

Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie

Band 20

Abflussbildung und Regionalisierung in einem forstlich genutzten Einzugsgebiet (Dürreychtal, Nordschwarzwald)

von

Guido Waldenmeyer

Schriftleitung: Beate Fischer

Herausgeber: M. Meurer, D. Burger und J. Vogt
Institut für Geographie und Geoökologie
der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe 2003

Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Bio- und
Geowissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2002

Referenten: Prof. Dr. Dieter Burger
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

ISBN 3-934987-09-5

Persönliches Vorwort und Dank

Die Untersuchungen zur Abflussbildung und Regionalisierung im Dürreychgebiet knüpfen thematisch an Fragen an, wie sie in Deutschland konzertiert vom DFG-Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie 1992-1998“ (KLEEBERG et al. 1999), aber auch von vielen anderen Forschergruppen international bearbeitet wurden (BONELL 1998). Dass es nach wie vor offene Fragen gibt, die nach neuen Antworten verlangen, ist der Komplexität und Skalenabhängigkeit hydrologischer Prozesse im Allgemeinen und der Individualität eines jeden Einzugsgebietes im Besonderen zuzuschreiben. Die Bewunderung für den „Organismus Einzugsgebiet“ hat mich während der Bearbeitung immer wieder motiviert, Fragen neu zu stellen, um „unser“ Einzugsgebiet Dürreychtal besser zu verstehen.

Die Promotionszeit ist ein wissenschaftliches Abenteuer, die Fertigstellung der Dissertation ein Kraftakt, der ohne das Zutun Vieler undenkbar wäre. Daher möchte ich im Folgenden meinen Dank ausdrücken:

Die Finanzierung der Forschungsaktivitäten wurde mir von 1997 bis 2000 durch ein Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Graduiertenkolleg „Ökologische Wasserwirtschaft“ (GRK 147) an der Universität Karlsruhe (TH) ermöglicht. Dafür gilt der DFG mein aufrichtiger Dank. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei Frau Dr. Ch. Kämpf für ihre Bemühungen um das Graduiertenkolleg als Koordinatorin bedanken. Von 2000 bis 2002 konnte ich meine Forschung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geographie und Geoökologie der Universität Karlsruhe fortsetzen. Dem Betreuer meiner Arbeit, Herrn Prof. Dr. D. Burger, sowie dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr. M. Meurer

möchte ich für die Finanzierung und das in mich gesetzte Vertrauen danken.

Herr Prof. Burger war stets für Fragen und Diskussionen offen und hat die Entstehung der Kapitel ständig begleitet. Ihm verdanke ich viele Anregungen, insbesondere zur Struktur meiner Arbeit und zur Integration von Dünn-schliffuntersuchungen. Meine Arbeitsschwerpunkte konnte ich dennoch weitgehend selbst bestimmen. Für die ungezwungene, kollegiale Arbeitsatmosphäre während der gesamten Promotionszeit schulde ich Herrn Prof. Burger meinen herzlichen Dank.

Herr Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. F. Nestmann möchte ich für sein großes Interesse an meiner Arbeit danken. Prof. Nestmann war nach Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. E. Plate Sprecher unseres Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“. Sein Angebot, das Korreferat zu übernehmen, war für mich eine Ehre.

Die Promotionszeit ist ein Stück Biographie, in der sich Berufliches und Persönliches stärker vermischen als in anderen Lebensphasen. Insofern sei mir im Folgenden ein persönlicherer Tonfall gestattet. Mein Freund Dr.-Ing. Markus Casper machte mich im Jahr 1997 auf das Promotionsthema aufmerksam. Ohne den Anstoß durch meinen damaligen Kollegen Dr. forest. K.-H. Biederbick hätte ich den Sprung vom Planungsbüro zur Universität jedoch nicht vollzogen. Ich habe die Entscheidung nicht bereut. Markus Casper leitete unsere Arbeitsgruppe „AG Dürreych“, die zeitweise aus 5 Doktoranden und einem post-Doktoranden bestand. Viele ihrer Geländedaten hat die AG Dürreych im Kollektiv erhoben und gemeinsam genutzt. Auf diese Weise kamen bedeutende inhaltliche Synergieeffekte zustande; insbesondere mit den Arbeiten von

CASPER (2002) und VOLKMANN (2002). Darüber hinaus war Markus Caspers Hilfe in Datenbank- und GIS-Fragen für meine Arbeit essenziell.

Für die freundschaftliche Zusammenarbeit möchte ich auch den weiteren Mitgliedern und Assoziierten der AG Dürreych danken:

- Dipl.-Biol. Holger Volkmann, Dipl.-Geogr. Andrea Zielke, Dr. Ing. Jens Mehlhorn, Dr.-Ing. Jochen Aberle.
- den Projekt-Diplomanden und Kandidaten für das Lehramt Dipl.-Geoökol. Niels Kobayashi, Silke Sander und Leonhard Schütz
- Dr.-Ing. Erwin Zehe für die Zusammenarbeit bei der hydrologischen Simulation

Für die praktische Hilfe schulde ich folgenden Personen besonderen Dank:

- Dipl.-Geol. Katharina Garz und Dipl.-Chem. Martin Kull für die Unterstützung bei den Laborarbeiten, Herrn Dipl.-Ing. P. Oelmann für etliche Zeichnungen, Martin Henning für die Unterstützung bei den Messfahrten, Jürgen Waldenmeyer für das Korrekturlesen, Samuel Giersch für Layoutarbeiten an der Abgabefassung
- Herrn Dr. Ch. Fritz; LGRB Baden-Württemberg, für die Überlassung der für die Simulationsversuche der AG Dürreych so grundlegenden Datentabelle pedo-hydrologischer Parameter
- Frau Dr. T. Vogt für die Unterstützung bei der Auswertung von Landsat-Szenen

- Herrn Revierförster A. Wieland als Repräsentant der Forstverwaltung für die Duldung der Untersuchungen im Dürreychgebiet.

Die Hypothesen und die Zwischenergebnisse zur Abflussbildung im Dürreychgebiet wurden in zahllosen Gesprächen diskutiert. Allen voran hat mein Freund Dr.-Ing. Erwin Zehe in z.T. leidenschaftlich geführten Diskussionen wesentlich zur Reflexion der Forschungsergebnisse der AG Dürreych beigetragen.

Meinen Eltern und Freunden danke ich für die Unterstützung v.a. in schwierigen Phasen der Arbeit.

Ich widme diese Arbeit Herrn Prof. Dr. Gerd Peschke, der im Jahr 2001 nach schwerer Krankheit verstarb. Bis zuletzt hatte Prof. Peschke am Lehrstuhl für Umweltsystemwissenschaften des Internationalen Hochschulinstituts Zittau (IHI) intensiv zur hydrologischen Prozessforschung beigetragen. Er hatte die Arbeiten der AG Dürreych seit 1997 engagiert verfolgt und mit seiner charismatischen Persönlichkeit nicht nur meiner Arbeit, sondern auch unserer gesamten Arbeitsgruppe die entscheidenden Impulse gegeben. Der Tod von Prof. Peschke ist menschlich und wissenschaftlich ein großer Verlust.

Inhaltsverzeichnis

	Persönliches Vorwort und Dank	I
	Inhaltsverzeichnis	III
	Abbildungsverzeichnis	VII
	Tabellenverzeichnis	XV
	Anhangverzeichnis.....	XVIII
1	Einführung.....	1
2	Stand der Forschung.....	5
2.1	Prozessforschung zur Abflussbildung.....	5
2.1.1	Überblick und Begriffe.....	5
2.1.2	Niederschlag und Interzeption	6
2.1.3	Bodenwasser	6
2.1.4	Abflussbildungstypen	8
2.1.5	Bisherige Untersuchungen im Nordschwarzwald	11
2.1.6	Forschungsbedarf	15
2.2	Regionalisierung der Abflussbildung	16
2.2.1	Überblick und Begriffe.....	16
2.2.2	Verschneidung von Informationsebenen mittels GIS.....	18
2.2.3	Digitale Höhenmodelle (DHM) und Feuchte-Indizes	19
2.1.4	Die Forstliche Standortskarte (FSK)	21
2.1.5	Forschungsbedarf	22
3	Untersuchungskonzept.....	24
3.1	Gebietsuntersuchungen auf verschiedenen Skalen	24
3.2	Regionalisierung auf Basis von FSK und DHM	25
3.3	Validierung	26
4	Naturräumliche Ausstattung.....	28
4.1	Überblick	28
4.2	Witterung und Klima.....	29
4.3	Stratigrafie der Festgesteine.....	29
4.4	Periglaziale Erscheinungen	31
4.4.1	Schuttdecken	31
4.4.2	Karbildungen	32
4.4.3	Talbildungen.....	33
4.5	Böden.....	33
4.6	Quellen und Gewässer	34
4.7	Nutzung und Vegetation	35
4.8	Zusammenschau der Befunde hinsichtlich der Abflussbildung	36

5	Hypothesen zur Abflussbildung	37
6	Methoden	40
6.1	Entwicklung einer Regionalisierungsmethodik.....	40
6.1.1	Die FSK als Informationsquelle für die Regionalisierung.....	40
6.1.2	Entwurf eines Regelwerks zur Hydrotopklassifikation	41
6.1.3	Gewichteter Topographischer Index für den Sättigungsflächenabfluss.....	45
6.1.4	Entwicklung eines Index für den Zwischenabfluss (Interflow-Index)	47
6.1.5	Kombination der Indizes.....	48
6.2	Geländeuntersuchungen und Laboranalysen	49
6.2.1	Hydrologische Messungen.....	49
6.2.2	Refraktionsseismik	50
6.2.3	Geomorphologische Untersuchungen.....	52
6.2.4	Vegetationskundliche Untersuchungen.....	53
6.2.5	Aufnahme von Bodenprofilen.....	54
6.2.6	Messungen zum Bodenwasserhaushalt	56
6.2.7	Hydrophobizität der organischen Auflage	57
6.2.8	Korngrößenanalyse und Humusgehaltbestimmung.....	57
6.2.9	Dünnschliffuntersuchungen.....	58
6.2.10	Ableitung pedohydrologischer Parameter	59
6.3	Simulation, Fernerkundung und GIS.....	60
6.3.1	Das Simulationsmodell CATFLOW	60
6.3.2	Auswertung von Landsat TM-Daten.....	62
6.3.3	GIS-gestützte Analysen.....	62
7	Regionalisierungsergebnisse	65
7.1	Überprüfung der FSK-Datenqualität.....	65
7.2	Ableitungen aus der FSK	66
7.3	Ableitungen aus FSK und Digitalem Höhenmodell (DHM)	71
7.3.1	Topographischer Index.....	71
7.3.2	Gewichteter Topographischer Index	72
7.3.3	Interflow-Index.....	74
7.3.4	Kombination der Indizes.....	75
8	Überprüfung der Regionalisierungsergebnisse	77
8.1	Flächen mit Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA).....	77
8.2	Vorfluternahe Beitragsflächen	81
8.2.1	Rinnenböden	81
8.2.2	Morphologie des Dürreychbachs	82
8.2.3	Bachnahe Vegetation und Abflussbildung	85
8.2.4	Vegetation und Abflussbildung der Nebengerinne.....	91

8.3	Feucht- und Sättigungsflächen (SOA)	94
8.3.1	Standortseinheiten und Böden.....	94
8.3.2	Stauhazonte im Dünnschliff	95
8.3.3	Messstation Sättigungsfläche Grandlohweg (FF).....	99
8.3.3.1	Standortsbeschreibung und Vegetation.....	100
8.3.3.2	Bodenkundliche Befunde	100
8.3.3.3	Bodenfeuchtemessungen	102
8.3.3.4	Vergleich mit den Regionalisierungsansätzen.....	104
8.3.4	Simulation des Aufsättigungsprozesses mit CATFLOW	106
8.3.5	Feuchtflächenanteile und Abflussbeiwerte	108
8.3.5.1	Vorgehensweise.....	108
8.3.5.2	Abflussbeiwerte im Gesamteinzugsgebiet.....	109
8.3.5.3	Abflussbeiwerte der Teileinzugsgebiete	110
8.3.6	Feuchtflächen und Vegetation	113
8.3.7	Feuchteklassifikation einer Landsat-TM-Szene.....	115
8.3.8	Gewässeranbindung von Sättigungsflächen	117
8.4	Flächen mit Zwischenabfluss (ZWA)	122
8.4.1	Standortseinheiten und Böden.....	122
8.4.2	Regionalisierung und Indikatoren für den Zwischenabfluss	123
8.4.2.1	Hydrotopkarte.....	123
8.4.2.2	Interflow-Index.....	124
8.4.1.3	Teileinzugsgebiet FH	128
8.4.1.4	Hangrutschungen im oberen Dürreychtal	129
8.4.3	Intensivmessstandort Zwischenabfluss (P 1)	132
8.4.3.1	Standortbeschreibung.....	132
8.4.3.2	Vegetation und Feuchte.....	132
8.4.3.3	Profilbeschreibung	134
8.4.3.4	Dünnschliffuntersuchungen	136
8.4.3.5	Bodenfeuchtemessungen	139
8.4.1.6	Vergleich mit den Regionalisierungsansätzen.....	146
8.4.4	Simulation des Zwischenabflusses mit CATFLOW	147
8.5	Flächen mit Infiltration (INF).....	151
8.5.1	Standortseinheiten und Böden.....	151
8.5.2	Intensivmessstandort Infiltration (P 2)	151
8.5.2.1	Standortsbeschreibung	151
8.5.2.2	Vegetation und Feuchte.....	152
8.5.2.3	Profilbeschreibung	154
8.5.2.4	Bodenfeuchtemessungen	155
8.5.1.5	Vergleich mit den Regionalisierungsansätzen.....	164

9	Zusammenfassende Diskussion	166
10	Resümee und Ausblick.....	175
	Breite versus Detailschärfe – Ein Nachwort.....	178
	Kurzfassung.....	179
	Summary	182
	Literaturverzeichnis	187
	Glossar und Abkürzungsverzeichnis.....	193

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Titelseite des Badischen Tagblatts (Baden-Baden) am 30.10.1998	1
Abb. 2: Zerstörte Forststraße im unteren Dürreychtal nach dem Hochwasser vom 29./30.10.98.	1
Abb. 3: Lage des Untersuchungsgebiets Dürreychtal (eingekreist) in Baden- Württemberg	2
Abb. 4: Die Identifikation von Abflussprozessen als zentrales Ziel der AG Dürreych.....	4
Abb. 5: Darstellung der Niederschlags-Abfluss-Transformation als System. – Die Gebietseigenschaften wirken als Steuergrößen.	5
Abb. 6: Zusammenhänge zwischen den Bodenarten mit Bodenfeuchtezustand, Porenraumgliederung und pflanzenverfügbarem Wasser (ZEPP 1995).....	7
Abb. 7: Schematische Darstellung des Sättigungsflächenabflusses (MERZ 1996:77, verändert).....	8
Abb. 8: Beispiel für die maximale und minimale Ausdehnung von Sättigungsflächen (PESCHKE 2001, verändert)	8
Abb. 9: Schematische Darstellung des Zwischenabflusses am Hang (MERZ 1996:79, verändert).....	9
Abb. 10: Abflusskomponenten in Abhängigkeit von Gebietseigenschaften (ANDERSON & BURT 1990, aus dem Englischen übersetzt)	9
Abb. 11: Häufigkeit der gemessenen Ks-Werte für Horizonte der Podsole und Bändchenböden im Nordschwarzwald (in: STAHR 1973:138)	12
Abb. 12: Schematische Darstellung der Abflusskomponenten im Seebachgebiet (SEEGER 1990:30).....	14
Abb. 13: Topographischer Index $\ln(a/\tan\beta)$ als Maß für die Abflusswirksamkeit von Flächen im Einzugsgebiet der Eyach..	20
Abb. 14: Selektion von Formelementen und abflusswirksamen Flächen im Eyachgebiet. Schwarze Pixel: Horizontal und vertikal konkav, $\ln(a/\tan\beta) > 9$, Tiefenlinie ausmaskiert (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996, ergänzt).....	20
Abb. 15: Standortkartierung in Baden-Württemberg – zweistufiges Verfahren (AK STANDORTSKARTIERUNG, 1996:242).....	22
Abb. 16: Größenordnungen der räumlichen Untersuchungsskalen im 7 km ² großen Dürreychgebiet (schematisch)	24
Abb. 17: Untersuchungskonzept (Erläuterung siehe Text)	27
Abb. 18: Lage des Dürreychgebiets, Einzugsgebietsgrenzen, Pegelmessstellen (mit Nummerierung: Pegel des Messnetzes Baden-Württemberg) und Wetterstationen des DWD	28
Abb. 19: Geologische Übersichtskarte des Untersuchungsraumes nach GLA BW (1967), generalisiert.....	30
Abb. 20: Hangneigungen im Dürreychgebiet	32

Abb. 21: Hauptbodengesellschaften im Untersuchungsraum nach der Bodenübersichtskarte BÜK 1:200.000 (GLA BW 1994b), vereinfacht.....	34
Abb. 22: Die wichtigsten Quellaustritte im Dürreychgebiet (KASSEBEER 1997, verändert).....	35
Abb. 23: Entscheidungsbaum zur Ableitung von Hydrotopen aus der Forstlichen Standortskarte	42
Abb. 24: Wichtungsfunktion für die Ökologische Feuchte und Verschiebung um $-\Delta w$ zur Simulation trockenerer Bedingungen	46
Abb. 25: Vereinfachtes Prinzip der Refraktionsseismik für einen Zwei-Schichten-Fall (HECHT, 2000).....	51
Abb. 26: Flächenanteile (Balken) und Flächensumme (Kurve) der Forstlichen Standortseinheiten im Gesamteinzugsgebiet in [%]	55
Abb. 27: Vorgehensweise bei der Parametrisierung des Simulationsmodells CATFLOW	61
Abb. 28: Schematische Einordnung der Böden im Dürreychgebiet in Felder mit vergleichbarer Kombination von Bodenfeuchteregeime und hydraulisch wirksamer Schichtung.	65
Abb. 29: Abweichung (Δ) der festgestellten Bodentypen von der FSK-Legende in Feldern gemäß Abb. 28.	66
Abb. 30: Ökologische Feuchtestufen im Dürreychgebiet, klassifiziert in Anlehnung an AK STANDORTSKARTIERUNG (1996).	67
Abb. 31: Ergebnis der Hydrotopausgliederung auf Grundlage der Forstlichen Standortskarte für länger anhaltende, extensive Niederschläge.	69
Abb. 32: Flächenanteile der Hydrotopen am Gesamteinzugsgebiet (6,99 km ²)	69
Abb. 33: Schwarze Flächen können bei höheren Niederschlagsintensitäten Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) bilden.	70
Abb. 34: Topographischer Index $\ln(A / \tan\beta)$ für das Dürreychgebiet. (30 m-Raster).....	71
Abb. 35: Ökologische Feuchte im Vergleich mit dem Topographischen Index.....	71
Abb. 36: Beispiele für Übereinstimmungen von Ökologischer Feuchte und Topographischem Index.....	72
Abb. 37: Beispiele für Abweichungen von Ökologischer Feuchte und Topographischem Index.....	72
Abb. 38: Mit der Ökologischen Feuchte gewichteter Topographischer Index (30 m- Raster): Wichtungswerte zwischen 0 und 0,95.	73
Abb. 39: Gewichteter Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster): Wichtungswerte zwischen $-0,2$ und $+0,75$	73
Abb. 40: Gewichteter Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster): Wichtungswerte zwischen $-0,3$ und $+0,65$	73
Abb. 41: Sukzessive Abkopplung der Sättigungsflächen vom Vorfluter am Beispiel der Forsthaus-Klinge	74
Abb. 42: Interflow-Index I_{pot} für das Dürreychgebiet (30 m-Raster).....	74
Abb. 43: Sättigungsabfluss (SOA) reinfiltrierte (INF) und wird als Zwischenabfluss (ZWA) teilweise weitergeleitet.	75

Abb. 44: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index	75
Abb. 45: (a) Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index mit Reinfiltration (Subtraktion von $\Delta = 0,2$)	76
Abb. 45: (b) Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index mit Reinfiltration (Subtraktion von $\Delta = 0,3$)	76
Abb. 45: (c) Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index mit Reinfiltration (Subtraktion von $\Delta = 0,4$)	76
Abb. 46: Häufigkeitsverteilung der Ks-Klassen für 57 Oberböden im Dürreychgebiet ohne Berücksichtigung der Durchwurzelung	77
Abb. 47: Kartiertes Wegenetz im Dürreychgebiet (Gesamtlänge ca. 68 km). Die Wegdichte beträgt damit ca. 10 km km ⁻²	79
Abb. 48: Gewitterereignis August 1999: LE = Pegel Lerchenstein, DÜ = Hauptpegel Dürreych, FF = Messstation Freifläche	80
Abb. 49: 28,4 % Flächen mit potenziellem Horton'schem Oberflächenabfluss im Teileinzugsgebiet Lerchenstein (LE)	82
Abb. 50: Gleichzeitiger Anstieg der Bodenfeuchten an der Messstation FF	80
Abb. 51: Standortseinheiten Rinne (Ri) und Blockrinne (BIRi) gemäß FSK (GRABMANN 1996). Ihr Flächenanteil beträgt 2,9 %	81
Abb. 52: Terrasse aus extrem blockreichem Substrat, GOK ca. 1,5 m über Mittelwasser	81
Abb. 53: Längsgliederung des Dürreychbachs (Übersichtskarte)	82
Abb. 54: Stark überhöhter Längsschnitt des Dürreychbachs von der Quellmulde bis zum Hauptpegel (DÜ).	82
Abb. 55: Schematische Darstellung der Talentwicklung in den Abschnitten I bis III (unmaßstäblich).	83
Abb. 56: Hanganschnitt rechts des Dürreychbachs am Forsthaus Dürreych, Fließabschnitt IIIb (5.08.99)	84
Abb. 57: Profilaufbau des Hanganschnitts Abb. 56	84
Abb. 58: Rundungsgrade der Skelettfraktion > 22,4 mm für Oberboden, Schuttdecke und Fluviatiles Sediment	84
Abb. 59: <i>Luzula sylvatica</i> -Dominanzbestand mit Abflussspuren nach schwerem Hochwasser (Unteres Einzugsgebiet FH, 2.11.1998)	86
Abb. 60: Bachquerschnitt aus dem unteren Fließabschnitt des Dürreychbachs (IIIb)	89
Abb. 61: Bachquerschnitt aus dem mittleren Fließabschnitt des Dürreychbachs (Grenze II/III)	89
Abb. 62: Morphologisch-vegetationskundliche Differenzierung der FSK-Rinnenstandorte – Beispiel: Übergangszone Fließabschnitt II/III	90
Abb. 63: Flächenanteil an Vegetation mit Indikatorwert für die Abflussbildung auf Rinnenstandorten	90
Abb. 64: Lage der Teileinzugsgebiete Hirschklänge (HI, vgl. Vegetationskarte Abb. 66), Forsthaus (FH), Seemiss (SM) und Seeberg (SB)	91

Abb. 65: <i>Luzula sylvatica</i> -Dominanzbestand in der Tiefenlinie des im Teileinzugsgebiets Hirschklänge bei Trockenwetter (Fotostandort vgl. Abb. 66).	91
Abb. 66: (oben) Vegetationstypen im Bereich der Tiefenlinien Teileinzugsgebiet Hirschklänge – Flächen vom <i>Luzula</i> -Typ zeichnen die Tiefenlinie nach.	92
Abb. 67: (links) Kombination aus Interflow-Index und Gewichtetem Topographischem Index (30 m-Raster)	92
Abb. 68: Schneller oberflächennaher Abfluss (Pipe Flow) in Subrosionstunnel oberhalb Ortstein (II Bms) nahe P 105. Vegetation: <i>Luzula sylvatica</i> - Dominanzbestand fast ohne Feuchtezeiger	95
Abb. 69: Hangwassergeprägter Bändchenstagnogley (P 105) mit stauendem Ortsteinbändchen (Bbms-Sd): Oberhalb starke Nassbleichung, unterhalb trockene Verhältnisse.....	95
Abb. 70: Häufigkeit n der Bodenarten von Bbms-Horizonten im Forstbezirk Kaltenbronn	95
Abb. 71: Gescannter Dünn Schliff eines ausgeprägten Ortsteinbändchens (D 6, P 105): Im oberen Teil (a) starke Verkittung der Sandkörner durch Sesquioxide und Humussubstanzen.....	96
Abb. 72: Klassifikation von Poren, Grob- und Feinanteilen des Ortsteinbändchens in Abb. 71	96
Abb. 73: Bodenkundliche Standortaufnahme des Profils P 20 (vgl. auch Anhang 4)	98
Abb. 74: Lamellenartig herausgewittertes Gefüge einer verfestigten Schuttdecke unterhalb eines Ortsteinbändchens (Weganschnitt Einzugsgebiet Hirschklänge).....	99
Abb. 75: Übersichtsplan und Forstliche Standortseinheiten im Bereich der Klima- und Bodenfeuchte-Messstation Freifläche Grandlohweg (FF)	100
Abb. 76: NW-SE-Transekt durch die Klima- und Bodenfeuchtemessstation Freifläche Grandlohweg (FF). Unten: Deckung des Wechselfeuchtezeigers <i>Molinia</i> <i>caerulea</i> (Pfeifengras), bezogen auf eine 20 m ² große Aufnahme fläche.	101
Abb. 77: Bodenprofil P 25 nahe der Messstation Freifläche (FF).	101
Abb. 78: Zusammenhang zwischen Bodenfeuchteverlauf an der Messstation FF und Einsetzen des Abflusses am Pegel SH (8.-12.10.1999).	103
Abb. 79: Interflow-Index Ipot (30 m-Raster) im Umfeld der Messstation Freifläche Grandlohweg (FF)	104
Abb. 80: Gewichteter Topographischer Index (30 m-Raster) Messstation Freifläche Grandlohweg (FF)	105
Abb. 81: Kombiniertes Topographischer Index (30 m-Raster) Messstation Freifläche Grandlohweg (FF) 1	105
Abb. 82: Abb. 80: Kombiniertes Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster) Messstation Freifläche Grandlohweg (FF) 1	105
Abb. 83: Synthetisches Profil HMi+ als Grundlage für die Simulation eines Standorts mit Sättigungsflächenabfluss	106
Abb. 84: Relative Sättigung des repräsentativen Profils HMi+ nach 60 Tagen Simulationsdauer.....	107

Abb. 85: Relative Sättigung des repräsentativen Profils HMi+ mit reduziertem K_s -Wert des Bms-Sd-Horizontes von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$. Links: nach 55 Tagen, rechts nach 60 Tagen Simulationsdauer	108
Abb. 86: Nach der Größe sortierte Abflussbeiwerte $\Psi_{DÜ}$ des Gesamteinzugsgebiets (DÜ) für $n = 80$ Ereignisse	109
Abb. 87: Nach der Größe sortierte Abflussbeiwerte $\Psi_{DÜ}$ des Gesamteinzugsgebiets (DÜ) für $n = 52$ Ereignisse in den Jahren 1975 –1985 (Datenquelle: FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996)	110
Abb. 88: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel SH zum Gesamtgebiet (DÜ)	110
Abb. 89: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel LE zum Gesamtgebiet (DÜ)	111
Abb. 90: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel SE zum Gesamtgebiet (DÜ)	111
Abb. 91: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel HI zum Gesamtgebiet (DÜ)	111
Abb. 92: Feuchtflächenanteile (SOA, INF!), Einzugsgebiete und 100 m-Gewässerpuffer	111
Abb. 93: Gewässernahe Vegetation mit Indikatorwert für die Abflussbildung im Seemißkar (SE). Vegetationsaufnahmen V 37–V 39 im Anhang 6-3	113
Abb. 94: Gewichteter Topographischer Index für das Seemißkar (30 m Raster). Molinia-Flächen sind gestrichelt eingefasst	115
Abb. 95: Gewässernahe Vegetation mit Indikatorwert für die Abflussbildung im Bereich der Quellmulde des Dürreychbachs	114
Abb. 96: Gewichteter Topographischer Index für die Quellmulde des Dürreychbachs (30 m Raster). Molinia-Flächen sind gestrichelt eingefasst	115
Abb. 97: 14.30 Uhr-Temperaturen (unten) und Tagesniederschläge (oben) vor dem Aufnahmezeitpunkt 7.3.1992 (Quelle: DWD, Station Dobel, 770 m NN)	115
Abb. 98: Die grauen Flächen zeigen die Verteilung von Sturmwurfflächen, jungen Aufforstungen (J) und Wiesenflächen (W) im Dürreychgebiet (Quelle: FORSTDIREKTION KARLSRUHE 1995)	115
Abb. 99: Feuchteklassifikation einer Landsat-TM-Szene vom 7.03.1992. (Falschfarbenbild in 16 Klassen, Wertespektrum 0-255)	116
Abb. 100: Landsat-Feuchteklassifikation und Kombiniertes Topographischer Index mit Reinfiltration – Vergleich ausgewählter Kartenausschnitte	117
Abb. 101: (links) Lageplan der beiden Vergleichshänge und der Hangschnitte A-B und C-D (vgl. Abb. 102)	118
Abb. 102: Übersichtspläne und Hangschnitte der Vergleichshänge Stillwasser (links) und Häuserwald (rechts)	118
Abb. 103: Gewichteter Topographischer Index, kombiniert mit Interflow-Index für die Hänge Stillwasser und Häuserwald (Kap. 7.3.4). Links: Ansatz ohne Reinfiltration (Kap. 7, Abb. 44). Rechts: Ansatz mit Reinfiltration (Kap. 7, Abb. 45a)	119
Abb. 104: Detailausschnitt Hang Stillwasser – Beobachtete Wasseraustritte und Abflussnetz	120

Abb. 105: Detailausschnitt Hang Häuserwald – Beobachtete Wasseraustritte und Abflussnetz (Legende vgl. Abb. 104).....	120
Abb. 106: Hydrotoptypen gemäß FSK-Ableitung, Hangwasseraustritte und Rutschungen.	123
Abb. 107: Verteilung der Hangwasseraustritte auf Hydrotoptypen.....	124
Abb. 108: Verteilung der Wegstrecken auf die Hydrotoptypen.....	124
Abb. 109: Histogramm der Interflow-Indexwerte (Ipot) im Gesamteinzugsgebiet DÜ (30 m-Raster).....	125
Abb. 110: Interflow-Index (Ipot, 30 m-Raster), überlagert mit Hangwasseraustritten und Rutschungen.....	125
Abb. 111: Histogramm der Interflow-Indexwerte Ipot(w) an Stellen mit Hangwasseraustritten	126
Abb. 112: Histogramm der Interflow-Indexwerte Ipot(r) an Stellen mit Rutschungen.....	126
Abb. 113: Interflow-Index (Ipot, 30 m-Raster), überlagert mit Wegerosion	127
Abb. 114: Interflow-Index, Wasseraustritte Rutschungen im Einzugsgebiet FH	128
Abb. 115: Interflow-Index, Hangwasseraustritte und Rutschungen im Bereich der Stillwasserquelle (SQ)	129
Abb. 116: Schnitt durch die Hangrutschung bei Probenahmepunkt D 8	130
Abb. 117: Dicht gelagerte Schuttdecke mit plattiger Textur an der Rutschfläche in ca. 3 m Tiefe (P 107, Bildbreite ca. 40 cm)	130
Abb. 118: Dünnschliffe D7 und D8 aus dicht gelagerter, plattiger Schuttdecke	131
Abb. 119: Scan der Dünnschliffprobe D 4 Bildbreite 2,8 cm	131
Abb. 120: Lageplan und Vegetationstypen im Bereich von Intensivmessprofil P 1 und Vegetationsaufnahmen V 32 / V 33 (vgl. Anhang 6-3).....	132
Abb. 121: Schematischer Geländeschnitt durch den Messstandort P 1.....	133
Abb. 122: Modellvorstellung zur Bildung von Zwischenabfluss (ZWA) an steilen Ortstein-Hängen im Dürreychgebiet.....	134
Abb. 123: Bodenkundliche Standortsaufnahme des Intensivmessprofils P 1 (vgl. auch Anhang 4)	135
Abb. 124: Intensivmessprofil P 1: Hangwasser beeinflusster Bändchen-Stagnogley, Profiltiefe ca. 1,2 m	134
Abb. 125: Nachfolgend 7 Dünnschliffausschnitte der Horizonte P 1. Kreisdiagramme: Mittlere Grobporen-, Fein- und Grobsubstanzanteile aus je drei Ausschnitten.....	136
Abb. 126: Mittlere Grobporenanteile von Dünnschliffen (D 15-D 21) im Messprofil P 1 mit Angabe der Schwankungsbreiten.....	138
Abb. 127: Dünnschliff D 12 mit Mittelwerten (n=3) der Flächenanteile von Poren, Fein- und Grobfraction	139
Abb. 128: Anordnung der TDR-Sonden und Tensiometer im Messprofil 1. Der Grauton symbolisiert den nach unten zunehmenden Stauwassereinfluss.....	139
Abb. 129: Verlauf der Niederschläge und der Bodenfeuchte im Ober- und Unterboden des Messprofils 1 im Zeitraum vom 1.03. bis 15.11.1998	140

Abb. 130: Niederschlag, Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil P 1 nach einem konvektiven Ereignis vom 31.5. bis 3.6.1998.	142
Abb. 131: Niederschlag, Saugspannung und Bodenfeuchte Messprofil P 1, 25.10. bis 29.10.1998.	145
Abb. 132: Interflow-Index Ipot (10 m-Raster) und Forstliche Standortseinheiten am Messprofil 1	146
Abb. 133: Gewichteter Topographischer Index (10 m-Raster) am Messprofil 1	147
Abb. 134: Synthetisches Profil BISH als Grundlage für die Modellierung eines Standorts mit Zwischenabfluss	148
Abb. 135: Hangsegment mit akkumulierendem Zwischenabfluss nach 666 Tagen Simulationsdauer. Die Pfeillängen stellen die simulierten Flussdichten $[q]$ dar.	150
Abb. 136: Simulierte Flussdichten q für Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss in der Zeit t in Tagen $[d]$ seit t_0	150
Abb. 137: In den schraffierten Bereichen wurden Erosionsspuren festgestellt.	152
Abb. 138: Lageplan und Vegetationstypen im Bereich von Intensivmessprofil P 2, Vegetationsaufnahmeplätze V 40, V 41 und V 47 (vgl. Vegetationstabelle Anhang 6-3).....	153
Abb. 139: Intensivmessprofil P 2. (vgl. Erläuterungen im Text sowie Abb. 141).....	155
Abb. 140: Anordnung der TDR-Sonden und Tensiometer im Messprofil 2.	155
Abb. 141: Bodenkundliche Standortsaufnahme des Intensivmessprofils P 2 (vgl. auch Anhang 4).....	156
Abb. 142: Verlauf der Niederschläge und der Bodenfeuchte im Ober- und Unterboden des Messprofils 2 im Zeitraum vom 1.03. bis 15.11.1998.....	157
Abb. 143: Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil 2 vom 28.10. bis 5.11.1998 um das extreme Niederschlagsereignis vom 29.10.	159
Abb. 144: Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil 2 vom 10.09. bis 21.09.1998.....	161
Abb. 145: Niederschlag, Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil P 2 nach einem konvektiven Ereignis vom 31.5. bis 3.06.1998.	163
Abb. 146: Gewichteter Topographischer Index (30 m-Raster) am Messprofil P 2. Gestrichelt eingefasst: Erosionsspuren (Abb. 137).....	164
Abb. 147: Gewichteter Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster) am Messprofil P 2.....	165
Abb. 148: Kombiniertes Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster) am Messprofil P 2.....	165
Abb. 149: Flächenanteile der Hydrotopklassen am Gesamteinzugsgebiet (7 km ²)	167
Abb. 150: Verhältnis der Abflussbeiwerte ψ am Pegel SH zum Gesamtgebiet (DÜ). Erklärung der Bereiche a, b und c im Text.....	168
Abb. 151: Konvergenz der DOC-Konzentrationen im Dürreychgebiet bei zunehmendem Abflussbeiwert. Wiedergabe aus: VOLKMANN (2002).....	168

Abb. 152: Gegenüberstellung von Topographischem Index (links) und Gewichtetem Topographischen Index (rechts) für das Dürreychgebiet (30 m-Raster).....	169
Abb. 153: Gewichteter Topographischer Index mit Infiltration (30 m-Raster) im Einzugsgebiet FH. Erst bei hoher Gebietsfeuchte (rechts) liefert das Einzugsgebiet nennenswerte Abflussbeiträge (vgl. auch Abb. 38-40).....	170
Abb. 154: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index ohne Reinfiltration (0)	174

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Pedohydrologische Eigenschaften von Bändchenböden im Nordschwarzwald. Zusammenstellung auf Grundlage von STAHR (1973:137, 151)	12
Tab. 2: Zusammenstellung pedohydrologischer Kennwerte für den Nordschwarzwald	13
Tab. 3: Skalenbereiche in der Hydrologie (KLEEBERG 1999:6)	17
Tab. 4: Zusammenhang von Strukturen, Prozessen und Indikatoren	25
Tab. 5: Untersuchung von Strukturen (S), Prozessen (P) und Indikatoren (I) im Dürreychgebiet auf verschiedenen Skalen und ihre Aussagekraft für Flächen mit Zwischen- und Sättigungsflächenabfluss	25
Tab. 6: Mittlere Jahresniederschläge benachbarter Messstationen (Quellen: GRAßMANN 1996, DWD).....	29
Tab. 7: Stratigrafie der Festgesteine im Einzugsgebiet nach GLA BW (1967, 1994a), vereinfacht ...	30
Tab. 8: Substrateigenschaften der Schuttdecken nach der stratigrafischen Herkunft (Zusammenstellung aus GLA BW 1994a)	31
Tab. 9: Bodengesellschaften im Einzugsgebiet – Zusammenstellung aus der BÜK 1:200.000 (GLA BW 1994b)	33
Tab. 10: Gewässerkundliche Hauptzahlen des Pegels Dürreych im Zeitraum 1973-1998 (Messungen der LFU BADEN-WÜRTTEMBERG, eigene Messungen)	35
Tab. 11: Aus der FSK ableitbare, hydrologisch relevante Informationen	40
Tab. 12: Klassifizierung der effektiven gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens	43
Tab. 13: Umsetzung der Ökologischen Feuchtestufen ÖF in Ordinalzahlen.....	43
Tab. 14: Grund- und Stauwassereinfluss.....	44
Tab. 15: Ausbildung eines potenziell Sickerwasser hemmenden Unterbodens oder C-Horizonts.....	44
Tab. 16: Direkte Hinweise auf laterale Wasserbewegung	45
Tab. 17: Wertzahlen für Wölbung und Neigung. Die Reliefkonvergenzzahl wird durch Addition eines Wertepaars berechnet.	46
Tab. 18: Klassifizierung der Erosionserscheinungen im Dürreychgebiet	53
Tab. 19: Rundungsgrade nach REICHELT (1961), ergänzt	53
Tab. 20: Kartierschlüssel für die relative Deckung d der Indikatorvegetation.....	54
Tab. 21: Hydrophobizitätsgrade und Benetzungszeiten (BISDOM et al., 1993)	57
Tab. 22: Häufig verwendete GIS-Operationen in Arc/Info	63
Tab. 23: Profile mit größeren Abweichungen von der FSK-Legende ($\Delta > 1$)	66
Tab. 24: Zuordnung von Hydrotypen zu den Forstlichen Standortseinheiten. Prozentangaben in Klammern = Flächenteil am Gesamteinzugsgebiet (6,99 km ²)	68
Tab. 25: Aufschlüsselung der Horizonte aus Abb. 46 mit abgeleiteten Ks-Klassen < 4	77
Tab. 26: Hydrophobizität verschiedener organischer Auflagen im Dürreychgebiet im feldfrischen und getrockneten Zustand	78
Tab. 27: Weglängen und ihre Flächenanteile im Dürreychgebiet.....	79
Tab. 28: Kennwerte für Starkregenereignisse bei geringer Gebietsfeuchte	79
Tab. 29: Beschreibung der Fließabschnitte des Dürreychbachs	83

Tab. 30: Zusammenschau von Vegetationstypen, korrespondierenden Talniveaus und ihren dominanten Abflussprozessen	88
Tab. 31: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der Missen und Moore mit ausgeprägtem Sättigungsabfluss	94
Tab. 32: Grundfeuchte Standortseinheiten (FSE) mit ausgeprägtem Sättigungsabfluss	94
Tab. 33: Schwächer grundfeuchte Standortseinheiten (FSE) mit verzögertem Sättigungsabfluss	94
Tab. 34: Profil P25 – Aus Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt abgeleitete Bodenkennwerte (LGRB 1998)	102
Tab. 35: Wichtige pedohydrologische Parameter für das repräsentative Profil HMi+ (Ableitungen aus LGRB (1998)	107
Tab. 36: Randbedingungen für die Modellierung der Standortseinheit HMi+	107
Tab. 37: Feuchtflächenanteile am Gesamteinzugsgebiet $F_{TEG}/F_{DÜ}$ und ihre Abflussbeiwertquotienten (Erläuterungen im Text).	112
Tab. 38: Gewichtete Feuchtflächenanteile am Gesamteinzugsgebiet $F_{TEG}/F_{DÜ}$ und ihre Abflussbeiwertquotienten (Erläuterungen im Text).	112
Tab. 39: Naturräumliche Charakterisierung der Vergleichshänge	119
Tab. 40: Ergebnisse der DOC-Konzentrationsbestimmungen und fluoreszenzspektroskopischen Untersuchungen an den Hängen Stillwasser und Häuserwald (Zusammenstellung aus VOLKMANN 2002).....	121
Tab. 41: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der steileren Hänge mit ausgeprägtem Zwischenabfluss	122
Tab. 42: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der Rücken und Kuppen mit ausgeprägtem Zwischenabfluss	122
Tab. 43: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der Rücken und Kuppen mit ausgeprägtem Zwischenabfluss und Wasserzufluss	122
Tab. 44: Forstliche Standortseinheiten (FSE) steilerer Lagen mit verzögertem Zwischenabfluss	122
Tab. 45: Forstliche Standortseinheiten (FSE) flacherer Lagen mit verzögertem Zwischenabfluss ...	123
Tab. 46: Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter von Interflow-Index I_{pot} und Wasseraustritten $I_{pot}(w)$	126
Tab. 47: Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter von Interflow-Index I_{pot} und Hangrutschungen $I_{pot}(r)$	126
Tab. 48: Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter von Interflow-Index I_{pot} und Wegerosion $I_{pot}(e)$ für die Erosionsklassen $e > 0$, $e > 1$, $e > 2$ und $e > 3$ für das Gesamteinzugsgebiet, Gewässerpuffer 30m ausmaskiert.....	127
Tab. 49: Vegetationsaufnahme V 32 in der Quellmulde mit Feuchtezahlen (Aufnahmefläche: 25 m ² , Gesamtdeckung der Krautschicht: 90%, Blöcke).....	133
Tab. 50: Vegetationsaufnahme V 33 am Messprofil P 1 mit Feuchtezahlen (Aufnahmefläche: 30 m ² , Gesamtdeckung der Krautschicht: 35%, Blöcke).....	133
Tab. 51: Deskriptive Statistik der Bodenfeuchtemessungen [Vol-%] am Messprofil 1 (1.03. bis 15.11.1998)	141

Tab. 52: Wichtige pedohydrologische Parameter für das repräsentative Profil BISH (Ableitungen aus LGRB (1998)	148
Tab. 53: Randbedingungen für die Modellierung der Standortseinheit BISH	149
Tab. 54: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der flacheren Lagen mit guter Infiltration	151
Tab. 55: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der stärker geneigten Lagen mit Infiltration und untergeordnetem Zwischenabfluss	151
Tab. 56: Vegetationsaufnahme V 47 am Messprofil P 2 mit Feuchtezahlen (ELLENBERG et al. 1992). Aufnahmefläche: 30 m ² , Gesamtdeckung der Krautschicht: 70 %, einzelne Blöcke.....	154
Tab. 57: Deskriptive Statistik der Bodenfeuchtemessungen [Vol-%] am Messprofil 2 vom 1.03. bis 15.11.1998	155

Anhangverzeichnis

Anhang A1: Übersichtskarten

- A1-1: Messeinrichtungen der AG Dürreych
- A1-2: Die wichtigsten Teileinzugsgebiete des Dürreychgebiets

Anhang A2: Forstliche Standortseinheiten

- A2-1: Ökoserien im Dürreychgebiet (GRAßMANN, 1996, verändert):
- A2-2: Forstliche Standortseinheiten im Dürreychgebiet (GRAßMANN, 1996, verändert):
- A2-3: Übersetzung bodenkundlicher FSE-Angaben in die Nomenklatur der AG Boden (1994)
- A2-4: Forstliche Standortseinheiten, (GRAßMANN 1996), Hydrotopotypen, Bodenprofile, Dünnschliffprobenpunkte

Anhang A3: Profile der Forstlichen Standortskarte (FSK)

- A3-1: Standortbeschreibung der FSK-Leitprofile (Quelle: GRAßMANN 1996)
- A3-2: Horizontbeschreibung der FSK-Leitprofile (Quelle: GRAßMANN 1996)
- A3-3: Horizontbeschreibung der Forstlichen Standortseinheiten (FSK-Legende, GRAßMANN 1996)
- A3-4: Datenbankabfrage gerechte Aufbereitung der FSK-Legendeninformationen zur Hydrotopklassifikation im Regelwerk

Anhang A4: Eigene Profilaufnahmen

- A4-1: Standortbeschreibung eigener Leitprofile
- A4-2: Horizontmerkmale der eigenen Leitprofile
- A4-3: Korngrößenanalysen und Humusgehaltbestimmungen eigener Leitprofile
- A4-4: Standorte der Profil- und Dünnschliffuntersuchungen

Anhang A5: Synthetische Profile für die hydrologische Simulation

- A5-1: Ermittlung repräsentativer Horizonteigenschaften
- A5-2: Synthetische Profile der Forstlichen Standortseinheiten als Grundlage für hydrologische Simulationen der AG Dürreych

Anhang A6: Vegetationsaufnahmen

- A6-1: Ökologische Artengruppen (AK Standortskartierung 1996), Zeigerwerte (ELLENBERG et al. 1992) und Charakterisierung der Feuchtezeigerfunktion (dto., OBERDORFER 2001) für wichtige Arten der bachnahen Vegetationstypen
- A6-2: Vegetationstabelle der 7 Wiesenaufnahmeflächen
- A6-3: Vegetationstabelle der 46 Waldaufnahmeflächen
- A6-4: Vegetationsaufnahmepunkte und Vegetationstypen gewässernaher Flächen

Anhang A7: Refraktionsseismische Profile

- A7-1: Übersichtslageplan der refraktionsseismischen Profile im Dürreychgebiet.
- A7-2: Refraktionsseismische Profile: Klimastation FF (Hochfläche)
- A7-3: Refraktionsseismische Profile: Häuserwald HW (Unterhang)
- A7-4: Refraktionsseismische Profile: Messprofil P 2 (Hangtreppe)
- A7-5: Refraktionsseismische Profile: Oben: Messprofil P 1 (steiler Hang). Unten: Hauptpegel DÜ (Talboden Dürreychbach)

Anhang A8: Abflussdaten

Abflussbeiwerte, Niederschlagssummen und maximaler Durchfluss am Pegel DÜ (Wiedergabe der Werte aus CASPER 2002)

1 Einführung

Wald und Hochwasser: Ende Oktober 1998 brachte ein „Rekordhochwasser in Mittelbaden“ den Nordschwarzwald in die Schlagzeilen der Presse (Abb. 1): Nach einer vorangegangenen Feuchtperiode hatten Extremniederschläge in der Region zu schweren Hochwasserschäden geführt.



Abb. 1: Titelseite des Badischen Tagblatts (Baden-Baden) am 30.10.1998

Auch im nicht weit entfernten Dürreychgebiet, das im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, war ein mindestens 100-jährliches Hochwasser (CASPER et al. 1999) zu vermelden, das schwere Schäden am Forstwegenetz verursachte (Abb. 2). Eine derartig heftige Abflussreaktion war in dem forstlich genutzten Einzugsgebiet nicht ohne Weiteres zu erwarten gewesen.



Abb. 2: Zerstörte Forststraße im unteren Dürreychtal nach dem Hochwasser vom 29./30.10.98.

Derartige Ereignisse zeigen, dass selbst als gesichert geltende Resultate zur Wechselbeziehung Wald-Wasser – etwa die landläufige Erfahrung, Wald dämpfe die Hochwasserentstehung – nicht pauschal interpretiert und zu allgemein gültigen Zusammenhängen erhoben werden dürfen (DYCK & PESCHKE 1995:476). Vielmehr müssen Einzugsgebietseigenschaften wie Relief, Böden, Vegetation, Gewässernetz, sowie Ereignisseigenschaften wie Niederschlagsdauer und -intensität in ihrem komplexen Zusammenwirken berücksichtigt werden. Nur ein besseres Systemverständnis ermöglicht es letztlich, prozessnähere Simulationsmodelle zu entwickeln und zuverlässigere Vorhersagen zu machen.

Abflussforschung und Regionalisierung:

Zahlreiche Forschergruppen haben sich mit der Abflussbildung in bewaldeten Einzugsgebieten befasst, wie umfassende Literatursichtungen dokumentieren (vgl. BONELL 1998, 1993, UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997a,b). Nach wie vor besteht jedoch Forschungsbedarf (BONELL 1998):

- nach gründlicheren Studien zur raumzeitlichen Verteilung von Abflussbildungsprozessen,
- nach vereinfachten Modellen für Gewässereinzugsgebiete.

Die Suche nach sinnvollen Raumgliederungskonzepten für die Abflussbildung führt zur Vorstellung von Flächen mit gleichen dominanten Abflussbildungsprozessen, die sich aus der jeweiligen Kombination von Relief, Substrat, Vegetation und Feuchtezustand ergeben: den Hydrotopen (→ Glossar). Die Gliederung eines Einzugsgebiets in Hydrotopen schärft einerseits das Prozessverständnis. Sie ist andererseits Voraussetzung dafür, ein reales Nieder-

schlags-Abfluss-System im Simulationsmodell prozessnah abzubilden. Angesichts einer Vielzahl schwer kalibrierbarer und überparametrierter Simulationsmodelle (MÜLLER & PESCHKE 2000) ist die räumliche Diskretisierung von Einzugsgebieten als Preprocessing für vereinfachte funktionale Modelle ein wichtiges Desiderat der hydrologischen Forschung.

Zwischen dem integralen Informationsgehalt einer Abflussganglinie am Pegel eines Einzugsgebiets und kleinskaligen Untersuchungen zur Abflussbildung klafft eine Lücke. Regionalisierungsverfahren versuchen, diese Lücke zu schließen und bieten Konzepte, punktartige Informationen auf Flächen zu übertragen und umgekehrt. Bei diesem Vorgehen sind bedeutende Probleme bei Skalenübergängen zu überwinden: Messskala, Prozess- und Modellskala erweisen sich dabei z.T. als unvereinbar (BLÖSCHL 1996).

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Regionalisierung in der Hydrologie“ wurden diese Fragestellungen intensiv bearbeitet (KLEEBERG 1992, KLEEBERG et al. 1999a). In den Abschlussberichten wird nach wie vor Forschungsbedarf hinsichtlich der prozessbezogenen Definition von Flächen mit räumlich einheitlichen hydrologischen Reaktionen sowie hinsichtlich der Skalenabhängigkeit beteiligter Prozesse gesehen. Der Prozessforschung und der Validierung von Regionalisierungskonzepten und Modellen im Gelände messen MÜLLER & PESCHKE (2000) sowie BONELL (1998) einen besonderen Stellenwert bei.

In die Prozessforschung zur Abflussbildung reihen sich auch die Forschungsaktivitäten der AG Dürreych ein. Dabei kann z. T. an hydrologische Forschungsergebnisse im Bereich des Dürreychgebiets angeknüpft werden (KREBS 1979, CASPARY 1990, DIKAU 1994, FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996).

Arbeitsgruppe Dürreych: Unsere interdisziplinär besetzte Arbeitsgruppe, „AG Dürreych“, bestand zeitweise aus 5 Doktoranden und einem Post-Doktoranden und arbeitete von 1997 bis 2002 an der Identifikation von Abflussprozessen und ihrer raum-zeitlichen Verteilung. Gemeinsames Untersuchungsobjekt war das 7 km² große hydrologische Testgebiet „Dürreychtal“ im Buntsandstein-Schwarzwald, das im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“ (GRK 147) seit 1996 betrieben wurde (Abb. 3).

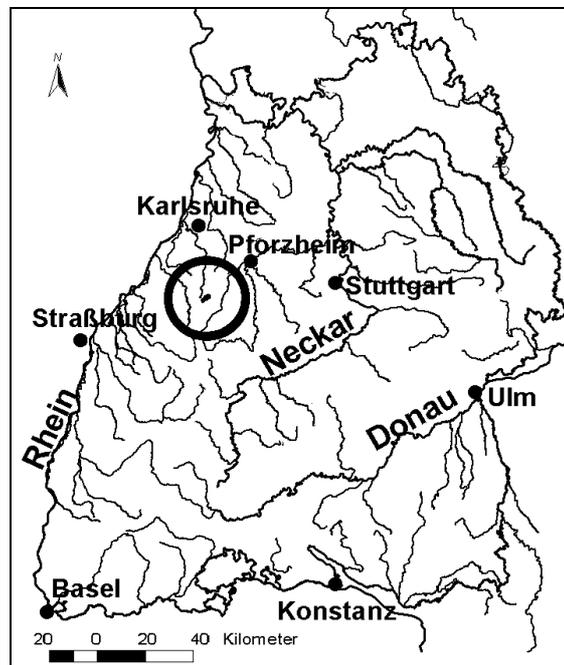


Abb 3: Lage des Untersuchungsgebiets Dürreychtal (eingekreist) in Baden-Württemberg

Das Dürreych-Projekt schließt an die Untersuchungen zum Wasser- und Stofftransport im Weiherbachgebiet an, die vom damaligen Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) der Universität Karlsruhe initiiert wurden (PLATE 1994). Unter anderem sollte der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich die Erfahrungen aus dem Weiherbachgebiet – einem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet im Kraichgauer Lösshügelland – auf ein forstlich genutztes Einzugsgebiet mit steilem Mittelge-

birgsrelief übertragen lassen. Das Dürreychgebiet erfüllte aufgrund der überschaubaren Verhältnisse hinsichtlich Geologie und Hydrologie, verfügbarer Pegeldaten seit 1974, vorhandener Untersuchungen (insbes. CASPARY 1990) sowie seiner günstiger Lage die Anforderungen an ein komplementäres Testobjekt zum Weiherbachgebiet in besonderem Maße.

Forschungsziele der AG Dürreych: Im Zentrum aller Forschungsaktivitäten der AG Dürreych steht die Identifikation von Abflussprozessen (Abb. 4). Dennoch lassen sich für die Teilprojekte klare Schwerpunkte formulieren:

- Aufbau des hydrologischen Messnetzes; hydrometrische/tracerhydrologische Untersuchungen und Ankopplung an Simulationsmodelle (CASPER 2002)
 - Transportdynamik und Nutzung gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen (DOC) als natürlichen Tracer zur Identifizierung dominierender Abflussprozesse (VOLKMANN 2002)
 - Untersuchungen zur Gerinnehydraulik und Bettstabilität von Gebirgsbächen (ABERLE 2000)
- Räumliche Verteilung der Abflussbildungsprozesse, Hydrotopausgliederung (vorliegender Beitrag).

Die vorliegende Arbeit versteht sich dabei sowohl als Beitrag zur Prozessforschung in bewaldeten Einzugsgebieten als auch zur Regionalisierung. Die Hauptziele sind:

- Identifikation hochwasserrelevanter Abflussprozesse im Dürreychgebiet und de-

ren Bedingtheit durch die Gebietseigenschaften

- Entwicklung eines Regionalisierungskonzepts zur Gliederung des Dürreychgebiets in Flächen gleicher Abflussbildung (Hydrotopotypen).

Praktikable Regionalisierungskonzepte sind auf möglichst breitenverfügbare Daten zu den Einzugsgebietseigenschaften Relief, Substrat und Vegetation angewiesen. Im Rahmen dieser Arbeit werden dazu neben einem Digitalen Höhenmodell (DHM) vor allem Unterlagen der Forstlichen Standortkartierung (FSK) verwendet. Sie sind sowohl Informationsgrundlage für die wichtigsten Gebietseigenschaften als auch für die Hydrotopausgliederung. Mit dem gewonnenen Prozessverständnis werden bestehende N-A-Simulationsmodelle kritisch überprüft (CASPER 2002). Die für die Simulation erforderlichen bodenkundlichen Parameter und ihre räumliche Verteilung waren von der vorliegenden Arbeit bereit zu stellen.

Die von der AG Dürreych gewonnenen Daten wurden in einem gemeinsamen Datenpool, einer ORACLE-Datenbank mit GIS-Anbindung, vorgehalten (Abb. 4). Von den Synergieeffekten des gemeinsamen Datenpools profitiert die vorliegende Arbeit in besonderem Maße: Der offene Austausch von Daten und die Zusammenarbeit haben es ermöglicht, Hypothesen zur Abflussbildung im Untersuchungsgebiet gemeinsam zu entwickeln und die oft qualitativen Beobachtungen mit Messwerten zu untermauern.

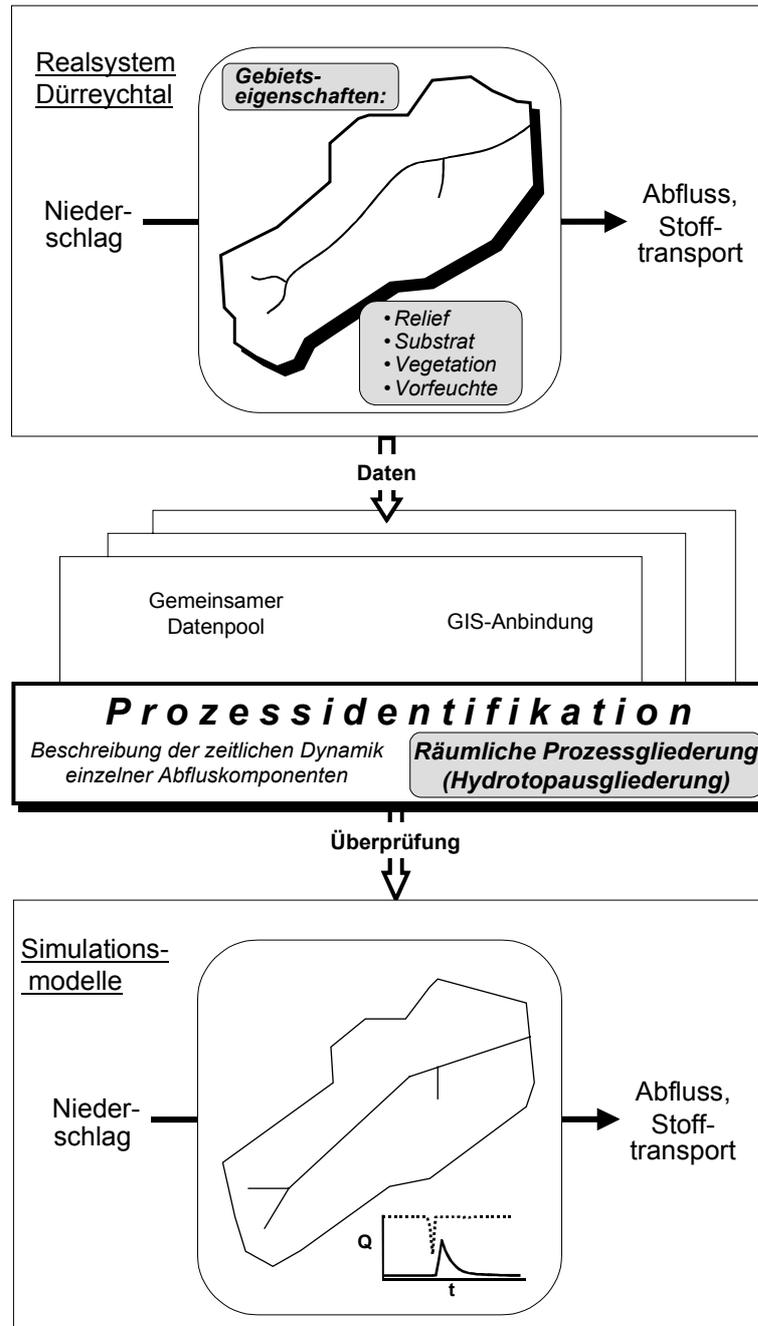


Abb. 4: Die Identifikation von Abflussprozessen als zentrales Ziel der AG Dürreych. Die Arbeitsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit sind grau unterlegt.

2 Stand der Forschung

Das Kapitel stellt im ersten Teil der Stand der Prozessforschung zur Abflussbildung vor. Im zweiten Teil werden gängige Regionalisierungsansätze dieses Forschungszweigs erläutert. Die Teilkapitel schließen jeweils mit der Formulierung des allgemeinen Forschungsbedarfs sowie der auf das Dürreychgebiet bezogenen Anknüpfungspunkte ab.

2.1 Prozessforschung zur Abflussbildung

2.1.1 Überblick und Begriffe

Abflussbildung als System: Der Transformationsprozess vom Niederschlag zum Abfluss in einem Einzugsgebiet kann als Input-Output-Modellsystem abstrahiert dargestellt werden (Abb. 5). Steuergrößen des Systems sind die näherungsweise statischen Gebietseigenschaften Relief, Substrat, Böden und Vegetationsbedeckung sowie die vom Systeminput beeinflusste Vorfeuchte, welche die Dynamik des Systems bestimmt.

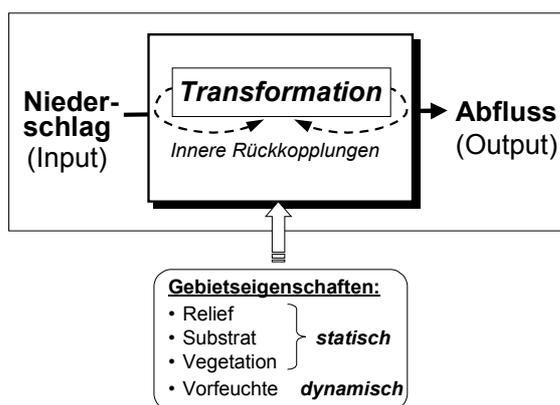


Abb. 5: Darstellung der Niederschlags-Abfluss-Transformation als System. – Die Gebietseigenschaften wirken als Steuergrößen.

Der Transformationsprozess wird in der Literatur kategorisiert nach

- Reaktionszeit: Schnelle und langsame Abflusskomponenten
- Herkunftsraum: Oberflächennahe und tiefe Abflusskomponenten.

Begriffunschärfen: Die vorgenannten Kategorien Reaktionszeit und Herkunftsraum werden häufig gleichbedeutend verwendet, obwohl eine schnelle Abflussreaktion nicht zwangsläufig durch oberflächennahe Abflusskomponenten bedingt ist. Die Vielfalt um den Begriff des Zwischenabflusses mag als weiteres Beispiel für gewisse Begriffunschärfen gelten, die der Abflussforschung immanent sind: Mehr oder weniger synonym zum Begriff Zwischenabfluss werden die Begriffe Interflow, Oberflächennaher Abfluss, Bodeninnerer Abfluss, Hypodermischer Abfluss, Subsurface Stormflow, Oberer Deckschichtenabfluss, Lateraler Abfluss etc. verwendet.

Das Beispiel verdeutlicht, dass Abflussprozesse und ihre Bildungsbedingungen nicht so scharf voneinander zu trennen sind, wie es ihre Systematik suggerieren mag (PESCHKE et al. 1999b). Die uneinheitliche Begriffsbildung ist einerseits auf die historische Entwicklung der Abflussforschung zurückzuführen und liegt andererseits in der komplexen Natur des Forschungsgegenstands begründet. Letztlich bleibt die wissenschaftliche Begriffsbildung in der Abflussforschung ein Versuch, das per se unscharfe Prozessgeschehen sprachlich unterscheidbar zu machen.

Literaturübersicht: Einen Überblick über die kaum übersehbare Vielfalt von Fachbeiträgen zur Abflussbildung, besonders in forstlich genutzten Einzugsgebieten, verschaffen die umfanglichen Literatur-Reviews von BONELL (1998, 1993). Eine deutschsprachige Literatursichtung zur historischen Entwicklung der Ab-

flussforschung und ihrer Begriffe legen UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997a,b) vor. BISHOP 1991 stellt die z.T. kontroversen Schulen der Abflussbildung gegeneinander. KIRKBY (1980) fasst die Kenntnisse zur Abflussbildung an Hängen zusammen. Literatur zum Phänomen des Zwischenabflusses wird im deutschen Sprachraum z.B. von BARSCH & FLÜGEL (1988) sowie in neuerer Zeit KÖRNER (1996) ausgewertet.

Angesichts dieser teils widersprüchlichen Vielfalt und der systemimmanenten Begriffunschärfen hat die AG Dürreych ein Glossar erstellt, und „ihre“ gemeinsam verwendeten Begriffe zur Abflussbildung in Anlehnung an die gängige Literatur definiert (→ Glossar vor dem Anhang). An dieser Stelle sollen lediglich die wichtigsten Grundlagen der Abflussbildung behandelt werden, die für die Untersuchungen im Dürreychgebiet relevant sind.

2.1.2 Niederschlag und Interzeption

Je nach Baumartenzusammensetzung, Baumalter und Bestandsdichte steht in Waldeinzugsgebieten ein mehr oder weniger reduzierter Niederschlagsinput für die Abflussbildung zur Verfügung. Zahlreiche Studien beschäftigen sich daher mit der Ermittlung von Interzeptionsverlusten (zusammenfassend z.B. DVWK 1986). MOESCHKE (1998) stellt beispielsweise bei einem intakten Bergmischwald am Alpenrand eine Interzeption von ca. ¼ des Freilandniederschlags fest. In dem Einzugsgebiet ist der Bestockungsgrad im Verhältnis zum Einfluss der tonig-schluffigen Deckschichten von untergeordneter Bedeutung. Kahlschläge erhöhen dagegen die Abflussspitzen um 30 %. Zu erwähnen ist auch die verringerte Ausschöpfung des Bodenwassers durch Transpiration auf Schlagflächen.

2.1.3 Bodenwasser

Matrixfluss: Fundamentale Grundlagen zur Beschreibung der Wasserbewegung in porösen Medien wurden mit der Darcy-Gleichung und der Richards-Gleichung gelegt (dargestellt z.B. in SUMNER 2000 oder KUTILEK & NIELSEN 1994). Die beiden Ansätze sind bis heute die Grundbausteine physikalischer Modellansätze zur Beschreibung der Abflussbildung.

Die Darcy-Beziehung beschreibt den Wasserfluss in gesättigten Substraten (Gl. 1).

$$J = \frac{Q}{A} = -K_S \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Flussrate Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] pro Flächeneinheit A [m^2] ist proportional zum hydraulischen Gradienten $\Delta H/L$, der Höhendifferenz [m] pro Filterstrecke [m]. Die vom Substrat abhängige Proportionalitätskonstante wird als gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_S [m s^{-1}] bezeichnet. Gl. 1 gilt streng genommen nur für homogene Porensysteme und laminares Fließen, wird meist jedoch auch für natürliche Korngemische als gültig angenommen. Der K_S -Wert bewegt sich in Böden meist bei 10^{-4} m s^{-1} in sandigen Substraten und 10^{-9} m s^{-1} in tonigen Substraten. Zwischen K_S -Wert und anderen bodenphysikalischen Parametern wie Korngrößenverteilung, Porengrößenverteilung und Porenvolumen, Bodenwassergehalt und Matrixpotential, Feldkapazität, etc. bestehen vielfache Beziehungen (Abb. 6). Insbesondere die Kenntnis der Bodenart ermöglicht die einfache Abschätzung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und anderer Parameter aus Tabellenwerken oder Pedotransferfunktionen (Kap. 6.2.10).

Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_u hängt vom zeitlich veränderlichen Wassergehalt und dem dadurch bestimmten Matrixpotential des Bodens ab.

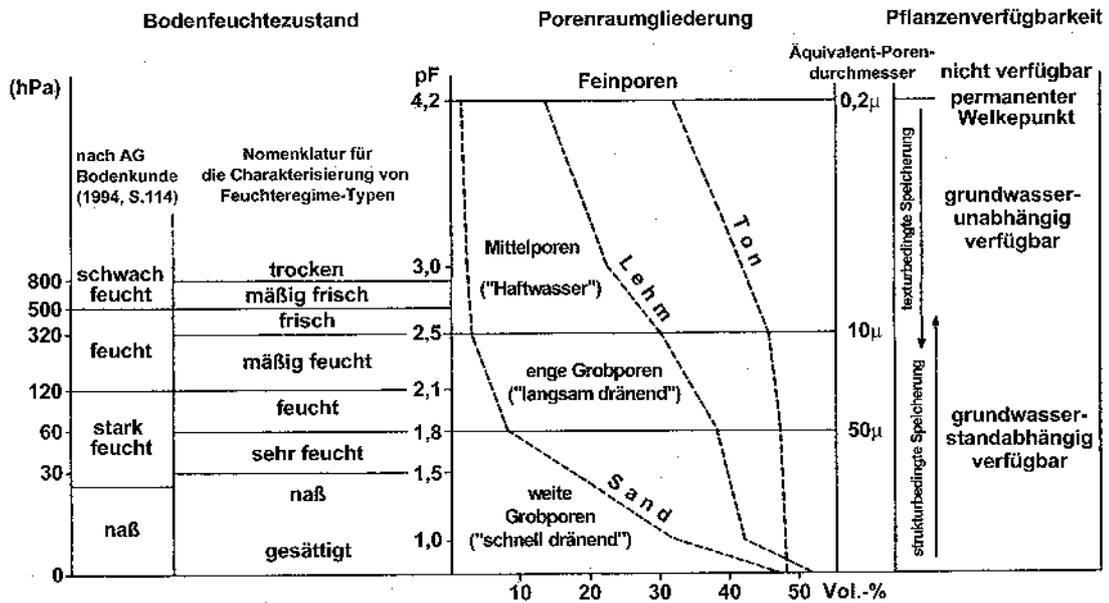


Abb. 6: Zusammenhänge zwischen den Bodenarten mit Bodenfeuchtezustand, Porenraumgliederung und pflanzenverfügbarem Wasser (ZEPP 1995)

Wie Gl. 2 von CAMPBELL (1974, zit. in SUMNER 2000: A-99) beispielhaft zeigt, nimmt die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_u mit sinkendem Wassergehalt stark ab (Gl. 2):

$$K_u(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^m \quad (\text{Gl. 2})$$

Dabei bedeuten θ den aktuellen Wassergehalt und θ_s den Sättigungswassergehalt des Bodens [Vol.-%]; m ist eine dimensionslose Konstante. Sande etwa, wie sie im Dürreychgebiet dominieren, haben im gesättigten Zustand eine hohe hydraulische Leitfähigkeit. Sie sinkt mit der schnellen Entleerung der Poren rapide ab.

Makroporenfluss: Wurzeln, Bodenfauna, Quellung und Schrumpfung, Subrosion u.a. können Makroporen (\rightarrow Glossar) in Böden erzeugen. Sie gestatten auch in wasserungesättigten Böden schnellen Wassertransport (z.B. BEVEN & GERMANN 1982) und sind daher für die Hochwasserentstehung von besonderer Bedeutung. In natürlichen Waldböden sind

vermutlich die effektivsten Makroporensysteme ausgebildet und Makroporenflüsse sind die Regel (BONELL 1993). Größenangaben für Makroporen werden in der Literatur sehr uneinheitlich gehandhabt und schwanken zwischen $> 30 \mu\text{m}$ und $10.000 \mu\text{m}$ (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997b:16). Bei noch größeren Porensystemen wird von Röhren oder Pipes gesprochen, wie sie etwa aus dem Dürreychgebiet vergleichbaren Einzugsgebieten mit podsoligen Böden im britischen Hochland (ATKINSON in KIRKBY 1980) oder andersartigen Einzugsgebieten (UCHIDA et al. 1999) bekannt sind. Bei verschiedenen Markierungsversuchen an makroporösen Böden konnten z.T. Fließgeschwindigkeiten im cm s^{-1} -Bereich festgestellt werden (in UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997a), so etwa auch in Blockschutthalden des Südschwarzwalds (UHLENBROOK 1999). FEYEN et al. (1999) stellen hydraulische Leitfähigkeiten infolge von präferenziellem Fließen im

Unterboden von Waldböden des Schweizer Flyschs fest, die den K_s -Wert um das 10^3 -fache übertreffen. Bedeutende Wassermengen können an der Horizontgrenze zwischen organischer Auflage und Mineralboden transportiert werden (BONELL 1998, UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997a). Möglicherweise kommt es jedoch erst bei Sättigung bis in den Oberboden zum Pipe Flow (\rightarrow Glossar) in den organischen Horizonten, wie er von CAREY & WOO (2000) über Permafrostböden in hohem Ausmaß beobachtet wurde.

2.1.4 Abflussbildungstypen

Horton'scher Oberflächenabfluss: Oberflächenabfluss im Sinne von HORTON (1933) entsteht, wenn die Regenintensität den K_s -Wert des obersten Bodenhorizontes überschreitet. Mittlere Sande mit einem K_s -Wert von ca. 10^{-4} m s^{-1} können beispielsweise bis zu 360 mm h^{-1} aufnehmen – ein Wert, der in den Mittelbreiten nie erreicht wird (PESCHKE 2001:20). Auf feinkörnigeren oder verdichteten Substraten mit einem K_s -Wert unter ca. 10^{-5} m s^{-1} ist die Entstehung von Infiltrationsüberschuss prinzipiell denkbar. Waldböden dagegen verhindern Infiltrationsüberschuss meist auch unter ungünstigeren Verhältnissen. Dies ist auf ihre meist hohe Durchwurzelung und Bioaktivität zurückzuführen (BONELL 1998, WOHLRAB et al. 1992).

