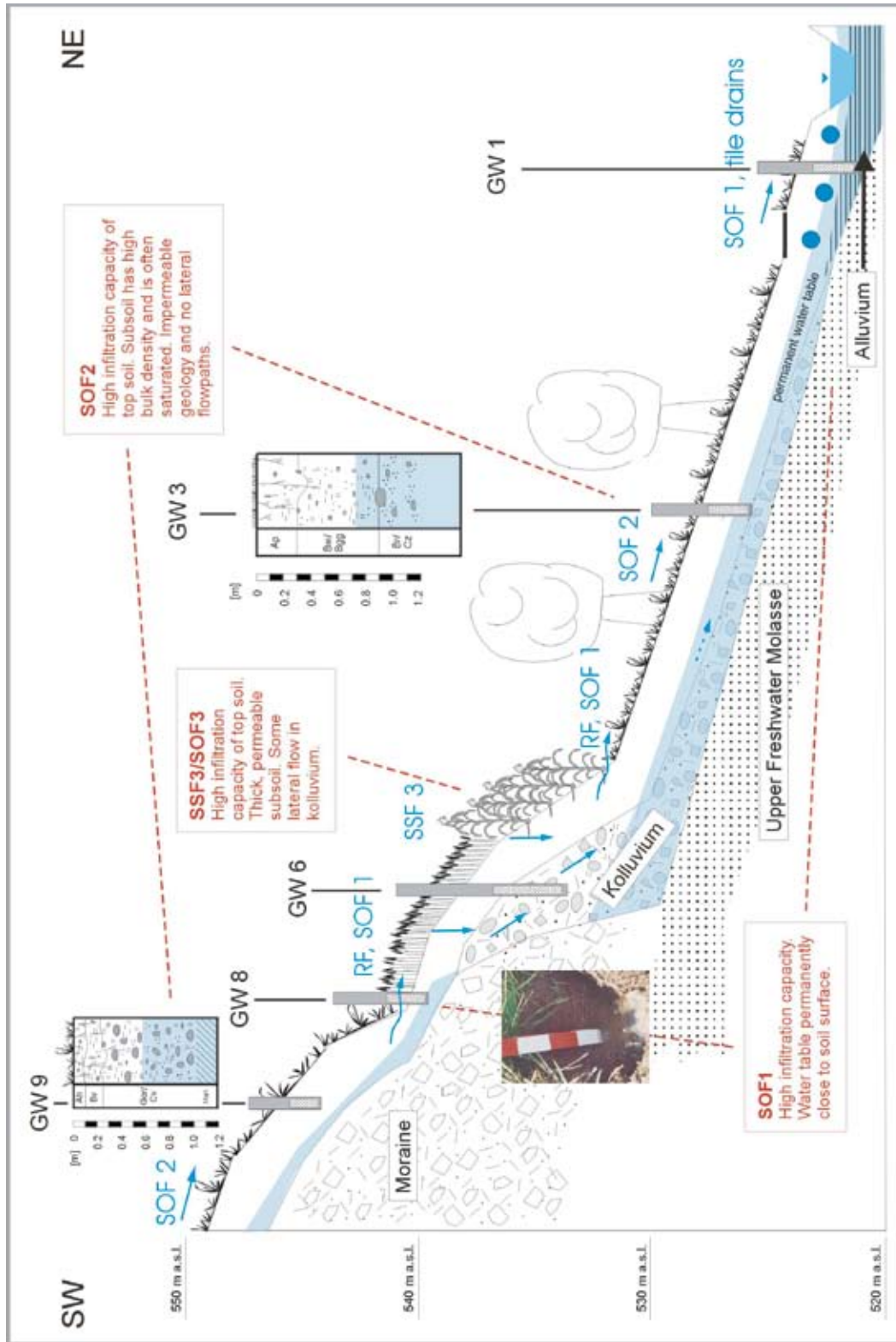


Abb. 6/16: Prozess-Catena Ror. Schema nach Schmocker-Fackel (2004) leicht verändert. Diese Prozessevaluation stützt sich zusätzlich auf Messungen ab (Piezometer: GW1, 3, 6, 8, 9).

Abbildung 6/17 zeigt die Prozesscatena. Im Kasten über dem Hangprofil sind die Ergebnisse der Prozessbeurteilung nach PBS für den Standort angegeben, darunter sind unter dem Begriff „Catena“ die evaluierten Prozesse aufgeführt, wenn zusätzlich noch hanghydrologische Aspekte berücksichtigt werden.

In der Kuppenlage am oberen Ende des Hanges ergibt das PBS SOF3. Angesichts der Flachheit des Gelände und der peripheren Lage dieser Fläche wurde die Fläche als nicht beitragend beurteilt. Der mittlere Teil des Hanges wird als SOF3 beurteilt. Im steileren, bewaldeten Unterhang ergibt das PBS aufgrund der teilweise hoch durchlässigen Sandsteine DP. Dies würde bedeuten, dass das als SOF3 abfließende Niederschlagswasser des Oberhanges in jenem bachnahen Saum versickern würde. Da dieser Saum nur wenige 10er-Meter breit ist, ist eine wesentliche „Pufferung“ des Abflusses kaum wahrscheinlich. Die Besichtigung des Steilhanges zeigte auch, dass verschiedene Rinnen vom Waldrand bis zum Bach hinunter reichen, d. h. der landwirtschaftlich genutzte Bereich des Hanges ist also ans Gerinne angeschlossen. (s. Abb. 6/17)

#### 6.3.2.4 Prozess-Catena mit starker gegenseitiger Beeinflussung der Prozessflächen

Abbildung 6/18 zeigt eine Prozesscatena mit starker gegenseitiger Beeinflussung Prozessflächen. Im Oberhang liegt ein schmales Kalksteinband. Unterhalb davon bilden Tonschichten den geologischen Untergrund, worauf feuchte bis nasse Böden entstanden sind (Gleye, Pseudogleye). Hangabwärts streicht eine etwas besser durchlässige Mergelformation aus und am Hangfuss bilden Kalkgesteine den Untergrund.

Im obersten Hangabschnitt über Kalkgestein versickert das Niederschlagswasser (DP). Der Abschnitt mit Tonuntergrund mit feuchten bis nassen Böden wird gemäss PBS als SOF1 bis 2 klassifiziert. Der anschließende Bereich mit Mergeluntergrund wird gemäss PBS als SOF3 klassifiziert, der Hangfuss als SSF2. Da die im oberen Teil des Hanges liegenden, stark reagierenden SOF1-2-Flächen den unterhalb davon liegenden SOF3-Flächen Wasser zuführen, wird die Prozessintensität von SOF3 auf SOF 2 erhöht. Im Bereich des Hangfusses erhöht sich die Intensität von SSF2 auf SSF1. (s. Abb. 6/18)

#### 6.3.3 Abflussprozesskarte des Idarbach-Einzugsgebiets

Der Idarbach liegt im Hunsrück zwischen 478 und 766 m ü. NN. Der Jahresniederschlag beträgt 1055 mm. Der geologische Untergrund bildet der Hunsrückschiefer und der Taunusquarzit. Darauf entwickelten sich stark saure Braunerden mit sandig-lehmiger Textur. Die Böden auf Gehängeschuttablagerungen des Quarzits sind teilweise vernässt, und es entwickelten sich Gleye unterschiedlichster Ausprägung.

Mittels der zusammengetragenen Grundlagen und der Prozess-Catenen konnte die Abflussprozesskarte ermittelt werden (Abb. 6/19). Abbildung 6/20 zeigt den Anteil der verschiedenen Abflussprozesse im Einzugsgebiet bei wenig intensiven Niederschlägen. Auf 12% der Gebietsfläche findet entlang der Gerinne und in den vernässten Bereichen sofortiger Oberflächenabfluss (SOF1) als Folge der Bodensättigung statt. In den landwirtschaftlich genutzten Unterhängen im unteren Teil des Einzugsgebiets liegen Areale mit verzögertem Oberflächenabfluss (SOF2: 8%). Im Forst sind die Flächen mit sofortigem Abfluss im Boden (SSF1) klein (8%) und liegen oft oberhalb von gesättigten Bereichen. Dominant sind hingegen leicht und stark verzögerter Abfluss im Boden (SSF2 und SSF3) mit 18 resp. 32%. Kaum oder gar nicht an der Abflussbildung beteiligt sind 16% der Gebietsfläche (DP). Rasche Abflüsse als Folge von Infiltrationshemmnissen spielen im Idarbach bei langanhaltenden Niederschlägen kaum eine Rolle. (s. Abb. 6/19 und Abb. 6/20)

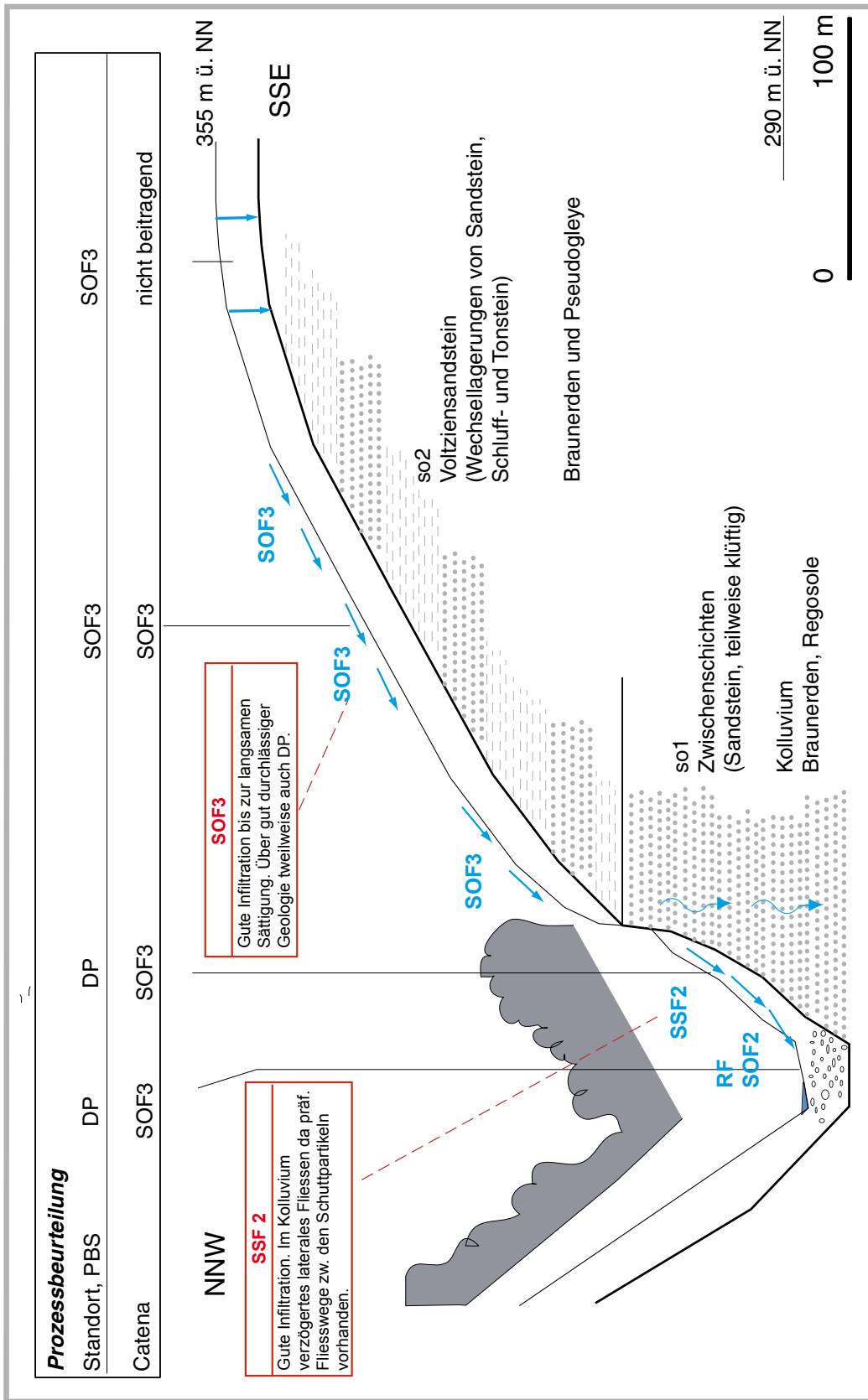


Abb. 6/17: Prozess-Catena Grundgraben (Zemmer). Quelle Prozesskarte Zemmer (Scherrier AG, 2005).

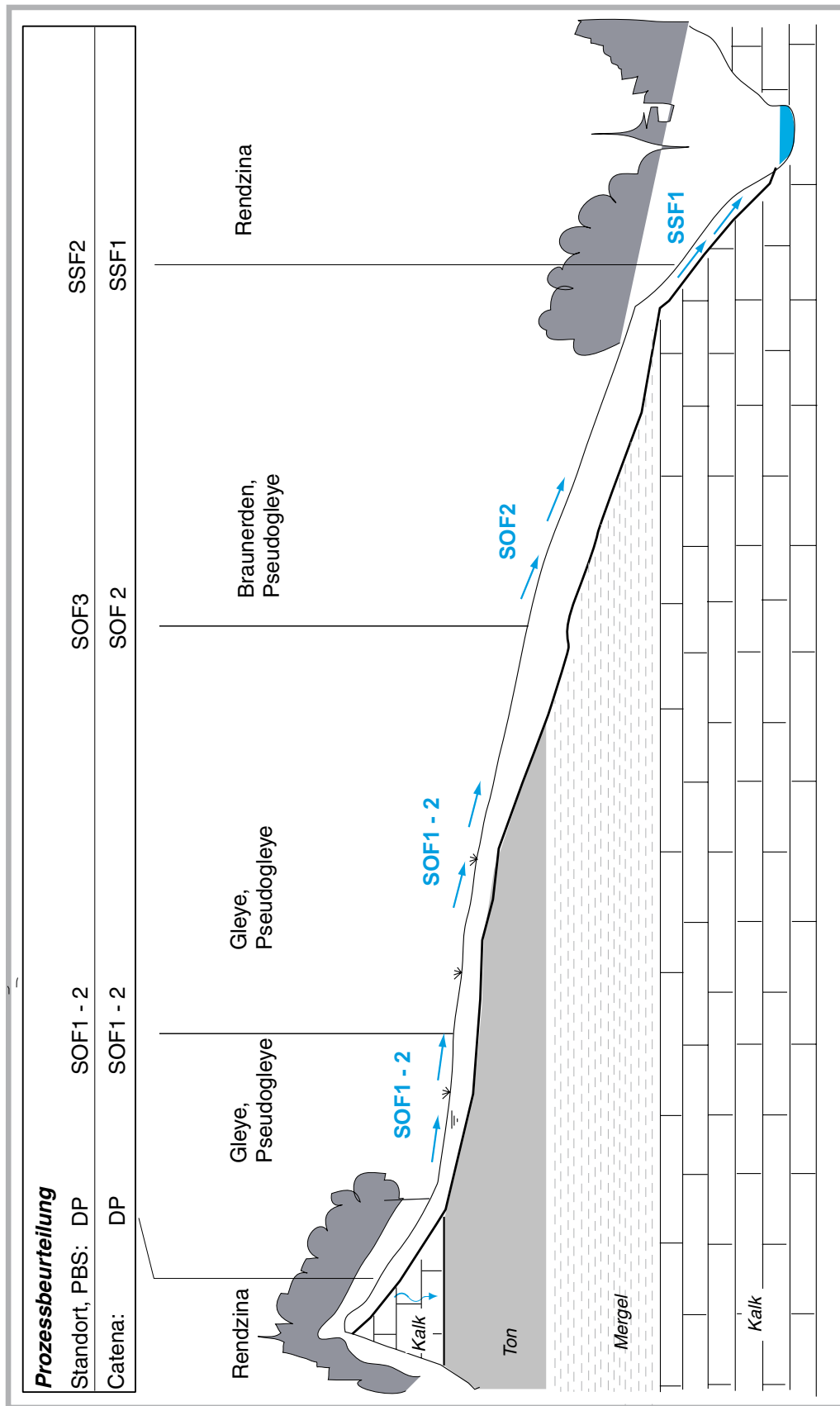


Abb. 6/18: Prozess-Catena einer frei erfundenen Hangesituation.