Sättigungsflächenabfluss: Eine andere Form des Oberflächenabflusses bildet sich durch Auffüllen eines Grund- oder Stauwasserspiegels bis zur Oberfläche infolge von Infiltration oder lateralem Wasserzufluss. Voraussetzung dafür ist ein geogener oder pedogener Wasserstauer. Nach Sättigung bzw. Überlaufen der Flächen (Return Flow \rightarrow Glossar) fließt der gesamte zusätzliche Niederschlag vollständig oberflächlich ab. Sättigungsflächenabfluss tritt

häufig in Auenbereichen (Abb. 7, a) oder anderen konkaven Lagen mit grundwasserbeeinflussten Böden auf.

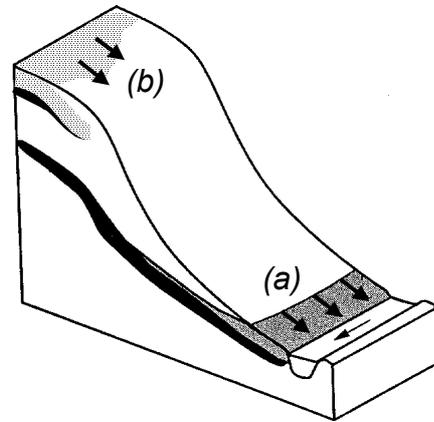


Abb. 7: Schematische Darstellung des Sättigungsflächenabflusses (MERZ 1996:77, verändert)

Aber auch auf stark hydromorph geprägten Böden in anderen Reliefpositionen, so etwa auf Stagnogleyen in den feuchten Hochlagen des Schwarzwalds, kann Sättigungsflächenabfluss auftreten (Abb. 7, b).

Sättigungsflächen können sich je nach Reliefsituation und Ereigniseigenschaften ausdehnen und schrumpfen (BONELL 1993), wie Abb. 8 beispielhaft zeigt.

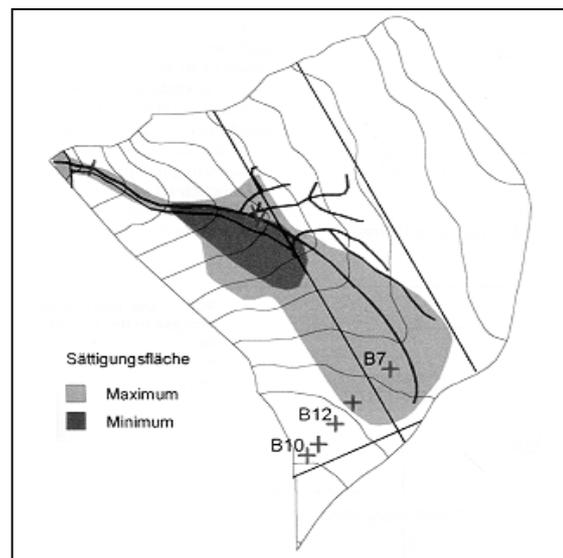


Abb. 8: Beispiel für die maximale und minimale Ausdehnung von Sättigungsflächen (PESCHKE 2001:23, verändert)

Diese Erkenntnis geht zurück auf das Variable Source Area Concept (HEWLETT & HIBBERT 1967) und wird heute in verschiedenen Simulationsmodellen umgesetzt.

Zwischenabfluss: In der ungesättigten Zone, d.h. zwischen Grundwasser- und Bodenoberfläche, kann Zwischenabfluss entstehen, wenn die hydraulische Leitfähigkeit mit der Tiefe deutlich abnimmt. Die Tiefensickerung wird gehemmt, und das Wasser fließt bei ausreichendem Gefälle, dem geringeren Fließwiderstand folgend, lateral ab (Abb. 9). Eine besondere Bildungsbedingung ist das Auftreten eines in lateraler Richtung höheren K_s -wertes.

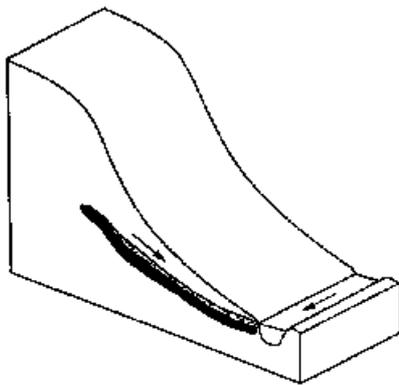


Abb. 9: Schematische Darstellung des Zwischenabflusses am Hang (MERZ 1996:79, verändert)

Hangrinnen können als bevorzugte Bahnen des Zwischenabflusses dienen (BARSCH & FLÜGEL 1988). An Unterhängen kann es durch Akkumulation des Zwischenabflusses zu Sättigungsflächenabfluss kommen (Abb. 7). Je nach Lage der Schichtgrenzen können mehrere Zwischenabflusshorizonte entstehen. Tiefere Komponenten erreichen ggf. den Vorfluter mit größerer Verzögerung, weswegen schnelle und langsame Zwischenabflüsse unterschieden werden können (PESCHKE 2001). Schnelle Zwischenabflusskomponenten können ein bis zwei Stunden nach einem Niederschlagsereignis eine Abflussspitze auslösen. Langsame

Komponenten dagegen können um viele Stunden bis mehrere Tage verzögert auftreten (ANDERSON & BURT 1990).

BONELL (1998) hält fest, dass schneller Zwischenabfluss (subsurface stormflow) in ausgewählten Waldeinzugsgebieten der feuchtgemäßigten Breiten den vorherrschenden Abflusspfad darstellt. Der Abfluss bewegt sich näherungsweise oberflächenparallel auf einem Stauer oder dem unterlagernden Festgestein. Aus einem Dreiecksdiagramm von ANDERSON & BURT (1990) ist die Dominanz verschiedener Abflusskomponenten in Abhängigkeit von verschiedenen Einzugsgebietseigenschaften abzulesen (Abb. 10). Daraus ist ersichtlich, dass Zwischenabfluss insbesondere in Gebieten mit steilem Relief, schmalen Talauen und durchlässigen Böden zu erwarten ist, wie sie etwa im Dürreychgebiet vorkommen.



Abb. 10: Abflusskomponenten in Abhängigkeit von Gebietseigenschaften (nach ANDERSON & BURT 1990:370, aus dem Englischen übersetzt)

Zwischenabfluss kann sowohl als Darcy-Fluss als auch als Makroporenfluss auftreten. Makroporen im humosen Oberboden ermöglichen präferenzielles Fließen entlang von Wurzeln u.a. Sie können den Zwischenabfluss während und kurz nach einem Niederschlagsereignis erheblich beschleunigen. BONELL (1998) fand,

dass die effektive hydraulische Leitfähigkeit kleiner Einzugsgebiete in der gleichen Größenordnung lag wie die Leitfähigkeit der obersten 10 cm Boden und damit viel höher, als es in situ-Messungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit suggerieren. Damit wären rascher oberflächennaher Zwischenabfluss und return flow im oberen organischen Horizont die vorrangigen Leitbahnen für die Hangentwässerung im Verlauf von Niederschlagsereignissen.

Abflussbildung durch Druckfortpflanzung:

Lysimeteruntersuchungen zeigen, dass Abflussreaktionen nach einem Niederschlag bereits zu einer Zeit registriert werden, die viel kürzer ist als die Fließzeit durch den gesamten Bodenkörper (PESCHKE 2001). Dies lässt auf Druckfortpflanzungsphänomene schließen, wie sie auch aus natürlichen Einzugsgebieten bekannt sind (BONELL 1993, 1998). Unterschieden werden Phänomene wie etwa Groundwater Ridging und Piston Flow (→ Glossar). Druckfortpflanzung ist nur bei einem hydraulisch verbundenen Porensystem denkbar. So kann etwa am Oberhang infiltrierendes Wasser bei entsprechender Verbindung Wasser am Unterhang ausdrücken. An dieser Stelle werden Ergebnisse isopenhydrologischer Untersuchungen verständlich, die darauf hinweisen, dass der Hochwasserabfluss oft zu großen Teilen aus Vorereigniswasser besteht (BONELL 1998). Es kommt also Wasser zum Abfluss, das im Boden oder im Grundwasserkörper zwischengespeichert war und das in seiner isotopischen Signatur weiter zurückliegenden Niederschlagsereignissen entspricht.

Tiefensickerung, Grundwasserneubildung:

Gut durchlässige, wenig geschichtete Substrate ohne große Neigung sind die Hauptentstehungsorte für Tiefensickerung von der Bodenzone in die Grundwasserzone. Insbesondere die sandig-kiesigen Talauen größerer

Flüsse erfüllen diese Bedingungen und sind die wichtigsten Flächen für die Grundwasserneubildung. Aber auch klüftige Festgesteinsaquifere, wie sie etwa im Nordschwarzwald anzutreffen sind, können bedeutende Grundwasservorräte bergen. Die vorliegende Arbeit klammert bewusst die Vorgänge der Grundwasserneubildung aus, um sich auf die schnellen, hochwasserrelevanten Abflusskomponenten zu konzentrieren. Hier sei nur auf die Literatur verwiesen (z.B. HÖLTING 1996, MATTHESS 1983).

Flächendynamik und Abflusskonzentration:

Die Zuordnung eines Abflussprozesses zu einer Fläche ist zeitlich dynamisch: Sie hängt ab von der Vorfeuchte und Ereigniseigenschaften (vgl. Abb. 5). PESCHKE et al. (1999b) unterscheiden deshalb potenziell und aktuell dominante Abflussprozesse. In dieser Unterscheidung ist eine zweite Feststellung enthalten: Meist laufen mehrere Abflussbildungsprozesse gleichzeitig ab; ein einzelner Prozess kommt unter bestimmten Bedingungen lediglich neben anderen zur Dominanz.

Beispielhaft soll die komplexe Dynamik der Abflussbildung am Hitachi Ohta Einzugsgebiet, einem bewaldeten Kerbtal in Japan, verdeutlicht werden. SIDLE et al. (2000) stellen ein nichtlineares Gebietsverhalten mit zunehmender Gebietsfeuchte fest: Bei geringer Feuchte findet nur Sättigungsabfluss aus der Aue statt, gefolgt von lateralem Matrixfluss von den Unterhängen. Danach setzt Makroporenfluss ein; die Feuchte von Senken oder Einzugsgebietsteilen nullter Ordnung überschreitet Schwellenwerte. Unter sehr nassen Bedingungen werden die meisten Einzugsgebietsteile nullter Ordnung durch Ausweitung und Selbstorganisation von präferenziellen Fließwegen ans Abflussnetz angeschlossen. An diesem Beispiel werden Eigenschaften der Abflussbil-

dung deutlich, wie sie typisch sind für komplexe Systeme: Nichtlinearität, innere Rückkopplungen und Selbstorganisation.

Erst durch Anbindung abflussaktiver Flächen an das Vorfluternetz kann der gebildete Abfluss hochwasserwirksam werden. Dafür sind die Ausprägung des Gewässernetzes und der Topographie entscheidend. Für die Abflusskonzentration im Gewässernetz stehen bewährte ingenieurhydrologische Methoden wie etwa Faltungsoperationen, Linearspeichermodele u.a. zur Verfügung (z.B. DYCK & PESCHKE 1995). Sie leiten über zur hydrologischen Modellierung und sind nicht mehr Gegenstand dieser Untersuchung.

2.1.5 Bisherige Untersuchungen im Nordschwarzwald

Böden und Bodenwasser: Bodenkundlich orientierte Arbeiten über den Nordschwarzwald liegen insbesondere von STAHR (1973) und SCHWEIKLE (1971) vor. Zusammenfassende Darstellungen zu Waldböden im Nordschwarzwald mit Verweisen auf Arbeiten von BLUME (1968) und BLEICH et al. (1986) finden sich in REHFUESS (1990). Seitens der Forstwissenschaften sind Beiträge von JAHN (1957) und MÜLLER (1967) zu erwähnen. An der Universität Hohenheim werden die Entstehung und Eigenschaften von Podsolen im Buntsandstein-Schwarzwald untersucht (ANDRUSCHKEWITSCH et al. 1999).

STAHR (1973) untersuchte v.a. Eigenschaften von Böden mit bändchenartiger Ortsteinbildung (Bb-Horizont¹), die in den kühlfeuchten Hochlagen des Nordschwarzwalds als Abweichungssubtypen von Podsolen bzw. Stagnogleyen auftreten. Infolge ihrer offenbar wasserhemmenden Eigenschaften sind sie für

die Abflussbildung von besonderer Bedeutung. Wichtige Eigenschaften hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Pedohydrologische Eigenschaften von Bändchenböden im Nordschwarzwald. Zusammenstellung auf Grundlage von STAHR (1973:137, 151)

Horizont	Eigenschaften
Humusauf- lage	Höchste Wasserkapazität und Porenvolumen bis 70 % Stärkste Wassergehaltsschwankungen Ausgleichende Wirkung vermutet
Oberer Mineral- boden	Geringere Wasserkapazität Hohe Ks-Werte Schwankender Wassergehalt
Stau- wasser- zone	Geringe Saugspannung, oft Sättigung Wassergehalt schwankt kaum Geringster Ks-Wert Minimum des Porenvolumens im unteren Bereich
Ortstein (Bs, Bb)	Maximum des (Fein-)Porenvolumens
unterhalb Ortstein	Wieder höhere Saugspannung Direkt unterhalb Bb-Horizont höchstes Porenvolumen Wassergehalt schwankt kaum Ks-Wert höher als oberhalb

STAHR (1973:137) konnte an Einzelprofilen überraschenderweise keine signifikante Verringerung der Wasserleitfähigkeit am Bb-Horizont feststellen. Die nach Horizonttypen geordnete Häufigkeitsverteilung der Ks-Werte (Abb. 11) lässt jedoch die statistischen Unterschiede hervortreten.

STAHR (1973) schreibt den oberhalb des Ortsteinhorizonts liegenden Aeg-Horizonten (nach neuerer Nomenklatur wohl Serw) eine entscheidende Stauwirkung zu: Deren häufigste Ks-Werte haben ein Maximum bei $10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$. Die Ks-Werte der Bb-Horizonte liegen zwischen 10^{-3} und $10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$ mit einem Häufigkeitsmaximum bei $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$.

¹ Nach neuerer Nomenklatur spricht man von einem Bbms-Horizont (AK BODENSYSTEMATIK 1998).

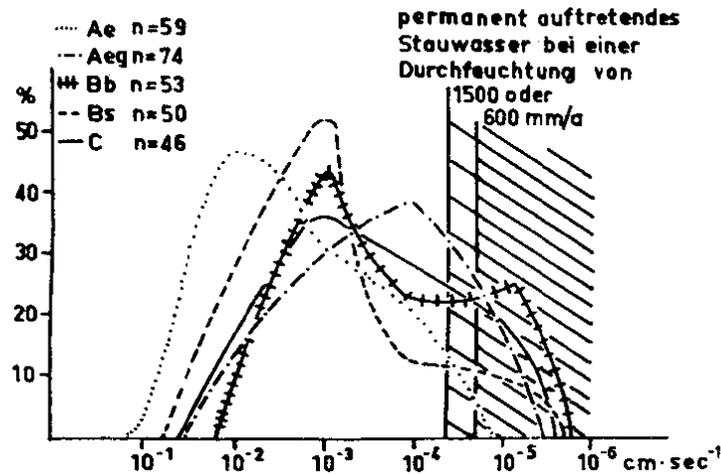


Abb. 11: Häufigkeit der gemessenen Ks-Werte für Horizonte der Podsole und Bändchenböden im Nordschwarzwald (in: STAHR 1973:138)

Es ergibt sich aber eine deutlich zweipipflige Häufigkeitsverteilung. Sie wird zurückgeführt auf:

- große, substratbedingte Primärporen,
- kleine, durch Verkittung des Substrats mit Sesquioxiden bedingte Sekundärporen.

Stauereffekte können jedoch auch infolge eines verringerten Fließquerschnitts vom feinporenen Bb-Horizont zum unterlagernden grobporeneren Material auftreten. Dadurch kommt es zum Kapillarabriss und zur Ausbildung hängender Menisken. Derartige Kapillarsperreffekte werden u.a. bei Deponieoberflächendichtungen zur lateralen Wasserableitung genutzt. Wasserstau wird nach den Untersuchungen von STAHR (1973) nie durch Horizonte unterhalb des Bb-Horizonts verursacht. STAHR (1973:152) befindet,

„daß nicht nur Hochflächenböden zu Wasserstau neigen, sondern daß auch ein großer Teil der Hangböden der Bb-Bodenlandschaft ganzjährig oder zeitweise Stauwasser führt“.

SOMMER et al. (1997, 2001), welche die Arbeiten von STAHR aufgreifen, stellen an Oberhängen im Schwarzwald mächtige Ae-Horizonte fest, an Unterhängen mächtige Bhs-Horizonte und postulieren laterale Podsolierungsprozesse auf Landschaftsebene. Diese Beobachtung

spricht ebenfalls für maßgebliche laterale Wasserflüsse:

„Lateral flowing water above denser, periglacial basal layers and / or clay accumulated subsoil horizons (= lower ksat) have been observed in all up- and midslope soils and several times throughout the year. In addition thin iron pans caused the impedance and lateral flow component at the plateau. In the entire sandstone catchment, about one third of the runoff could be attributed to interflow...“
SOMMER et al. (2001:243).

Laterale Verlagerungsprozesse aus Stagnogleyen mit Bildung von unterhalb anschließenden Ockererden werden bereits von SCHWEIKLE (1971) beschrieben.

Abflussbildung im Seebachgebiet: Fragen zum Wasserhaushalt und Stofftransport im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes sind am Beispiel von Seebach, Rotenbach und Kleiner Kinzig südöstlich Baden-Baden behandelt worden (SEEGER 1990, EINSELE & HINDERER 1992, MEESENBURG & MÜLLER 1992). Da diese Einzugsgebiete bezüglich ihrer naturräumlichen Ausstattung dem Dürreychgebiet sehr ähnlich sind, liegt es nahe, die dort entwickelten Prozessvorstellungen zumindest teilweise zu übertragen.

Anhand von Trockenwetterlinie und Leerlaufkoeffizient wurden von SEEGER (1990) ursprünglich vier Abflusskomponenten getrennt (Abb. 12), wobei die oberste Komponente

später nicht mehr unterschieden wird (EINSELE & HINDERER 1992):

- Oberflächennaher Abfluss Q_o über das Makroporensystem des Oberbodens; nahezu ohne zeitliche Verzögerung,
- Oberer Deckschichtenabfluss Q_{do} oberhalb des hydraulisch wirksamen Ortsteins; geringe zeitliche Verzögerung,
- Unterer Deckschichtenabfluss Q_d oberhalb des Festgesteins; langsames Austropfen,
- Permanenter Grundwasserabfluss Q_g über das Kluftsystem des Buntsandsteins.

Die Deckschichten können je nach Witterung zu mehr als 50 % zum Abfluss beitragen. Dabei spielen deren Mächtigkeit eine Rolle sowie ihre Exposition: Südhänge sind wegen des größeren Anteils an Feinschuttdecken weniger abflusswirksam.

Die Bildung von Überlandabfluss i.e.S. (Horton'scher Infiltrationsüberschuss) hält SEEGER

(1990) aufgrund der hohen Infiltrationskapazität im Wald für ausgeschlossen; lediglich return flow wurde einmal kurz nach der Schneeschmelze bei gesättigtem Boden beobachtet. SEEGER (1990:32) hält bezüglich der schnellsten Komponenten fest:

„Es ist also sicher realistischer, von einem oberflächennahen Abfluß als von Überlandabfluß zu sprechen, der auf direktem Wege dem Vorfluter zugeleitet wird. Dieser oberflächennahe Anteil ist für die hohen und steilen Hochwasserspitzen in den Nordschwarzwälder Vorflutern verantwortlich. (...) Allerdings kann es nur zu starken Hochwässern kommen, wenn die Böden vor dem Ereignis schon etwa den Wassergehalt der Feldkapazität besaßen.“

Mit dem Hinweis auf die Vorsättigung der Böden wird unterstrichen, dass die Gebietsantwort ein zeitvariabler, dynamischer Prozess ist und nicht nur von den statischen Einzugsgebietseigenschaften abhängt.

In Tab. 2 werden einige pedohydrologische Kennwerte für den Nordschwarzwald aus der zitierten Literatur zusammengestellt.

Tab. 2: Zusammenstellung pedohydrologischer Kennwerte für den Nordschwarzwald

	SEEGER (1990)	STAHR (1973)
Oberster Horizont	K_s locker gepackter Sand 10^{-4} m s^{-1} Mittlere Fließgeschwindigkeit: 60-600 m d^{-1} (Mittel 300 m d^{-1}) Gesamtporenvolumen: 40 %	Ae-Horizont: K_s -Modalwert bei 10^{-4} m s^{-1} , Median bei 10^{-5} m s^{-1}
Über Ortstein	Mittlere Fließgeschwindigkeit: 10 m d^{-1} , kann durch Grobporen auf 100 m/d ansteigen	Aeg-Horizont: K_s -Modalwert bei 10^{-6} m s^{-1} , Median bei $5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$
Ortstein	$K_s = 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ Gesamtporenvolumen: 30-35 %	Bs-Horizont: K_s -Modalwert bei 10^{-5} m s^{-1} , Median bei $5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ Bb-Horizont: K_s -Modalwert bei 10^{-5} m s^{-1} , zweites Maximum 10^{-7} m s^{-1} , Median bei $3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$
Unter Ortstein	$K_s = 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ Im ungesättigten Zustand 2-3 Zehnerpotenzen geringer	C-Horizont: K_s -Modalwert bei 10^{-5} m s^{-1} , Median bei $5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$
Tiefere Schuttdecken	Mittlere Fließgeschwindigkeit: 4 m d^{-1} , bei Grobporrenfluss u.U. wesentlich größer	-

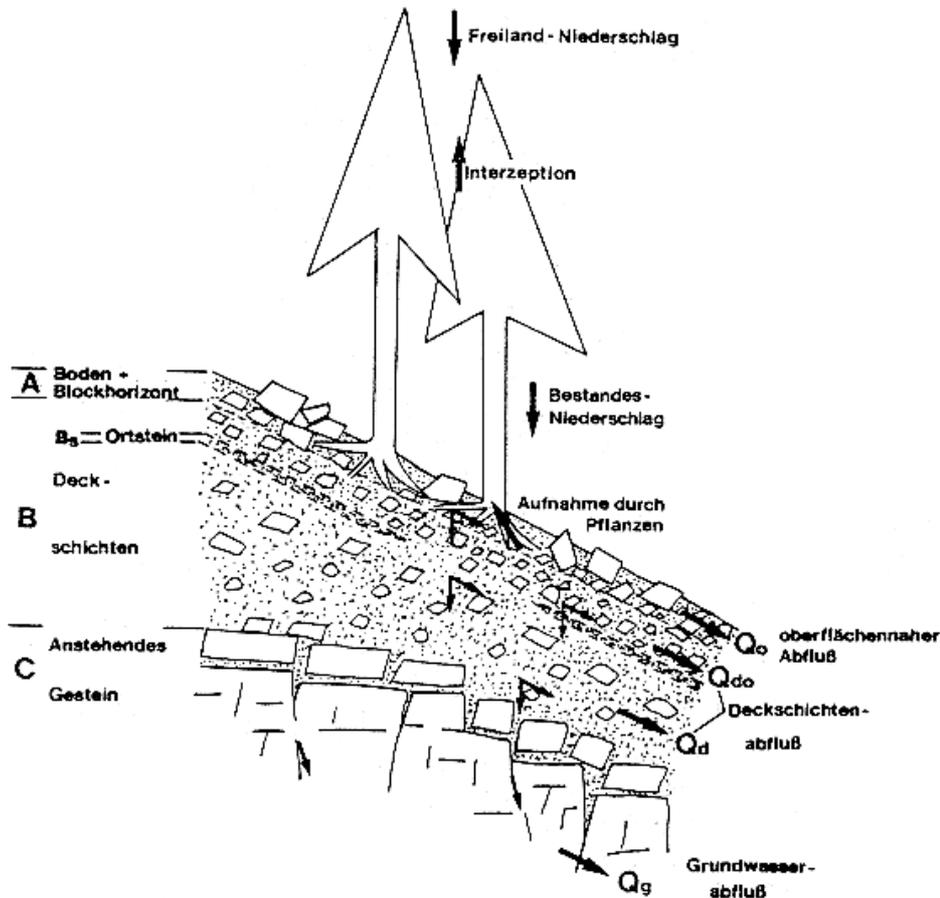


Abb. 12: Schematische Darstellung der Abflusskomponenten im Seebachgebiet (Seeger 1990:30)

Abflussbildung im Eyachtal: KREBS (1979), CASPARY (1990) und FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) untersuchen das dem Dürreychgebiet übergeordnete Einzugsgebiet der Eyach:

KREBS (1979) verfolgt vorrangig wasserwirtschaftliche Fragestellungen und beschäftigt sich demzufolge stark mit dem Grundwasserabfluss. Da der Grundwasserabfluss nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, werden die Ergebnisse nicht näher dargestellt.

CASPARY (1990) studiert die Wirkungen von Waldschäden auf das Abflussverhalten mit Hilfe des konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modells PRMS des U.S. Geological Survey (LEAVESLEY et al. 1983) und weiterführenden Ansätzen. Prozessstudien zur Abflussbildung fehlen hier völlig.

FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) dagegen macht systematische Beobachtungen zur Abflussbildung im Eyachgebiet, insbesondere zur Bildung von Sättigungsabfluss. Es zeigte sich zunächst wie schon bei KREBS (1979),

„dass das Teileinzugsgebiet der Dürreych im Frühjahr bei hoher Bodenwassersättigung auf Niederschläge eine heftige Abflussreaktion aufweist, bei abnehmender Bodenfeuchte und besonders bei kleineren Niederschlägen aber zunehmend träge reagiert“ (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996:170).

Es ergaben sich durchschnittliche Abflussbeiwerte von 8-12 % und mithin eine starke Dämpfung der Niederschlagsereignisse; bei Extremniederschlägen wurde über 50 % Direktabfluss bestimmt.

FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) gliedert das Eyachtal grob in die Reliefeinheiten Talaue, steile Talhänge und Hochflächen mit jeweils typischen Abflussbildungsbedingungen. Die

wichtigsten Angaben der Autorin zu diesen Einheiten sind im Folgenden zusammen gestellt:

- Talau: Nur kleine Flecken am Hangfuß, wirken abflussbildend und sind durch Zwischenabfluss induziert (110)
- Steile Talhänge $>15^\circ$: Von besonderer Bedeutung für die Abflussbildung sind Karnischen und Quellmulden. Ständig abflusswirksam im Dürreychgebiet ist der Ursprung des Dürreychbaches. Im Frühjahr nach Sättigung kommen dazu: Seemiß, Seeberg, Bodelschwingtanne, Hirschklinge. Bei Ausdehnung des Gewässernetzes können zudem moorige und anmoorige Flächen auf den Hochflächen abflusswirksam werden (113). Abflussbildungsprozesse sind Sättigungsflächenabfluss, Interflow, Return-Flow sowie Pipe Flow „in wenigen cm Tiefe...mit recht hoher Geschwindigkeit“ (115).
- Konvexe Hochflächen $> 750...800$ m NN: Wechselnässe tritt bei Neigungen $< 7^\circ$ auf, Wasserzügigkeit nur bei $> 2^\circ$ Neigung. Abflusswirksamkeit ist nur bei Gewässeranschluss gegeben. Abflusdämpfung durch Speicherfunktion der Hochflächen im Sommer.

2.1.6 Forschungsbedarf

Grundsätzliches: Die Literatursichtung dokumentiert einen profunden Wissensstand über die Abflussbildung. Nach wie vor sieht BONELL (1998) Forschungsbedarf nach

- *Gründlicheren Studien zur raum-zeitlichen Verteilung von Abflussbildungsprozessen auf Auenflächen und Hängen sowie deren Verbindung im Modell.*

BONELL (1998) stellt fest, dass die Fortschritte bei der Modellentwicklung bei weitem der Vali-

dierung im Gelände den Rang abgelaufen haben und spricht sich u.a. aus für

- *Mehr Feldstudien zur Validierung von Modellen mit innovativen Methoden; speziell: Validierung Topographischer Feuchtemodelle.*

Topographische Feuchtemodelle machen Aussagen über die Bodenfeuchteverteilung auf Grundlage Digitaler Höhenmodelle (vgl. Kap. 2.2.3) und versprechen eine Reihe von praktischen Anwendungen in der Forstwirtschaft und Hydrologie.

Offene Fragen im Untersuchungsraum:

Während CASPARY (1990) seiner hydrologischen Modellierung im Eyachtal überhaupt keine Prozessuntersuchungen zugrunde legt, überprüft FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) ihr Konzept zur Identifizierung abflussrelevanter Flächen mit Geländeuntersuchungen. Sie erfüllt damit prinzipiell die o.a. Forderung BONELLS nach mehr Validierung. Dennoch ergeben sich aus dieser Arbeit mehrere wichtige Anknüpfungspunkte für Prozessuntersuchungen:

- *Bedarf nach vergrößertem Untersuchungsmaßstab*

Bedingt durch den größeren Untersuchungsraum (30 km^2) kann FARRENKOPF-HILDEBRANDT die Abflussbildungsprozesse nur begrenzt raum-zeitlich differenzieren. Dazu muss der Untersuchungsmaßstab vergrößert werden.

- *Stärkere Berücksichtigung des Zwischenabflusses*

Die Geländeuntersuchungen FARRENKOPF-HILDEBRANDTS beziehen sich vornehmlich auf Sättigungsflächen. Für den Zwischenabfluss, der im Nordschwarzwald eine wichtige Rolle spielt, existiert kein eigenständiges Untersuchungskonzept.

- *Klärung der Rolle des Sättigungsflächenabflusses von den Hochflächen*

Voruntersuchungen der AG Dürreych zeigen, dass der Beitrag der Hochflächen zur Abflussbildung unterschätzt wird.

- *Vertiefte bodenkundliche Untersuchungen, insbesondere zur Rolle von Ortsteinbildungen für den Bodenwasserhaushalt*

Die Bedeutung der Böden und Substrate für die Abflussbildung wird von FARRENKOPF-HILDEBRANDT nur untergeordnet behandelt. Ergebnisse von Ks-Messungen waren ungeeignet zur flächenhaften Auswertung und wurden „nicht weiter zur Interpretation herangezogen“ (S. 63).

- *Nutzung vegetationskundlicher Untersuchungen zur Identifikation abflusswirksamer Flächen*

Die Vegetation als Indikator für Feuchtflecken wird von FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) nur für die kleinmaßstäbige Erfassung der ökologischen Feuchte genutzt (1 :25.000). Nur kleine Flecken am Hangfuß des unteren Eyachtals, „die sich durch besondere Gräser abheben“ (S. 110), wurden als abflussbildend erkannt.

2.2 Regionalisierung der Abflussbildung

2.2.1 Überblick und Begriffe

Ökotopeausgliederung: Wie am Beispiel der Abflussbildung deutlich wurde, werden Prozesse in der Landschaft durch die Wechselwirkung von Struktureigenschaften (Relief, Klima, Substrat u.a.) gesteuert. Wie jene treten sie in einem regelhaften räumlichen Muster auf. Von jeher ist es das Ziel der Geographie, derartige Muster im Raum aufzudecken und zu beschreiben.

In der Literatur finden sich daher zahlreiche geographische Ansätze zur Ausscheidung von Landschaftseinheiten mit gleichen Struktureigenschaften, deutlich weniger zur Ausscheidung von Prozesseigenschaften. So werden etwa Ökotope als „in sich homogene, aber in Mehrzahl vorhandene Standortseinheiten“ bezeichnet, die „in einer ganz bestimmten Auswahl und in einer charakteristischen Vergesellschaftung“ auftreten (TROLL 1950). Homogen sind Ökotope hinsichtlich der Gesamtheit aller biotischen und abiotischen Geoökofaktoren (LESER 1997).

Zur Ökotopeausgliederung zieht NEEF (1967) die ökologischen Hauptmerkmale Vegetation, Bodentyp und Bodenfeuchteregime heran, da sie bereits das Ergebnis des Zusammenwirkens einer Vielzahl von Faktoren sind. FINKE (1986, 1994) schlägt die Humusform als viertes Hauptmerkmal vor. Topische Informationen werden durch Summierung und Kombination auf die chorische Maßstabsebene übertragen. LESER & KLINK (1988) legen mit der „Kartieranleitung Geoökologische Karte 1:25.000“ (GÖK 25) ein geschlossenes Konzept zur Ausgliederung von Ökotypen vor. Eine Weiterentwicklung erfuhr die Methode v.a. durch MOSIMANN & DUTTMANN (1992) durch vom Wasserhaushalt ausgehende hierarchische Strukturierung, Berücksichtigung lateraler Prozesse und GIS-Einsatz sowie hinsichtlich der Regionalisierung von Bodenfeuchteregimetypen durch ZEPP (1995).

Kritik: Die beschriebenen Ansätze zielen überwiegend auf eine ganzheitliche, physiogeographische Raumgliederung ab. Sie sind zunächst zweckfrei, d.h. nicht auf eine bestimmte Fragestellung hin orientiert. Die verhaltene Akzeptanz oder auch Unkenntnis der genannten Gliederungsansätze in der Planungspraxis (POTSCHIN & HEILAND 2001) geben allerdings

Anlass zur Kritik: Meist ist mit der Erhebung der notwendigen Daten ein hoher zeitlicher Aufwand verbunden. Der Nutzen ganzheitlicher Gliederungsansätze leuchtet umso weniger ein, als in der Planungspraxis meist nur thematische Teilaspekte benötigt werden – z.B. um Fragen des Naturschutzes, der Landwirtschaft oder der Wasserwirtschaft zu beantworten. Daher besteht weniger das Bedürfnis nach einem Universalkonzept als vielmehr nach einer aufgabenorientierten Raumgliederung.

Hydrologische Regionalisierung: Auch für Fragen der Abflussbildung und Hochwasserentstehung ist vorwiegend der wasserhaushaltliche Teilaspekt eines Ökotopts relevant: nämlich das „Hydrotop“ als hydrologisch homogenes Teilgebiet (DYCK & PESCHKE 1995). Die AG Dürreych verwendet diesen Begriff im Sinne von Flächen mit gleichen dominierenden Abflussprozessen, stellt also weniger die strukturelle Homogenität, sondern mehr die Prozessähnlichkeit in den Vordergrund.

Die hydrologisch ausgerichtete Raumgliederung war eine der Hauptaufgaben der Arbeitsgruppen im DFG-Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“ 1992-1998 (KLEEBERG 1992; KLEEBERG et al. 1999a). Die Tatsache, dass die o.g. geographischen Raumgliederungskonzepte von Seiten der Hydrologie praktisch ignoriert wurden, mag auf den „zweckfreien“ Charakter dieser Ansätze zurückzuführen sein, möglicherweise aber auch auf mangelnde interdisziplinäre Kommunikation.

Der Oberbegriff der hydrologischen Regionalisierung umfasst ganz allgemein die regionale Übertragung als flächenhafte Verallgemeinerung hydrologischer Größen. Diese Verallgemeinerung kann von einer Skale zur anderen erfolgen – etwa von der Punktskale zur

Mikroskale bis hin zur Makroskale (vgl. Tab. 3). Sie schließt auch die geographische Übertragung von einem Einzugsgebiet auf ein anderes ein. Übertragen werden Berechnungsvorschriften, Modellparameter und Zustandsgrößen (KLEEBERG 1999:4).

Tab. 3: Skalenbereiche in der Hydrologie (KLEEBERG 1999:6)

	Mikroskale	Mesoskale	Makroskale
Längen [km]	< 0,1	0,1...10	> 10
Flächen [km ²]	< 0,01	0,01...100	> 100

Skalenabhängigkeit und Modellierung: Ein Skalenwechsel in der Regionalisierung ist meist nicht einfach durch proportionale Vergrößerung oder Verkleinerung zu erzielen. Die Transformation erfordert meist auch einen Wechsel von Methoden und Parametern. Eine geschlossene Theorie zur Skalentransformation existiert bisher nicht (PESCHKE 1999). Die Schwierigkeiten zeigen sich besonders deutlich bei Simulationsmodellen, die immer mehr für Szenarien und Prognosen künftiger Umweltzustände herangezogen werden: Während in der kleinen Skale oft detaillierte, physikalisch begründete Modelle genutzt werden, erhalten in größeren Skalen Block- oder Systemmodelle den Vorrang – kurz: je größer die Skale, um so einfacher das Modell (KLEEBERG 1999). Dies hat z.T. pragmatische, aber auch systemeigene Gründe:

- Physikalische Modelle haben einen immensen Bedarf nach räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Daten, der in größeren Skalen nicht mehr befriedigt werden kann.
- Je nach Skale dominieren unterschiedliche Prozesse (z.B. am Punkt: Sickervorgänge, im Einzugsgebiet: Transportprozesse im Bachbett).

Für Prognosen werden prozessorientierte Modelle bevorzugt, die das Realsystem verein-

facht abbilden. Diese verlangen bereits eine aufwändige räumliche Diskretisierung und zahlreiche Parameter. Zur Modellkalibrierung steht dagegen oft nur die Abflussganglinie des Gesamteinzugsgebiets zur Verfügung. Infolge der vielen Freiheitsgrade derartiger Modelle ist es möglich, fast jede gemessene Ganglinie mit einem entsprechenden Parametersatz anzupassen. PESCHKE (1999:16) umreißt diesen Problemkreis mit dem Begriff der „Überparametrisierung“. Modellreduktion tut daher Not. KLEEBERG (1999:8) fordert daher:

- „Effektive, das heißt reduzierte (vereinfachte) Modelle und
- Effektive Parameter für diese Modelle.“

Effektive Parameter beschreiben integrierend die Flächenvariabilität der hydrologischen Charakteristika (Relief, Bodeneigenschaften, Nutzung u.a.). Sie müssen der gewählten Skala und dem gewählten Modell angemessen sein. KLEEBERG bricht eine Lanze für diesen neuen, den „funktionalen“ Modelltyp (S. 9):

„Mit der Modellreduktion wird die Ebene der mechanistischen Modelle verlassen. Wir haben es dann mit funktionalen Modellen zu tun. Das ist nicht nachteilig, im Gegenteil, nur so ist es heute möglich, im mesoskaligen oder makroskaligen Bereich zu simulieren.“

Funktionale Simulationsmodelle verlangen ein sorgfältiges räumliches Preprocessing: Die Ausgliederung homogener Einheiten, für die effektive Parameter als gültig anzunehmen sind und aus denen in einem weiteren Schritt hydrologische Prozesseinheiten – Hydrotöpfe – gebildet werden können.

2.2.2 Verschneidung von Informationsebenen mittels GIS

Die Ausgliederung von Struktur- oder Prozesseinheiten wird gegenwärtig mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (GIS) bewältigt: Fast immer werden im ersten Schritt die in digitale Form gebrachten Strukturinformationen

wie Boden-, Reliefeigenschaften, Landnutzung u.a. miteinander verschnitten. Dabei entstehen zahlreiche kleinste gemeinsame Geometrien, die jeweils die gleiche Kombination von Struktureigenschaften aufweisen. Während dieser erste Schritt methodisch sehr einheitlich gehandhabt wird, so fehlt für den zweiten Schritt – die Aggregation der kleinsten gemeinsamen Geometrien und die Zuordnung von Abflussprozessen zu diesen Aggregaten – ein allgemeingültiges Konzept. Beispiele für Problemlösungen, die z.T. kombiniert werden sind:

- Zuweisung fester Parameterwerte oder ihrer Verteilungsfunktionen, ggf. mit statistischen Angaben zur Variabilität
- Mathematisch-statistische Verfahren wie Clusteranalysen simulierter Wasserflüsse (DIEKKRÜGER et al. 1999a); Simple scaling und reskaliertes simple scaling (KLEEBERG et al. 1999b); Aggregation unter Berücksichtigung stochastischer Unsicherheiten (PLATE et al. 1999a)
- Flächenklassifikation mit Hilfe wissensbasierter Systeme (PESCHKE et al. 1999a)

Wie schon für die Modelle festgestellt wurde, gilt auch für diese Verfahren: Je größer die Skala, umso einfacher ist i.d.R. der verwendete Aggregierungsalgorithmus. So werden für ein makroskaliges Einzugsgebiet von 1157 km² lediglich die Landnutzung, wenige Reliefklassen und der klassifizierte Grundwasserflurabstand aggregiert (BECKER & LAHMER 1999). Das wissensbasierte System FLAB (PESCHKE et al. 1999a; PESCHKE et al. 1999b), das in einem kleinen mesoskaligen Einzugsgebiet (4,6 km²) entwickelt wurde, berücksichtigt dagegen zahlreiche Parameter in einem verzweigten Entscheidungsalgorithmus.

In kleineren Skalen dominieren wieder physikalische Ansätze die mit mathematisch-statistischen Verfahren gekoppelt werden.

Die Flächenklassifikation durch wissenschaftliche Systeme fällt als Aggregierungsmethode etwas aus dem Rahmen: Hier ist nicht die Simulation der Abflussganglinie das Hauptziel, sondern die sorgfältige Gliederung des Einzugsgebiets in Räume mit gleichen dominanten Abflussprozessen. Dabei kann auch unscharfes Erfahrungswissen über die individuellen Bedingungen im Einzugsgebiet in die Klassifikation mit einfließen.

2.2.3 Digitale Höhenmodelle (DHM) und Feuchte-Indizes

Der Einsatz von Digitalen Höhenmodellen (DHM) ist neben der Verschneidung von Struktureigenschaften gängige Praxis in der hydrologischen Raumgliederung. Dabei wird unterstellt, dass das Relief einen gewichtigen, ja vielleicht den entscheidenden Einfluss auf Abflussprozesse hat. Einige Forschergruppen stellen daher die Analyse des Reliefs auch in den Vordergrund. Zahlreiche aus DHM ableitbare Reliefparameter sind beschrieben worden (SCHMIDT & DIKAU 1999). Zu den einfachen Reliefparametern gehören z.B. Neigung, Wölbung, Fließrichtung u.a. Komplexe Reliefparameter sind z.B. Beitragsfläche, Hangposition etc.

Topographischer Index: Zu den komplexen Reliefparametern gehört auch der durch Digitale Höhenmodelle (DHM) recht populär gewordene Topographische Index. Dabei handelt es sich um einen einfachen, aber wirkungsvollen Ansatz zur Prognose von Flächen mit hoher Bodenfeuchte bzw. Bereitschaft zum Sättigungsflächenabfluss. Eingeführt von BEVEN & KIRKBY (1979) wurde das Verfahren seither vielfach angewendet und weiterentwickelt. Auf Grundlage des DHM wird auf Rasterbasis die lokale Einzugsgebietsgröße A je

der Rasterzelle mit der Hangneigung β und der Transmissivität T der Zelle verrechnet:

$$c_s = \ln \frac{A}{T \tan \beta} \quad (\text{Gl. 3})$$

A Spezifische Einzugsgebietsgröße pro Längeneinheit einer Rasterzelle [$\text{m}^2 \text{m}^{-1}$]

T Transmissivität [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] (Integral der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten K_s über die Mächtigkeit h : $T = \int K_s dh$). In der Praxis oft rechnerisch vernachlässigt und gleich 1 gesetzt.

β Hangneigung [$^\circ$]

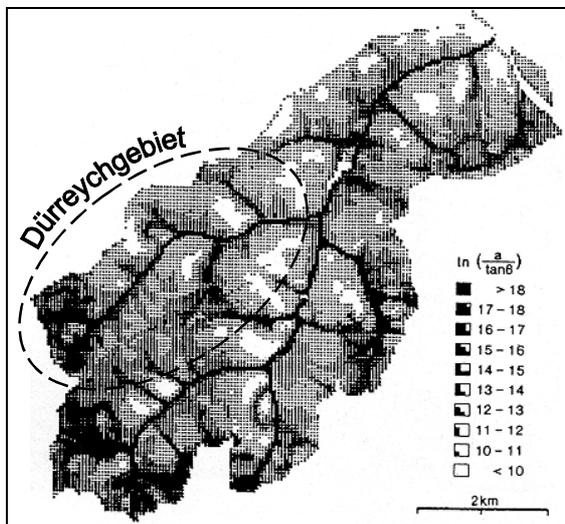
Hohe Indexwerte und damit eine hohe Wahrscheinlichkeit für Sättigung des Bodens ergeben sich folglich für Flächen mit großem lokalen Einzugsgebiet, geringer Hangneigung und geringer Transmissivität, wie sie etwa Mulden oder flache Talböden mit schlechten Sickereigenschaften aufweisen. Wichtige Annahmen des Konzeptes sind:

- Das Bodenprofil ist unten begrenzt, d.h. $K_s \rightarrow 0$.
- Der Grund-/Stauwasserspiegel verläuft parallel zur Oberflächentopographie.
- Bei Sättigung stellt sich ein quasistationärer Zustand ein.

Der Topographische Index und seine Weiterentwicklungen sind heute fester Bestandteil von verbreiteten Modellen wie TOPMODEL (BEVEN et al. 1995) und dessen Derivaten. Viele Untersuchungen dokumentieren die Wirksamkeit aber auch Schwächen des Konzeptes, wie BONELL (1998) schildert: Probleme bereiten Unterschiede zwischen oberflächlicher Topographie und Topographie des Stauers, die Auflösung des verwendeten Höhenmodells, inhomogene Böden, Makroporenflüsse u.a. – kurz: die Homogenitätsannahmen reichen oft nicht aus, um die Bildung von Sättigungsflächen zu erklären.

Auch im Schwarzwald wurde das Konzept des Topographischen Index angewandt: GÜNTNER (1997) testete TOPMODEL im Südschwarzwald (Brugga-Einzugsgebiet) und verglich die vom Modell vorhergesagten Sättigungsflächen mit bodenkundlichen und geobotanischen Kartierungen. Die Übereinstimmung war „eher gering“; das Modell erschien hier „insgesamt nicht geeignet“ für prozessorientierte Fragestellungen.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Regionalisierung in der Hydrologie“ (KLEEBERG 1992, KLEEBERG et al. 1999a) wurden von der Arbeitsgruppe DIKAU et al. Untersuchungen im dem Dürreychgebiet übergeordneten Eyachtal durchgeführt. DIKAU (1994) verwendet den Topographischen Index auf Basis eines Digitalen Höhenmodells mit 50 m-Raster, um abflusswirksame Flächen ausfindig zu machen (Abb. 13).



Die Kartendarstellung ist – wie alle nachfolgenden Karten der vorliegenden Arbeit – nach Norden orientiert.

Abb. 13: Topographischer Index $In(a/\tan\beta)$ als Maß für die Abflusswirksamkeit von Flächen im Einzugsgebiet der Eyach. Dunkle Flächen zeigen potenziell hohe Abflusswirksamkeit (DIKAU 1994, ergänzt).

Wie aus Abb. 13 ersichtlich, finden sich hohe Werte – abgesehen von den Tiefenlinien – in

den oberen wasserscheidennahen Bereichen; also auch im oberen Teil des Dürreychgebiets. Die hier liegenden Hochmoorareale, die für die Abflussbildung „nicht unerheblich“ sind (DIKAU, 1994:110), unterscheiden sich signifikant von Talseitenhängen mit geringerer Abflussbildung. FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) geht der Beziehung zwischen verschiedenen Reliefparametern und Direktabfluss im Eyachgebiet weiter nach. Untersuchungsgrundlagen sind das DHM, deskriptive Statistik von Niederschlag-Abfluss-Daten (1975-1985) und Kartierungen von Relief, Substrat, Feuchte und Gewässernetz.

Zur Identifikation abflusswirksamer Flächen aus dem Digitalen Höhenmodell stellte FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) ein Regelwerk zusammen, das Wölbungs-, und Hangpositionsparameter sowie den Topographischen Index einschließt (Abb. 14).

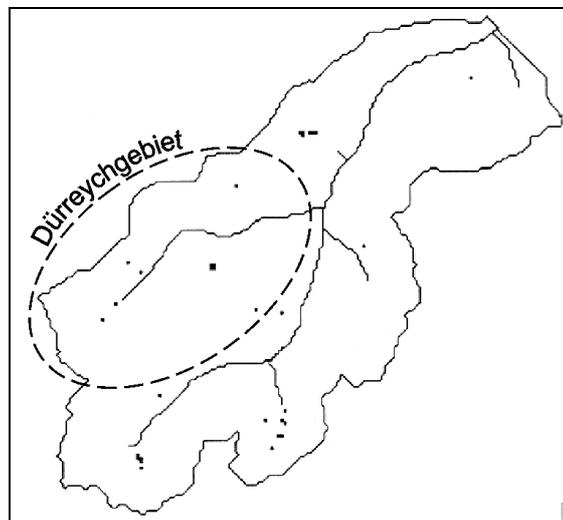


Abb. 14: Selektion von Formelementen und abflusswirksamen Flächen im Eyachgebiet. Schwarze Pixel: Horizontal und vertikal konkav, $In(a/\tan\beta) > 9$, Tiefenlinie ausmaskiert (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996, ergänzt)

Abb. 14 zeigt die als abflusswirksam identifizierten Flächen im Einzugsgebiet der Eyach. Die wenigen Flächen stimmen etwa mit der

Lage ständig abflusswirksamer Flächen überein.

Kritik: Der Vergleich mit Abb. 13 legt nahe, dass hier zu strenge Selektionskriterien angelegt wurden. Die bei erhöhter Vorsättigung des Eyachgebiets zusätzlich abflusswirksamen Flächen werden zwar im Rahmen der Prozessuntersuchungen von FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) erkannt (Kap. 2.1.5), sie werden jedoch bei der o.g. Selektion nicht abgebildet. Dies resultiert vor allem aus der Überbetonung des Kriteriums ‚Konkave Wölbung‘, das für die Identifizierung von abflusswirksamen Flächen kein unbedingtes Kriterium darstellt: Naturräumlich bedingt treten im Nordschwarzwald auch in den ebenen bis schwach konvexen Hochlagen abflusswirksame Feuchflächen auf, die sogenannten Misen (→Glossar).

Die folgende Überlegung zeigt, dass die Topographischen Indizes für derartige Sonderstandorte systematisch zu klein sein müssen, um die Realität abzubilden: Aufgrund ihrer Nähe zur Einzugsgebietsgrenze werden auf den flachen und oft schmalen Höhenrücken oft nur geringe lokale Einzugsgebietsgrößen und damit kleinere Indexwerte erreicht. Darüber hinaus ist die vom Topographischen Index implizierte Vorstellung, dass sich Sättigungsflächen von einer Talaue oder Mulde ausgehend auf angrenzende Hänge ausdehnen, unter den gegebenen Reliefverhältnissen (Talaue, steile Talhänge und Hochflächen) nur bedingt zu vertreten. Vielmehr ist ein „Überlaufen“ der feuchten Hochflächen und damit eine Ausdehnung von oben nach unten zu vermuten.

2.2.4 Die Forstliche Standortskarte (FSK)

Bodenkarten, Geologische Karten, Landnutzungskartierungen etc. haben sich seit langem

für die Ableitung hydrologischer Gebietseigenschaften etabliert. Die Forstliche Standortskarte (FSK) dagegen ist eine bislang wenig beachtete Quelle hydrologischer Informationen, deren komplexe Aussagen zum Standortwasserhaushalt z.T. deutlich über die summarische Kombination von Einzelkarten hinausgehen. Durch Zusammenschau von zahlreichen Merkmalen aus den Bereichen Klima, Lage und Relief, Vegetation und Böden können ökologisch hinreichend einheitliche Standortstypen im Gelände abgegrenzt werden (AK STANDORTSKARTIERUNG, 1996:16). Eine Übersicht des in Baden-Württemberg üblichen zweistufigen Kartierverfahrens zeigt Abb. 15.

In der Literatur finden sich bisher nur wenige Ansätze, die das hydrologische Informationspotenzial der FSK nutzen. In der Regel werden forstliche Standortskartierungen lediglich als Ersatz für fehlende großmaßstäbige Bodeninformationen herangezogen, die oft genug nur für landwirtschaftlich genutzte Gebiete vorliegen. Den Anstoß für diese Bemühungen gibt häufig der enorme Datenbedarf von Wasser- und Stoffhaushaltsmodellen.

Im Bodeninformationssystem NIBIS werden die forstlichen Standortstypenkarten des Landes Niedersachsen digital vorgehalten. Dies ermöglicht die GIS-gestützte Ableitung einer ganzen Reihe von Bodeninformationen sowie Auswertungen mit einfachen Modellen wie etwa zur Gewässerversauerung (NLF, 1996). Diese Datenbasis ist grundsätzlich auch für Auswertungen zur Abflussbildung geeignet.

LANGBEIN & MÜLLER (1986) stellen hydropedologische Forstkartiermethoden im Rahmen des Schönbuch-Projektes vor, um Fragen des Bodenwasserhaushaltes – insbesondere hinsichtlich der Bildung von Oberflächenabfluss – zu beantworten. Sie verwenden dazu als Basis

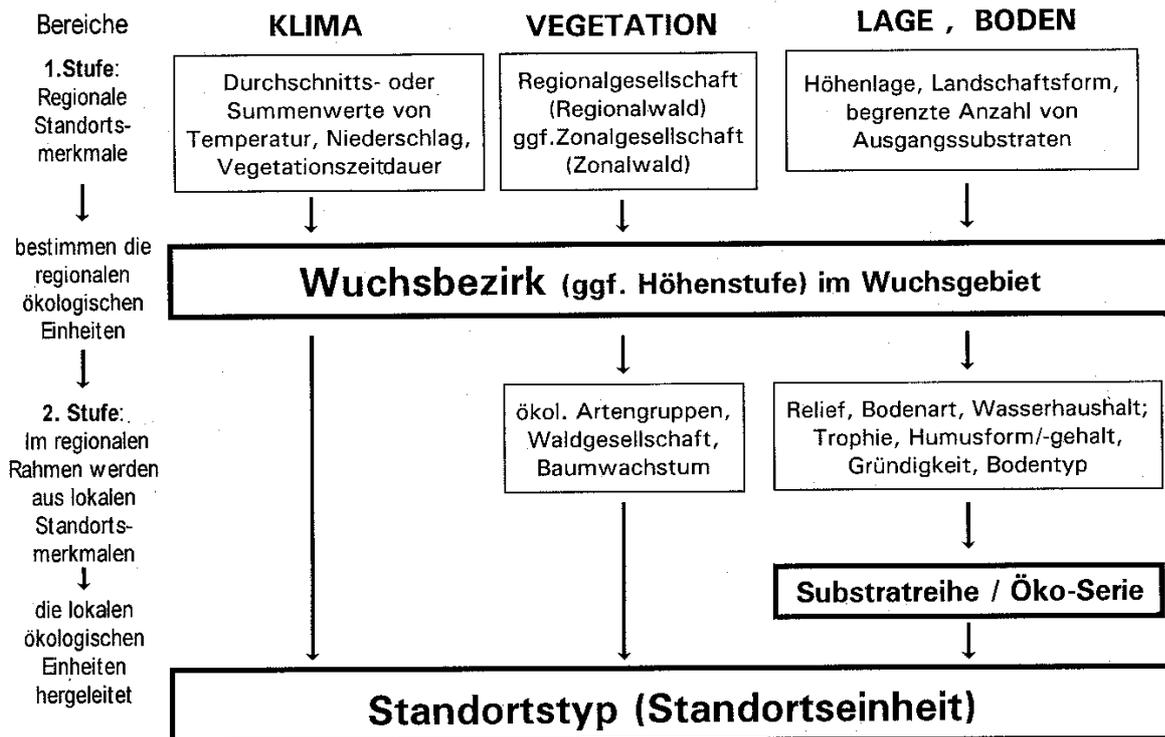


Abb. 15: Standortkartierung in Baden-Württemberg – zweistufiges Verfahren (AK STANDORTSKARTIERUNG, 1996:242)

die Forstliche Standortkarte und gehen aus von den Ökoserien als Kombination von Substrattyp und Wasserhaushalt, wobei die Ökoserien stets eine Spanne bodengenestischer Typen enthalten. Innerhalb der Bodenformen grenzen die Autoren vernässende und nicht vernässende Kartiereinheiten gegeneinander ab. So entsteht die pedohydrologische Grundkarte. Auf dieser Grundlage werden die Wasserdurchlässigkeit und die Feldkapazität in fünf Stufen nach AG BODEN (1982) geschätzt. Um die Ergebnisse mit hydrologischen Messungen zu vergleichen wurde für die Schätzeinheiten ein hektarbezogener Mittelwert ermittelt. Die so entstandenen Gebietskennwerte wurden mit Wasserhaushaltgrößen korreliert (AGSTER, 1986).

Auch im Eyachtal – dem übergeordneten Einzugsgebiet des Dürreychbachs – kam die Forstliche Standortkartierung bereits zum Einsatz, um die Identifikation abflusswirksamer

Flächen zu belegen. Auf Grundlage der Ökologischen Artengruppen wurde eine Karte der Ökologischen Feuchtegrade erstellt und mit den Ergebnissen einer Relieffanalyse verglichen. Die FSK dient hier jedoch lediglich zur Plausibilitätskontrolle einer ansonsten rein morphographischen Strategie und wird nicht wie bei LANGBEIN & MÜLLER (1986) in das Identifikationskonzept einbezogen.

2.2.5 Forschungsbedarf

Grundsätzliches: Die Ausführungen haben eine Reihe von allgemeinen Forschungsdesideraten aufgezeigt:

- *Der Überparametrisierung muss mit vereinfachten Modellen und effektiven Parametern begegnet werden.*

There is "...a need to search for phenomenological relationships or 'processes' at the catchment scale that can be linked to simple models with a minimum number of parameters, so that they are of more use to decision makers" (BONELL 1998:766).

Es ist demnach erforderlich nach phänomenologischen Beziehungen oder (übergeordneten) „Prozessen“ auf der Einzugsgebietskale zu suchen und sie an einfache Modelle mit einem minimalen Parametersatz zu koppeln. Nur so können sie Entscheidungsträgern zum größeren Nutzen gereichen.

- *Die Aggregation und Übersetzung von Struktur- zu Prozesseinheiten ist nach wie vor problematisch.*

UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997b:46) leiten aus ihrer umfangreichen Literaturstudie zur Abflussbildung den Bedarf nach einem Konzeptmodell ab. Dieses sollte

„...beispielsweise in Form eines Entscheidungsbaumes (unter Berücksichtigung physiogeographischer Merkmale) auf den jeweils dominanten Abflussbildungsprozess schließen lassen.“

„...Hierfür ist noch Grundlagenforschung bezüglich der Abflussbildungsprozesse notwendig, um eine GIS-gestützte Ausweisung von Flächen vorzunehmen, bei denen ein Hochwasserentstehungsprozess dominiert.“ (S. 64)

Gleichwohl wurden etwa von Peschke et al. (1999b) bereits derartige Konzeptmodelle entwickelt und erfolgreich angewendet. Konzeptuelle Abflussprozess-Beurteilungsschemata zur Bestimmung hochwasserrelevanter Flächen im Gelände (IHW 2000) haben bereits erste Anwendungen in der wasserwirtschaftlichen Praxis gefunden. Für Waldflächen steht ein entsprechender Bestimmungsschlüssel jedoch noch nicht zur Verfügung.

- *Die FSK wird bisher kaum für hydrologische Fragestellungen genutzt.*

Die Untersuchungen von LANGBEIN & MÜLLER (1986) zeigen, dass die FSK Potenziale für die hydrologische Regionalisierung hat.

Offene Fragen im Untersuchungsraum: Die Regionalisierungsansätze von FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) für das Eyachtal bieten eine Reihe von speziellen Anknüpfungspunkten:

- *Der Gliederungsansatz erfasst die Sättigungsflächen der Hochlagen nicht ausreichend.*

- *Für die Lokalisierung von Flächen mit Zwischenabfluss liegt bisher kein Konzept vor.*

Die Bedeutung des Sättigungsabflusses von den feuchten Hochlagen und des Zwischenabflusses von den steilen Hängen wurde bereits hervorgehoben.

- *Die morphographische Ausgliederungsstrategie sollte durch bodenkundliche / substratbezogene Kriterien ergänzt werden.*

Insbesondere bodenkundliche Kenngrößen sollten in ein Ausgliederungskonzept aktiv einbezogen werden. FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996:217) empfiehlt, „in fortführenden Arbeiten die ermittelten Reliefparameter in Bezug zu den Eigenschaften oberflächennaher Substrate, v.a. der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit“ zu setzen.

- *Die Informationen der FSK werden nicht aktiv ins Regionalisierungskonzept einbezogen.*

Die FSK dient lediglich zur Validierung von Ausgliederungsergebnissen. Der Informationsgehalt für die Regionalisierung wird nicht ausgeschöpft.

- *Das DHM ist für prozessbezogene Untersuchungen zu grob gerastert.*

FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) führte Reliefanalysen auf Grundlage eines nicht vegetationsbereinigten 50 m-Rasters durch. Durch höhere DHM-Auflösung sind bessere Vergleichsmöglichkeiten mit Prozessbeobachtungen zu erwarten.

3 Untersuchungskonzept

Aus dem Stand der Forschung zur Abflussbildung (Kap. 2.1) und deren Regionalisierung (Kap. 2.2) wurde eine Reihe von Punkten zum grundsätzlichen und zum speziellen Forschungsbedarf abgeleitet. Die folgenden Arbeitsziele bilden die thematische Klammer für die Untersuchungen im Dürreychgebiet:

- Identifikation hochwasserrelevanter Abflussprozesse im Dürreychgebiet und deren Bedingtheit durch die Gebietseigenschaften
- Entwicklung eines Regionalisierungskonzepts zur Gliederung des Dürreychgebiets in Flächen gleicher Abflussbildung (Hydrotypen)

3.1 Gebietsuntersuchungen auf verschiedenen Skalen

Skalen: Die Abflussmessungen am Gebietsauslass des Dürreychtals geben zwar Aufschluss über die Abflusscharakteristik des 7 km² großen Einzugsgebiets, jedoch im Sinne einer integralen „Black-Box“-Information. Erst durch Verfeinerung der räumlichen und zeitlichen Untersuchungsskale lassen sich die komplexen Transformationsprozesse im Einzugsgebiet weiter differenzieren. Dazu kommt je nach Fragestellung eine angepasste Kombination von Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Die räumliche Spanne reicht dabei von der Mesoskale bis in den untersten Bereich der Mikroskale (Abb 16). Die betrachtete Zeitskale reicht vom jahreszeitlich bedingten Langzeitverhalten bis hin zur Ereignisskale mit Zeitschritten von einer Stunde.

Vorgehensweise: Das 7 km² große Dürreychgebiet wird zunächst in mehrere Teileinzugsgebiete aufgeteilt (Anhang 1-2). Dadurch wird

die Abflussinformation des Hauptpegels in kleinere Kompartimente zergliedert.

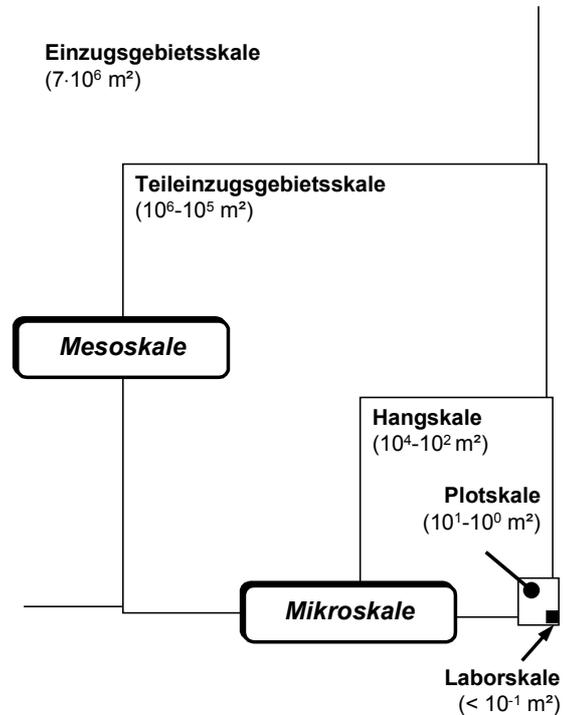


Abb. 16: Größenordnungen der räumlichen Untersuchungsskalen im 7 km² großen Dürreychgebiet (schematisch)

Zur Untersuchung der Einzugsgebiete dienen:

- Abflussmessungen
- Hydrochemische Parameter wie pH-Wert, Leitfähigkeit, Temperatur, DOC, ¹⁸O u.a.

Die hydrologischen und hydrochemischen Messungen in den Teileinzugsgebieten wurden von der AG Dürreych gemeinsam erhoben und schwerpunktmäßig von VOLKMANN 2002, CASPER 2002 und ABERLE 2000 bearbeitet. Die Ergebnisse werden in der gemeinsamen Datenbank der AG Dürreych vorgehalten und im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Überprüfung von Regionalisierungsansätzen und Prozessstudien genutzt.

Da Abflussbildungsprozesse auf der Hang-/Plotskale oft nicht direkt beobachtbar sind, werden ersatzweise die abflusssteuernden

Gebietsstrukturen sowie Indikatoren untersucht. Tab. 4 verdeutlicht die Begriffe „Struktur, Prozess und Indikator“ an zwei Beispielen.

Tab. 4: Zusammenhang von Strukturen, Prozessen und Indikatoren

Strukturen (S) →	Prozesse (P)	→Indikatoren (I)
Stauhorizont + Flachlage	Sättigungsabfluss	Feuchtezeiger
Stauhorizont + Steillage	Zwischenabfluss	Hangrutschung

Je nach Untersuchungsziel wird eine bedarfsgerechte Kombination von Untersuchungsmethoden gewählt. Tab. 5 zeigt eine Übersicht der verwendeten Methoden.

Tab. 5: Untersuchung von Strukturen (S), Prozessen (P) und Indikatoren (I) im Dürreychgebiet auf verschiedenen Skalen und ihre Aussagekraft für Flächen mit Zwischen- und Sättigungsflächenabfluss

Skale	Art der Untersuchungen	Zwischenabfluss	Sättigungsabfluss
Hang / Teileinzugsgebiet	Abflussmessungen	P	P
	Hydrochemische Messungen	I	I
	Erosionskartierung auf Forstwegen	I	I
	Hangrutschungen	I	-
	Kartierung von Feuchtezeigern	I	I
	Kartierung von Hangwasseraustritten	I	-
	Refraktionsseismische Profile	S	S
	Landsat TM-Feuchteklassifikation	-	I
	Feuchte-Indizes (DHM)	I	I
Plot	Bodenprofilaufnahme	S	S
	Messungen zum Bodenwasserhaushalt	P	P
	Bodenfeuchtesimulation (CATFLOW)	(P)	(P)
Labor	Korngrößenanalyse, Humusgehalt	S	S
	Dünnschliffuntersuchungen	S	S

Schließlich kommt das physikalisch basierte N-A-Modell CATFLOW als Validierungsinstrument zum Einsatz. CASPER (2002) legt hierzu

sowie zu zwei weiteren Simulationsmodellen weitergehende Untersuchungen vor.

Gemeinsames Ziel der Untersuchungen ist, die hydrologische Reaktion von Teileinzugsgebieten, Hängen oder Kleinstandorten durch das jeweilige Zusammenspiel ihrer verschiedenen Standortseigenschaften zu erklären. Dazu müssen die Anteile der Hydrotope sowie ihre laterale Verknüpfung ermittelt werden. Diese Aufgabe wird mit einem für das Dürreychgebiet angepassten Regionalisierungskonzept bearbeitet.

3.2 Regionalisierung auf Basis von FSK und DHM

Konzept: Das Regionalisierungskonzept basiert auf der Forstlichen Standortskarte (FSK) und dem Digitalen Höhenmodell (DHM). Mit der Nutzung der FSK werden die typischen Probleme umgangen, die bei der gängigen Verschneidung von thematischen Karten zu kleinsten gemeinsamen Geometrien und ihrer Aggregation auftreten (Kap. 2.2.2). An die Stelle eines Aggregats einzelner Strukturmerkmale tritt die prozessnähere, im Gelände synthetisierte Forstliche Standortseinheit. Sie dient als geometrischer Grundbaustein für die direkte Zuordnung von Hydrotopotypen sowie für die Berechnung von Feuchteindizes in Verbindung mit dem DHM.

Vorgehensweise: Zunächst werden auf Basis der naturräumlichen Ausstattung, des Literaturwissens und erster Voruntersuchungen Hypothesen zur Abflussbildung und deren räumlicher Verteilung im Dürreychgebiet formuliert (Kap. 5). Wichtigste Kartengrundlage ist dabei die FSK. Für ihre Legendeninhalte wird ein Regelwerk entwickelt, das den Forstlichen Standortseinheiten Hydrotopotypen zuordnet. Die sich ergebende Hydrotopklassifikation

ist statisch und gibt das im Mittel dominierende Abflussverhalten der Flächen wieder.

Das Digitale Höhenmodell gestattet es darüber hinaus, den Prozess der Fließakkumulation und damit laterale Verknüpfungen der Hydrotope dynamisch abzubilden:

- Mit Hilfe der aus der FSK abgeleiteten Ökologischen Feuchte wird ein Gewichteter Topographischer Index berechnet. Dieser soll die Bildung von Sättigungsabfluss auf den feuchten Hochflächen realistischer abbilden, als der herkömmliche Topographische Index. Durch einen einfachen Berechnungsansatz können zudem unterschiedlich feuchte Gebietszustände simuliert werden.
- Zur Modellierung der potenziellen Zwischenabflussintensität wird ein Interflow-Index entwickelt, der bodenkundliche Informationen aus der FSK verwendet.
- Der Gewichtete Topographische Index und der Interflow-Index können zu einem kombinierten Index integriert werden.

Die FSK hat mithin als Regionalisierungsgrundlage eine zentrale Bedeutung. Um die Verlässlichkeit der Ergebnisse abzuschätzen,

wird daher ihre Qualität durch bodenkundliche Untersuchungen überprüft.

3.3 Validierung

Im Validierungsschritt werden Gelände- und Laborbefunde sowie Simulationsergebnisse dazu herangezogen, um die regionalisierten Prozesse mit der Realität zu vergleichen (Abb. 17). Dies geschieht sowohl qualitativ-beschreibend, als auch durch meist GIS-gestützte statistische Auswertung. Der Vergleich von Regionalisierungsergebnissen und Struktur-/Prozessuntersuchungen auf verschiedenen Skalen bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Die Ergebnisse werden, gegliedert nach den fünf übergeordneten Hydrotopen, synoptisch zusammengeführt:

- Flächen mit Horton'schem Oberflächenabfluss
- Vorfluternahe Beitragsflächen
- Sonstige Feucht- und Sättigungsflächen
- Flächen mit Zwischenabfluss
- Flächen mit Infiltration

Abb. 17 zeigt abschließend die Vorgehensweise im schematischem Überblick.

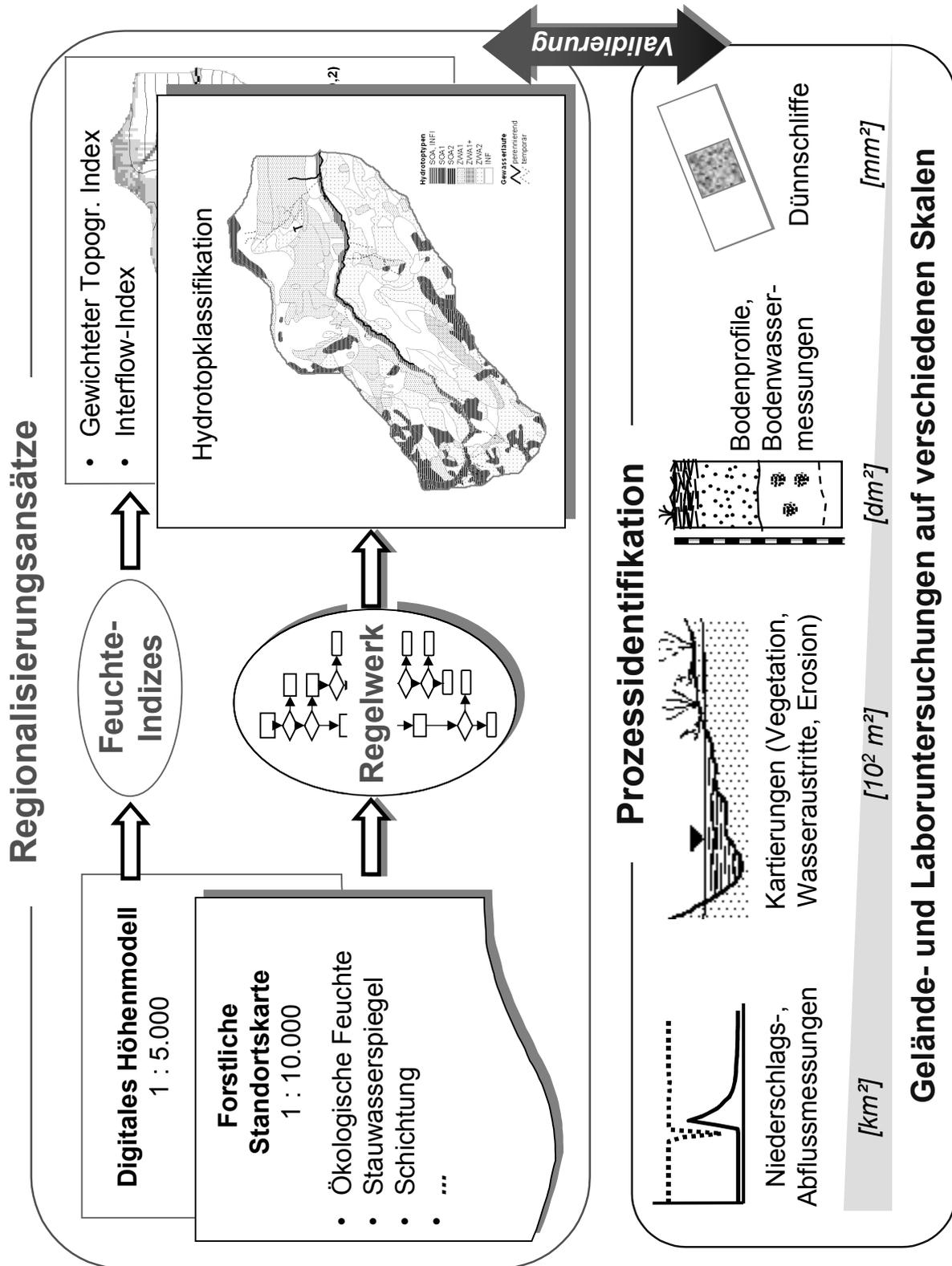


Abb. 17: Untersuchungskonzept zur Abflussbildung und Regionalisierung im Dürreychgebiet

4 Naturräumliche Ausstattung

Abflussbildungsprozesse resultieren aus dem komplexen Wechselspiel der naturräumlichen Eigenschaften des Einzugsgebietes. Diese Gebietseigenschaften werden im folgenden vorgestellt, soweit sie für die Fragestellung wichtig erscheinen. Am Ende des Kapitels werden die grundsätzlichen Implikationen der Gebietseigenschaften für die Abflussbildung abgeleitet.

4.1 Überblick

Das Einzugsgebiet des Dürreychbachs ist Teil des Nordschwarzwaldes und liegt südlich von Bad Herrenalb und westlich Wildbad (Abb. 18). Das Gebiet zählt zum Naturraum „Enzhöhen“

(INST. F. LANDESKUNDE 1967) und liegt mit dem größten Teil seiner Fläche in der Untereinheit „Enzriedel“ (151.10), einer durch tiefe Kerbtäler in langgezogene, bewaldete Buntsandsteinriedel aufgelösten Hochfläche.

Der Bauplan dieses Naturraums ist im Dürreychgebiet mustergültig repräsentiert: Das im Oberlauf sohlenlose Kerbtal des Dürreychbachs öffnet sich nach Nordosten und wird von weitgespannten, leicht nach Osten abdachenden Höhenzügen des Hauptkonglomerats (Mittlerer Buntsandstein) umrahmt. Unterhalb der Hochflächen setzen die steilen, oft von Blockhalden bedeckten Talhänge im Hauptbuntsandstein ein.

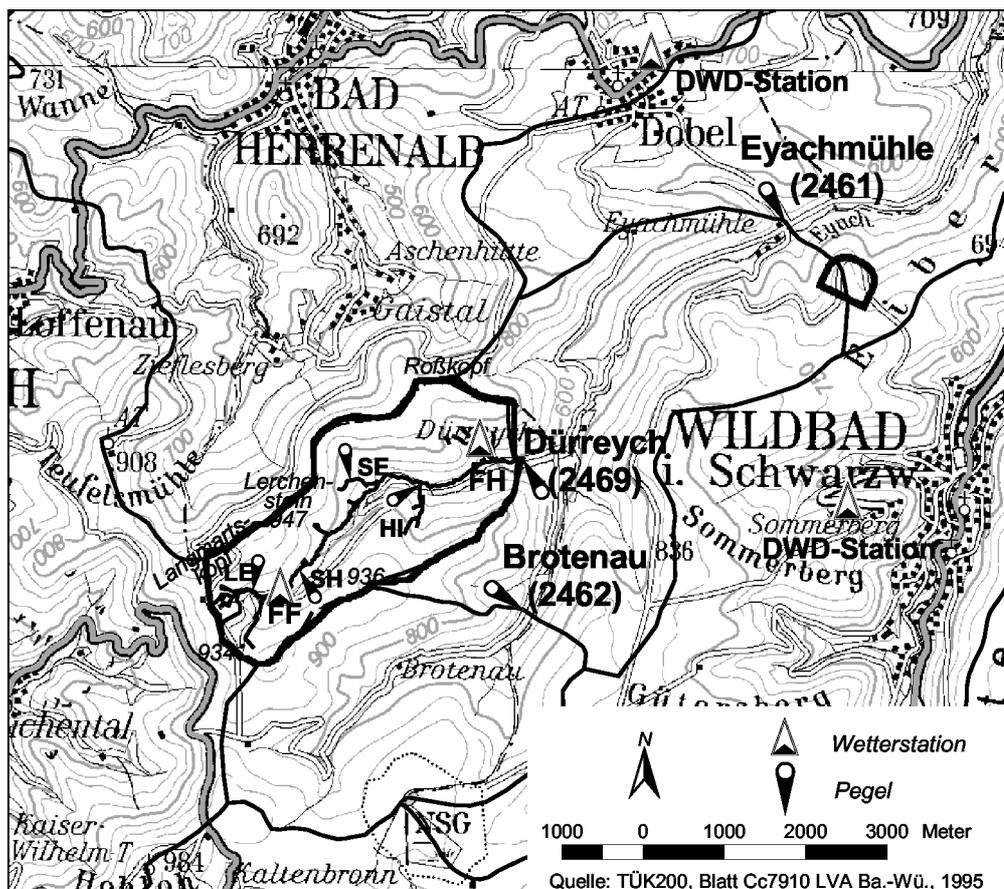


Abb. 18: Lage des Dürreychgebiets, Einzugsgebietsgrenzen, Pegelmessstellen (mit Nummerierung: Pegel des Messnetzes Baden-Württemberg) und Wetterstationen des DWD

Örtlich sind in die Hochflächen steilwandige Kare oder Karnischen mit z.T. vermoorten Karböden eingesenkt. Die naturräumliche Untereinheit Enzmissen (151.11) schließt hufeisenförmig die westlichen, abflussträgen Hochflächen des Einzugsgebietes ein. Sie zeichnet sich durch ausgeprägte Vermoorung mit Ausbildung sog. „Missen“ (von Moos) aus. Der Roßkopf an der Nordspitze des Einzugsgebietes zählt naturräumlich bereits zur Untereinheit „Herrenalber Berge“ (151.12).

Der Dürreychbach gehört zum Einzugsgebiet des Neckars: Im Bereich der „Großen Wiese“, einem Schwemmfächer unterhalb des Pegels Dürreych, vereinigt er sich mit dem benachbarten Brotenaubach zur Eyach, deren Wasser später als Enz zum Neckar fließt. Die nordwestliche Begrenzung des Einzugsgebietes entlang der Kammlinie Langmartskopf – Roßkopf bildet die Wasserscheide zur Alb, die direkt dem Rhein zufließt. Hier findet sich auch der Lerchenstein, die mit 947 m NN höchste Erhebung des Einzugsgebietes. Die niedrigste Geländehöhe wird am Gebietsauslass beim Pegel Dürreych mit 588 m NN erreicht.

4.2 Witterung und Klima

Die Enzhöhen gehören zu den niederschlags- und schneereichsten Teilen des Schwarzwaldes. Trotz ihrer Lage im Regenschatten des westlichen Schwarzwaldanstiegs werden an ihrem Ostrand noch Jahresniederschlagshöhen um 1400 mm erreicht. Die Temperaturen liegen im Jahresdurchschnitt zwischen 6,5 und 7°C (INST. F. LANDESKUNDE 1967) mit einem mittleren Temperaturunterschied von ca. 16°C zwischen Januar und Juli (Bad Wildbad). Die Täler sind wärmebegünstigt und entsprechend der Höhenabhängigkeit des Niederschlags regenärmer. Folgende ausgewählte Daten kön-

nen für den weiteren Untersuchungsraum gelten:

Tab. 6: Mittlere Jahresniederschläge benachbarter Messstationen (Quellen: GRAßMANN 1996, DWD)

Messstation	Messzeitraum	mittlerer Niederschlag [mm/a]
Kaltenbronn (858 m NN)	1931-1960	1546
Dobel, DWD (689 m NN)	1976-1995	1588
Bad Wildbad, DWD (731 m NN)	1976-1995	1472

Entsprechend der Höhenabhängigkeit der Niederschlagsmenge wurde an der Wetterstation FF (Freifläche Grandlohweg) auf 880 m NN 1997 und 1998 ca. 5 bis 6 % mehr Jahresfreilandniederschlag als an der Wetterstation FH (Forsthaus Dürreych) auf 625 m NN) registriert.

4.3 Stratigrafie der Festgesteine

Der Nordschwarzwald wird hauptsächlich aus der Schichtenfolge des triassischen Buntsandsteins aufgebaut. Die Sedimente liegen einem Grundgebirgssockel aus Graniten und Gneisen auf. Zwischen dem Buntsandstein-Deckgebirge und dem Grundgebirge können permische Sedimente des Rotliegenden eingeschaltet sein.

Dieser grundlegende Aufbau des Nordschwarzwaldes ist auch im Untersuchungsraum repräsentiert (Abb. 19 und Tab. 7): Bestimmend für das Einzugsgebiet sind die tektonisch wenig gestörten, schwach nach Osten einfallenden Schichtverbände des Unteren und Mittleren Buntsandsteins; die Schichten des Oberen Buntsandsteins sind im Gebiet bereits abgetragen. Das Grundgebirge sowie Unterhänge aus Oberrotliegend-Sedimenten treten lediglich unterhalb des Einzugsgebietes im Eyachtal zutage (vgl. Abb. 19).

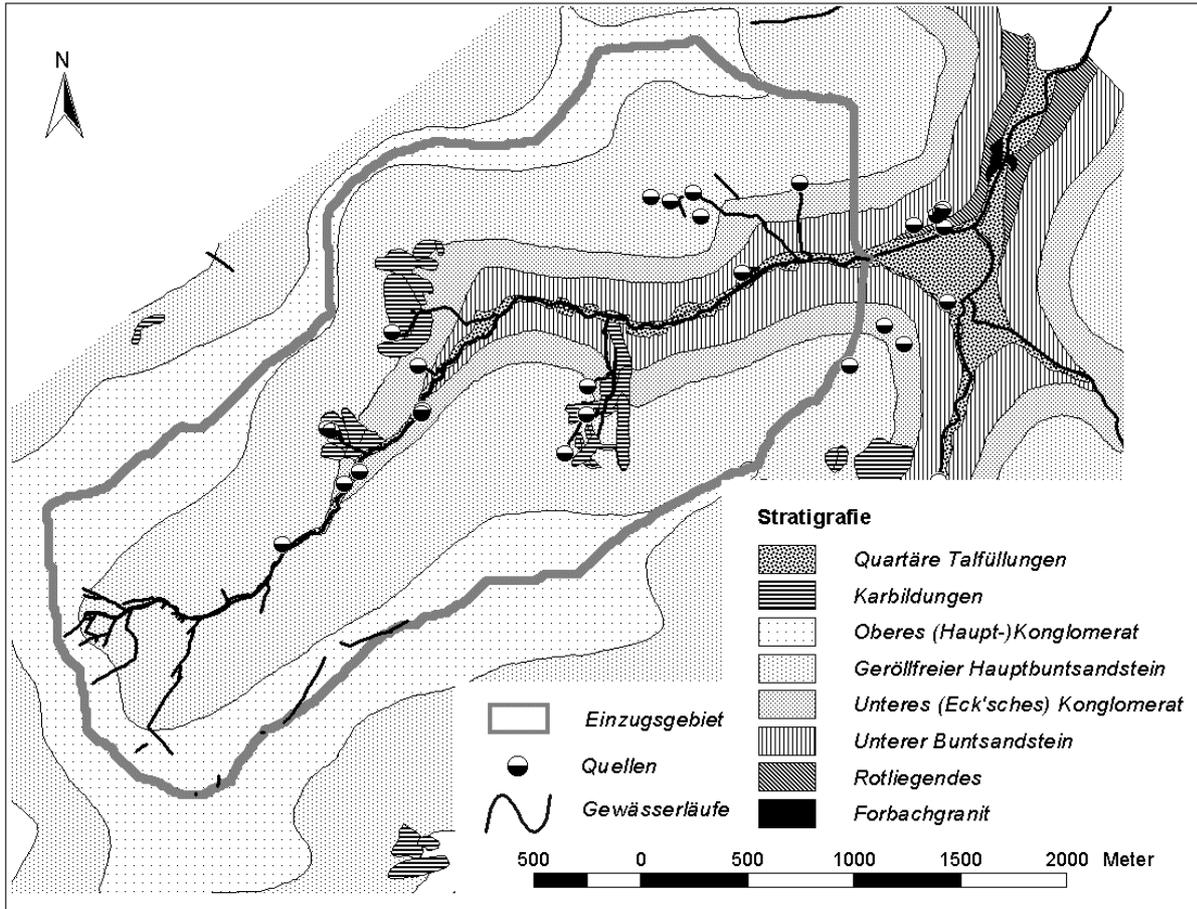


Abb. 19: Geologische Übersichtskarte des Untersuchungsraumes nach GLA BW (1967), generalisiert

Tab. 7: Stratigrafie der Festgesteine im Einzugsgebiet nach GLA BW (1967, 1994a), vereinfacht

Mittlerer Buntsandstein	smc2	Oberes- oder Hauptkonglomerat Roter, ± verkieselter, mittelkörniger Sandstein mit Quarzgeröllen; weitständig geklüftet
	sm	Geröllfreier Hauptbuntsandstein oder Bausandstein Hellroter, dickbankiger mittelkörniger Sandstein v.a. aus Quarz, gelegentlich grobkörnige Lagen; weitständig geklüftet
	smc1	Unteres oder Eck'sches Konglomerat Hellroter, lockerer, mittel- bis grobkörniger Sandstein aus Quarz und Feldspäten mit Geröllen, meist aus Quarz; zum Hangenden hin tonige Lagen
Unterer Buntsandst.	su	Unterer Buntsandstein oder Tigersandstein Weiße, dunkel gefleckte, eher feinkörnige Sandsteine aus Quarz und Feldspäten; ferner Schiefertone, Arkosen
Rotliegendes	ro	Oberrotliegendes Rote, oft tonige Arkosen,
Grundgebirge	Gm	Forbachgranit

4.4 Periglaziale Erscheinungen

Während großräumige Hebungen und einsetzende Erosion im Tertiär dem Festgesteinssockel seine Grundform gegeben haben, waren es vor allem die landschaftsformenden Prozesse im Umfeld der kaltzeitlichen Eisschilde, welche die heutige Gestalt des Einzugsgebietes herausmodelliert haben. Die wichtigsten dieser Prozesse sind (WEISE 1983):

- Frostverwitterung, insbes. Frostsprengung
- Frost- bzw. Permafrostboden
- Massenbewegungen, insbesondere Solifluktion.

Die aufgeführten Prozesse haben die Ausgangsgesteine oft bis in etliche Meter Tiefe überprägt. Mithin spielen die eiszeitlichen Bildungen für die Bodenentwicklung und damit für die oberflächennahe Abflussbildung eine entscheidende Rolle.

4.4.1 Schuttdecken

Infolge der Frostverwitterung wurde das Ausgangsgestein je nach Klüftung, Bankung und Textur unterschiedlich stark aufbereitet und in Abhängigkeit von Neigung und Exposition transportiert und akkumuliert. Die Schuttdecken verhüllen den geologischen Bau, so dass die stratigrafischen Grenzen talwärts verschoben erscheinen.

Substrate: Hauptlieferanten für groben Blockschutt sind die widerstandsfähigen Gesteine des Hauptkonglomerats sowie des Geröllfreien Hauptbuntsandsteins, während die weicheren Schichten des Eck'schen Konglomerats und des Tigersandsteins feineres Schuttmaterial bilden. Die Blockbildner können örtlich feinkornfreie Massen von mehreren Metern Mächtigkeit aufbauen:

- Blockhalden unterhalb anstehender Felsen
- lineare Blockströme in Mulden oder Rinnen

- flächenhafte Blockmeere

Auch die Feianteile der Schuttdecken spiegeln die Eigenschaften ihrer Ausgangsgesteine wider: Es handelt sich ganz überwiegend um Substrate der Hauptbodenartengruppe Sand. Die sandigen, stein- und blockreichen Schuttdecken des Hauptkonglomerats und des Geröllfreien Hauptbuntsandsteins dominieren auch die stratigrafisch tiefer liegenden Hänge (vgl. Tab. 8).

Tab. 8: Substrateigenschaften der Schuttdecken nach der stratigrafischen Herkunft (Zusammenstellung aus GLA BW 1994a)

smc2	Oberes- oder Hauptkonglomerat Blockreiche, grobe Sande, stellenweise tonig, häufige Ortsteinbildung. Bildung von Blockmeeren.
sm	Geröllfreier Hauptbuntsandstein oder Bausandstein Skelettreiche Sande, schwach bindig, da kaum verwitterungsfähige Bindemittel, häufige Ortsteinbildung. Blockschuttbildung v.a. an Steilhängen.
smc1	Unteres oder Eck'sches Konglomerat Grobkörnige Sande, schwächer bindig als su, weitgehend überschüttet von Schuttmassen der höheren Schichten. Orterdebildung
su	Unterer Buntsandstein oder Tigersandstein Schwach lehmige, stellenweise tonhaltige Sande; weitgehend überschüttet von Schuttmassen der höheren Schichten, Ortsteinbildungen vorhanden

Mächtigkeiten: Aus Periglazialgebieten ist allgemein bekannt, dass an sonnseitig exponierten Hängen infolge des stärkeren Auftauens und Abtrags höhere Schuttmächtigkeiten und geringere Hangneigungen auftreten. Höhere Mächtigkeiten werden auch in Mulden und Rinnen erreicht.

Spezielle Untersuchungen zur Mächtigkeit der Schuttdecken im Nordschwarzwald finden sich bei FEZER (1957), STAHR (1973) sowie bei SEEGER (1990). Die Angaben sind uneinheitlich, jedoch lässt sich die Tendenz erkennen, dass:

- die Mächtigkeiten mit wachsender Hangneigung abnehmen,
- die Blockgrößen mit wachsender Hangneigung aber zunehmen.

STAHR (1973:105) stellte höhere Mächtigkeiten als FEZER (1957) fest. Nach Untersuchungen im Seebach-Gebiet (SEEGER 1990) und Bohrungen im Eyachtal (KREBS 1979) sind, je nach Relieflage, sogar Mächtigkeiten in einer Größenordnung von 10 m nicht selten.

Schuttdeckengliederung: Lokale Gesteinsanteile und Fremdgesteinsanteile wie z.B. Löss ermöglichen die lithologische und zeitliche Gliederung von Schuttdecken in Lagen (vgl. AK BODENSYSTEMATIK 1998). Angesichts der enormen Mächtigkeiten erscheint der Sinn einer solchen Gliederung jedoch zumindest fraglich. STAHR (1973) konnte für die Schuttdecken in den meisten Teilen des Nordschwarzwalds nur eine Zweigliederung vornehmen.

- Bis 500...600 m: lössbeeinflusstes, gelb- bis mittelbraunes Decksediment (Hauptfolge) über Gesteinszersatz
- Über 800 m: Lockere, meist gebleichte Deckfolge über gesteinsfarbener oder verbraunter Basisfolge. Letzere sehr dicht, pseudogeschichtet, Skelett eingeregelt.

Nur im Zwischenbereich fanden sich auch dreischichtige Folgen, bei denen die Schuttgrenzen und die Horizontgrenzen der Böden häufig zusammenfallen.

Das Vorkommen von Fernlöss – also Auswehungen aus dem Oberrheingraben – gilt auf der Nord- und Ostabdachung des Schwarzwalds bis in Höhen von 600 m als gesichert (STAHR 1973). Entlang des Schwarzwald-Westanstiegs vermindern sich die Fernlössgehalte, während die Lössgehalte aus lokalen Ausblasungen nach oben zunehmen (MAUS & STAHR 1977); ein Minimum im Gesamtlössgehalt wird dabei zwischen 800 und 1000 m Hö-

he erreicht. – Im Dürreychgebiet mit Geländehöhen zwischen rund 600 und 950 m ist demnach ein spürbarer Lösserfluss allenfalls im unteren Einzugsgebiet zu erwarten. Ein dadurch erhöhter Schluffanteil kann die Substrat-eigenschaften der lokalen Verwitterungsmaterialien (vgl. Tab.8) modifizieren.

4.4.2 Karbildungen

Als weitverbreitete Glazialformen finden sich auch im Nordschwarzwald zahlreiche Karbildungen in unterschiedlich deutlicher Ausprägung (FEZER 1957, 1971). Die sesselförmige Grundform mit steiler Karwand, eingetieftem Karboden und Karschwelle ist im Dürreychgebiet am besten am Seemißkar (SE) zu erkennen: Der Karboden ist hier zudem von einem ca. 1,5 bis 2 m mächtigen, teilweise zersetzten Torfkörper erfüllt – ein Hinweis auf einen heute verlandeten Karsee. Ein direkt angrenzendes, getreptes Kar vereinigt sich mit dem Seemißkar zum Zwillingsskar. Die steilen Rückwände der Hohlformen sind sehr gut in der Hangneigungskarte zu erkennen (vgl. Abb. 20).

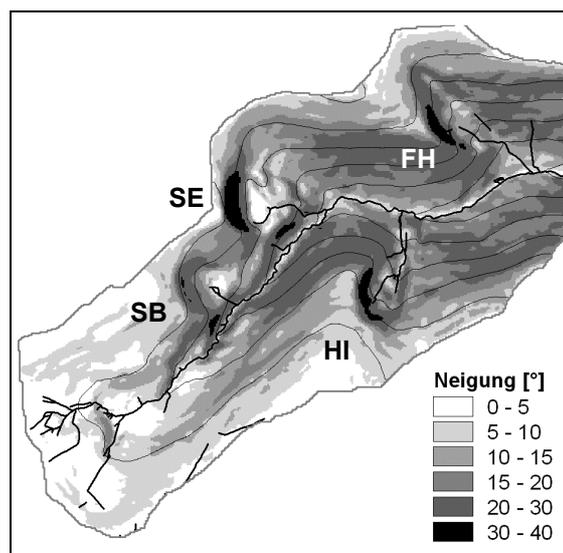


Abb. 20: Hangneigungen im Dürreychgebiet
Weitere Karformen im Einzugsgebiet sind – nach abnehmender Deutlichkeit sortiert: das

Seebergkar (SB), die Hirschklinge (HI) und die Forsthausklinge (FH). Die Kare sowie kleinere Nivationsnischen haben sich im Schutz vor Wind und Sonne, auf den nord- bis ostexponierten Hängen am besten entwickeln können.

4.4.3 Talbildungen

Im Wechsel von kaltzeitlicher Akkumulation und warmzeitlicher Erosion haben sich im Einzugsgebiet Bachterrassen entwickelt. Mindestens zwei Terrassenniveaus sind entlang des Dürreychbachs zu unterscheiden (KASSEBEER 1997):

- ca. 1,5 m über heutigem Mittelwasser
- ca. 4,0 m über heutigem Mittelwasser

Als besondere Bildungen sind die hochgelegenen terrassenähnlichen Einebnungen „aus wirrgelagerten, oft äußerst groben Buntsandsteinblöcken“ zu erwähnen (GLA BW 1994a). Die Entstehung solcher Blockterrassen wird zurückgeführt auf gewaltige eiszeitliche Schmelzwasserströme.

Das schmale Kerbtal des Dürreychbachs bietet nur sehr wenig Platz für die Ausbildung einer rezenten Aue. Auelehme, wie sie in breiteren Schwarzwaldtälern zu finden sind, fehlen im Einzugsgebiet. Dass Talformungsprozesse durchaus nicht abgeschlossen sind, zeigen die Laufverlegungen des Dürreychbachs und die Weiterentwicklung von Klingen nach stärkeren Hochwässern sowie die möglicherweise durch Dränagen verursachte rückschreitende Erosion im oberen Einzugsgebiet.

4.5 Böden

Die stark generalisierende Bodenübersichtskarte 1:200.000 (Abb. 21) lässt die drei wesentlichen bodenkundlichen Haupteinheiten des Einzugsgebiets deutlich hervortreten (vgl. Tab. 9):

- Auf den Hauptkonglomerat-Hochflächen finden sich vorwiegend stauwasserbeeinflusste Bodengesellschaften wie Staupodsole und Stagnogleye (Einheit 28).
- Die Hänge im unteren Einzugsgebiet werden von Podsol-Braunerde-Gesellschaften dominiert (Einheit 34).
- Die nord- und ostexponierten Hänge der höheren Lagen mit ihren Karbildungen nehmen eine Zwischenstellung ein (Einheit 36).

Im einzelnen sind die Bodenverhältnisse jedoch wesentlich differenzierter. Sie werden im Rahmen der eigenen Untersuchungen noch dargestellt. Als Besonderheit dieser Bodendlandschaft soll hier lediglich das Vorkommen von Bändchen-Böden genannt werden (STAHR 1973) – Übergangssubtypen zwischen Podsol und Stagnogley mit einem wasserstauenden, oft nur millimeterdünnen Ortsteinhorizont.

Tab. 9: Bodengesellschaften im Einzugsgebiet – Zusammenstellung aus der BÜK 1:200.000 (GLA BW 1994b)

28	<p>Bändchenstau podsol + Stagnogley + Podsol (+ Podsol-Ranker + Braunerde-Podsol + podsoliger Pseudogley + Moor-Stagnogley + Hochmoor)</p> <p>Steiniger, oft blockreicher schluffiger bis lehmiger Sand und Sand über blockreichem Sandsteinschutt und -zersatz</p>
34	<p>Podsol + Podsol-Braunerde + podsolige Braunerde + Podsol-Regosol (+ Braunerde + Auengley + Anmoorgley + Hanggley)</p> <p>Steiniger, oft blockschuttreicher, lehmiger und schluffiger Sand über blockreichem Sandsteinschutt; Mittel- und Oberhänge häufig schuttbedeckt. Podsolierung hangabwärts i.d.R. abnehmend.</p>
36	<p>Podsol + Podsol-Regosol (+ Podsol-Braunerde + Bändchenstau podsol + Stagnogley + Anmoorgley + Übergangsmoor + Hochmoor)</p> <p>Blockschuttreicher schluffiger und lehmiger Sand über blockreichem Sandsteinschutt: Karböden häufig mit Torfaufage; verbreitet Blockschutt an der Oberfläche.</p>

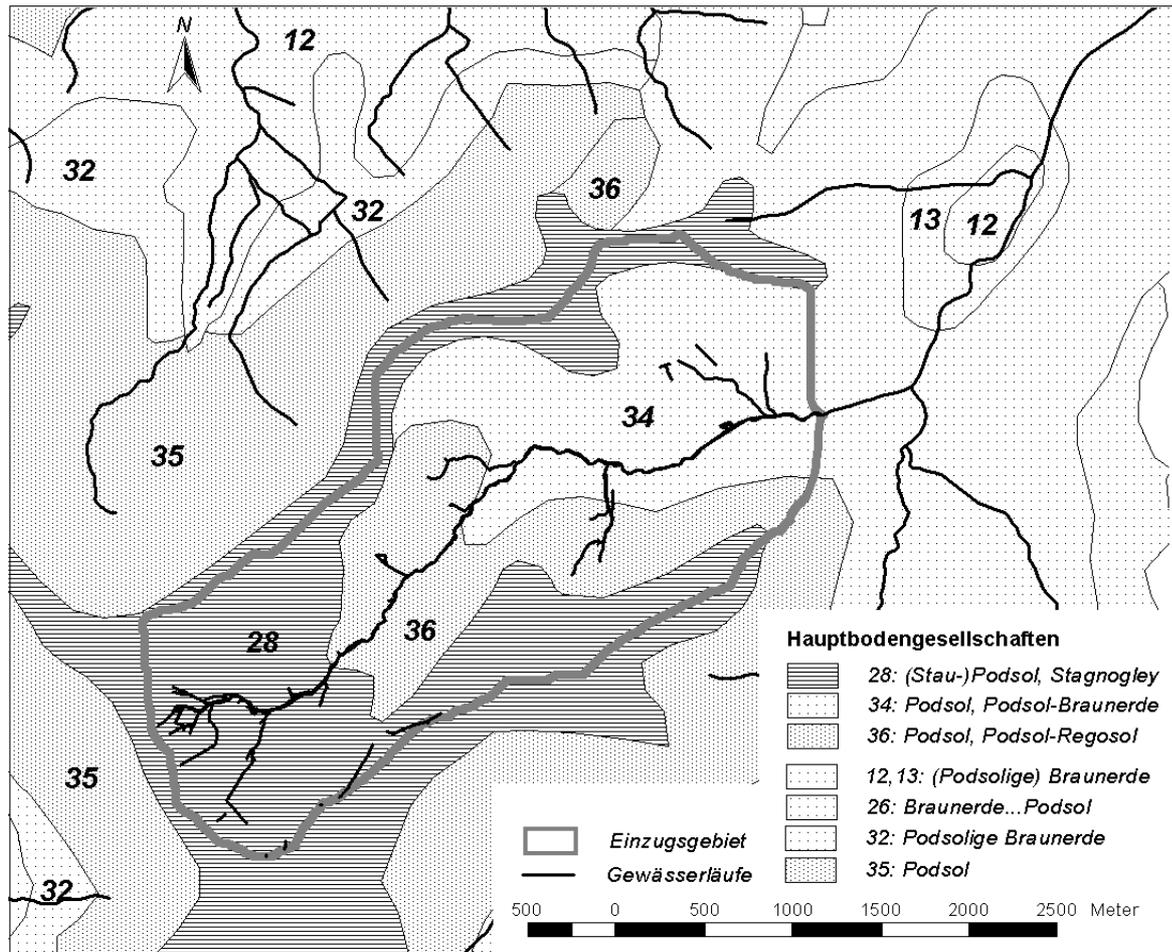


Abb. 21: Hauptbodengesellschaften im Untersuchungsraum nach der Bodenübersichtskarte BÜK 1:200.000 (GLA BW 1994b), vereinfacht

4.6 Quellen und Gewässer

Eine kartografische Darstellung der Quellen und der wichtigsten temporären und permanenten Gewässerläufe im Einzugsgebiet findet sich in Abb. 19.

Quellen: Oberflächennahe und tiefe Quellen lassen sich in erster Näherung leicht anhand ihrer Färbung durch Huminstoffe, ihrer schwankende Temperatur und ihres unausgeglichenen Schüttungsverhaltens differenzieren. KASSEBEER (1997) und THIEMANN (1998) legen hierzu weitergehende Untersuchungen vor. Der Basisabfluss des Dürreychbachs wird hauptsächlich von zwei permanent schütten-

den Kluffquellen – der Stillwasserquelle und der Teichquelle – gespeist, die sich durch sehr ausgeglichene Temperaturen und Leitfähigkeiten sowie eine verzögerte und gedämpfte Reaktion auf Niederschläge auszeichnen. Ihre Lage ist im geologischen Normalprofil (Abb. 22, große Symbole) zu erkennen. Sie liegen an folgenden hydrogeologisch bedeutsamen Schichtgrenzen:

- zwischen Geröllfreiem Hauptbuntsandstein (sm) und den oberen tonigen Lagen des Eck'schen Konglomerats (smc1). Hierzu gehörte die Stillwasserquelle (SQ) (vgl. Anhang 1-1).

- zwischen Unterem Buntsandstein (su) und dem Oberrotliegenden (ro). Hierzu gehört die Teichquelle (TQ) (vgl. Anhang1-1).

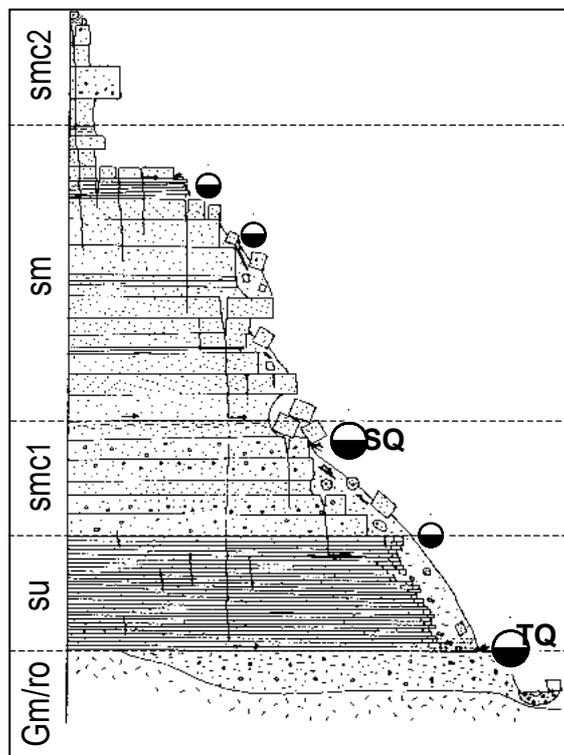


Abb. 22: Die wichtigsten Quellaustritte im Dürrreychgebiet (KASSEBEER 1997, verändert). Große Symbole: perennierende Quellen, kleine Symbole: temporäre Quellen.

Wie in der Abbildung angedeutet, kann der Quellaustritt im Gelände etliche Meter unterhalb der Schichtgrenze liegen, da er durch die auflagernden Schuttdecken verschleppt wird. Laut neueren Tritium- und ¹⁸O-Untersuchungen von BAUER (1998) liegt das Alter des Quellwassers bei ca. 2 Jahren.

Auch in anderen stratigrafischen Lagen treten Quellen auf. Zumeist handelt es sich um Schuttquellen mit einem größeren Anteil an oberflächennahem Wasser und kürzeren Aufenthaltszeiten im Untergrund.

Gewässerläufe: Die hohe Gebirgsdurchlässigkeit des Buntsandsteins bedingt im ganzen Nordschwarzwald eine geringe Dichte des Gewässernetzes (STAHR 1973) – so auch im

Dürrreychgebiet. Das einzige ganzjährig gespannte Gewässer ist der Hauptlauf des Dürrreychbachs unterhalb der Stillwasserquelle. Der oberhalb liegende Bachabschnitt sowie die Seitentäler fallen im Sommer trocken. Das natürliche Entwässerungssystem wird im oberen Teil des Gebietes – dem Teileinzugsgebiet Stillwasserhütte (SH) – durch ein mehr oder weniger wirksames Netz künstlicher Drainagegräben ergänzt, das die feuchten Hochflächen entwässern soll. Im weitesten Sinne sind auch Wegentwässerungen zum temporären Gewässernetz zu zählen.

Die gewässerkundlichen Hauptzahlen des Pegels Dürrreych sind der Tab. 10 zu entnehmen. Der mit ca. 13.000 l/s höchste gemessene Abfluss der etwa 35-jährigen Reihe fiel in den Untersuchungszeitraum (30.10.1998). An dem großen Quotienten HHQ/NNQ ist die mögliche Reaktionsbreite des Gebiets auf Niederschläge zu ermessen.

Tab. 10: Gewässerkundliche Hauptzahlen des Pegels Dürrreych im Zeitraum 1973-1998 (Messungen der LFU BADEN-WÜRTTEMBERG, eigene Messungen)

NNQ	Niedrigster Abfluss	17 l/s
NQ	Mittlerer Niedrigabfluss	25 l/s
MQ	Mittlerer Abfluss	118 l/s
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss	670 l/s
HHQ	Höchster Hochwasserabfluss	ca. 13.000 l/s

4.7 Nutzung und Vegetation

Nadelforste beherrschen heute das gesamte Einzugsgebiet des Dürrreychbachs. Nicht-Waldbodenflächen – zumeist Wiesen – nehmen kaum 1 % der Gesamtfläche ein.

Waldgeschichte: (vgl. GRABMANN 1996) Pollenanalysen belegen, dass Buche und Tanne die vorherrschenden Baumarten der früheren natürlichen Vegetation im Untersuchungsraum waren. Sie wurden begleitet von Eiche, Kiefer,

Birke u.a. die heute dominierende Fichte spielt nur eine untergeordnete Rolle. Daher wird der Tannen-Buchenwald als die vorherrschende Regionalgesellschaft vermutet. Sie wird den Höhenstufen entsprechend gegliedert in zwei Zonalgesellschaften:

- montan (bis ca. 880...900 m NN): Buchen-Tannen-Wald
- hochmontane Höhenstufe: Tannen-(Buchen)-Fichten-Wald mit Kiefer

Die Zonalgesellschaften werden im Zuge der Forstlichen Standortkartierung nach örtlichen Gegebenheiten wie Lokalklima, Boden etc. weiter in Standortgesellschaften differenziert. Diese natürlichen Waldgesellschaften und ihre Standorte wurden und werden durch die Nutzung stark verändert. Besonders einschneidend sind:

- Nährstoffentzug durch Streunutzung, Waldweide, Köhlerei
- Beschleunigung der Podsolierung durch Kiefern- und Fichtenanbau
- Entwässerung der Hochflächen
- Veränderung des Baumarteninventars.

Forstbaumarten: Von Fichte dominierte Bestände bestocken heute nahezu die Hälfte der Einzugsgebietsfläche, Tanne und Kiefer beanspruchen jeweils ein Fünftel. Der Rest verteilt sich auf die Douglasie und andere nicht einheimische Nadelhölzer sowie wenig Buche (FORSTDIREKTION KARLSRUHE 1995).

Altersklassen: Altbestände über 80 Jahre bestocken etwa ein Viertel des Einzugsgebiets. Jungbestände unter 10 Jahren – meist ehemalige Windwurfflächen – machten im Verlauf der Untersuchungen ca. 10 % der Gesamtfläche aus und konzentrierten sich auf die Hochflächen im oberen Einzugsgebiet. Durch den katastrophalen Sturm („Lothar“) im Dezember 1999 hat sich diese Flächenklasse dramatisch vergrößert.

4.8 Zusammenschau der Befunde hinsichtlich der Abflussbildung

Aus den naturräumlich bedingten Gebietseigenschaften ergeben sich eine Reihe von Implikationen für die Abflussbildung und -konzentration:

Die Stratigrafie der Festgesteine bedingt die Lage und Höflichkeit von Quellen. Stillwasserquelle und Teichquelle bilden die am langsamsten reagierenden, tiefsten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet: den Basisabfluss. Mächtige Hangschuttdecken können entsprechend den Substrateigenschaften ihrer Ausgangsgesteine in ihrem Porenraum viel Wasser zwischenspeichern und sorgen trotz des steilen Reliefs für einen geringen Direktabfluss (vgl. auch KREBS 1979:15).

Sandige Podsole und Braunerden ermöglichen hohe Infiltrationsraten in den obersten Teil des Wasserumsatzraumes. Dabei können Ortsteinbildungen – insbesondere Ortsteinbändchen – jedoch die Tiefensickerung hemmen und Zwischenabfluss entstehen lassen. Die vernässten Bodengesellschaften der smc2-Hochlagen sowie die vermoorten Karböden dagegen neigen zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss. Durch die künstliche Abflusskonzentration in Drainagegräben lassen die Flächen schnelle Abflussbeiträge erwarten. Schnelle Abflusskonzentration infolge des Reliefs ist außerdem in den scharf eingeschnittenen Seitentälchen zu vermuten.

Nutzungsbedingt ist lediglich auf Schlagflächen ein Wasserüberschuss durch verringerte Transpiration gegenüber Flächen mit Waldbestand zu erwarten (MOESCHKE 1998).

Die oben formulierten allgemeinen Vorstellungen vom Abflussgeschehen im Untersuchungsraum werden im folgenden zu einem Hypothesenkatalog weiterentwickelt.

5 Hypothesen zur Abflussbildung

Bereits in der ersten Projektphase war es möglich, Hypothesen über die zu erwartenden Abflussbildungsprozesse im Dürreychtal zu entwickeln sowie Annahmen über deren räumliche Verteilung zu treffen. Dazu dienten:

- die allgemeine Theorie der Abflussbildung (Kap. 2.1)
- Analogieschlüsse aus dem Wissen über ähnliche Einzugsgebiete (Kap. 2.1)
- frühere Untersuchungen im Untersuchungsraum (Kap. 2.2).
- die hydrologische Interpretation der naturräumlichen Ausstattung (Kap. 4)
- eigene Voruntersuchungen.

Dem Regionalisierungsansatz liegen folgende prinzipielle Annahmen zugrunde:

- Durch Kombination von Relief- und Bodeneigenschaften lassen sich Standorte mit gleichen dominanten Abflussbildungsprozessen (Hydrotöpfe) ableiten. Vegetation und Klima spielen dabei nur eine mittelbare Rolle.
- Ökoserien bzw. Forstliche Standortseinheiten sind ebenfalls komplexe Kombinationen der genannten Standorteigenschaften. Sie sind daher als Grundlage für die Hydrotopausweisung besonders geeignet.
- Die Abflusskonzentration von Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss folgt der Geländeoberfläche. Die Lage eventueller Stauhorizonte wird dazu näherungsweise parallel zur Geländeoberfläche angenommen.
- Flächen mit potenziell hoher Abflusskonzentration lassen sich durch Kombination von Fließkonvergenzen mit gering durchlässigen Horizonten abbilden. Durch fehlende Stauer bei gleichzeitiger Hangverfla-

chung kann es wieder zur Tiefenversickerung akkumulierter Abflüsse kommen.

Die reliefbedingte Gliederung des Einzugsgebiets von FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996, vgl. Kap. 4) in (1) Talaue, (2) steile Talhänge mit Karnischen und Quellmulden und (3) Hochflächen erweist sich als nützlich, da sie in erster Näherung die Raumeinheiten mit ähnlichen Abflussbildungsbedingungen zusammenfasst.

Vorfluternahe Beitragsflächen: Talauen sind infolge ihrer geringen Neigung und des hohen Grundwasserstands aus der Literatur als vorrangige Flächen für die Bildung von Sättigungsflächenabfluss bekannt. Das Kerbtal des Dürreychbachs mit seinen z.T. mehrere Meter über dem Mittelwasserspiegel liegenden Terrassen besitzt jedoch nur sehr schmale Auenflächen, für die dieses Kriterium zutrifft. Daraus ist in Übereinstimmung mit FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) zu folgern:

- *Der Anteil an Beitragsflächen entlang des Dürreychbachs und der Tiefenlinien ist gering und für die Abflussbildung von untergeordneter Bedeutung.*
- *Abflussaktive vorfluternahe Flächen lassen sich durch Indikatorvegetation abgrenzen.*

Die sandigen, skelettreichen Auen- und Terrassenböden lassen jedoch eine schnelle Sickerung bzw. Druckfortpflanzung in den Vorfluter erwarten. Gleiches gilt im Prinzip auch für die vorfluternahe Flächen der Seitengerinne:

- *Die vorfluternahen Flächen stehen in guter hydraulischer Verbindung zum Vorfluter.*

Sättigungsflächen der Hochlagen und Karbildungen: Die vernässenden Bodeneinheiten des Hauptkonglomerats (smc2) und Geröllfrei-

en Hauptbuntsandsteins (sm) im Bereich der wenig geneigten Hochflächen nehmen weit größere Areale ein als die Aue. Oberflächennahes, oft durch Huminstoffe kräftig braun gefärbtes Stauwasser wird hier nach Überschreiten der Sättigung schon durch relativ geringe Niederschläge mobilisiert und über Dränagen rasch abflusswirksam. Abflusslose oder ausgetrocknete Sättigungsflächen können dagegen auch temporär als Speicher wirken. Daraus ist zu folgern:

- *Der Sättigungsabfluss von den dränierten Hochflächen dominiert in feuchten Perioden maßgeblich die Abflusscharakteristik des gesamten Einzugsgebietes.*

Ähnlich verhalten sich Karböden oder Quellnischen. Die Flächenanteile sind jedoch vergleichsweise gering. Im Gegensatz zu FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) wird daher angenommen:

- *Der Sättigungsabfluss von Karböden oder Quellnischen ist in feuchten Perioden gegenüber dem Abfluss der feuchten Hochlagen von untergeordneter Bedeutung*

Landsat-TM-Daten lassen Schlüsse auf die Feuchteverhältnisse am Boden zu. Dieser Informationsgehalt soll für die Validierung von Feucht- und Sättigungsflächen genutzt werden:

- *Mit Hilfe von Landsat TM-Daten lässt sich die Verteilung von Sättigungsflächen überprüfen.*

Stauende Horizonte der Sättigungsflächen sind entweder auf pedogene Verfestigungen wie Ortsteinbildungen oder geogen bedingte feintmaterialreichere oder verdichtete Lagen zurück zu führen.

- *Gefügeeigenschaften müssen bei der Abschätzung bodenhydraulischer Parameter berücksichtigt werden.*

Flächen mit dominantem Zwischenabfluss

– **steile Podsol-Hänge:** Schnelle laterale Abflusskomponenten sind an Hanganschnitten des Dürreychgebiets nach stärkeren Niederschlägen häufig zu beobachten.

- *Zwischenabfluss entsteht bevorzugt an steileren Hängen oberhalb von Ortsteinbildungen. Dabei spielen schnelle Makroporenflüsse in feuchten Perioden eine wichtige Rolle. Auch piston flow (→ Glossar) infolge von Druckübertragungseffekten ist denkbar.*
- *Wasseraustritte an Weganschnitten, dadurch verursachte Wegerosion sowie Hangrutschungen zeigen zwischenabflussaktive Hänge an.*
- *Bei Tiefensickerung in die meist dichter gelagerten tieferen Schuttdecken kann es ggf. zur Bildung von tieferem Zwischenabfluss kommen. Die überwiegend langsamen Matrixflüsse sind jedoch kaum hochwasserrelevant.*

Die mächtigen Schuttdecken im Dürreychgebiet lassen vermuten:

- *Zwischenabfluss an der Grenze zwischen Schuttdecke und Festgestein trägt nicht zur schnellen Abflussbildung bei.*

Flächen mit dominanter Tiefensickerung – Flachere Braunerde-Hänge:

Bodengesellschaften mit weniger ausgeprägter Verfestigung des Unterbodens wie Braunerde-Podsole, Braunerden und Regosole erlauben bei nicht zu großer Hangneigung eine verstärkte Tiefensickerung.

- *Flachere Hänge ohne ausgeprägte Schichtung sind Speicher- und Infiltrationsflächen.*

Flächen mit Horton'schem Oberflächenabfluss:

Literaturstudien zeigen, dass Wald den

Oberflächenabfluss praktisch vollständig unterbindet (vgl. Kap. 2.1). Schon aufgrund der sehr durchlässigen Oberböden wird Horton'scher Oberflächenabfluss nur von den befestigten Forstwegen im Dürreychgebiet erwartet. Im Bereich stark zersetzter Torfauflagen ist eine Überschreitung der Infiltrationskapazität nach Starkniederschlägen allerdings nicht auszuschließen.

- *Horton'scher Oberflächenabfluss spielt im Dürreychgebiet eine geringe Rolle. Er kann auf verdichteten Wegen und Flächen mit stark zersetzten Torfauflagen auftreten.*

Abflusskonzentration: Dränagen im oberen Teil des Einzugsgebiets sowie das im Winterhalbjahr ausgedehntere Gerinnenetz schließen auch vorfluterferne Flächen abflusswirksam an:

- *Die Nähe zum Gerinnenetz ist in der Regel Voraussetzung für die schnelle Abflusswirksamkeit von Flächen.*
- *Unter geeigneten Bedingungen können auch Feuchtflächen ohne direkten Vorfluteranschluss abflusswirksam werden.*

Auch das Wegenetz hat für die Abflusskonzentration eine gewisse Bedeutung. Die Wirkung von Wegen am Hang ähnelt einem Drä-

nagenetz, das einerseits Wegablaufwasser und andererseits Hangwasser sammelt. Im Unterschied zur Dränage wird jedoch ein großer Teil des Wegeabflusses nicht systematisch dem Vorfluter zugeleitet und somit abflusswirksam, sondern dezentral versickert:

- *Durch Weganschnitte werden oberflächennahe Abflüsse dräniert und streckenweise beschleunigt abgeleitet.*

Dynamik der Abflussbildung: Die beschriebenen Hydrotopklassen sowie die Abflusskonzentration ergeben sich aus der Kombination der statischen Gebietseigenschaften Relief und Böden. Sie beschreiben die potenziell dominierende Abflussreaktion einer Fläche. Die aktuelle Abflussreaktion einer Fläche hängt zusätzlich von Ereignisseigenschaften sowie der Vorfeuchte ab. So ist die Bildung von Zwischenabfluss und Sättigungsflächenabfluss erst nach Überschreiten eines Schwellwertes der Wasserspeicherkapazität möglich.

- *Die Abflussbildung ist zeitlich und räumlich dynamisch.*
- *Die oberflächennahe Abflussbildung ist nichtlinear. Ein lineares Verhalten ist nur innerhalb bestimmter Schwellenwerte der Vorsättigung möglich.*

6 Methoden

6.1 Entwicklung einer Regionalisierungsmethodik

Zur Regionalisierung der Abflussbildung im Dürreychgebiet werden zwei methodische Stränge verfolgt und miteinander verknüpft:

- Entwicklung eines Regelwerks zur (statischen) Hydrotopklassifikation auf Basis der Forstlichen Standortskarte (FSK)
- Kombination von Ableitungen aus der FSK mit dem Digitalen Höhenmodell (DHM)

6.1.1 Die FSK als Informationsquelle für die Regionalisierung

Informationsgehalt: Insbesondere die Homogenität der Standortseinheiten hinsichtlich des Wasserhaushaltes macht die FSK für mesoskalige hydrologische Fragestellungen interessant. Zahlreiche direkt und indirekt hydrologisch relevante Informationen lassen sich aus den Beschreibungen der Standortseinheiten ableiten bzw. schätzen, wie Tab. 11 zusammenstellt.

Tab. 11: Aus der FSK ableitbare, hydrologisch relevante Informationen

FSK-Information	Daraus ableitbar:	
Wasserhaushalt Stau-, Hangzugwasser, Drainagen, Ökologische Feuchtestufe, Ökologische Artengruppen	Dominierende Wasserbewegung, Abgrenzung von Feuchtflächen	direkt
Klima Klimatisch-waldbauliche Höhenstufen, Geländeklima	Pot. Evapotranspiration	
Relief Exposition, Reliefformtyp, Neigung	Laterale Wasserbewegung, Pot. Evapotranspiration	indirekt
Geologie, Boden Ausgangssubstrat, Bodenart, Bodentypen und Horizonte, Skelettgehalt, Gefüge, Gründigkeit, Durchwurzelbarkeit, Lagerungsdichte, Zersetzungsgrad von Torfen	Bodenphysikalische Eigenschaften wie GPV, FK, nFK, kf etc., Bodenfeuchteregime und Sickerverhalten	

Von besonderem Wert für die hydrologische Regionalisierung sind direkte Angaben zum Wasserhaushalt: Sie umfassen insbesondere Angaben über Stauhorizonte, Hangzugwasser, Zu- und Abflussbereiche und Drainagen. Der Standortwasserhaushalt wird zudem durch eine Ökologische Feuchtestufe oder Wasserhaushaltsstufe zusammenfassend charakterisiert. Aus diesen Angaben ist die dominierende Wasserbewegung – Sickerung, lateraler Abfluss, Stauwasser – für eine Standortseinheit z.T. unmittelbar erkennbar. Unterstützende Hinweise bieten dabei die Ökologischen Artengruppen, die auf Grundlage von Zeigerpflanzen die Standortbedingungen ganzheitlich charakterisieren.

Datenqualität: Die relativen Unterschiede im Standortwasserhaushalt eines Kartiergebietes werden durch diese Vorgehensweise sehr gut abgebildet, sind aber oft stark auf die örtlichen Gegebenheiten bezogen. Damit ist die absolute Vergleichbarkeit mit Kartiergebieten in anderen Naturräumen nur schwer möglich (GAUER 1996). Angaben der FSK zum Geländeklima und zum Relief sind teilweise recht grob, sofern nicht Sonderstandorte beschrieben werden. Recht detaillierte Ableitungen dagegen sind i.d.R. aus den Bodeninformationen möglich (Tab. 11), die auf Grundlage von Leitprofilen sowie einer engmaschigen Bohrstockkartierung erhoben werden. In Waldgebieten, wo oft großmaßstäbige Bodenkarten fehlen, ist daher der Wert der Standortskarten besonders hoch einzuschätzen. Eine sorgfältige fachliche Interpretation der Daten ist, insbesondere auch bei älteren Karten, unerlässlich.

Die FSK Kaltenbronn: Im Forstbezirk Kaltenbronn wurde die Standortskartierung zwischen

1988 und 1991 durchgeführt. Im Zuge der Bodenaufnahme wurde das Gebiet nach den Angaben von GRAßMANN (1996) im Raster zwischen 50 und 80 m bis in eine Tiefe von ca. 90 cm mit dem Bohrstock untersucht. Die Übersicht in Anhang 2-1 zeigt die im Dürreychgebiet ausgeschiedenen Substratreihen oder Ökoserien. Innerhalb der durch Lage und Relief begründeten Haupteinteilung wird nach lehmigen und sandigen Substraten sowie nach vernässenden und nicht vernässenden Einheiten unterschieden. Die 900 m Isohypse trennt in etwa die montane Höhenstufe von der hochmontanen Lage. Diese Unterscheidung ist für waldbauliche Aspekte wichtig, für die Hydrotopausgliederung dagegen von untergeordneter Bedeutung.

FSK-Bodendaten: Die FSK Kaltenbronn dokumentiert die Böden der Standortseinheiten anhand von realen und schematischen Bodenprofilen. Ihre Aufnahme erfolgte in Anlehnung an die Kartieranleitung des AK STANDORTSKARTIERUNG (akt. Aufl. 1996), die letztlich auf der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994) basiert. Zur Datenqualität ist anzumerken:

- Die Nomenklatur folgt nicht überall konsequent der AG BODEN (1994)
- Die bodenkundlichen Parameter werden nicht immer vollständig angegeben¹.

Für das Regionalisierungsvorhaben werden die FSK-Daten in die Nomenklatur der AG BODEN (1994) übersetzt und ggf. ergänzt. Dazu ist häufig eine fachliche Interpretation erforderlich und damit ein gewisser Entscheidungsspielraum nicht zu vermeiden. Eine umfangreiche Vorschrift zur einheitlichen und datenbankgerechten Erfassung forstlicher Stand-

ortsprofilbeschreibungen in Niedersachsen legte STEININGER (1993) vor. Mit der Standortskarte Kaltenbronn wurde – z.T. in Anlehnung an diese Vorschrift – nach den Regeln in Anhang 2-3 verfahren.

FSK-Geometrien: Im gemeinsamen Datenpool der AG Dürreych stand eine mit der Software Arc/Info (ESRI 1999) im Maßstab 1 : 10.000 digitalisierte FSK des Forstbezirks Kaltenbronn zur Verfügung (CASPER 2002).

6.1.2 Entwurf eines Regelwerks zur Hydrotopklassifikation

Zielsetzung: Auf Grundlage der FSK Kaltenbronn sollen Flächen mit gleichen dominanten Abflussbildungsprozessen (Hydrotope) durch ein Regelwerk ausgegliedert werden.

Vorgehensweise: Um die Fülle der Informationen für die Hydrotopausgliederung handhabbar zu machen, wird der Legendeneinhalt der FSK datenbankgerecht aufbereitet und als Datenbanktabelle abgelegt. Nachfolgend werden die Daten einem Abfrageschema unterzogen, der den Flächen die zu erwartenden dominante Abflussreaktion zuweist. Das Regelwerk zur Abfrage kann als Entscheidungsbaum dargestellt werden (Abb. 23). Er ordnet den Standortseinheiten vier Hydrotopklassen zu, die in acht Hydrotoptypen weiter differenziert werden können. Folgende für die Abflussbildung bedeutsame Standortseigenschaften werden bei der Abfrage berücksichtigt:

- Vorfluternahe Rinnen, Auen
- Durchlässigkeit des Oberbodens
- Ökologische Feuchte
- Grund-/ Stauwassereinfluss
- Schichtung Ober-/ Unterboden
- Wölbung u.a. Reliefmerkmale
- Hinweise auf laterale Wasserbewegung

¹ Unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit sowie der waldbaulichen Zielsetzung der Kartierung ist dies vom Standortskartierer auch nicht unbedingt zu verlangen.

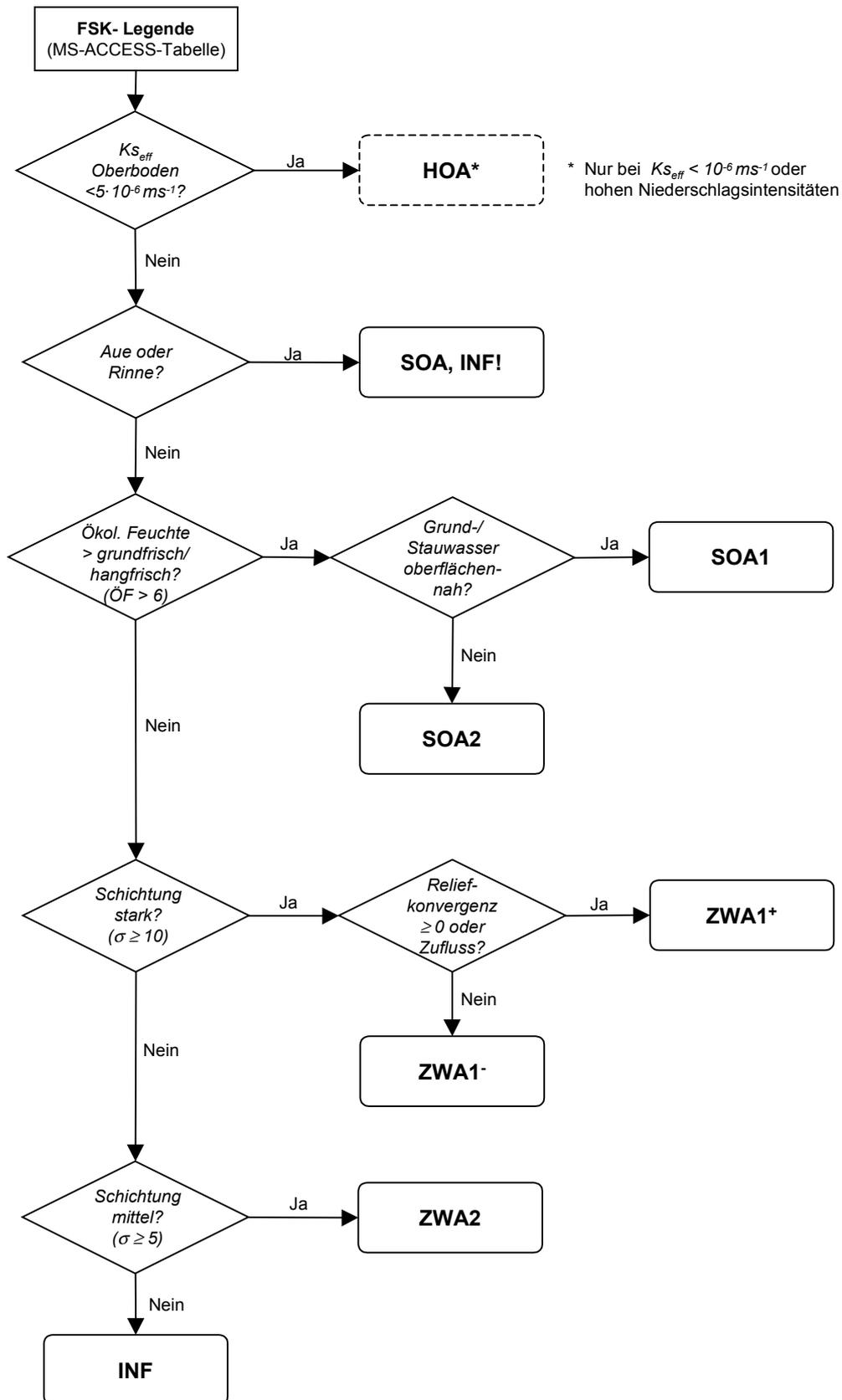


Abb. 23: Entscheidungsbaum zur Ableitung von Hydrotopen aus der Forstlichen Standortskarte: HOA = Horton'scher Oberflächenabfluss, SOA1 = Schneller Sättigungsflächenabfluss, SOA2 = Verzögerter Sättigungsflächenabfluss, ZWA1 = Schneller Zwischenabfluss, ZWA2 = Verzögerter Zwischenabfluss, Zusätze +/- = Wasserzu-/abfluss, INF = Infiltration. Zuordnung gültig für extensive, längere Niederschläge (außer HOA).

Zur Aufnahme in die Datenbank muss der Legendentext z.T. ordinal klassifiziert werden. **Auen und Rinnen:** Vorfluternahe Auen und Rinnenstandorte stehen i.d.R. in enger hydraulischer Verbindung mit dem Gewässer, so dass Abflussreaktionen durch Sättigungsflächenabfluss und Infiltration sehr schnell erfolgen können (SOA, INF!). Derartige Standorte werden daher gleich zu Beginn des Entscheidungsbaumes abgetrennt und in ihrer Abflusswirksamkeit Flächen mit schnellem Sättigungsabfluss gleichgestellt.

Durchlässigkeit des Oberbodens: Die Durchlässigkeit des Oberbodens wird als Ks-Klasse aus Bodenart, Humusgehalt und Lagerungsdichte nach Tabellen des LGRB BADEN-WÜRTTEMBERG (1998) abgeschätzt¹. Dabei wird von einer geringen Lagerungsdichte (LD 2) sowie einem mittleren Humusgehalt ausgegangen (h3). Mit einem Zuschlag um eine Ks-Klasse wird der Durchwurzelung und dem lockeren Gefüge des Oberbodens Rechnung getragen und eine effektive hydraulische Leitfähigkeit gebildet. Die effektive Leitfähigkeit von $K_s = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ entspricht der Obergrenze der Ks-Klasse 3 (AG BODEN 1994) und wird als Schwellwert für die potenzielle Bildung von Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) angesetzt (Tab. 12). Dieser Wert entspricht einer theoretischen Infiltrationsrate von ca. 17 mm h^{-1} und damit in etwa einem Starkregenereignis mit einer Jährlichkeit von 1 a für die Region (vgl. KOSTRA-Atlas, BARTELS 1997). Böden mit höherer Infiltrationsrate können nur bei seltenen Extremereignissen Horton'schen Oberflächenabfluss bilden. Wie Literaturstudien zeigen, verhindert Wald überdies die Entstehung von Horton'schem Oberflächenabfluss

auch oft unter ungünstigeren Durchlässigkeitsverhältnissen (Kap. 2.1). Der Abflussbildungsprozess HOA wird daher für das Dürreychgebiet als wenig bedeutsam eingeschätzt.

Tab. 12: Klassifizierung der effektiven gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens (Erläuterung im Text)

0	Effektiver K_s des Oberbodens $\geq 5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$
1	Effektiver K_s des Oberbodens $< 5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$

Ökologische Feuchte: Eine Schlüsselstellung im Entscheidungsbaum (Abb. 23) nimmt die Ökologische Feuchte ein. Sie wurde in Anlehnung an AK STANDORTSKARTIERUNG (1996) klassifiziert und mit Hilfe einer Skala von 1 (sehr trocken) bis 10 (sehr nass) verschlüsselt (Tab. 13).

Tab. 13: Umsetzung der Ökologischen Feuchtestufen ÖF in Ordinalzahlen

ÖF	Ökologische Feuchte
1	sehr trocken
2	trocken
3	mäßig trocken
4	mäßig frisch
5	frisch
6	grundfrisch, hangfrisch
7	grundfeucht
8	feucht, wechselfeucht
9	nass, vernässend
10	sehr nass, z.T. überflutet

Übergänge zwischen zwei Stufen werden in der Datenbank als Dezimalzahlen abgebildet. Das Spektrum von 1 bis 10 ist den Feuchtestufen von ELLENBERG et al. (1992) nachempfunden, kann jedoch nicht direkt mit ihnen verglichen werden. Die Kenntnis der Ökologischen Feuchte als wasserhaushaltliches Standortintegral ermöglicht bereits eine erste Abschätzung des Abflussbildungspotenzials einer Standortseinheit. Insbesondere lassen

¹ Die Klasseneinteilung beruht auf den kf-Klassen der AG BODEN (1994:306)

sich damit feuchte Flächen ($\ddot{O}F > 6$) leicht erfassen, die – nach Ausschöpfung ihrer Speicherkapazität – potenziell Sättigungsabfluss bilden können.

Grund-/Stauwassereinfluss: Ausgeprägte Sättigungsflächen sind eingrenzbar durch ständig oberflächennah anstehendes Grund- oder Stauwasser, während ein oberflächenfernere Wasserspiegel vorübergehende Speicherung, laterale Abflusskomponenten und verzögerten Sättigungsflächenabfluss bedingen kann. Die Lage des Stau- oder Grundwasserspiegels wird daher in drei Stufen eingeteilt (Tab 14).

Tab. 14: Grund- und Stauwassereinfluss

0	kein Grund-/ Stauwasser
1	oberflächenfern (> 4 dm)
2	oberflächennah (< 4 dm)

Die Unterscheidung zwischen „oberflächennah“ und „oberflächenfern“ für das Dürreychgebiet wird nach den Geländeerfahrungen auf einen mittleren scheinbaren Flurabstand von ca. 40 cm festgelegt. Ausgewertet wurden neben direkten Angaben zum Wasserhaushalt auch auf Staunässe hinweisende Horizontsymbole sowie Angaben zu gestörter Durchwurzelung infolge Vernässung.

Schichtung: Infiltrationshemmende Horizonte unter gut durchlässigen Oberböden bilden bei geneigtem Gelände die Voraussetzung für die Entstehung von Zwischenabfluss (ZWA). In einer wahlweise drei- oder fünfstufigen Skala wird angegeben, in welchem Maße potenziell wasserhemmende Unterböden oder C-Horizonte ausgebildet sind. Auf schlecht durchlässige Unterböden weisen hin:

- Bodentyp und Horizontbezeichnung: Geringe Durchlässigkeiten haben z.B. Sd-, Sg-Horizonte und ihre Übergänge (AG BODEN

1994), wasserhemmend wirken auch Ortsteinbildungen Bms, Bb sowie dichte C-Horizonte (STAHR 1973, SEEGER 1990, SOMMER et al. 1997, 2001).

- Änderung der Bodenart zu feineren Korngrößen: z.B. Angabe „tonige Basisfließerde“ unter sandigen Substraten. Sonderfall: Blockschutthalden mit hohen lateralen Fließgeschwindigkeiten (MEHLHORN 1998, UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997a).
- Lagerungsdichteänderungen von mehr als einer Klasse im Zusammenhang mit
- Änderung von Gefügemerkmalen wie v.a. Ortsteinbildung, plattiges Gefüge
- Zersetzungsstufe bei Torfen > z3 führt zu geringer Durchlässigkeit (AG BODEN 1994)
- Störung der Durchwurzelbarkeit durch Ortsteinbildung oder Staunässe

Die Angaben müssen fachlich interpretiert und den drei Stufen zugeordnet werden. Bei besserer Datenlage kann alternativ ein Schichtungsquotient σ aus den gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten des Oberbodens Ks_o und des Unterbodens Ks_u [$m\ s^{-1}$] ermittelt (Gl. 4) und in eine Schichtungsklasse umgesetzt werden (Tab. 15).

$$\sigma = \frac{Ks_o}{Ks_u} \quad (\text{Gl. 4})$$

Tab. 15: Ausbildung eines potenziell Sickerwasser hemmenden Unterbodens oder C-Horizonts

0	gering	$\sigma < 2$	1
		$\sigma = \{2... < 5\}$	2
1	mittel	$\sigma = \{5... < 10\}$	3
2	stark	$\sigma = \{10... < 20\}$	4
		$\sigma \geq 20$	5

Zur Berechnung des Interflow-Index (Kap. 6.1.4) wurden nicht die Klassen, sondern die Schichtungsquotienten σ aus den Ks -Werten

verwendet, die für die synthetischen Profile (Anhang 5) abgeleitet wurden (Kap. 6.3.1).

Reliefkonvergenz: Teilweise liefert die Forstliche Standortskarte explizite Informationen zu lateralem Wasserzu- oder -abfluss, die direkt ausgewertet werden können (Tab. 16). Auf diese Weise können Standorte mit ausgeprägterem Zwischenabfluss weiter differenziert werden.

Tab. 16: Direkte Hinweise auf laterale Wasserbewegung

0	keine Hinweise
+1	lateraler Zufluss
-1	lateraler Abfluss

In den übrigen Fällen impliziert die Kombination der Reliefmerkmale Wölbung (konkav, gestreckt, konvex) und Neigung (flach, geneigt, steil) das laterale Fließverhalten. Beide Größen werden in Wertzahlen zwischen -1 und +1 umgesetzt. Durch Addition der Wertpaare jeder Standortseinheit ergibt sich die Reliefkonvergenzzahl als einfaches Maß für die potenzielle Fließakkumulation (Tab. 17):

- Im Falle einer konvexen Reliefposition wird Wasserabfluss unterstellt (Wertzahl -1), im Fall einer konkaven Lage oder Unterhangsituation ist Wasserzufluss zu erwarten (Wertzahl +1).
- In Flachlagen findet kein lateraler Abfluss statt (Wertzahl 0), in Steillagen starker Abfluss (Wertzahl -1).

Um Übergänge oder unscharfe Angaben der FSK-Legende abzubilden, werden auch hier Dezimalzahlen zugelassen. Eine Reliefkonvergenzzahl ≥ 0 weist auf Standorte mit stagnierenden Abflussbedingungen bzw. lateralem Wasserzuschuss hin (ZWA1+).

Tab. 17: Wertzahlen für Wölbung und Neigung. Die Reliefkonvergenzzahl wird durch Addition eines Wertepaars berechnet.

Wölbungszahl		Neigungszahl	
+1	konkav	0	eben, flach
0	gestreckt, keine Hinweise	-0,5	geneigt
-1	konvex	-1	steil
Wölbungszahl + Neigungszahl = Reliefkonvergenzzahl			

Methodenkritik: Das vorliegende Regelwerk ist speziell für die Abschätzung dominanter Abflussbildungsprozesse im Dürreychgebiet konzipiert. Einflussfaktoren, die für die Abflussbildung außerhalb des Gebietes und insbesondere außerhalb des Buntsandstein-Schwarzwaldes von Bedeutung sein können, werden nicht berücksichtigt. Eine Übertragung auf andere Gebiete ist daher nur mit entsprechenden Anpassungen an die regionalen Gegebenheiten möglich.

6.1.3 Gewichteter Topographischer Index für den Sättigungsflächenabfluss

Die vorangehenden Ausführungen haben Methoden für eine einfache qualitative Hydrotopklassifikation auf Basis der FSK aufgezeigt. Durch Einbeziehen der Abflusskonzentration mit Hilfe des DHM erhält der statische Ansatz eine dynamische Qualität.

Zielsetzung: Im Zuge der Literatursichtung wurde festgestellt, dass der Topographische Index einer Modifizierung bedarf, um der naturraumbedingten Sondersituation auf den feuchten Hochflächen mit Sättigungsflächenabfluss im Dürreychgebiet gerecht zu werden.

Vorgehensweise: Auf Grundlage eines mit der Ökologischen Feuchte gewichteten Fließakkumulationsgrids wird ein gewichteter Topographischer Index c_f in Weiterentwicklung von

BEVEN & KIRKBY (1979) berechnet. Dabei wird die Transmissivität gleich 1 gesetzt (Gl. 5a):

$$c_f = \ln \frac{A_{wf}}{\tan \beta} \quad (\text{Gl. 5a})$$

mit
$$A_{wf} = \sum_j w_f \cdot A_j \quad (\text{Gl. 5b})$$

A_{wf} Gewichtete spezifische Einzugsgebietsgröße pro Längeneinheit einer Rasterzelle [$\text{m}^2 \text{m}^{-1}$] (Gl. 5b), Rasterzellengröße: 10 m

w_f Dimensionsloser Wichtungsfaktor zwischen 0 und 1, abgeleitet aus der Ökologischen Feuchte

β Hangneigung [$^\circ$]

Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die Überlegung, dass nur auf Flächen mit hoher Ökologischer Feuchte potenziell Sättigung zu erwarten ist, während auf trockeneren Flächen Infiltration oder Zwischenabfluss vorherrscht. Der Wichtungsfaktor w_f wirkt sich in der Weise aus, dass nur feuchte Flächen zur Fließakkumulation beitragen.

Der herkömmliche Topographische Index kann – die in der Praxis häufige Vernachlässigung der Transmissivität vorausgesetzt – als Grenzfall des Gewichteten Topographischen Index aufgefasst werden: Alle Rasterzellen erhalten dadurch den Wichtungsfaktor 1 und wirken damit maximal beitragend. Ein derartiges Verhalten ist aber nur für Einzugsgebiete mit sehr undurchlässigen Böden realistisch. Wird also die Transmissivität bei der Berechnung des Topographischen Index vernachlässigt, so geht damit ein Regulativ für die räumliche Variabilität der Abflussbildung verloren. Dass diese Vorgehensweise dennoch sehr verbreitet ist, hat meist pragmatische Gründe: Häufig sind entsprechende Daten zur Transmissivität schlicht nicht verfügbar. An die Stelle der Transmissivität tritt beim vorgeschlagenen

Gewichteten Topographischen Index die Ökologische Feuchte als effektiver Parameter.