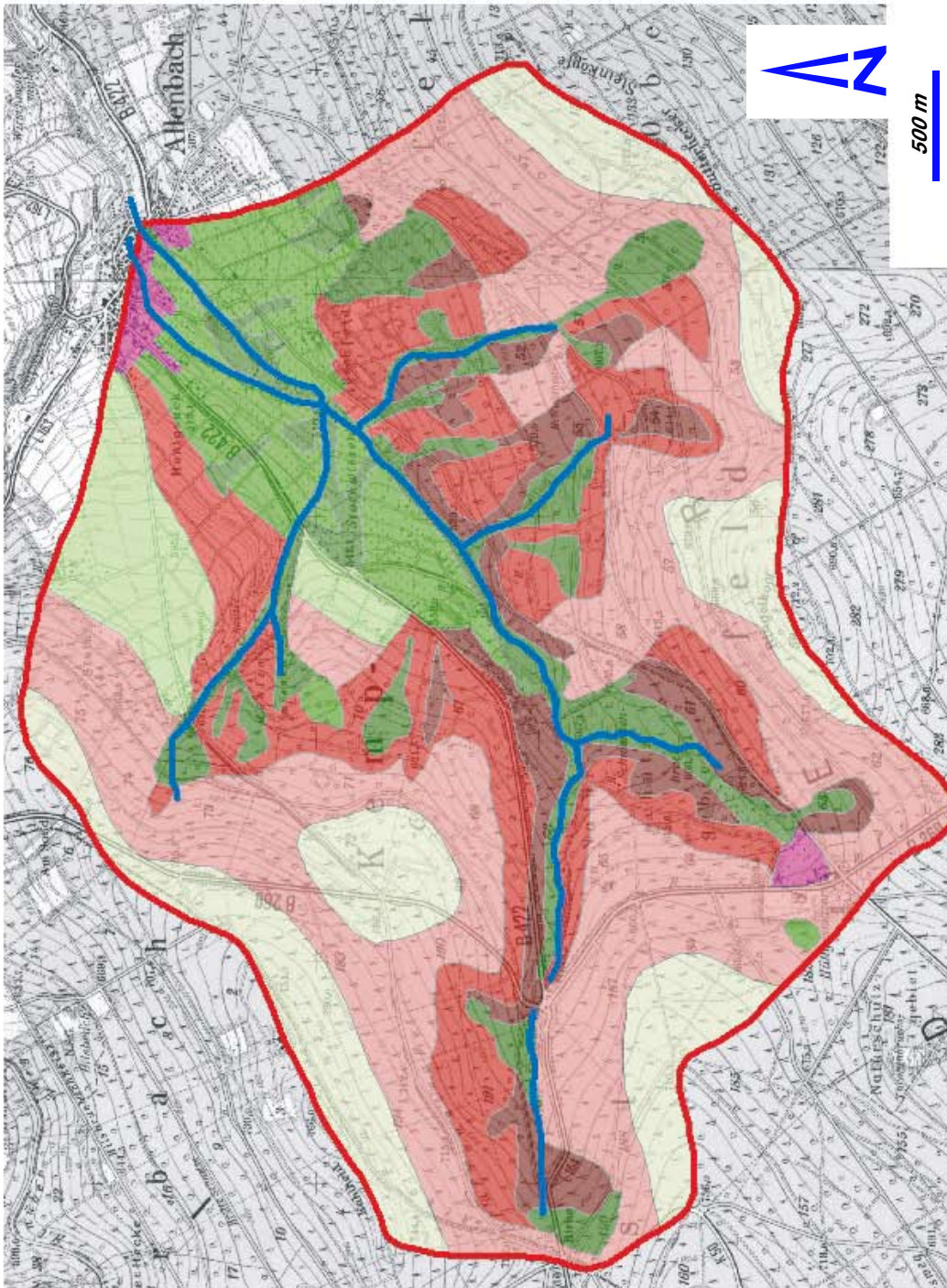
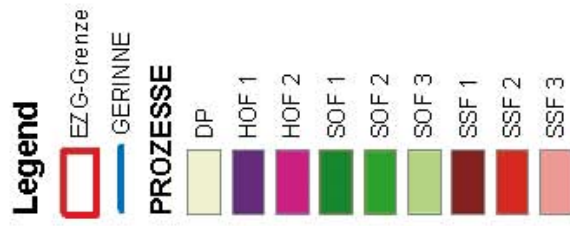


Abb. 6/19: Prozesskarte des Einzugsgebiets des Idarbachs.

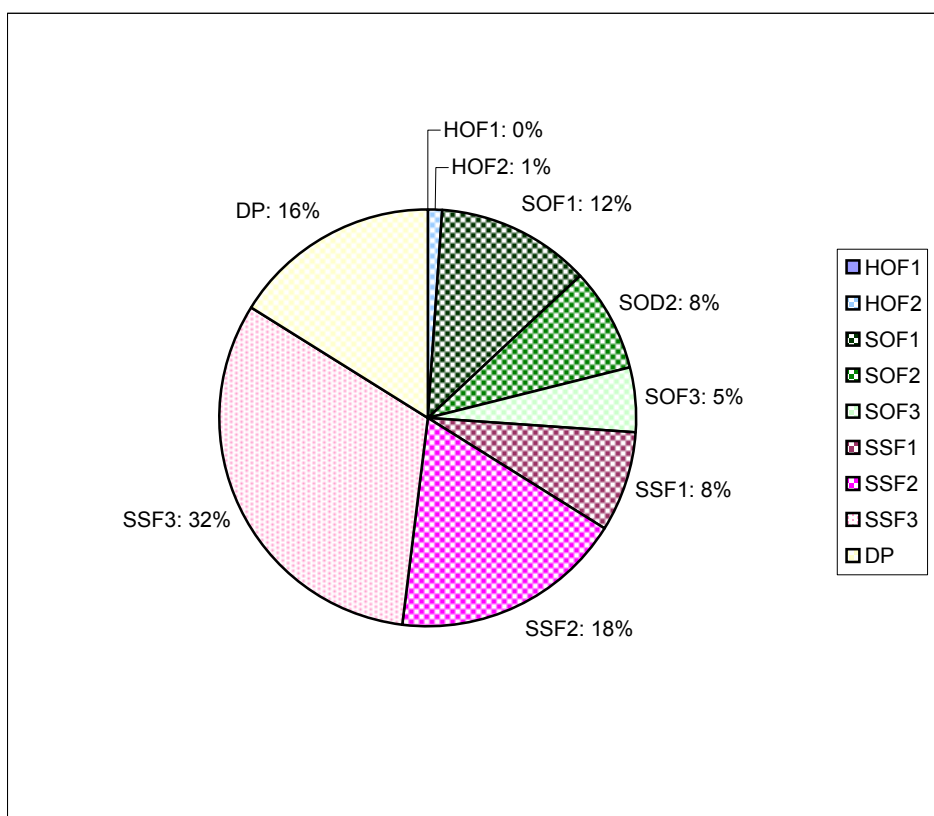


Abb. 6/20: Flächenanteile der Abflusstypen im Einzugsgebiet des Idarbachs.



## 7 Literatur

Arbeitsgemeinschaft Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage.

Altemüller H.-J.(1991): Der morphologische Bau des Bodens in Abhängigkeit vom Bodentyp und der Bodennutzung. Ber. über Landwirtsch. 204, Sonderheft: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 2, S. 13-32.

Anderson M.G. Burt T.P. (1990) Processes in hillslope hydrology. John Wiley and Sons, Chichester (Eds.)

Barret G., Slaymaker O. (1989): Identification, characterization and hydrological implications of water repellency in mountain soils, Southern British Columbia. In: Catena, 16, 477-489.

Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft (1985): Erosionsversuche in Maiskulturen 1981-1994. Informationsbericht Heft 4/85.

Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (1997): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. Hrsg. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 2. geänderte Auflage, Freising-München.

Beasley R.S. (1976): Contribution of subsurface flow from thje upper slopes of a forested watershed to channel flow Soil Science Society of America Journal 40, 955-957.

Beisecker R. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löss- und eines Sandbodens. Fachgebiete Bodenkunde und Regionale Bodenkunde, Institut für Oekologie, Technische Universität Berlin.

Benecke, P. (1966): Die Geländeansprache des Bodengefüges in Verbindung mit der Entnahme von Stechzylinderproben für Durchlässigkeitsmessungen. Z. f. Kulturtechn. u. Flurber., Jg. 7, S. 91-104.

Bergsma E. (1983): Rainfall Erosion Surveys for Conservation Planning. ITC Journal, 2, 166-174.

Berkenhagen J. (1998): Die Morphologie von Oberflächenverschlammungen bei variierten Entstehungsbedingungen und ihre Bestimmung mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie. Bodenökologie und Bodengenese, Bd. 30.

Beste, A., Hampl, U. & Kussel, N. (2001): Bodenschutz in der Landwirtschaft: Einfache Bodenbeurteilung für Praxis, Beratung und Forschung. Ökologische Konzepte 101, Stiftung Ökologie & Landbau, Bad Dürkheim.

Bisdorn E., B. A., Dekker L. W., and Shoute J.F.T. (1993): Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. Geoderma, 56, 105-118.

BoFA-Extern (1999): Sachdatenbank zur Beschreibung von bodenkundlichen Kartiereinheiten, Version 0.2.1 vom 30.5.1999.

Booltink H.W.G., Bouma J. (1991): Physical and morphological characterization of bypass flow in a well-structured clay-soil. Soil Science Society of America Journal, 55, 1249-1254.

Boormann D.B., Hollis J.M., Lilly A. (1995): Hydrology of Soil Types: a hydrologically-based classification of the soils of the United Kingdom. Ed. Institut of Hydrology Wallingford U.K., Rep. 126.

Bork H.R., Bork H. (1981): Oberflächenabfluss und Infiltration : Ergebnisse von 100 Starkregensimulationen im Einzugsgebiet der Rambla del Campo Santo(SE-Spanien). In: Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, Heft 8 Cremlingen-Destedt.

Bouma J., Belmans C.F., Dekker I.W., 1982, Water infiltration and redistribution in a silt loam with vertical worm channels, Soil Sci Soc Am J 46, 917-921.

Bouma J. (1991): Influence of macroporosity on environmental quality. In Advances in Agronomy, 46, 1-37.

Burch G.J., Moore I.D., Burns J. (1989): Soil Hydrophobic Effects on Infiltration and Catchment Runoff. Hydrological Processes, 3, 211-222.

Büro für Umweltberatung und Geoökologie, Dr. H. Ernstberger (2001): Identifikation hochwasserrelevanter Flächen (Gebiet Gelbach). Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz.

BWG Boden Wasser Geoinformatik (2001): Identifikation hochwasserrelevanter Flächen in einem Teileinzugsgebiet des Daubachs. ). Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz.

Carson B., Jung C, Netta (2000): Naherkundung sensibler Niederschlagsflächen, IRMA II A5. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.

Demuth N., Meuser A., Burghardt W., Bädjer, N., Dornauf C., Steinberg O., Terhorst S., Twer D., Winzig G. (1998): Leitfaden Flächenhafte Niederschlagswasserversickerung. Hrsg. Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz 1998.

Deutsches Institut für Normen, DIN 19 682-10 (1998): Beschreibung und Beurteilung des Gefüges. Beuth Verlag GmbH, Köln-Berlin.

Diez, T. (1991): Beurteilung des Bodengefüges im Feld - Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. Ber. über Landwirtsch. 204, Sonderheft: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 2 Bodengefüge, S. 96-103.

Diez, T., H. Weigelt (1997): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Hrsg. von der Bayerischen Landesanstalt f. Bodenkultur u. Pflanzenbau, Freising-München, Sonderdruck dlz.

Dunne T., Black R.D. (1970): An Experimental Investigation of Runoff Prediction in Permeable Soils. Water Resources Research, 6 (2), 478-490.

Deutsches Institut für Normen DIN (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau, Felduntersuchungen, Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges, DIN 19682-10.

Doerr S.H. (1998): On standardizing the „water drop penetration time“ and the „molarity of an ethanol droplet to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils (short communication). Earth surfaces and Processes and Landforms 23, 663-668.

Doerr S.H., Shakesby R.A., R. P. D. Walsh (2000): Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. Earth-Science Reviews 51, 33-65.

Dumbeck G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Giessener Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 3.

DVWK (1985): Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen, DVWK Schriften, Bd. 71.

DVWK (1986): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte. Teil III: Anwendung der Kennwerte für die Melioration, Bd. 117.

DVWK (1995): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung. Teil I: Ansprache der Böden, Bd. 129.

Edwards W.M., 1990, Effect of *Lumbricus Terrestris* L. Burrows on Hydrology of continuous no-till corn fields, *Geoderma*, 46, 73-84.

Edwards C. A. Eds., (1998): Earthworm ecology, verschiedene Beiträge.

Ehlers W., 1975, Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil, *Soil Science*, Vol. 119, No. 3.

Ernstberger H., (2000): Fernerkundung sensibler Niederschlagsflächen im Einzugsgebiet der Nahe auf der Grundlage der Niederschlags-Abflussgleichung. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.

Ellenberg, H. (1979): Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. 2. verbesserte und erweiterte Auflage. Verlag Erich Goltze, KG Göttingen.

Ellenberg H. (1991): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta geobotanica*, Vol. 18, Verlag Erich Goltze, Göttingen.

Ernstberger, H. (2000): IRMA II A3; Fernerkundung sensibler Niederschlagsflächen im Einzugsgebiet der Nahe auf der Grundlage der Niederschlags-Abflussgleichung. Bericht und Anlage A. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.

Erpenbeck Ch. (1987): Über Stoffaustrag mit dem Oberflächen- und Zwischenabfluss von landwirtschaftlichen Flächen verschiedener Nutzungsweise. Dissertation, Universität Giessen.

Etzenberg Ch. (1998): Zur Regionalisierung der Abflussbildung - Bestimmung flächenspezifischer Abflussbeiträge aus Gebietseigenschaften. Dissertation, Zittau.

Faeh A.O. (1997): Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation; A study based on the numerical simulation of hillslope experiments. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 150.

Feyen H. (1998): Identification of Runoff Processes in Catchments with a Small Scale Topography. Dissertation ETH Zürich, No. 12868.

Flügel W.A., Schwarz O. (1983): Oberflächenabfluss und Interflow auf einem Braunerde-Pelosol-Standort in Schönbuch; Ergebnisse eines Beregnungsversuchs. *Allg. Forst- und Jagdzeitung* 154, Jg. 3, 59-64.

Flury M., Flüher, H. (1995): Tracer characteristics of Brilliant Blue FCF. *Soil Science Soc. Am. J.*, 59, 22-27.

Flury M., Flühler H., Jury W.A., Leuenberger J. (1994): Susceptibility of Soils to Preferential Flow of Water: A Field Study. *Water Resources Research* 30(7), 1945-1954.

Forster J.C., 1995: Nutzungseinflüsse auf Struktureigenschaften von Gebirgsböden. *Bayreuther Bodenkundliche Berichte*, Bd. 42.

Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz (1974): Geologische Karte Blatt 6711, Pirmasens-Nord.

Germann P. (1981): Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. In: *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Nr.51.

Ghodrati M., Jury W.A. (1990): Field Studies using Dyes to Characterize Preferential Flow of Water. *Soil Science Soc. m. J.* , 54 (6), 1558-1563.

Glasstetter M. (1991): Die Bodenfauna und ihre Beziehungen zum Nährstoffhaushalt in Geosystemen des Tafel- und Faltenjuras (Nordwestschweiz). *Physiographica*, Bd. 15.

Harrach T., Vorderbrügge T. (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Ber. über Landwirtsch.* 204, Sonderheft: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Bd. 2 Bodengefüge, S. 69-82.

Harrach T. (2000): Methodische Ansätze der Bodenbewertung auf rekultivierten Bergbauflächen. *Mitt. Dtsch. Bdkl. Ges.* 93, 258-261.

Harrach T., Richter, U. (1994): Einfluß von Bodenbearbeitungsverfahren auf die Nitratverlagerung. In: *KTBL- Arbeitspapier 206: Strategien zur Verminderung der Nitratauswaschung in Wasserschutzgebieten*, S. 71-81

Harrach T., Sauer S. (2002): Bestimmung der Packungsdichte von Böden zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz.

Helming K., Roth C., Diestel H. (1996): Characterization of Rainfall-Microrelief Interaction with Runoff Using Parameters Derived from Digital Elevation Models (DEMs). In: *Soil Techn.*, 6, 273-286.

Hendriks M. (1993): Effects of Lithology and Land Use on Storm Runoff in East Luxembourg. *Hydrological Processes*, 7, 213-226.

Hofmann U., Köpfer P., Werner A. (1995): *Ökologischer Weinbau*. Verlag Ulmer, Stuttgart.

Holzhey C.S. (1969): Soil Morphological Relationships and Water Repellence. In: *Water Repellent Soils, Proc. Symp., Water repellent Soils, University of California, Riverside, May 6-10, 1968*, 281-288.

Horat & Scherrer (2000): Entwurf zum „Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen“, Bericht 00/11.

Hornberger G. M., Germann P. F., Beven K. J. (1991): Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment. *Journal of Hydrology* 124, 81-99.

Horton R.E. (1933): The Role of Infiltration in the Hydrologic Circle. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 14, 446-460.

Huber M. (1995): The Digital Geoecological Map. Concepts, GIS methods and case studies. *Physiogeographica*, Basler Beiträge zur Physiogeographie, Bd. 20, 144 S. und Karten.

Husse B. (1991): Soil conservation in vineyards. Forschungsstelle Bodenerosion, Universität Trier, H.10, 89-96.

Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft IHW (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung - aufgezeigt an drei Beispielen in Rheinland-Pfalz. Bericht Nr. B003. Auftraggeber: Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.

Kirkby, M.J. (1978): Hillslope Hydrology. John Wiley & Sons, Chichester (Eds.)

Kirkby M.J., Chorley R.J. (1967): Throughflow, Overland Flow and Erosion. *Bull. intern. Assoc. Sci. Hydrology*, 12, 5-21.

Koehler G. (1992): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrhein-Gebiet. *WB*, 44(1), 11-15.

Koepf H. (1963): Die Kennzeichnung des Bodengefüges im Felde. *Z. f. Kulturtechn. u. Flurbereinigung*, Bd. 4, S. 93-101.

Kohl R. & Harrach T. (1991): Zeitliche und räumliche Variabilität der Nitratkonzentration in der Bodenlösung in einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung*, Bd. 32, S. 80-87

Konrad H.J., (1975): Geologische Karte 1: 25'000 von Rheinland-Pfalz, Erläuterungen zum Blatt 6711 Pirmasens-Nord.

Kunzmann, G. (1989): Der ökologische Feuchtegrad als Kriterium zur Beurteilung von Grünlandstandorten, ein Vergleich bodenkundlicher und vegetationskundlicher Standortmerkmale. Diss. Univ. Giessen, *Dissertationes Botanicae* Bd. 134, J. Cramer Verlag, Berlin u. Stuttgart.