Zur Wichtung des Fließakkumulationsgrids werden die verbal formulierten Ökologischen Feuchtestufen zunächst in eine numerische Ordinalskala transformiert (Tab. 13) und dann in einen Wichtungsfaktor w_f umgesetzt. Um die z.T. unscharfen Angaben der FSK zu berücksichtigen, wurden auch Übergangswerte zwischen den ÖF-Klassen zugelassen.

Für die Wichtungsfunktion wird ein sigmoider Verlauf gewählt, d.h. Feuchtwerte > 6 erzeugen mit stark wachsender Wahrscheinlichkeit Sättigungsabfluss (Abb. 24). Die Wichtungsfunktion hat eine Nullstelle bei einer Ökologischen Feuchte von 5 (frisch), d.h. in diesen und allen noch trockeneren Zellen ist kein Sättigungsflächenabfluss zu erwarten. Sie nimmt den Maximalwert 1 auf sehr nassen, z.T. überfluteten Flächen an, wo der Sättigungsabfluss bei 100 % liegen kann. w_f kann somit als unkalibrierter Abflussbeiwert der Zellen aufgefasst werden.

Ansatz mit Reinfiltration: Durch Verschieben der Wichtungsfunktion um einen festen Wert $-\Delta w$ entstehen für Ökologische Feuchtestufen < 5 negative w_f -Werte (Abb. 24).

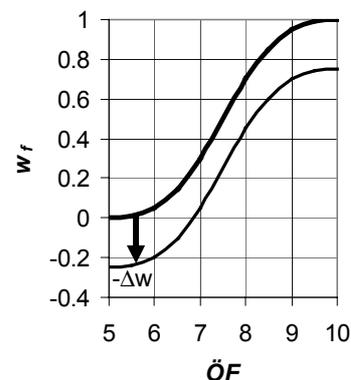


Abb. 24: Wichtungsfunktion für die Ökologische Feuchte und Verschiebung um $-\Delta w$ zur Simulation trockenerer Bedingungen

Bei Berechnung der Fließakkumulation kann so auf negativen Rasterzellen Reinfiltration unter trockeneren Vorbedingungen simuliert werden. Diese Vorgehensweise lässt zunächst unberücksichtigt, ob durch infiltrationshemmende Horizonte auf diesen Flächen beitragswirksame Zwischenabflüsse auftreten können. Folgende Randbedingungen werden für die Fließakkumulation gesetzt:

- Die Summe der Rasterzellen wird nie kleiner als Null.
- Inkrementwerte des logarithmischen Ausdrucks ≤ 1 in Gl. 5a werden auf den Wert 1 gesetzt ($\ln 1=0$), um nicht definierte Werte zu vermeiden.

6.1.4 Entwicklung eines Index für den Zwischenabfluss (Interflow-Index)

Zielsetzung: Während für die Regionalisierung des Sättigungsflächenabflusses mit dem Topographischen Index ein bewährtes Konzept vorliegt, fehlt ein entsprechender Ansatz für den Zwischenabfluss.

ANDERSON & BURT (1990:372) stellen heraus:

„As the ratio between the hydraulic conductivity of the upper and the lower layers increases, more subsurface flow is generated and the flow direction is more nearly parallel to the slope.“

Indem also das Verhältnis der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten von Ober- zu Unterboden anwächst, wird auch mehr Zwischenabfluss gebildet und die Fließrichtung wird nahezu hangparallel.

Vorgehensweise: Diese Feststellung legt nahe, das Verhältnis der Leitfähigkeiten des oberen und unteren Horizonts K_{s_o} und K_{s_u} [$m\ s^{-1}$] in Kombination mit der Hangneigung β [°] als Maß für die potenzielle Zwischenabflussintensität eines Hanges heranzuziehen. Für die Skalierung dieses Schichtungsquotienten ist die absolute Größenordnung von K_{s_o} bedeut-

sam. Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde folgendes Konzept für die potenzielle Zwischenabflussintensität I_{pot} [m] bei zweischichtigem Bodenaufbau entwickelt (Gl. 6):

$$I_{pot} = \sin \beta \cdot \left| \log \frac{K_{s_o}}{K_{s_u}} \right| \cdot K_{s_o} \quad (\text{Gl. 6})$$

Gl. 6 setzt sich aus drei Faktoren zusammen:

1. **Neigungsfaktor:** $\sin \beta$ beschreibt die laterale Komponente der Wasserbewegung am Hang im Sinne einer Komponentenzerlegung an der schiefen Ebene. Der Faktor wird 0 für $\sin 0^\circ$, d.h. der vertikale Anteil beträgt 100 %. Starke Neigungen bewirken auch bei geringer Schichtung erhöhte I_{pot} -Werte.²
2. **Schichtungsfaktor:** Der Schichtungsquotient K_{s_o}/K_{s_u} wird logarithmiert. Er wird dadurch 0 für $K_{s_o} = K_{s_u}$. In diesem Fall kann ungehinderte Sickerung stattfinden. Durch Verwendung des Absolutwertes kann auch im umgekehrten Schichtungsfall – weniger durchlässiger Oberboden über durchlässigem Unterboden – ein Zwischenabfluss durch Kapillarsperreffekte konzeptionell nachgebildet werden.
3. **Skalierungsfaktor:** Zur Skalierung des Wertes auf die tatsächliche Durchlässigkeit des Oberbodens, in dem sich der Zwischenabfluss bewegt, wird mit dem K_s -Wert des Oberbodens multipliziert.

Im Falle des Dürreychgebiets kann der Skalierungsfaktor infolge der meist sehr ähnlichen Bedingungen im Oberboden näherungsweise vernachlässigt werden. Gl. 6 vereinfacht sich damit zu Gl. 7

$$I_{pot} = \sin \beta \cdot \left| \log \frac{K_{s_o}}{K_{s_u}} \right| \quad (\text{Gl. 7})$$

² Prinzipiell ist auch der $\tan \beta$ für die Berechnung geeignet (WALDENMEYER 2001). Für kleine β ist $\sin \beta \approx \tan \beta$;

Bei der Interpretation der Indexwerte ist zu beachten:

- Die Gleichung beschreibt keinen physikalischen Zusammenhang, sondern ist konzeptionell zu verstehen.
- Die Werte sind im Sinne einer Ordinalskala zu deuten.
- Die Werte geben die potenzielle Neigung zur Zwischenabflussbildung an. Nur bei entsprechender Vorfeuchte und Niederschlagsintensität kann tatsächlich Zwischenabfluss auftreten. Diesen Punkt betonen auch ANDERSON & BURT (1990:372):

„...the rainfall intensity must greatly exceed the hydraulic conductivity of the lower layer if the upper horizon is to develop basal saturation.“

6.1.5 Kombination der Indizes

Zielsetzung: Sättigungsflächenabfluss und Zwischenabfluss sollen durch Kombination der beschriebenen Ansätze gekoppelt werden. Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, dass Sättigungsflächenabfluss reinfiltrieren und sich unter geeigneten Bedingungen als Zwischenabfluss im Hang fortsetzen kann.

Vorgehensweise: Dazu werden zunächst zwei Wichtungsgrids addiert, die auf der Ökologischen Feuchtestufe und dem Schichtungsquotienten basieren (Gl. 8):

$$w_{f,i} = w_f + w_i \quad (\text{Gl. 8})$$

w_f Dimensionsloser Wichtungsfaktor zwischen 0 und 1, abgeleitet aus der Ökologischen Feuchte (vgl. Kap. oben)

w_i Dimensionsloser Wichtungsfaktor zwischen 0 und 1, abgeleitet aus der pot. Zwischenabflussintensität I_{pot}

w_i wird aus der potenziellen Zwischenabflussintensität I_{pot} (siehe Gl. 7) gemäß Gl. 9a,b erzeugt:

$$w_i = 0,5 \cdot I_{pot} \quad \text{für} \quad \left| \log \frac{Ks_o}{Ks_u} \right| \leq 2 \quad (\text{Gl. 9a})$$

$$w_i = \sin \beta \quad \text{für} \quad \left| \log \frac{Ks_o}{Ks_u} \right| > 2 \quad (\text{Gl. 9b})$$

Gl. 9a und 9b beruhen auf der folgenden vereinfachten Annahme zum Schichtungsquotienten $\log(Ks_o/Ks_u)$, die für die üblichen Verhältnisse im Dürreychgebiet getroffen wird: Bei einem Schichtungssprung um mehr als zwei Zehnerpotenzen wird die vertikale Sickergeschwindigkeit so stark verlangsamt, dass sie auf der Ereignisskala vernachlässigbar gering ist. Das Sickerwasser steht dann praktisch vollständig für die Zwischenabflussbildung zur Verfügung. Durch den Faktor 0,5 wird der Schichtungsquotient $\log(Ks_o/Ks_u) = 2$ daher auf 1 bzw. auf 100 % skaliert. Größere Schichtungsquotienten werden ggf. durch Gl. 9b nach Art eines Tiefpassfilters auf 1 begrenzt. In diesem Fall hängt w_i nur von der Hangneigung ab. Die Nullstelle der Wichtungsfunktion liegt bei $Ks_o = Ks_u$ und kennzeichnet ungehinderte Sickerung.

Das kombinierte Wichtungsgrid $w_{f,i}$ (Gl. 8) dient analog zu Gl. 5 als Grundlage zur Berechnung eines kombinierten Topographischen Index (Gl. 10):

$$c_{f,i} = \ln \frac{A_{wf,i}}{\tan \beta} \quad (\text{Gl. 10})$$

Analog zum Wichtungsfaktor w_f kann $w_{f,i}$ um $-\Delta w$ in den negativen Bereich verschoben werden, um bei Durchlaufen der Fließakkumulation Reinfiltration zu simulieren. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass Infiltration lediglich auf Standorten mit geringer Zwischenabflussintensität simuliert wird.

größere β führen zu einer stärkeren Gewichtung der Neigung. Nahe 90° gehen die Werte jedoch gegen ∞ .

6.2 Geländeuntersuchungen und Laboranalysen

Zur Validierung des Regionalisierungskonzepts kommt eine Kombination von Methoden aus Boden- und Vegetationskunde, Hydrologie und Geomorphologie auf verschiedenen Raum und Zeitskalen zum Einsatz. Je nach Hydrotyp ist eine unterschiedliche Methodenkombination zweckmäßig. Die Gelände- und Labormethoden werden von der großen zur kleinen Skala abgehandelt. Abschließend werden ein physikalisch basiertes Niederschlags-Abfluss-Modell sowie Fernerkundungsmethoden als Validierungsmöglichkeiten vorgestellt.

6.2.1 Hydrologische Messungen

Zielsetzung: Als Input- und Outputgrößen des hydrologischen Systems Dürreychgebiet müssen Niederschlag und Abfluss auf der Skala des Einzugsgebietes und seiner Teileinzugsgebiete untersucht werden. Insbesondere hydrologische Simulationsmodelle benötigen diese Daten in hoher Auflösung. Die Datenerhebungen sowie die Wartung der Messeinrichtungen wurden von der AG Dürreych im Kollektiv bei gemeinsamen Messfahrten durchgeführt und die Daten in der Projektdatenbank für alle Projektmitglieder bereit gestellt (Kap. 1).

Gebietsniederschlag: Niederschlagsmengen und -intensitäten wurden an drei Stellen mittels Kippwaage (Auflösung 0.1 mm) in 10-min-Schritten aufgezeichnet und mit Hellmann-Totalisatoren auf die wöchentliche Niederschlagssumme geeicht:

- Hauptpegel (DÜ); 590 m NN
- Klimastation Forsthaus (FH); 625 m NN
- Klimastation Freifläche (FF); 875 m NN

Da die drei Stationen bei fast allen Ereignissen sehr gleichmäßig überregnet wurden, wurde nur eine einfache Höhenregression zwischen

den beiden Klimastationen zur Gebietsniederschlagsbestimmung aufgestellt. Bei Datenverlusten wurden die Daten der benachbarten Stationen des Deutschen Wetterdienstes Doppel und Bad Wildbad/ Sommerberg ausgewertet. Wenn nicht anders angegeben, werden im Rahmen dieser Arbeit Niederschlagsdaten der Station Forsthaus (FH) verwendet.

Bestandsniederschlag: Um den Interzeptionsverlust exemplarisch zu erfassen, wurde an 2 Standorten (Intensivmessprofile 1 und 2) mit jeweils vier Hellmann-Totalisatoren der wöchentliche Niederschlag im Kronenbereich bzw. im Zwischenkronenbereich eines Fichtenaltbestandes erfasst.

Energiebilanz: Zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration ist die Erfassung von Strahlungsbilanz, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchte erforderlich. Diese vier Messgrößen wurden an den beiden Klimastationen mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min erfasst.

Abflussuntersuchungen: Das fest installierte Abflussmessnetz umfasst neben dem Hauptpegel (DÜ) fünf Teileinzugsgebiete (vgl. Anhang 1):

- Lerchenstein (LE)
- Stillwasserhütte (SH)
- Seemißkar (SE)
- Hirschklänge (HI)
- Stillwasserquelle (SQ)

Die Teileinzugsgebiete wurden mit der Absicht ausgewählt, die verschiedenen morphologischen Grundgestalten des Dürreychgebiets zu repräsentieren:

Stillwasserhütte (SH) mit Lerchenstein (LE) sind charakteristisch für die feuchten, relativ flachen, oft von Drainagegräben durchzogenen Hochlagen. Sie sind ineinander geschachtelt und umfassen das gesamte 1.5 km² große obere Einzugsgebiet des Dürreychgebiets.

Das Seemißkar (SE) als ausgeprägteste Karbbildung im Dürreychgebiet ist ein rundliches Einzugsgebiet mit steilen Rückwänden und flachem, torferfülltem Karboden. Es bietet damit besondere Bedingungen für die Abflussbildung.

Das Seitentälchen des Hirschklingsbachs (HI) ist eine weitere, undeutlichere Karbbildung. Das Tal ist jedoch stärker V-förmig entwickelt, besitzt steile Seitenhänge und hat einen relativ großen und flachen oberen Einzugsgebietsteil. Der perennierenden Stillwasserquelle (SQ) kann im Rahmen der Untersuchungen zum oberflächennahen Abflussgeschehen kein sinnvolles oberes Einzugsgebiet zugeordnet werden. Die Kluftquelle dient vielmehr als Referenzsystem für die Beurteilung der Abflussreaktion der anderen Teileinzugsgebiete. Weitere Messstellen wurden lediglich zu bestimmten Stichtagen beprobt.

Instrumentierung: Die Auslässe der Teileinzugsgebiete wurden zu Pegelmessstellen ausgebaut. Während der Messpunkt Stillwasserquelle mit einem 90°-V-Meßwehr bestückt wurde, wurden alle übrigen Messwehre als kombinierte V- und Rechteckmesswehre ausgeführt, um die hohen Durchflussschwankungen aufzunehmen. Geeicht wurden die Messwehre mit Gefäßmessungen sowie Salzverdünnungsmessungen bei höheren Abflüssen (CASPER 2002). Wasserstände wurden entweder mit mobilen Drucksonden der Firma ISCO Inc., mit Trommelschreibern der Firma OTT oder Ultraschallsensoren der Firma ZÜLLIG aufgezeichnet. Die Abflüsse der Teileinzugsgebiete wurden in 6 bzw. 10-min-Intervallen erfasst und zu Stundenwerten aggregiert. Die Geräte der Firma ISCO ermöglichten es, automatisch Wasserproben für hydrochemische Untersuchungen zu entnehmen.

Hydrochemische Untersuchungen: Im Rahmen der anderen Teilprojekte der AG Dürreych wurden chemisch-physikalische Wasseruntersuchungen als Stichtagbeprobungen durchgeführt (CASPER 2002, VOLKMANN 2002, THIEMANN 1998, KASSEBEER 1997). Mindestens wöchentlich wurden pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit an allen Pegeln bestimmt. Intensiv wurde der Gehalt und die Dynamik an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) in Boden- und Oberflächenwasser von VOLKMANN (2002) untersucht. DOC, Sauerstoffisotopenmessungen und andere Wasserinhaltsstoffe wurden als natürliche Tracer für Abflussprozesse verwendet (CASPER 2002).

6.2.2 Refraktionsseismik

Zielsetzung: Refraktionsseismische Messungen sollten Aufschluss über die Mächtigkeit der Schuttdecken an charakteristischen Standorten des Dürreychgebiets geben. Da Aufschlüsse bis zum Festgestein nur spärlich vorhanden sind und tiefere Bohrungen fehlen, musste auf diese indirekte Bestimmungsmethode zurückgegriffen werden. Hydrologischer Hintergrund der Untersuchungen ist die Frage, ob das Interface Schuttdecke / Festgestein für die schnelle Abflussbildung eine Rolle spielt.

Vorgehensweise: Die Messanordnung ist schematisch aus Abb. 25 zu ersehen.

Mit einer Schallquelle – Hammer und Schlagplatte – wird eine Schallwellenfront erzeugt, die mit einer bestimmten Laufgeschwindigkeit (v_1) in den oberflächennahen Untergrund eindringt. Trifft die Wellenfront auf eine Gesteinsschicht mit einer anderen Laufgeschwindigkeit (v_2), wird – analog zur optischen Brechung – an der Schichtgrenze ein Teil der Welle zurückgebrochen, ein anderer Teil dringt in die untere Schicht ein. Ab einem kritischen Eindringwinkel

läuft die Wellenfront an der Schichtgrenze entlang und strahlt dabei refraktierte Wellen, auch Kopfwellen genannt, zur Oberfläche hin ab. Die Laufzeit der Wellen wird von einer Geophonkette automatisch aufgezeichnet und gegen die Geophondistanz abgetragen. Aus dem aufgezeichneten Seismogramm wird – meist Computer gestützt – die Tiefe der Schichtgrenze bestimmt. Nähere Ausführungen zur Methode finden sich in KNÖDEL et al. (1997).

Messpunkte: Die Messungen im Dürreychgebiet wurden im Sommer 1999 an fünf Standorten durchgeführt. Die Standorte sollten typische Reliefpositionen repräsentieren und wurden möglichst in die Nähe weiterer Messeinrichtungen gelegt (vgl. Anhang 7-1):

1. Oberhang/Hochfläche (Klimastation FF)
2. Hang P1 (Messprofil Zwischenabfluss)
3. Hang P2 (Messprofil Tiefensickerung)
4. Unterhang Häuserwald im unteren Einzugsgebiet
5. Talboden am Gebietsauslass (Pegel DÜ)

Folgende Messbedingungen wurden gewählt:

- Messanordnung: Geophonabstände von 1 bis 2 m, Auslage in Hangfallrichtung sowie senkrecht dazu
- Schallquelle: Hammerschlagplatte
- Schlagpunktabstände: 5,5 m bzw. 11 m
- Signaldetektion: Digitale 12-Kanal-Apparatur Firma Geometrics
- Einmessen der relativen Geländehöhen mittels Theodolith

Die Auswertung der Feldmessungen erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro GUS - Geophysikalische Messungen (Karlsruhe). Dabei wurden nur die Kompressionswellen berücksichtigt. Ausgehend von einem Startmodell, das die eingemessene Topographie enthält, wurden die Laufzeiten der Kompressionswellen mittels finiter Differenzen ermittelt. Das Modell wurde iterativ an die gemessenen Laufzeiten angepasst, bis eine mittleren Abweichung im Bereich der Messungenauigkeit (ca. 1 msec) erreicht war.

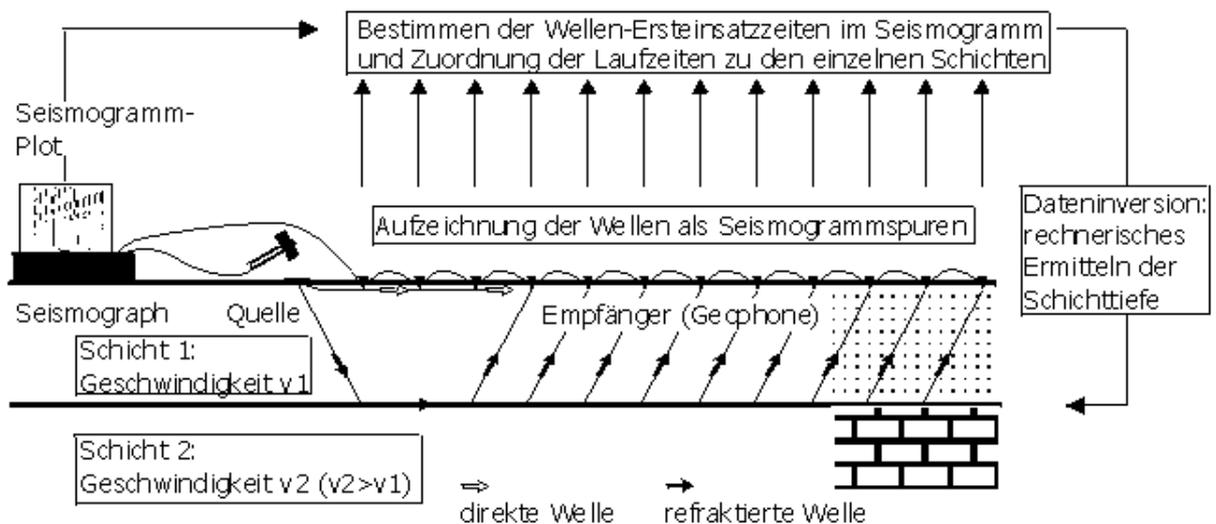


Abb. 25: Vereinfachtes Prinzip der Refraktionsseismik für einen Zwei-Schichten-Fall (HECHT, 2000)

Methodenkritik: Seismische Methoden zur Ermittlung von Schuttdeckenmächtigkeiten wurden erfolgreich u.a. von BARSCH & FLÜGEL (1988) sowie im Buntsandstein-Schwarzwald von SEEGER (1990) erfolgreich angewandt. Im Dürreychgebiet liegen leider keine Bohrungen zur Eichung der Schichtgrenztiefen vor. Für den Felshorizont wurde daher auf Grundlage einer geschätzten Kompressionswellengeschwindigkeit von 2000 m/s eine Minimaltiefe errechnet.

6.2.3 Geomorphologische Untersuchungen

Kartierung der Bachaue: Die Bachaue ist wegen ihrer direkten Kopplung an den Vorfluter für die Abflussbildung von besonderer Bedeutung. Insbesondere kann Sättigungsflächenabfluss zu schnellen Abflussbeiträgen führen (Kap. 2). Es war deshalb zu klären, auf welchen Flächen geeignete morphologische Bedingungen zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss herrschen.

Im Sommer 1999 wurde die Talaue des Dürreychbachs untersucht hinsichtlich

- Längsgliederung des Tals in Abschnitte unterschiedlicher Talentwicklung bzw. unterschiedlichen Fließregimes
- Quergliederung des Tals zur Abgrenzung rezenter und älterer Terrassenbildungen sowie potenzieller Sättigungsflächen.

Zur Längsgliederung des Tals wurde das DHM zur Hilfe genommen und mit Geländebegehungen überprüft.

Zur Abgrenzung von Terrassen wurden mit einfachen Hilfsmitteln (Maßband, Fluchtstab, Neigungsmesser) zunächst mehrere Querschnitte durch charakteristische Abschnitte der Talaue gelegt und skizziert. Zugleich wurden Indikatorpflanzen aufgenommen, die zur Identifizierung rezenter Überflutungsflächen sowie

von Flächen mit oberflächennaher Wasserbewegung beitragen (vgl. Vegetationskundliche Untersuchungen, Kap. 6.2.4). Nach dieser Vorarbeit wurde die Aue flächenhaft kartiert.

Erosionskartierung: Weganschnitte können den oberflächennahen Zwischenabfluss zum Austritt zwingen und beschleunigt oberirdisch abfließen lassen. Die Wasseraustritte sowie die dadurch verursachten Erosionserscheinungen auf Wegen können daher als Indikatoren für die Lokalisierung zwischenabflussaktiver Hänge herangezogen werden. Auch oberflächennahe Rutschungen deuten auf übersättigte Oberböden und oberflächennahe Abflüsse hin. LANGBEIN & MÜLLER (1986) nutzen in ähnlicher Weise Erosionsspuren und Rutschungen zur Erstellung einer Karte des beobachteten Oberflächenabflusses und potenziellen Hangwasserzuges.

Zunächst im Rahmen von Voruntersuchungen (SANDER 1998) und in erweitertem Umfang nach den Jahrhundertniederschlägen Ende Oktober 1998 wurden die Erosionserscheinungen auf ca. 70 km Wegenetz des Dürreychgebiets im Maßstab 1 : 5.000 kartiert. Zahlreiche Schleif- und Maschinenwege wurden dazu in der Grundkarte ergänzt, sofern sie Erosionsspuren zeigten. Die Kartierung erfolgte nach einem von SANDER (1998) in Anlehnung an DVWK (1996) entwickelten Kartierschlüssel in fünf Intensitätsstufen (Tab. 18). Auf befestigten Wegen wurden ersatzweise Erosionserscheinungen der Gräben aufgenommen, sofern keine Schäden an der Fahrbahndecke zu bemerken waren.

Tab. 18: Klassifizierung der Erosionserscheinungen im Dürreychgebiet

Erosionsintensität		Merkmale
1	keine	Keine sichtbaren Erosionsmerkmale
2	gering	Leichte Feinmaterialausspülung, Erosionsrillen < 10 cm, Abflusstreppchen
3	mittel	Deutliche Ausspülung und Ablagerung von Feinmaterial, Freilegung von Grobmaterial
4	stark	Kaum mehr Feinmaterial vorhanden, Auskolkungen, tiefe Erosionsrinnen
5	sehr stark	Tiefe Erosionsgräben mit Seitenerosion, Erosionstiefen immer > 40 cm

Des weiteren wurden entlang des Wegenetzes erfasst:

- Hangwasseraustritte
- Hangrutschungen
- Erosionserscheinungen an hangseitigen Wasserabschlägen
- Feuchtezeiger auf Wegen

Bestimmung von Rundungsgraden: Im Zuge einer Hochwasserbaumaßnahme im unteren Talabschnitt wurde der Hangfuß entlang des Dürreychbachs auf 350 m Länge bis zu 5 m hoch angeschnitten. Hier bot sich die Gelegenheit, Hangentwicklungsprozesse beispielhaft zu studieren.

Im Gelände wurde die Vermutung aufgestellt, dass ein fluviatiler Schotterkörper von Hangschutt überfahren wurde. Zur Überprüfung der Hypothese wurde in drei Tiefen Material aus der Aufschlusswand entnommen und die Skelettfraktion > 22,4 mm auf ihren Rundungsgrad untersucht:

- Schotterkörper, ca. 1 m über Mittelwasserniveau
- Fließerde mit Plattengefüge, ca. 2 bis 2,5 m über Mittelwasserniveau
- Bleichhorizont, ca. 3,5 m über Mittelwasserniveau

Das Probenmaterial wurde vor Ort mit einem Analysensieb nach DIN 4187 (ISO 565-T1) mit Quadratlochung nass gesiebt. Der Stichpro-

benumfang betrug zwischen 342 und 504 Steinen je Probe. Die Ansprache des Rundungsgrades erfolgte in Anlehnung an REICHELT (1961) mit den vier Habitusklassen kantig / kantengerundet / gerundet / stark gerundet (Tab. 19). Zur besseren Differenzierung wurde noch eine weitere Klasse „schwach kantengerundet“ eingefügt:

Tab. 19: Rundungsgrade nach REICHELT (1961), ergänzt

Rundungsgrad		Habitus
k	Kantig	Form beliebig, Kanten nahezu bruchfrisch
swkg	Schwach kantengerundet	Form beliebig, Kanten meist abgegrust, Oberfläche rau und unregelmäßig
dkg	Deutlich kantengerundet	Nicht durchgängig konvex, Kanten noch erkennbar, Oberfläche meist noch unregelmäßig
g	Gerundet	Deutlich konvex, Kanten nur noch angedeutet, rundlich, ei- oder linsenförmig, Oberfläche geglättet
stg	Stark gerundet	Regelmäßig konvex, rundlich, ei- oder linsenförmig, Oberfläche glatt

6.2.4 Vegetationskundliche Untersuchungen

Zielsetzung: Die Vegetation als integraler Standortsindikator der Bodenfeuchte ist geeignet zur Kartierung und Abgrenzung abflussbedeutsamer Flächen. Daher sollen ausgewählte Flächen mit vermutetem Sättigungsabfluss oder schnellem Zwischenabfluss auch vegetationskundlich untersucht werden.

Vorgehensweise: Im Sommer 1999 wurden im Dürreychgebiet Vegetationsaufnahmen angefertigt und daraus abgeleitete Vegetationstypen mit Indikatorwert für die Abflussbildung im Maßstab 1 : 2.500 kartiert. Die Untersuchungen wurden auf Flächen begrenzt, die für die schnelle Abflussbildung besonders bedeutsam sind:

- Alle vorfluternahen Flächen und Quellbereiche

- Sonstige Flächen im Bereich von ausgeprägten Tiefenlinien
- Ausgewählte Feuchtflächen der Hochlagen sowie ein trockener Unterhang

Vegetationsaufnahmen: Auf den Aufnahme­flächen wurden die höheren Pflanzenarten getrennt nach Baum-, Strauch- und Krautschicht bestimmt und ihre Deckung bzw. Artmächtigkeit nach der Skala von BRAUN-BLANQUET geschätzt (DIERSCHKE 1994). Nicht bestimmt wurden Moose; Torfmoosvorkommen (*Sphagnum spec.*) wurden jedoch vermerkt. Nicht einheimische Forstbaumarten wie Sitkafichte, Japanische Lärche u.a. wurden nicht bis zur Art bestimmt, weil sie für die standörtliche Aussage wenig Bedeutung haben.

Tabellenarbeit: Anhand von 53 Vegetationsaufnahmen wurden pflanzensoziologisch ranglose Vegetationstypen gebildet. Dabei wurden zwei Strategien verfolgt:

- Auflisten aller Aufnahmen und Arten in einer Vegetationstabelle. Manuelles Sortieren der Tabelle, ausgehend von Arten mit mittlerer Stetigkeit (Vorgehensweise vgl. DIERSCHKE 1994).
- Gruppieren von Arten mit schwach ausgeprägtem Differenzialcharakter nach ihrem Deckungsgrad.

Den Vegetationstypen und ihren repräsentativen Arten wurde ein z.T. regionalspezifischer, qualitativer Indikatorwert für oberflächennahe Abflussvorgänge zugeordnet. Grundlage für diese Zuordnung sind neben den Zeigerwerten (ELLENBERG et al. 1992) die Ökologischen Artengruppen (AK STANDORTSKARTIERUNG 1996), allgemeine Angaben zur Ökologie der Arten (OBERDORFER 1994), regionale Untersuchungen von MURMANN-KRISTEN (1987), SCHWABE (1987) sowie eigene Beobachtungen (Anhang 6-1).

Kartierung: Grundlage der Kartierung waren die Leitarten der erarbeiteten Vegetationstypen sowie ihre Deckungsgrade. Bei spärlicher Gesamtdeckung der Krautschicht war die Abgrenzung von Flächen mit Indikatorwert erschwert. Daher wurde die relative Dominanz d der Indikatorvegetation – d.h. der Flächenanteil der Indikatorvegetation $D_{Ind.}$ an der Gesamtdeckung $D_{ges.}$ der Krautschicht (Gl. 14) – als Kartierkriterium zur Hilfe genommen. Bei Gesamtdeckungen $\geq 10\%$ wurden Kernbereich und Grenzbereich unterschieden. Unterhalb von ca. 10 % Gesamtdeckung wird die Schätzunsicherheit zu groß (Tab. 20).

$$d = \frac{D_{Ind.}}{D_{ges.}} \quad (\text{Gl. 14})$$

Tab. 20: Kartierschlüssel für die relative Deckung d der Indikatorvegetation

Kartierstatus	$D_{ges.} \geq 0,1$	$D_{ges.} < 0,1$
	relative Deckung d	
Nicht kartiert	< 0,1	< 0,33
Grenzbereich	$\geq 0,1 - 0,33$	$\geq 0,33$
Kernfläche	$\geq 0,33$	-

6.2.5 Aufnahme von Bodenprofilen

Zielsetzung: Durch die Anlage von Bodenprofilen sollte einerseits die Tauglichkeit der Forstlichen Standortskarte als Quelle hydrologisch relevanter Bodenparameter überprüft werden. Andererseits sollten detailliertere Daten für eigene Auswertungen und Proben für Laboruntersuchungen gewonnen werden.

Vorgehensweise: Nach Vorsondierung mit dem 1 m-Bohrstock wurden schwerpunktmäßig in zwei hydrologisch unterschiedlich reagierenden Teileinzugsgebieten etwa 40 Profilgruben angelegt:

- SH: Hochflächen im oberen Einzugsgebiet

- FK: Seitentälchen mit Karbildung im unteren Einzugsgebiet

Die Profile sollten die wichtigsten der im Gebiet ausgewiesenen 35 Forstlichen Standortseinheiten beispielhaft repräsentieren (Anhang 2-4 und Anhang 4-4). Dazu wurden die großflächig verbreiteten Einheiten stärker berücksichtigt: Wie Abb. 26 zeigt, machen nur acht Standortseinheiten bereits 72 % der Einzugsgebietsfläche aus. Unabhängig von ihrem Flächenanteil wurden jedoch auch Feuchtflecken verstärkt untersucht, da sie für die Abflussbildung von besonderer Bedeutung sind. Bei der Auswahl der Profilstandorte wurden die Übergangsbereiche zwischen den Standortseinheiten ebenso vermieden wie offensichtliche Sonderstandorte.

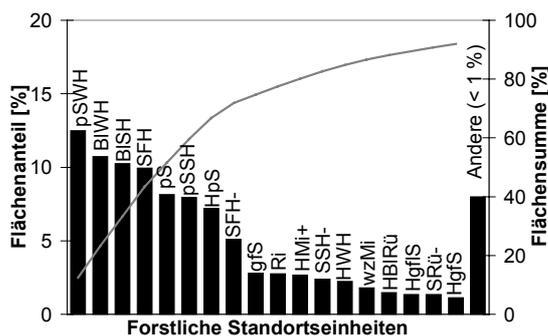


Abb. 26: Flächenanteile (Balken) und Flächensumme (Kurve) der Forstlichen Standortseinheiten im Gesamteinzugsgebiet in [%]

Die Profile wurden zumeist bis in eine Tiefe von ca. 1 m aufgegraben. Wenn möglich, wurden dafür Weganschnitte genutzt. Nicht immer konnte der C-Horizont erreicht werden.

Die Lage im Relief wurde charakterisiert durch:

- Meereshöhe in m NN (aus der DGK 5)
- Hangneigung (°) und Exposition (Neigungsmesser und Peilkompass, Firma Suunto)
- Wölbung (qualitativ nach KA 4)
- Reliefformtyp und Mikrorelief (verbal, in Anlehnung an KA 4 und FSA 5)

Ferner wurden Waldtyp, ggf. Feuchtezeiger sowie die aktuelle Witterung festgehalten.

Die Nomenklatur von Horizontsymbolen und Bodentypen richtet sich nach AK BODENSYSTEMATIK (1998). Gegenüber der KA 4 (AG BODEN 1994) erfolgten kleinere Modifikationen, von denen hier v.a. folgende Änderung bedeutend ist: Hydromorphe Bändchen-Böden, die zuvor zur Klasse der Podsole zählten („Bändchen-Staupodsol“), werden nun – konsequenterweise – zu den Stagnogleyen („Bändchen-Stagnogley“) gestellt. Folgende Bodeneigenschaften wurden im Gelände nach KA 4 erfasst:

- Humusform und -mächtigkeit
- Horizonttiefe und Schärfe der Horizontgrenzen
- Bodenfarbe (verbale Ansprache ohne Farbtafel)
- Humusgehalt (Ansprache nach der Farbe)
- Hydromorphiemerkmale
- Bodenfeuchte
- Vernässungsgrad
- Gefügeform
- Röhren und sonstige Makroporen
- Lagerungsdichte (Schätzung aus Eindringwiderstand mit Messer und ggf. Taschenpenetrometer, Firma Eijkelkamp)
- Substanzvolumen und Zersetzungsgrad bei Torfen (Quetschprobe)
- Durchwurzelungsintensität (Auszählung)
- Bodenart (Fingerprobe)
- Skelettgehalt (Schätzung der Flächenanteile an der Profilwand)
- Sonstige Merkmale wie Humusfleckung, Ortsteinbildung, Sauerbleichung, Wurzelreste etc.

Die Profilaufnahme geschah stets unter dem Gesichtspunkt, den Bodenwasserhaushalt zu charakterisieren. Besonderes Augenmerk galt

deshalb hydromorphen Merkmalen, potenziell wasserhemmenden Gefügeausbildungen, Makroporen, ggf. Wasseraustritten, sowie dem Skelettgehalt.

Methodenkritik: Blocküberdeckung und extreme Steingehalte erschwerten mitunter die Profilanlage und beeinflussten somit die Wahl des Profilstandortes. Infolgedessen sind skelettreiche Standorte systematisch unterrepräsentiert. Auch die Repräsentativität eines Profils für seine Umgebung lässt sich nur begrenzt mit Bohrstocksondierungen prüfen.

Fast alle bodenkundlichen Geländemethoden beruhen auf Schätzungen und sind dementsprechend mit Schätzunsicherheiten verbunden. Beispielsweise dürfte der Fehler bei der Abschätzung des Skelettgehalts für skelettreiche Böden bei mindestens 10 % liegen. Durch Geländeerfahrung sowie Rückkopplung mit Laborbefunden lassen sich jedoch für die meisten Parameter hinreichend genaue Schätzergebnisse erzielen, die zumindest innerhalb des untersuchten Bodenkollektivs Dürreych untereinander vergleichbar sind. Erfahrungsgemäß treten die Schätzfehler oft noch hinter die räumliche Heterogenität der Bodenparameter zurück. Folglich versprechen genauere Messergebnisse am Einzelpunkt keinen wesentlichen Erkenntnisgewinn für die Fläche.

6.2.6 Messungen zum Bodenwasserhaushalt

Zielsetzung: Bodenfeuchte- und Saugspannungsmessungen können Aufschluss sowohl über den längerfristigen Bodenwasserhaushalt, als auch über das kurzfristige Befeuchtungs- und Austrocknungsverhalten des Bodens geben. Die Messungen sollten dazu dienen, die Modellvorstellungen der Abflussbildung auf der Profilskaale exemplarisch zu belegen.

Messpunkte: Dazu wurden drei Standorte mit unterschiedlichen Abflussbildungsbedingungen ausgewählt (Anhang 1-1):

- Klimastation FF: Schwach geneigter wechselfeuchter Standort mit Sättigungsflächenabfluss
- Intensivmessprofil P1: Hangfeuchter steiler Standort mit Zwischenabfluss
- Intensivmessprofil P2: Flacher Sickerstandort mit sporadischem Hangwasserzuschuss

Vorgehensweise: An den genannten Standorten wurden Bodenprofile angelegt und mit TDR-Feuchtemesssonden in verschiedenen Tiefen ausgestattet. Die Sonden der Firma IMKO arbeiten nach dem Prinzip der Time Domain Reflectometry (TDR) (STACHEDER 1996). Das Messprinzip der Zwei- oder Dreistabsonden beruht auf der scheinbaren Dielektrizitätszahl ϵ des Bodens, die maßgeblich von flüssigem Wasser bestimmt wird (SUMNER, 2000). Mit Hilfe eines Eichsubstrats von bekanntem Porenvolumen wurde ϵ gegen den Wassergehalt θ geeicht. Da die TDR-Messung nur bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunkts sinnvoll ist, wurde parallel zur Bodenfeuchte auch die Bodentemperatur mit Pt100-Sonden gemessen.

An den beiden Intensivmessprofilen wurde zudem die Saugspannung durch Tensiometer mit elektronischem Druckaufnehmer der Firma UMS, München bestimmt. Des Weiteren wurden im Rahmen der Untersuchungen von VOLKMANN (2002) Saugkerzen zur Bodenwasserentnahme eingebaut. Alle Messsonden wurden horizontal in die Profilwand installiert. Die Grube wurde nach dem Einbau wieder verfüllt, um Störungen des natürlichen Bodenwasserhaushalts zu minimieren.

Methodenkritik: Prinzipiell sind bei Bodenfeuchtemessungen in skelettreichen Waldböden große Heterogenitäten zu erwarten. Zu-

dem musste sich die Anordnung der Sonden pragmatisch an feinmaterialreichen Stellen der Profilwand orientieren. Absolute Messwerte können daher nur bedingt interpretiert und aufeinander bezogen werden.

Die gerätebedingte Messungenaugigkeit der verwendeten TDR-Sonden liegt nach Herstellerangaben bei 1-2 Vol-% (Firma IMKO mdl.). Die wartungsfreien Geräte lieferten robuste Messungen. Mit Vorbehalt müssen dagegen Tensiometermessungen in Oberböden interpretiert werden. Hier kann Lufteintritt in die Tensiometerrohre die Messung verfälschen.

6.2.7 Hydrophobizität der organischen Auflage

Zielsetzung: Aus der Literatur ist bekannt, dass Humusaufgaben und die Streu bestimmter Pflanzen (u.a. *Vaccinium* spp. und *Calluna vulgaris*, die auch im Dürreychgebiet häufig sind) hydrophob wirken können. Diese wasserabweisenden Auflagen können die Infiltration beeinflussen (DOERR et al., 2000).

Vorgehensweise: Um derartige Effekte zu überprüfen, wurden organische Auflagen nach einer sommerlichen Trockenphase auf ihre Hydrophobizität exemplarisch untersucht. Die Probenstandorte sollten die Bandbreite der Humusformen und Torfe im Dürreychgebiet repräsentieren und wurden möglichst in die Nähe weiterer Messeinrichtungen gelegt.

Zur Abschätzung der Hydrophobizität wurden wiederholt einige Wassertropfen auf die feldfrische Probe aufgebracht und die Zeit bis zur Benetzung gemessen und gemittelt. Die unterschiedlich feuchten Proben wurden nach Lufttrocknung nochmals untersucht. Die Hydrophobizität lässt sich nach BISDOM et al. (1993) in fünf Klassen einteilen (Tab. 21).

Tab. 21: Hydrophobizitätsgrade und Benetzungszeiten (BISDOM et al., 1993)

Stufe	Hydrophobizitätsgrad	Benetzungszeit [s]
1	Nicht hydrophob	< 5
2	Leicht hydrophob	5 – 60
3	Stark hydrophob	60 – 600
4	Sehr stark hydrophob	600 – 3600
5	Extrem hydrophob	> 3600

Zu unterscheiden sind eine durch Austrocknung bedingte vorübergehende sowie eine anhaltende Hydrophobizität. Ab der Stufe 4 lässt sich von einer andauernden Hydrophobizität ausgehen. Stärkere Niederschläge auf derartige Auflagen können u.U. zu Oberflächenabfluss führen.

Methodenkritik: Die verwendete Methode ermöglicht eine grobe Einschätzung der Hydrophobizität. Durch Mittelwertbildung der Benetzungszeiten lässt sich ein hinreichend genaues Ergebnis erzielen. Die Benetzbarkeit hängt stark von der aktuellen Feuchte der Auflage ab und ist daher im feldfrischen Zustand nicht direkt vergleichbar. Daher wurde der Versuch an den lufttrockenen Proben wiederholt. Allerdings werden auf diese Weise unrealistisch niedrige Feuchtegehalte erzeugt, wie sie im Gelände nicht auftreten.

6.2.8 Korngrößenanalyse und Humusgehaltbestimmung

Zielsetzung: Korngrößenanalysen und Humusgehaltbestimmung sind die Grundlage zur Abschätzung pedohydrologischer Kenngrößen aus Tabellenwerken, insbesondere der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (AG BODEN 1994, LGRB 1998). Für die im Nordschwarzwald verbreiteten Ortsteinhorizonte ist dieses Verfahren vermutlich nicht geeignet, weil das Kittgefüge die Porenverteilung stark beeinflusst. Durch Dünnschliffuntersuchungen sollte

geklärt werden, inwieweit das Bodengefüge bei der Abschätzung bodenhydraulischer Kennwerte stärker berücksichtigt werden muss.

Probenauswahl: Aus praktischen Gründen ist eine statistisch befriedigende Laborbeprobung der 35 Forstlichen Standortseinheiten auf 7 km² nicht durchführbar. Die Laboruntersuchungen sollen lediglich die bodenkundlichen Geländeuntersuchungen (s.o.) unterstützen. Dazu wurden Proben aus typischen Horizonten der Standortseinheiten sowie aus tieferen Schuttdeckenlagen entnommen. Verzahnungshorizonte und heterogene Übergangshorizonte – häufig Bsh- oder Bhs-Horizonte – wurden nicht beprobt.

Korngrößenanalysen: Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte nach DIN 19683 Bl. 2. Es wurden 10 bis 20 g des getrockneten Feinbodens eingewogen, mit demineralisiertem Wasser und Natriumpyrophosphatlösung versetzt und zur Zerstörung der Aggregate geschüttelt. Danach wurden die Sandfraktionen durch Nasssiebung abgetrennt. Aus der Restsuspension wurden nach der Pipett-Methode die Schluff- und Tonfraktionen bestimmt. Entsprechend der prozentualen Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen der Proben wurden die Bodenarten gemäß AG BODEN (1994:134f) bestimmt.

Humusgehaltbestimmung: Der Humusgehalt wurde durch Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 19684, T.3 ermittelt. Dazu wurden etwa 2 g Feinboden eingewogen, bei 105 °C vorgetrocknet und bei 550 °C im Muffelofen geglüht. Die Glühverluste (GV) wurden um ihren Tongehalt korrigiert, indem pro Gewichtsprozent Ton 0,1 % des Glühverlustes abgezogen wurde (Gl. 12). Diese Vorgehensweise ist für sehr sandige Böden, wie sie im Dürreychgebiet überwiegend vorkommen, hinreichend genau (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

$$GV_{korr} = GV - 0,1 \cdot \%Ton \quad (\text{Gl. 12})$$

Der Gehalt an Organischer Substanz (OS) wurde durch Multiplizieren des korrigierten Glühverlustes mit dem Faktor 1,724 (Gl. 13) berechnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998:64):

$$OS = 1,724 \cdot GV_{korr} \quad (\text{Gl. 13})$$

Der OS-Wert kann wiederum einer Humusklasse gemäß AG BODEN (1994:108) zugeordnet werden.

6.2.9 Dünnschliffuntersuchungen

Zielsetzung: Auf herkömmliche Methoden zur Ermittlung bodenhydraulischer Parameter musste wegen der z.T. extremen Skelettgehalte verzichtet werden. Stattdessen wurden auf Korngröße, Humusgehalt und Lagerungsdichte beruhende Schätztabelle angewendet. Die hydraulische Leitfähigkeit der verbreiteten Ortsteinbildungen oder plattig verfestigten tieferen Schuttdecken wird jedoch nach diesem Verfahren vermutlich überschätzt, da Kittsubstanzen oder sonstige die Sickerung hemmende Gefügemerkmale nicht ausreichend berücksichtigt werden. Durch Dünnschliffuntersuchungen an typischen Boden- und Schuttdeckenhorizonten sollte geklärt werden, inwieweit derartige Effekte bei der Abschätzung von Durchlässigkeitsklassen berücksichtigt werden müssen.

Vorgehensweise: Dazu wurden ungestörte Proben aus 7 Horizonttiefen eines Bändchenstagnogleys (Messprofil P 1) sowie aus weiteren typischen Einzelhorizonten anderer Standorte (Anhang 4-4) entnommen und in Kleinbild-Filmdosen transportiert. Die Proben wurden im Trockenschrank bei 60°C getrocknet und unter Vakuum in ein Epoxidharz (Araldite, Fa. Ciba) eingegossen. Dabei werden sämtliche Porenräume der Probe erfüllt. Die

erhärteten Proben wurde geschnitten und auf etwa 30 µm Schichtdicke dünn geschliffen. Die Schnittrichtung verlief senkrecht zur natürlichen Lagerung der Probe bzw. zur Schichtung. Bei der polarisationsmikroskopischen Untersuchung und Klassifikation der Dünnschliffe wurden berücksichtigt:

- Prozentualer Anteil von Grobporen
- Prozentualer Anteil an mineralischer Grob- und Feinsubstanz
- Erscheinungsbild von Poren und Festphase wie räumliche Verteilung, Einregelung, Hüllen-/Brückengefüge, organische Anteile

Die Dünnschliffe wurden im Rahmen einer Examensarbeit (SCHÜTZ, 2001) mit einem Zeiss Axioskop mit CDD-Color-Videokamera untersucht, die mit einem PC verbunden ist. Zur quantitativen Bestimmung von Porenanteilen und mineralischer Grob- und Feinsubstanz diente die Bildverarbeitungssoftware Image Pro Plus 4.1 (MEDIA CYBERNETICS, L.P. 1999). Bei homogenen Proben wurden jeweils drei ca. 2 x 3 mm große Bildausschnitte der Probe in 25-facher Vergrößerung ausgewertet und die Ergebnisse gemittelt. Die Bildklassifikation ging in folgenden Schritten vor sich:

- Optimierung der Mikroskopeinstellungen am Bildschirm (*live preview*)
- Längenkalibrierung mit Objektmikrometer
- Einlesen des Bildes bei gekreuzten Polarisatoren
- Bearbeitung (*enhancement*) des Bildes mit dem *median*-Filter (Medianwert aus wahlweise 3 x 3 bis 7 x 7 Pixeln)
- Manuelle Klassifikation mit Hilfe der *color cube based* bzw. *histogram based segmentation*-Funktion
- Quantitative Auswertung des Klassifikationsergebnisses mit der *count*-Funktion (v.a. Flächenanteile und -größen)

Während des gesamten Klassifikationsvorgangs wurde das Klassifikationsergebnis visuell durch Vergleich mit dem Originalbild überwacht.

Zu den Dünnschliffproben wurden Korngrößenanalysen angefertigt (Kap. 6.2.8). Aus diesen Angaben wurde in Verbindung mit der im Gelände geschätzten Lagerungsdichte die Luftkapazität nach AG BODEN (1994) abgeleitet und mit dem im Dünnschliff ermittelten Flächenanteil der Grobporen verglichen.

6.2.10 Ableitung pedohydrologischer Parameter

Zielsetzung: Pedohydrologische Parameter bilden die essenzielle Grundlage jedes N-A-Modells. Sie sollten der AG Dürreych vom vorliegenden Teilprojekt für Simulationen zur Verfügung gestellt werden (Kap. 6.3.1, s.u.). Auch für konzeptionelle Voraussagen über Abflussbildungsprozesse sowie zur Interpretation vieler Geländebefunde ist die Kenntnis pedohydrologischer Parameter unentbehrlich.

Vorgehensweise: Von herkömmlichen Laboruntersuchungsmethoden zur Messung pedohydrologischer Parameter an Stechzylinderproben musste wegen des z.T. extremen Skelettgehaltes der Böden abgesehen werden. Ebenso brachten in-situ-Versuche mit dem Doppelringinfiltrometer wie schon bei FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) keine verwertbaren Ergebnisse. Dennoch liegen eine Reihe von Literaturangaben zu hydraulischen Eigenschaften von Buntsandsteinböden vor, die zur Orientierung dienen können (vgl. Tab. 2, Kap. 2.1.5).

Alternativ können pedohydrologische Parameter auf der Grundlage von Tabellenwerken und Pedotransferfunktionen abgeschätzt werden (AG BODEN 1994, (MÜLLER et al. 1992, AK STANDORTSKARTIERUNG 1996, DVWK 1995,

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG 1995 PESCHKE et al. 1999b, ZIMMERMANN 1998, LGRB 1998, CARSEL & PARRISH 1988, EDER 1980 u.a.). SHRIVASTAVA & ULRICH (1977) fordern zwar, die statistischen Beziehungen für die Schätzung bodenphysikalischer Parameter im Rahmen der forstlichen Standortkartierung für das Bodenkollektiv eines Kartiergebietes jeweils neu zu gewinnen. Aus den genannten Gründen musste jedoch auf nicht gebietspezifische Ableitungsverfahren zurückgegriffen werden. Eine vergleichbare Vorgehensweise – Schätzung von Parametern aus der Forstlichen Standortkarte nach Tabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1982) – findet sich im übrigen auch bei LANGBEIN & MÜLLER (1986).

Wichtigster Ausgangspunkt für alle Schätzverfahren ist die Bodenart. Je nach Verfahren können weitere Angaben wie Lagerungsdichte und Humusgehalt verarbeitet werden (z.B. LGRB 1998). Effektive Parameter unter Berücksichtigung von Makroporen und Skelett werden z.B. von PESCHKE et al. (1999b) und ZIMMERMANN (1998) zusammengestellt. Soweit nicht anders angegeben, werden die folgenden pedohydrologische Parameter nach LGRB (1998) aus Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt abgeschätzt:

- Lagerungsdichteklasse (AG BODEN 1994)
- Trockenraumgewicht [g cm^{-3}]
- Gesamtporenvolumen [%]
- Luftkapazität [%]
- Feldkapazität [%]
- nutzbare Feldkapazität [%]
- K_s -Klasse (AG BODEN 1994)

Für einige im Dürreychgebiet auftretende Kombinationen von Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt nach LGRB BADEN-WÜRTTEMBERG (1998) lag kein entsprechender Parametersatz vor. In diesem Falle wurde der

nächstgelegene Datensatz unter fachlicher Berücksichtigung des Horizonttyps zugewiesen.

Für Simulationszwecke werden u.a. van Genuchten-Parameter zur Berechnung der Saugspannungskurve benötigt (vgl. Kap. 6.3.1). Sie werden aus der Bodenart nach einem Parametersatz von CARSEL & PARRISH (1988) abgeschätzt. Für die Humusaufgabe existieren keine van Genuchten-Parameter. Hier wurde aufgrund von Überlegungen zur Porengrößenverteilung ein Lufteintrittspunkt für Sand ($\alpha = 0,145 \text{ m}$) und eine Glätte der Porenverteilung von $n = 1,32$ angenommen. Ferner wurden in Anlehnung an ZIMMERMANN (1998) für die organische Auflage folgende Werte angenommen:

- K_s -Wert: 10^{-3} m s^{-1}
- Gesamtporenvolumen: 60 %
- Feldkapazität: 32,5 %
- Residualer Wassergehalt: 6,5 %

6.3 Simulation, Fernerkundung und GIS

6.3.1 Das Simulationsmodell CATFLOW

Zielsetzung: Im Rahmen des Dürreychprojekts wurden Niederschlags-Abfluss-Simulationen v.a. von CASPER (2002) mit den Modellen CATFLOW, WASIM-ETH und PRMS durchgeführt. Die vorliegende Arbeit legte dazu eine wichtige Grundlage: Es wurden pedohydrologische Parameter für die 35 Forstlichen Standortseinheiten aus der FSK und eigenen Untersuchungen im Dürreychgebiet abgeleitet und im gemeinsamen Datenpool als Basis für die Simulationsversuche bereitgestellt (vgl. Anhang 5).

Die Simulationsversuche in der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf zwei exemplarische Studien:

- Standortseinheit mit Sättigungsabfluss
- Standortseinheit mit Zwischenabfluss

Dazu wird das physikalisch basierte, gegliederte Niederschlags-Abfluss-Modell CATFLOW verwendet.

Modellbeschreibung: CATFLOW wurde im Rahmen des Weiherbachprojekts (vgl. Kap. 1) am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe entwickelt (PLATE 1992, MAURER 1997, ZEHE et al. 2000). Es erlaubt die zeitkontinuierliche Simulation des Wassertransportes in kleinen Einzugsgebieten. Das Modell arbeitet nach folgenden Prinzipien:

- Berechnung des Matrixflusses im Boden durch die RICHARDS-Gleichung
- Simulation des Makroporenflusses durch effektive Erhöhung der k_s -Werte
- Berechnung der Evapotranspiration mit dem PENMAN-MONTEITH-Ansatz
- Repräsentation der Hangflächen durch zweidimensionale Hangschnitte
- Kopplung der Hänge über das Gewässernetz
- Berechnung des Oberflächenabflusses mit der SAINT-VENANT-Gleichung

Parametrisierung des Bodenmodellteils:

Auf Grundlage der FSK-Bodendaten und der eigenen Bodenkartiererergebnisse wurden für jede der 35 Forstlichen Standortseinheiten repräsentative synthetische Profile erstellt. Als Hilfestellung für die Zuweisung repräsentativer Horizonteigenschaften wurden aus allen verfügbaren Datensätzen Mittelwerte bzw. Medianwerte für die Horizonttypen O und H, Bs und Cv auf Grundlage der gesamten Datenbasis gebildet (vgl. Ausführungen im Anhang 5-1). Waren für bestimmte Eingangsgrößen Klas-

senbreiten angegeben, so wurden grundsätzlich die Klassenmitten verwendet.

Für jeden Horizont wurden aus Pedotransfertabellen die für das Modell erforderlichen pedohydrologische Parameter abgeschätzt (Kap. 6.2.10) und zusammen mit Informationen zum Niederschlag, Verdunstung, Vegetation und Relief dem Simulationsmodell übergeben (Abb. 27).

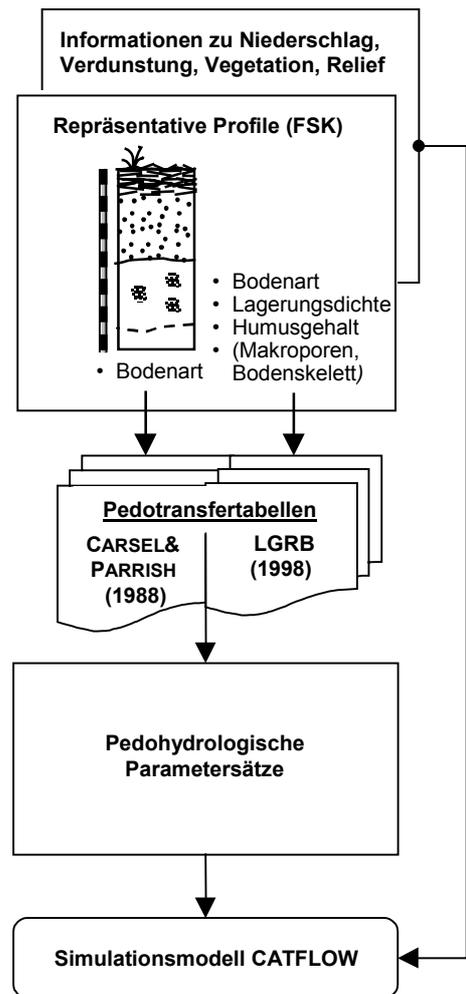


Abb. 27: Vorgehensweise bei der Parametrisierung des Simulationsmodells CATFLOW

Simulationsbeispiele: Für die Simulationsversuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Forstlichen Standortseinheiten „Wasserzügige Hochlagenmisse“ (HMi⁺) und „Block-Sommerhang“ (BISH) ausgewählt (Anhang 5). Im Falle der Einheit HMi⁺ wurde ein

2-D Profil mit dem Simulationsziel Sättigungsflächenabfluss getestet. Für die Einheit BISH wurde ein rechteckiges Hangsegment mit konstanter Neigung parametrisiert und auf Zwischenabflussbildung getestet. Allen Berechnungsknoten wurden die pedohydrologischen Parameter der repräsentativen Profile (s.o.) zugewiesen. Die relative Sättigung der Profile sowie die Flussdichten zu verschiedenen Zeitschnitten wurden mit der Software MATHLAB visualisiert.

6.3.2 Auswertung von Landsat TM-Daten

Zielsetzung: Durch Auswertung von Landsat TM-Daten hinsichtlich ihres Feuchteinformationsgehalts soll die ermittelte räumliche Verteilung von Feuchtfächen mit potenziellem Sättigungsflächenabfluss im Dürreychgebiet validiert werden.

Methode: CRIST & CIGONE (1984) zeigten in grundlegenden Arbeiten den Zusammenhang von Landsat TM-Spektralkurven und Bodeneigenschaften, insbesondere mit der Bodenfeuchte. Untersuchungen von VOGT & LENCO (1995), VOGT & VOGT (1996) sowie HERBINGER (1996) belegen, dass Landsat-Daten auch in bewaldeten Gebieten Schlüsse auf die Feuchteverhältnisse am Boden zulassen.

Die Auswertemethode basiert auf der Hauptkomponententransformation von sechs Landsat-Kanälen mit Hilfe der Software CARTEL (HIRSCH & SCHNEIDER 1983). Drei Hauptkomponenten erklären meist über 95% der Varianz einer Szene und können praktisch redundanzfrei als Falschfarbenkomposit dargestellt werden. Sie korrespondieren mit:

- Helligkeit („Brightness“)
- Vegetation („Greenness“)
- Feuchte („Wetness“)

Die letztgenannte Komponente liegt im mittleren Infrarotbereich (TM Kanal 5) und kann als aktuelle Feuchteinformation interpretiert werden. An einem ausgewählten Trainingsgebiet wird die Bildklassifikation durch schrittweise Diskriminanzanalyse des Falschfarbenbilds durchgeführt (BELZ 2000).

Vorgehensweise: Es wurde eine Landsat-Szene vom 7.03.1992 ausgewählt, die einen mäßig feuchten Gebietszustand repräsentiert. Als Trainingsgebiet wurde ein 30 × 30 km großer Ausschnitt des westlichen Schwarzwalds zwischen Rastatt und Achern verwendet und nach der o.g. Methode ausgewertet. Die Trainingsergebnisse wurden auf das Dürreychgebiet angewendet und mit CARTEL in ein Falschfarbenkomposit umgesetzt. Anschließend wurde die Ergebniskarte in ein Arc/Info-Rasterbild konvertiert, georeferenziert und entzerrt.

Um den Feuchtezustand des Dürreychgebiets einschätzen zu können, wurden Niederschlags- und Temperaturwerte vor dem Aufnahmezeitpunkt für die nahegelegene Station des Deutschen Wetterdienstes Dobel ausgewertet.

6.3.3 GIS-gestützte Analysen

Nahezu alle räumlichen Informationen zu Einzugsgebietsstrukturen, Prozessen und ihren Indikatoren wurden in der gemeinsamen GIS-gestützten Projektdatenbank der AG Dürreych vorgehalten. Von zentraler Bedeutung für diese Arbeit sind die digitalisierte Forstliche Standortskarte (FSK) und das Digitale Höhenmodell (DHM).

Die FSK (GRAMMANN 1996) wurde am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe im Maßstab 1 : 10.000 digitalisiert. Das DHM wurde mit dem TO-

POGRID-Tool des GIS Arc/Info (ESRI, 1999) auf Grundlage der digitalisierten Höhenlinien der Deutschen Grundkarte M = 1 : 5.000 (DGK5) erstellt (CASPER 2002). Die Tiefenlinien wurden ggf. durch Geländebeobachtungen ergänzt und in das DHM eingefügt. Für die Rasterberechnungen wurde überwiegend ein 30 m-Raster gewählt.

Die wichtigste Auswertemethode zum Erkennen räumlicher Muster ist die Überlagerung verschiedener Kartenebenen und deren visuelle Interpretation. Das verwendete GIS Arc/Info stellt jedoch auch zahlreiche quantifizierende Analysemethoden zur Verfügung. Durch die Berechnung von Flächenanteilen sind Vergleiche mit hydrologischen Kennwerten wie etwa dem Abflussbeiwert ψ möglich. Die Vorgehensweise bei der Berechnung DHM-basierter Indexberechnungen wurde bereits in Kap. 7 erläutert. Um Zusammenhänge zwischen den berechneten Indizes und den Indikatoren (z.B. Erosion, Feuchtezeiger, Wasseraustritte) nicht nur visuell, sondern auch statistisch zu charakterisieren, bietet sich die Möglichkeit eines Mittelwertvergleichs der Indikatoren mit dem Gesamteinzugsgebiet. Dabei wird rasterbasiert vorgegangen:

- Berechnen des mittleren Indexwertes des Gesamtgebiets DÜ (i.d.R. 30 m-Raster) mit dem Arc/Info-Befehl DESCRIBE
- Konvertieren der Indikatordaten in ein Rasterformat (Arc/Info-Befehl POINTGRID, LINEGRID, POLYGRID)
- Abbilden der Indexwerte auf die Zellen mit Indikatorwert (Bedingungsabfrage mit Arc/Info-Befehl CON; Multiplikation)
- Berechnen des mittleren Indexwertes aller Rasterzellen mit Indikatorwert (DESCRIBE)
- Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter

Eine weitere Möglichkeit bietet die Kreuzkorrelationsanalyse zweier Rasterdatensätze. Der Arc/Info-Befehl CORRELATION gibt als Maß für den statistischen Zusammenhang einen Korrelationskoeffizienten ($-1 \leq r \leq 1$) aus. Die Methode hat strenggenommen nur für metrisch skalierte Daten Gültigkeit und nicht für ordinal skalierte Daten, wie etwa Erosionsstärke oder Feuchtezahl. Ein sinnvolles Ergebnis ist bei dieser Vorgehensweise dennoch zu erwarten. In diesem Zusammenhang sei auf die seit langem gängige Praxis der Vegetationskunde erwähnt, die mit ordinal skalierten Zeigerwerten fruchtbare Mittelwertstatistik betreibt.

Sonstige häufig verwendete Befehle des GIS Arc/Info sind in Tab. 22 zusammen gestellt.

Tab. 22: Häufig verwendete GIS-Operationen in Arc/Info

GIS-Operation	Funktion
ASPECT	Ermitteln der Exposition
BUFFER	Erzeugen von Pufferpolygonen
CLIP	Ausschneiden von Vektordaten
CON	Selektionsabfrage
CORRELATION	Berechnung Kreuzkorrelation
DESCRIBE	Anzeigen der Datenstatistik
FLOWACCUMULATION	Ermittlung des lokalen Einzugsgebiets
FLOWDIRECTION	Ermitteln der Fließrichtung
INTERSECT	Verschneidung von Vektordaten
POLYGRID, LINEGRID, POINTGRID	Umwandlung von Vektor- in Rasterdaten
SLOPE	Berechnung der Hangneigung
WATERSHED	Berechnung von Einzugsgebietsgrenzen

Mit ArcView 3.2a (ESRI 2000) werden die räumlichen Daten klassifiziert, ggf. Abfragen und weitere Berechnungen durchgeführt. Mit dem Zusatzmodul „Spatial Analyst“ sind weitere Reliefanalysen mit Rasterdaten möglich, so etwa die Erstellung von Isolinien, Berechnung der Exposition und Hangneigung u.a. Zur Be-

rechnung einer gewichteten Fließakkumulation wird ein Avenue-Script verwendet, das auch negative Wichtungswerte verarbeitet.

Kartendarstellung: ArcView 3.2a dient letztlich auch zur Visualisierung der erstellten Geodaten. Als topographischer Hintergrund für Detailkarten wurden ggf. die gescannten und georeferenzierten Deutschen Grundkarten 1 : 5.000 sowie für Übersichtskarten die Topographische Karte 1 : 25.000 und 1 : 50.000 verwendet (alle LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG LVA BW, vgl. Literaturverzeichnis).

Anmerkung zu Nordpfeil und Maßstab:

Sämtliche in dieser Arbeit dargestellten Karten sind genordet. Daher erschien die Darstellung eines Nordpfeils i.d.R. entbehrlich.

Weiterhin wird bei den häufig in Folge abgedruckten Darstellungen des Gesamteinzugsgebiets der Maßstab meist nur in der Anfangskarte abgedruckt und im Folgenden als bekannt vorausgesetzt. Kartenausschnitte aus dem Gesamtgebiet sind dagegen grundsätzlich mit einem Maßstab versehen.

7 Regionalisierungsergebnisse

In diesen Kapitel wird zunächst die Datenqualität der FSK als Regionalisierungsgrundlage überprüft. Anschließend werden die Regionalisierungsergebnisse für das gesamte Einzugsgebiet im Überblick vorgestellt. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln aufgegriffen und mit den Geländebefunden verglichen.

7.1 Überprüfung der FSK-Datenqualität

Die Informationen der Forstlichen Standortskarte (FSK) zu Böden und Wasserhaushalt bilden im Folgenden die wichtigste Grundlage der Regionalisierungsergebnisse. Daher soll die Datenqualität der FSK abgeprüft und damit eine Aussage über die zu erwartenden Datenunsicherheiten getroffen werden.

Vorgehensweise: Die selbst aufgenommenen Leitprofile wurden mit den Angaben der FSK-Legende sowie ggf. mit vorhandenen Profilbeschreibungen der Standortkartierung verglichen. Hinsichtlich der Regionalisierungsauf-

gabe standen dabei die Bewertung des Bodenfeuchteregimes und der hydraulisch wirksamen Schichtung im Vordergrund. Um die Ähnlichkeit zwischen den selbst untersuchten Leitprofilen und der Standortskarte über Substratunterschiede hinweg integrierend zu bewerten, wurden die im Dürreychgebiet vorkommenden Bodentypen nach Wasserhaushalt und Schichtung in ein Diagramm eingeordnet (Abb. 28): Bodentypen innerhalb des gleichen Feldes sind hinsichtlich dieser beiden Eigenschaften ähnlich.

Ergebnisse: Es wurden 58 Profile zum Vergleich mit den Legendenangaben der FSK Kaltenbronn heran gezogen; davon 17 Leitprofile des Standortkartierers und 41 eigene Leitprofile. Als Maß für die Übereinstimmung wird die Abweichung Δ zwischen dem beobachtetem Bodentyp und dem Bodentyp der Standortskarte in Feldern entsprechend Abb. 28 angegeben Das Ergebnis des Vergleichs zeigt das Kreisdiagramm Abb. 29:

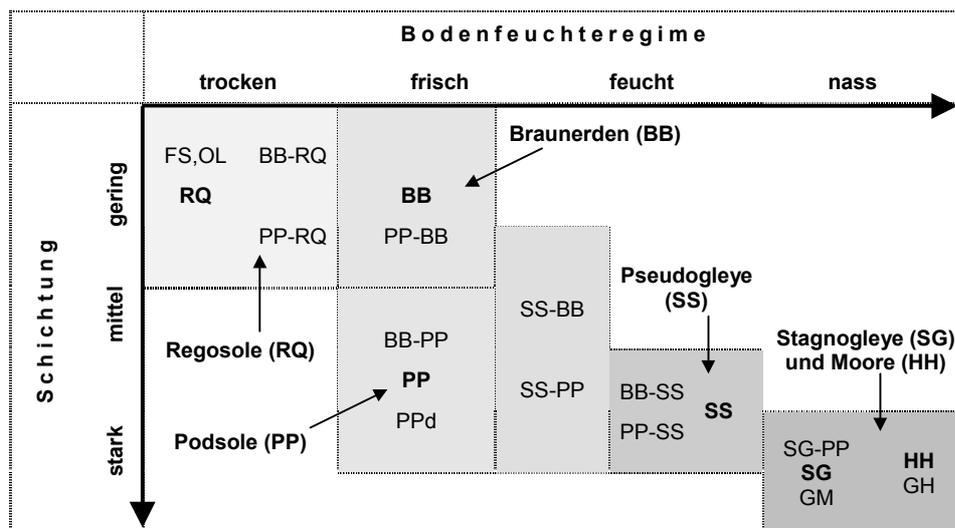


Abb. 28: Schematische Einordnung der Böden im Dürreychgebiet in Felder mit vergleichbarer Kombination von Bodenfeuchteregime und hydraulisch wirksamer Schichtung.

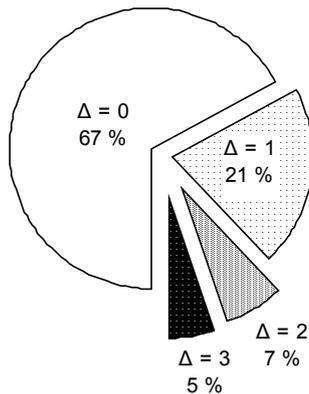


Abb. 29: Abweichung (Δ) der festgestellten Bodentypen von der FSK-Legende in Feldern gemäß Abb. 28.

Zwei Drittel aller untersuchten Fälle zeigen eine gute Übereinstimmung ($\Delta = 0$). In weiteren 21 % lässt sich noch eine zufriedenstellende Übereinstimmung feststellen ($\Delta = 1$). Abweichungen um ein Feld traten überraschend oft bei den Leitprofilen der FSK auf. Stärkere Abweichungen von mehr als einem Feld (Tab. 23) sind in der Standortseinheit HgfS (Grundfeuchter Hochlagensand), pS (Mäßig frischer podsoliger Sand), pSWH (Podsolig sandiger Winterhang) und SFH (Mäßig trockener sandiger Flachhang) zu beobachten. Die Abweichungen sind z.T. durch die Lage im Relief zu erklären. Bei der Standortseinheit HpS (Podsolierter Hochlagensand) sowie bei der Sammeleinheit gfla (Grundfeuchte Lagen) schränkt die sehr große Spanne der mögliche Bodentypen die Vergleichbarkeit ein.