Kunzmann, G. (1990): Die Bestimmung des ökologischen Feuchtegrades von Grünlandstandorten mit einem modifizierten Zeigerartenverfahren. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 31, 368-380.

Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (1993): Topographische Karte 1:50'000, Blatt L6710, Pirmasens-Nord.

Lange H., Lischeid, G., Hoch R., Hauhs M. (1996): Water Flow Paths and Residence Times in a Small Headwater Catchment at Gardsjön, Sweden, During Steady State Storm Flowconditions. *Water Resources Research*, 32 (6), 1689-1698.

Leibundgut Ch., Uhlenbrook S. (1997): Abflussbildung bei Hochwasser. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.

Leser H, H.-J. Klink (1988): Handbuch und Kartieranleitung Geoökologische Karte 1:25 000. *Forsch. zur dtsh. Landeskde.* Bd. 228, Zentralausschuss f. dtsh. Landeskunde, Selbstverlag, Trier.

Leser H., Schaub D. (1995): Bodenerosion. Bekämpfungsmaßnahmen für Praktiker. Hrsg. H. Leser, Dep. für Geographie der Universität Basel.

Letey, J. (1969): Measurements of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension. Proceedings of the Symposium on water repellent soils, 6-10 May 1968, University of California, Riverside, 43-47.

Lin H.S., McInnes M.J., Wilding L.P., Hallmark c.T. (1999a): Effects of Soil Morphology on Hydraulic Properties: Quantification of Soil Morphology. Soil Science Society of America Journal, Vol. 63, 948-954.

Lin H.S., McInnes M.J., Wilding L.P., Hallmark c.T. (1999b): Effects of Soil Morphology on Hydraulic Properties: Hydraulic Pedotransfer Functions. Soil Science Society of America Journal, Vol. 63, 955-961.

Löhmannsröben R. (2000): Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.) Materialien Nr. 87.

Markart G., Kohl B. (1996): Einfluss der Bewirtschaftung, Vegetation und Boden auf das Abflussverhalten von Wildbacheinzugsgebieten. Internationales Symposium Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Tagungspublikation, Bd. 1, 135-144.

Marxen C. (1988): Untersuchungen zur jahreszeitlichen Dynamik von Bodenwasser und Bodenerosion im Pflughorizont unter besonderer Berücksichtigung der Oberflächenverdichtung: Untersuchungen mit einer Laborberegnungsanlage. Dissertation, Techn. Universität Braunschweig.

Meuser A. (1989): Einfluss von Brachlandvegetation auf das Abflussverhalten in Mittelgebirgslagen. Verlag Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten.

Mikovari A., Peter C., Leibundgut Ch. (1995): Investigation of Preferential Flow Using Tracer Techniques. IHAS Publ., 22, 87-97.

Mosimann T., Maillard A., Musy A., Neyroud J.-A., Rüttimann M., Weisskopf P. (1991): Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. In: Nationales Forschungsprogramm „Nutzung des Bodens in der Schweiz“.

Mosley M.P. (1979): Streamflow Generation in a Forested Watershed, New Zealand. Water Resources Research, 15, (4), 795-806.

Mosley M.P. (1982): Subsurface Flow Velocities through Selected Forest Soils, South Island, New Zealand. Journal of Hydrology, 52, 321-335.

Mückenhausen E. (1975): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrographischen Grundlagen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.

Müller S. (1984): Oberflächenabfluss, Abschwemmung und Abtrag von landwirtschaftlichen Nutzflächen als mögliche Ursache der Befruchtung von Trinkwassertalsperren. Dissertation, Universität Giessen.

Naef F., Scherrer S., Zurbrugg C. (1999): Große Hochwasser - Unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Blatt 5.7.

Naef F., Scherrer S., Weiler M., 2002: A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. Journal of Hydrology, Vol. 267 (1-2) (2002) pp. 74-79.

Peschke G., Etzenberg C., Müller G., Töpfer J., Zimmermann S. (1998): Die Abflussbildung in ihrer Abhängigkeit von der wirksamen Kombination flächenvariabler Einflussfaktoren und vom Gebietszustand. Abschlussbericht „Regionalisierung in der Hydrologie“, IHI, Zittau.

Petch R.A. (1988): Soil Saturation Patterns in Steep, Convergent Hillslopes under Forest and Pasture Vegetation. *Hydrological Processes*, 2, 93-103.

Rabenhorst M. C., Bell J. C., McDaniel; P. A. (Hrsg.) (1996): Quantifying soil hydromorphology: Proceedings Symposium sponsored by Division S-5 and S-10, and Committee S-884 of the Soil Science Society of America in Indianapolis, Indiana, 4 Nov. 1996

Rudolf A., 1997: Das Mikrorelief im Initialprozess der Obeflächenabflussbildung. *Bodenökologie und Bodengenese*, Bd. 24.

Rawls W.J., Brakensiek D.L. (1989): Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity. In: *Unsaturated Flow and Hydrologic Modeling, Theory and Practice*, Morel-Sytoux H.J. (Ed.); Kluwer Academic Publishers, 275-300.

Reiche E.-W. (1998): Bodenschätzungs-Standardauswertung Schleswig-Holstein: Eine Methode zur computergestützten Übersetzung, Parameterisierung und planungs-bezogenen Bodenbewertung. *Mitteil. d. Dtsch. Bodenk. Gesellsch.*, 87, 39-42.

Richter G. (1978): Bodenerosion in Reblagen des Moselgebietes, Ergebnisse quantitativer Untersuchungen 1974-1977. Forschungsstelle Bodenerosion der Univ. Trier, Mertesdorf (Ruwertal).

Richter G. (1998): Bodenschutzprobleme im Steilhang-Weinbau. In: *Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Hrs. G. Richter, Darmstadt, 185-193.

Richter U. (1995): Einfluß langjähriger differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. *Diss. Univ. Gießen, SR Boden und Landschaft*, Bd.4.

Römkens M.J.M., Prasad S.N., Whisler F.D. (1990): Surface Sealing and Infiltration. In: *Process studies in hillslope hydrology*. Eds. M.G. Anderson, T.P. Burt, Chichester.

Rohr W., Mosimann T., Bono R., Rüttimann M., Prasuhn V. (1990): Kartieranleitung zur Aufnahme von Bodenerosionsformen und -schäden auf Ackerflächen. *Legende, Erläuterungen zur Kartiertechnik, Schadensdokumentation und Fehlerabschätzung*. - Materialien zur Physiogeographie H. 14, Basel.

Roth C.H. (1992): Die Bedeutung der Oberflächenverschlammung für die Auslösung von Abfluss und Abtrag. *Bodenökologie und Bodengenese*, H. 6, Habilitationsschrift Techn. Univ. Berlin.

Roth C.H. (1998): *Physikalische Ursachen der Wassererosion*, Handbuch der Bodenkunde.

Roth C.H., Helming K., Fohrer N. (1995): Oberflächenverschlammung und Abflussbildung auf Böden aus Löss und pleistozänen Sedimenten. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 158, 43-54.

Sauer, S., U. Steinrücken & T. Harrach (1992): Die Bewertung stillgelegter und genutzter Ackerflächen für Belange des Naturschutzes im Lahn-Dill-Bergland. *Verh. Ges. f. Ökologie* 21, 447-451.

Sauer S., Harrach T. (1999): Nutzung von Bodenschätzungsdaten als Planungsgrundlage für die Flächenversickerung von Niederschlagswasser. Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung, Justus-Liebig-Universität, Giessen.

Sauer, S., V. Blencke, B. Pfeiffer & T. Harrach (2000): Bedeutung temporärer Vernässungen für die Artendiversität in der Agrarlandschaft I. Bodenkundliche Grundlagen und landwirtschaftliche Relevanz. *Verh. Ges. f. Ökologie* Bd. 30, S.41.

Sauer S., Harrach T. (2002): Konzept einer standort-bodenkundlichen Geländebegehung als Bestandteil des Bestimmungsschlüssels zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz.

Scheffer F., P. Schachtschabel (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage.

Scherrer AG (2005): Abflussprozesskarte Zemmer. Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz.

Scherrer S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 147.

Scherrer S., Naef F. (2003): A decision scheme to identify dominant hydrological flow processes on temperate grass land. *Hydrological Processes*, 17, 391-401

Scherrer S., Demuth N., Meuser A. (2002): A procedure for the identification of dominant runoff processes by field investigations to delineate the relevant contributing areas for flood modelling. Proceedings of the International Conference on Flood Estimation, March 6 - 8, 2002 Bern.

Scherrer S., Naef F., Faeh A., Cordery I. (2007): Formation of runoff at the hill-slope scale during intense precipitation. Submitted to: *Hydrology, Earth System Sciences HESS*.

Schmocker-Fackel P. (2004): A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations. Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH, Zürich.

Schlichting E., Blume H.-P., Stahr, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum*. 2. Aufl., Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin - Wien.

Selige Th. (1997): Flächenhafte Diagnose von Standorteigenschaften rekultivierter Böden mittels Bioindikation und digitaler flugzeuggestützter Fernerkundung. Diss. Univ. Gießen. DLR-Forschungsbericht DLR-FB-97-40.

Selige T. & Vorderbrügge T. (1994): Roots and Yield as Indicators of Soil Structure. In: Kutschera, L. et al.: *Root Ecology and its Practical Application*, 3rd ISRR-Symposium Wien, Univ. Bodenkultur, 1991, Verein für Wurzelforschung, A-9020 Klagenfurt, S. 121-124.

Smettem K.R.J., Collis-George N. (1985): Statistical Characterization of Soil Biopores using a Peel Method. *Geoderma*, 36, 27-36.

Sokollek V., Süßmann W. (1981): Einfluss von Bodennutzung und Standorteigenschaften auf Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und Nährstoffaustrag bei simulierten Starkregen. Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 30, 361-378.

Stamm C. (1997): Rapid transport of phosphorus in drained grassland soils. Dissertation ETH Zürich, Nr. 12486.

Steinrücken, U. (1998): Die Ackervegetation als Zeiger für Bodeneigenschaften in Kirchvers, Lahn-Dill-Bergland. Diss. Gießen, Schriftenr. Boden und Landschaft Bd. 19.



Steinrücken, U., H. Vollrath & T. Harrach (2000): Bedeutung temporärer Vernässungen für die Artendiversität in der Agrarlandschaft I. Stoffhaushalt und Artendiversität der Ackerwildkrautgesellschaften. *Verh. Ges. f. Ökologie* Bd. 30, S.42.

Syers J.K., Springett J.A., 1983, Earthworm ecology in grassland soils. In: Satchell J.E. (ed) earthworm ecology - from Darwin to vermiculture, Capman and Hall, 67-83.

Tenholtern, R., G. Dumbeck & T. Harrach (1996): Standortbeurteilung auf rekultivierten Flächen im rheinischen Braunkohlenrevier. In: Alfred-Wegener-Stiftung (Hrsg.): Von den Ressourcen zum Recycling, 141-153.

Tenholtern (2000): Bodengefüge, Durchwurzelung und Ertrag als Indikatoren für Lockerungsbedürfnis und Lockerungserfolg auf rekultivierten Standorten im rheinischen Braunkohlerevier. *Diss. Univ. Gießen. Boden und Landschaft* Bd. 28.

Trojan M.D., Linden D.R., 1992, Microrelief and rainfall effects on water and solute movement in earthworm burrows, *Soil Sci Soc Am J* 56, 727-733.

Tsuboyama Y., Sidle R.C., Noguchi S., Hosoda I. (1994): Flow and Solute Transport through the Soil Matrix and Macropores of a Hillslope Segment. *Water Resources Research*, 30 (4), 879-890.

Turton D.J., Barnes D.R., Návar J. de J. (1995): Old and New Water in Subsurface Flow from a Forest Soil Block. *Journal of Environmental Quality*, 24, 139-146.

Uhlenbrook S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 10.

Valentin C, Bresson L. M. (1992): Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55, 225-245.

Vorderbrügge T. (1989): Einfluß des Bodengefüges auf Durchwurzelung und Ertrag bei Getreide - Untersuchungen an rekultivierten Böden und einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. *Diss. Univ. Gießen, Giessener Bdkdl. Abh.*, Bd. 5.

Voronkov N.A., Kozhevnikova S.A., Pavlushkin L.T., Shomolova V.A. (1976): Hydrologic and Meteorological Role of Forest Plantations of Various Tree Species. *Soviet Hydrology, Selected Papers*, 15, 75-79.

Warner G.S., Nieber J. L. (1991): Macropore ditributions in tilled vs. grass-surfaced cores as determined by computed tomography, *Preferential Flow, symposium*, 849 645, 192-201.

Warner C.A. (1998): *Earthworm ecology*, Soil and Water Conservation Society.

Waldenmeyer G. (1999): Ausgliederung von Flächen gleicher Abflußreaktion auf Grundlage der Forstlichen Standortskarte und eines Digitalen Höhenmodells. <http://www-ihw.bau-vern.uni-karlsruhe.de/projects/duerreych/99waldenm.html>.

Walter B. (1991): Consolidation of vineyards and soil problems. *Forschungsstelle Bodenersion, Universität Trier*, H.10, 71-80.

Weiler M., Scherrer S., Thoma C., Fackel P., Naef F., 2000: The potential to influence runoff processes by changes in landuse. *Proceeding European Conf. On advances in flood research*, PIK Report No. 65. Eds. A. Bronsstert, C. Bismuth und L. Menzel.

Weiler M. (2001): Mechanisms controlling macropore flow during infiltration - dye tracer experiments and simulations Mitteilungen des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich, Bd. 7. .

Weiler M., Naef F., Leibundgut Ch. (1998): Study of Runoff Generation on Hillslopes Using Tracer Experiments and a Physically-based Numerical Hillslope Model. IAHS Publ. No. 248.

Werner, D. & Thämert, W. (1989): Zur Diagnose des physikalischen Bodenzustandes auf Produktionsflächen. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, Berlin, Bd. 33, S. 729-739.

Whipkey R.Z. (1965): Subsurface Stormflow from Forested Slopes. Bull. of IASH, 1, 74-85.

Wigmosta M. S., Lettenmaier D. P. (1999): A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow. Water Resour. Res., 35(1), 255-264.

Wilson G.V., Jardine P.M., Luxmoore R.J., Jones J.R. (1990): Hydrology of a Forested Hillslope during Storm Events. Geoderma 46, 119-138.

## Abkürzungsverzeichnis:

AG BODEN Kartieranleitung 4 (AG, Bodenkunde, 1994).

ATKIS Amtlich topographisch-kartographisches Informationssystem der Landesvermessungsämter

c Carbonatgehalt

h Humusgehalt

Vn Vernässungstufe

Ver Verschlammungsneigung

W Durchwurzelungsintensität

I Niederschlagsintensität

Mp Makroporen, Makroporosität

PBS Prozess-Beurteilungsschema

Pd Packungsdichte

SSF Subsurface Flow (Abfluss im Boden)

HOF Hortonischer Oberflächenabfluss

THOF Temporary Hortonian Overland Flow (vorübergehender Oberflächenabfluss)

SOF Saturation Overland Flow (gesättigter Oberflächenabfluss)

DP Deep percolation (Tiefensickerung)

## Anhang

- Anhang 1: Grundlagen zu den Abflussprozessen auf verschiedener Landnutzung
- Anhang 2: Weitergehende Untersuchungen zur Vorerkundung
- Anhang 3: Abflussreaktionskurven
- Anhang 4: Fotodokumentation
- Anhang 5: Bestimmung der Packungsdichte nach Harrach & Sauer, 2002
- Anhang 6: Verschiedene Formulare zur Erfassung hochwasserrelevanter Kriterien

## Fußnoten

- 1 Die Unterscheidung zwischen Hortonschem Oberflächenabfluss (HOF) und gesättigtem Oberflächenabfluss (SOF, siehe S. 7) ist oft schwierig. Verschiedene Autoren sprechen von SOF, wenn ein Oberboden, der über einem weniger durchlässigen Unterboden liegt, gesättigt wird. Da als Ursache für den Oberflächenabfluss ein Infiltrationshemmnis des Unterbodens vorliegt, gehen wir in solchen Fällen von HOF aus. Von SOF wird hier gesprochen, wenn (weitgehend) die gesamte Bodensäule gesättigt ist.
- 2 Der Vorgang der Verschlämmung kann durch einen hohen Regenwurmbesatz und die damit verbundene Perforation der Verschlammungskruste kompensiert werden.
- 3 Fachliteratur wie Hillslope Hydrology (Kirkby, 1978) oder Process studies in hillslope hydrology (Anderson & Burt, 1990) vermittelt Anschauungsmaterial, wie man sich das Zusammenwirken von Abflussprozessen vorstellen muss.
- 4 Die Anwendung der PBS stützt sich auf Informationen ab, die an Bodengruben erhoben werden können. Sondierungen geben zwar Aufschluss über Schichtung, Textur, Bodenfarbe, etc., hingegen sind Aussagen über die Struktur an einer Sonde (Pürkhauer oder Rammkernbohrung) kaum machbar.
- 5 Die Entwicklung von geographischen Informationssystemen hat dazu geführt, dass verschiedenartige, digital verfügbare Geländedaten miteinander kombiniert („verschnitten“) werden, und so beispielsweise auf die Abflussreaktion von Einzugsgebieten geschlossen wird. Diese Verfahren haben bis heute nicht den erwarteten Erfolg gehabt. Verschiedene Gründe sind dafür verantwortlich, wie beispielsweise die Komplexität des Abflussbildungsprozesses, fehlendes oder unvollständiges Prozessverständnis, Unkenntnis der maßgebenden Parameter und deren Zusammenwirken, gegenseitige räumliche Beeinflussung der Prozesse, mangelnde Verfügbarkeit wichtiger Parameter wie z.B. Makroporosität u.v.a.
- 6 Eine Catena ist eine regelhafte Abfolge von Böden an einem Hang, die durch Umlagerungsprozesse differenziert wurden.
- 7 Heterogenitäten bei Aufbau und Eigenschaften des Bodens sind bei natürlichen aber auch anthropogen überprägten Böden üblich. Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen kommt die Art der Bearbeitung (unterschiedlicher Verdichtungs- und Deckungsgrad auf Fahrspuren und in den Zwischenbereichen, u.a.) ins Spiel. Auf Fahrspuren ist häufig HOF zu beobachten, während im Zwi-