Tab. 23: Profile mit größeren Abweichungen von der FSK-Legende ($\Delta > 1$)

FSE (Profil-Nr.)	Bodentyp FSK	Bodentyp beobachtet	Δ
HgfS (P 428)	SGd	(SS)-pBB	2
pS (P 25)	pBB...PP	PP-SS	2
SFH (P 11)	PP...(BB-PP)	SSg	2
HgfS (P 305)	SGd	PP	3
pS (P 19)	pBB...PP	SGd	3
pSWH (P 105)	PP...(BB-PP)	SGd	3

Die eigenen Leitprofile zeigen im Vergleich zur FSK zudem folgende Tendenzen:

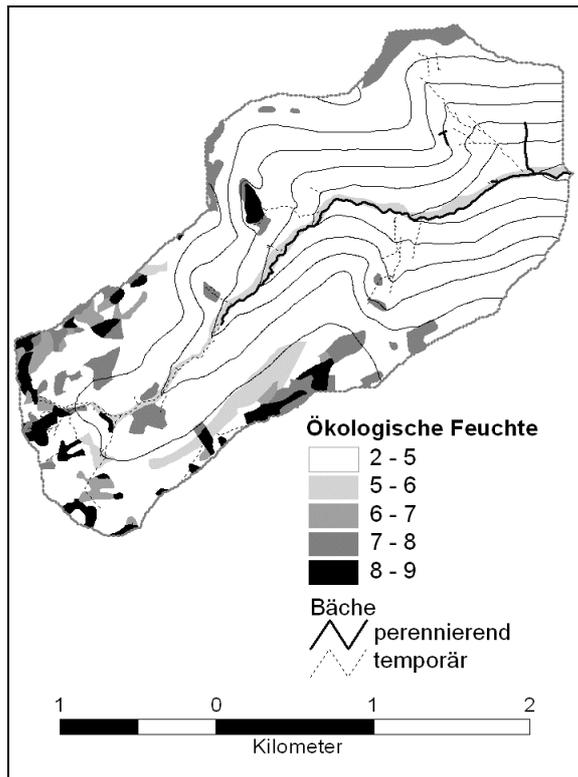
- Mächtigkeit der Ae-Horizonte oft < 40 cm (besonders BISH, HBIRü)
- v.a. in Unterböden lehmigere Bodenarten (HMi+, SRü-, pS, BIWH, BISH)
- „tonige Basisfließerde“ selten angetroffen

Bei einem Detailvergleich der Merkmale Relief, Skelettgehalt, Durchlässigkeit des Oberbodens, Ortsteinbildung, Staunässe, Wasserzügigkeit und Feuchtezeiger im Teil-einzugsgebiet Stillwasserhütte (SH) ergab sich ebenfalls für zwei Drittel der Leitprofile eine gute bis zufriedenstellende Übereinstimmung mit der Standortskarte (KOBAYASHI 1999).

Das Ergebnis stimmt gut mit den Erläuterungen zur FSK-Legende überein: Der Anteil an Profilen mit von der Legende abweichenden Merkmalen entspricht nämlich etwa dem Anteil an bis zu 30 % Kleinstandorten, die maßstabsbedingt in einer Standortseinheit aufgehen können (GRAßMANN 1996:3). Somit kann eine Aussage über die zu erwartende Güte der Regionalisierungsergebnisse auf Basis der FSK Kaltenbronn gemacht werden: Insbesondere bei der Übertragung von Regionalisierungsergebnissen auf kleinere Skalen (Hang- oder gar Profilscale) ist eine Treffsicherheit nicht über 70 % zu erwarten.

7.2 Ableitungen aus der FSK

Ökologische Feuchte: Die Ökologische Feuchte (ÖF) ist leicht aus der FSK zu gewinnen. Sie gibt als Integral des Wasserhaushalts einen schnellen Überblick über die relativen Feuchteverhältnisse in einem Einzugsgebiet. Abb. 30 zeigt die Verteilung der Ökologischen Feuchtestufen $\text{ÖF} > 5$ im Dürreychgebiet.



Sämtliche Kartendarstellungen sind genordet!

Abb. 30: Ökologische Feuchtestufen im Dürreychgebiet, klassifiziert in Anlehnung an AK STANDORTSKARTIERUNG (1996): 2-5 = trocken bis frisch; 6 = grund- / hangfrisch; 7 = grundfeucht; 8 = feucht / wechselfeucht; 9 = nass / vernässend.

Flächen mit Feuchtwerten von $\bar{ÖF} > 7$ korrespondieren i.d.R. mit einem oberflächennahen Grund- bzw. Stauwasserspiegel. Damit ermöglicht schon allein die Kenntnis der Ökologischen Feuchte eine schnelle Identifizierung von Flächen mit potenziellem Sättigungsflächenabfluss. Sie ist das am leichtesten verfügbare Surrogat für mesoskalige Aussagen über diesen besonders hochwasserrelevanten Abflussbildungsprozess. $\bar{ÖF}$ -Werte < 6 (\pm frische bis trockene Standorte) sind für die Abschätzung des Abflussbildungsprozesses dagegen nur mittelbar geeignet; beim Entscheidungsprozess müssen zusätzlich Relief- und Bodenmerkmale herangezogen werden.

Regelwerk zur Hydrotopausgliederung: In Kap.6.1.2 wurde ein Entscheidungsbaum zur

konzeptionellen Ableitung von Hydrotopen aus der Forstlichen Standortskarte (FSK) vorgestellt und das dabei verwendete Regelwerk erläutert. Datengrundlage ist die als MS-ACCESS-Tabelle aufbereitete FSK-Legende (Anhang 3-4). Die oben beschriebene Ökologische Feuchte spielt in diesem Regelwerk eine wichtige Rolle.

Die nachfolgend dargestellte Zuordnung von Abflussprozessen zu Standortseinheiten (Hydrotopotypisierung) gilt ausschließlich für länger anhaltende, extensive Niederschläge. Unter diesen Witterungsbedingungen werden die zugeordneten Abflussprozesse als dominant erachtet. Gleichzeitig können aber alle andere Prozesse untergeordnet auftreten. Tab. 24 zeigt das Zuordnungsergebnis und die verwendeten Abfragekriterien in tabellarischer Form, Abb. 31 in Kartenform. Die Hydrotope werden im Folgenden näher beschrieben.

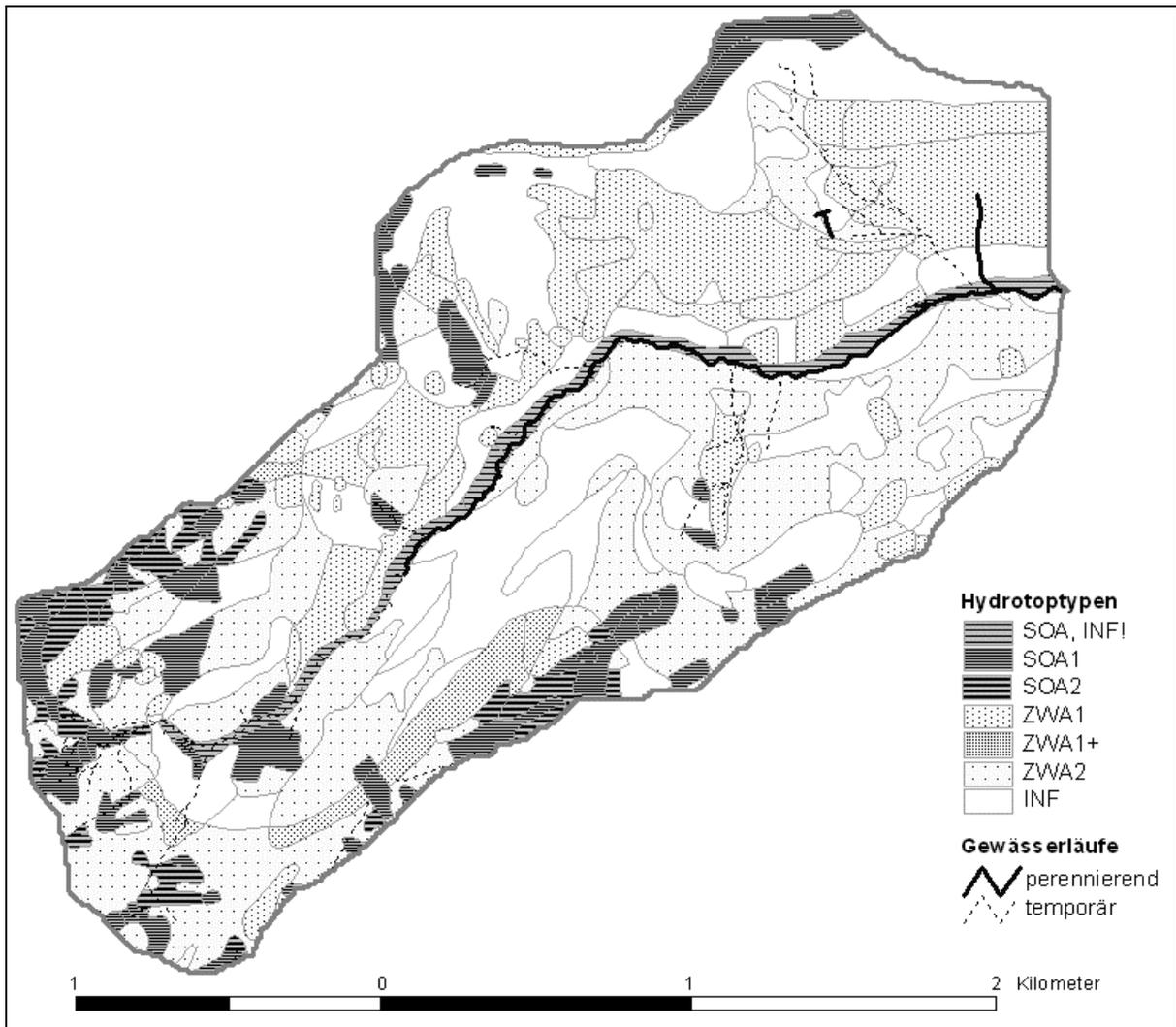
Flächen mit Sättigungsabfluss (SOA1, SOA2) konzentrieren sich auf die flachen Hochlagen des oberen Einzugsgebietes, insbesondere auf die Einzugsgebietsränder. Weitere Sättigungsflächen sind in den Mulden des Seemiss- und Seebergkars nördlich des Dürreychbachs sowie in kleinem Umfang in der Hirschklänge zu finden. Sie stellen zusammen rund 13 % der gesamten Einzugsgebietsfläche und umfassen (Bändchen-) Stagnogleye, entwässerte Hochmoore (Missen), Pseudogleye und ihre Übergangsformen. Flächen vom Typ SOA1 sind überwiegend künstlich dräniert. Damit ist für einen größeren Anteil der Flächen von einem abflusswirksamen Anschluss über ein temporär aktives Gewässernetz an den Vorfluter auszugehen, obwohl die Flächen z.T. weit vom Vorfluter entfernt liegen. Die Flächen vom Typ SOA2 reagieren infolge ihres tieferen Stauwasserstands nur bei stärkeren Ereignissen mit verzögertem Sättigungsabfluss.

Tab. 24: Zuordnung von Hydrotypen zu den Forstlichen Standortseinheiten. Prozentangaben in Klammern = Flächenteil am Gesamteinzugsgebiet (6,99 km²)

Dominanter Prozess*	Beschreibung	Abfragekriterien (MS-ACCESS)	Standortseinheiten**
HOA (3,8 %)	Horton'scher Oberflächenabfluss (nur bei Starkniederschlägen) von Flächen mit schlecht durchlässigen Oberböden (stark zersetzte Torfe, Ks-Klasse < 3)	[KS_OBERB.]=1	MLa, MR, HMi, HMi+ Gesamtflächenanteil:
SOA, INF! (2,9 %)	Sättigungsflächenabfluss und schnell abflusswirksame Infiltration von Flächen in Bachnähe	RINNE=1	Ri, BIRi Gesamtflächenanteil: 2,9 %
SOA1 (8,9%)	Sättigungsflächenabfluss von ausgeprägten Feuchflächen mit oberflächennahem Grund-/Stauwasserstand a) ± abflusswirksam dräniert	ÖK_FEU>6; [GW_STAUW]=2; [DRÄNAGE]=1	HMi, HMi+, MR, gfS, wzMi, MLa
	b) nicht dräniert	dto., jedoch [DRÄNAGE]=0	gfLa, HgfS Gesamtflächenanteil: 3,4 %
SOA2 (3,4 %)	Verzögerter Sättigungsflächenabfluss von sonstigen Feuchflächen mit tieferem Grund-/Stauwasserstand	ÖK_FEU>6; [GW_STAUW]<2	HgfIS+, HgfIS, HgfS+
ZWA1+ (2,5 %)	Zwischenabfluss von Flächen mit ausgeprägter Bodenschichtung und lateralem Wasserzufluss. Auftreten von return flow möglich.	ÖK_FEU<=6; [PODSOL-B]>1 Oder [C-SD]>1; [KONVERGENZ]>=0 Oder [ZU_AB]>0	HWH, HBIWH
ZWA1 (30,7 %)	Zwischenabfluss von sonstigen Flächen mit ausgeprägter Bodenschichtung a) flachere Lagen (geringere Intensität)	dto., jedoch [KONVERGENZ]<0>= -0,5 Und [ZU_ABFL]<=0	SRü-, HpS, HBIRü
	b) steilere Lagen (höhere Intensität)	KONVERGENZ]<-0,5 Und [ZU_ABFL]<=0	pSSH, SSH-, BISH, BIST
ZWA2 (22,2 %)	Zwischenabfluss von Flächen mit schwächer ausgeprägter Bodenschichtung a) flachere Lagen (geringere Intensität)	ÖK_FEU<=6; [PODSOL-B]=1 Oder [C-SD]=1; [KONVERGENZ] >=-0,5	pS, HIS
	b) steilere Lagen (höhere Intensität)	dto., jedoch [KONVERGENZ] <-0,5	pSWH, BIWH+
INF (29,4 %)	Infiltration auf Flächen ohne deutliche Bodenschichtung a) flachere Lagen (gute Infiltration)	ÖK_FEU<=6; [PODSOL-B]<1 Und [C-SD]<1; [KONVERGENZ] >=-0,5	IS, SFH, SFH-, sIFH
	b) steilere Lagen (geringere Infiltration, untergeordnet Zwischenabfluss)	dto., jedoch [KONVERGENZ] <-0,5	SWH, SSH+, SSH, BIWH

* Erläuterungen zu den Kriterien vgl. Kap.6.1.2. Abfragegerecht klassifizierte FSK-Legendeninformationen vgl. Anhang 3-4

**Beschreibung der Standortseinheiten siehe Anhang 2-2



Bei den nachfolgenden Übersichtsdarstellungen des Gesamteinzugsgebiets wird auf den Maßstab verzichtet!

Abb. 31: Ergebnis der Hydrotopausgliederung auf Grundlage der Forstlichen Standortskarte für länger anhaltende, extensive Niederschläge: INF = Infiltration; SOA, INF! = Sättigungsflächenabfluss und abflusswirksame Infiltration in der Aue; SOA1 = Schneller Sättigungsflächenabfluss, SOA2 = Verzögerter Sättigungsflächenabfluss, ZWA1 = Schneller Zwischenabfluss (ZWA1+ = mit Wasserzufluss), ZWA2 = Verzögerter Zwischenabfluss.

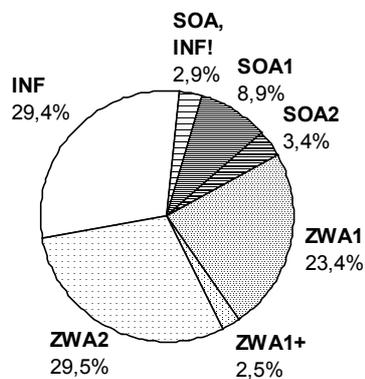


Abb. 32: Flächenanteile der Hydrotope am Gesamteinzugsgebiet (6,99 km²)

Bachnahe Talflächen: Der Dürreychaue wurden die Prozesse Sättigungsflächenabfluss und abflusswirksame Infiltration (SOA, INF!) zugeordnet. Gut durchlässige Böden und geringe Grundwasserflurabstände ermöglichen schnelle Abflussreaktionen auf etwa der Hälfte der Flächen (vgl. Kap. 8.2). Standortseinheiten der Auen und Rinnen umfassen knapp 3 % der Gesamteinzugsgebietsfläche (6,99 km², vgl. Abb. 32).

Flächen mit Zwischenabfluss (ZWA1+, ZWA1, ZWA2) nehmen über die Hälfte des Gesamteinzugsgebiets ein. Verantwortlich für die Bildung von Zwischenabfluss sind v.a. Podsole mit wasserhemmenden Ortsteinbildungen. Im Bereich der Hochflächen treten auch tonige C-Horizonte auf, möglicherweise Verwitterungsreste des Oberen Buntsandsteins.

Wie bei den Flächen mit Sättigungsabfluss lässt sich auch bei den Zwischenabflussflächen eine räumliche Gliederung erkennen: Auf den südexponierten Steilhängen, den sogenannten Sommerhängen, dominiert Flächentyp ZWA1 mit intensiverer Zwischenabflussbildung. Als Sondertyp sind Flächen mit Zwischenabfluss und Wasserzuschuss (ZWA1+) hervorzuheben. Sie treten unterhalb der Hochlagen mit Sättigungsflächenabfluss im Süden des Einzugsgebiets auf.

Dagegen wurden auf den nordexponierten Winterhängen aufgrund der geringeren Ortsteinausprägung überwiegend Flächen mit verzögertem Zwischenabfluss (ZWA2) ausgliedert. Diese Gliederung entspricht den Erwartungen, denn aus der Literatur sind verstärkte Ortsteinbildungen an den Sommerhängen, insbesondere an Mittelhangpositionen bekannt.

Flächen vom Typ ZWA2 umfassen zudem hufeisenförmig das obere Einzugsgebiet. Dafür verantwortlich ist die Standortseinheit HpS (Podsolierter Hochlagensand), dessen Podsole sich teilweise zu Bändchenstagnogleyen entwickeln können. Aufgrund der geringen Hangneigungen sind hier jedoch vergleichsweise geringere Zwischenabflussgeschwindigkeiten zu erwarten.

Flächen mit Infiltration machen knapp 30 % der Einzugsgebietsfläche aus. Sie werden gebildet von meist podsoligen Braunerden oder

Braunerde-Podsolen ohne ausgeprägte Unterbodenverdichtung. Besonders günstige Infiltrationsbedingungen herrschen im Bereich der flachen Standortseinheiten (vgl. Tab. 24).

Flächen mit Horton'schem Oberflächenabfluss: Bereits Vorüberlegungen (Kap. 6.1.2) haben gezeigt, dass die Infiltrationskapazität der meist sandigen Waldböden des Dürreychgebiets die in Mitteleuropa üblichen maximalen Niederschlagsintensitäten bei weitem übersteigt. Lediglich auf den zersetzten Torfen der Moor- und Missenlagen ist bei höheren Niederschlagsintensitäten die kurzzeitige Entstehung von Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) theoretisch möglich. Abb. 33 zeigt die Verteilung der betreffenden Flächen. Sie umfassen 3,8 % der Gesamteinzugsgebietsfläche und gehen unter extensiven Niederschlagsbedingungen im Hydrotyp SOA1 auf. Wie bei allen Flächen mit oberflächennaher Wasserbewegung entscheidet die Nähe zum Gewässernetz über die Abflusswirksamkeit.

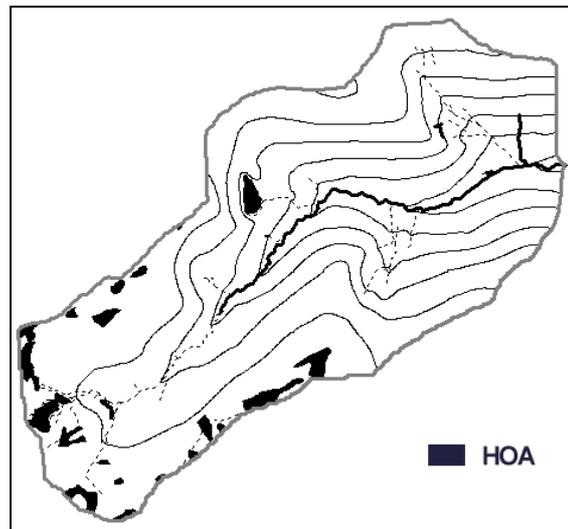


Abb. 33: Schwarze Flächen können bei höheren Niederschlagsintensitäten Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) bilden.

7.3 Ableitungen aus FSK und Digitalem Höhenmodell (DHM)

7.3.1 Topographischer Index

Der Topographische Index $\ln(A / \tan\beta)$ (BEVEN & KIRKBY 1979) ist ein Maß für die reliefbedingte Tendenz einer Fläche, erhöhte Bodenfeuchten und letztlich Sättigungsabfluss zu bilden: Hohe Werte entstehen durch geringe Hangneigungen β und/ oder ein großes lokales Einzugsgebiet A (vgl. Kap. 2.2.3). Abb. 34 zeigt das Berechnungsergebnis für das Dürreychgebiet.

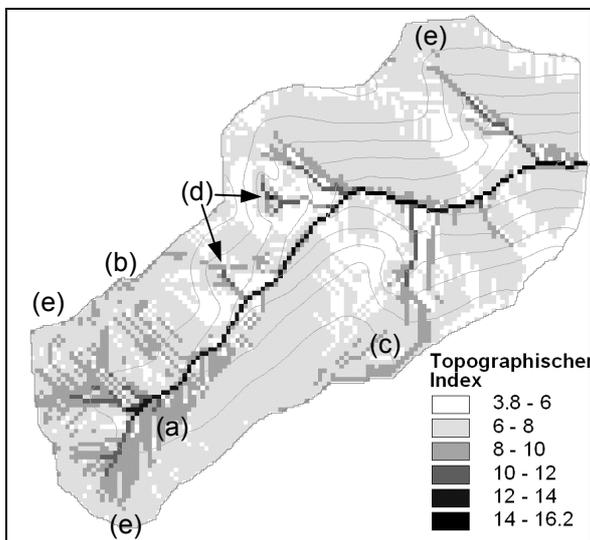


Abb. 34: Topographischer Index $\ln(A / \tan\beta)$ für das Dürreychgebiet. (30 m-Raster). Erläuterungen zu (a) bis (e) im Text.

Flächen mit Indexwerten > 8 finden sich auf 16,5 % der Einzugsgebietsfläche. Da die Berechnung des Topographischen Indexes auf der Fließakkumulation beruht, ergeben sich in den Tiefenlinien die höchsten Indexwerte (Maximum 16,2). Erhöhte Werte (8-10) finden sich zudem im oberen Einzugsgebiet als breiter Saum um die Tiefenlinien (a); einzelne aufgelöste Pixel sind auf den Kammlagen anzutreffen (b). An die Tiefenlinie der Hirschklinge schließt sich oberhalb ein Streifen mit höheren

Werten an (c), der sich bis auf die flachen Kammlagen hinaufzieht.

Topographischer Index und Ökologische Feuchte

Da der Topographische Index ein theoretisches Maß für erhöhte Bodenfeuchten ist, liegt es nahe, seine räumliche Verteilung mit der Verteilung hoher Ökologischer Feuchtestufen (ÖF) zu vergleichen (Abb. 35).

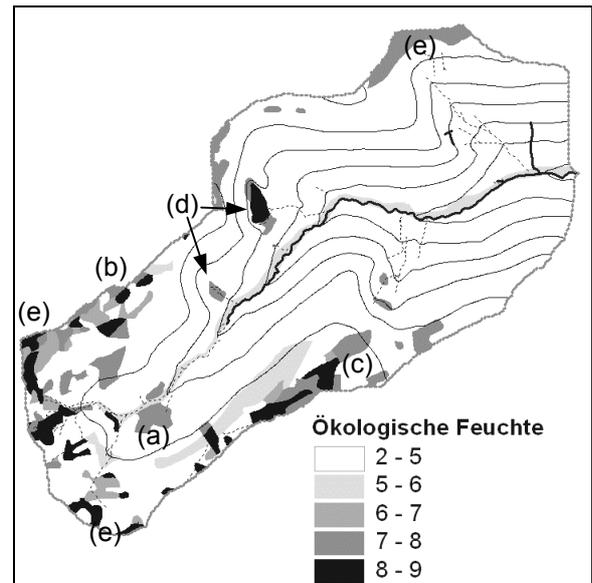


Abb. 35: Ökologische Feuchte im Vergleich mit dem Topographischen Index. Erläuterungen zu (a) bis (e) im Text.

Ein visueller Vergleich der Topographischen Indizes ≥ 8 mit den Ökologischen Feuchtwerten ≥ 6 zeigt die Übereinstimmungen an zwei ausgewählten Kartenausschnitten (Abb. 36). Flächen mit stärkeren Abweichungen sind in Abb. 37 heraus gegriffen. Insgesamt ist die Übereinstimmung der Karten eher gering: Während der Topographische Index die Abflusskonzentration in den Tiefenlinien sauber abbildet, bleiben die wasserscheidennahen Feuchtfelder der Kammlagen weitgehend unerkannt. Dies ist z.T. durch die Berechnungsvorschrift des Topographischen Indexes $\ln(A / \tan\beta)$ bedingt: Flächen nahe der Wasserscheide haben zwar meist geringe Neigungen β und können so potenziell hohe Index-

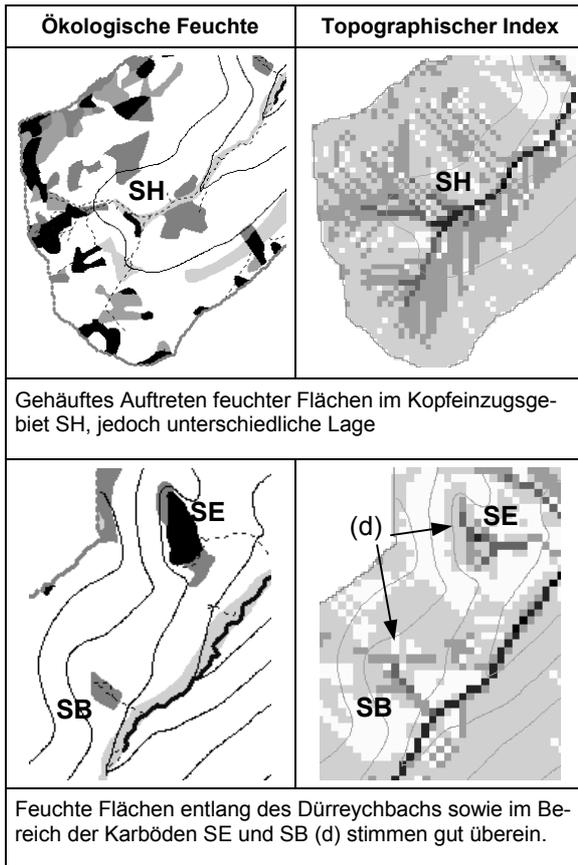


Abb. 36: Beispiele für Übereinstimmungen von Ökologischer Feuchte und Topographischem Index

werte erzeugen; ihre lokale Einzugsgebietsgröße A ist jedoch oft gering, wodurch die der Index unangemessen klein wird. Die Gewichtung des Topographischen Indexes mit der Ökologischen Feuchte verspricht ein besseres Ergebnis.

7.3.2 Gewichteter Topographischer Index

Ansatz ohne Reinfiltration: Die Karte der Ökologischen Feuchte wird gemäß Kap. 6.1.3 in ein Wichtungsgitter übersetzt: Hohe Feuchtwerte erhalten einen Wert nahe 1, niedrige Werte liegen nahe Null, Feuchtwerte mit $\text{ÖF} \leq 5$ werden gleich Null gesetzt. Dadurch leisten nur Flächen mit hohen Flächengewichten einen nennenswerten Beitrag zur Fließakkumulation und damit zu hohen Indexwerten.

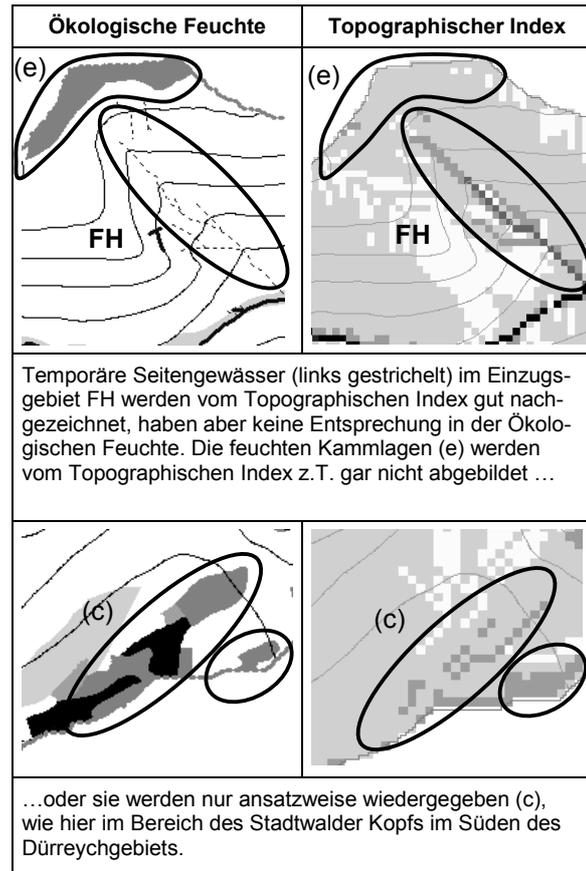


Abb. 37: Beispiele für Abweichungen von Ökologischer Feuchte und Topographischem Index

Das Ergebnis der Berechnung für ein 30 m-Raster zeigt Abb. 38. Das Einzugsgebiet teilt sich nun deutlich auf in einen oberen, westlichen Gebietsteil mit hohen Indexwerten und einen unteren, östlichen Gebietsteil mit niedrigen Indexwerten. Bildlich gesprochen laufen die Feuchtflächen der Kammlagen über und bilden fingerartige Fließmuster, die sich teilweise an den Vorfluter anknüpfen. Dies ist bei (a) besonders deutlich zu erkennen.

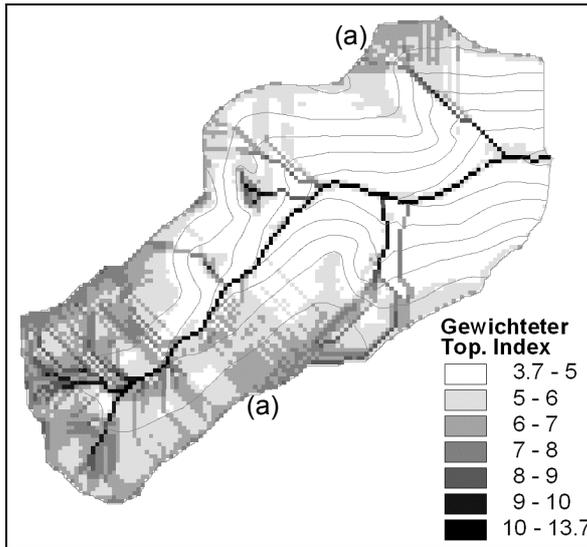


Abb. 38: Mit der Ökologischen Feuchte gewichteter Topographischer Index (30 m-Raster): Wichtungswerte zwischen 0 und 0,95.

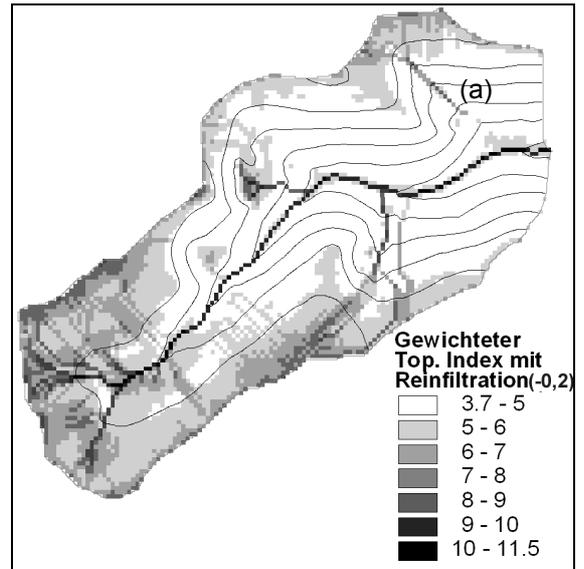


Abb. 39: Gewichteter Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster): Wichtungswerte zwischen -0,2 und +0,75.

Ansatz mit Reinfiltration: Nullwerte im Wichtungsgird beeinflussen bei der o.g. Vorgehensweise den Fließakkumulationsalgorithmus nicht, d.h. der Fließakkumulationswert der oberhalb liegenden Zellen bleibt in Abb. 38 bei Durchlaufen einer Nullzelle erhalten. Werden die Wichtungswerte aber um $-\Delta w$ verschoben (vgl. Kap. 6.1.3), ergeben sich für geringe Ökologische Feuchten negative Flächenegewichte. Der Fließakkumulationswert nimmt dann beim Durchlaufen negativer Zellen ab (Minimalwert 0). Auf diese Weise kann Reinfiltration simuliert werden.

Abb. 39 und Abb. 40 zeigen die Berechnungsergebnisse für $\Delta w = 0,2$ und $\Delta w = 0,3$. Die Abfolge der Abbildungen lässt erkennen, dass sich die Flächen mit hohen Indexwerten sukzessive vom Vorfluternetz abkoppeln (a).

In Abb. 40 verschwinden zudem die hohen Indexwerte im mittleren und unteren Laufabschnitt des Dürreychbachs (b). Der Wechsel zu niedrigen Indexwerten findet im Bereich der permanent schüttenden Stillwasserquelle (SQ) statt.

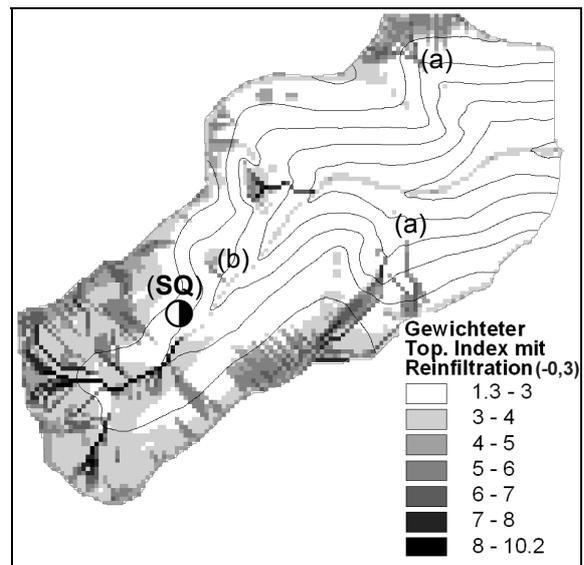


Abb. 40: Gewichteter Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster): Wichtungswerte zwischen -0,3 und +0,65.

Abb. 41 stellt den beschriebenen Prozess der sukzessiven Abkopplung von Feuchtfächen an einem Ausschnitt beispielhaft dar.

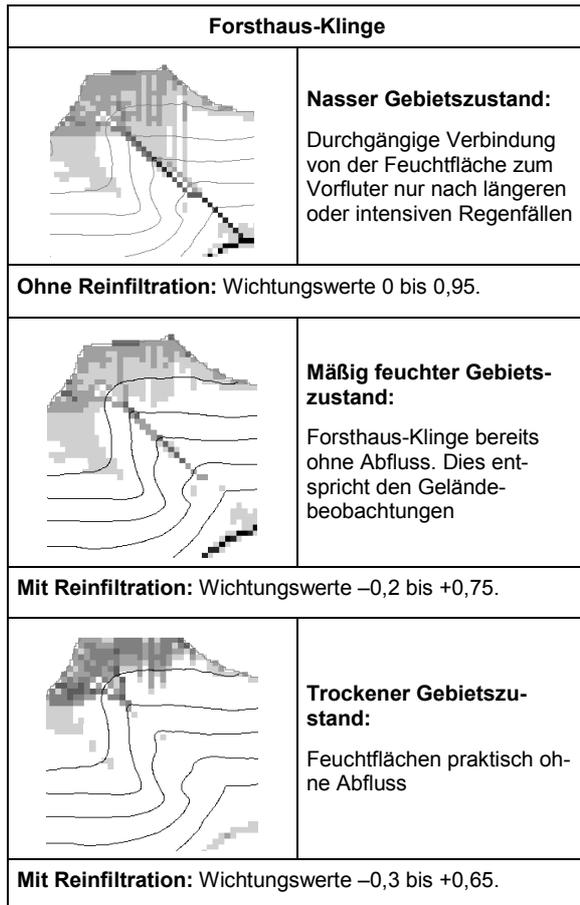


Abb. 41: Sukzessive Abkopplung der Sättigungsflächen vom Vorfluter am Beispiel der Forsthaus-Klinge im Nordosten des Einzugsgebiets

7.3.3 Interflow-Index

Aus Literaturstudien (Kap. 2.1) und eigenen Beobachtungen ist evident, dass Zwischenabfluss im Dürreychgebiet eine wichtige Rolle spielen muss. Daher wurde der Zwischenabfluss- oder Interflow-Index $\sin\beta \cdot \log(Ks_o/Ks_u)$ als Regionalisierungsinstrument entwickelt (Kap. 6.1.4), der die lokale Neigung β sowie den Schichtungsquotienten der hydraulischen Leitfähigkeiten von Ober- und Unterboden Ks_o/Ks_u berücksichtigt. Abb. 42 zeigt das Berechnungsergebnis für ein 30 m-Raster.

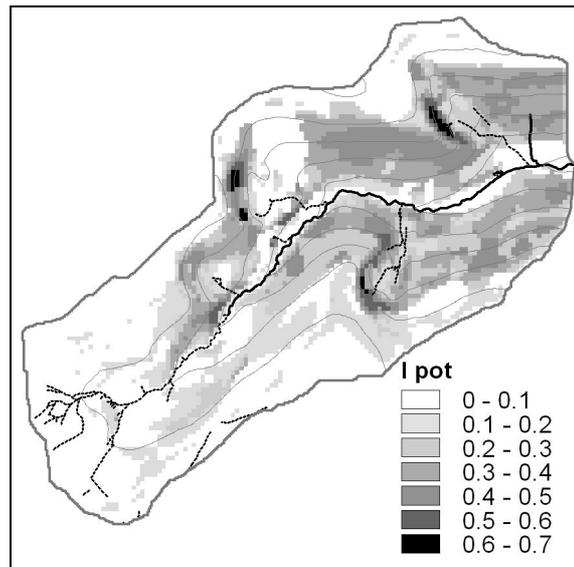


Abb. 42: Interflow-Index I_{pot} für das Dürreychgebiet (30 m-Raster).

Deutlich zeichnen sich die Gebiete mit großen Hangneigungen in der Osthälfte des Einzugsgebiets ab. Bei vergleichbaren Neigungsbedingungen ergeben sich für die südexponierten Sommerhänge aufgrund der ausgeprägteren Schichtung im Mittel höhere Werte als auf den nordexponierten Winterhängen. Die höchsten Indexwerte treten im Bereich der steilen Karwände auf.

Ein Vergleich der I_{pot} -Werte mit der Hydrotopklassifikation gemäß Regelwerk (Abb. 31) zeigt:

- Betonung der steilen Lagen. Die Lage von Flächen mit Zwischenabfluss (ZWA1, ZWA2) wird nur geringfügig modifiziert.
- Abschwächen des Zwischenabflusspotenzials auf Flachlagen. Trotz hoher Schichtungswerte ergeben sich überwiegend niedrige Indizes infolge kleiner Werte für $\sin\beta$.

Das Digitale Höhenmodell (DHM) ermöglicht somit eine differenziertere Identifizierung von Flächen mit potenziellem Zwischenabfluss als die FSK-Informationen allein.

7.3.4 Kombination der Indizes

Ansatz ohne Reinfiltration: Der Interflow-Index I_{pot} als Maß für den Zwischenabfluss kann mit dem Topographischen Index als Maß für den Sättigungsflächenabfluss kombiniert werden. Dazu wird der Ansatz des gewichteten Topographischen Indexes weiterentwickelt: Flächen mit hohen I_{pot} -Werten erhalten nun anstelle von Null ein positives Flächengewicht im Wichtungsgird und können auf diese Weise zur Fließakkumulation beitragen (Kap. 6.1.5). Diesem Vorgehen liegt die Vorstellung zugrunde, dass Sättigungsflächenabfluss (SOA) reinfiltrieren kann und sich bei starker Schichtung und Neigung (folglich hohen I_{pot} -Werten) teilweise als Zwischenabfluss (ZWA) im Hang fortsetzt (Abb. 43).

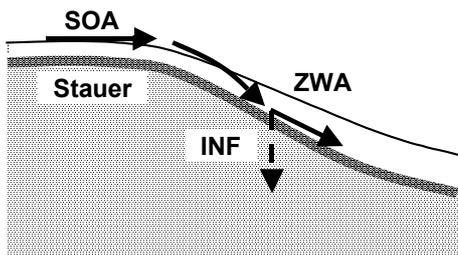


Abb. 43: Sättigungsabfluss (SOA) reinfiltriert (INF) und wird als Zwischenabfluss (ZWA) teilweise weitergeleitet.

Die kombinierte Ergebniskarte (Abb. 44) zeigt die relative Verteilung von Flächen mit oberflächennahen Abflüssen nach langanhaltenden, extensiven Niederschlägen.

Insgesamt ergibt sich ein sehr ähnliches Bild wie beim Gewichteten Topographischen Index (vgl. Abb. 38). Jedoch zeigen die Unterhänge im Ostteil des Einzugsgebiets erhöhte Indexwerte (a). Aufgrund ihrer ausgeprägteren Ortsteinbildungen treten hier wieder die Sommerhänge stärker hervor als die Winterhänge. Bachnahe Seitengerinne (b) erhalten nun ein stärkeres Gewicht, weil dort bei entsprechender Schichtung die Zellwerte akkumulieren.

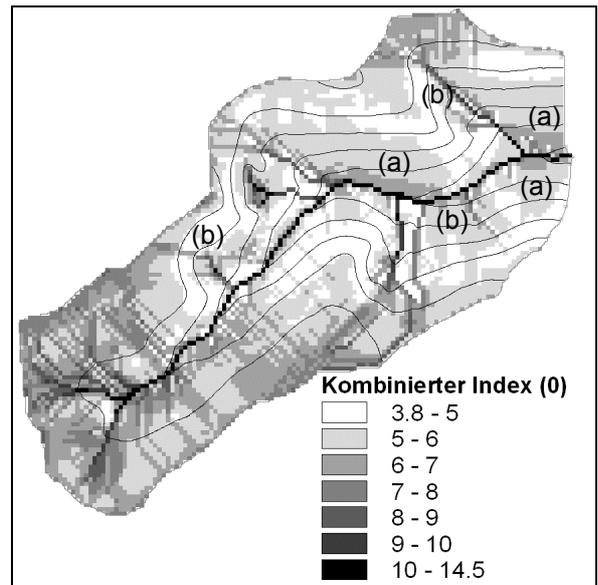


Abb. 44: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index

Ansatz mit Reinfiltration: Analog zum Ansatz des Topographischen Indexes mit Reinfiltration (s.o.) kann ein konstanter Wert Δw vom Wichtungsgird subtrahiert werden, um so unterschiedliche Vorfeuchten zu simulieren. Abb. 45 a-c zeigen die Berechnungsergebnisse für $\Delta w = 0,2$ bis $0,4$. Wie in Abb. 39 und Abb. 40 ist erkennbar, dass sich vorfluterferne Flächen mit hohen Indexwerten sukzessive vom Vorfluternetz abkoppeln. Dies geschieht in der Reihenfolge (1) FH, (2) HI, (3) SB, (4) SM; einer Reihenfolge, die sehr gut mit den Geländebeobachtungen während Trockenphasen übereinstimmt. Auch die Tatsache, dass Zwischenabfluss nur bei sehr feuchten Vorbedingungen eine Rolle spielt (Abb. 44), wird von diesem Ansatz gut wiedergegeben.

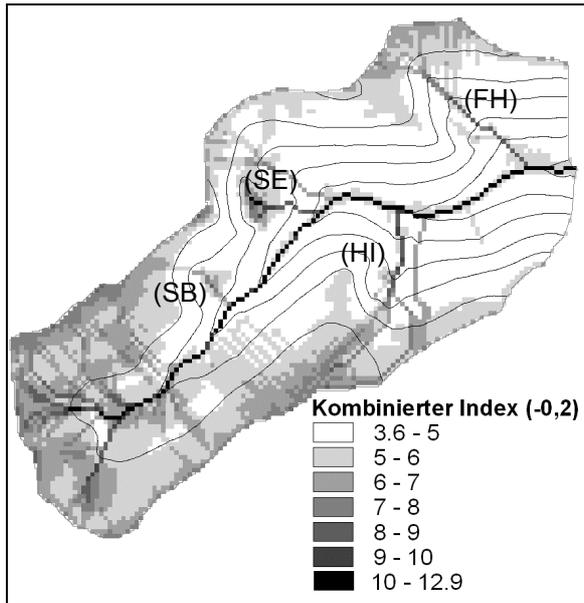


Abb. 45 a: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index mit Reinfiltration (Subtraktion von $\Delta = 0,2$)

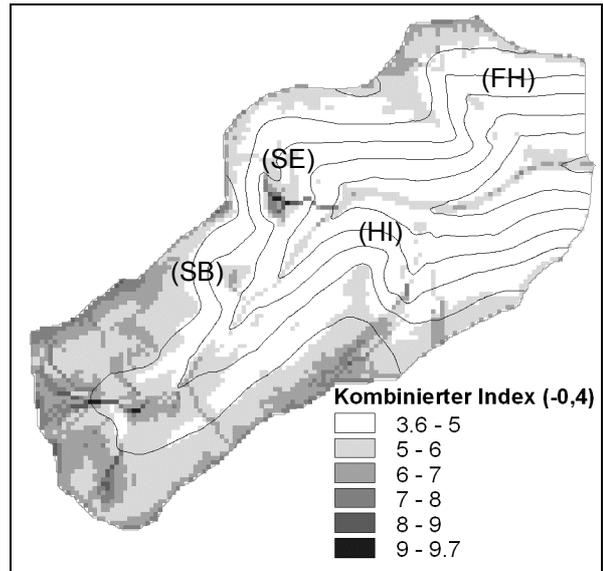


Abb. 45 c: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index mit Reinfiltration (Subtraktion von $\Delta = 0,4$)

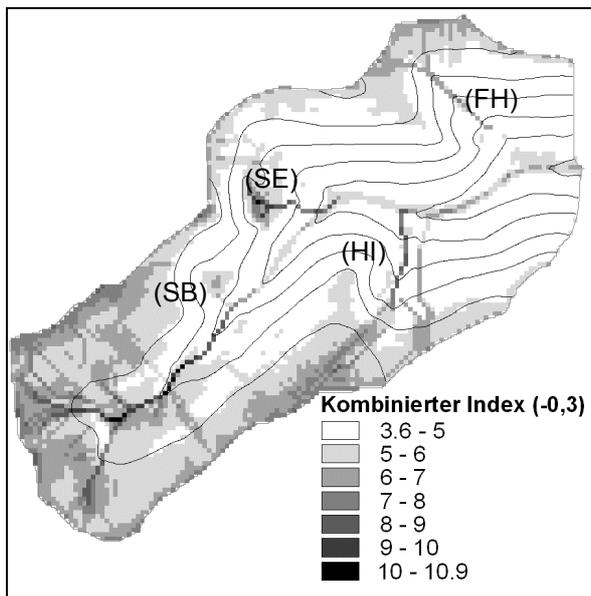


Abb. 45 b: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index mit Reinfiltration (Subtraktion von $\Delta = 0,3$)

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich auf Grundlage der FSK-Daten und des DHM mit einfachen Modellkonzepten eine wirklichkeitsnahe räumliche und zeitliche Verteilung vieler der in Kap. 5 „Hypothesen“ genannten Abflussbildungsprozesse generieren lässt.

Sind diese Prozesse auch auf kleineren Skalen – am Hang, am Bodenprofil – nachweisbar, und lassen sie sich auf strukturelle Eigenschaften zurück führen? – Diesen Fragen soll im Folgenden nachgegangen werden. Dabei werden die aus der FSK abgeleiteten Hydrotypen kapitelweise abgehandelt.

8 Überprüfung der Regionalisierungsergebnisse

8.1 Flächen mit Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA)

Als Ursachen für die Entstehung von Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) kommen in Frage:

- Geringe Durchlässigkeiten der Oberböden
- Hydrophobizität organischer Auflagen

Die beiden Entstehungsursachen werden im Folgenden geprüft.

Durchlässigkeit der Oberböden: Im Entscheidungsbaum zur Hydrotopausgliederung (Abb. 23, Kap. 6) wurde eine effektive gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens von $K_s \geq 5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ oder 17 mm h^{-1} als Schwellenwert definiert, oberhalb dessen bei einem Starkregen kein HOA mehr entsteht. Dies entspricht der Klassengrenze zwischen den K_s -Klassen 3 und 4 der AG BODEN (1994). Die Häufigkeitsverteilung der nach LGRB (1998) abgeleiteten K_s -Klassen für die Oberböden gibt daher Aufschluss über das potenzielle Auftreten von Infiltrationsüberschuss (Abb. 46).

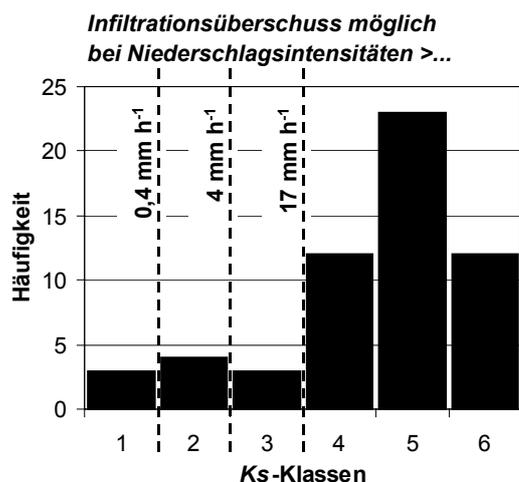


Abb. 46: Häufigkeitsverteilung der K_s -Klassen für 57 Oberböden im Dürreychgebiet ohne Berücksichtigung der Durchwurzelung

Grundlage für die Häufigkeitsverteilung sind die eigenen Erhebungen sowie die Musterprofile der FSK (GRAßMANN 1996). Wird der Durchwurzelung des Oberbodens mit einem Zuschlag um eine K_s -Klasse Rechnung getragen, so verschieben sich die Klassen 1 bis 5 in Abb. 46 um eine Klasse nach rechts. Die Horizonte mit $K_s < \text{Klasse 4}$ sind in Tab. 25 aufgeschlüsselt und werden einer näheren Betrachtung unterzogen.

Tab. 25: Aufschlüsselung der Horizonte aus Abb. 46 mit abgeleiteten K_s -Klassen < 4

K_s -Klasse	Horizont	FSK-Einheit	Quelle
1	hH	MLa	FSK
1	hHm	wzMi	E
1	hHm*	gfS	E
2	ROF-MR	HMi ⁺	E
2	ROF*	HgfIS	E
2	ROF*	pS	E
2	ROF*	SFH ⁺	E
3	ROF	HMi	FSK
3	Aeh	HgfIS ⁺	FSK
3	Aeh*	HpS	E

K_s -Klassen und Horizontsymbole nach AG BODEN (1994); * = Horizontausprägung mit von der FSK stärker abweichenden Merkmalen; FSK-Einheiten: vgl. Aufschlüsselung in Anhang 2; Quellenangaben: E = Eigene Erhebung, FSK = Forstliche Standortskarte (GRAßMANN 1996)

Mineralische Oberböden: Für die mineralischen Oberböden im Dürreychgebiet ergibt sich die minimale K_s -Klasse 3 einmal für den lehmigen Oberboden der Einheit HgfIS⁺ („Schwach Grundfeuchter lehmiger Hochlagensand“) sowie – abweichend von der FSK-Legende – für die Einheit HpS („Podsolierter Hochlagensand“). Berücksichtigt man den Zuschlag für Oberböden um eine K_s -Klasse, so erhöht sich der Wert auf mindestens $5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (Klassenuntergrenze) und genügt damit

nur im ungünstigen Falle dem Kriterium. Demnach kann HOA für die mineralischen Oberböden im Dürreychgebiet praktisch ausgeschlossen werden.

Torfe: Sehr geringe Ks-Werte wurden hingegen für die Torfhorizonte der Missen und Moorlagen (Ks-Klasse 1) sowie für torfähnliche Feuchtrohhumusaufgaben abgeleitet (Tab. 25). Torfähnliche Feuchtrohhumusaufgaben waren jedoch gelegentlich auch in Standortseinheiten anzutreffen, die i.d.R. aeromorphe Humusformen aufweisen (z.B. pS, SFH, Tab: 25). Für die Torfe gibt die FSK meist starke Zersetzungsgrade infolge der Entwässerungsmaßnahmen an. Dies konnte auch durch die eigenen Profiluntersuchungen bestätigt werden (P 12-P 14, P 20, P 27, P 28, vgl. Anhang 4). Die organischen Substrate sind meist stark durchwurzelt. Regelmäßig wurden größere Makroporen infolge abgestorbener Baumwurzeln beobachtet. Auf lichtreichen Standorten bauen Gräser wie das Pfeifengras (*Molinia caerulea*) oder Halbsträucher wie die Heidelbeere (*Vaccinium spec.*) die Torfe zu einem grobporigen Graswurzelfilzmoder (GMO) ab. Dadurch wird die geringe Matrixdurchlässigkeit relativiert, so dass auf vielen Standorten allenfalls verzögerter Infiltrationsüberschuss zu erwarten ist. Die betreffenden Flächen machen im Dürreychtal 3,8 % aus und konzentrieren sich im oberen Einzugsgebiet. Ihre Verteilung geht aus Abb. 33 (Kap. 7) hervor.

Hydrophobizität: Wasserabweisende organische Auflagen können die Infiltration hemmen (DOERR et al., 2000) und auf diese Weise zu Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) führen. Tab. 26 stellt die Hydrophobizität verschiedener organischer Auflagen im Dürreychgebiet im feldfrischen und getrockneten Zustand zusammen.

Tab. 26: Hydrophobizität verschiedener organischer Auflagen im Dürreychgebiet im feldfrischen und getrockneten Zustand

Probe	Auflagehumus	Hydrophobizität		Feldfeuchte A-Horiz.
		feldfr.	trocken	
5	Mullartiger Moder* L: Nadelstreu (Of, Oh kaum vorh., * vermutl. erodiert)	4 (1)	- -	feu 2
1	Moder L: Nadelstreu Oh:	4 4	4 5	feu 2
4a	Rohhumus L: Nadelstreu Oh:	4 4	4 4	feu 4
6	Rohhumus Of:	2	2	feu 2
3	Feuchtrohhumus L: Wurzelfilz, Gras Oh:	2 2	3 3	feu 4
2	Torf stark zersetzt (z 4) hHm:	1	2	feu 4

Probenstandorte: (1) Anschnitt Forsthaus, (2) Ächtlesweg, (3) Klimastation FF, (4) Seemisskar, (5) Intensivmessprofil P 2, (6) Intensivmessprofil P 1

Hydrophobizitätsgrade: (1) nicht hydrophob, (2) leicht hydrophob, (3) stark hydrophob (4) sehr stark hydrophob, (5) extrem hydrophob

Die Ergebnisse zeigen:

- Sehr starke Hydrophobizität der Nadelstreu und O-Horizonten aeromorpher Humusformen (Benetzungsdauer bis zu 1 h)
- Nur leichte Hydrophobizität des zersetzten Torfs (Benetzungsdauer < 1 min).

Folglich können nach trockenen Vorbedingungen auf den im Dürreychgebiet verbreiteten Flächen mit Rohhumus und Moder Benetzungswiderstände auftreten und bei Starkregen zu Infiltrationshemmung führen. Dieser Zustand kann lediglich zu Beginn sommerlicher Gewitterereignisse auftreten. Für längere Ereignisse (> 1 h) sowie für Ereignisse mit Vorfeuchte spielt dieser Prozess keine Rolle.

Bei Feuchtrohhumus und zersetztem Torf ist grundsätzlich keine nennenswerte Infiltrationshemmung durch Hydrophobizität zu erwarten.

Wegeabfluss: Für viele Standortseinheiten hebt die FSK die Gefahr von Oberflächenverdichtung durch Maschineneinsatz hervor. Die damit verbundene Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit insbesondere der organischen Auflage konnte bereits auf häufig begangenen Fußwegen im Bereich der Klimastation FF durch Bohrstockeinschläge qualitativ beobachtet werden: Unter einer gesättigten, z.T. überstauten organischen Auflage schloss sich der häufig ungesättigte Mineralboden an. Auf befestigten Forstwegen mit wassergebundener Decke sowie auf unbefestigten Fahrspuren war nicht selten Oberflächenabfluss im Verlauf von Ereignissen zu beobachten. Dieser stammte z.T. aus Hangwasseraustritten, z.T. zweifellos aus Infiltrationsüberschuss. Abb. 47 zeigt das kartierte dichte Netz von Forst- und Maschinenwegen im Dürreychgebiet; Tab. 27 schlüsselt die zugehörigen Weglängen und ihre Flächenanteile auf.

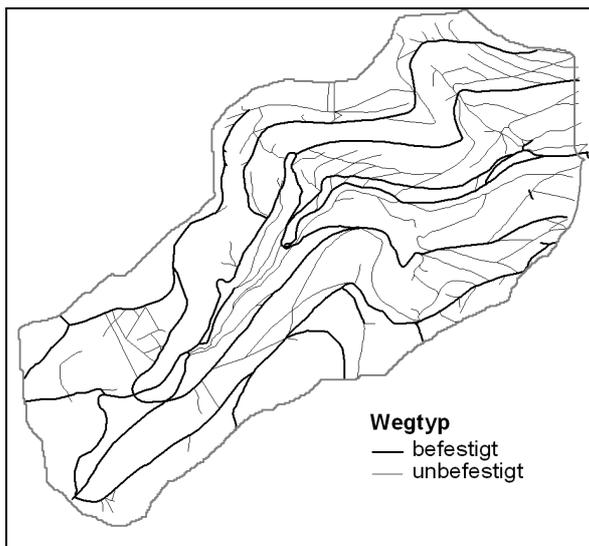


Abb. 47: Kartiertes Wegenetz im Dürreychgebiet (Gesamtlänge ca. 68 km). Die Wegdichte beträgt damit ca. 10 km km⁻².

Tab. 27: Weglängen und ihre Flächenanteile im Dürreychgebiet

Wegtyp	Weglänge	Wegbreite*	Flächenanteil
befestigt	31 km	3,5 m	1,5 %
unbefestigt	38 km	1,5 m	0,8 %
Summe:	69 km	-	2,3 %

* Geschätzte HOA-bildende Wegbreite (Fahrspur, verdichtete Wegoberfläche ohne Bankett)

Setzt man eine abflusswirksame Breite von 3,5 bzw. 1,5 m an, so ergibt sich ein Flächenanteil von rund 2 %, die potenziell HOA bilden können. Die Abflusswirksamkeit des Wegeabflusses für den Vorfluter ist jedoch unklar: Durch Wasserableitungseinrichtungen reinfiltiert ein großer Teil des Wegeabflusses, wie eigene Untersuchungen sowie SANDER (1998) gezeigt haben. Lediglich Wege in der Nähe des Gewässernetzes sind daher abflussbeitragend.

Die maximale Flächengröße mit potenziellem Horton'schen Oberflächenabfluss kann in der Summe mit etwa 6 % angegeben werden. **Starkregenereignisse:** Bei Starkregenereignissen auf trockene Vorbedingungen wurden in der zweijährigen Messphase jedoch lediglich Abflussbeiwerte im Gesamteinzugsgebiet um 0,01 oder 1 % erreicht (Tab. 28).

Tab. 28: Kennwerte für Starkregenereignisse bei geringer Gebietsfeuchte

Datum	Niederschlags-summe [mm]	max. Intens. [mm h ⁻¹]	Abfluss-beiwert
31.05.98	20,0	30,1	0,006
4.08.99	33,0	30,1	0,01
6.08.99	19,9	15,0	0,01

Quelle: CASPER (2002), vgl. Anhang 8

Am Beispiel eines Gewitterereignisses am 4. August 1999 lässt sich die schnelle Abflussreaktion exemplarisch zeigen (Abb. 48).

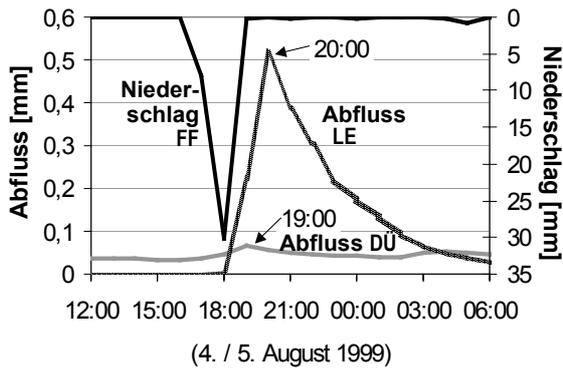


Abb. 48: Gewitterereignis August 1999: LE = Pegel Lerchenstein, DÜ = Hauptpegel Dürreych, FF = Messstation Freifläche

- 16:00: Einsetzen des Niederschlags; Maximum 18:00 (ca. 20 mm h^{-1})
- 17:00: Einsetzen der Abflussreaktion am Hauptpegel Dürreych (DÜ); Maximum um 19:00
- 18:00: Einsetzen der Abflussreaktion am Pegel Lerchenstein (LE) im oberen Einzugsgebiet; Maximum 20:00.

Die Abflussspitze des Pegels LE im Kopfeinzugsgebiet (19:00) folgt erst nach der Abflussspitze am Gebietsauslass (DÜ, 18:00). Daraus kann geschlossen werden, dass zur Zeit des Peaks am Pegel DÜ nur gewässernahe Flächen und Wege im unteren Einzugsgebiet am Abfluss beteiligt waren.

Bei Niederschlagsintensitäten von ca. 30 mm h^{-1} an der Messstation FF konnte die theoretische Infiltrationskapazität auf dem Flächentyp HOA überschritten werden. Während das Gesamteinzugsgebiet nur 3,8 % HOA-Flächen aufweist, hat dieser Flächentyp im Teileinzugsgebiet LE mit 28,4 % die größte Verbreitung (Abb. 49)

Für das dargestellte Abflussereignis am Pegel LE beträgt der Abflussbeiwert 6,0 %, am Hauptpegel DÜ dagegen nur 1,0 %. Mithin hat das Teileinzugsgebiet LE mit einem leicht überproportionalen Direktabfluss reagiert. Eine

Erklärungsmöglichkeit liegt in der guten Gewässeranbindung der Flächen vom Typ HOA: Wie in Abb. 49 erkennbar, wird eine Teilfläche vom Typ HOA vom relativ dichten Dränagenetz entwässert.

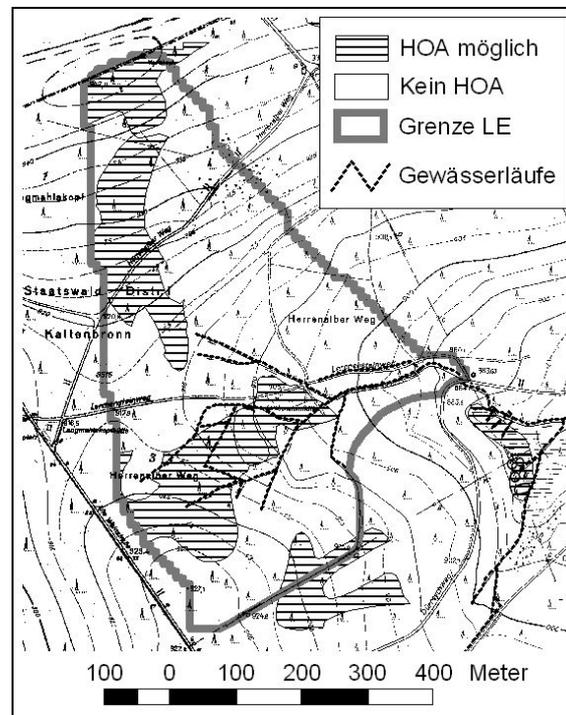


Abb. 49: 28,4 % Flächen mit potenziellem Horton'schem Oberflächenabfluss im Teileinzugsgebiet Lerchenstein (LE)

Möglicherweise weist die gegenüber Pegel DÜ etwas verzögerte Abflussreaktion darauf hin, dass sich im Teileinzugsgebiet LE z.T. schneller Sättigungsflächenabfluss (SOA1) gebildet hat.

An der Bodenfeuchtemessstation FF, welche die Sättigungsflächen repräsentiert (Kap. 8.3.3), wurde in 20 und 35 cm Tiefe ein gleichzeitiger Anstieg der Bodenfeuchten auf den Sättigungswert registriert (Abb. 50). Es ist also nicht zu entscheiden, ob es bei diesem Ereignis wie üblich zur Aufsättigung von unten nach oben gekommen ist, oder zum Infiltrationsüberschuss.

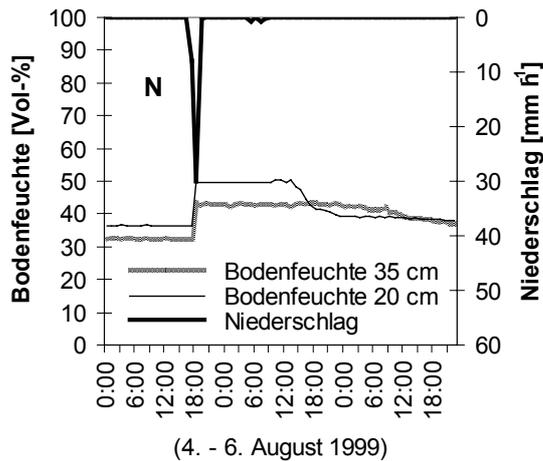


Abb. 50: Gleichzeitiger Anstieg der Bodenfeuchten an der Messstation FF

An diesem Beispiel zeigt sich, dass sich die schnellen Abflussbildungsprozesse wie Horton'scher Oberflächenabfluss und Sättigungsflächenabfluss auf den Feuchflächen weder prozessmäßig noch räumlich deutlich voneinander trennen lassen. Zudem ist nicht zu klären, ob die verfrühte Abflussspitze am Gebietsauslass DÜ nicht möglicherweise allein durch Reaktion der vorfluternahen Flächen erklärbar ist. Die Abflussbildung auf diesen Flächen wird im folgenden Kapitel untersucht.

8.2 Vorfluternahe Beitragsflächen

Auen und sonstige vorfluternahe Flächen spielen bei der Abflussbildung eine besondere Rolle, da sie schnelle Abflussbeiträge durch Sättigungsflächenabfluss oder durch Druckfortpflanzung liefern können (Kap. 2). Auen- und Rinnenböden sind in der FSK separat kartiert und können so gleich zu Beginn des Entscheidungsbaums abgetrennt werden.

8.2.1 Rinnenböden

Wie aus der Übersichtskarte (Abb. 51) ersichtlich ist, begleiten die Rinnenböden ausschließlich den Hauptvorfluter. Die Flächen entlang der Nebengerinne sind nicht separat ausge-

wiesen sondern gehen in anderen Standorteinheiten auf.

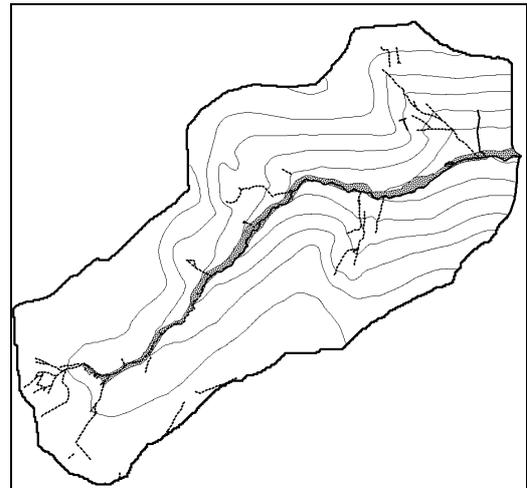


Abb. 51: Standorteinheiten Rinne (Ri) und Blockrinne (BIRi) gemäß FSK (GRABMANN 1996). Ihr Flächenanteil beträgt 2,9 %

Die Ökologische Feuchte der Standorteinheiten ist frisch bis grundfeucht, je nach Abstand zum lokalen Grundwasserspiegel. Die Böden sind meist sandige bis lehmige, humose Braunerde- bis Braunerde-Pseudogley-Kolluvisole mit z.T. sehr hohem Skelettgehalt (Abb. 52). Die Infiltrationsbedingungen werden demzufolge als gut eingeschätzt.



Abb. 52: Terrasse aus extrem blockreichem Substrat, GOK ca. 1,5 m über Mittelwasser

Zur Abflussbildung auf gewässernahen Flächen ist anzumerken, dass nicht nur Sättigungsabfluss (SOA) zu schnellen Abflussbeiträgen führen kann, sondern auch Infiltration

bei geringen Grundwasserflurabständen zu Druckantworten im Gewässer führen kann (INF!). Dies macht folgende Abschätzung deutlich: Wird von einem sandig-kiesigen Substrat für die jüngeren Talterrassen (s.u.) ausgegangen, so kann ein effektiver K_s -Wert von 10^{-3} m s^{-1} (ZIMMERMANN 1998:43) angenommen werden. Dadurch ergeben sich theoretische Sickerzeiten in der Größenordnung von nur 0,5 h für einen Flurabstand von 1,5 m über Mittelwasser. Stärker verzögerte Beiträge durch Infiltration sind von den pleistozänen Blockterrassen (bis 4 m über Mittelwasser) zu erwarten.

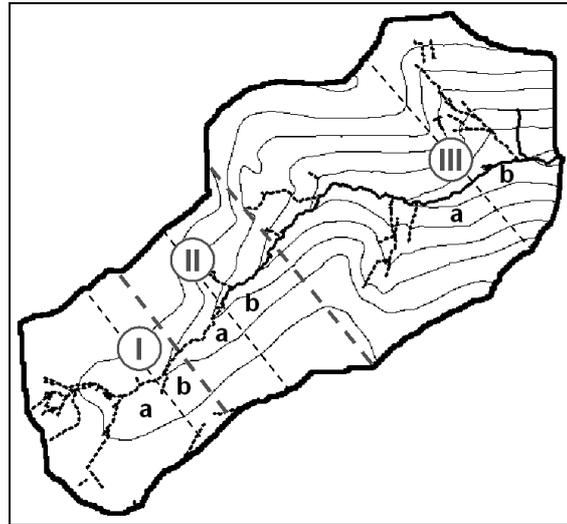


Abb. 53: Längsgliederung des Dürreychbachs (Übersichtskarte)

8.2.2 Morphologie des Dürreychbachs

Der Dürreychbach lässt sich morphologisch in die Fließabschnitte I, II und III mit je zwei Unterabschnitten gliedern (Abb. 53 und Abb. 54).

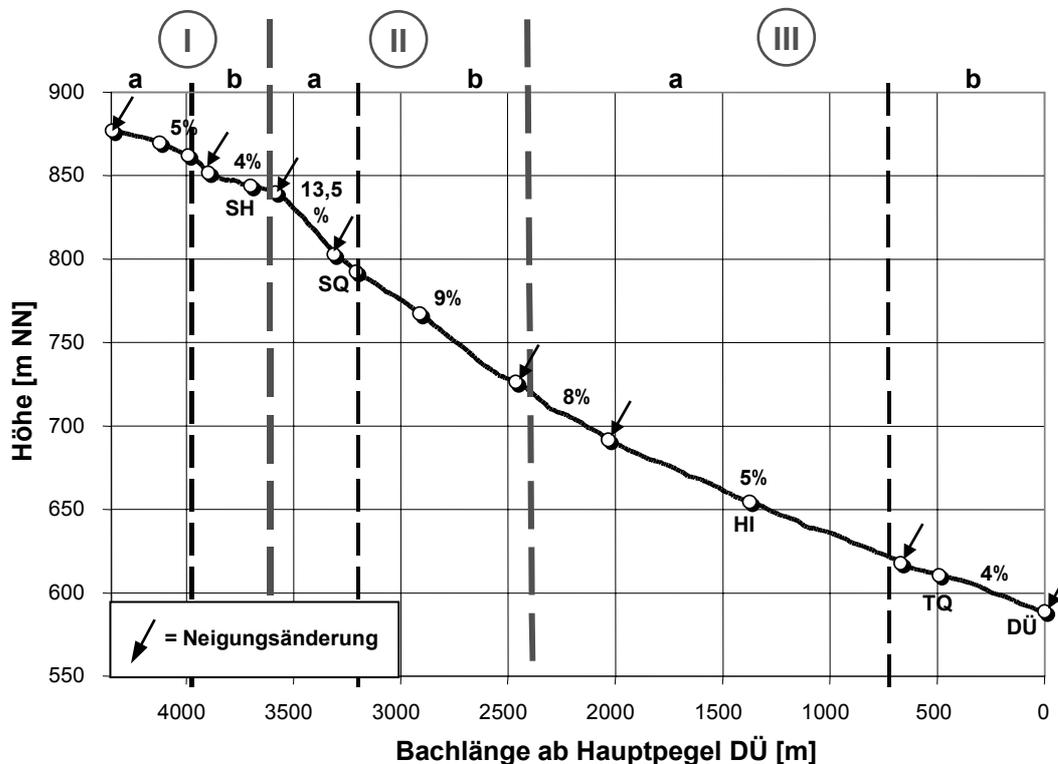


Abb. 54: Stark überhöhter Längsschnitt des Dürreychbachs von der Quellmulde bis zum Hauptpegel (DÜ), vgl. Abb. 53. Das oberstrom liegende, verzweigte Dränagenetz der Hochflächen wurde nicht dargestellt.

Tab. 29 stellt die Charakteristika der Fließabschnitte zusammen.