- schenbereich durchaus gute Infiltrationseigenschaften vorherrschen können. Ob solche Fahrspuren abflussrelevant werden können, hängt von verschiedenen Faktoren u.a. auch von der Bewirtschaftungsrichtung ab. Beim Übertragen einer Standortbeurteilung auf die Fläche muss der Bearbeiter diesem Umstand Rechnung tragen.
- 8 Bei einem Beregnungsversuch in Hospental in den Schweizer Zentralalpen entstand auf der Oberfläche eines flachgründigen sandigen Braunerdebodens, der einen oberflächennahen Wurzelfilz aufwies, rasch aber vorübergehend Oberflächenabfluss. Als Ursache wurde die starke Austrocknung und die starke oberflächennahe Durchwurzelung angesehen.
  - 9 Unter Packungsdichte wird der mit gefügekundlichen Feldmethoden ermittelte Grad der Kompaktheit bzw. Lockerheit eines Bodenhorizontes verstanden, der einen fundamentalen Einfluss auf wichtige Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen wie Porengrößenverteilung, Wasserdurchlässigkeit, Durchlüftung, Durchwurzelbarkeit, Ertragsfähigkeit, Verdichtungsempfindlichkeit, usw. ausübt. Diese Bodeneigenschaften bzw. Bodenfunktionen werden nicht durch die Packungsdichte allein, sondern durch die Kombination von Körnung (Textur), Packungsdichte und teils auch Wassergehalt bestimmt (Harrach&Sauer, 2002).
  - 10 Strukturelle Eigenschaften wie Packungsdichte, Gefüge etc. beeinflussen die hydraulische Leitfähigkeit von Böden (DIN, 1998). Ein Konzept für die Quantifizierung von Bodenstrukturen wurde von Lin et al., 1999a und b vorgestellt. Allerdings sprengt die Verfahrensweise den Aufwand, der im Zusammenhang mit einer Prozessbeurteilung zu leisten möglich ist. Eine wesentliche Vereinfachung müsste erarbeitet werden, die aber den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte.
  - 11 Warner und Nieber, 1991; Ehlers, 1975; Trojan und Linden, 1998; Edwards, 1990; Edwards, 1998, Warner, 1998.
  - 12 Weiler (2002) benützte einen Industriestaubsauger, um die Schnittfläche von Bodenteilchen zu reinigen und damit die  $M_p$  freizulegen.
  - 13 Penetrometer, bestehend aus einer Stabsonde und einer Registriereinheit, die den Eindringwiderstand aufzeichnet. Nur auf skelettarmen Böden liefert dieses Instrument realistische Resultate. Aufgrund der begrenzten Einsatzmöglichkeit wird auf den Einsatz verzichtet.
  - 14 Hilfestellung bei der Beurteilung von Bodengefüge gibt auch die Anleitung „Bodenstruktur erkennen und beurteilen“ (Bayerisches Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 1997).
  - 15 Scherrer, 1997 hat beispielsweise mittels Tensiometer in unterschiedlichen Bodentiefen an einer sandigen Braunerde (Standort Therwil) gezeigt, wie bei einem Niederschlag von über 100 mm in zwei Tagen der Niederschlag als Sickerfront weitgehend über die Matrix infiltrierte. Bei den Beregnungsversuchen mit hohen Niederschlagsintensitäten von bis zu 100 mm/h spielten die Makroporen eine wichtige Rolle bei der Infiltration und bei Verteilung des Wassers im Boden.
  - 16 Bei Beregnungsversuchen im Sandsteingebiet der subalpinen Molasse wurde starker Abfluss in solchen lateralen Fließwegen beobachtet (Beregnungsversuch Willerzell-Hang).
  - 17 Hydromorphie ist die durch Stau- oder Grundwasser hervorgerufene graue bis rötliche Verfärbung (Flecken) der Böden. Oxidationsprozesse führen zur Rotfärbung, Reduktion zur Graufärbung der Bodenmatrix.
  - 18 Zusätzlich kann die Bodenfeuchteänderung unterhalb der Beregnungsfläche mit dem Time Domain Reflectometry (TDR), System Moisture Point, der Firma Environmental Sensors Inc. gemessen werden, um die Verteilung des Wassers im Boden zu untersuchen. Dieses System ermöglicht die Bestimmung des Bodenwassergehaltes in mehreren Tiefen mittels einer einzigen, 100 cm

## Anhang 1: Grundlagen zu den Abflussprozessen auf verschiedener Landnutzung

Die Ausführungen in Anhang 1 entstammen IHW, 2000.

### A Ackerbaulich genutzte Flächen

Die Abflussbildung auf Äckern hängt vom Aufbau und der Bearbeitung des Bodens sowie von der Kultur ab (DVWK, 1985). Die Durchlässigkeit der Böden wird von Bearbeitungstiefe, Makroporen, Bodenart, Wurzeldichte, Durchwurzelungstiefe und Verdichtungen beeinflusst. Die Durchlässigkeit der Oberböden kann durch verschlammtes Material oder durch daraus entstandene Krusten verringert werden. Saisonale Aspekte, wie der Deckungsgrad der Vegetation, spielen dabei eine wichtige Rolle. Das Befahren der Äcker kann zu lokalen Verdichtungen der Flächen führen.

#### Verschlammung und Bodenkrusten

Die Oberfläche von ackerbaulich genutzten Böden unterliegt wiederkehrenden Veränderungen. Je nach Nutzpflanze variiert der Deckungsgrad und die Bodenoberfläche ist unterschiedlich lang und stark der Aufprallwirkung großer Tropfen bei Starkniederschlägen ausgesetzt (Römken et al., 1990). Große Regentropfen, v.a. bei Gewitterregen, können die Bodenaggregate an der Oberfläche zerschlagen und in einzelne Partikel zerlegen. Das so entstandene Feinmaterial kann sich auf der Oberfläche verteilen, die Wasserdurchlässigkeit der Matrix begrenzen und Makroporen verfüllen. Die von Makroporen beeinflusste Infiltration geht dann zurück. Bei Austrocknung des verschlammten Materials können sich Krusten bilden, die eine markant tiefere Wasserleitfähigkeit aufweisen als strukturierte Böden (Roth, 1998)<sup>1</sup>. Schwach aggregierte Böden aus Löss und pleistozänen Sedimenten, die oft schluffreich und feinsandig sind, sowie kalziumarme Böden gelten als besonders gefährdet für Verschlammung. Einen ungenügenden Schutz der Bodenaggregate gegen die Aufprallwirkung großer Tropfen gewähren Mais, Zuckerrüben, Hopfen und Reben. Getreide bietet nur im Jungstadium einen ungenügenden Schutz. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten, Anwendung von Mulchungen, Stabilisierung des Bodengefüges (Kalkung, Zufuhr organischer Substanz. u.a.) und Erhöhen der Oberflächenrauigkeit kann die Verschlammungsanfälligkeit wesentlich verringert werden (Roth et al., 1995). Weitere Ursachen und Teilprozesse, die den Verschlammungsprozess beeinflussen, finden sich bei Roth (1998).

Die Verschlammung kann also auf strukturschwachen Böden die Infiltration limitieren, allerdings liegen nach Roth (1998) die Infiltrationsraten immer noch im Bereich wenig intensiver Niederschläge (2-19 mm h<sup>-1</sup>). Entstehen hingegen eigentliche Krusten, so kann je nach Krustentyp die Infiltrationsrate in den Bereich von 1-3 mm h<sup>-1</sup> sinken (Valentin und Bresson, 1992). Nach Harach und sauer, 2002 werden Sedimentkrusten, die aus abgetragenen Bodenmaterial aufgebaut sind und Regenschlagkrustendie auf die Splashwirkung der Regentropfen zurückgehen, unterschieden.

---

<sup>1</sup> Roth (1998) untersuchte die mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit an verschlammten 5 mm mächtigen Schichten: Eine lehmig-siltige Parabraunerde aus Löss wies im Ausgangszustand eine Wasserleitfähigkeit von 378 mm/h auf, im verschlammten Zustand nur gerade 6 bis 12 mm/h).

## Einfluss von Bewirtschaftung auf Bodengefüge, Infiltration und Entstehung von Oberflächenabfluss

Die Bewirtschaftung von Ackerböden führt alljährlich zu einem Aufbau und teilweisen Abbau von Fließstrukturen im Boden. Einerseits zerstört das Pflügen zumindestens teilweise die durch Pflanzenwurzeln und Bodenlebewesen erzeugten Makroporen und Bodenaggregate. Es sorgt jedoch andererseits dafür, dass verdichteter Oberboden aufgebrochen wird und seine Durchlässigkeit langfristig gewährleistet bleibt. Durch wiederholtes Pflügen in etwa ähnlicher Tiefe kann sich eine Pflugsohle ausbilden, die ihrerseits die Wasserbewegung im Boden beeinflussen kann. Anschliessend werden einige wissenschaftliche Arbeiten zum kontroversen Thema des Einflusses der Bodenbewirtschaftung aufgeführt und versucht, eine Wertung der einzelnen Einflüsse vorzunehmen.

Beisecker (1994) hat die Wasserflüsse im Boden bei verschiedenen Bearbeitungsmethoden untersucht (Direktsaat, Pflügen und Flügelschargrubber). Er stellte fest, dass ohne Bearbeitung längerfristig höhere Bodendichten und komprimierte Gefüge, aber auch höhere Belastbarkeit und Tragfähigkeit der untersuchten Böden entstehen. Bei der Pflugvariante waren die vertikalen Wasserflüsse größer als bei der Direktsaat. Die durchgängigen Makroporen waren bei der Direktsaatvariante jedoch länger als bei jährlichem Pflügen. Im Verlauf der Vegetationsperiode zeigten die bearbeiteten Böden, unabhängig von Verschlammungs-, Verkrustungs- oder Verdichtungseffekten, Sackungen, die in einer Abnahme der Leitfähigkeit resultierten (Marxen, 1988).

Berechnungsversuche des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (1985) zeigten, dass mit Anbauweisen, die der Bodenerosion entgegenwirken (höhenkurvenparalleles Pflügen, Untersaat, Lockerung der Fahrspuren, hangparallele Querstreifen mit anderer Kultur, etc.), auch der Oberflächenabfluss bei Starkregen wesentlich eingeschränkt wird, (siehe auch Müller, 1984). Sokollek und Süssmann (1981) beobachteten nach Abernten eines Getreidefeldes, das stark befahren wurde, große Oberflächenabflüsse. Bei gefrorenen Böden wurde schon nach wenig intensiven Niederschlägen auf allen Äckern Oberflächenabfluss beobachtet, ausser bei frisch gepflügten und wenig geneigten (Neigung < 2% ). Die abflussdämpfende Wirkung rauher Oberflächen führte Erpenbeck (1987) auf die geringere Abflussgeschwindigkeit und die dadurch erhöhte Infiltration zurück.

Die Verdichtung des Oberbodens wird wesentlich durch den unterschiedlich starken Einsatz von Landmaschinen für die Bearbeitung der Felder beeinflusst. Kartoffelanbau beispielsweise führt im Jahresverlauf zu fast flächendeckendem Befahren der Flächen. In den Untersuchungen der Bodenerosion werden verschiedenste Vorschläge zur Eindämmung des Oberflächenabflusses gemacht (Richter, 1998; Mosimann et al., 1991).

Vegetationslose Hänge zeigen mit zunehmender Hanglänge größeren Oberflächenabfluss. Schon geringe Vegetationsbestände verringern den Oberflächenabfluss im Vergleich zu vegetationsfreien Flächen (DVWK, 1985). Besonders Klee und Luzerne vermindern Oberflächenabfluss.

## **B Weinberg**

Abflussprozesse an weinbaulich genutzten Hängen wurden kaum untersucht. Hingegen sind über die Bodenerosionsproblematik in Weinbergen verschiedene Arbeiten vorhanden, worüber Richter (1998) einen Überblick gibt. Heute werden auch im Rebbau Maschinen eingesetzt. Dafür wurden größere Parzellen angelegt, Terrassen beseitigt und die Parzellen mit einem Wegnetz erschlossen. Die so geschaffenen größeren und längeren, teilweise auch steileren, Hänge sind aber anfälliger auf Bodene-

rosion und Oberflächenabfluss. Allerdings hängt die jährliche Erosionsrate wesentlich von einzelnen starken Gewittern ab (Richter, 1978). Erosionsvermeidende Maßnahmen werden von Walter (1991), Husse (1991) und Hofmann et al. (1995) vorgestellt.

Der Bodenerosion wird vermehrt mit Mulchungen aus Baumrinden, Sägemehl oder Stroh begegnet, oder es wird spontaner Unkrautwuchs oder Untersaat zugelassen (Richter, 1998).

Im Einzugsgebiet des Katzenbachs konnte eine kombinierte Praxis festgestellt werden. Einige Reizeilen werden unkrautfrei oder gemulcht gehalten, während andere im selben Weinberg eine deckende Grasschicht aufweisen. Teilweise wird die Grasvegetation während der Vegetationsperiode beseitigt, wahrscheinlich um den Pilzbefall und Nährstoff-/Wasser Konkurrenz zwischen Reben und Gras zu vermeiden.

Die grundsätzlichen Unterschiede zu ackerbaulich genutzten Gebieten liegt in der Steilheit der Weinberge. Während Äcker kaum steiler als 15% sind, können Weinberge bis ca. 80% geneigt sein. Große Steilheit von Weinbergen bedeutet nicht unbedingt viel Oberflächenabfluss (Richter, 1978). Bei steilen Hängen kann einmal entstandener Oberflächenabfluss an Fließgeschwindigkeit zulegen und deshalb nur schwer wieder versickern. Auch bei weniger intensiven Niederschlägen kann bei Böden mit einer verschlammungsanfälligen Bodenoberfläche durch eine Kombination von mangelndem Deckungsgrad, schwacher Durchwurzelung und oberflächennaher Verdichtungserscheinungen Oberflächenabfluss entstehen.

Da Weinberge oft an sonnenbegünstigten Lagen liegen, kann von guten Verhältnissen für die Strukturbildung (Benetzungs- und Austrocknungsvorgänge, Bodenfauna) ausgegangen werden. Sofern die Böden weder strukturlabil, noch aufgrund der Bewirtschaftung verdichtet sind, dürfte eine günstige Durchlässigkeit vorherrschen.

## **C Grünland**

Eine dichte Grünlandvegetation kann zusammen mit oberflächennahem Wurzelfilz eine temporäre Verringerung der Infiltrationsrate hervorrufen (Scherrer, 1997). Die oberflächennahe, dichte Durchwurzelung kann bei warmer Witterung zu einer starken Austrocknung der obersten Zentimeter führen. Dies führt dazu, dass Oberböden mit einem hohen organischen Gehalt nach längeren niederschlagsarmen Perioden wasserabstossend (hydrophob) sind. Vegetationsdecken mit Borstgräsern (*Nardus stricta*) sind besonders oft hydrophob (Markart und Kohl, 1996). Dieser Effekt kann auf subalpinen Böden über längere Zeit anhalten (Barret und Slaymaker, 1989). Holzhey (1969) gibt eine Übersicht über Hydrophobizität auslösende Faktoren.

Verdichtung durch landwirtschaftliche Bearbeitung oder hohen Beweidungsdruck verringert die Durchlässigkeit des Oberbodens. In DVWK (1985) wird ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Beweidung und Erhöhung des Oberflächenabflusses festgestellt. Erpenbeck (1987) zeigte auf, dass eine narbenschonende Grünlandnutzung (an der Bodenfeuchte orientierte Beweidung, Heu- und Graswerbung bei möglichst trockenen Verhältnissen) den Oberflächenabfluss verringert.

Die Infiltration im Boden unter Grünland ist stark durch Makroporen beeinflusst (Germann, 1981). Das Makroporensystem kann sich auf Grünlandböden sehr gut entwickeln, da der Boden nicht durch Pflügen gestört wird. Findet die Infiltration über Makroporen statt, so ist besonders der Wasseraustausch (Interaktion) zwischen den Makroporen und der umgebenden Bodenmatrix von Relevanz. So stellte Faeh (1997) fest, dass bei Böden mit geringer Interaktion rasch Hortonscher Oberflächenab-



fluss entstand. Geringe Interaktion kann aber auch zu bypass flow führen, wodurch das Wasser rasch in tiefere Bereiche des Bodens gelangt. Sofern dort leistungsfähige laterale Fließstrukturen vorhanden sind, ist die Voraussetzung für starken unterirdischen Abfluss gegeben.