Tab. 29: Beschreibung der Fließabschnitte des Dürreychbachs

I	Schwach geneigte Talmulde unterhalb der Hauptkonglomerat-Hochflächen Wasserführung nur temporär.
a)	Undeutlich ausgebildete Terrassen
b)	Einkerbung durch rückschreitende Erosion
II	Mittel bis stark geneigtes Kerbtal mit sehr schmaler Talsohle Z.T. von Rutschmassen überprägt.
a)	Stark geneigter Abschnitt im Geröllfreien Hauptbuntsandstein Wasserführung nur temporär
b)	Mittel geneigter Abschnitt im weicheren Eck'schen Konglomerat. Wasserführung ab Stillwasserquelle (SQ) permanent
III	Mittel bis schwach geneigtes Kerbsohlental Erkennbare Terrassen, z.T. Blockwälle
a)	Schmale Talsohle Terrassen deutlich erkennbar
b)	Aufweitung der Talsohle

Die Aue ist je nach Fließabschnitt im Querprofil unterschiedlich stark differenziert (Abb. 55). In den unteren Fließabschnitten II und III sind deutlich verschiedene Niveaus zu erkennen:

- Rezentes Mittelwasserniveau (A)
- Rezente Hochwasserterrasse (B)
- Mindestens zwei ältere Terrassenniveaus (C) und (D)

Abschnitt I zeigt eine muldenartige Talform mit geringem Gefälle. Bis etwa 200 m vor Übergang in den versteilten Abschnitt II ist der Bachlauf jedoch durch rückschreitende Erosion in die Mulde eingeschnitten (Ib). Sättigungsflächenabfluss durch Ansteigen des lokalen Grundwasserspiegels war demzufolge nur in der oberen nassen Kernzone Ia der Talmulde zu beobachten. Im Abschnitt Ib jedoch dräniert der Bachlauf die bachnahen Flächen.

Abschnitt II zeichnet sich durch hohes Gefälle und einen sehr schmalen, tief eingeschnittenen Talboden aus, der keinen Raum für die Bildung größerer Sättigungsflächen in der Aue bietet.

Durch starke Übersteilung der Hänge sind hier häufiger Rutschmassen zu beobachten, die teilweise den Terrassen aufsitzen und den Gewässerlauf zusätzlich einengen.

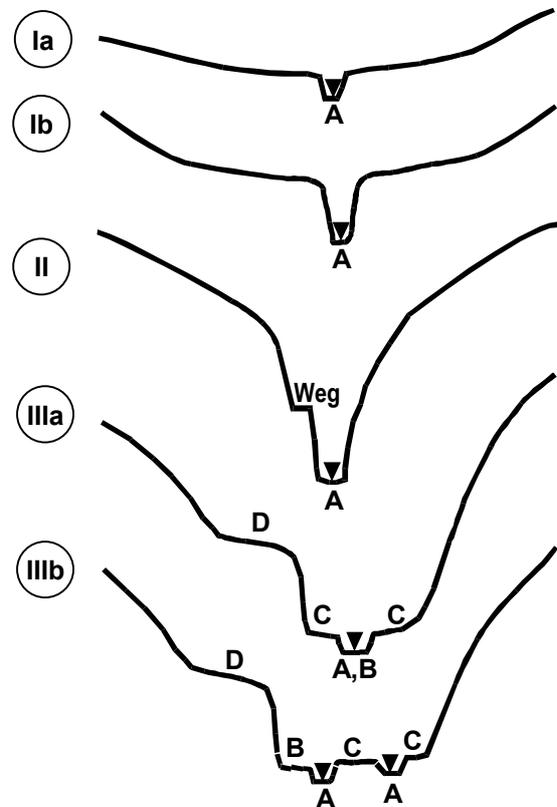


Abb. 55: Schematische Darstellung der Talentwicklung in den Abschnitten I bis III (unmaßstäblich). A = heutiger Mittelwasserspiegel; B = rezente Hochwasserterrasse; C und D = ältere Terrassensysteme.

Abschnitt III verfügt über einen etwas breiter entwickelten Talboden. Dieser wird jedoch nur zum geringen Teil von der rezenten Aue (A) und ihrem Hochwasserbett (B) eingenommen. Ältere Terrassensysteme nehmen wesentliche Teile des Talbodens ein. Die Terrasse des rezenten Hochwasserbetts (B) liegt im Mittel etwa 0,7 m über dem heutigen Mittelwasser. Eine weitere Terrassengeneration (C) ist in Höhe von ca. 1,5 bis 1,8 m entwickelt. Auf diesen Terrassenniveaus liegen nur bis zu 2 m Lockersedimente über dem Anstehenden, im Übergang zum Hang bis zu 3 m (Anhang 7-5).

Exkurs „Blockterrassen“: Aufbau und Entwicklung:

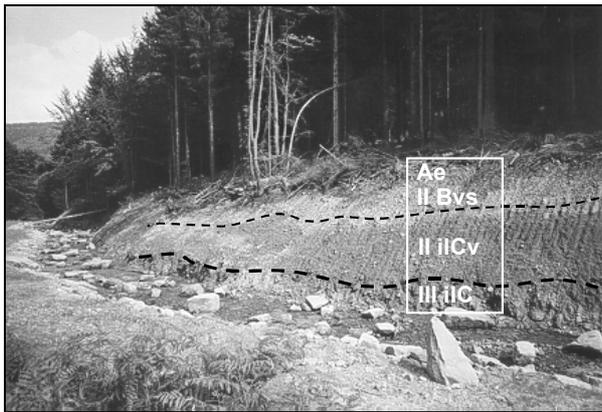


Abb. 56: Hanganschnitt rechts des Dürreychbachs am Forsthaus Dürreych, Fließabschnitt IIIb (5.08.99)

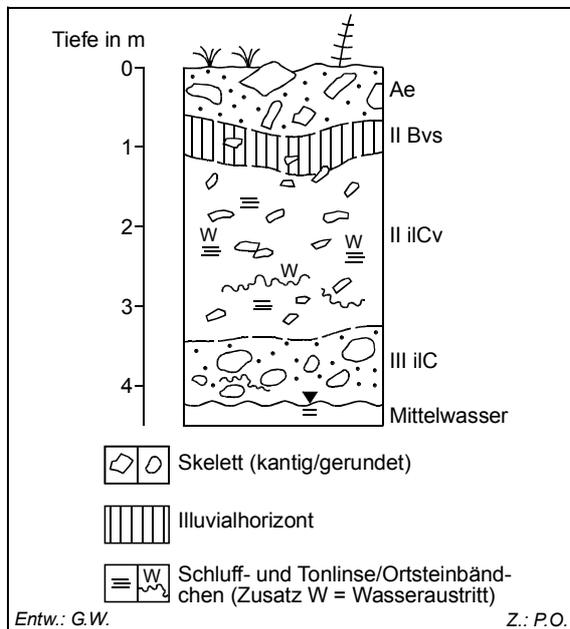


Abb. 57: Profilaufbau des Hanganschnitts Abb. 56

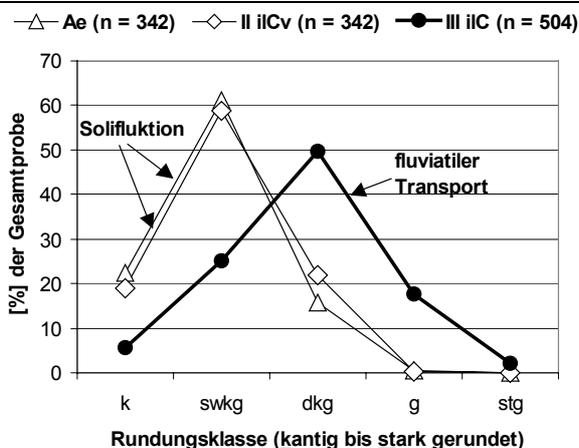


Abb. 58: Rundungsgrade der Skelettfraktion > 22,4 mm für Oberboden, Schuttdecke und Fluviales Sediment

Aufbau:

Abb. 57 zeigt den Aufbau einer in der Geologischen Karte (GLA BW 1994) als Blockterrasse dargestellte Fläche im Fließabschnitt IIIb des Dürreychbachs.

Ae

- Hellgrauer, locker-sandiger Eluvialhorizont (SI2-SI3)
- Mächtigkeit meist ca. 0,6 bis 0,8m
- Viel kantiges, grobes Skelett (fX, mX), nicht eingeregelt;
- Stellenweise Anzeichen von Hydromorphierung

II Bvs

- Kräftig gefärbter lehmiger Illuvialhorizont (SI4)
- Mächtigkeit ca. 0,5 m
- Stellenweise schwache Rostfleckung

II ilCv

- Sandige Schuttdecke (SI2-SI3), z.T. plattig verfestigt
- Mächtigkeit bis ca. 2,5 m
- Weniger und feineres Skelett, teilweise eingeregelt
- Lokal rotviolette, schluff- und tonreichere Einschaltungen; hier starke Durchfeuchtungen, Wasseraustritte (Abb. 56)
- Stellenweise stauende dünne Ortsteinbändchen

III ilC

- Hellbraunes fluviatiles Sediment (mSgs), z.T. plattig verfestigt
- Mächtigkeit ca. 1,5 m über Mittelwasserniveau
- Viel gerundetes, z.T. eingeregelttes Skelett
- Vereinzelt Ortsteinbändchen

Analyse und Interpretation

Rundungsgrade: Die Analyse der Skelettfraktion hinsichtlich ihrer Rundungsgrade (Abb. 58) gibt Hinweise zum Materialtransport: 70 % deutlich kantengerundetes (dkg) bis gut gerundetes (g) Skelett weist eindeutig auf fluviatilen Transport des Liegenden (III ilCv) hin. Der Eluvialhorizont und die plattige Fließerde zeigen trotz unterschiedlicher Skelettgrößen ein nahezu identisches Rundungsspektrum mit Anteilen von 80 % schwach kantengerundetem (swkg) und kantigem (k) Skelett. Der hohe Anteil an schwach kantengerundetem Material mit rauer Oberfläche und abgerundeten Kanten deutet auf Transport durch Solifluktion hin.

Lithologie: Der Aufschluss befindet sich an der Obergrenze des Rotliegenden (ro) / Untergrenze des Unteren Buntsandsteins (su). Demzufolge entstammt das Schuttdeckenmaterial überwiegend dem hangenden Unteren Buntsandstein sowie zum geringeren Teil dem untersten Glied des mittleren Buntsandsteins (smc1), dem Eck'schen Konglomerat. Der sog. Tigersandstein (su) gibt sich durch seine schwarzbraune Fleckung zu erkennen. Die Gesteine des Eck'schen Konglomerats sind grobkörniger, mürber und zeigen charakteristische rote Tongallen, die rasch herauswittern. Ganz vereinzelt finden sich sehr grobkörnige Stücke eines Fanglomerates, das dem Rotliegenden zuzuordnen ist. Damit bestätigt sich die stratigraphische Einordnung des Standortes. Im Liegenden treten auch die widerstandsfähigen Gesteine des Geröllfreien Hauptbuntsandsteins (sm) auf sowie einzelne Quarzkiesel auf.

Fazit: Aus den Befunden kann geschlossen werden, dass die Schotterterrasse eines ehemals breiteren pleistozänen Talbodens durch solifluidal verlagerten Hangschutt überdeckt wurde. Der im Jahre 1936 von M. Frank geprägte Begriff „Blockterrasse“ (GLA BW 1994) erscheint damit nur für den unteren Teil des Aufschlusses passend. Die plattig verdichteten, tieferen Schuttdecken mit feinmaterialreicheren Lagen sind auch nach längeren Trockenphasen durchfeuchtet und spielen eine Rolle für den langsamen Zwischenabfluss.

Ältere Terrassen, wie die in Kap. 2 genannten „Blockterrassen“, liegen bis zu 4 m über dem heutigen Mittelwasserniveau (D). Im Zuge einer Hochwasserbaumaßnahme wurde eine der hoch gelegenen Terrassen im unteren Talabschnitt des Dürreychbachs angeschnitten. Der Aufbau und die daraus zu folgernden Hangentwicklungsprozesse sind im Exkurs „Blockterrassen“ dargestellt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass lediglich kleine Flächen des Talbodens (Terrassensysteme A, B und C) die morphologischen Voraussetzungen für die Bildung von Sättigungsabfluss durch ansteigendes Grundwasser oder schnell abflusswirksame Infiltration erfüllen. Für die Blockterrassen (D) ist die Entstehung schneller Abflüsse – insbesondere von Sättigungsflächenabfluss durch Anstieg des Grundwasserspiegels vom Vorfluter – praktisch auszuschließen. Die unterschiedlichen Flurabstände führen zu einer kleinräumigen Differenzierung des Wasserhaushaltes, die sich oft in einer Größenordnung von weniger als 10 m abspielt. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die FSK im Maßstab 1:10.000 diese Differenzierung nicht abbildet, sondern den gesamten Talboden als Rinnenstandort ausweist. Im Entscheidungsbaum kann dieser Standortseinheit folglich nur untergeordnet Sättigungsabfluss zugeordnet werden, der jedoch ggf. sehr schnell abflusswirksam werden kann. Diese Schlussfolgerung kann durch vegetationskundliche Untersuchungen untermauert werden (s.u.).

8.2.3 Bachnahe Vegetation und Abflussbildung

Die kleinräumige Differenzierung des Wasserhaushaltes spiegelt sich in der Vegetation besonders deutlich wieder. Ihr Arteninventar und ihre Verbreitung erlauben Rückschlüsse auf zu

erwartende Abflussbildungsprozesse und ihren Flächenanteil. 46 Vegetationsaufnahmen im Wald oder auf Schlagfluren und 7 Wiesenaufnahmen entlang des Dürreychbachs und seiner Nebengerinne sowie die Berücksichtigung der Dominanzverhältnisse bildeten die Grundlage für die Ausweisung von Vegetationstypen (Vegetationsaufnahmen und Lageplan s. Anhang 6).

***Luzula sylvatica*-reiche Bestände:** Bei der Begehung des Talbodens fiel auf, dass die Terrassen (B) und auch (C) oft mit *Luzula sylvatica* (Wald-Hain-Simse) in hoher Deckung bestanden sind. Nachforschungen in der Literatur ergaben, dass SCHWABE (1987:147ff) ebenfalls dominant mit *Luzula sylvatica* bewachsene Terrassen an Bächen des Nordschwarzwalds feststellt, die auch überflutet werden. SCHWABE verweist ferner auf ältere Arbeiten von OBERDORFER, der feuchte Talmulden der Raumünzach-Quellbäche als *Luzulo-Abietum* kartierte. MURMANN-KRISTEN (1987:206) fand *Luzula sylvatica* zudem nicht selten an N- bis W-exponierten Böschungen des Nordschwarzwalds auf feuchten, tiefgründig verwitterten Böden. Dies führte zusammen mit den eigenen Beobachtungen zu der Hypothese, dass *Luzula sylvatica* – ungeachtet der Einschätzung in der überregionalen Literatur (z.B. ELLENBERG et al. 1992, OBERDORFER 1994 u.a.) – bei hoher Deckung einen lokalen Zeigerwert für oberflächennah abziehendes Wasser hat.

Abb. 59 zeigt zur Veranschaulichung einen derartigen Bestand mit *Thelypteris limbosperma* (Berg-Lappenfarn) unterhalb eines nur selten Wasser führenden Murkanals im Einzugsgebiet FH (vgl. Vegetationsaufnahme V53, Anhang 6-3): Deutlich sind hier nach schwerem Hochwasser die Abflussspuren an den nieder gedrückten Gräsern zu erkennen.



Abb. 59: *Luzula sylvatica*-Dominanzbestand mit Abflussspuren nach schwerem Hochwasser (Unteres Einzugsgebiet FH, 2.11.1998)

Bedingt durch die entsprechende Probestückauswahl kommt *Luzula sylvatica* mit einer hohen Gesamtstetigkeit von 87 % in den 46 Waldaufnahmen vor. Sie bildet mit *Oxalis acetosella* (Wald-Sauerklee, 63 %) und *Dryopteris dilatata* (Breitblättriger Dornfarn, 61 %) den Grundstock der Vegetationsaufnahmen. Die Arten zählen zur Ökologischen Artengruppe III (AK STANDORTSKARTIERUNG 1996) und haben ihr Schwergewicht auf frischen bis sehr frischen Standorten (Anhang 6-1).

Die Auswertung der Vegetationstabellen zeigte, dass sich *Luzula sylvatica*-reiche Bestände in pflanzensoziologisch ranglose Typen weiter differenzieren lassen in Bestände mit Feuchtezeigern (vier Typen) und in sonstige *Luzula sylvatica*-reiche Bestände fast ohne Feuchtezeiger (Anhang 6-3). In vielen *Luzula*-reichen Beständen sind Feuchte- bis Nässezeiger

($F = 8$) – wenn auch ohne strengen Differenzialcharakter – zu finden. Dazu gehören insbesondere *Deschampsia cespitosa* (Rasen-Schmiele) und *Stellaria uliginosa* (Quell-Stermiere).

***Luzula*-Bestände – *Sphagnum*-Typ:** *Luzula sylvatica*-Bestände mit *Sphagnum spec.* (Torfmoos-Arten) sind häufig mit *Deschampsia cespitosa* (Rasen-Schmiele) und in einigen Aufnahmen mit *Thelypteris limbosperma* (Berg-Lappenfarn) vergesellschaftet. Sie zeigen quellige, wechselfeuchte bis nasse Standorte an. Auf Sickerfeuchte weist zudem *Athyrium filix-femina* (Frauenfarn) hin, das jedoch auch in anderen Aufnahmen häufig ist.

***Luzula*-Bestände – *Myosoton*-Typ:** In den schmalen, häufig vom Wasser überspülten Niveaus A und teilweise B ist regelmäßige *Myosoton aquaticum* (Gemeiner Wasserdarm) zu finden, der nasse Ufer mit bewegtem Bodenwasser anzeigt. Häufiger Begleiter ist *Impatiens noli-tangere* (Echtes Springkraut), das auf mäßig sickerfeuchten bis -nassen, wasserzügigen, auch gestörten Böden anzutreffen ist. Dieser Vegetationskomplex wird als „*Myosoton*-Typ“ bezeichnet und ist Indikator für Flächen, die bei Niederschlägen kaum verzögerten Sättigungsflächenabfluss erzeugen. Die Flächen treten in größerem Umfang nur in den Fließabschnitten II und III auf.

***Luzula*-Bestände – *Adenostyles*-Typ:** Den gleichen Stellenwert für die Abflussbildung haben Flächen vom „*Adenostyles*-Typ“ mit *Adenostyles alliariae* (Grauer Alpendost). Die Art wächst gelegentlich am Ufer des Dürreychbachs und kommt dann zusammen mit *Myosoton aquaticum* vor. Meist ist er aber an Quellzutritten und seitlichen Sickerrinnen zu finden. In der Vegetationstabelle (Anhang 6-3) bildet die Art eine Schnittmenge zwischen *Sphagnum*- und *Myosoton*-Typ. Begleiter sind

Athyrium filix-femina sowie Torfmoose (*Sphagnum* spp.). SCHWABE (1987:144) gliedert eine entsprechende *Adenostyles alliariae*–*Athyrium filix-femina*-Gesellschaft mit unsicherer syntaxonomischer Zuordnung aus, die auf im Frühjahr überfluteten Standorten zusammen mit den Moosen *Sphagnum squarrosum* und *Polytrichum commune* vorkommt.

Luzula-Bestände – Cardamine-Typ: Die Aufnahmen V47, V49 und V50 sind durch das gemeinsame Auftreten von *Cardamine flexuosa* (Wald-Schaumkraut) und *Circaea intermedia* (Mittleres Hexenkraut) gut von anderen Aufnahmen getrennt. Beide Arten weisen auf feuchte bis nasse quellige Verhältnisse mit bewegtem Bodenwasser hin.

Sonstige Luzula-reiche Bestände: An Rinnestandorten sind *Luzula sylvatica*-reiche Bestände bei ausreichendem Lichtangebot z.T. eng mit *Molinia caerulea* (Blaues Pfeifengras) verzahnt (Schnittmenge in Anhang 6-3). Sie gleichen in diesem Fall hinsichtlich ihrer Abflussbildungsbedingungen den *Luzula*-Typen mit Feuchtezeigern und wurden dementsprechend kartiert.

Pteridium aquilinum (Adlerfarn) zeigt darüber hinaus „in der Tiefe meist wasserzügige“ Böden an (OBERDORFER 2001:74). Einige Aufnahmen fallen jedoch lediglich durch hohe Deckungen an *Luzula sylvatica* auf, ohne weitere Arten mit Indikatorwert zu enthalten (V5, V8, V46, V36, V53). Auffällig ist das Vorkommen von *Pteridium aquilinum* in den *Luzula*-reichen Aufnahmen (V5, V36, V37), wo Zeiger oberflächlicher Nässe fehlen. Daher kann bei diesen Flächen unter geeigneten Bedingungen Zwischenabfluss vermutet werden.

Molinia caerulea-reiche Bestände: *Molinia caerulea* (Blaues Pfeifengras) kommt mit einer Gesamtstetigkeit von 28 % vor. Sie ist ein Zeiger für wechselfeuchte Bodenverhältnisse und

lässt damit auf gelegentlich auftretenden Sättigungsflächenabfluss schließen. In dichten Beständen wird die lichtliebende Art im Gegensatz zu *Luzula sylvatica* schnell zurückgedrängt. Daher koinzidiert sie auf den Sturmwurfflächen des oberen Einzugsgebiets mit der ebenfalls lichtliebenden und auf Denitrifikationsprozesse deutenden Art *Epilobium angustifolium* (Schmalblättriges Weidenröschen) und bildet in der Vegetationstabelle (Anhang 6-3) eine undeutliche soziologische Gruppe. *Molinia caerulea* ist stets mit *Avenella flexuosa* (Draht-Schmiele) vergesellschaftet; stete Feuchte-zeigende Begleitarten lassen sich dagegen nicht ausmachen. Flächen vom *Molinia*-Typ sind im Fließabschnitt I auch fernab der Tiefenlinie verbreitet.

Im Bereich der ständig nassen Kernzone der morphologisch kaum gegliederten Quellmulde (Fließabschnitt Ia) bilden Flächen mit *Carex rostrata* (Schnabel-Segge) einen Sondertyp (Aufnahmen V26 und V29). Die Art erträgt als Wechselwasserzeiger auch zeitweise Überflutungen. Hier wurde regelmäßig Sättigungsflächenabfluss beobachtet.

Sonstige bachnahe Vegetation: Hohe Stetigkeiten von 59 % bzw. 50 % in allen Aufnahmen weisen *Vaccinium myrtillus* (Heidelbeere) und *Avenella flexuosa* (Draht-Schmiele) auf. Sie gehören zu Ökologischen Artengruppe II, die ihr Schwergewicht auf mäßig trockenen bis mäßig frischen Standorten hat (Anhang 6-1). Beide Arten – insbesondere aber *Vaccinium myrtillus* – besitzen eine große Feuchtigkeitsamplitude, sodass eher durch das Fehlen weiterer Indikatorarten auf die geringere Feuchtigkeit der Standorte geschlossen werden kann. *Avenella flexuosa* und *Vaccinium myrtillus* dominieren auf den trockeneren, von oberflächennahen Abflüssen kaum beein-

flussten Infiltrationstandorten wie insbesondere den älteren Terrassen (D und z.T. C).

Feuchtwiesen: Bachnahe Wiesenflächen mit *Holcus mollis* (Weiches Honiggras) zeigen leicht erkennbar durch Binsenarten (*Juncus acutiflorus*, *Juncus effusus*) nasse Verhältnisse an. *Juncus acutiflorus* (Spitzblütige Binse) ist charakteristisch für quellig durchsickerte Wiesen im Nordschwarzwald (MURMANN-KRISTEN 1987), während *Juncus effusus* (Flutter-Binse) auch als Verdichtungs- und Störungszeiger gilt. Die 7 Vegetationsaufnahmen auf Wiesenflächen lassen sich in drei Gruppen sortieren (Anhang 6-2). Bis auf Aufnahme V10 enthalten alle Flächen Feuchte- bis Nässe-zeigende Arten ($F > 7$ oder wechselfeucht) wie etwa *Carex ovalis* (Hasen-Segge), *Cirsium palustre* (Sumpf-Kratzdistel) und *Epilobium tetragonum* (Vierkantiges Weidenröschen).

Gestörte Flächen: Anthropogen gestörte Vegetation am Dürreychbach ist meist durch Holzlagerung, Befahren oder Bodenbewegungen bedingt und wird möglichst einem der genannten Vegetationstypen zugeordnet. Im Zuge einer Hochwasserschutzmaßnahme im Jahr der Vegetationskartierung entstanden abschnittsweise vegetationsfreie Flächen, die nicht zugeordnet werden konnten.

Zusammenschau: Tab. 30 gibt eine Übersicht der Vegetationstypen, ihrer korrespondierenden Talniveaus und der dominanten Abflussprozesse.

Tab. 30: Zusammenschau von Vegetationstypen, korrespondierenden Talniveaus und ihren dominanten Abflussprozessen

Vegetationstyp	Talniveau	Dominanter Abflussprozess
<i>Luzula sylvatica</i> -reiche Rinnen mit: <i>Sphagnum spec.</i> <i>Myosoton aquaticum</i> <i>Adenostyles alliariae</i> <i>Carex rostrata</i> <i>Cardamine flexuosa</i>	A, B	SOA, INF!
Sonstige <i>Luzula sylvatica</i> -Bestände	C, Hänge	SOA2, INF
<i>Molinia caerulea</i> -reiche Bestände Sondertyp mit <i>Carex rostrata</i>	Quellmulde Dürreychbach	SOA2 SOA1
<i>Avenella flexuosa</i> -reiche Bestände	D, (C)	INF
<i>Juncus</i> -Feuchtwiesen	D, Hänge	SOA2

SOA1 = Schneller Sättigungsflächenabfluss, SOA2 = Verzögerter Sättigungsflächenabfluss, INF = Infiltration, INF! = Schnell abflusswirksame, bachnahe Infiltration

Terrassenquerschnitte: Abb. 60 zeigt einen typischen Bachquerschnitt aus dem unteren Fließabschnitt (IIIb) des Dürreychbachs. Die Vegetation wechselt in Abhängigkeit von den verschiedenen Geländeneiveaus, wie oben beschrieben.

Abb. 61 liegt an der Grenze zwischen Fließabschnitt II und III (siehe auch Karte in Abb. 62). Der eingeeengte Bachlauf überflutet hier das Talniveau B häufiger, sodass sich *Myosoton aquaticum* eingefunden hat.

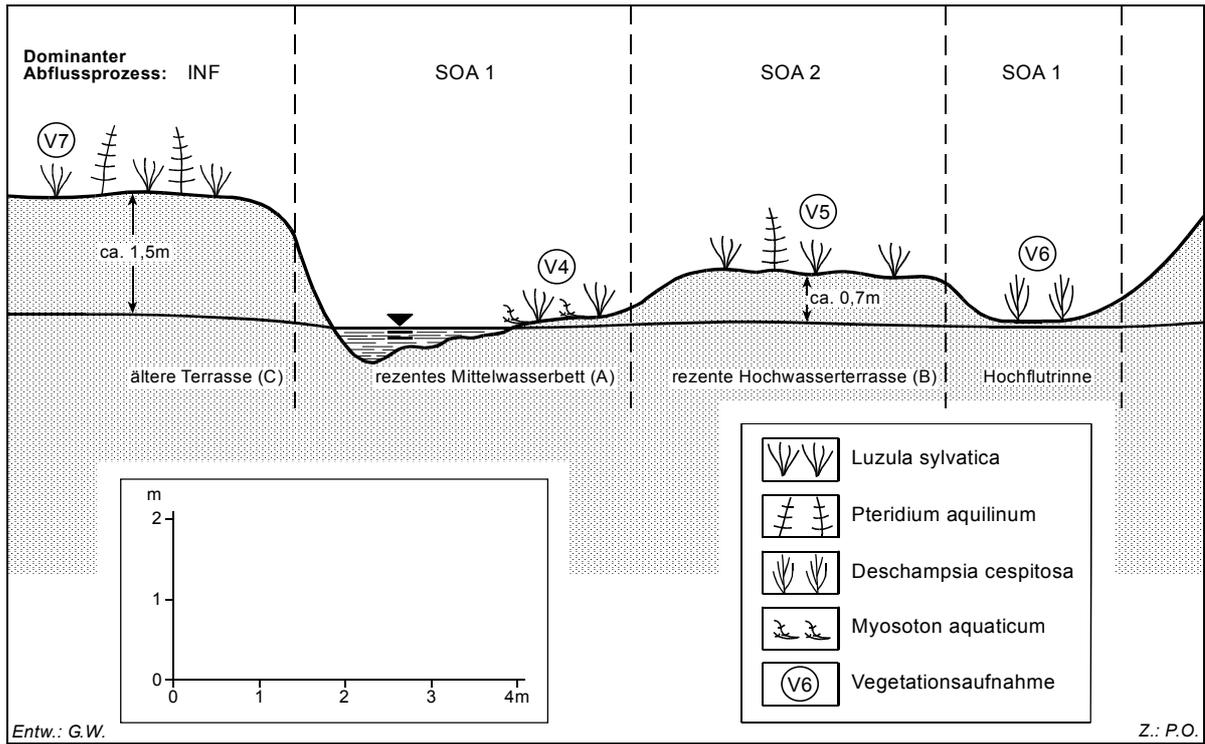


Abb. 60: Bachquerschnitt aus dem unteren Fließabschnitt des Dürreychbachs (IIIb). Abk. vgl. Abb.61.

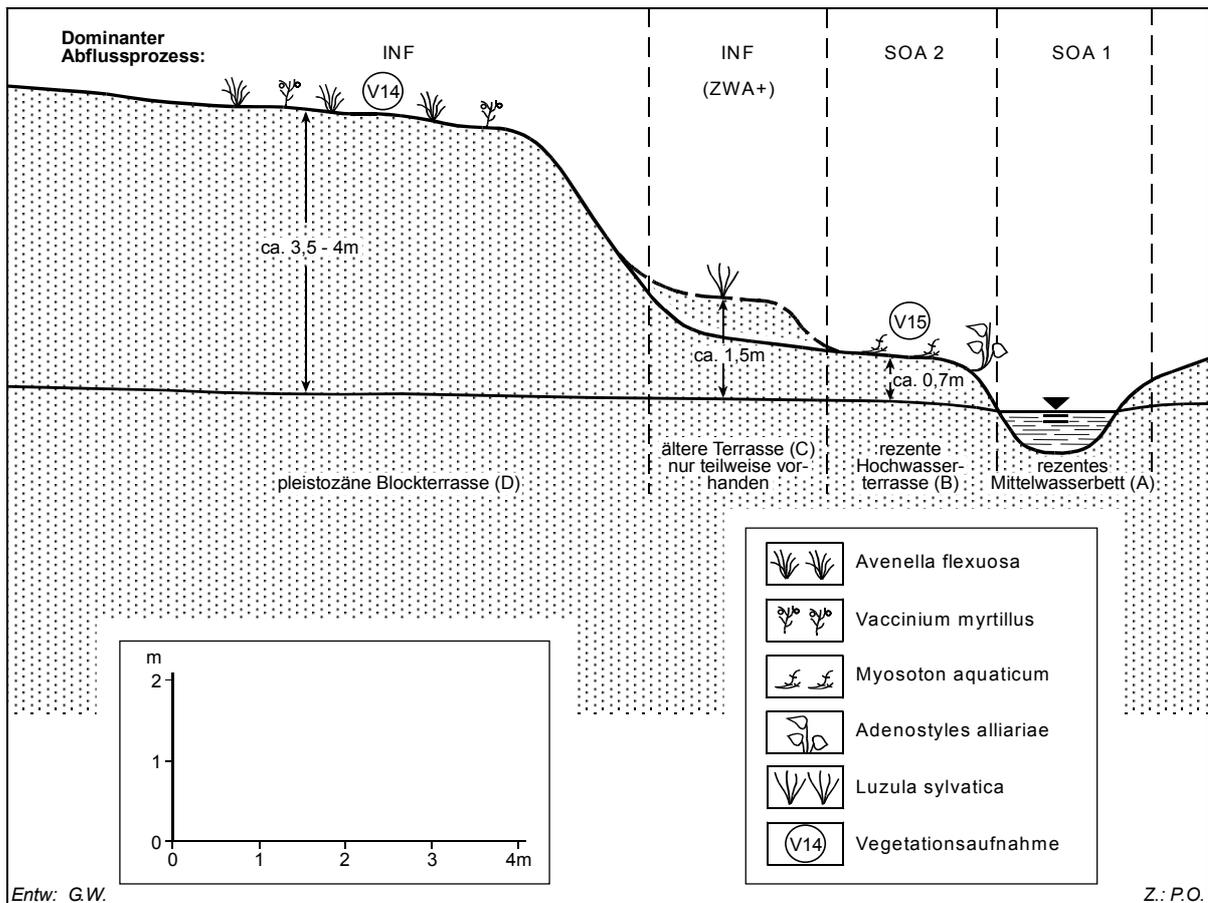
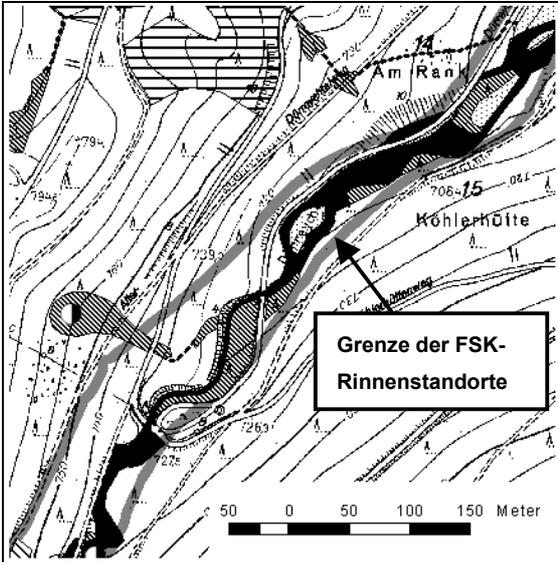


Abb. 61: Bachquerschnitt aus dem mittleren Fließabschnitt des Dürreychbachs (Grenze II/III). SOA1 = Schneller Sättigungsflächenabfluss, SOA2 = Verzögerter Sättigungsflächenabfluss, ZWA+ Zwischenabfluss mit Wasserzufluss, INF = Infiltration

Vergleich FSK / Vegetationskartierung:

Abb. 62 zeigt beispielhaft die bachnahe Vegetation im Übergangsbereich zwischen Bachabschnitt II und III.



Vegetationstypen (generalisiert)

-  *Luzula-Rinnen und Quellfluren*
-  *Myosoton-Überflutungsflächen*
-  *Sonstige bachnahe Flächen*
-  *Molinia-Flächen*

Gewässerläufe

-  *perennierend*
-  *temporär*
-  *Quelle*

Abb. 62: Morphologisch-vegetationskundliche Differenzierung der FSK-Rinnenstandorte – Beispiel: Übergangszone Fließabschnitt II/III

Deutlich ist hier zu erkennen, dass Überflutungsflächen mit *Myosoton aquaticum* und sonstige Vegetationstypen mit Indikatorwert für die schnelle Abflussbildung nur einen kleineren Flächenanteil der FSK-Rinnenstandorte ausmachen. Das wenig abflusswirksame Terrassenniveau D sowie Teile des Unterhangs sind hier in die Standortseinheit einbezogen. Beim Vergleich der Vegetationskartierung (M = 1 : 2.500) mit der digitalen Reproduktion der

FSK (M = 1 : 10.000) können allerdings aufgrund der Maßstabsunterschiede Fehler im Bereich von einigen Prozent auftreten. Abb. 63 stellt unter dieser Prämisse den Flächenanteil der Vegetation mit Indikatorwert für schnelle Abflussbildung auf allen FSK-Rinnenstandorten im Dürreychgebiet dar.

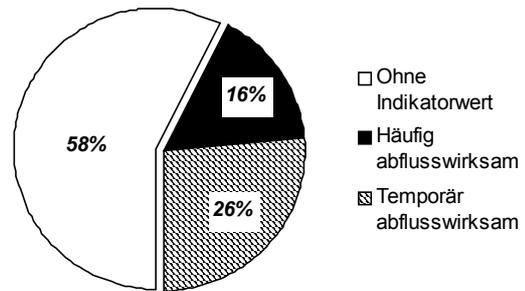


Abb. 63: Flächenanteil an Vegetation mit Indikatorwert für die Abflussbildung auf Rinnenstandorten.

Häufig überflutete Flächen vom *Myosoton*-Typ und vom nassen *Luzula*-Typ mit *Adenostyles alliariae* umfassen lediglich 16 % der gesamten Rinnenfläche. Auf diesen Flächen, die den Talniveau A und z.T. B entsprechen, tritt regelmäßig Sättigungsflächenabfluss auf. Auf weiteren 26 % der Flächen kann sich bei stärkeren Ereignissen Sättigungsflächenabfluss oder oberflächennaher Zwischenabfluss bilden. Hierzu zählen überwiegend die rezenten Hochwasserterrassen (B) vom *Luzula*-Typ (12 %), aber auch bachnahe Hangflächen und Wiesen (je ca. 2 %) sowie frisch umgestaltete vegetationsfreie Abschnitte (5 %). 58 % der Rinnenvegetation sind ohne Indikatorwert. Dabei handelt es sich größtenteils um ältere Terrassen (C und v.a. D) mit Vegetation vom *Avenella*-Typ oder um steilere Hangfußbereiche. In der Summe sind damit 42 % der Rinnenstandorte entlang des Dürreychbachs bzw. 1,2 % des Gesamteinzugsgebiets als schnell abflusswirksam zu bezeichnen. Dieses Ergebnis harmoniert mit den Abflussbeiwerten, die

bei Starkregenereignissen nach trockenen Bedingungen nur bei 1 % liegen (Tab. 28).

8.2.4 Vegetation und Abflussbildung der Nebengerinne

Der Anteil an vorfluternahen Flächen mit möglichem Abflussbeitrag nimmt mit der Ausdehnung des Gewässernetzes insbesondere während des Winterhalbjahres deutlich zu (gestrichelte Gewässerläufe in Abb. 51 s.o.). Daher wurden zusätzlich zu den Flächen entlang des Dürreychbachs auch seitliche Tiefenlinien sowie Quellbereiche vegetationskundlich untersucht.

Luzula-Rinntyp: Wie im Falle der Rinnenstandorte sind auch in seitlichen Tiefenlinien *Luzula sylvatica*-Dominanzbestände anzutreffen, z.T. im Verbund mit Feuchtezeigern. Insbesondere im Teileinzugsgebiet Hirschklänge (HI, Abb. 64) zeichnen diese Bestände die Tiefenlinie mit temporärer Wasserführung gut nach (Abb. 65 und Abb. 66). Quellfluren sind z.T. durch etwas abweichende Pflanzengesellschaften charakterisiert. Sie wurden in Abb. 66 aufgrund ihrer Ähnlichkeit hinsichtlich der Abflussbildungsbedingungen mit den *Luzula*-Rinnen zusammengefasst. Die Ausdehnung der Vegetationstypen wird – analog zu den Flächen entlang des Dürreychbachs – als Indikator für gewässernahe Beitragsflächen interpretiert. Reliefbedingt fließen hier oberflächennahe Abflusskomponenten zusammen, bilden eine temporär gesättigte Zone und tragen so zum Direktabfluss bei. Ein prinzipiell ähnliches Bild ergibt sich für das Teileinzugsgebiet Forsthaus (FH) sowie für die kürzeren Nebengerinne Seemiss (SM) und Seeberg (SB) (vgl. Vegetationskarte, Anhang 6-4 und Übersichtskarte der Einzugsgebiete, Anhang 1-2).

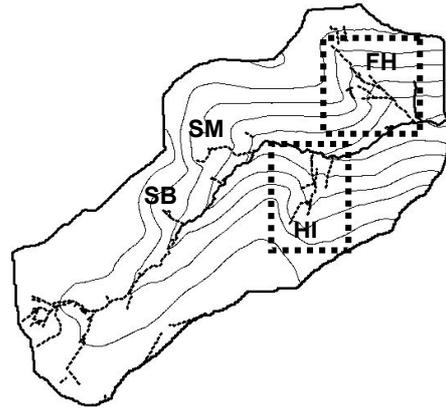


Abb. 64: Lage der Teileinzugsgebiete Hirschklänge (HI, vgl. Vegetationskarte Abb. 66), Forsthaus (FH), Seemiss (SM) und Seeberg (SB)

Auch in steileren konvexen Hangbereichen finden sich *Luzula*-Dominanzbestände; so etwa am Unterhang des Teileinzugsgebiets HI, wo das Wasser als Zwischenabfluss breitflächig den Hangfuß durchsickert.



Abb. 65: *Luzula sylvatica*-Dominanzbestand in der Tiefenlinie des im Teileinzugsgebiets Hirschklänge bei Trockenwetter (Fotostandort vgl. Abb. 66).

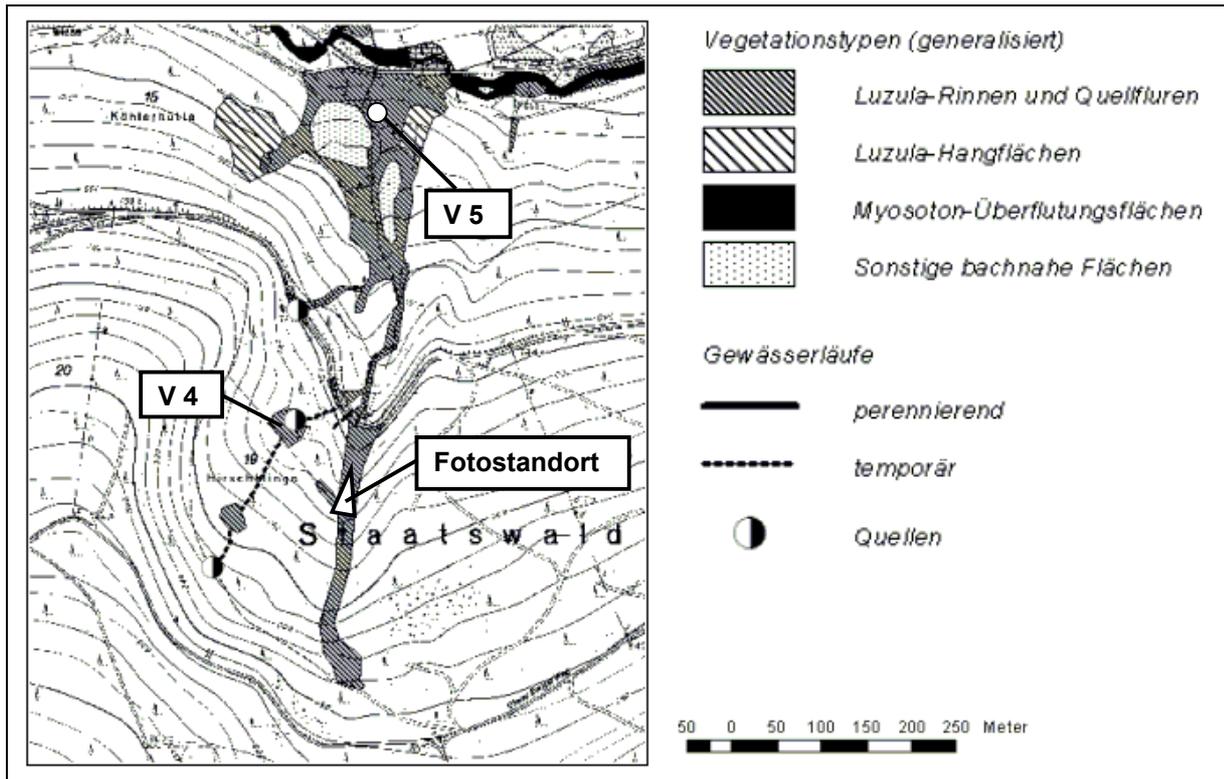


Abb. 66: (oben) Vegetationstypen im Bereich der Tiefenlinien Teileinzugsgebiet Hirsch Klinge – Flächen vom *Luzula*-Typ zeichnen die Tiefenlinie nach. Vegetationsaufnahmen V 4 und V 5 im Anhang 6-3; vgl. Abb. 65

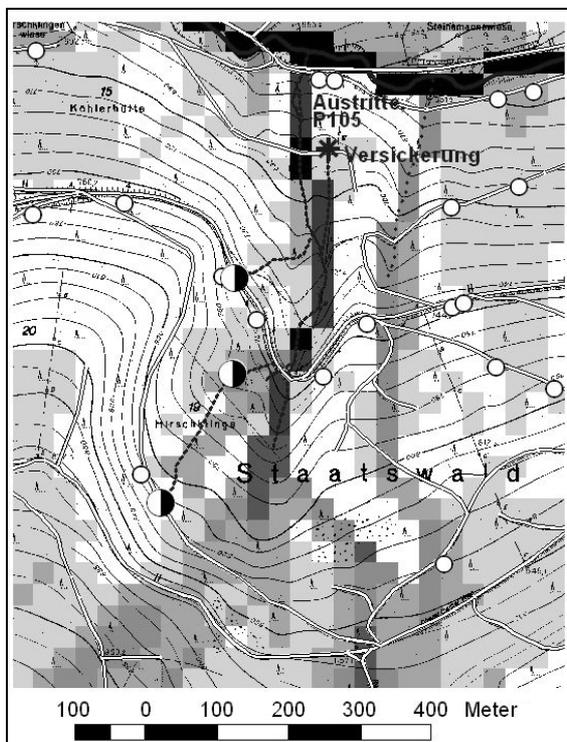


Abb. 67 (links) zeigt das Berechnungsergebnis für die Kombination aus Interflow-Index und

Gewichtetem Topographischem Index für ein 30 m-Raster. Im Vergleich mit der Abb. 66 zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung von hohen Indexwerten mit den *Luzula*-Rinnenbeständen entlang des Hauptfließwegs.

Abb. 67: (links) Kombination aus Interflow-Index und Gewichtetem Topographischem Index (30 m-Raster)

Der östlich gelegene Nebenfließweg weist deutlich geringere Indexwerte auf. Dies korreliert mit fehlenden *Luzula*-Beständen.

Im unteren, konvexen Teil der Hirschklänge kurz vor Einmündung in den Dürreychbach zeigen die *Luzula*-Bestände eine fächerartige Aufweitung, die von den Indexwerten nicht nachgebildet wird. Der Untergrund wird hier von Schuttmassen des Karriegels gebildet, die vom Hirschklängenbach durchschnitten werden. Die Schuttmassen sind oben locker gelagert, weisen im Unterboden aber massiv verfestigte, wasserstauende Ortsteinbildungen an der Grenze zur liegenden, plattig verfestigten Schuttdecke auf. Der Bodentyp wurde als stark hangwasserbeeinflusster Bändchenstagnogley angesprochen (P 105, Profilbeschreibung im Anhang 4).

Schneller Abfluss aus der Karmulde kann daher oberflächennah den konvexen Hangfuß durchströmen und tritt stellenweise an einem Weganschnitt etwas abseits der Tiefenlinie wieder aus (Abb. 67). Hier kommt es zur Tunnelerosion im lockeren Ae- bzw. Srw-Horizont (Abb. 68). Trotz der konvexen Reliefsituation herrschen daher hier vergleichbare Standortbedingungen, wie in den durchströmten Rinnen. Damit bestätigt sich ein weiteres Mal die Zeigerfunktion von *Luzula sylvatica* (Wald-Simse) für schnelle oberflächennahe Abflüsse im Dürreychgebiet.

Es muss ggf. künftigen vegetationskundlichen Untersuchungen überlassen bleiben, diese zumindest lokale Indikatorfunktion zunächst im Umfeld des Dürreychgebiets – etwa im übrigen Buntsandsteinschwarzwald – zu belegen. Auch in anderen Naturräumen sollte der Art hinsichtlich einer möglichen Zeigerfunktion Beachtung geschenkt werden.



Abb. 68: Schneller oberflächennaher Abfluss (Pipe Flow) in Subrosionstunnel oberhalb Ortstein (II Bms) nahe P 105. Vegetation: *Luzula sylvatica*-Dominanzbestand fast ohne Feuchtezeiger (vgl. Vegetationsaufnahme V 46 im Anhang 6-3). Fotostandort vgl. Abb. 67 „Austritte“.

8.3 Feucht- und Sättigungsflächen (SOA)

Im Folgenden werden die Struktur- und Prozessmerkmale der Standortseinheiten mit potenziellem Sättigungsabfluss (SOA) zunächst im Überblick und dann an Einzelbeispielen beschrieben. Die Aussagen stützen sich sowohl auf Profile der Standortskartierung (Anhang 3) als auch auf eigene Untersuchungen (Anhang 4).

8.3.1 Standortseinheiten und Böden

Den Standorten mit dominierendem Sättigungsflächenabfluss (SOA) im Dürreychgebiet ist gemeinsam:

- Hohe Ökologische Feuchte
- Markanter Ks-Sprung zwischen Ober- und Unterboden
- Geringe Neigung, schwach konvexe bis konkave Relieflage

Missen und Moore: Im Dürreychgebiet bilden die Hochmoorlagen und Missen die ausgeprägtesten Sättigungsflächen (SOA1). Sie umfassen die folgenden Forstlichen Standorteinheiten (FSE) in Tab. 31:

Tab. 31: Forstliche Standorteinheiten (FSE) der Missen und Moore mit ausgeprägtem Sättigungsabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
MLa	Moorlagen	412
MR	Moorrandlage	-
wzMi	Wasserzügige Misse	12
HMi	Abflussträge Hochlagen-Misse	27, 28, 407
HMi ⁺	Wasserzügige Hochlagen-Misse	20

Bei den Missen handelt sich um abflussträge Hochflächen mit z.T. ausgeprägter Vermooring. Sie bilden den Übergang zu den Moorlagen. Die Standorte sind häufig dräniert und damit „wasserzügig“. Die Bodentypen dieser Einheiten sind der Stagnogley (→ Glossar) mit den Subtypen Anmoor-/ Moorstagnogley, und Bändchenstagnogley sowie deren entwässerte Formen. Die Torf- oder Feuchtrohhumusaufgaben sind stark zersetzt (vgl. Kap. 8.1) und erreichen Mächtigkeiten bis ca. 30 cm.

Grundfeuchte Einheiten: Ebenfalls durch hoch anstehendes Stauwasser charakterisiert sind die grundfeuchten Einheiten (→ Glossar). Es handelt sich um die z.T. sehr heterogenen Standorteinheiten (Tab. 32) Die Bodentypen reichen vom Bändchen-Stagnogley bis zu verrockerten Braunerden.

Tab. 32: Grundfeuchte Standorteinheiten (FSE) mit ausgeprägtem Sättigungsabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
gfS	Grundfeuchter Sand	14, 306, 402, 405
gfLa	Grundfeuchte Lagen	-
HgfS	Grundfeuchter Hochlagensand	305, 418, 428

Schwächere Grundfeuchte zeigen die Einheiten in Tab. 33:

Tab. 33: Schwächer grundfeuchte Standorteinheiten (FSE) mit verzögertem Sättigungsabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
HgfS ⁺	Schwach grundfeuchter Hochlagensand	-
HgflS	Grundfeuchter lehmiger Hochlagensand	17, 301, 423, 424
HgfIS ⁺	Schwach grundfeuchter lehmiger Hochlagensand	302, 421

Dem schwächeren Stauwassereinfluss entsprechend variieren die Bodentypen vom Pseudogley und Ockererde bis zum Podsol. Einige der grundfeuchten Einheiten zeigen Merkmale der Ockererde (→ Glossar). Sie weisen auf eine laterale Zufuhr von Eisen mit dem Zwischenabfluss aus den oberhalb liegenden Stagnogleyen hin. Dieser Prozess wurde von SCHWEIKLE (1971) beschrieben und von WIEDERHOLD (2001) durch Eisenisotopenuntersuchungen belegt. Der Standortkartierer beschreibt das räumlich regelhafte Auftreten dieser Standorteinheiten bildhaft als „Zwiebelschale um Missen“ (GRAßMANN 1996).

8.3.2 Stauhorizonte im Dünnschliff

Häufig wurden auf den Missenlagen tiefgründige gebleichte Sande bis lehmige Sande angetroffen. Skelett oder Stauwasser verhinderten meist, das Profil bis zum Stauhorizont aufzu-

schließen (P 12, P 25, P 27, P 28). Als stauende Substrate kommen in Frage:

- tonige Verwitterungsreste des Oberen Buntsandsteins
- Ortsteinbildungen
- Plattig verfestigte Schuttdecken

Unterböden mit Tongehalten > 20 % wurden im gesamten Dürreychgebiet nur sporadisch angetroffen (P 9, P 302). Sie dürften daher nur lokale Bedeutung haben.

Ortsteinbändchen: Häufiger treten bändchenartig entwickelte, stauende Ortsteinhorizonte (Symbol „b“ in der Horizontbezeichnung B_{bms}) auf (Abb. 69).

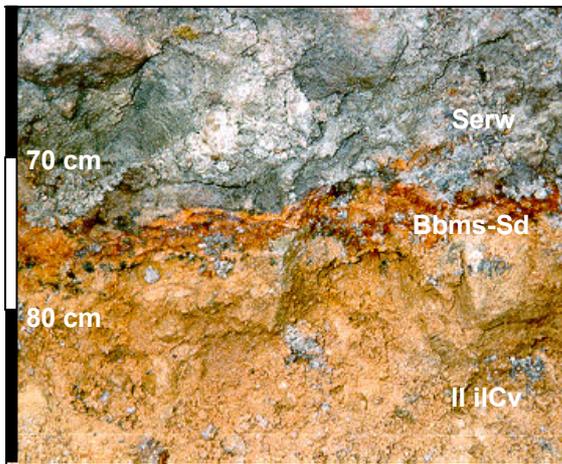


Abb. 69: Hangwassergeprägter Bändchenstagnogley (P 105) mit stauendem Ortsteinbändchen (B_{bms}-Sd): Oberhalb starke Nassbleichung, unterhalb trockene Verhältnisse.

Diese stauenden Bildungen sind sowohl auf den Hochflächen als auch in Hanglage anzutreffen. Wie Abb. 70 zeigt, lässt sich die stauende Eigenschaft der Ortsteinbändchen jedoch nicht aus der Bodenart ableiten.

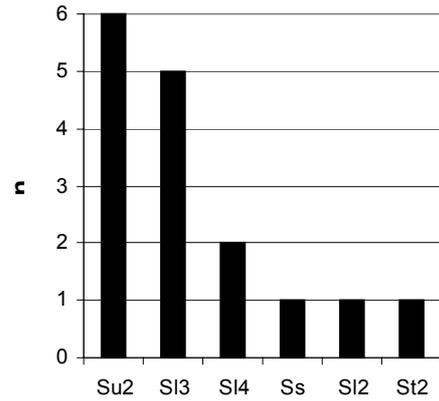


Abb. 70: Häufigkeit n der Bodenarten von B_{bms}-Horizonten im Forstbezirk Kaltenbronn. Profile (vgl. Anhang 3 und Anhang 4)

Die ausgewerteten Angaben zeigen, dass es sich meist um schluffige bis lehmige Sande handelt, für die eine hohe gesättigte hydraulische Leitfähigkeit anzunehmen wäre. Auch wenn die Bodenartbestimmung für die stark verkitteten Ortsteinbändchen problematisch ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Stauwirkung überwiegend auf Gefügemerkmale zurückzuführen ist. Durch pedogene Verkittung der Grobbestandteile mit Sesquioxiden (→ Glossar) wird der in sandigen Substraten übliche hohe Anteil an Grobporen (→ Glossar) stark reduziert (Kap. 2.1.5). Um diese hydraulisch entscheidende Einschränkung des Porenraumes zu dokumentieren, wurden von Ortsteinbändchen sowie den ober- und unterhalb vorkommenden Substraten Dünnschliffe angefertigt (Abb. 70, Abb. 71).

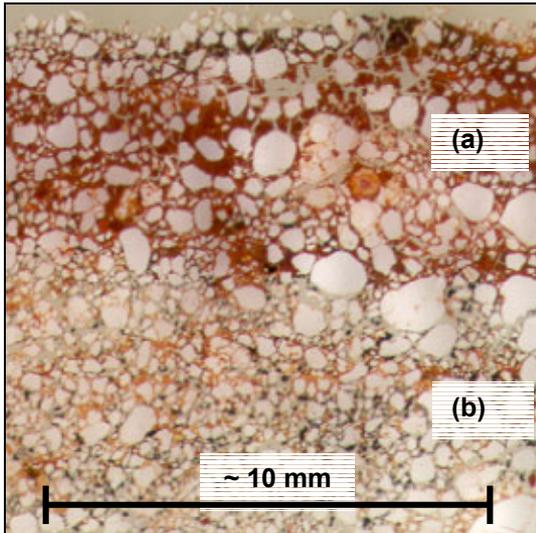


Abb. 71: Gescannter Dünnschliff eines ausgeprägten Ortsteinbändchens (D 6, P 105): Im oberen Teil (a) starke Verkittung der Sandkörner durch Sesquioxide und Humussubstanzen.

Wie in Abb. 71 erkennbar, konzentriert sich die stärkste Verkittung auf eine nur 5 mm mächtige Zone (a). Unterhalb dieser Zone ist das Gefüge bereits stark aufgelockert (b).

Mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems Image Pro Plus 4.1 (MEDIA CYBERNETICS, L.P. 1999) können die Flächenanteile von Poren, Grob- und Feinfraktion quantifiziert werden. Abb. 72 zeigt zwei Ausschnitte aus dem oberen und unteren Teil der Abb. 71 (a, b).

Abb. 72 lässt die Unterschiede in den Porenanteilen und –größen deutlich erkennen. Der verkittete Bereich (a) zeigt hier ca. 7 % Porenanteil und entspricht damit dem Durchschnittswert von drei untersuchten Ausschnitten. Im unterhalb anschließenden Bereich (b) steigt der Porenanteil bereits auf das Dreifache an. Durch die gleichzeitige Vergrößerung der Porenquerschnitte kann es zur Ausbildung hängender Menisken und somit zu Stauwirkungen kommen.

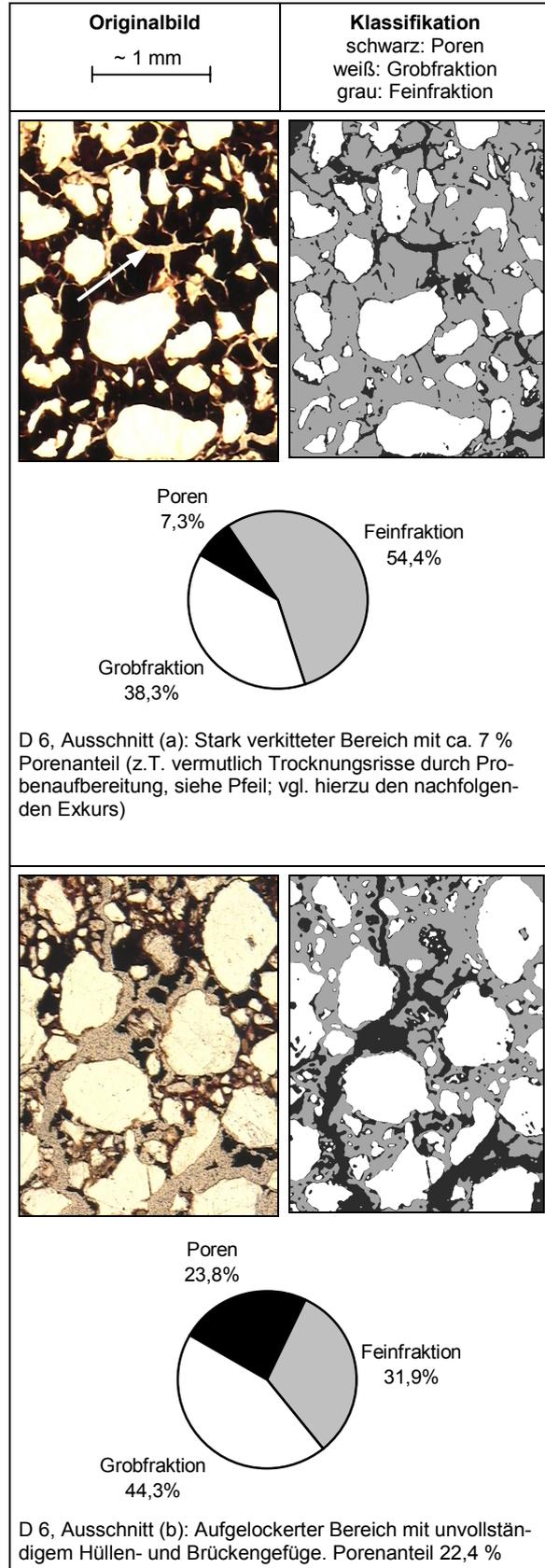


Abb. 72: Klassifikation von Poren, Grob- und Feinanteilen des Ortsteinbändchens in Abb. 71

Exkurs: Trocknungsrisse in Dünnschliffen?	
<p>Im stark verkitteten Teil des Bändchens (Abb. 72 oben) sind Rissstrukturen zu erkennen, die im stumpfen Winkel aufeinander zu laufen (Pfeil). Sie erinnern stark an jene typischen makroskopischen Trockenrisse, die sich auf tonigen Bodenoberflächen ausbilden (rechts).</p>	
<p>Vergleichbare Rissstrukturen: Trockenrisse auf einer Bodenoberfläche (Quelle: HINTERMAIER-ERHARD 1997)</p>	
<p>Ob es sich bei den trockenrissartigen Poren in Dünnschliffen um natürliche Bildungen handelt, oder um Artefakte, die erst bei der Trocknung der Proben entstehen, ist nicht zu entscheiden. Bei der Trocknung der Feinsubstanz aus amorphen organischen Komponenten und wasserhaltigen Eisen- und Aluminiumoxidhydroxiden sind Schrumpfungsprozesse durch Entwässerung generell denkbar. Organisch und anorganische Komponenten können dabei strukturell stark interagieren (SUMNER 2000:A-247)</p> <p>Dass rissartige Poren in Ortsteindünnschliffen nicht nur vereinzelt auftreten, zeigen weitere eigene Dünnschliffe. Sehr ähnliche Strukturen sind auch in einem von ANDRUSCHKEWITSCH et al. (2001:469) veröffentlichten Dünnschliffphoto eines verhärteten B(h)s-Horizonts zu erkennen, wobei hier die Trocknung durch Acetonaustausch erfolgte.</p> <p>Fazit: Möglicherweise wird der mit dieser Methode bestimmte Grobporenanteil von Ortstein unter Feldbedingungen infolge von Trockenrissen überschätzt.</p>	

Noch wesentlich höhere Grobporenanteile (z.T. über 40 %) wurden für die Oberböden und Stauwasser leitende Horizonte bestimmt (Dünnschliffe D 15 bis D 19, vgl. Kap. 8.4.3.4). Ein direkter Vergleich der an Dünnschliffproben ermittelten Werte mit nach herkömmlichen Methoden ermittelten Werten der AG BODEN (1994) ist letztlich nicht statthaft; methodisch sauber ist ohne Eichung lediglich ein relativer Vergleich innerhalb der Probe. Die folgenden Überlegungen mögen jedoch die Durchlässigkeitsverhältnisse veranschaulichen:

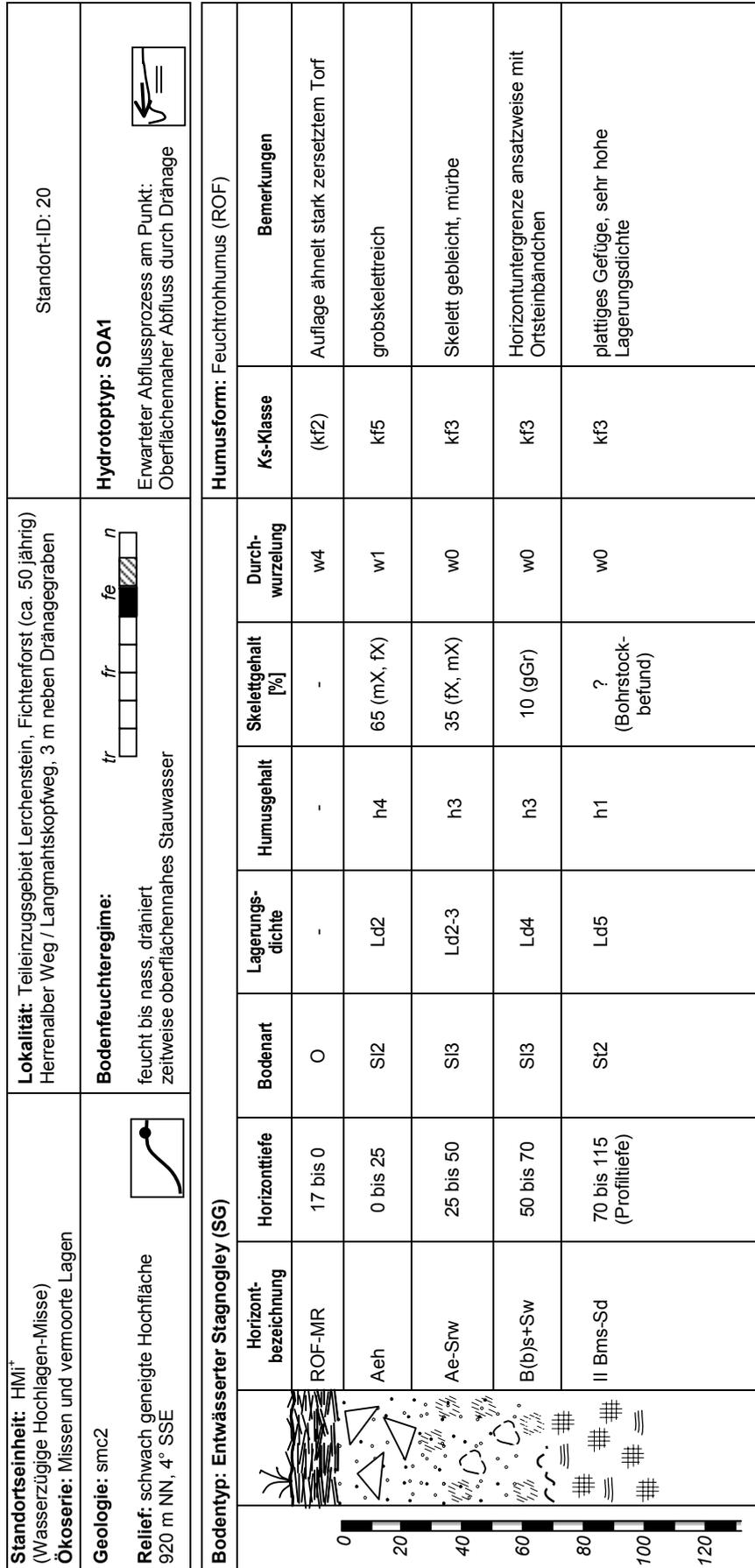
Der Porenanteil von 7 % für den oberen Teil des Dünnschliffs entspricht dem Zahlenwert für die Luftkapazität (→ Glossar), die von der AG BODEN (1994:297) für lehmige oder tonige Sande (S13 oder St3) mit sehr hoher Lagerungsdichte (Ld 4-5) angegeben wird. Der hydraulisch wirksame Porenanteil dürfte jedoch noch deutlich geringer sein. Dafür sprechen die folgenden Punkte:

- Im Dünnschliff werden möglicherweise durch die Probenaufbereitung entstandene Trocknungsrisse miterfasst (vgl. Exkurs).
- Im Dünnschliff werden untergeordnet auch Porenanteile < 50 µm erfasst, die nicht mehr zur schnellen Sickerung beitragen.
- Das ausgeprägte Hüllen- und Brückengefüge lässt darauf schließen, dass ein hoher Anteil der Poren allseits umschlossen und somit für die Sickerwasserbewegung unwirksam ist.

Geht man davon aus, dass nur die Hälfte der im Dünnschliff D6 erfassten Poren sickerwasserwirksam sind (3,5 %), so entspräche dies der Luftkapazität dicht gelagerter schluffiger Tone (Tu3, vgl. AG BODEN 1994:297). Starke Podsolierungsprozesse können also trotz des sandigen Ausgangssubstrates zu einer hydraulisch wirksamen Bodenart im Bbs-Horizont führen, die etwa mit Böden toniger Ausgangsgesteine vergleichbar wäre.

Folglich konnte im Dünnschliff und durch Profilmerkmale anschaulich gezeigt werden, dass bändchenartige Ortsteinbildungen bereits bei wenigen mm Mächtigkeit eine signifikante Verringerung der effektiven hydraulischen Leitfähigkeit verursachen und pedogenetisch prägend werden können. Auf Flachlagen mit fehlendem Abfluss kann es so zur Stagnogleyentwicklung mit Vermoorung und Missenbildung kommen.

Beispielprofil: Als Beispielprofil für die Misenlagen soll hier P 20 (Abb. 73) vorgestellt werden.



Alle Klassenangaben gemäß AG BODEN (1994)

Abb. 73: Bodenkundliche Standortsaufnahme des Profils P 20 (vgl. auch Anhang A4)

Das Profil befindet sich im Einzugsgebiet Lerchenstein (LE) auf der schwach geneigten Hochfläche bei 920 m NN nahe der Einzugsgebietsgrenze. Es handelt sich um einen entwässerten Stagnogley, der in der Nähe eines Drainagegrabens aufgedigelt wurde. Unter einer schmierig-zersetzten Feuchtrohhumusaufgabe findet sich ein von Stauwasser kaum sichtbar beeinflusster Aeh-Horizont aus schwach lehmigem Sand (SI2) mit hohem Anteil an grobem Skelett. Nach unten schließt sich ein Stauwasserhorizont (Ae-Srw) aus lehmigem Sand (SI3) an, in dem der ehemals dunkelrote Buntsandsteinschutt z.T. ausgebleicht oder orangefarben und mürbe verwittert ist. Die Stauwassermerkmale verstärken sich nach unten hin bis zu einem Verzahnungshorizont, wo sich ansatzweise ein Ortsteinbändchen entwickelt hat (B(b)s+Sw).

Wegen der nur unvollständigen Ausbildung des Ortsteinbändchens ist zu schließen, dass der nach unten anschließende, massige Ortsteinhorizont (II Bms-Sd) den eigentlichen Stauer darstellt. Dabei handelt es sich um einen nur schwach tonigen Sand (St2), jedoch mit auffällig hohem Verfestigungsgrad (Id5) und plattigem, oben auch verkittetem Gefüge.

Plattig verfestigte Schuttdecken: Stark verfestigte Schuttdecken mit plattigem Gefüge konnten in den Unterböden des Dürreychgebiets häufig beobachtet werden. Gut zu erkennen ist diese für sandige Substrate ungewöhnliche Gefügeeigenschaft an verwitterten Profilen, wie sie gelegentlich an Weganschnitten beobachtet werden können (Abb. 74).

Die plattig verfestigten Sande mit wechselnden Ton- und Schluffanteilen zeigen meist wesentlich geringere Skelettgehalte und Skelettgrößen als die überlagernden Schuttdecken. Nicht selten stimmt diese Substratgrenze mit einer Horizontgrenze überein.



Abb. 74: Lamellenartig herausgewittertes Gefüge einer verfestigten Schuttdecke unterhalb eines Ortsteinbändchens (Weganschnitt Einzugsgebiet Hirschklänge). Rechts im Bild: Kugelschreiber zum Größenvergleich

Ihre Entstehung kann im Dürreychgebiet auf die periglaziale Überprägung zurückgeführt werden; etwa auf Eispressung durch Eisrindenbildung (WEISE 1983). Teilweise kann das makroskopische Plattengefüge auch im Dünnschliff an orientierten Poren oder Mikrobänderung durch höhere Ton oder Schluffanteile nachvollzogen werden. KÜHN & SCHRÖDER (2001) dokumentieren gleichfalls Dünnschliffe aus sandigen Eiskeilfüllungen, die Spuren von Segregationseisbildung in Form von linsenförmig-plattig ausgebildetem Mikrogefüge zeigen.

8.3.3 Messstation Sättigungsfläche Grandlohweg (FF)

Für die übergeordnete Fragestellung – Identifikation von Hydrotopen – ist die Art des Stauhorizonts nicht so sehr von Bedeutung wie der resultierende Prozess: die bevorzugte Bildung von Sättigungsflächenabfluss.

Sättigungsabfluss selbst ist jedoch schwer messtechnisch zu erfassen: Nach Regenfällen entwickelt sich auf Sättigungsflächen im Kopfeinzugsgebiet des Dürreychgebiets kein Schichtabfluss. Vielmehr entsteht durch

Selbstorganisation ein fraktales Netz von Abflusswegen, wobei Oberflächenabfluss und oberflächennaher unterirdischer Abfluss kaum trennbar interagieren. Innerhalb einer Sättigungsfläche treten – häufig gesteuert durch das Mikorelief – ungesättigte und gesättigte Bereiche in engem Kontakt auf. Kurzum: die raum-zeitliche Wirklichkeit hat mit den gängigen Schnittzeichnungen oder Blockbildern, die den Abflussbildungsprozess modellhaft verdeutlichen sollen (Kap. 2.1), oft wenig gemein.

8.3.3.1 Standortsbeschreibung und Vegetation

Dennoch kann der Hydrotyp „Sättigungsfläche“ auf der Profilskala exemplarisch an der Klima- und Bodenfeuchtemessstation Freifläche Grandlohweg (FF) belegt werden (Abb. 75).

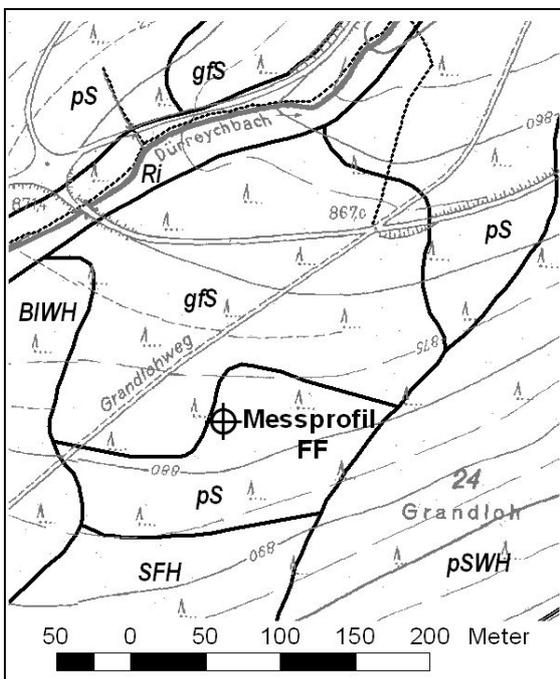


Abb. 75: Übersichtsplan und Forstliche Standortseinheiten im Bereich der Klima- und Bodenfeuchte-Messstation Freifläche Grandlohweg (FF)

Die nach 1990 wieder aufgeforstete „Freifläche FF“ auf ca. 880 m NN befand sich zum Aufnahmezeitpunkt in einem grasreichen Sukzes-

sionsstadium mit etwa 30 % Bestockung. Die Messstation selbst befindet sich auf einer nur 3-4° geneigten Verebnung unterhalb eines Hangknicks im Übergang von der Standorteinheit pS zur Einheit gfS (Abb. 76):

- pS: Mäßig frischer podsoliger Sand; Hydrotyp: ZWA2 (Zwischenabfluss geringer Intensität), Hauptbodentyp: Podsol
- gfS: Grundfeuchter Sand; Hydrotyp: SOA1 (ausgeprägter Sättigungsabfluss), Hauptbodentyp: Bändchenstagnogley

Vegetation: Bereits am Vegetationsbild lässt sich die stärkere Vernässung im Bereich der Messstation diagnostizieren: Der Wechselfeuchtezeiger *Molinia caerulea* (Pfeifengras) tritt im Bereich der Hangverflachung in stark erhöhter Deckung auf, wie die Abb. 76 zeigt. Am oberhalb anschließenden, bis zu 12° steilen Hang fällt dieser Wechselfeuchtezeiger infolge der besseren Drainage nahezu völlig aus.

8.3.3.2 Bodenkundliche Befunde

Zur Vernässung im Bereich der Messstation trägt neben der verringerten Neigung noch lateraler Zufluss bei: KOBAYASHI (1998) konnte aufgrund von Bohrstockbefunden entlang des Transekts nach 17 bzw. 35 mm Niederschlag (48 h) auch oberhalb des Hangknicks stark durchfeuchtete Horizonte mit Wasseraustritt aus dem Bohrgut über trockeneren Unterböden beobachten und somit auf lateralen Wasserzug schließen. Insbesondere wurde aber eine kleinräumige Variabilität der Bodenfeuchten festgestellt, die oft nicht mit einem Wechsel des Bodentyps bzw. Subtyps zusammen hing: Flache Hangdellen oder -rinnen, unterspülte Wurzelteller, Skelettgehalte, u.a. bestimmen hier offenbar das Feuchtemuster.

Der Bodentyp im Bereich der Messstation FF wurde als Podsol-Pseudogley angesprochen. Das Profil fällt laut Standortkarte noch in die Standortseinheit pS (Podsole), bildet jedoch den Übergang zu den Stagnogleyen der Einheit gfS. Die Bodenarten des Profils sind locker gepackte Sande mit geringen Schluff- und Tonanteilen. Sie sind im unteren Teil deutlich humusinfiltiert. Der insgesamt wesentlich skelettärmere aber dafür Feinskelett führende II Bhs-Sw-Horizont deutet auf einen Wechsel der periglaziären Lage hin. Die aus Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt abgeleiteten Bodenkennwerte weisen durchweg auf hohe Durchlässigkeiten hin (Tab. 34).

Tab. 34: Profil P25 – Aus Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt abgeleitete Bodenkennwerte (LGRB 1998)

Horizont	Ks	GPV	LK	FK	nFK
GMO	6	80	40	40	8
Aeh	5	43.5	16	27.5	18.5
Ae	5	41	17	24	17.5
Bhs-Sw	5	45	15.5	29.5	20
(II) Bhs-Sw	5	38.5	18.5	20	11.5

Ks: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Klasse nach AG BODEN 1994); GPV: Gesamtporenvolumen [%], LK: Luftkapazität [%], FK: Feldkapazität [%], nFK: nutzbare Feldkapazität [%]

In dem 110 cm tiefen Profil wurde kein offensichtlich Stauwasser hemmender Horizont angetroffen. Gleichwohl reicht der pedogenetisch wirksame Stauwassereinfluss bis fast 40 cm an die Geländeoberfläche heran. Vermutlich findet sich hier in größerer Tiefe ein bändchenartiger Stauhorizont, wie er im Umfeld der Messstation stellenweise erbohrt werden

konnte. Möglicherweise wirkt auch eine stärker verdichtete Schuttdecke oder ein Substratwechsel stauend. Eine Stauwirkung durch das anstehende Festgestein kann dagegen ausgeschlossen werden. Gestützt werden die Aussagen durch die Auswertung der refraktionsseismischen Untersuchungen (Anhang 7-2). Für den Bereich der Messstation ergibt sich folgender Aufbau:

- Bis ca. 1...1,5 m: gering verdichtete Lockersedimente
- Bis ca. 10...12 m: stärker verdichtete Lockersedimente
- > 10...12 m: anstehendes Festgestein

Die Schuttdeckenmächtigkeit ist mithin beträchtlich und liegt weit über der Mächtigkeit, die FEZER (1957) für entsprechende Reliefbedingungen im Nordschwarzwald angibt.

8.3.3.3 Bodenfeuchtemessungen

An der Messstation FF wurde neben meteorologischen Parametern auch die Bodenfeuchte (Vol-%) mit TDR-Sonden in zwei Tiefen gemessen (Kap. 8.3.3.3):

- 20 cm u. GOK: Übergang Humusauflage / Aeh-Horizont)
- 35 cm u. GOK: Ae-Horizont

Abb. 78 zeigt exemplarisch zwei Niederschlagsereignisse vom 8.10. bis 10.10. 1999 und ihre Wirkung auf den Bodenfeuchteverlauf und die Abflussganglinie am Pegel Stillwasserhütte (SH). Die beiden etwa 10-stündigen Ereignisse weisen unterschiedliche Niederschlagsintensitäten und -füllen auf:

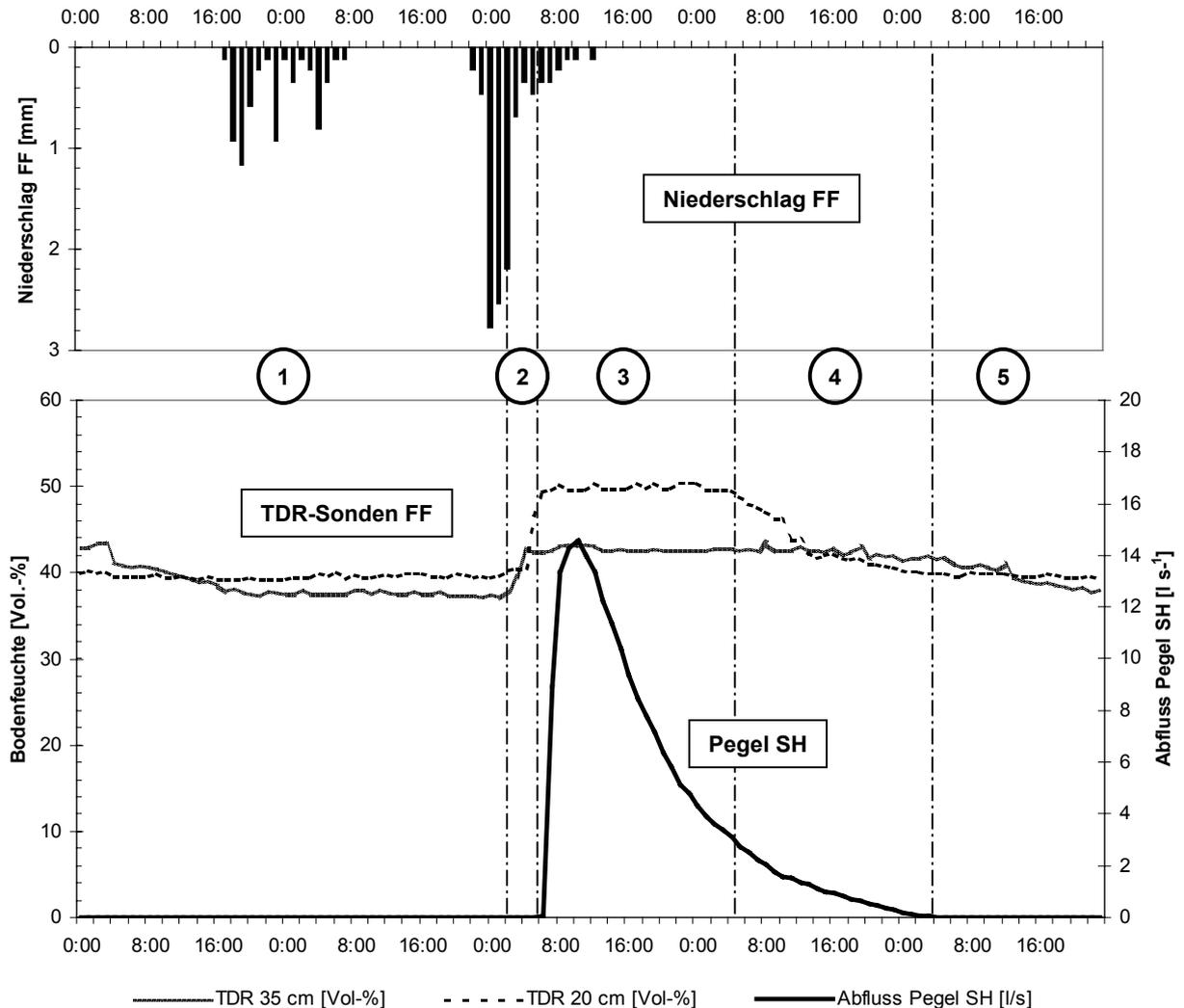


Abb. 78: Zusammenhang zwischen Bodenfeuchteverlauf an der Messstation FF und Einsetzen des Abflusses am Pegel SH (8.-12.10.1999). Erläuterung der Phasen (1) bis (5) im Text.

- Phase (1): Auf das erste Ereignis mit geringer Intensität zeigen die TDR-Sonden keine Reaktion. Offensichtlich wird hier lediglich die Speicherkapazität der Humusauflage ausgeschöpft.
- Phase (2): Das zweite Ereignis erreicht höhere Intensitäten und führt zu einem schnellen Anstieg der Bodenwassergehalte in beiden Tiefen.
- Phase (3): In einem Abstand von nur drei Stunden wird zunächst in 35 cm und dann in 20 cm Tiefe ein Plateauwert erreicht, der etwa dem auffüllbaren Gesamtporenvolumen (GPV) der Horizonte gleichgesetzt werden kann. Während das erste Ereignis keine Reaktion am Pegel SH auslöst (1), führt das zweite Ereignis zu einer steilen Abflussspitze (Abb. 78 unten). Das Einsetzen des Abflusses fällt exakt mit dem Erreichen der Sättigung in 20 cm Tiefe zusammen (2/3). Die Sättigung bleibt nach dem letzten Niederschlagsimpuls noch für etwa 16 Stunden erhalten
- Phase (4): Die Bodenfeuchte in 20 cm Tiefe unterschreitet den Sättigungswert erst, nachdem sich die Abflussganglinie wieder

stark verflacht hat. In 35 cm Tiefe verharrt die Bodenfeuchte dagegen noch auf dem Plateauwert. Der Pegel SH spiegelt das langsame Leerlaufen der tieferen Horizonte wieder.

- Phase (5): In 35 cm setzt das Absinken unter den Sättigungswert Tiefe erst 40 Stunden nach dem letzten Niederschlagsimpuls ein. Der Zeitpunkt stimmt exakt mit dem Trockenfallen des Pegels SH überein.

In Verbindung mit den Geländebeobachtungen ist es naheliegend, diese Gebietsantwort auf dominierenden Sättigungsflächenabfluss zurückzuführen, der auf diesem Flächentyp im Einzugsgebiet SH in größerem Umfang (SOA1) gebildet wird. Die hohen Bodenfeuchten im Oberboden auch noch viele Stunden nach Ereignisende können auf laterale Zuflüsse zurückgeführt werden.

CASPER (2002) konnte die hier exemplarisch beschriebenen Zusammenhänge zwischen Sättigung und Abflussreaktion für eine Reihe von Ereignissen bestätigen.

8.3.3.4 Vergleich mit den Regionalisierungsansätzen

Im Folgenden werden die Untersuchungen an der Messstation FF mit den Regionalisierungsansätzen Interflow-Index Gewichteter und Kombiniertes Gewichteter Topographischer Index verglichen (Kap. 7.3)

Interflow-Index: Abb. 79 zeigt das Berechnungsergebnis des Interflow-Indexes I_{pot} auf Basis eines 30 m-Rasters für den Bereich der Messstation Freifläche Grandlohweg.

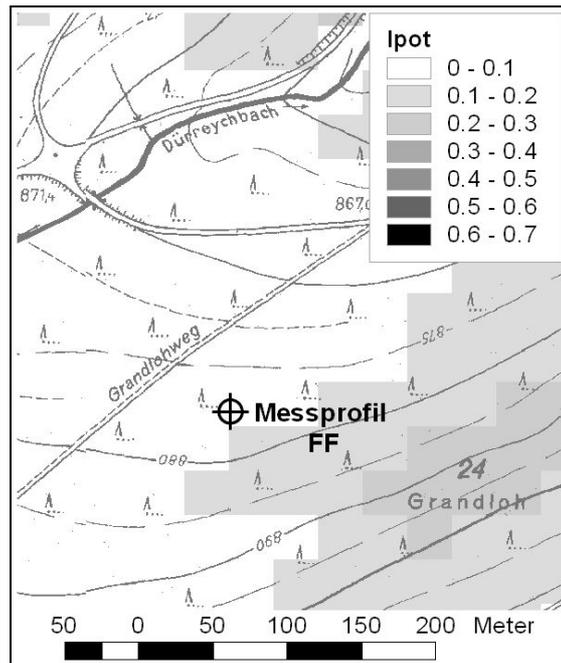


Abb. 79: Interflow-Index I_{pot} (30 m-Raster) im Umfeld der Messstation Freifläche Grandlohweg (FF)

Der Interflow-Index gibt gut die Hangverflachung im Bereich der Station FF wieder: Infolge der verringerten Neigung wird I_{pot} hier $< 0,1$. Im Südosten des Kartenausschnitts scharen sich die Isohypsen enger, und es werden etwas erhöhte Zwischenabflussaktivitäten angezeigt. Die Bedingungen am Messprofil sind für die Zwischenabflussbildung wenig geeignet. Wohl aber kann das Profil durch laterale Zuflüsse von Zwischenabfluss beeinflusst sein.

Gewichteter Topographischer Index: Abb. 80 lässt erkennen, dass am Messprofil und insbesondere talwärts erhöhte Indexwerte auftreten. Dies folgt einerseits aus der verringerten Neigung und andererseits aus dem erhöhten Wichtungsfaktor für die Standortseinheit gfS unterhalb des Messprofils.

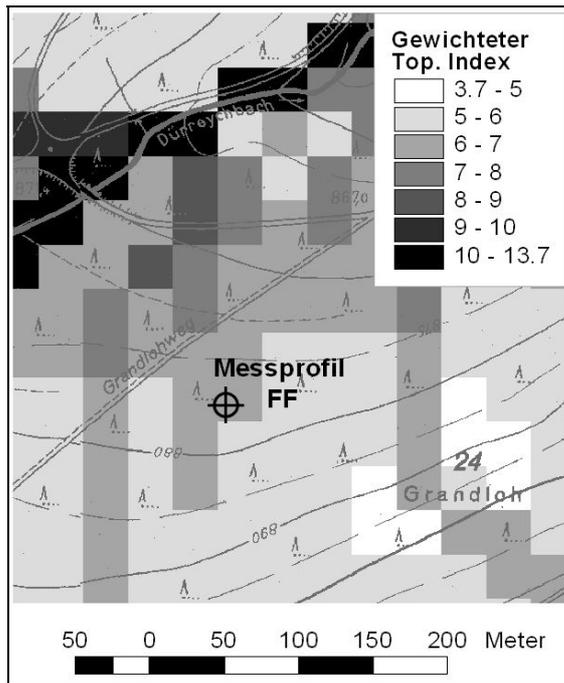


Abb. 80: Gewichteter Topographischer Index (30 m-Raster) Messstation Freifläche Grandlohweg (FF)

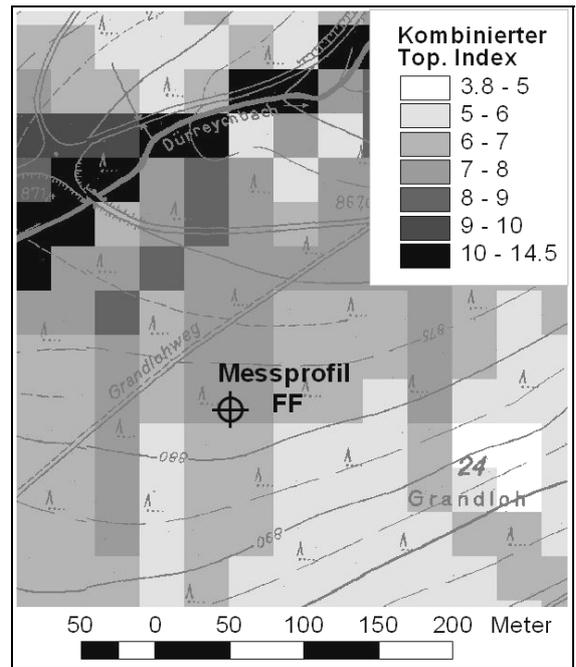


Abb. 81: Kombiniertes Topographischer Index (30 m-Raster) Messstation Freifläche Grandlohweg (FF) 1

Kombinierter Topographischer Index:

Abb. 81 zeigt die Kombination von Interflow-Index und Gewichtetem Topographischen Index: Das Indexmuster bestätigt, dass das Messprofil FF von Süden her Zufluss erhält. Gegenüber dem Gewichteten Topographischen Index hat sich hier die Zone hoher Indizes vergrößert. Die Zellen liegen im Bereich von Standortseinheiten mit geringem Schichtungsquotienten (ρ_s , SFH, vgl. Abb. 75). Dennoch macht sich ihre Berücksichtigung im Index ohne Berücksichtigung der Reinfiltration bemerkbar.

Kombinierter Index mit Reinfiltration:

Unter trockeneren Bedingungen verschwindet der laterale Zufluss von Süden schnell, wie der Berechnungsansatz mit Reinfiltration zutreffend simuliert (Abb. 82).

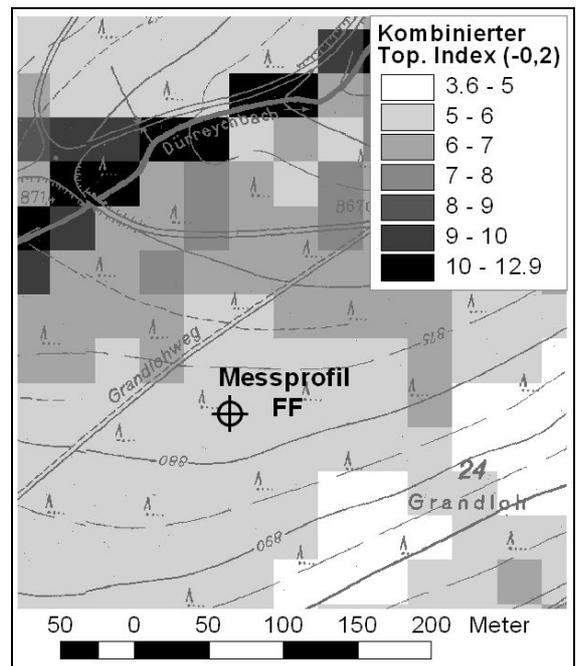


Abb. 82: Abb. 80: Kombiniertes Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster) Messstation Freifläche Grandlohweg (FF) 1

Die beschriebenen Ergebnisse der Regionalisierungsansätze sind mit den Ergebnissen der Standortuntersuchungen konsistent: Das Messprofil repräsentiert eine wechselfeuchte Fläche, die unter feuchten Bedingungen mit dominantem Sättigungsflächenabfluss reagiert und schwachen Einfluss von Zwischenabfluss zeigt. Die standörtliche Grenzsituation des Messprofils spiegelt sich ebenfalls gut im Wechsel der Indexwerte wieder. Bemerkenswert ist der enge Zusammenhang zwischen dem Sättigungsverhalten und der Abflussreaktion des Einzugsgebiets SH (s.o.). Der Standort wird damit zu einem sensiblen Indikator für die Abflussbereitschaft des Gebiets.

8.3.4 Simulation des Aufsättigungsprozesses mit CATFLOW

Am Beispiel der Standortseinheit HMi⁺ (Wasserzügige Hochlagenmisse) soll der Aufsättigungsprozess, der die Grundlage für die Entstehung von Sättigungsflächenabfluss ist, mit dem Simulationsmodell CATFLOW auf der Profilskaie simuliert werden. Dazu wurde ein für die Standortseinheit repräsentatives synthetisches Profil erstellt. (Abb. 83). Es repräsentiert die flachen Hochlagen vom Hydrotyp SOA1 (ausgeprägter Sättigungsflächenabfluss), wie sie v.a. im oberen Einzugsgebiet des Dürreychbachs auftreten.

Profilbeschreibung: Der Stauwassereinfluss im Profil reicht über längere Phasen des Jahres bis in den Oberboden. Dies führt zur Bildung einer mächtigen, durch künstliche Entwässerung zersetzten torfähnlichen organischen Auflage. Unter dem stauwasserführenden Srw-Horizont aus locker gelagertem, schwach lehmigem Sand (SI2) liegt ein dicht gelagerter Stauhorizont (Bms-Sd) aus tonigem Sand (St3).

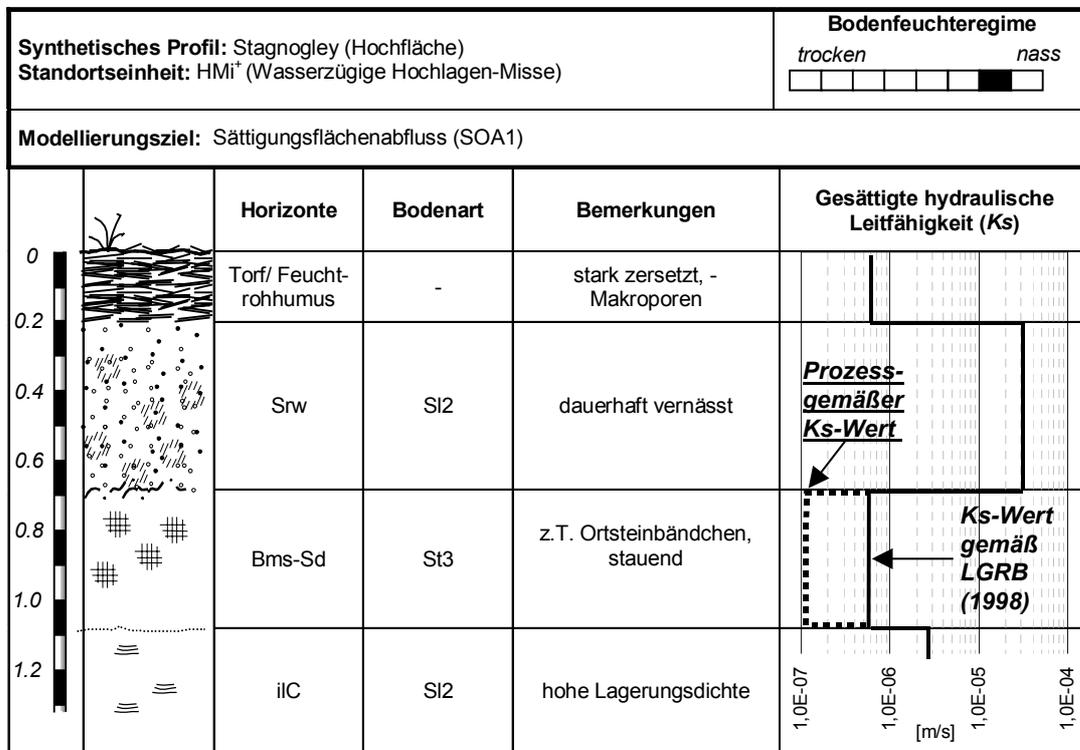


Abb. 83: Synthetisches Profil HMi⁺ als Grundlage für die Simulation eines Standorts mit Sättigungsflächenabfluss

Die dem Stauhorizont zugeordnete Bodenart orientiert sich nicht nur an Profilbeschreibungen (P 20, P 406, P 608), sondern auch an den Ergebnissen der Dünnschliffuntersuchungen für stauwasserwirksame Ortsteinbildungen (s.o.). Darunter schließt sich ein iIC-Horizont aus einer dicht gelagerten, sandigen Schuttdecke an. Die wichtigsten verwendeten pedo-hydrologischen Parameter zeigt Tab. 35. Weitere verwendete Parameter sind aus Anhang 5-2 ersichtlich.

Tab. 35: Wichtige pedohydrologische Parameter für das repräsentative Profil HMI⁺ (Ableitungen aus LGRB (1998))

Horizont	Tiefe	Ks	GPV	FK	FK/GPV
Torf/ ROF	0,20	5,8·10 ⁻⁷	92,0	82,0	0,89
Srw	0,70	2,3·10 ⁻⁵	42,5	27,5	0,65
Bms-Sd	1,10	5,8·10 ⁻⁷	33,0	26,0	0,79
iIC	> 1,10	2,9·10 ⁻⁶	29,5	20,5	0,69

Tiefe: Horizonttiefe [m] Ks: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m s⁻¹]; GPV: Gesamtporenvolumen [%], FK: Feldkapazität [%], FK/GPV: relative Feldkapazität

Auffällig ist dabei die aus LGRB (1998) abgeleitete sehr niedrige Durchlässigkeit der stark zersetzten Torfauflage: Sie liegt in der gleichen Größenordnung, wie die des Stauhorizonts Bms-Sd. Weitere Randbedingungen für die Modellierung der Standortseinheit HMI⁺ sind aus Tab. 36 zu entnehmen.

Tab. 36: Randbedingungen für die Modellierung der Standortseinheit HMI⁺

Simulationsziel:	Sättigungsflächenabfluss
Simulationsdauer:	88 d
Profilabmessungen:	Breite: 1 m Tiefe: 1,2m
Diskretisierung:	0,05 m-Schritte
Gefälle:	0°
Vegetation:	Gras, Wurzeltiefe begrenzt auf 30 cm (Staubnässe)

Ergebnisse: Abb. 84 zeigt ein Muster der relativen Sättigung im Profil nach 60 Tagen Simulationsdauer, das sich im wesentlichen nicht mehr verändert:

- Hohe relative Sättigung (0,8 - 0,9) im Bereich der torfigen Auflage, im Bereich der angenommenen Feldkapazität (vgl. Tab. 35)
- Relative Sättigung im Srw-Horizont kleiner als relative Feldkapazität (0,65 vgl. Tab. 35). Hohe relative Sättigung (0,8 - 0,9) nur in den ersten 10 cm oberhalb Stauer (Bms-Sd).
- Vollständige Sättigung im Bms-Sd- und Cv-Horizont

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bms-Sd-Horizonts (Ks) ist offensichtlich nicht niedrig genug, um eine Sättigung bis zur Geländeoberfläche zu bewirken. Jedoch kann es zu Infiltrationsüberschuss durch die langsame Sickerung in der torfigen Auflage kommen (vgl. Kap. 8.1). Obwohl bis in die Durchwurzelungstiefe von 30 cm Makroporen simuliert wurden, ist der Ks-Sprung zwischen Torf und Mineralboden noch sehr groß.

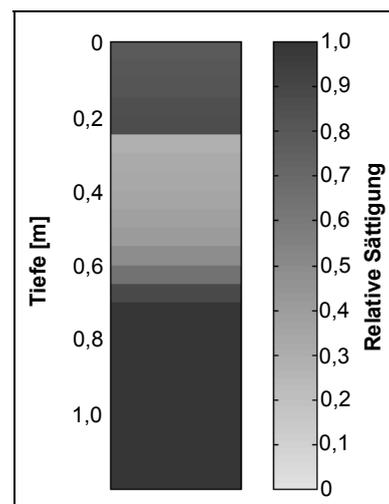


Abb. 84: Relative Sättigung des repräsentativen Profils HMI⁺ nach 60 Tagen Simulationsdauer

Wird der K_s -Wert des Bms-Sd-Horizontes von $5,8 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ um eine halbe Größenordnung reduziert (Abb. 83) so sättigt sich das Profil nach 60 Tagen bis zur Geländeoberkante auf und produziert den erwarteten Sättigungsabfluss (Abb. 85). Langfristig stellen sich so realistische Bodenfeuchtebedingungen für die Entwicklung eines Stagnogleyprofils ein.

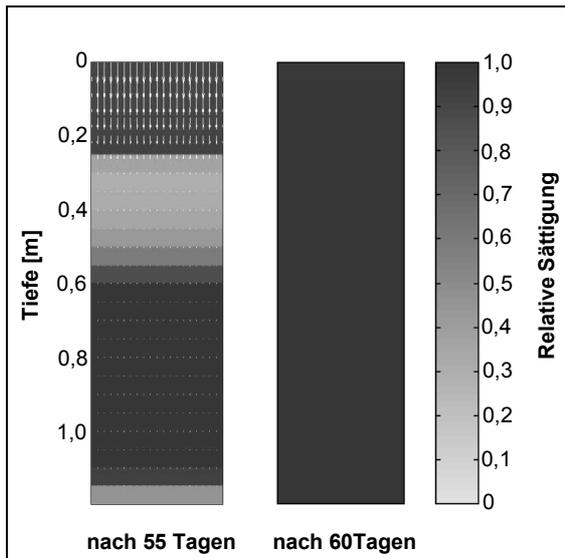


Abb. 85: Relative Sättigung des repräsentativen Profils HMI⁺ mit reduziertem K_s -Wert des Bms-Sd-Horizontes von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$. Links: nach 55 Tagen, rechts nach 60 Tagen Simulationsdauer

Somit legt die Untersuchung nahe, für stauende Ortsteinhorizonte eine Durchlässigkeit in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ anzunehmen; ein Wert, der am unteren Ende der von STAHR (1973) angegebenen Werte liegt. Da auch SEEGER (1990) für Ortsteinhorizonte im Nordschwarzwald einen Wert von 10^{-7} m s^{-1} angibt, kann diese Größenordnung somit als gesichert gelten.

An diesem Beispiel wird deutlich, wie sensitiv die richtige Schätzung des K_s -Wertes für das Simulationsergebnis ist. Gerade der K_s -Wert ist jedoch ein Parameter mit besonders ausgeprägter Bestimmungsunsicherheit. Simulationsexperimente dieser Art sind relativ aufwän-

dig, können aber dazu beitragen, sinnvolle Wertespannen einzugrenzen. Dünnschliffuntersuchungen liefern die mikromorphologische Erklärung für das eingeschränkte Sickerverhalten, das auf Grundlage gängiger Pedotransfertabellen überschätzt wird (ZEHE & WALDENMEYER 2001). Im Wechselspiel von Modell und Beobachtung lassen sich auf diese Weise prozessgemäße Parameter identifizieren. In Verbindung mit entsprechender Gebietskenntnis sind derartige Untersuchungen eine wertvolle Grundlage für eine physikalisch begründete, prozessorientierte Modellparametrisierung, die nicht nur auf das bestmögliche Nachahmen einer Abflussganglinie durch Parameterfitting abzielt

8.3.5 Feuchtflächenanteile und Abflussbeiwerte

8.3.5.1 Vorgehensweise

Flächen mit Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) und mit Sättigungsflächenabfluss (SOA) bestimmen maßgeblich den Direktabfluss eines Einzugsgebietes, der sich im Abflussbeiwert Ψ ausdrückt (\rightarrow Glossar). Im Dürreychgebiet gehen Flächen mit potenziellem HOA – abgesehen von Wegflächen – in den Flächen mit SOA auf (Kap. 8.1). Nach dem Konzept des Direktabflusses sollten Sättigungsflächenanteile und Abflussbeiwerte also einander entsprechen. Diese Annahme ist stark vereinfachend. Sie ermöglicht aber eine überschlägige quantitative Überprüfung des aus der FSK ermittelten Anteils an Flächen mit potenziellem SOA und abflusswirksamer Infiltration (INF!). Auf diesen Flächen – im Folgenden als „Feuchtflächen“ zusammengefasst – wird sich bei geringer Gebietsfeuchte nur zu einem Bruchteil Direktabfluss bilden. Erst bei sehr

nassen Bedingungen kann der Abflussbeiwert der Feuchtfächen näherungsweise gegen 1 streben. Der Abflussbeiwert ist damit „– im Gegensatz zu oft getroffenen Annahmen – kein konstanter Gebietswert“ (DYCK & PESCHKE 1995:365), die Bezeichnung als „Beiwert“ insofern irreführend.

Auf Grundlage der FSK wurde der Gesamtanteil an Feuchtfächen im Dürreychgebiet zu 15,2 % bestimmt (vgl. Kap. 7.2). Messungen der AG Dürreych haben aber gezeigt, dass nur bei starken Hochwässern ein Abflussbeiwert $\Psi_{DÜ} > 0,1$ bzw. 10 % am Gebietsauslass (DÜ) auftritt. Der durchschnittliche Abflussbeiwert dieser Flächen muss demnach für durchschnittlich feuchte Bedingungen weit unterhalb 1 liegen. Diesem Umstand wurde im vorgestellten Regionalisierungskonzept durch Zuweisung eines Wichtungsfaktors aus der Ökologischen Feuchte Rechnung getragen (Kap. 6.1.3). Dieser Wichtungsfaktor kann als geschätzter maximaler Abflussbeiwert einer Standortseinheit aufgefasst werden.

Eine Kalibrierung des Wichtungsfaktor wäre nur durch Messung des tatsächlichen Abflussbeiwerts einzelner Feuchtfächen möglich und ist praktisch kaum durchführbar. Durch den Vergleich von Teileinzugsgebieten mit dem Gesamteinzugsgebiet lassen sich aber relative Abflussbeiwerte berechnen: Bei ausreichender Vorfeuchte sollte das Verhältnis der Abflussbeiwerte Ψ eines Teileinzugsgebiets TEG zum Abflussbeiwert des Gesamteinzugsgebiets EG dem Verhältnis der jeweiligen Feuchtfächenanteile F entsprechen. Es sollte also näherungsweise Gl. 14 gelten:

$$\frac{\Psi_{TEG}}{\Psi_{EG}} \cong \frac{F_{TEG}}{F_{EG}} \quad (\text{Gl. 14})$$

Ψ : Abflussbeiwert

F : Feuchtfächenanteil

Index_{TEG}: Teileinzugsgebiet

Index_{EG}: Gesamteinzugsgebiet (hier das Dürreychgebiet, Index_{DÜ})

Dieser Zusammenhang wird im Folgenden geprüft. Für die Teileinzugsgebiete SH, LE, SE und HI werden die jeweiligen Abflussbeiwerte von 80 Ereignissen als Vielfaches des Abflussbeiwertes am Hauptpegel DÜ dargestellt und zum ermittelten Anteil der Feuchtfächen in Beziehung gesetzt.

8.3.5.2 Abflussbeiwerte im Gesamteinzugsgebiet

Abb. 86 zeigt zunächst die nach der Größe sortierten Abflussbeiwerte $\Psi_{DÜ}$ des Pegels Dürreych im Messzeitraum 1997 bis 2000 für 80 Ereignisse (vgl. Anhang 8):

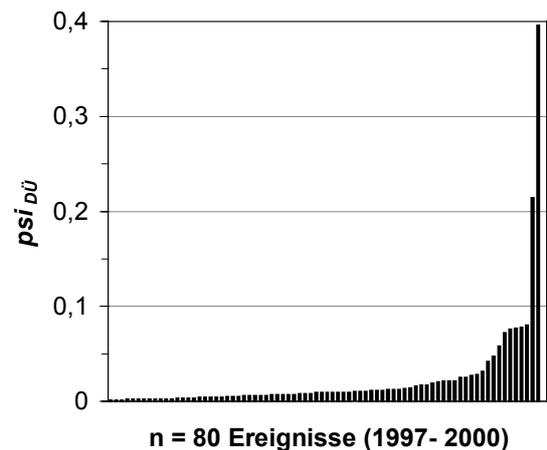


Abb. 86: Nach der Größe sortierte Abflussbeiwerte $\Psi_{DÜ}$ des Gesamteinzugsgebiets (DÜ) für n = 80 Ereignisse.

Deutlich ist das Überwiegen der Werte bis zu einem Abflussbeiwert von $\Psi_{DÜ} = 0,03$ zu erkennen. Ein zweites Wertenniveau deutet sich bei etwa $\Psi_{DÜ} = 0,08$ an. Der Sprung zu den nur zwei mal erreichten höheren Abflussbeiwerten kann auch ohne langjährige Beobachtungsreihe als nichtlineares Systemverhalten interpretiert werden: Hier zeichnet sich ein Schwellenwert ab, jenseits dessen ein qualitativ anderer Systemzustand den Abflussbeiwert bestimmt. In diesem neuen Systemzustand

kann der Anteil an Feuchflächen nicht mehr als proportional zum Abflussbeiwert angenommen werden; auch Nicht-Feuchflächen tragen maßgeblich zum Abfluss bei. Die Höhe des Schwellenwertes ist aus der kurzen Zeitreihe jedoch nicht zuverlässig zu schätzen.

Abb. 87 zeigt in gleicher Darstellungsweise die Abflussbeiwerte für den Zeitraum 1975 bis 1985 (Datenquelle: FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996). Unterschiedliche Schlüsselkurven des Pegels Dürreych (DÜ) und Verfahren zur Basisabflussabtrennung schränken die direkte Vergleichbarkeit der Werte zwar ein. Dennoch lässt sich für $\psi_{DÜ}$ feststellen:

- Erstes Ansteigen der Werte bei $\psi_{DÜ} = 0,04$
- Schwache Werthäufung bei 0,08 bis 0,09
- Sprung zu höheren Werten bei 0,17

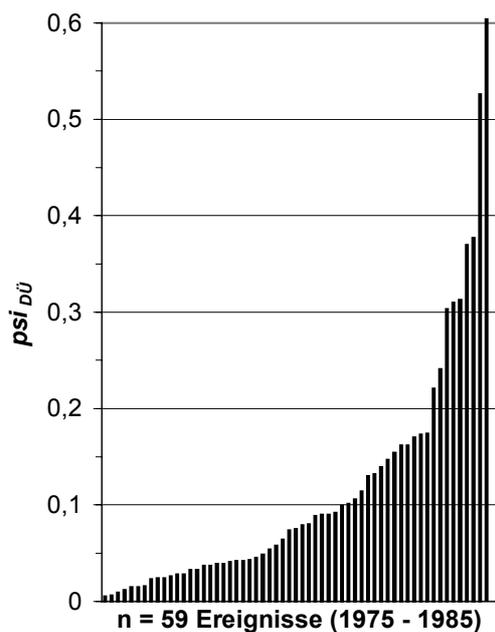


Abb. 87: Nach der Größe sortierte Abflussbeiwerte $\psi_{DÜ}$ des Gesamteinzugsgebiets (DÜ) für $n = 52$ Ereignisse in den Jahren 1975 –1985 (Datenquelle: FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996).

Im Vergleich zur eigenen Messreihe lässt sich das erste Wertenniveau gut, das zweite Wertenniveau noch undeutlich wiedererkennen. Der Sprung zu höheren Werten erfolgt – wie bei ei-

ner längeren Messreihe nicht anders zu erwarten – erst bei einem höheren Abflussbeiwert. Auch bei einer 11-jährigen Datenreihe ist aber ein Schwellenwert nicht zuverlässig zu schätzen.

8.3.5.3 Abflussbeiwerte der Teileinzugsgebiete

Erst durch den Vergleich der Abflussbeiwerte für den Pegel DÜ mit denen der Teileinzugsgebiete LE, SH, HI und SE lässt sich das Überschreiten eines Schwellenwertes deutlicher zeigen. In den Abb. 88 bis 91 ist der Abflussbeiwert ψ jedes Ereignisses für die vier Teileinzugsgebiete (TEG) dargestellt als Vielfaches vom Abflussbeiwert am Hauptpegel DÜ ($\psi_{TEG}/\psi_{DÜ}$). Diese Darstellungsweise ermöglicht es, direkt abzulesen, um welchen Faktor der Abflussbeiwert eines Teileinzugsgebiets vom Hauptpegel DÜ abweicht. Allen vier Diagrammen ist gemeinsam:

- Starke Streuung der Quotienten bei Abflussbeiwerten $\psi_{DÜ}$ nahe 0 im Gesamteinzugsgebiet
- Verjüngung der Punktwolke im Bereich des vermuteten Schwellenwertes $\psi_{DÜ} \approx 0,08$
- Erreichen eines Quotienten von $\psi_{TEG}/\psi_{DÜ} \approx 1$ für hohe Abflussbeiwerte $\psi_{DÜ}$ im Gesamteinzugsgebiet

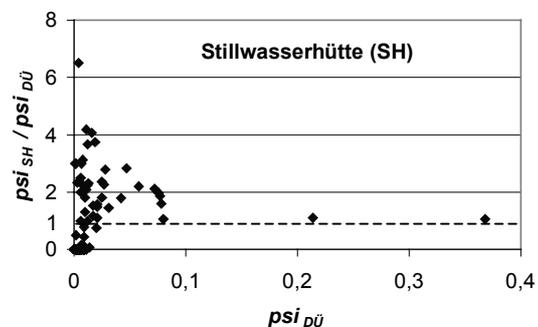


Abb. 88: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel SH zum Gesamtgebiet (DÜ)

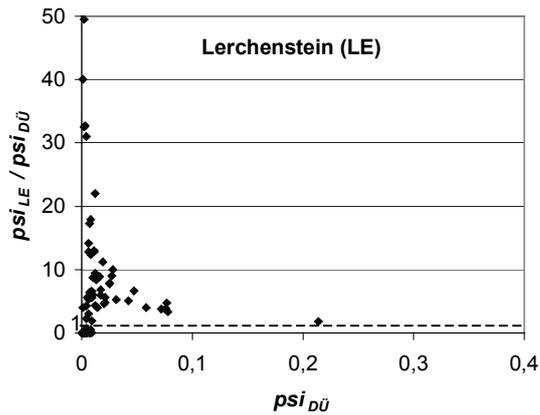


Abb. 89: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel LE zum Gesamtgebiet (DÜ)

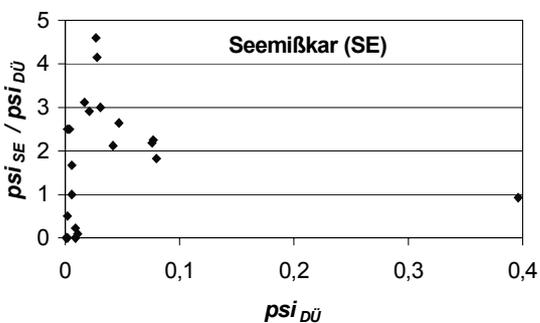


Abb. 90: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel SE zum Gesamtgebiet (DÜ)

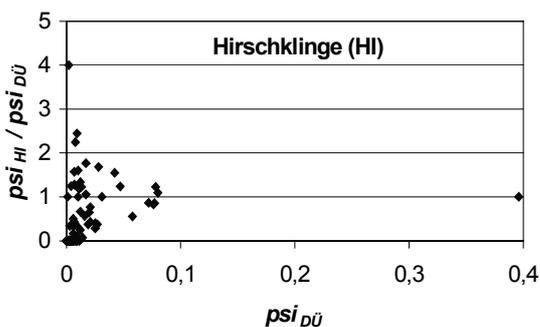


Abb. 91: Verhältnis der Abflussbeiwerte am Pegel HI zum Gesamtgebiet (DÜ)

Interpretation: Die große Streuung bei sehr kleinen Abflussbeiwerten $\psi_{DÜ}$ belegt die weite Spanne möglicher Abflussreaktionen eines Teileinzugsgebietes bei geringeren Gebietsfeuchten. Während hier noch Speicherung dominiert, kann dort bereits Sättigungsabfluss vorherrschen. Einen besonders breiten Streu-

bereich zeigt dabei das Teileinzugsgebiet Lerchenstein (LE), das sich als das Teileinzugsgebiet sowohl mit den höchsten relativen wie auch absoluten Abflussbeiwerten präsentiert. Hier dürfte die starke künstliche Dränierung neben dem hohen Feuchtflächenanteil eine maßgebliche Rolle spielen.

Erst bei feuchteren Bedingungen werden nahezu alle Feuchtflächen abflussaktiv und erreichen ihre optimale Ausdehnung. In diesem Optimalzustand sollten die Abflussbeiwertquotienten $\psi_{TEG} / \psi_{DÜ}$ dem Verhältnis der Feuchtflächenanteile $F_{TEG} / F_{DÜ}$ entsprechen. Zum besseren Vergleich der beiden Verhältniszahlen wurde der Median der Abflussbeiwertquotienten für Werte > 0 berechnet. Der Median ist die ungefähre statistische Entsprechung des visuell ablesbaren Schwellenwerts im Bereich der Verjüngung der Punktwolken.

Um die unterschiedliche Anbindung der Feuchtflächen an das Gewässernetz zu berücksichtigen, wurde die gleiche anteilige Berechnung für diejenige Einzugsgebietsfläche angestellt, die in einen 100 m-Pufferbereich um das Gewässernetz fällt (Abb. 92).

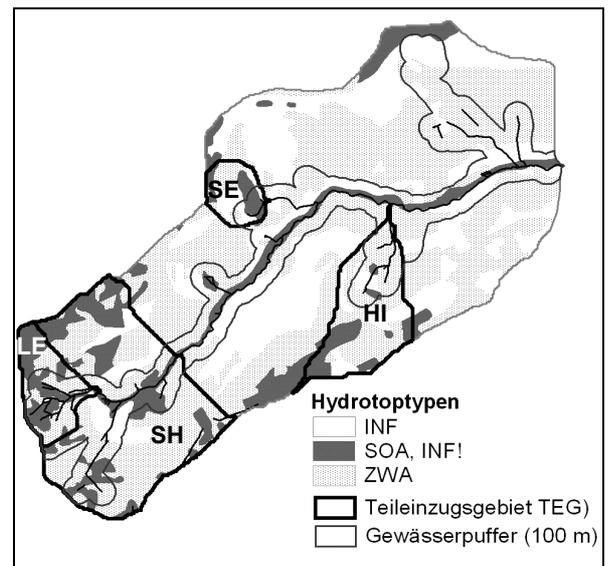


Abb. 92: Feuchtflächenanteile (SOA, INF!), Einzugsgebiete und 100 m-Gewässerpuffer

Die Feuchflächenquotienten für die Teileinzugsgebiete ($F_{TEG}/F_{DÜ}$) sowie ihre Pufferzonen ($F_{TEG}/F_{DÜ}$ 100m-Puffer) sind in Tab. 37 den Medianwerten der Abflussbeiwertquotienten (Median $\Psi_{TEG}/\Psi_{DÜ}$) gegenübergestellt.

Tab. 37: Feuchflächenanteile am Gesamteinzugsgebiet $F_{TEG}/F_{DÜ}$ und ihre Abflussbeiwertquotienten (Erläuterungen im Text).

Teileinzugsgebiet (TEG)	Median $\Psi_{TEG}/\Psi_{DÜ}$	$F_{TEG}/F_{DÜ}$	$F_{TEG}/F_{DÜ}$ 100m-Puffer
DÜ	1	1	1
SH	1,8	1,9	1,8
SE	2,2	2,2	2,5
LE	6,2	3,4	2,2
HI	0,9	1,4	0,3

Tab. 37 zeigt für die Teileinzugsgebiete SH und SE eine gute Übereinstimmung: Tatsächlich zeigen die beiden Gebiete mit einem etwa doppelt so hohen Anteil an Feuchflächen wie im Gesamteinzugsgebiet DÜ auch etwa doppelt so hohe Abflussbeiwerte. Stark unterschätzt wird der Abflussbeiwert dagegen im Einzugsgebiet LE. Dies ist auf die künstliche Dränierung des Gebiets zurückzuführen.

Etwas überschätzt wird der Abflussbeiwert des Teileinzugsgebiets HI. Wie ein Blick auf Abb. 92 bestätigt, liegt der überwiegende Anteil der Feuchflächen in diesem Einzugsgebiet weit vom Gewässernetz entfernt, was einer schnellen Abflusskonzentration entgegenwirkt. Innerhalb einer 100 m-Pufferzone reduziert sich demzufolge auch der Flächenquotient stark auf Werte, die nun jedoch unter dem ermittelten Medianwert liegen. Robuste Werte sind ohnehin nur für nicht zu kleine Pufferflächen zu erwarten, da mit sinkender Flächengröße zunehmend Mittelungseffekte entfallen. Während Tab. 37 lediglich den prozentualen Anteil aller Feuchflächen berücksichtigt, zeigt der Vergleichsdatensatz in Tab. 38 die mit der

Ökologischen Feuchte gewichteten Feuchflächenanteile (vgl. zur Wichtung Kap. 6.1.3).

Tab. 38: Gewichtete Feuchflächenanteile am Gesamteinzugsgebiet $F_{TEG}/F_{DÜ}$ und ihre Abflussbeiwertquotienten (Erläuterungen im Text).

Teileinzugsgebiet (TEG)	Median $\Psi_{TEG}/\Psi_{DÜ}$	$wF_{TEG}/wF_{DÜ}$	$wF_{TEG}/wF_{DÜ}$ 100m-Puffer
DÜ	1	1	1
SH	1,8	2,2	2,6
SE	2,2	3,3	5,6
LE	6,2	3,9	3,7
HI	0,9	1,8	0,5

Tab. 38 lässt erkennen, dass der gewichtete Feuchflächenanteil eher zu größeren Abweichungen vom Median führt. Für das Teileinzugsgebiet SH kann noch eine akzeptable Übereinstimmung festgestellt werden, während für die kleineren Einzugsgebiete – insbesondere für die Pufferflächen – der Zusammenhang schlechter wird.

FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996:137) gibt für die „minimum contributing area CBA (%)“¹ einen Mittelwert von 9,6 % und einen Median von 6,4 % an. Dieser Wert liegt in der Größenordnung für $\Psi_{DÜ}$, jenseits dessen die Quotienten der Abflussbeiwerte $\Psi_{TEG}/\Psi_{DÜ}$ gegen 1 streben (Abb. 88-91). Diese minimal abflusswirksame Fläche sollte „nicht als repräsentativ für die aktuelle Größe der Abflussbildungsflächen im Einzugsgebiet gehalten werden“ (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996:171). Sieht man die 15,2 % Feuchflächen im Dürreychgebiet als die ausschließlichen Abflussbildungsflächen an, so bedeutet dies, dass etwa auf der Hälfte dieser Flächen Direktabfluss gebildet wird. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung dieses Ergebnisses mit dem gewichteten Feuchflächenanteil des Gesamtgebietes, der

¹ CBA: Die hypothetische Mindestbeitragsfläche, die 100 % Direktabfluss produziert. (CBA =! Ψ)

bei 0,08 oder 8 % liegt. Offenbar trifft die Wichtungsfunktion (Kap. 6.1.3) die Verhältnisse im Mittel recht gut, während sie auf kleinen Flächen zu unbefriedigenden Ergebnissen führen können (Tab. 38).

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass auf Grundlage der FSK eine plausible Bestimmung der Feuchtflächenanteile mit Direktabfluss möglich ist. Mithilfe der Quotienten-Plots kann darüber hinaus ein Schwellenwert abgeschätzt werden, jenseits dessen sich die Abflussbildungsprozesse im Einzugsgebiet nivellieren und nicht mehr von den Feuchtflächen dominiert werden.

8.3.6 Feuchtflächen und Vegetation

Die vegetationskundlichen Untersuchungen im Dürreychgebiet haben sich zur Abgrenzung bachnaher Überflutungsflächen sowie oberflächennah durchströmter Rinnen als geeignet erwiesen. Eine wichtige Zeigerfunktion haben dabei *Luzula sylvatica*-Dominanzbestände (Wald-Hainsimse) verschiedener Ausprägung (Kap. 8.2.3 f).

Für die ausgedehnten Feucht- und Sättigungsflächen der flachen Lagen mit stagnierendem Bodenwasser konnten Dominanzbestände von *Molinia caerulea* (Blaues Pfeifengras) als Indikator für Wechselfeuchte ausgemacht werden. Der Zusammenhang zwischen erhöhter Deckung von *Molinia caerulea* und Sättigungsflächen wurde beispielhaft durch Bodenfeuchtemessungen an der Messstation Freifläche Grandlohweg (Kap. 8.3.3.3) gezeigt.

Weitere Beispiele für *Molinia caerulea*-reiche Flächen sind die Vegetationsaufnahmen V 26 bis V 29 und V 48 (vgl. Anhang 6-3); die Aufnahmen V 23, V 37 und V 38 vermitteln zu den Rinnen mit *Luzula sylvatica*. Die Bestände

wurden bereits zusammenfassend in Kap. 8.2.3 charakterisiert.

Die Lichtbedürftigkeit von *Molinia caerulea* schränkt die Eignung als Indikatorpflanze für Sättigungsflächen im von Nadelforsten beherrschten Dürreychgebiet stark ein. Eine flächige Erfassung ist daher nur auf älteren Schlagflächen oder ggf. in lichten Altholzern sinnvoll. Es wurden zwei kleinere zusammenhängende Flachlagen nahe der Tiefenlinie untersucht:

- Karboden des Seemißkars mit teilweise lichtem Altbestand.
- Umfeld der Quellmulde des Dürreychbachs; 1990 durch Sturmwurf entwaldet

Beispiel Seemißkar: Aus Abb. 93 wird deutlich, dass die sehr flache Mulde im Zentrum des Seemißkarbodens recht gut von *Molinia*-Beständen nachgezeichnet wird.

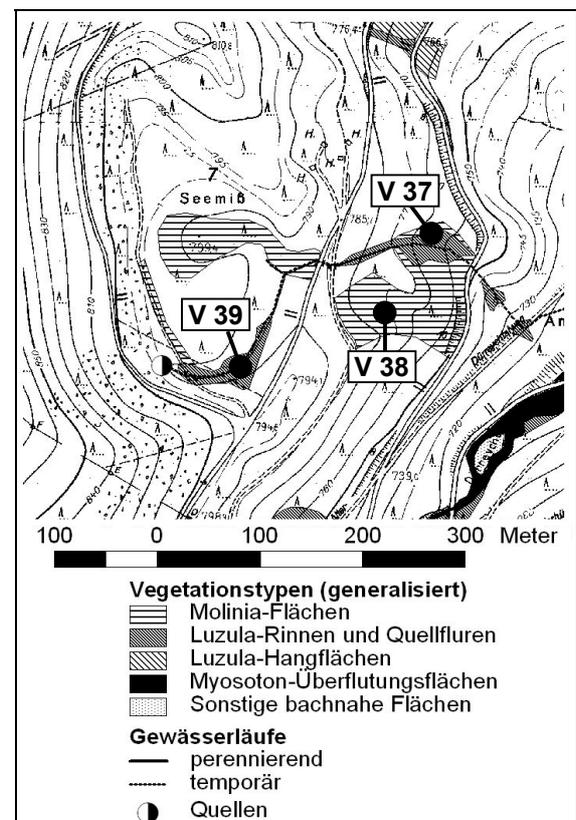


Abb. 93: Gewässernahe Vegetation mit Indikatorwert für die Abflussbildung im Seemißkar (SE). Vegetationsaufnahmen V 37–V 39 im Anhang 6-3

Im Bereich der Karschwelle im Osten bedecken *Molinia*-Dominanzbestände jedoch auch einen konvexen Hangfußbereich.

Im Zentrum des Karbodens stimmen erhöhte Werte des Gewichteten Topographischen Index in ihrer Lage gut mit der Lage von veräsnsten *Molinia*-Flächen bzw. *Luzula*-Rinnen und Quellfluren überein (Abb. 94).

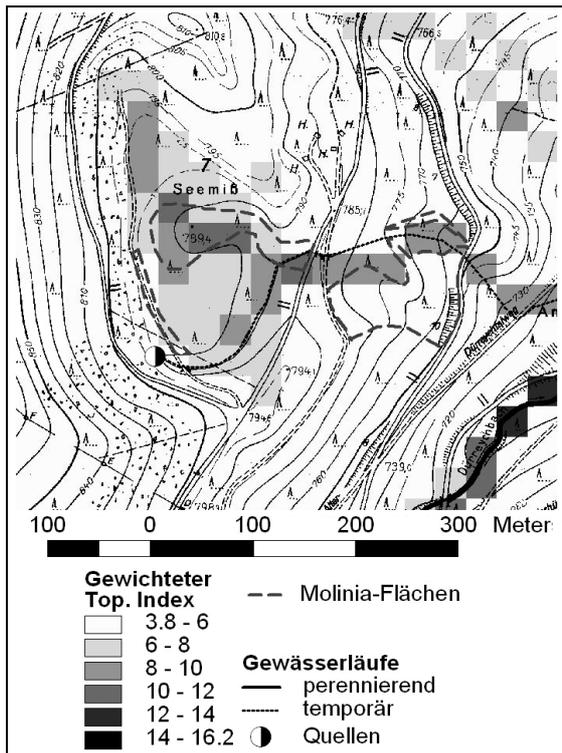


Abb. 94: Gewichteter Topographischer Index für das Seemißkar (30 m Raster). *Molinia*-Flächen sind gestrichelt eingefasst.

Die Standortbedingungen legen nahe anzunehmen, dass die Flächen im Bereich der Karschwelle in feuchten Perioden langsamen Wasserzuschuss aus dem Kar erhalten, in niederschlagsarmen Perioden aber austrocknen. Entlang des Gerinnes, welches das Seemißkar entwässert, zeigen dagegen *Luzula*-Rinnenbestände schnelle oberflächennahe Wasserbewegungen an. Eine ähnliche konvexe Standortsituation unterhalb des Hirschklingen-Kars wurde im Kap. 8.2.4 untersucht. Hier bedecken *Luzula*-Dominanzbestände den kon-

vexen Hangfuß und weisen auf schnellen pipe-flow hin. In beiden Fällen können diese Sonderstandorte nicht von den Indexwerten abgebildet werden.

Beispiel Quellmulde Dürreychbach: In der Quellmulde des Dürreychbachs zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie für den Seemißkarboden: Erhöhte Werte des Gewichteten Topographischen Index stimmen in ihrer Lage recht gut mit der Lage von *Molinia*-Flächen bzw. *Luzula*-Rinnen und Quellfluren überein (Abb. 95 und Abb. 96). Eine Tendenz des jeweiligen Vegetationstyps zu höheren oder geringeren Indexwerten ist wie beim Seemißkar nicht festzustellen.

Die zwei Beispiele bestätigen die Vermutung, dass *Luzula*-Dominanzbestände im Untersuchungsraum tatsächlich an stark wasserzügige Standorte gebunden sind, während *Molinia caerulea* – entsprechend der allgemeinen Einschätzung in der Literatur – auf wechselfeuchten Standorten mit stagnierender Wasserbewegung anzutreffen ist (Anhang 6-1).

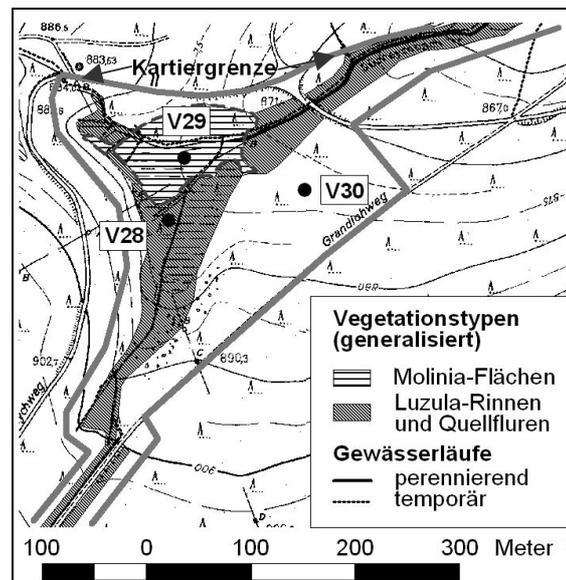


Abb. 95: Gewässernahe Vegetation mit Indikatorwert für die Abflussbildung im Bereich der Quellmulde des Dürreychbachs. Vegetationsaufnahmen V 28–V 30 im Anhang 6-3

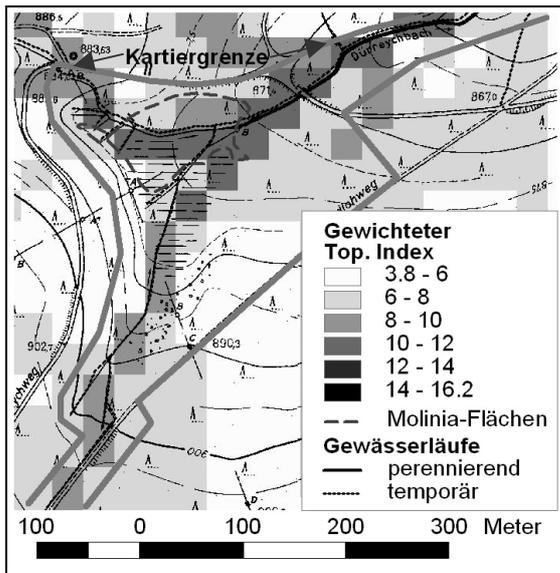


Abb. 96: Gewichteter Topographischer Index für die Quellmulde des Dürreychbachs (30 m Raster). *Molinia*-Flächen sind gestrichelt eingefasst.

8.3.7 Feuchteklassifikation einer Landsat-TM-Szene

Landsat-TM-Spektralkurven bieten die Möglichkeit, auf Feuchteunterschiede in Einzugsgebieten rückzuschließen (vgl. Kap. 6.3.2). Aufgrund der Rastergröße von 30 x 30 m eignet sich die Methode gut für mesoskalige Aussagen. Abb. 99 (nächste Seite) zeigt die Feuchteklassifikation einer Landsat-TM-Szene vom 7.03.1992 für den Ausschnitt des Dürreychgebiets bei nur mäßig feuchtem, praktisch schneefreiem Gebietszustand (Abb. 97).

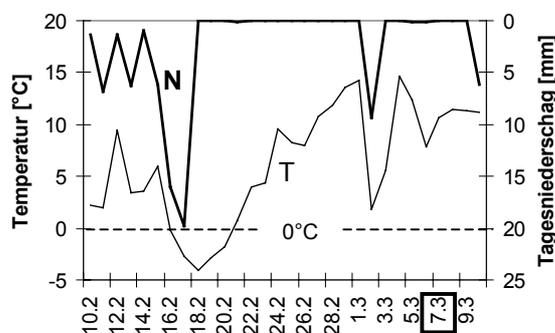


Abb. 97: 14.30 Uhr-Temperaturen (unten) und Tagesniederschläge (oben) vor dem Aufnahmezeitpunkt 7.3.1992 (Quelle: DWD, Station Dobel, 770 m NN)

Die als nass bis feucht klassifizierten Flächen (Magenta und Dunkelblau) konzentrieren sich auf die flachen Lagen des Kopfeinzugsgebiets. Gut nachgezeichnet wird das Seitengerinne des Seebergkars (SB). Mäßig feucht (Graublau) erscheinen ebenfalls Teile des Kopfeinzugsgebiets (a), aber auch die südexponierten Unterhänge im Ostteil des Einzugsgebiets (b) sowie der obere Teil der Hirschklinge (HI).

Ungewöhnlich trocken (Orangerot) erscheinen der Quellbereich des Dürreychbachs, eine größere Kuppenlage nördlich dieser Fläche sowie einzelne, recht scharf begrenzte Flächen im Nordosten des Gebiets. Wie ein Blick auf die Abb. 98 zeigt, wird die Klassifizierung hier offenbar durch Interferenz mit der Vegetationsbedeckung gestört: Bei den großen, als trocken klassifizierten Flächen handelt sich ganz überwiegend um Sturmwurfflächen bzw. junge Aufforstungen (J). Insbesondere an den kleinen Wiesenflächen (W) ist der Zusammenhang mit der fehlenden Waldbedeckung deutlich zu erkennen. Mit dieser Einschränkung können die Werte interpretiert werden.

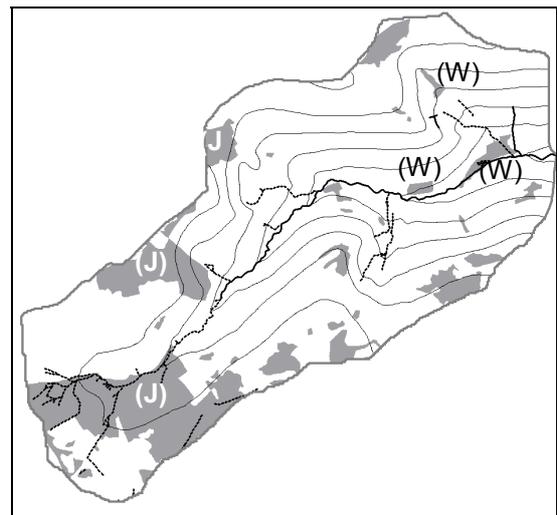


Abb. 98: Die grauen Flächen zeigen die Verteilung von Sturmwurfflächen, jungen Aufforstungen (J) und Wiesenflächen (W) im Dürreychgebiet (Quelle: FORSTDIREKTION KARLSRUHE 1995).

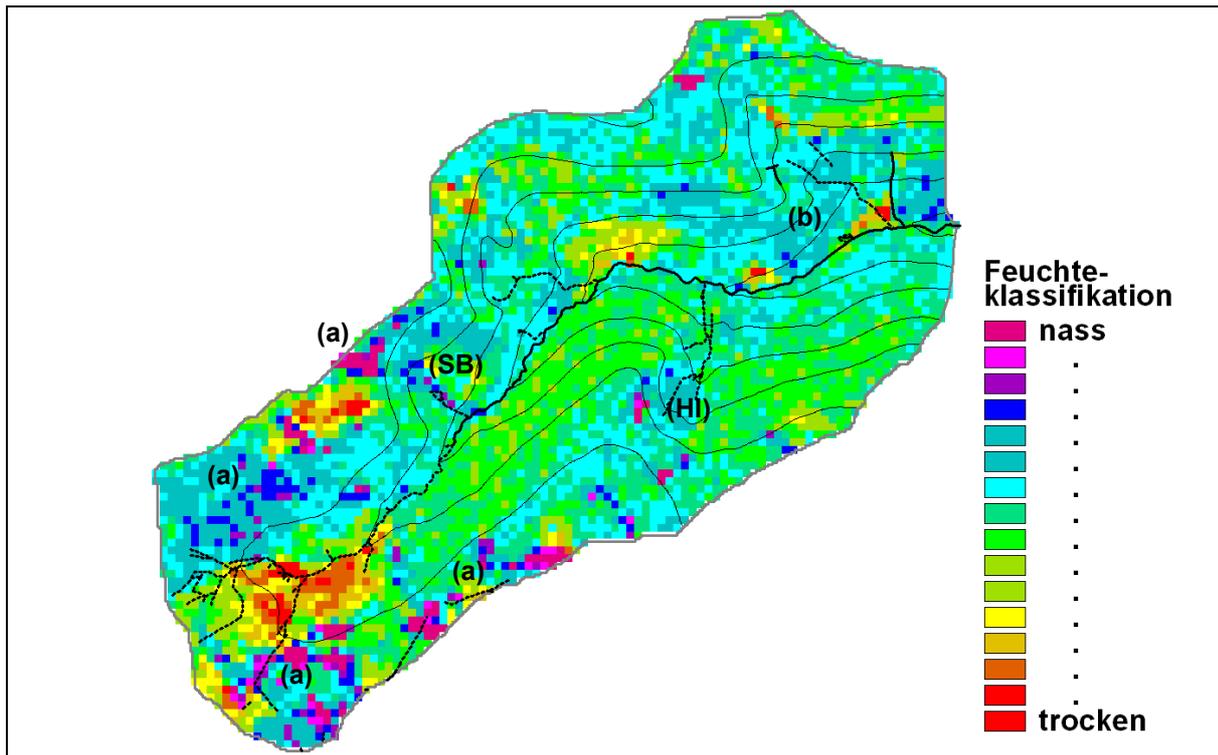


Abb. 99: Feuchteklassifikation einer Landsat-TM-Szene vom 7.03.1992. (Falschfarbenbild in 16 gleich breiten Klassen, Wertespektrum 0-255). Erläuterung der Beschriftungen im Text.

Vergleich mit dem Gewichteten Top. Index:

Zum Vergleich des Feuchtemusters mit dem Regionalisierungsergebnis bietet sich der Gewichtete Topographische Index an. Da die Witterungsbedingungen – geringe Niederschläge und ausklingende Schneeschmelze (Abb. 97) – auf einen nur mäßig feuchten Gebietszustand schließen lassen, wird zum Vergleich der Kombinierte Index mit Reinfiltration herangezogen (Kap. 9, Abb. 39, Wichtungswerte zwischen $-0,2$ und $+0,75$). Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Karten wurden hohe Feuchtwerte des Falschfarbenbilds ebenfalls in Graustufen übersetzt.

Der exemplarische Vergleich zeigt stellenweise deutliche Ähnlichkeiten der Feuchtemuster. Häufiger jedoch besteht die Ähnlichkeit nur in einer gemeinsamen Tendenz: So konzentrieren sich die feuchten Flächen in beiden Dar-

stellungen auf die Verebnungen des Kopfeinzugsgebiets, jedoch meist ohne dass die Flächen in ihrer Lage übereinstimmen. Demzufolge ließ die Kreuzkorrelation zwischen der ausgewerteten Satellitenszene und dem Gewichteten Topographischen Index (Arc Info-Befehl CORRELATION) keinen statistischen Zusammenhang erkennen ($r < 0,1$).

Die Detailbetrachtungen in Abb. 100 sprechen dennoch für einen Feuchteinformationsgehalt der Szene, der aber offenbar durch Interferenzen mit der Vegetationsbedeckung (s.o.), Verschattung usw. getrübt wird. Leider erbrachte die Analyse dreier weiterer Landsat-TM-Szenen keine verwertbaren Ergebnisse.

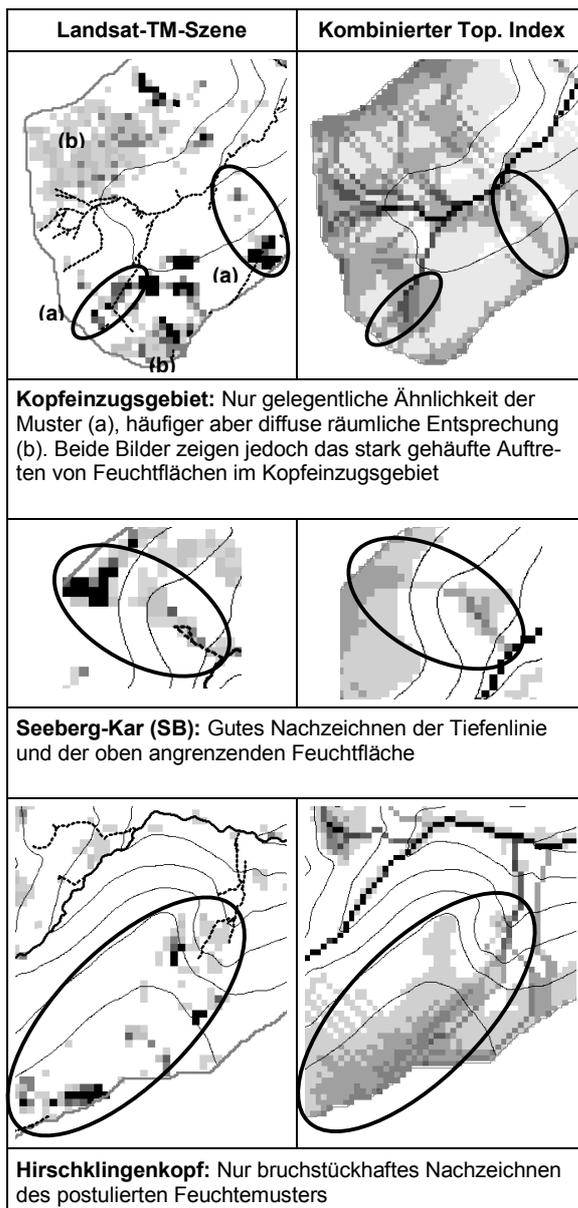


Abb. 100: Landsat-Feuchteklassifikation und Kombiniertes Topographisches Index mit Reinfiltration – Vergleich ausgewählter Kartenausschnitte.

8.3.8 Gewässeranbindung von Sättigungsflächen

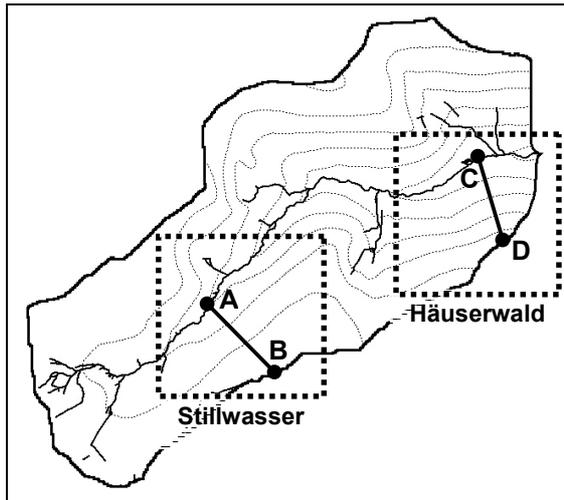
Fragestellung: Die Bodenfeuchtemessungen an der Messstation FF, Sättigungsfläche Grandlohweg (Kap. 8.3.3.3) zeigen einen engen Zusammenhang zwischen Wassersättigung im Boden und Abflussbeginn des Pegels SH (vgl. Abb. 78). Dies ist umso erstaunlicher,

als bei diesem Messpunkt keine direkte räumliche Anbindung an das Gewässernetz erkennbar ist. Wie bei vielen gewässerfernen Sättigungsflächen ist unklar, welchen tatsächlichen Abflussbeitrag diese potenziell abflussbereiten Flächen zu leisten imstande sind.