Befinden sich die Grünlandflächen in vernässten Bereichen, findet rasch SOF statt (bei höheren Niederschlagsintensitäten HOF). Ist das Gebiet drainiert, wird der Wasserspiegel abgesenkt. Damit verbessert sich in der Regel die Strukturbildung und damit das Wasser-Rückhaltevermögen von Böden. Zusammen mit bypass flow kann aber ein Drainagesystem das in die Tiefe gelangende Wasser rasch abführen und zu verzögertem, aber starkem Abfluss im Boden führen (Stamm, 1997).

Müller (1984) stellte bei Grünlandböden eine starke saisonale Abhängigkeit der Wasserbewegung im Boden fest. Er begründete dies mit einer Verdichtungszunahme im Oberboden infolge einer Veränderung des Makroporensystems. Meuser (1989) untersuchte die saisonale Abhängigkeit von Grasbrache auf das Abflussverhalten und stellte aufgrund der besseren Entwicklung des Makroporensystems während der Vegetationsphase sehr hohe Sickerwassermengen fest, die bei günstigen geologischen Verhältnissen nur eine geringe Abflussreaktion erzeugen (DP). In der vegetationsfreien Zeit ist jedoch aufgrund der Aufsättigung des Bodens und der schlechteren Ausbildung des Makroporensystems von einer höheren Abflussbereitschaft auszugehen.

Die hohe Variabilität im Aufbau der Böden, die für Weidewirtschaft und begrenzt auch für Graswirtschaft genutzt werden, sowie die unterschiedliche landwirtschaftliche Bewirtschaftung (Beweidung oder Mähen) führen je nach Standorteigenschaften zu verschiedenen Abflussprozessen.

## **D Abflussprozesse im Wald**

### a) Grundlagen

Wälder wirken im Vergleich zu Wiesen, Weiden und Äckern dämpfend auf Abflussspitzen. Größere Interzeptionspeicher und höhere Transpiration einerseits sowie wasserspeichernde Streu und vergleichsweise größere Durchlässigkeit der Böden andererseits, sind die relevanten Faktoren. Zahlreiche Untersuchungen haben bereits den Waldeinfluss aufgezeigt, wie z.B. die langjährigen Abflussmessungen in 3 benachbarten Kleinstenungsgebieten in Russland (20 bis 30 ha) mit unterschiedlichem Waldanteil von 13%, 57% und 90% (VORONKOV ET AL., 1976). Diese Untersuchungen stellen anschaulich die Verminderung der jährlichen maximalen Scheitelabflüsse dar (vgl. IHW, 2000).

Im Wald wird der Infiltrationsvorgang sehr stark durch das Wurzelsystem der Bäume gesteuert. Es entwickelt sich ein stabiles Makroporensystem, das Wasser präferentiell in die Tiefe leitet und für eine hohe laterale Durchlässigkeit sorgt (WHIPKEY, 1965 und MOSLEY, 1979). Schwundrisse in tonigen Böden erhöhen zudem die Infiltrationsrate. Besonders im Sommer leiten solche Strukturen den Niederschlag als bypass flow direkt zu den lateral abflusswirksamen Bereichen (FLÜGEL UND SCHWARZ, 1983; HENDRIKS, 1993).

Im Wald wird der Infiltrationsvorgang sehr stark durch das Wurzelsystem der Bäume gesteuert. Es entwickelt sich ein stabiles Makroporensystem, das Wasser präferentiell in die Tiefe leitet und für eine hohe laterale Durchlässigkeit sorgt (WHIPKEY, 1965 und MOSLEY, 1979). Schwundrisse in tonigen Böden erhöhen zudem die Infiltrationsrate. Besonders im Sommer leiten solche Strukturen

den Niederschlag als bypass flow direkt zu den lateral abflusswirksamen Bereichen (FLÜGEL UND SCHWARZ, 1983; HENDRIKS, 1993).

In bewaldeten Hängen kann bedeutender lateraler Abfluss im Boden entstehen. Dieser unterirdische Abfluss kann, ohne dass die Bodenmatrix gesättigt ist, als präferentieller Fluss in Wurzelkanälen, Pipes oder hoch durchlässigen Schichten erfolgen. Dabei können hohe Fließgeschwindigkeiten bis 2 cm s<sup>-1</sup> auftreten (BEASLEY, 1976; MOSELY, 1979). Lateraler Fluss findet auch häufig im gesättigten Bereich, z.B. an Schichtgrenzen, statt. In mächtigen stark durchwurzelten, humusreichen Oberböden, die bei tonigen, gleyigen Böden einen wirksamen Fließweg darstellen (FEYEN, 1998) oder in tieferen hoch durchlässigen Bodenschichten (WHIPKEY, 1965) kann es zu starkem lateralen Fluss kommen. Nur unter ungünstigen Bedingungen wurde in bewaldeten Gebieten bei extremen Niederschlagsereignissen Oberflächenabfluss beobachtet. Eine Vielzahl von künstlichen Beregnungsversuchen auf Waldböden mit hohen Intensitäten zeigte, dass die minimale Infiltrationsrate nicht unter 50 mm h<sup>-1</sup> sank und Oberflächenabfluss erst nach etwa 30 mm Niederschlag begann (DVWK, 1985; WEILER ET AL., 1998). Die geringeren Infiltrationsraten treten bei

- naturfernen Fichtenbeständen, meist auf undurchlässigen, vernässten Standorten (Gley),
- strukturschwachen Böden auf Waldweiden,
- tonigen Standorten (Pelosole),
- Standorten mit hydrophobem Auflagehumus

auf. Die Hydrophobizität des Oberbodens ist nur auf Böden mit wenig Makroporen relevant (BURCH ET AL., 1989). SOF tritt in Wäldern auf Böden auf, die aufgrund ihrer Bodeneigenschaften (tonig, lehmig) oder wegen ihrer Lage im Relief (Muldenlage, Hangfuss) schlecht drainieren können oder dauernden Wasserzuschuss erhalten. Der Wasserverbrauch der Bäume während der Vegetationsperiode sorgt dafür, dass Böden, welche im Freiland vernässt wären, eine „Entwässerung“ über die Vegetation erfahren (PETCH, 1988). Da Waldböden selten befahren werden, herrschen aufgrund der hohen Makroporendichte günstige Infiltrationseigenschaften vor. In flachen Gebieten mit tiefgründigen, durchlässigen und unvernässten Böden ist ein großes Speicherpotential vorhanden. Dort dürfte kaum Abfluss entstehen. Auf flachgründigeren Böden in Hanglagen sind hingegen aufgrund der Vegetation eine Vielzahl von bevorzugten Fließstrukturen vorhanden, die raschere Abflüsse im Boden ermöglichen (SSF 1 und SSF 2). In solchen Gebieten ist lateraler Abfluss im Boden der dominierende Abflussprozess (BURCH ET AL., 1989).

## b) Schlussfolgerungen

Wird von der räumlichen Niederschlagsverteilung durch die Pflanzendecke (Kronentraufe, Tropfniederschlag, Interzeption, Stammabfluss) einmal abgesehen, beeinflusst die Vegetation die Abflussbildung in Wäldern durch die Schaffung von Fließstrukturen im Boden maßgeblich. Je nach Art des Waldes (Bestandesdichte, Altersstruktur des Bestandes, Zusammensetzung der Baumarten mit teilweiser charakteristischer Durchwurzelung (Wurzeldichte und -tiefen), dem Vorhandensein einer Untervegetation, wie Kraut- und Moosschicht, u.v.a.), dürfte sich im Zusammenspiel mit der Bodenart ein vertikales und eventuell laterales Fließen ausbilden. Eine direkte Beeinflussung der Abflussbildung durch die Vegetation geht aber auch von der Entwicklung und Beschaffenheit des Oberbodens aus. In Wäldern entstehen je nach Standorteigenschaften aber v.a. in Abhängigkeit der Vegetation (Art und Abbaubarkeit der anfallenden Streu) unterschiedlich aufgebaute Oberböden. Von kaum vor-

handenem Humus (beispielsweise Fichtenmonokulturen) bis zu mächtigen Humusauflagen (vernässte oder niederschlagsreiche Gebiete) reicht das Spektrum. Bei der Entwicklung des Prozessbeurteilungsschemas Wald zeigte sich, dass es schwierig ist, die sämtliche Einflussfaktoren in einem Schema zu berücksichtigen. Das Beurteilungsschema hat demzufolge stark vereinfacht werden müssen.

## Anhang 2:

### Weitergehende Untersuchungen zur Vorerkundung (Sauer & Harrach, 2002)

#### Vernässungsgrad

Am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Justus-Liebig-Universität Giessen wurde ein Kartierschlüssel für die feldbodenkundliche Ansprache des Vernässungsgrades von Ackerflächen erarbeitet (Tab. 2) und in verschiedenen Projekten erprobt (z. B. Tenholtern et al., 1996; Selige, 1997, Tenholtern, 2000; Pleus, 2002). Die Durchführung erfolgt nach ausreichender Durchfeuchtung des Bodens und nach beginnender Abtrocknung der nicht vernässten Böden, in der Regel im Frühjahr, wenn die nicht vernässten Böden bereits befahrbar, aber die temporär vernässten Böden noch nicht befahrbar sind. Für die sichere Ansprache von Vernässungen muss die Ansprache des Vernässungsgrades nicht unbedingt erfolgen, auch wenn der Ausprägungsgrad Aussagen über die Intensität der Abflussprozesse zulässt.

**Tabelle 1: Kartierschlüssel für die feldbodenkundliche Ansprache des Vernässungsgrades auf Ackerflächen**

Vernässungsgrad	Bezeichnung	Kartierungskriterien
Vn1	nicht vernässt, abgetrocknet	befahrbar, keine tiefen Fahrspuren, nur flache Fuß-abdrücke, aufgehellte Bodenfarbe
Vn2	nicht vernässt, feucht	wie bei 1, aber Bodenfarbe nicht aufgehellt
Vn3	vernässt	kaum befahrbar, tiefere Fahrspuren, tiefere Fußabdrücke; bei empfindlichen Pflanzen sichtbare Entwicklungsstörungen, Chlorosen
Vn4	stark vernässt	nicht befahrbar, kaum begehbar, tiefe Fußabdrücke, Wasser in Fahrspuren; gestörte Pflanzenentwicklung, Chlorosen
Vn5	sehr stark vernässt	nicht begehbar, teils Oberflächenwasser; stark gestörte Pflanzenentwicklung

Zusammenfassend ergeben sich auch für andere Nutzungsarten folgende Kartierungskriterien für die sichere Ansprache von Vernässungen: Oberflächenwasser, Bodenfarbe (nur Acker), Konsistenz des Bodens (nur Acker), Befahrbarkeit, Begehbarkeit, Entwicklungsstörungen bei Kulturpflanzen (nur Acker), Pflanzengesellschaft, Zeigerpflanzen, z.B. Feuchtezeiger n. Ellenberg.

#### Zeigerpflanzen auf Grünland

In Tabelle 2 sind Pflanzenarten aufgeführt, die auf Grünland Nässe anzeigen.

**Tabelle 2: Beispiele häufig vorkommender Nässezeiger auf Grünland**

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	F-Zahl n. Ellenberg (1979)
<i>Lychnis flos-cuculi</i>	Kuckucks-Lichtnelke	6
<i>Colchicum autumnale</i>	Herbstzeitlose	6
<i>Juncus conglomeratus</i>	Knäuel-Binse	7
<i>Juncus effusus</i>	Flatter-Binse	7
<i>Polygonum bistorta</i>	Wiesen-Knöterich	7
<i>Cardamine pratensis</i>	Wiesen-Schaumkraut	7
<i>Deschampsia caespitosa</i>	Rasen-Schmiele	7
<i>Molinia caerulea</i>	Pfeifengras	7
<i>Sanguisorba officinalis</i>	Großer Wiesenknopf	7
<i>Cirsium oleraceum</i>	Kohldistel	7
<i>Silaum silaus</i>	Wiesensilge	7
<i>Equisetum palustre</i>	Sumpf-Schachtelhalm	7
<i>Lotus uliginosus</i>	Sumpf-Hornklee	8
<i>Senecio aquaticus</i>	Wasser-Greiskraut	8
<i>Caltha palustris</i>	Sumpfdotterblume	8
<i>Filipendula ulmaria</i>	Mädesüß	8
<i>Ranunculus flammula</i>	Brennender Hahnenfuß	9

#### Zeigerpflanzen auf Ackerland: Ackerbegleitflora

Die Ackerbegleitflora kann trotz ihrer starken anthropogenen Beeinflussung als Indikator für Bodeneigenschaften genutzt werden. Erst bei intensiver Bewirtschaftung überlagert die Nutzung die Standorteigenschaften, indem Unkräuter besonders durch Herbizideinsatz vollständig verdrängt werden. Folglich bieten extensiv bewirtschaftete Flächen gute Voraussetzungen für die Bioindikation durch Ackerwildkräuter (Sauer et al., 1992). Dennoch kann selbst bei intensiverem Herbizideinsatz auf vernässten Standorten eine verstärkte Verunkrautung oft wahrgenommen werden.

Temporäre Vernässungen von Böden führen aufgrund des im Boden herrschenden Luftmangels häufig zu Lücken im Kulturpflanzenbestand. In diesen Lücken entwickeln sich kleinflächig Bestände, die sich schon optisch durch ihr üppiges Wachstum auszeichnen. Vor allem in Mulden und am Unterhang gelegen fallen besonders in den abreifenden Getreidefeldern die grünen Unkrautbestände der Nassstellen auf (Steinrücken et al., 2000). Steinrücken (1998) gibt für ein Untersuchungsgebiet am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges die in Tabelle 4 angeführten Arten als typisch für temporäre Nassstellen an:

**Tabelle 3: Beispiele für Ackerwildkräuter vernässter Böden im Rheinischen Schiefergebirge (Steinrücken et al., 2000)**

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	F-Zahl n. Ellenberg (1979)
<i>Gnaphalium uliginosum</i>	Sumpf-Ruhrkraut	7
<i>Gypsophilla muralis</i>	Mauer-Gipskraut	7
<i>Plantago intermedia</i>	Mittlerer Wegerich	7
<i>Ranunculus repens</i>	Kriechender Hahnenfuß	7
<i>Juncus bufonius</i>	Krötenbinse	7

Anagallis minima	Acker-Kleinling	7
Mentha arvensis	Ackerminze	8
Polygonum hydropiper	Pfeffer-Knöterich	8

### Zustand von Kulturpflanzen als Hinweis auf Standortbedingungen

Der Kulturpflanzenbestand ist ein guter Bioindikator für den Bodenwasserhaushalt, da die Pflanzen sehr deutlich auf unterschiedliche Wasserversorgung und Durchlüftung reagieren. Eine geringe nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraumes, z.B. bei flachgründigen oder grobkörnigen Böden, aber auch infolge unzureichender Durchwurzelbarkeit auf verdichteten Standorten, führt beispielsweise zu deutlich sichtbaren Ertragsminderungen. Vernässte Kulturpflanzenbestände hingegen zeigen vom Frühjahr bis zur Reife eine verzögerte Entwicklung und geringere Bestandeshöhen als unvernässte Standorte (Sauer et al., 2000).

### Nutzungsgrenzen

Nutzungsgrenzen, z.B. zwischen Acker- und Grünland oder zwischen Wald/Brachfläche und landwirtschaftlicher Nutzfläche, haben oftmals pedohydrologische Ursachen. Besonders der Wechsel von Acker- zu Grünland ist in den meisten Fällen auf eine Änderung im Bodenwasserhaushalt zurückzuführen: In Mittelgebirgslandschaften bedeutet das in der Regel ein Wechsel von „tiefgründig“ zu „flachgründig“ oder hin zu Staunässe (Zeigerpflanzen!), in Tallagen weist das Grünland auf höheren Grundwasserstand hin. Nutzungsgrenzen können Hinweise auf Abflussprozesse liefern, indem beispielsweise lateral im Boden unter Grünland abfließendes Wasser im Übergang zum Acker austritt.

### Befragung ortskundiger Personen

Im Rahmen der Geländebegehung sollte nach Möglichkeit das Gespräch mit ortsansässige Landwirten gesucht werden. Mit hydrologischen Besonderheiten, die in der Regel Bewirtschaftungserkenntnisse für die Landwirtschaft darstellen (Sauer et al., 2000), sind die ansässigen Landwirte bestens vertraut. So können schon im Vorfeld der Geländebegehung gezielt räumliche Schwerpunkte für eine nähere Betrachtung herausgearbeitet werden.

### Optimaler Zeitpunkt der Geländebegehung

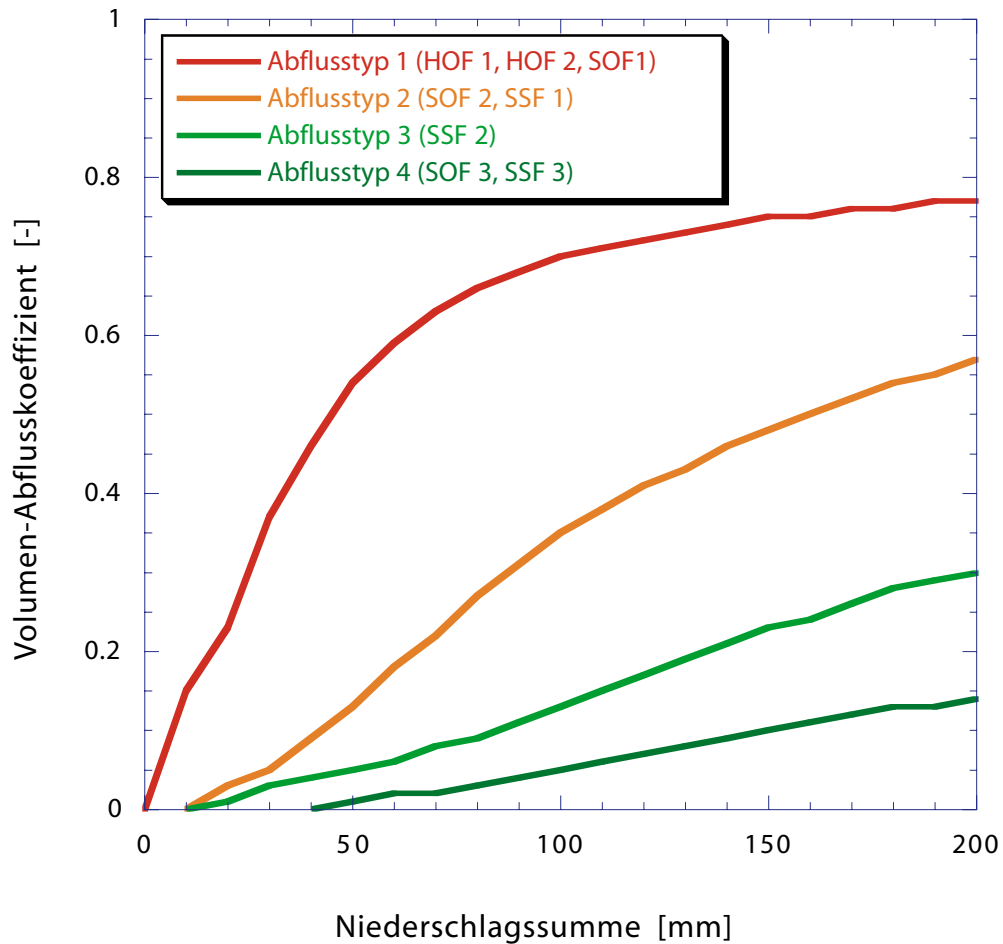
Tabelle 5 zeigt den für die Erfassung hydrologisch bedeutsamer Phänomene optimalen Zeitpunkt der Geländebegehung.

**Tab. 4: Ideale Zeiträume für Geländebegehungen.**

<b>Geländebegehung zur Erfassung von</b>	<b>Idealer Zeitpunkt</b>
Verschlämmung	Frühjahr
Aktuelle Erosionsformen	Frühjahr/ nach Starkniederschlägen
Historischer Erosionsformen	Ganzjährig
Nassstellen	Frühjahr
Laterale Fließwege	geringe Schneedecke oder Schneeschmelze
Reliefpositionen	Ganzjährig
Gebietsentwässerung	Ganzjährig/ nach Starkniederschlägen (Dränauslässe!)
Abflussprozesse allg.	nach größeren Niederschlägen
Bioindikation	Frühsummer (Grünland), Sommer (Segetalflora und Kulturpflanzen kurz vor der Abreife)
Nutzungsgrenzen	Ganzjährig

Geländebegehungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten sind zur Vorbereitung detaillierterer Untersuchungen kaum möglich. Aus diesem Grund wird der Frühjahrstermin, nach ausreichender Durchfeuchtung des Bodens und nach beginnender Abtrocknung der Böden, favorisiert, da aktuelle Erosionsformen, Verschlämmung und Nassstellen von zentraler Bedeutung für die Identifikation hochwasserrelevanter Flächen sind. Wünschenswert wäre in jedem Fall eine zusätzliche Geländebegehung unmittelbar im Anschluss an Starkniederschläge oder kurz nach der Schneeschmelze, um Prozessspuren und Wasser führende Geländestrukturen erkennen zu können. Auch wenn die Beurteilung der Vegetation (besonders der Kulturpflanzen) optimalerweise im Sommer erfolgen müsste, so sollte dem interessierten Hydrologen die Identifikation wichtiger Zeigerpflanzen auch im Frühjahr möglich sein.

### Anhang 3: Abflussreaktionskurven



Anhang 3: *Abflussreaktionskurven für Abflussprozesse in den Untersuchungsgebieten. Von 50 mm gefallenem Niederschlag fließen auf Flächen des Abflusstyp 1 (HOF 1, HOF 2 und SOF 1) 55 % oder rund 28 mm ab. Flächen des Abflusstyps 4 (SOF 3, SSF 3) tragen demgegenüber bei gleicher Niederschlagssumme praktisch nicht zum Abfluss bei.*



## Anhang 4: Fotodokumentation



Foto 1: Mäßig stark verschlammte Bodenoberfläche (Verschlammungsgrad V3) im Frühjahr (Herbstfurche) [Foto: S. Sauer]



Foto 2: Durch Bodenerosion abgelagertes Sediment am Unterhang. [Foto: S. Sauer]



Foto 3: Stark verschlammte Bodenoberfläche (Verschlammungsgrad V4) über locker gelagerter Ackerkrume im Frühjahr (Herbstfurche) [Foto: S. Sauer]



Foto 4: Rillenerosion in einem Weizenfeld im Frühjahr [Foto: S. Sauer]



Foto 5: Auf historische Bodenerosion zurückführbares Schluchtensystem unter Wald. [Foto: S. Sauer]



Foto 6: Durch Bodenerosion verursachte Texturunterschiede und dadurch bedingte unterschiedliche Abtrocknung der Böden in einer Lößlandschaft [Foto: S. Sauer]



Foto 7: Krümelartiges Bröckelgefüge aus dem Bfv-Horizont einer Lockerbraunerde mit sehr geringer Packungsdichte [Foto: S. Sauer]



Foto 8: Polyedergefüge mit geschlossener Lagerungsart aus einem verdichteten rekultivierten Boden mit hoher bis sehr hoher Packungsdichte (senkrechte Bildkante etwa 20 cm) [Foto: T. Harrach]



Foto 9: Plattengefüge aus der nicht bearbeiteten Unterkrume einer Parabraunerde aus Löss mit geschlossener Lagerungsart und hoher Packungsdichte [Foto: Diez & Weigelt, 1997]



Foto 10: Prismengefüge im P-Horizont eines Pseudogley-Pelosols mit mittlerer bis hoher Packungsdichte [Foto: S. Sauer]



Foto 11: Säulengefüge im Knickhorizont einer Knickmarsch mit fast geschlossener Lagerungsart und hoher Packungsdichte [Foto: S. Sauer]



Foto 12: Ergebnis der Abwurfprobe: Links mittlerer Zusammenhalt, rechts sehr loser bis loser Zusammenhalt [Foto: Diez & Weigelt, 1997]



Foto 13: Polyedergefüge mit geschlossener Lagerungsart in einem tonreichen Boden mit sehr hoher Packungsdichte [Foto: Schulte-Karring]



Foto 14: Grobprismatisches Gefüge mit fast geschlossener Lagerungsart eines stark verdichteten Horizontes mit hoher Packungsdichte; die Wurzeln sind durch hohen Quellungsdruck platt gepresst [Foto: T. Harrach]



Foto 15: Gleichmäßige Durchwurzelung eines Krümelgefüges geringer Packungsdichte [Foto: Diez & Weigelt, 1997]



Foto 16: Polyedergefüge mit halboffener bis fast geschlossener Lagerungsart in einem Pelosol-Pseudogley mit mittlerer bis hoher Packungsdichte [Foto: Vorderbrügge]



Foto 17: Austritt von Sub-Surface Flow in einem bewaldeten Hang [Foto: G. Waldenmeyer]



Foto 18: Der Ausfluss einer Pipe (Mausloch) während eines anhaltenden Niederschlages.  
[Foto: S. Scherrer]



Foto 19: Niederschlagswasser, das nach Abfluss im Boden in einer Mulde am Hangfuss austritt. [Foto: S. Scherrer]



Foto 20: Hydrophobe Verhältnisse zu Beginn eines Beregnungsversuchs. Das Wasser benetzt den Boden nicht und fließt konzentriert über die Kante aufs Auffangblech. [Foto: S. Scherrer]



Foto 21: Visualisierte hydrologische Phänomene zum Zeitpunkt der Schneeschmelze. Das aus dem Hang austretende Wasser ist gut sichtbar. [Foto: S. Scherrer]

## Anhang 5: Bestimmung der Packungsdichte (Harrach&Sauer, 2002, Kap. 4)

### Erfassung von Gefügemerkmalen

#### Gefügeformen

Man unterscheidet visuell durch makroskopische Betrachtung nicht aggregierte und aggregierte Gefügeformen (Mückenhausen, 1963 [Abb. 2]; DIN 19 682-10, 1998; Fotos 4 im Anhang). Nicht aggregierte Gefügeformen sind:

- das Einzelkorngefüge bei Fehlen von Bindemittel und
- das Kohärentgefüge, das durch Bindemittel wie Ton, Sesquioxide oder Kalk zusammengehalten wird, wobei im Falle einer Verfestigung durch massive Eisen- und Kalkausscheidungen auch von einem „Kittgefüge“ gesprochen wird.
- Aggregierte Gefügeformen versucht man aufgrund der vermuteten Entstehungsart der Aggregate zu gliedern in
- Krümelgefüge, das als biogenes Aufbauegefüge angesehen wird
- Absonderungsgefügeformen, die durch natürliche Segregationsprozesse entstehen, und zwar in tonhaltigen Böden durch Schrumpfung und Quellung und in dichten schluffreichen Böden durch Eislamellenbildung; zu den ersteren gehören u. a. Prismen und Polyeder, während durch Eislamellen das Plattengefüge entsteht
- Bodenfragmente, die durch Bodenbearbeitung erzeugt werden (Bröckel und Klumpen), und schließlich
- Rollaggregate, die bei Umlagerung von Bodenmaterial z. B. auf Transportbändern entstehen und in nicht verdichteten anthropogenen Böden vorkommen können.

Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Gefügeform in einem Bodenhorizont besteht darin, dass der Ausprägungsgrad der Gefügeform sehr unterschiedlich sein kann (sehr deutlich bis sehr undeutlich). Außerdem können unterschiedliche Gefügebildungsprozesse gleichzeitig oder häufiger nacheinander gewirkt haben. Infolge dessen kann es in manchen Böden sehr schwer sein, die Gefügeform eindeutig zu bestimmen. Zum Beispiel kann es in vielen Ackerkrumen kaum möglich sein, zwischen Bröckeln, Krümeln und Subpolyedern zu unterscheiden (Abb. 3).



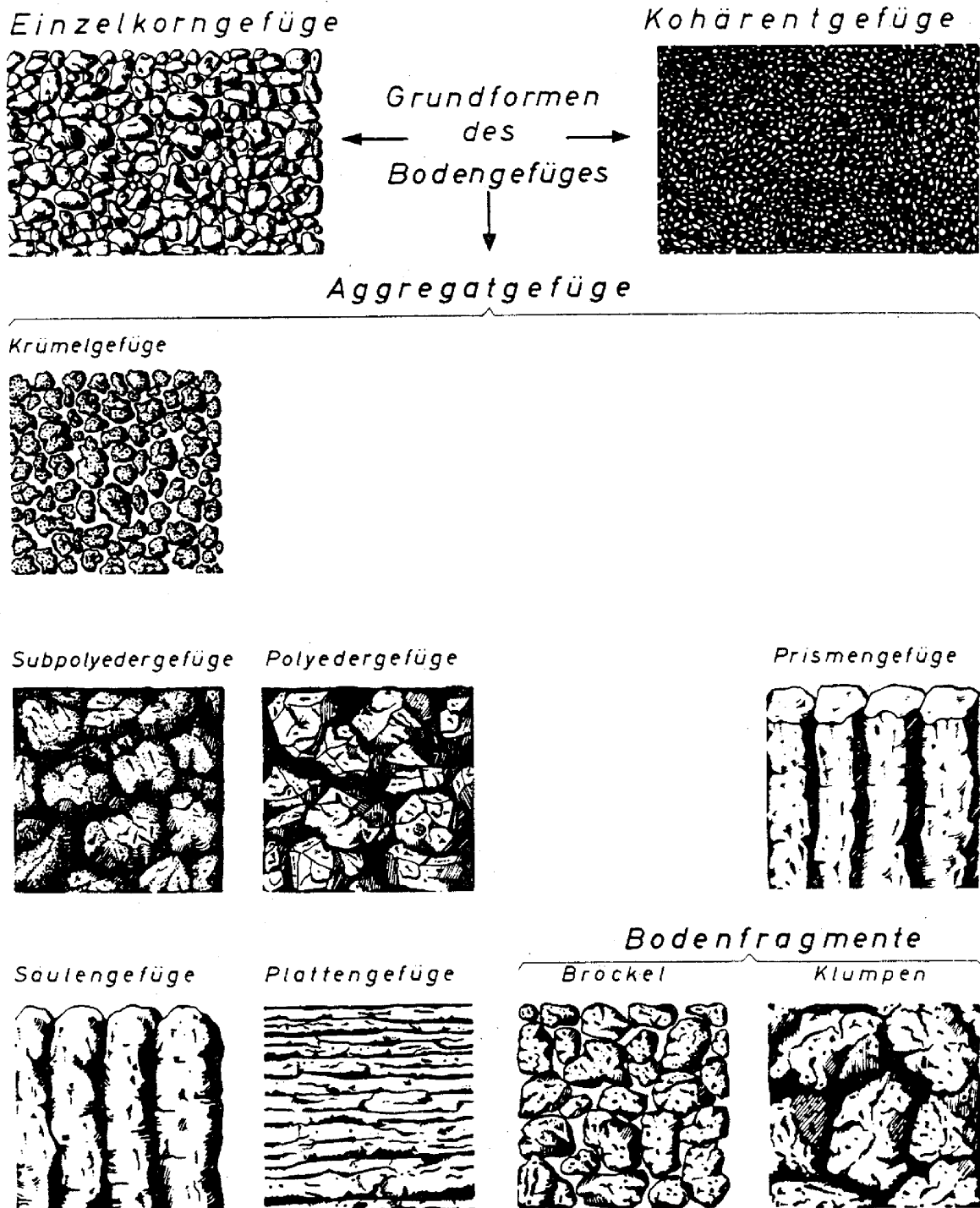


Abb. 2: Die wichtigsten Bodengefügeformen (verändert nach Mückenhausen [1963])



**Abb. 3:** Im Oberboden dieser Braunerde (Lu bis Tu3) sind die Aggregate nicht eindeutig als Krümel, Subpolyeder oder Bröckel zu identifizieren. Aufgrund anderer Gefügemerkmale lässt sich trotzdem feststellen, dass die Packungsdichte gering bis sehr gering ist (Pd 2-1).

Falls die Gefügesteuerung deutlich ausgeprägt ist, können über die vorherrschende Gefügedynamik klare Aussagen gemacht werden. Das sind sehr wertvolle Informationen. Aber für die Bestimmung der Packungsdichte ist es nicht unbedingt notwendig, die Gefügesteuerung eindeutig festzulegen. Für die sichere Abstufung der Packungsdichte sind andere Gefügemerkmale notwendig, die nur teilweise mit der Gefügesteuerung zusammenhängen.

Die folgende Zusammenstellung der wichtigsten Gefügesteuerungen (Übersicht 3) gibt einen Hinweis darauf, welche Packungsdichten in Abhängigkeit von der Gefügesteuerung vorkommen können.

Übersicht 3: Die wichtigsten Gefügesteuerungen mit den häufigsten Packungsdichten

Einzelkorngefüge:	Die Packungsdichte kann gering bis hoch sein
Kohärentgefüge:	Die Packungsdichte kann gering bis sehr hoch sein
Krümelgefüge:	Die Packungsdichte ist in der Regel sehr gering bis gering
Polyedergefüge:	Die Packungsdichte ist meistens mittel bis sehr hoch
Subpolyedergefüge:	Die Packungsdichte ist meistens sehr gering bis mittel
Prismengefüge:	Die Packungsdichte kann gering bis sehr hoch sein
Plattengefüge:	Die Packungsdichte ist meistens mittel bis sehr hoch
Bröckelgefüge:	Die Packungsdichte kann sehr gering bis hoch sein
Klumpengefüge:	Die Packungsdichte ist meistens mittel bis hoch
Rollaggregate:	Die Packungsdichte ist meistens sehr gering bis mittel

## Für die Bestimmung der Packungsdichte wichtige Gefügemerkmale

Während die Angabe der Gefügeformen im wesentlichen nach dem Rahmen von Mückenhausen (1963) zur bodenkundlichen Routine gehört, werden die weiteren Makrogefügemerkmale in der Regel eher stiefmütterlich berücksichtigt. Wichtige Grundlagen für die ökologische Gefügebeurteilung im Gelände haben Koepf (1963) und Benecke (1966) erarbeitet. Auf ihren Erkenntnissen beruht der Bestimmungsschlüssel für die Ansprache der effektiven Lagerungsdichte im Gelände (AG Boden, 1994, S.126), der aber offenbar zu wenig praktikabel ist, auf jeden Fall wird er zu selten konsequent zur Gefügeansprache benutzt. Seit Mitte der siebziger Jahre sind mir auch keine Studien bekannt, in denen die Treffsicherheit der nach diesem Schlüssel ermittelten „effektiven Lagerungsdichte“ belegt wird.

Nicht desto trotz bieten die von Koepf (1963), Benecke (1966), Werner & Thämert (1989) und Altemüller (1991) beschriebenen Gefügemerkmale sowie die von Diez (1991) gewonnenen Erfahrungen die Grundlage für die praxisgerechte Bestimmung der Packungsdichte. Folgende Makrogefügemerkmale werden herangezogen:

- Mechanischer Bodenwiderstand (Eindringwiderstand)
- Aggregatgröße
- Zusammenhalt des Bodengefüges bzw. Verfestigungsgrad
- Lagerungsart der Aggregate
- Anteil biogener Makroporen.

Der **mechanische Bodenwiderstand** kann z. B. mit einem Taschenmesser getestet (Schlichting et al., 1995, Tab. 3.5.4, S.36 f.) oder mit einem Taschenpenetrometer gemessen werden. Auch beim Spatenstich wird der mechanische Widerstand differenziert wahrgenommen. Zu berücksichtigen ist, dass mit zunehmendem Tongehalt und abnehmendem Wassergehalt der Eindringwiderstand bei gleicher Packungsdichte zunimmt. Erfahrene Bodenkundler können dennoch mindestens fünf Stufen des mechanischen Widerstandes unterscheiden:

sehr gering/ gering/ mittel/ hoch/ sehr hoch.

Während der mechanischer Widerstand in jedem Boden feststellbar ist, kann die **Aggregatgröße** nur in aggregierten Böden bestimmt werden. Die mittlere Aggregatgröße korreliert mit der Packungsdichte, d. h. in einem lockeren Boden überwiegen i. a. kleine Aggregate und in einem dichten große Aggregate. So kann bei deutlich aggregierten Böden bereits mit einem Blick auf die Lockerheit bzw. Verdichtung geschlossen werden. Folgende Abstufung der mittleren Aggregatgrößen ist üblich:

sehr fein, < 2 mm	fein, 2-5 mm	mittel, 5-20 mm	grob, 20-50 mm	sehr grob > 50 mm
----------------------	-----------------	--------------------	-------------------	----------------------

Der **Zusammenhalt des Bodengefüges** wird durch die Abwurfprobe getestet (Diez 1991), hierzu wird ein Bodenblock aus etwa 1 m Höhe auf eine geeignete Fläche fallen gelassen (Abb. 4, Fotos 12, im Anhang 4).



**Abb. 4: Abwurfprobe zur Bestimmung des Zusammenhaltes bzw. des Verfestigungsgrades, hier „loser Zusammenhalt“ und geringe Packungsdichte (Diez & Weigelt 1997)**

Aus dem Grad des Auseinanderfallens des Bodenblockes in Aggregate (bei aggregierten Böden) bzw. in Bruchstücke (bei kohärenten Böden) wird der Zusammenhalt des Bodengefüges eingestuft, wobei der Wassergehalt berücksichtigt werden muss:

sehr lose/ lose/ mittel/ fest/ sehr fest.

Die Fallprobe dient auch zur Feststellung des **Verfestigungsgrades**, falls eine Verfestigung (Kittgefüge) vorliegt. Vor allem in Sanden, die eher Einzelkorngefüge aufweisen, kommen Verfestigungen durch Einlagerung von Sesquioxiden (Ortstein bzw. Raseneisen) oder Kalk (z.B. in der Kapillarzzone des Grundwassers) vor. Während also bei bindigen Böden mit der Fallprobe der Zusammenhalt des Bodengefüges getestet wird, bestimmen wir mit der gleichen Handlung bei Sanden den Verfestigungsgrad:

nicht verfestigt/ schwach verfestigt/ mittel verfestigt/ stark verfestigt/ sehr stark verfestigt.

Die bisher behandelten Gefügemerkmale lassen sich sehr einfach und schnell feststellen. Sie geben tendenziell einen guten Hinweis auf die Packungsdichte, aber allein nach diesen Merkmalen ist nur eine grobe Einstufung der Packungsdichte möglich.

Für die Feineinstufung der Packungsdichte müssen wir die **Makroporensysteme des Bodens** näher betrachten (Altemüller, 1991). Bei genauem Hinsehen können wir visuell in aggregierten Böden

**Aggregatzwischenräume** sehr unterschiedlicher Ausprägung erkennen und außerdem sowohl in aggregierten als auch in nicht aggregierten Böden **biogene Makroporen** beobachten.

Das Gefügemerkmal „**Lagerungsart der Aggregate**“ (Koeppf, 1963; Benecke, 1966) dient der Kennzeichnung der Aggregatzwischenräume (Fotos 8 bis 16 im Anhang 4). Dieses Hohlraumsystem unterliegt im Jahresverlauf infolge von Schrumpfungs- und Quellungsprozessen einer deutlichen Dynamik. Worauf es dabei ankommt, ist die Frage, wie groß der Hohlraumanteil im ausgequollenen Zustand des Bodens ist, also z. B. im Frühjahr nach reichlichen Niederschlägen. Der luftführende Porenanteil und ihre Kontinuität im aufgequollenen Zustand bei Feldkapazität sind ausschlaggebende Faktoren für das Wurzelwachstum, die Pflanzenentwicklung und für die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens für weitere Niederschläge.

Die Bestimmung der „Lagerungsart von Aggregaten“ hat zum Ziel, die Beschaffenheit der Aggregatzwischenräume im aufgequollenen Zustand unter funktionalem Aspekt (Luftkapazität, Luft- und Wasserdurchlässigkeit) zu beschreiben. Werner & Thämert (1989) nennen dieses Gefügemerkmal in Anlehnung an TGL 24 300/19 „Form und Passfähigkeit der Zwischenaggregathohlräume“. Nach der fünfstufigen Skala lassen sich folgende Lagerungsarten unterscheiden, wobei erfahrene Fachleute zusätzlich auch Übergangsbereiche für die siebenstufige Bewertung mit ausreichender Treffsicherheit ausweisen können:

- Geschlossene Lagerungsart: die Aggregate sind nur durch Fugen getrennt, d. h. ihre Oberflächen bilden vollkommen Abdrücke voneinander und liegen im Quellungszustand unmittelbar aneinander
- Fast geschlossene Lagerungsart: im Quellungszustand sind nur wenige spalten- und röhrenförmige Hohlräume vorhanden
- Halboffene Lagerungsart: die Aggregate sind teils durch Fugen, teils durch Klüfte oder spaltenförmige Hohlräume voneinander getrennt
- Offene Lagerungsart: die Aggregate sind überwiegend durch Klüfte oder spaltenförmige Hohlräume voneinander getrennt, ihre Oberflächen bilden keine oder nur unvollkommene Abdrücke
- Sperrige Lagerungsart: die Aggregate befinden sich in wirrer, unorientierter Anordnung und lassen vielgestaltige Hohlräume auch im Quellungszustand zwischen sich frei.

Zum Verständnis der Lagerungsarten sei darauf hingewiesen, dass in dichten Böden bei der Quellung sehr hohe Quellungsdrücke entstehen. Die dadurch bedingten Pressungen und Quetschungen vernichten möglicherweise noch vorhandene sekundäre Grobporen und führen zugleich zur Ausformung glattflächiger und scharfkantiger Aggregate. In lockeren Böden mit vielen Sekundärporen baut sich dagegen kein hoher Quellungsdruck auf. Daher fehlen hier entsprechende Gefügemerkmale.

Die beschriebenen Gefügemerkmale gestatten es, zu jeder Jahreszeit und bei jedem Feuchtezustand des Bodens die Lagerungsarten zu bestimmen und die Packungsdichte zu ermitteln. Dennoch ist zu vermerken, dass nasse und sehr trockene Bodenzustände die Arbeit erschweren. Beste Bedingungen liegen im feuchten bis schwach feuchten Bereich vor.

Weniger abstrakt ist das Gefügemerkmal „**Anteil biogener Makroporen**“. Darunter fallen Feinwurzelkanäle (Durchmesser etwa 0,5 –1,0 mm) sowie Wurzel- und Wurmkanäle (1 mm bis über 5 mm Durchmesser).

Der Schätzungsrahmen zur Bestimmung des Makroporenanteils nach AG Boden (1994, Abb. 12, S.124) hängt die Latte zu hoch. Realistischer erscheint der entsprechende Rahmen von Werner & Thämert (1989) (Tab. 1).

**Tab. 1: Häufigkeit der Austritte von biogenen Makroporen je dm<sup>2</sup> in Anlehnung an Werner & Thämert (1989)**

	Poren 0,5-2 mm	Poren 2-5 mm	Poren > 5 mm
sehr hoch	> 40	> 20	> 10
hoch	24 – 40	11 – 20	6 – 10
mittel	12 – 23	6 – 10	2 – 5
gering	5 – 11	3 – 5	< 2
sehr gering	< 5	< 3	0

In der Regel korreliert der biogene Makroporenanteil mit der Lagerungsart der Aggregate. In dichten Böden mit geschlossener oder fast geschlossener Lagerungsart ist die biologische Aktivität geringer, daher entstehen dort weniger Makroporen. Darüber hinaus werden die wenigen Bioporen bei der Quellung des Bodens stark reduziert.

#### Durchwurzelungsmerkmale als Indikatoren der Packungsdichte

Da die Packungsdichte des Bodens einen erheblichen Einfluss auf die Durchwurzelbarkeit hat, kann die vorhandene Durchwurzelung als ein Indikator des Bodengefüges betrachtet werden (Harrach & Vorderbrügge, 1991; Selige & Vorderbrügge, 1994). Gemeint sind vor allem die Wurzeln anspruchsvoller Kulturpflanzen (z. B. Gerste, Weizen, Zuckerrübe, Raps), obgleich die Wurzeln weniger empfindlicher Pflanzen (z.B. Roggen) auf stärkere Verdichtungen nicht viel anders reagieren. Grundsätzlich verhalten sich auch Grünlandpflanzen und Gehölze auf verdichteten Böden ähnlich. Am ehesten kann die Eiche als Ausnahme herausgestellt werden, die am ehesten in der Lage ist, mit ihren Wurzeln Bodenhorizonte hoher Packungsdichte noch einigermaßen zu durchdringen.

In einem nicht verdichteten Boden nimmt die Wurzellängendichte mit der Tiefe allmählich ab (Abb. 5), wenn auch artenspezifisch etwas unterschiedlich. Eine abrupte Abnahme der Durchwurzelungsinintensität wird dagegen pedogen verursacht (z. B. pH-Sprung oder anaerobe Verhältnisse). Eine **überproportionale Abnahme der Wurzellängendichte** (Abb. 6) zeigt in vielen Fällen eine Verdichtung im betreffenden Bodenhorizont an (Vorderbrügge, 1989, S. 87-97)

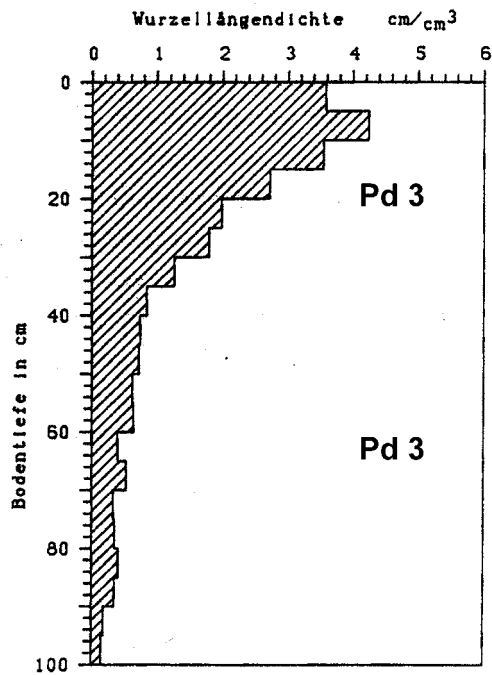


Abb. 5: Allmähliche Abnahme der Wurzellängendichte im Profil eines nicht verdichteten rekultivierten Bodens (nach Vorderbrügge 1989)

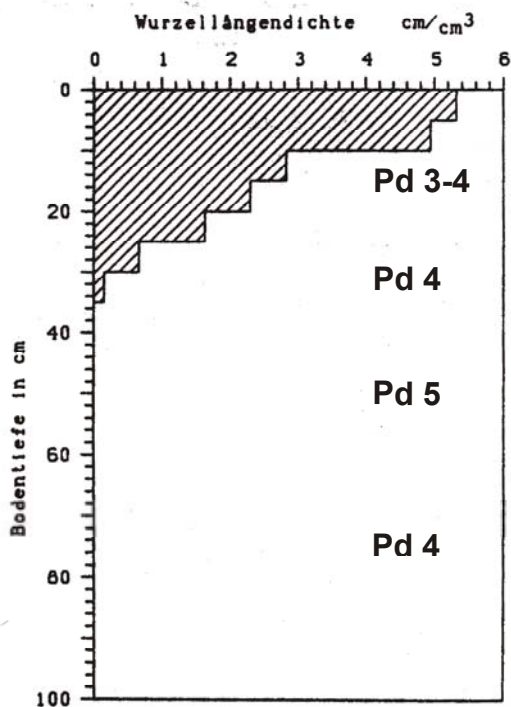


Abb. 6: Überproportionale Abnahme der Wurzellängendichte im Profil eines verdichteten rekultivierten Bodens (nach Vorderbrügge 1989)

Ein besonders sensibler Indikator des Bodengefügezustandes ist die **Wurzelverteilung in einem Bodenhorizont**, indem unverdichtete Horizonte gleichmäßig und verdichtete Horizonte ungleichmäßig oder gar nicht durchwurzelt werden. Unterhalb der Durchwurzelungszone muss die Gefügebeurteilung, die für hydrologische Fragestellungen wichtig sein kann, ohne die Bioindikatoren Wurzeln auskommen. Folgende Stufen der Wurzelverteilung werden unterschieden, wobei für die siebenstufige Skala auch eine feinere Unterteilung möglich ist:

gleichmäßig/ etwas ungleichmäßig/ starke Häufung in Rissen/sehr starke Häufung in Rissen.

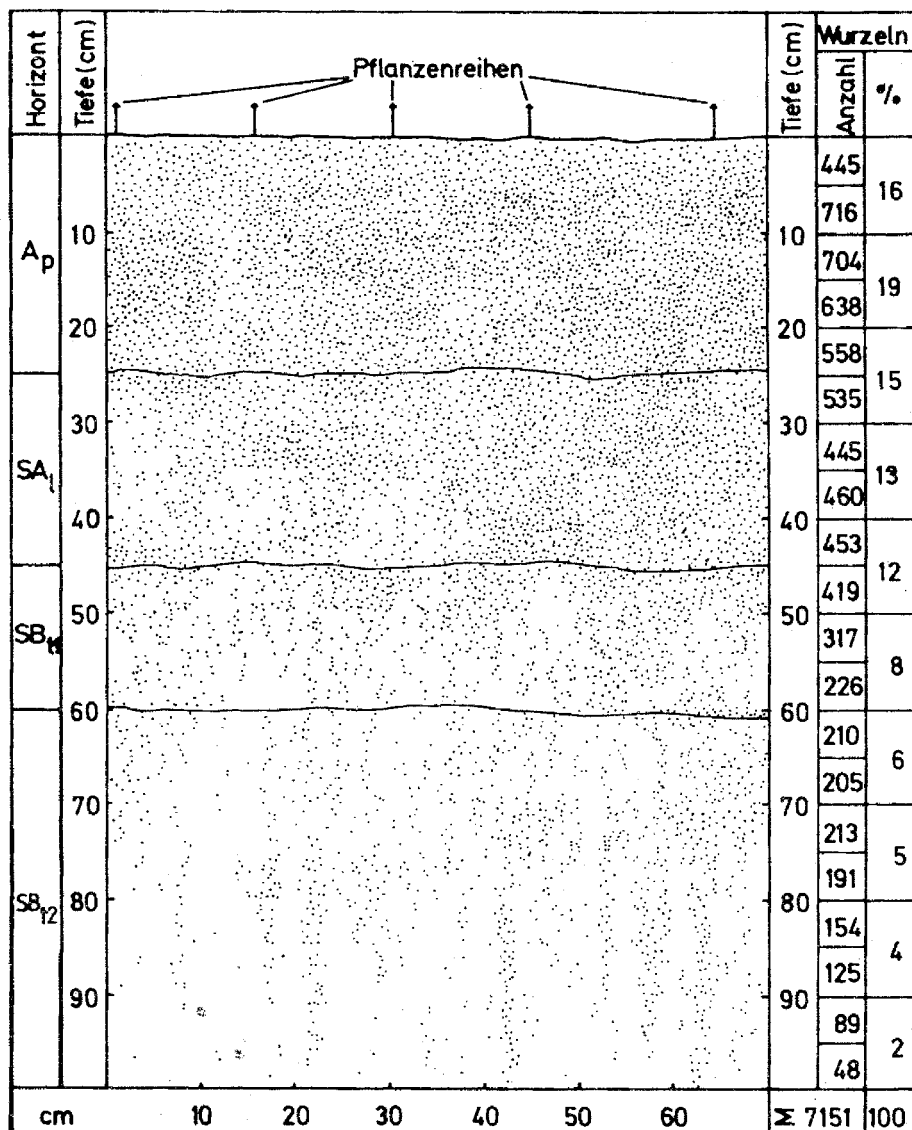


Abb. 7: Wurzelprofil von Hafer in einer pseudovergleyten Parabraunerde mit gleichmäßiger Wurzelverteilung im Oberboden und etwas ungleichmäßiger Wurzelverteilung unterhalb von 50 cm Bodentiefe (Rex 1984)



## Ableiten der Packungsdichte aus Gefüge- und Durchwurzelungsmerkmalen

Die Gefügebeurteilung im Gelände an einer Profilgrube erfolgt in mehreren Schritten (Abb. 8). Die für die Bestimmung der Packungsdichte relevanten Merkmale sind in Übersicht 4 aufgelistet. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Merkmalen und der Packungsdichte ist unterschiedlich eng. Er ist vor allem in den ersten drei Spalten der Übersicht 4 eher tendenziell zu sehen. Diese einfach zu bestimmenden Gefügemerkmale erlauben daher nur eine grobe Einstufung der Packungsdichte. Viel präziser charakterisieren die Lagerungsart und der Anteil biogener Makroporen die Packungsdichte und erlauben ihre Feineinstufung.

Schließlich kommt der Wurzelverteilung die höchste Zuverlässigkeit zu bei der Ableitung bzw. Kontrolle der Packungsdichte nach Übersicht 4.

Für eine weitere Absicherung der Gefügebeurteilung können Pflanzen als Bioindikatoren nützlich sein. Im Wald, in Grünlandbeständen und gegebenenfalls in Unkrautgemeinschaften sollten Zeigerpflanzen des Luft- und Wasserhaushaltes beachtet werden. Auf dem Ackerland sind die Kulturpflanzen hervorragende Indikatoren. Ihre Entwicklung, ihre phänologischen Merkmale und ihre Ertragsleistung zeigen etwaige Schadverdichtungen sehr zuverlässig an, wenn der Witterungsablauf berücksichtigt wird. In Normaljahren, die durch Nässe im Frühjahr und Trockenheit im Sommer gekennzeichnet sind, reagieren die Pflanzen empfindlich auf Schadverdichtungen. Nur in Jahren mit trockenem Frühjahr und nachfolgend niederschlagsreichem Sommer gedeihen sie trotz Bodenverdichtung zufriedenstellend.

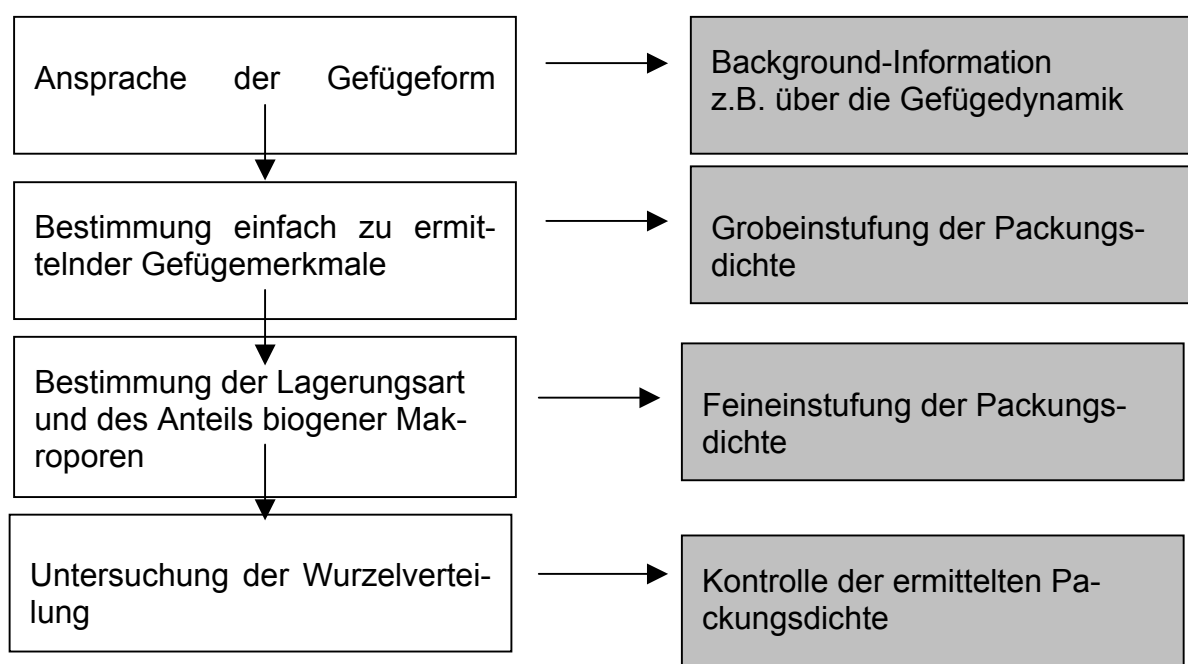


Abb. 8: Arbeitsschritte zur Bestimmung der Packungsdichte

Die hier vorgestellte Synthese der Gefügebeurteilung ist eine **wurzelökologisch** begründete Bewertung des Bodengefügezustandes. Die Methode ist ein Ergebnis jahrzehntelanger Forschungsarbeit über die Kausalkette

Gefügeeigenschaften des Bodens  $\Rightarrow$  Durchwurzelung  $\Rightarrow$  Ertragsbildung

Die wurzelökologisch begründete Gefügebeurteilung kann ohne wenn und aber auch für **hydrologische Fragestellungen** genutzt werden. Das Makroporensystem hat für die Sickerung gleich große Bedeutung wie für das Wurzelwachstum, das eine ausreichende Drainage des Bodens voraussetzt. Außerdem hinterlassen Wurzeln Wurzelkanäle im Boden, die bevorzugte Fließwege für das Sickerwasser darstellen. Zwischen Durchwurzelbarkeit, Durchwurzelung und Drainageeigenschaften des Bodens bestehen also vielfältige Wechselwirkungen. Eine gute Durchwurzelung ist einerseits ein sicherer Indikator für ausreichende Drainage des Bodenprofils, und andererseits schaffen die vorhandenen Wurzeln neue Kanäle im Boden für die Sickerwasserbewegung.

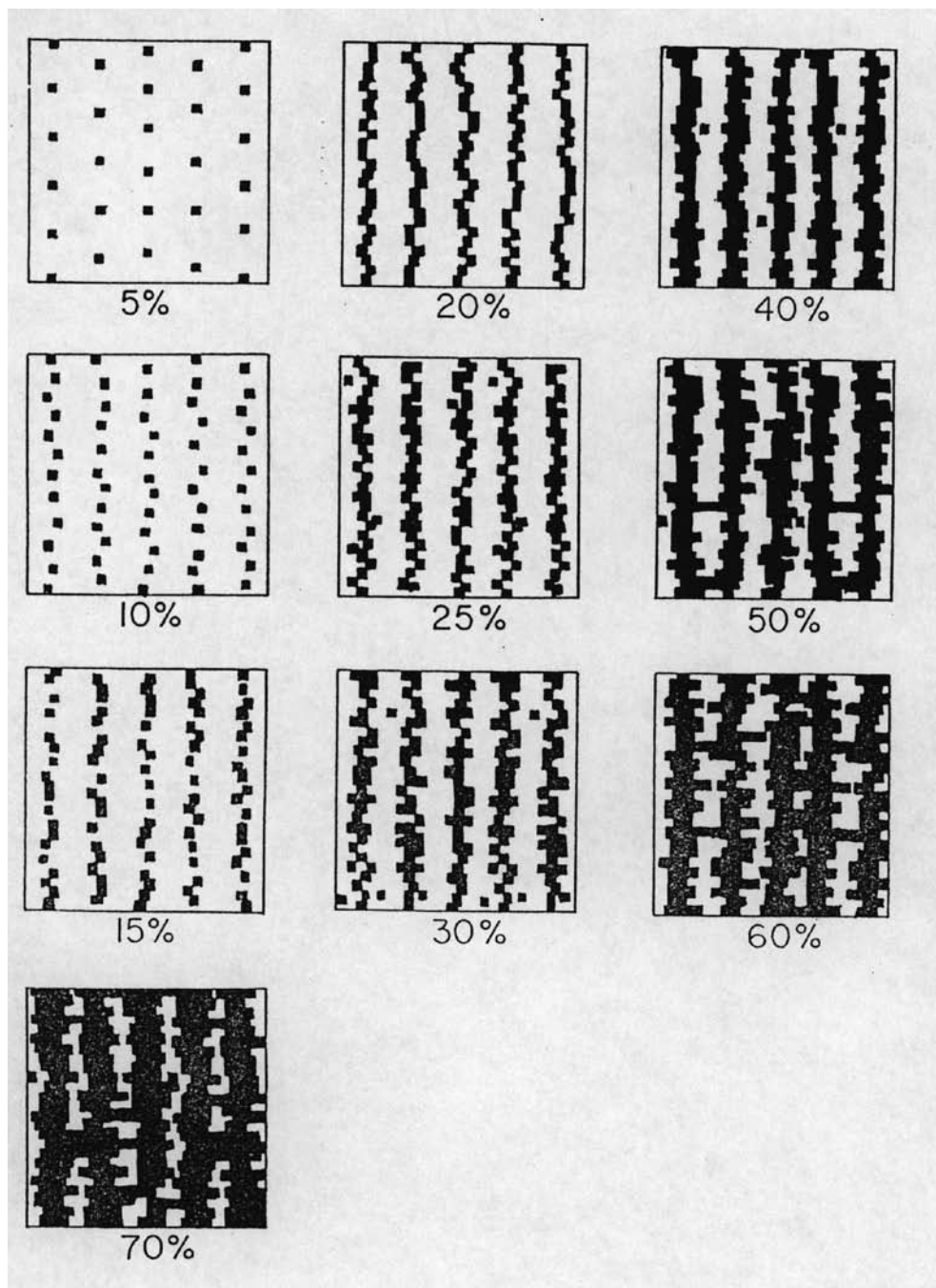
Bei einer **bodenmechanischen Gefügebeurteilung** wären leicht modifizierte Akzente zu setzen. Hier ist der Lagerungsart das höchste Gewicht zuzumessen. Ein Boden mit sperriger Lagerungsart hat die geringste mechanische Belastbarkeit, während ein Boden mit geschlossener Lagerungsart, bei der Bioporen a priori kaum vorkommen können, über die höchste Belastbarkeit (geringste Verdichtungsgefährdung) verfügt.

Eine außergewöhnliche Konstellation von Gefügemerkmalen entwickelt sich im **pfluglosen Ackerbau**. Bei konservierender Bodenbearbeitung und noch stärker beim Ackerbausystem mit Direktsaat befindet sich die Unterkrume in einem recht kompakten Zustand, weist aber eine starke Perforation durch Bioporen auf. Die Lagerungsart ist etwa „fast geschlossen“ (roter Bereich), während der hohe Bioporenanteil Grün signalisiert. Die Durchwurzelbarkeit ist nicht ganz optimal, aber dennoch ausreichend. Eine zielgerichtete Gefügebewertung ergibt tendenziell:

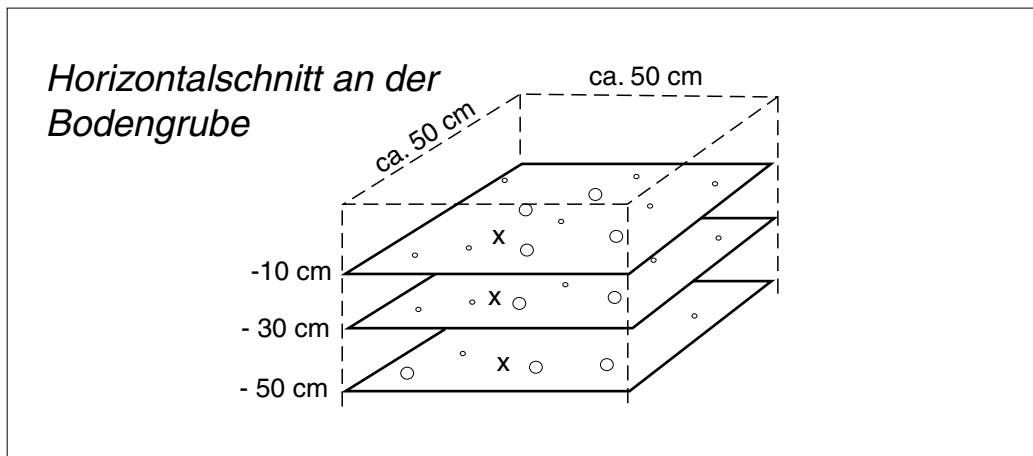
- wurzelökologisch: mittlere Packungsdichte (Pd 3)
- bodenmechanisch: hohe Packungsdichte (Pd 4)
- pedohydrologisch: geringe Packungsdichte (Pd 2)

Diese von der Regel abweichende Kombination von Gefügeeigenschaften begründet die Faszination des pfluglosen Ackerbaues: Der Boden ist gut befahrbar (tragfähig), die Ertragsfähigkeit nicht beeinträchtigt und die Infiltrabilität des Bodens für Wasser (Wasseraufnahmefähigkeit) sehr günstig (Dumbeck, 1986; Vorderbrügge, 1989; Kohl & Harrach, 1991; Harrach & Richter, 1994; Richter 1995). Ein derartiger Gefügezustand, der sowohl aus landwirtschaftlicher als auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht erstrebenswert ist, bietet hervorragenden Schutz vor Oberflächenabfluss, Bodenerosion und Bodenverdichtung. Es darf jedoch nicht verschwiegen werden, dass im pfluglosen Ackerbau Pflanzenschutzaspekte zu beachten sind und erhöhter Pflanzenschutzmitteleinsatz notwendig ist.

Die funktionalen Vorzüge des sich bei pflugloser Wirtschaftsweise bildenden Bodengefügezustandes kämen bei dem Gefügebewertungsrahmen, den Beste et al. (2001) anwenden, nicht zur Geltung. Ihre Gefügebewertung orientiert sich am optimalen Krümelgefüge, das im hier angesprochenen Boden nicht anzutreffen ist. Ein solcher Bewertungsrahmen scheint daher den Zielen des Bodenschutzes nicht optimal zu dienen.

**Anhang 6:****Verschiedene Formulare zur Erfassung hochwasserrelevanter Kriterien****Anhang 6 /1: Schema zur Abschätzung des Bedeckungsgrades der Bodenoberfläche ackerbaulich genutzter Flächen.  
(Rohr et al., 1990)**

**Anhang 6/2: Die Beurteilung der Makroporosität am Boden-Horizontalschnitt.**



Tiefe	Aufsicht	Anz. Mp d > 5 mm	Anz. Mp d < 5 mm	Total (nach Multiplikation*)	Total Mp/m <sup>2</sup>
- 10 cm					
- 30 cm					
- 50 cm					
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ○ Kleine, grosse Wurmröhren</li> <li>× Wurzeln</li> <li>● ● Skelett</li> </ul>				

(\*Die Zahl der grösseren Mp (d > 5 mm) werden mit Faktor 5 multipliziert).

**Anhang 6/3: Feldblatt zur Erfassung der abflussrelevanten Kriterien.**

**Beurteilung abflussrelevanter Kriterien**

Einzugsgebiet: \_\_\_\_\_ Höhe über NN: \_\_\_\_\_  
 Landnutzung: \_\_\_\_\_ Relief: \_\_\_\_\_ Geologie: \_\_\_\_\_  
 Standort: \_\_\_\_\_ Hochwert: \_\_\_\_\_  
 Bemerkungen: \_\_\_\_\_ Hangneigung: \_\_\_\_\_ Bodentyp: \_\_\_\_\_

<p><b>Beurteilung der Makroporosität</b></p>	<p><b>Beurteilung der Matrix</b></p>	<p><b>Hydrologische Zusatzuntersuchungen</b></p> <p>Infiltrationsversuch (mit Tracer):</p> <p>Kleinbereichungsvers. (mit Tracer):</p>
<p><b>Oberfläche</b></p> <p>Deckungsgrad: _____</p> <p>Hydrophobizität: _____</p> <p>Hydrophober Humus: _____</p> <p>Oberflächenrauigkeit: _____</p>	<p><b>Oberboden</b></p> <p>Matrix verdichtet (Packungsdichte): _____</p> <p>Makroporosität: _____</p> <p>Verschlämmungsneigung: _____</p> <p>Durchwurzelung: _____</p> <p>Matrix durchlässig: _____</p>	<p><b>Unterboden</b></p> <p>Pflugsohle, Matrix verdichtet, (Pd): _____</p> <p>Matrixdurchlässigkeit: _____</p> <p>Mächtigkeit: _____</p> <p>laterale Fliesswege: _____</p> <p>Drainagen: _____</p> <p>Makroporosität: _____</p> <p>Vergleichungsgrad: _____</p> <p>Grundwasserstufe: _____</p> <p>Flurabstand Grundwasser: _____</p> <p>Lage der Stauschicht (in mächtigen bis sehr mächtigen Böden): _____</p> <p>Lage der Vergleichungsmerkmale: _____</p> <p>Laterale Fliesswege: _____</p>
		<p>Prozessevaluation:</p> <p>niedrige Niederschlagsintensität</p> <p>hohe Niederschlagsintensität</p>



Übersicht 4:  
Tendenzieller Zusammenhang zwischen Gefügemerkmalen, Wurzelverteilung und Packungsdichte sowie ihre diagnostische Gewichtung

Gefügemerkmale mittlerer Gewichtung			Gefügemerkmale hoher Gewichtung		Gefügeindikator sehr hoher Gewichtung
Mechanischer Bodenwiderstand	Aggregatgröße	Zusammenhalt des Bodengefüges (Verfestigungsgrad)	Lagerungsart der Aggregate	Anteil biogener Makroporen	Packungsdichte (Pd)
sehr gering	sehr fein bis fein	sehr lose (nicht verfestigt)	sperrig	sehr hoch	Pd 1 sehr gering
gering	sehr fein bis mittel	lose (nicht verfestigt)	offen	hoch	Pd 2 gering
mittel	fein bis grob	mittel (schwach verfestigt)	halboffen	mittel	Pd 3 mittel
hoch	mittel bis sehr grob	fest (mittel bis stark verfestigt)	fast geschlossen	gering	Pd 4 hoch
sehr hoch	grob bis sehr grob	sehr fest (stark bis sehr stark verfestigt)	geschlossen	sehr gering	Pd 5 sehr hoch