Vorgehensweise: Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kombinierte Gewichtete Topographische Index (Kap. 6.1.3) trägt dazu bei, mögliche Abflusswege von den Feuchtflecken der Hochlagen zum Vorfluter zu identifizieren. Bei diesem Ansatz wird die mögliche Fortsetzung des Oberflächenabflusses als Zwischenabfluss berücksichtigt. Um die Ergebnisse zu validieren, können gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (DOC) als natürliche Tracer verwendet werden. Oberflächennahe Komponenten lassen bereits durch ihre dunklere Färbung auf höhere DOC-Konzentrationen schließen. Wie Untersuchungen der AG Dürreych gezeigt haben, eignen sich Menge und Qualität des DOC, verschiedene Herkunftsräume von Abflusskomponenten zu identifizieren (VOLKMANN 2002; CASPER 2002).

Aufbauend auf der Kartierung von Wasseraustritten und Erosionsspuren auf Forstwegen (Kap. 6.2.3) wurden 53 Wasseraustritte an zwei charakteristischen Hängen nach längeren Regenfällen am 23.03.2001 beprobt. VOLKMANN (2002) führte mit den Proben DOC-Konzentrationsbestimmungen durch (IR-Detektion von CO₂ durch Verbrennen) und konnte das DOC durch fluoreszenzspektroskopische Untersuchungen näher charakterisieren.

Untersuchungsflächen: Zur Untersuchung wurden zwei Hänge ohne Gewässernetz ausgewählt (Abb. 101 und Abb. 102), die sich hinsichtlich ihrer naturräumlichen Ausstattung und der resultierenden Abflussbildungseigenschaften deutlich unterscheiden:



Kurzbeschreibung der Vergleichshänge:

- Hang Stillwasser: Überwiegend mittel geneigter Hang mit Sättigungsflächen im Bereich der fast ebenen Hochfläche
- Hang Häuserwald: überwiegend sehr stark geneigter Hang ohne Sättigungsflächen

Abb. 101: (links) Lageplan der beiden Vergleichshänge und der Hangschnitte A-B und C-D (vgl. Abb. 102)

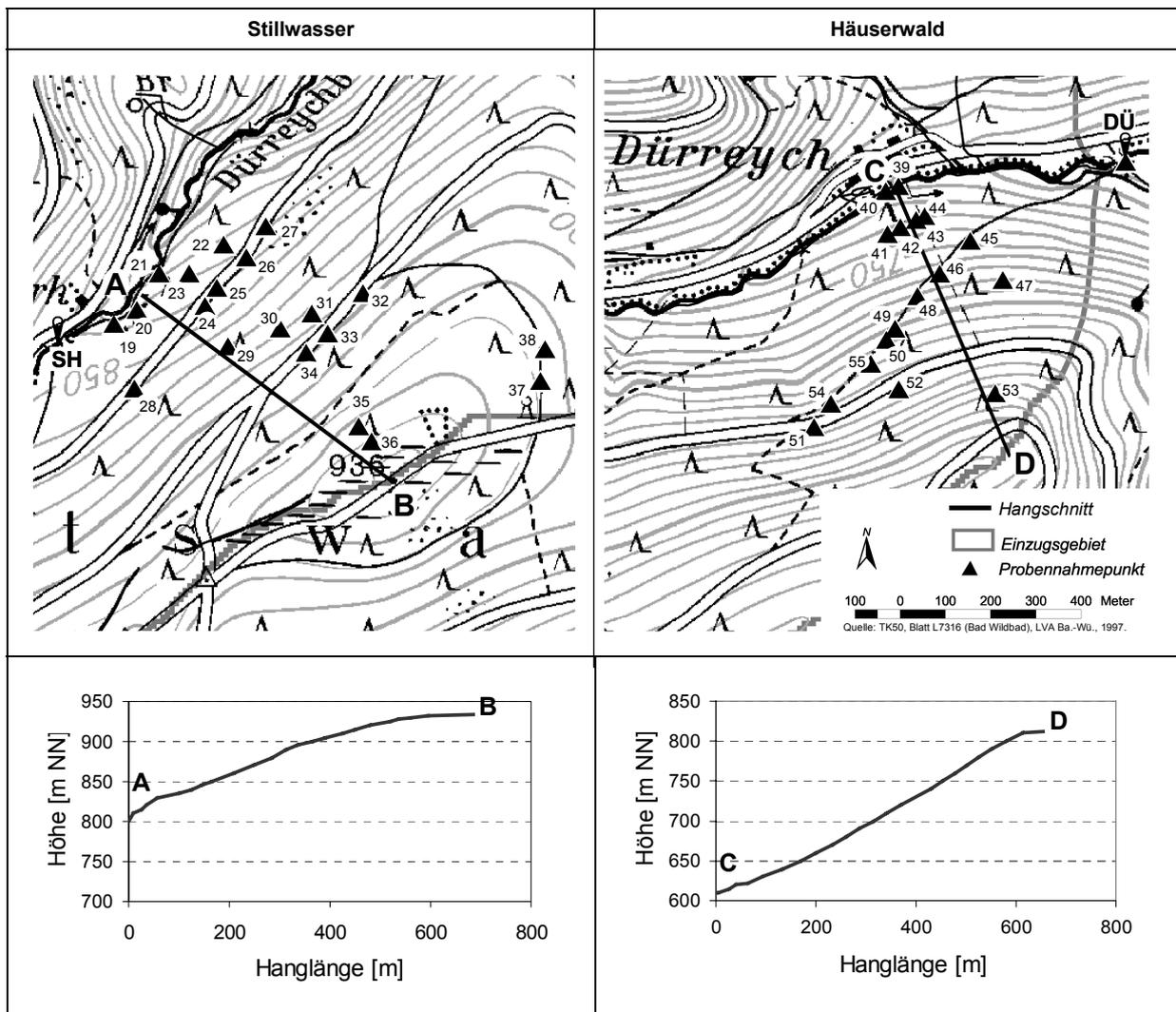


Abb. 102: Übersichtspläne und Hangschnitte der Vergleichshänge Stillwasser (links) und Häuserwald (rechts)

In Tab. 39 sind die naturräumlichen Gegebenheiten der beiden Hänge vergleichend gegenübergestellt.

Tab. 39: Naturräumliche Charakterisierung der Vergleichshänge

	Hang Stillwasser	Hang Häuserwald
Relief	Höhen: 800-930 m NN	Höhen: 610-810 m NN
	Mittlere Neigung ca. 20 %	Mittlere Neigung ca. 30 %
	Oberhang schwach konvex, breites Plateau	Oberhang gestreckt, sehr schmales Plateau
	Unterhang schwach konkav, sehr blockreich	Unterhang schwach konkav
Substrat / Boden	smc2-Hochflächen, smc2-beeinflusste Hänge	smb-Hänge
	Unterhang blockreich	Unterhang feinmaterialreich
	Podsole...Braunerden Oben: Hydromorphe Böden	Braunerden...Podsole Keine hydromorphen Böden
	Rohhumus...Moder Oben: Feuchthumus, Torf	Moder...Rohhumus
Hydrologie	Oben: Sättigungsflächen	Keine Sättigungsflächen
	Flächen mit Tiefensickerung oder Zwischenabfluss	Flächen mit Tiefensickerung oder Zwischenabfluss

Indexberechnung: Die beiden Hänge zeigen infolge ihrer naturräumlichen Ausstattung ein sehr unterschiedliches Muster des Gewichteten Topographischen Index (Abb. 103).

Wie aus der Abbildung erkennbar, zeigt sich beim Hang Stillwasser sowohl bei nassen als auch bei nur mäßig feuchten Bedingungen deutlich das Überlaufen der Sättigungsflächen: Die simulierten Fließmuster reichen z.T. bis an den Vorfluter heran.

Am Hang Häuserwald wird nur für den nassen Zustand Abflussbildung im unteren Teil des Hanges simuliert, die überwiegend auf die hohen Interflow-Indexwerte zurückzuführen ist (vgl. Kap. 7, Abb. 42). Beim mäßig feuchten Zustand wird am Hang Häuserwald kein Abflussmuster generiert.

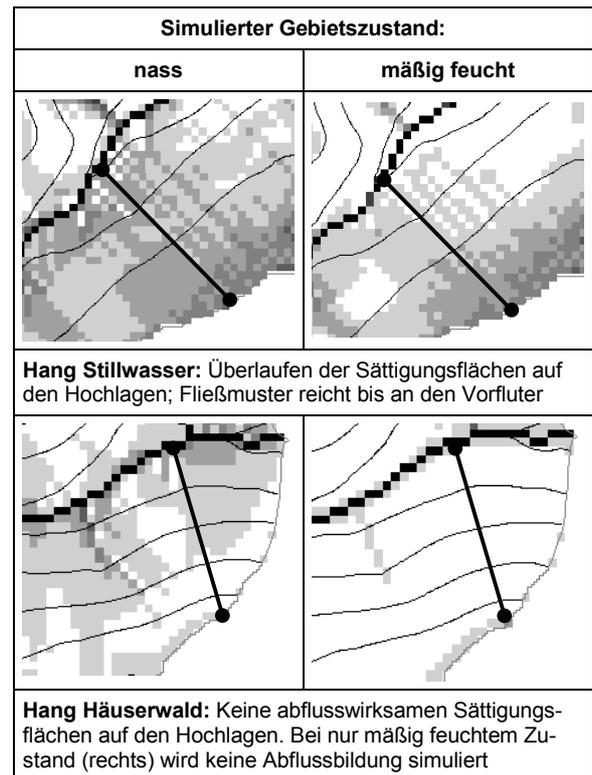


Abb. 103: Gewichteter Topographischer Index, kombiniert mit Interflow-Index für die Hänge Stillwasser und Häuserwald (Kap. 7.3.4). Links: Ansatz ohne Reinfiltration (Kap. 7, Abb. 44). Rechts: Ansatz mit Reinfiltration (Kap. 7, Abb. 45a).

Kartierergebnisse: Im Zuge der Erosionskartierung (Kap. 6.2.3) wurden auf beiden Hängen über einen Zeitraum von ein bis zwei Tagen nach größeren Regenereignissen zahlreiche Wasseraustritte an Weganschnitten festgestellt. Das meist durch DOC gelbbraun gefärbte Wasser deutet bei beiden Hängen auf oberflächennahes Hangzugwasser hin.

Insbesondere am Hang Stillwasser konnte beobachtet werden, wie sich das Wasser gleichsam kaskadenartig am Hang fortbewegt (Abb. 104):

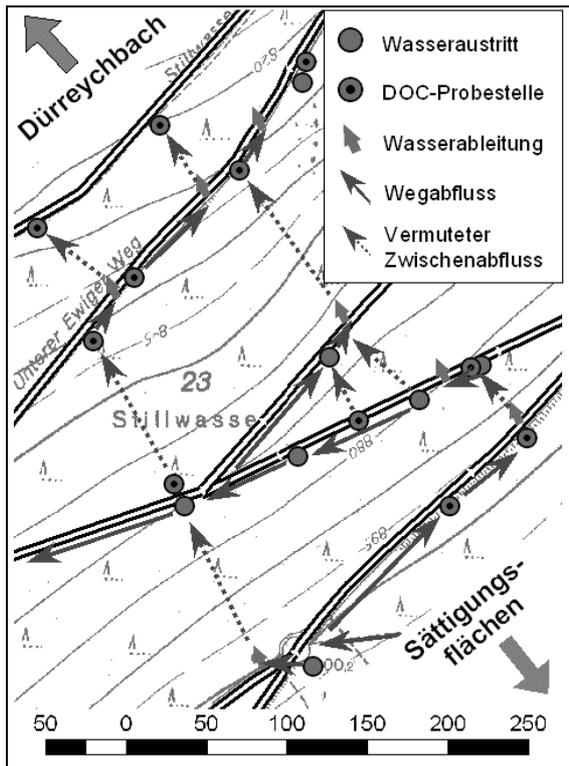


Abb. 104: Detailausschnitt Hang Stillwasser – Beobachtete Wasseraustritte und Abflussnetz

Die Wegentwässerung nimmt das Wasser von den moorigen Hochlagen auf, leitet es oberflächlich ab und bringt es unterhalb von Durchlässen zum Versickern. Z.T. tritt jedoch das Wasser am nächsten unterhalb gelegenen Weganschnitt wieder aus. Möglicherweise gelangt auf diese Weise Sättigungsflächenabfluss der Hochlagen relativ schnell bis zum Vorfluter, so, wie es das Ergebnis der Indexberechnung nahe legt.

Im blockreichen Unterhang des Hanges Stillwasser ist der Weg des Wassers schließlich nicht mehr nachvollziehbar. Dass es am Hangfuß zu stärkerem Zwischenabfluss kommen kann, belegen aber die Rutschungen am übersteilten Einschnitt des oberen Dürreychbachs, die in Kap. 8.4.2.4 näher untersucht werden. Hier kommt es bei sehr feuchten Bedingungen zur Infiltrationshemmung an der

Grenze zwischen lockerem Blockschutt und verfestigten liegenden Schuttdecken.

Abb. 104 zeigt, wie stark die oberflächlichen Abflusswege vom Wegenetz modifiziert werden: Die Wege übernehmen z.T. die Funktion des Gewässernetzes und überlagern auf der Hangskala das Abflussmuster, das vom auf einem 30 m-Raster berechneten Index nur stark generalisierend wiedergegeben werden kann (Abb. 103).

Am Hang Häuserwald führt die starke Ortsteinbildung am Mittelhang zu lokalem Zwischenabfluss, der sich durch eine dichte Galerie von Wasseraustritten, gefolgt von z.T. sehr starker Erosion entlang der steilen Wege anzeigt (Abb. 105).

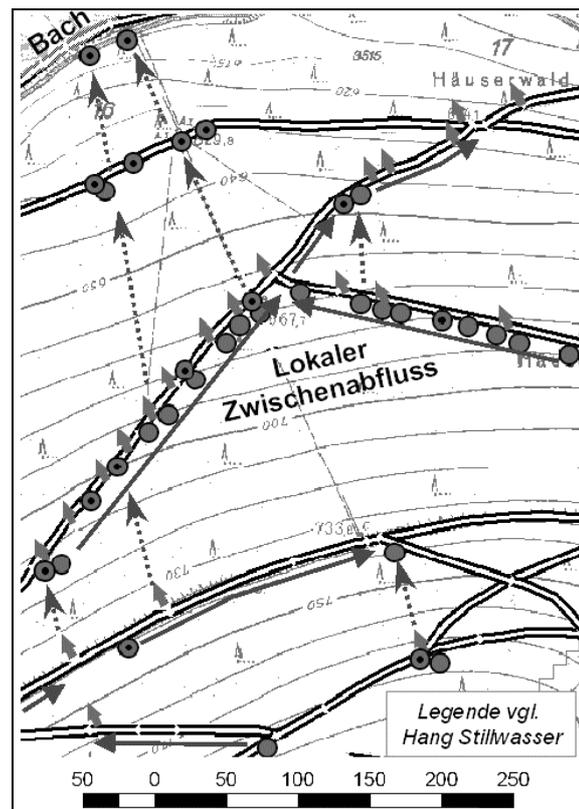


Abb. 105: Detailausschnitt Hang Häuserwald – Beobachtete Wasseraustritte und Abflussnetz (Legende vgl. Abb. 104)

Die zu vermutenden bodeninneren Fließwege sind nicht so offensichtlich wie am Hang Stillwasser; insbesondere sind nur wenige Fließverbindungen zwischen Mittel- und Oberhang ableitbar. Am flacher auslaufenden Unterhang sind nur noch wenige Wasseraustritte festzustellen. Die am nordwestlichen Bildrand gelegenen Wasseraustritte wurden in großer Tiefe (3-4 m u. GOK) am Bachanschnitt diagnostiziert.

Die Beobachtungen sprechen dafür, dass oberflächennahes Hangwasser am Unterhang infiltriert, sich z.T. als langsamer Zwischenabfluss über tieferen Horizontgrenzen periglaziärer Lagen fortsetzt und am Hangfuß langsam austritt. Der Hangfuß Häuserwald wird von einer hangschuttüberdeckten pleistozänen Terrasse aufgebaut, der im Exkurs „Blockterrassen“ (Kap. 8.2.2) untersucht wurde. Deutlich ist im Foto (Abb. 56) die Durchfeuchtung der tieferen Schuttdecken trotz sommerlicher Austrocknung (August 1999) zu erkennen.

Ein schnell abflusswirksamer Zwischenabfluss an der Schichtgrenze Schuttdecke/Festgestein kann am Unterhang Häuserwald durch die refraktionsseismischen Untersuchungen sicher ausgeschlossen werden: Die Tiefenlage des Felshorizonts am Unterhang wurde auf 14 bis 18 m bestimmt. (Anhang 7-3).

DOC-Messungen: VOLKMANN (2002) konnte anhand von DOC-Untersuchungen die unterschiedlichen Qualitäten der Abflusskomponenten an den beiden Vergleichshängen belegen. Die Ergebnisse der Messungen werden in Tab. 40 verbal beschreibend wiedergegeben. Für detaillierte Beschreibungen der Analysemethoden und -ergebnisse sei an dieser Stelle auf die genannte Veröffentlichung verwiesen.

Tab. 40: Ergebnisse der DOC-Konzentrationsbestimmungen und fluoreszenzspektroskopischen Untersuchungen an den Hängen Stillwasser und Häuserwald (Zusammenstellung aus VOLKMANN 2002)

Hang Stillwasser	Hang Häuserwald
<ul style="list-style-type: none"> Keine Korrelation von Geländehöhe und DOC-Konzentration Hohe Ähnlichkeit der Fluoreszenzspektren über den ganzen Hang 	<ul style="list-style-type: none"> DOC Konzentration nimmt mit der Geländehöhe zu Heterogene Fluoreszenzspektren mit Gruppen von ähnlichen Spektren im oberen und im unteren Hangteil

Die ähnlichen Fluoreszenzspektren und die fehlende Höhenkorrelation der DOC-Proben am Hang Stillwasser weisen auf qualitativ ähnliche Abflusskomponenten über den gesamten Hang hin. Dieses Ergebnis lässt sich als weiteres Indiz dafür interpretieren, dass Sättigungsflächenabfluss der Hochflächen auch ohne Gewässervernetzung über Wege und als flacher Zwischenabfluss abfließen und in den Vorfluter gelangen kann.

Die heterogenen Fluoreszenzspektren am Hang Häuserwald bilden Gruppen und weisen so auf lokal unterschiedliche Abflusskomponenten hin, die wenig interagieren. Als hauptsächliches Bildungsgebiet schneller Zwischenabflüsse ist hier der Mittelhang anzusehen.

8.4 Flächen mit Zwischenabfluss (ZWA)

Im Folgenden werden die Struktur- und Prozessmerkmale der Standortseinheiten mit dominierendem Zwischenabfluss (ZWA) zunächst im Überblick und dann an Einzelbeispielen beschrieben. Den Standorten ist gemeinsam:

- mittlere bis geringe Ökologische Feuchte
- Ks-Sprung infolge Verfestigung des Unterbodens durch Podsolierung
- meist steile, z.T. mittel geneigte, oft konvexe Hanglagen

8.4.1 Standortseinheiten und Böden

Flächen mit ausgeprägtem Zwischenabfluss:

Besonders ausgeprägte Merkmale zeigen die Standortseinheiten in Tab. 41.

Tab. 41: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der steileren Hänge mit ausgeprägtem Zwischenabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
BISH	Mäßig frischer Block-Sommerhang	3, 4, 15, 16, 413
pSSH	Mäßig frischer Podsol-Sommerhang	-
SSH-	Mäßig trockener sandiger Sommerhang	9, 10
BISt	Blockströme	-

In der Regel handelt es sich um ausgeprägte Podsole, z.T. um Ortstein-Podsole (P 10, P 15). Prägend ist der hohe Skelettgehalt von im Mittel über 50 %. Beim Block-Sommerhang (BISH) ist z.T. eine Überlagerung aus Blöcken v.a. des Bausandsteins (sm) charakteristisch, die Kantenlängen um 1 m haben können. Im Extremfall bilden sich Blockströme (BISt), in denen sich Zwischenabfluss mit sehr großen Geschwindigkeiten bewegen kann (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997a, UHLENBROOK 1999).

Ausgeprägte Ortsteinentwicklung auf weniger stark geneigten konvexen Lagen treten in den Standortseinheiten in Tab. 42 auf. Bei ungünstiger Relieflage können die Profile stauwasserbeeinflusst sein. Insbesondere die Einheit HpS vermittelt mit ihren stellenweise ausgeprägten Ortsteinbändchen zu den Sättigungsflächen der Hochlagen (P 18: Bändchenstagnogley).

Tab. 42: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der Rücken und Kuppen mit ausgeprägtem Zwischenabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
SRü-	mäßig trockener Rücken	8
HBIRü	Rau blockreiche Bergrücken und Hochlagen	22
HpS	Podsolierter Hochlagensand	18, 303, 308, 410, 420

Als Sonderformen des Hydrotyps ZWA1 sind die Standortseinheiten der Tab. 43 zu betrachten: Es handelt sich um skelettreiche, hangfrische Lagen unterhalb der Hochflächen mit lateralem Wasserzuschuss.

Tab. 43: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der Rücken und Kuppen mit ausgeprägtem Zwischenabfluss und Wasserzufluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
HWH	Hochlagen-Winterhang	101, 102, 409
HBWH	Hochlagen-Block-Winterhang	-

Flächen mit verzögertem Zwischenabfluss:

Flächen mit verzögertem Zwischenabfluss (ZWA2) weisen eine weniger dezidierte Leitfähigkeitsabnahme mit der Tiefe auf und reagieren nur nach länger anhaltenden Niederschlägen mit Zwischenabfluss. Auch hier kann zwischen steileren Lagen (Tab. 44) und flacheren Lagen (Tab. 45) unterschieden werden:

Tab. 44: Forstliche Standortseinheiten (FSE) steilerer Lagen mit verzögertem Zwischenabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
pSWH	Mäßig frischer Podsol-Winterhang	6, 105, 106, 307, 416, 417,
BIWH+	Frischer Block-Winterhang	104

Die Standortseinheit pSWH (Tab. 44) ist mit 12,5 Flächenprozenten die verbreitetste Einheit im Dürreychgebiet. Dominierender Bodentyp ist der Podsol. An Stellen mit konzent-

riertem Wasserzug wurde mehrfach wasserstauende Ortsteinbändchen festgestellt (P 105, P 106).

Die Bodentypen der flacheren Lagen umfassen podsolige Braunerden bis Podsole (Tab. 45).

Tab. 45: Forstliche Standortseinheiten (FSE) flacherer Lagen mit verzögertem Zwischenabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp
HIS	Lehmiger Hochlagensand	21, 422
pS	Mäßig frischer podsolierter Sand	19, 25

Als montanes Pendant zur hochmontanen Einheit HpS kann auch pS von Stauwasser beeinflusst sein und bei entsprechender Reliefage zu den Sättigungsflächen vermitteln (P 19, P 25, Anhang 4-3).

8.4.2 Regionalisierung und Indikatoren für den Zwischenabfluss

8.4.2.1 Hydrotopkarte

Als Indikatoren für den Zwischenabfluss wurden Hangwasseraustritte und flachgründige Hangrutschungen entlang des fast 70 km langen Forstwegenetzes kartiert. Diese Erscheinungen sollten der Erwartung nach gehäuft in den aus der FSK abgeleiteten Flächen vom Typ ZWA auftreten. Um diesen vermuteten Zusammenhang zu überprüfen, wurden die Informationsebenen „Rutschung“ und Hangwasseraustritt“ mit der Hydrotopkarte überlagert (Abb. 106).

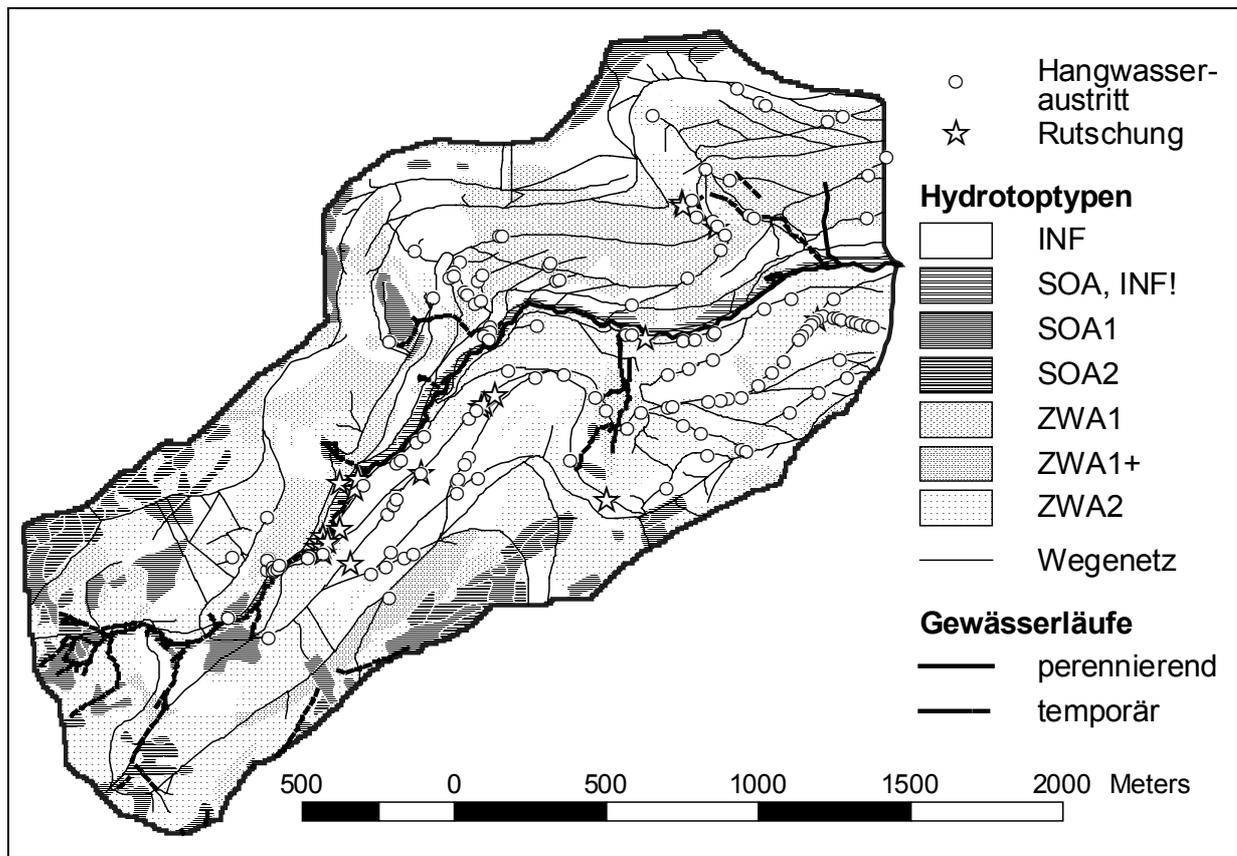


Abb. 106: Hydrotopotypen gemäß FSK-Ableitung, Hangwasseraustritte und Rutschungen.

Das Kreisdiagramm Abb. 107 illustriert die Verteilung der Hangwasseraustritte auf die Hydrotopptypen. Nur 57 % der Wasseraustritte liegen in Flächen der Klasse ZWA. Mit 38 % fällt ein beträchtlicher Anteil in Flächen, auf denen dominierende Infiltration vermutet wird. Um das Ergebnis richtig einschätzen zu können, wurde überprüft, ob die Wegeführung möglicherweise einen Flächentyp ungleich repräsentiert. Abb. 108 zeigt jedoch dass die Hydrotopklasse ZWA und andere Hydrotopklassen fast gleich vertreten sind.

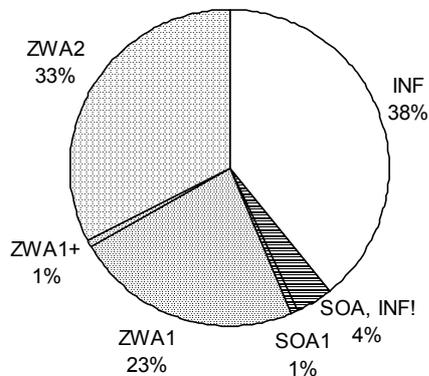


Abb. 107: Verteilung der Hangwasseraustritte auf Hydrotopptypen

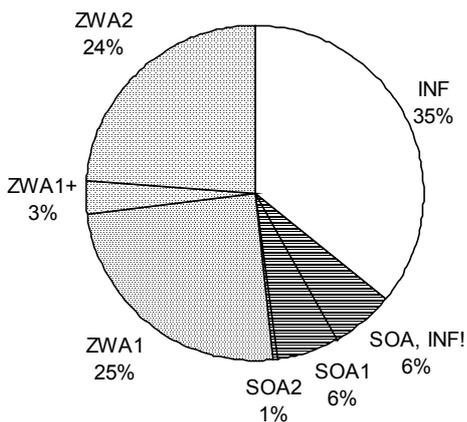


Abb. 108: Verteilung der Wegstrecken auf die Hydrotopptypen

Aus den Daten ist abzulesen, dass Hangwasseraustritte nur schwach gehäuft in der Flächenklasse ZWA auftreten. Für die Hangrutschungen sehen die Ergebnisse noch ungüns-

tiger aus: Nur ein Drittel der Hangrutschungen liegen in der Klasse ZWA. Das Ergebnis ist aber aufgrund der geringen Zahl der Rutschungen und dem gedrängten Auftreten wenig aussagekräftig.

8.4.2.2 Interflow-Index

Da für das Auftreten von Zwischenabfluss die Neigung eine entscheidende Rolle spielt und diese in den Forstlichen Standortseinheiten nur mittelbar enthalten ist, wird vom Interflow-Index ein besserer Zusammenhang mit Hangwasseraustritten und Rutschungen erwartet. Zudem wurden zur Lokalisierung zwischenabflussaktiver Hänge Erosionserscheinungen entlang von Forstwegen kartiert. Die genannten Informationen werden mit der Karte des Interflow-Index überlagert in der Erwartung, dass die Indikatoren mit erhöhten Interflow-Indexwerten koinzidieren. Dieser postulierte Zusammenhang wird im folgenden GIS-gestützt überprüft. Im Gesamtgebiet DÜ werden dazu 119 Wasseraustrittsstellen, 20 kleinere Hangrutschungen und die Erosionskartierung auf ca. 70 km Forstwegen und Rückegassen herangezogen. Punkte mit Hangwasseraustritten und Rutschungen sowie Strecken mit Wegerosion wurden in ein 30 m-Raster konvertiert und Mittelwerte sowie einfache statistische Lage- und Streuungsparameter berechnet. Zudem werden die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsberechnung vorgestellt. Abb. 109 vermittelt eine Vorstellung von der Verteilung der I_{pot} -Werte im Gesamteinzugsgebiet DÜ (Arc/Info-Befehl HISTOGRAM).

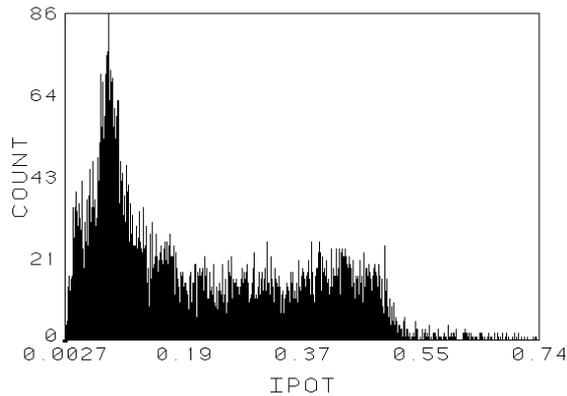


Abb. 109: Histogramm der Interflow-Indexwerte (I_{pot}) im Gesamteinzugsgebiet DÜ (30 m-Raster)

Der Mittelwert liegt bei $I_{pot}(DÜ) = 0,217$. Die starke Linksschiefe der Verteilung mit Schwerpunkt bei Werten $< 0,1$ ist auf die flachen Hochlagen zurückzuführen. Eine zweite Häufung der Werte deutet sich im Bereich der Werte zwischen $I_{pot} = 0,4$ bis $0,5$ an. Diese bimodale Werteverteilung muss bei der Interpretation der statistischen Lage- und Streuungsparameter berücksichtigt werden.

Hangwasseraustritte: Abb. 110 überlagert den Interflow-Index mit den beobachteten Hangwasseraustritten und Rutschungen. Den Mittelwertvergleich für die Hangwasseraustritte zeigt Tab. 46.

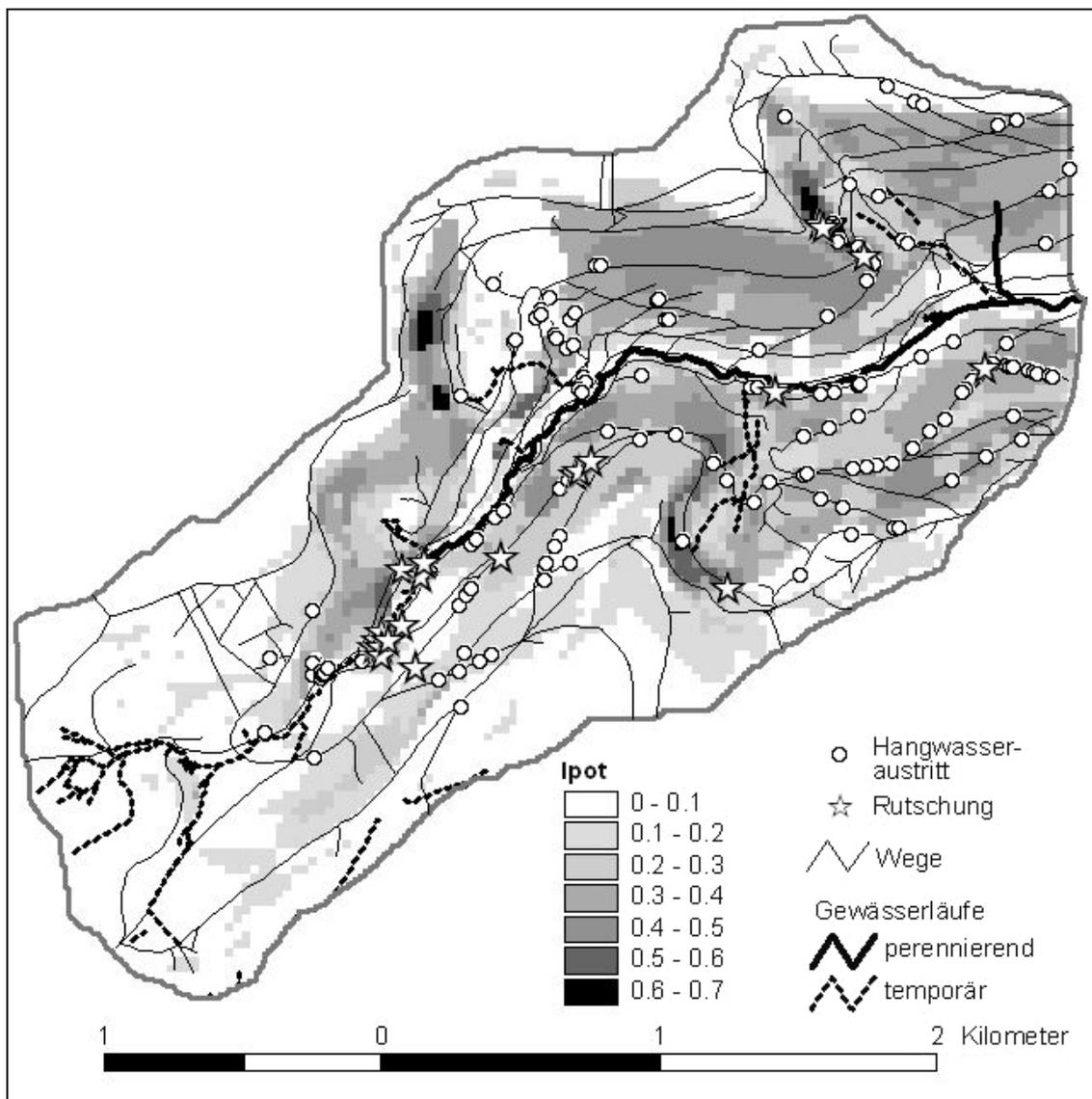


Abb. 110: Interflow-Index (I_{pot} , 30 m-Raster), überlagert mit Hangwasseraustritten und Rutschungen.

Tab. 46: Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter von Interflow-Index I_{pot} und Wasseraustritten $I_{pot}(w)$

	$I_{pot}(DÜ)$	$I_{pot}(w)$
Mittelwert	0,217	0,317
$I_{pot}(w) - I_{pot}(DÜ)$	0,000	0,100
Minimum	0,003	0,048
Maximum	0,737	0,685
Std.abweichung	0,160	0,148
Variationskoeff.	0,737	0,467
n (Σ Rasterzellen)	7759	119

Aus Tab. 46 ist ablesbar, dass der mittlere Interflow-Indexwert an Hangwasseraustrittspunkten $I_{pot}(w)$ deutlich oberhalb des Mittelwerts im gesamten Dürreychgebiet liegt: 91 von 119 Rasterzellen – mithin 76 % – überschreiten den mittleren Gebietswert von $I_{pot}(DÜ) = 0,217$ und sprechen damit für die Tauglichkeit des Indexes. Abb. 111 dokumentiert das Histogramm der Werte.

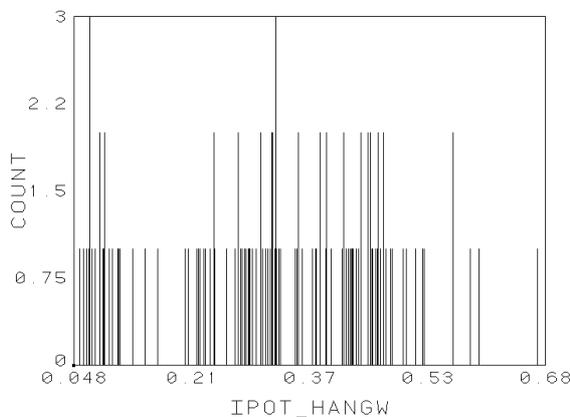


Abb. 111: Histogramm der Interflow-Indexwerte $I_{pot}(w)$ an Stellen mit Hangwasseraustritten

Hangrutschungen: In gleicher Weise wie bei den Hangwasseraustritten wurden die Indexwerte $I_{pot}(r)$ an Stellen mit Hangrutschungen analysiert (Tab. 47).

Tab. 47: Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter von Interflow-Index I_{pot} und Hangrutschungen $I_{pot}(r)$

	$I_{pot}(DÜ)$	$I_{pot}(r)$
Mittelwert	0,217	0,319
$I_{pot}(r) - I_{pot}(DÜ)$	0,000	0,102
Minimum	0,003	0,040
Maximum	0,737	0,699
Std.abweichung	0,160	0,201
Variationskoeff.	0,737	0,630
n (Σ Rasterzellen)	7759	20

Hinsichtlich des Mittelwertes ergibt sich etwa das gleiche Bild wie für die Hangwasseraustritte: Der $I_{pot}(r)$ liegt in 14 von 20 Fällen oberhalb des Mittelwerts im Gesamteinzugsgebiet (vgl. Abb. 112). Dabei fallen Standardabweichung und Variationskoeffizient etwas ungünstiger aus. Die statistische Aussage bezüglich der Hangrutschungen ist aufgrund der geringen Stichprobenzahl jedoch weniger gesichert, als für die Hangwasseraustritte.

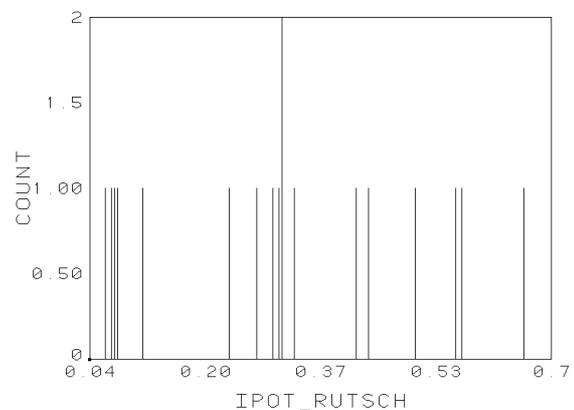


Abb. 112: Histogramm der Interflow-Indexwerte $I_{pot}(r)$ an Stellen mit Rutschungen

Wegerosion: Die Wegerosion wurde in fünf Klassen ($e = 0$, keine Erosion bis $e = 4$, sehr starke Erosion) kartiert (Kap. 6.2.3). Um einen sinnvollen Mittelwertvergleich zu ermöglichen, wurden die Klassen indiziert (Erosion $e = 0$, > 0 , > 1 , > 2 und > 3).

Vor der Analyse wurde eine 30 m-Pufferzone um das Gewässernetz ausmaskiert: Auf diese

Weise werden Erosionsstrecken aus der Betrachtung ausgeschlossen, die mit Sicherheit nicht auf Zwischenabfluss, sondern auf Aus-

uferungen zurückzuführen sind (Arc/Info-Befehle BUFFER und ERASE). Tab. 48 stellt die Ergebnisse gegenüber.

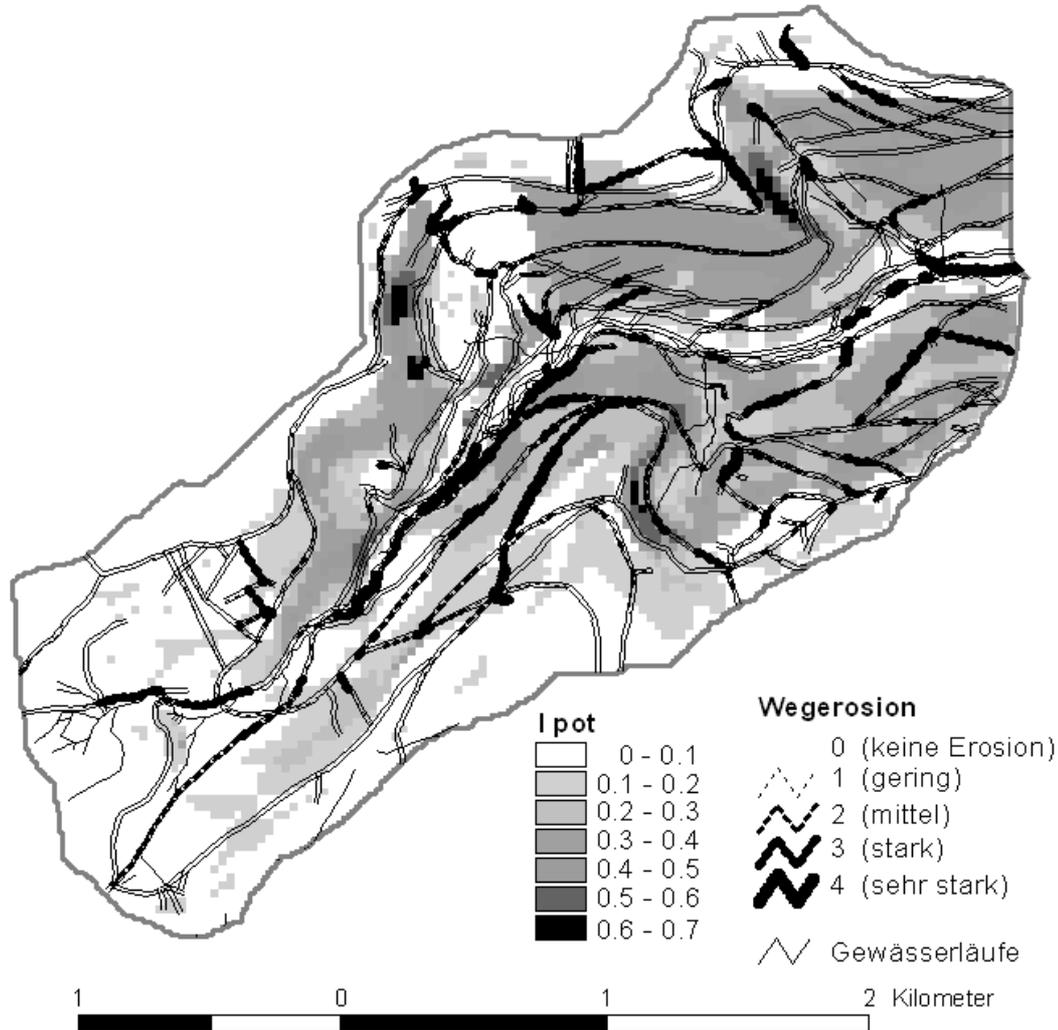


Abb. 113: Interflow-Index (I_{pot} , 30 m-Raster), überlagert mit Wegerosion

Tab. 48: Vergleich statistischer Lage- und Streuungsparameter von Interflow-Index I_{pot} und Wegerosion $I_{pot}(e)$ für die Erosionsklassen $e > 0$, $e > 1$, $e > 2$ und $e > 3$ für das Gesamt Einzugsgebiet, Gewässerpuffer 30m ausmaskiert

	$I_{pot}(DÜ)$	$I_{pot}(e=0)$	$I_{pot}(e>0)$	$I_{pot}(e>1)$	$I_{pot}(e>2)$	$I_{pot}(e>3)$
Mittelwert	0,217	0,215	0,254	0,252	0,259	0,258
$I_{pot}(e) - I_{pot}(DÜ)$	0	-0,002	0,039	0,037	0,044	0,043
Minimum	0,003	0,003	0,015	0,016	0,022	0,022
Maximum	0,737	0,688	0,685	0,685	0,668	0,473
Std.abweichung	0,160	0,157	0,154	0,150	0,139	0,125
Variationskoeff.	0,737	0,730	0,606	0,595	0,537	0,484
n (Σ Rasterzellen)	7759	1048	1202	613	278	68

Die Mittelwerte für alle Erosionsklassen liegen recht nahe beieinander. Bezogen auf die Standardabweichung überschreiten sie den Mittelwert des Gesamtgebietes in deutlich geringem Maße als es bei den Hangwasseraustritten und Rutschungen der Fall ist (s.o.). Die Minima steigen mit wachsender Erosionsstärke geringfügig an. Dabei verringert sich der maximale $I_{pot}(e)$ -Wert bei der höchsten Erosionsklasse $e > 3$ wieder verringert. Wegstrecken ohne Erosion liegen mit $I_{pot}(e) = -0,002$ nur knapp unter dem Mittelwert. Der fehlende Zusammenhang spiegelt sich auch in einem niedrigen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,1$ wieder.

Diskussion: Insgesamt besteht kein statistischer Zusammenhang zwischen dem berechneten Interflow-Index und der Wegerosion. Die Wegerosion als nur mittelbarer Indikator hat sich damit zur Identifizierung zwischenabflussaktiver Hänge nicht bewährt. Einflüsse wie Wegneigung, Weglänge, Wegsubstrat, Bewuchs, Wasserableitungseinrichtungen etc. können den Erosionsgrad in vielen Fällen offensichtlich besser erklären als Hangneigung und Schichtungsquotient. Die Tatsache, dass nicht unerhebliche Zwischenabflussanteile im Dürreychgebiet über das dichte Forstwegenetz in Oberflächenabfluss umgesetzt werden, bleibt von diesem Ergebnis unberührt. Untersuchungen von WINKLER (1992) und ZEDLACHER (1993) bestätigen aus anderen stark reliefierten Einzugsgebieten die besondere Bedeutung der Forstwege für den Gebietsabfluss.

Im Gegensatz dazu ist der Zusammenhang von Hangwasseraustritten und Rutschungen mit dem Interflow-Index deutlich und spricht für dessen Tauglichkeit. Als Indikatoren des Zwischenabflusses sind sie geeigneter, da sie als unmittelbare Manifestationen des Zwischenab-

flusses in viel geringerem Maße unerwünschten Einflüssen unterworfen sind, als die Wegerosion. Allerdings liefern sie nur Punktinformationen.

Um die statistischen Zusammenhänge auch realiter zu prüfen, werden nachfolgend die Kartierergebnisse unter Berücksichtigung zusätzlicher Geländeinformationen an ausgewählten Kartenausschnitten mit dem berechneten Interflow-Index verglichen. Die Ergebnisse der Wegerosionskartierung werden dabei nicht weiter berücksichtigt.

8.4.2.3 Teileinzugsgebiet FH

Abb. 114 zeigt das Teileinzugsgebiet Forsthaus (FH) als vergrößerten nordöstlichen Kartenausschnitt aus Abb. 110. Zusätzlich dargestellt sind Quellen und flächenhafte Erosionserscheinungen.

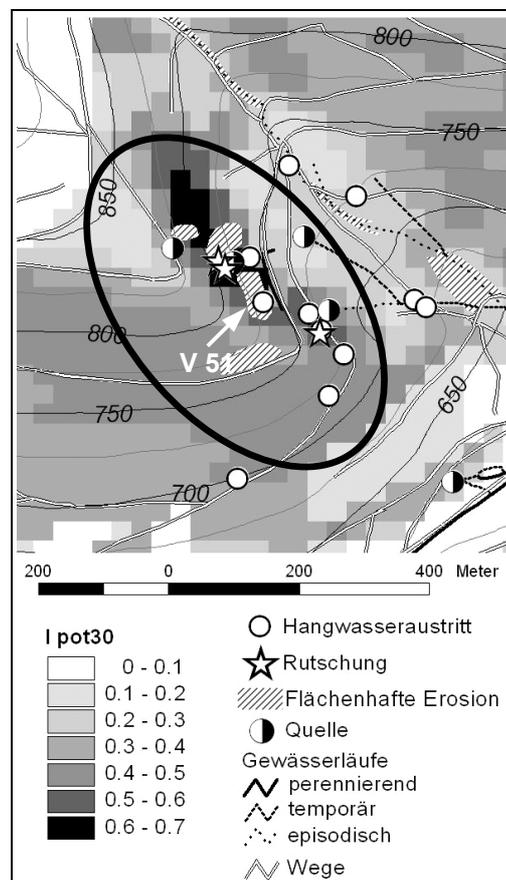


Abb. 114: Interflow-Index, Wasseraustritte, Rutschungen im Einzugsgebiet FH

Es fallen die stark erhöhten Interflow-Indexwerte (I_{pot}) an der steilen, gegen Nordost exponierten Flanke der Karnische auf. In der Tat häufen sich hier Wasseraustritte und kleine rezente Hangrutschungen. Zudem liegen hier kleinere Quellaustritte. Der Hangbereich zählt zur Standortseinheit pSWH, die dem Hydrotoptyp ZWA2 zugeordnet wurde (Kap. 7.2). Der am Hang zweifellos auftretende Zwischenabfluss wird durch temporär schüttende Schichtquellen ergänzt. Auch die Vegetation – *Luzula sylvatica*-Bestände mit Feuchtezeigern wie *Deschampsia cespitosa* (Rasen-Schmiele) – spiegelt die erhöhte Durchfeuchtung des Hanges wieder (vgl. V 51, Anhang 6-3). Nach hohen Niederschlägen kann die starke Durchfeuchtung des lockeren Oberbodens in Verbindung mit der großen Hangneigung zu Rutschungen führen, wie etwa nach den schweren Niederschlägen vom 28./29.10.98 beobachtet wurde. Auch Oberflächenabfluss konnte durch flächenhafte Spülungserscheinungen – Feinmaterialverlagerung und flachgedrückte Vegetation – nachgewiesen werden (schraffierte Flächen). Offensichtlich können sich hier die Hangflächen durch die hohe Vorfeuchte bis zur Oberfläche aufsättigen und Return Flow bilden.

8.4.2.4 Hangrutschungen im oberen Dürreychtal

Entlang des steilen Taleinschnitts des Dürreychbachs oberhalb der Stillwasserquelle (SQ) treten kleine Hangrutschungen in Form translationsartiger flacher Erdgänge mit Rutschvolumina von einigen m³ gehäuft auf. Hier fällt auf, dass die Rutschungen zwar oft in oder direkt unterhalb von Flächen mit erhöhten I_{pot} -Werten liegen, sich aber v.a. in Gewässernähe konzentrieren (Abb. 115).

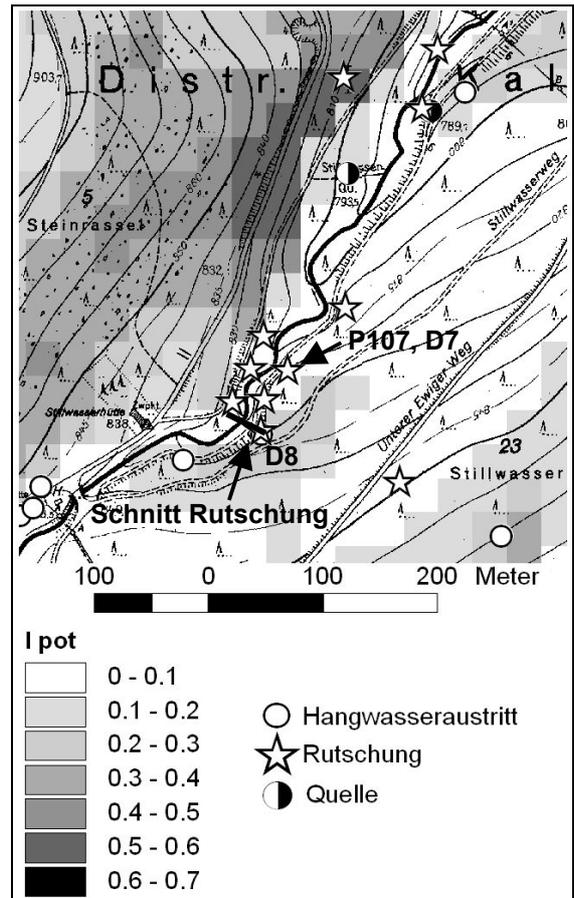


Abb. 115: Interflow-Index, Hangwasseraustritte und Rutschungen im Bereich der Stillwasserquelle (SQ)

Zur Rutschung kommt es an diesen Stellen nicht allein durch erhöhte Hangneigung und Schichtung. Erst eine lokale Übersteilung des Hanges, die maßstabsbedingt vom DHM und dem darauf aufbauenden Interflow-Index nicht mehr abgebildet werden kann, bildet die hinreichende Voraussetzung. Derartige kleinskalige Hangkanten entstehen oft bei Wegebaumaßnahmen.

Eine weitere Ursache bedingt an diesen Standorten ein erhöhtes Rutschungsrisiko: der typische zweischichtige Schuttdeckenaufbau im Dürreychtal. Unter einem z.T. blockreichen, lose gelagerten Substrat schließt sich ein plattig verfestigtes Lockermaterial mit geringeren Skelettgrößen an. Der Podsol-Illuvialhorizont zeichnet nicht selten diese Schuttdeckengrenze nach und verschärft den Kontrast in der

Durchlässigkeit zwischen Ober- und Unterboden. Abb. 116 zeigt die beschriebene Situation am Beispiel des Kartenausschnitts Abb. 115 im Schnitt. Die im oberen Teil blockreiche Schuttdeckenfolge wird durch den Oberlauf des Dürreychbachs angeschnitten und durch den bachbegleitenden Weg zusätzlich versteilt. Ortsteinbildung mit Kittgefüge ist am untersuchten Punkt nicht zu beobachten, wohl aber eine ausgeprägte plattige Textur der tieferen Schuttdecken. Nach den extremen Regenfällen Ende Oktober 1998 kommt es zur Aufsätti-

gung des oberen Schuttdeckenmaterials. Offenbar ist hierfür der Schichtungsgradient auch ohne Ortsteinbildung ausreichend groß. Durch die Aufsättigung wird die Kohäsion des Korngerüsts verringert. Temporärer Hangwasserzug, begünstigt durch die plattige Textur des tieferen Schuttdeckenmaterials, führt zu erhöhten Porenwasserdrücken und Strömungsdrücken. An den versteilten Wegstellen fehlt zudem die den Hang stabilisierende Blockschuttüberlagerung: Es kommt zur Rutschung.

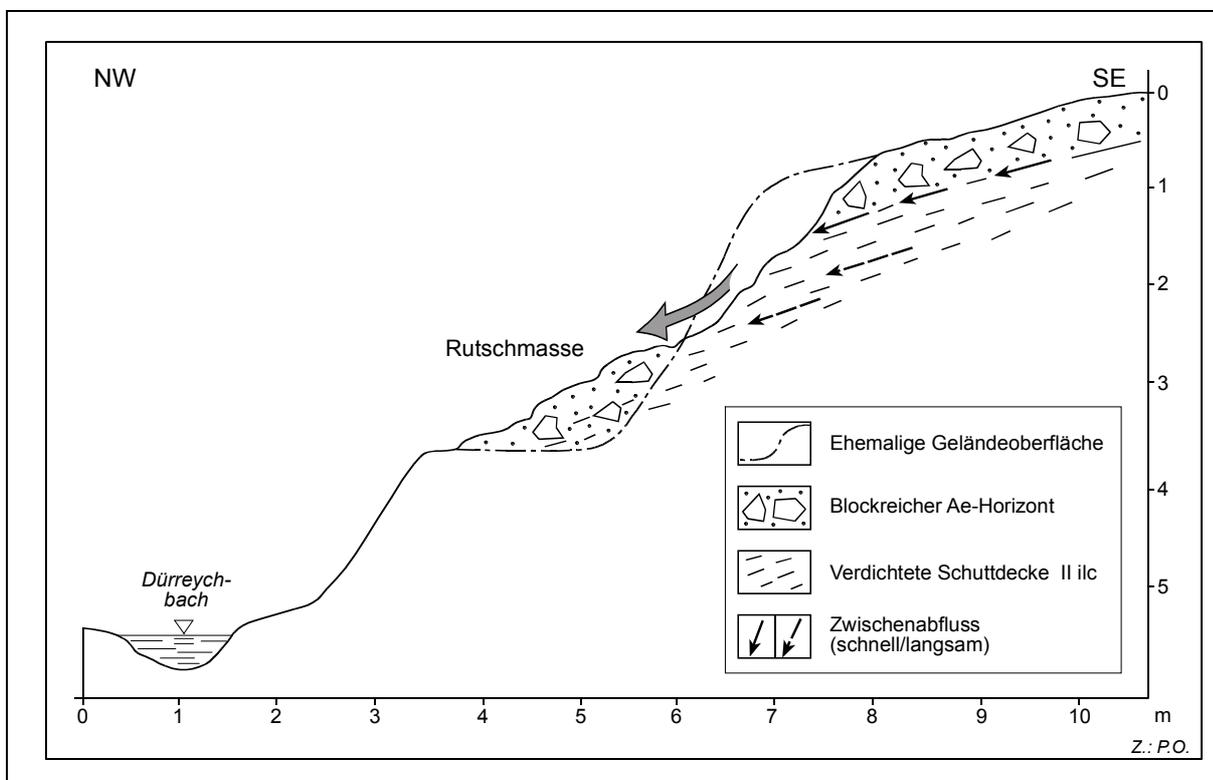
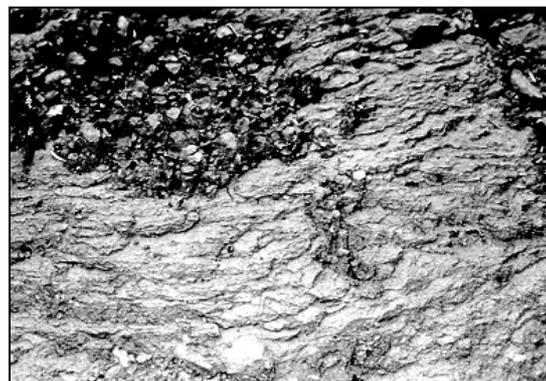


Abb. 116: Schnitt durch die Hangrutschung bei Probenahmepunkt D 8

Abb. 117 zeigt die plattige, im Hangfallen und -streichen orientierte Textur des tieferen Schuttdeckenmaterials, die durch die Witterung deutlich herauspräpariert, an der frischen Profilwand dagegen oft nicht erkennbar ist.

Abb. 117: (rechts) Dicht gelagerte Schuttdecke mit plattiger Textur an der Rutschfläche in ca. 3 m Tiefe (P 107, Bildbreite ca. 40 cm)



An zwei benachbarten Standorten wurden in 1,3 m und 3 m Tiefe Proben entnommen und im Dünnschliff untersucht (Abb.118, D7 und D8). Es handelt sich um Proben mit relativ viel Feinsubstanz: Die Bodenart der Probe D7 ist ein lehmiger Sand (SI3), die der Probe D8 ein schluffiger Sand (Su3). Beide Proben dokumentieren mit ihren z.T. horizontal eingeregeltten Poren die plattige Textur auch mikroskopisch. Ansonsten sind die intergranulären Räume z.T. matrixartig verfüllt.

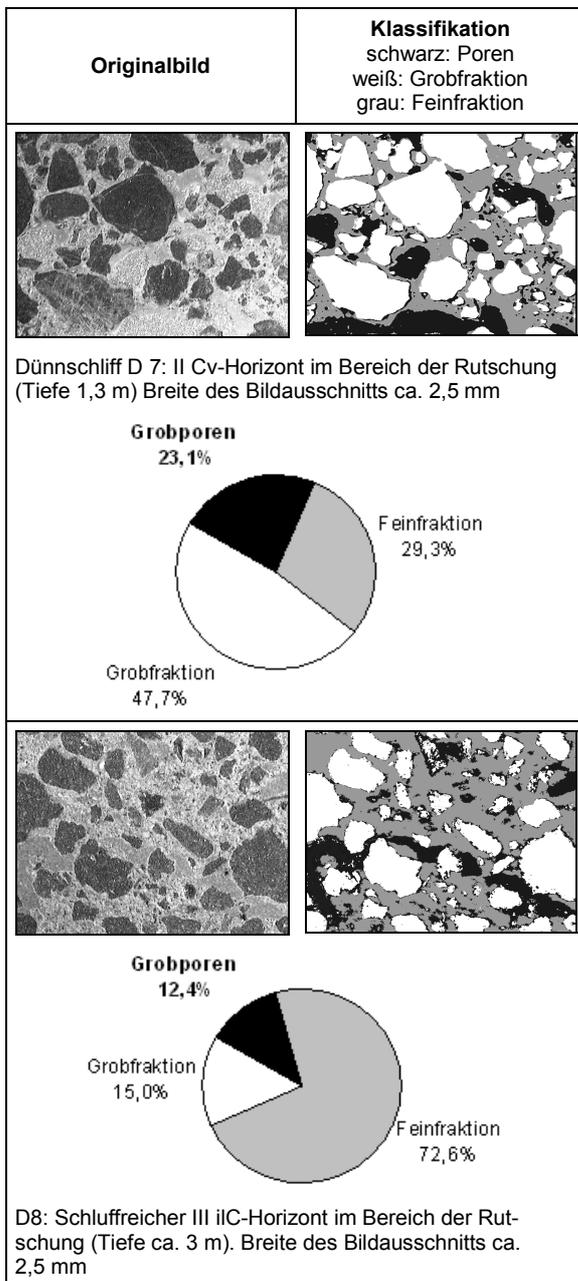


Abb. 118: Dünnschliffe D7 und D8 aus dicht gelagerter, plattiger Schuttdecke

Zwischenabfluss in tieferen Horizonten: Es ist damit naheliegend, ein anisotropes Durchlässigkeitsverhalten anzunehmen, das die vertikale Sickerung hemmt und die laterale hangparallele Fließrichtung in Grobporen bevorzugt. Schluffreichere Lagen mit verringertem Grobporenanteil, wie sie mit der Probe D 8 vorliegen, verstärken diese Anisotropie und manifestieren sich im Gelände durch langsame Wasseraustritte bzw. Vernässungsstellen an der Rutschungsfläche.

Auch an anderer Stelle im Dürreychgebiet – so etwa am tiefen Hanganschnitt einer Blockterrasse beim Forsthaus Dürreych (vgl. Kap. 8.2.2) – wurden ähnliche Verhältnisse hinsichtlich der Textur und Sickerereigenschaften der tieferen Schuttdecken angetroffen. Der Scan der Dünnschliffprobe D 4 (Abb. 119) dokumentiert ein schluff- und sesquioxidreiches Band in einer sandigen Probe aus etwa 4 m Tiefe, und lässt die resultierende lokale Durchfeuchtung unmittelbar anschaulich werden.

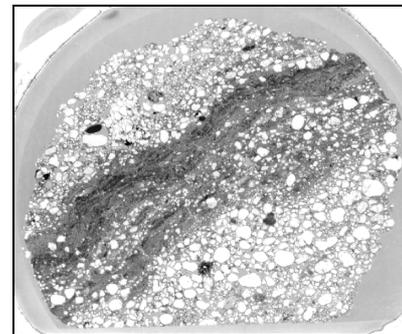


Abb. 119: Scan der Dünnschliffprobe D 4 Bildbreite 2,8 cm

Somit sind auch in den tieferen Schuttdecken die Bedingungen für Zwischenabfluss gegeben. Der beobachtete Abflussprozess ist jedoch vergleichsweise langsam und lang anhaltend. Ein Beitrag zur Hochwasserbildung scheint damit unwahrscheinlich.

8.4.3 Intensivmessstandort Zwischenabfluss (P 1)

Um die Bildungsbedingungen von Zwischenabfluss auf der Profilskaie studieren zu können, wurde ein Intensiv-Messprofil (P 1, Karte im Anhang 1-1) an einem steilen Hang ergraben und mit TDR-Sonden und Tensiometern bestückt (Kap. 6.2.6).

8.4.3.1 Standortbeschreibung

Das Messprofil P 1 befindet sich im mittleren Talabschnitt des Dürreychbachs unterhalb des Seemißkars (Übersichtskarte Anhang 1-1). Abb. 120 zeigt einen detaillierten Lageplan: Das Profil liegt an einem Weganschnitt in der äußersten Flanke einer quelligen Hangmulde in einem 80- bis 100-jährigen Fichtenbestand mit Tanne. An die Mulde schließt sich nach oben eine trockene Blockrinne an. Die Beobachtung der Quellschüttung lässt auf Mischung aus oberflächennahem Wasser und Schichtquellwasser schließen. Letzteres sorgt für eine dauerhafte Durchfeuchtung der Quellmulde. Das Wasser tritt vermutlich an der Grenze sm/smc1 auf Höhe des Seemißkar-Bodens aus, durchsickert den Hang bzw. die oberhalb anschließende Blockrinne, und tritt in der Mulde zutage. Eine Stauwirkung durch das Festgestein kann durch die Ergebnisse der refraktionsseismischen Messungen ausgeschlossen werden: Die Tiefe des Felshorizonts wird auf mindestens 10 m geschätzt (vgl. Anhang 7-5).

8.4.3.2 Vegetation und Feuchte

Wie die Vegetationskartierung (Abb. 120: Lageplan) und die Vegetationsaufnahmen in der Quellmulde und am Messprofil 1 bestätigen (Tab. 49 und Tab. 50), ist der Profilstandort selbst nicht oberflächlich durchfeuchtet: Im Bereich der Quellmulde liegt die mittlere ungewichtete Feuchtezahl (ELLENBERG et al. 1992) bei 6,2 (feucht bis frisch). Die Aufnahme ist von ihrem Artenspektrum den *Luzula sylvatica*-Beständen mit Feuchtezeigern zuzuordnen (vgl. Vegetationstabelle Anhang 6-3). Der Mittelwert für den Profilstandort dagegen liegt nur bei 5,2 (frisch).

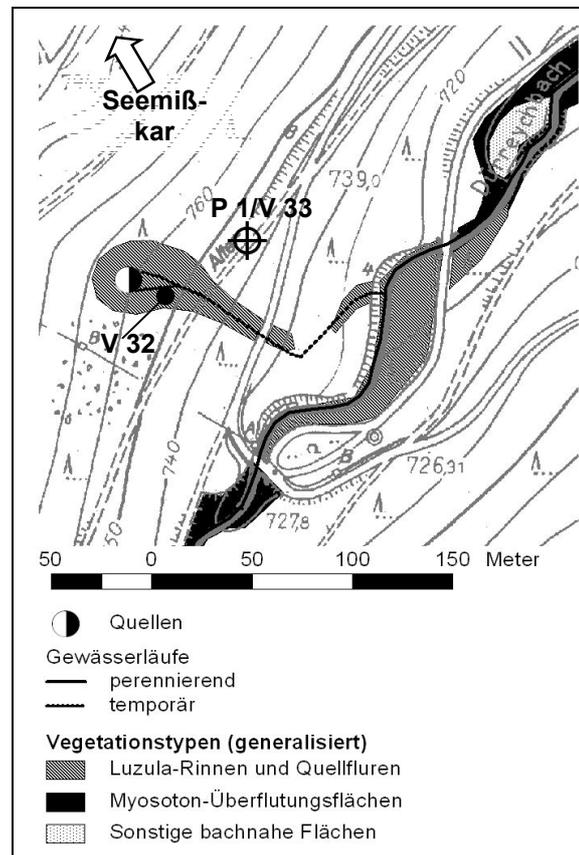


Abb. 120: Lageplan und Vegetationstypen im Bereich von Intensivmessprofil P 1 und Vegetationsaufnahmen V 32 / V 33 (vgl. Anhang 6-3)

Tab. 49: Vegetationsaufnahme V 32 in der Quellmulde mit Feuchtezahlen (Aufnahmefläche: 25 m², Gesamtdeckung der Krautschicht: 90%, Blöcke)

	Artname	Feuchte
3	<i>Athyrium filix-femina</i>	7
2b	<i>Luzula sylvatica</i>	5
2a	<i>Thelypteris limbosperma</i>	6~
2a	<i>Rubus fruticosus agg.</i>	X
2m	<i>Oxalis acetosella</i>	5
2m	<i>Holcus mollis</i>	5
2m	<i>Blechnum spicant</i>	6
1	<i>Viola palustris</i>	9
1	<i>Deschampsia cespitosa</i>	7~
1	<i>Senecio fuchsii</i>	5
1	<i>Ranunculus aconitifolius</i>	8
+	<i>Vaccinium myrtillus</i>	X
+	<i>Poa trivialis</i>	7
+	<i>Dryopteris dilatata</i>	6
+	<i>Adenostyles alliariae</i>	6
r	<i>Ajuga reptans</i>	6
r	<i>Prenanthes purpurea</i>	5
-	<i>Sphagnum spec.</i>	-
Ungewichteter Mittelwert:		6,2

Tab. 50: Vegetationsaufnahme V 33 am Messprofil P 1 mit Feuchtezahlen (Aufnahmefläche: 30 m², Gesamtdeckung der Krautschicht: 35%, Blöcke)

	Artname	Feuchte
3	<i>Vaccinium myrtillus</i>	X
2m	<i>Picea abies</i>	X
2m	<i>Abies alba</i>	X
2m	<i>Avenella flexuosa</i>	X
1	<i>Acer pseudo-platanus</i>	X
+	<i>Oxalis acetosella</i>	5
+	<i>Carex pilulifera</i>	5~
+	<i>Dryopteris dilatata</i>	6
+	<i>Luzula sylvatica</i>	5
+	<i>Prenanthes purpurea</i>	5
+	<i>Epilobium montanum</i>	5
Ungewichteter Mittelwert:		5,2

Ohne Zweifel stellt das Messprofil P 1 innerhalb der Standortseinheit SWH einen hangwasserbeeinflussten Sonderstandort mit domi-

nierendem langsamen Zwischenabfluss (ZWA) dar. Dieser über längere Phasen des Jahres anhaltende Zwischenabfluss wird am Weganschnitt durch Feuchte zeigende *Sphagnum*-Polster (Torfmoose) augenfällig (Abb. 121). Neben *Sphagnum spec.* treten hier noch weitere, auf erhöhte Feuchte weisende Arten wie insbesondere *Salix cinerea* (Grau-Weide) auf, die auf der restlichen Aufnahmefläche V 33 nicht zu finden sind.

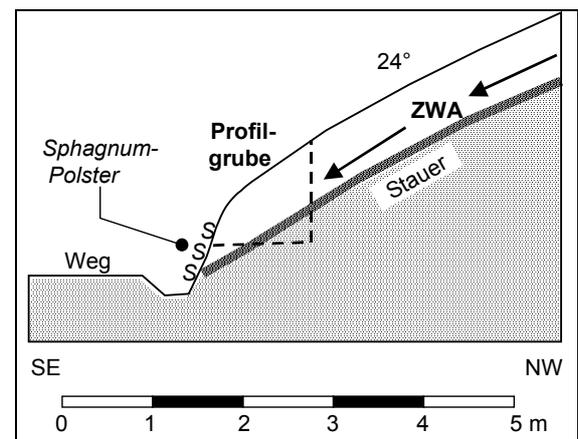


Abb. 121: Schematischer Geländeschnitt durch den Messstandort P 1

Der langsame Zwischenabfluss oberhalb des Ortsteins konnte bei Anlage des Profils direkt beobachtet werden und war auch nach Sondeneinbau und Verfüllung über ein am Profilgrund verlegtes Dränagerohr nach Feuchtperioden auch weiterhin feststellbar.

Auch die organische Auflage spielt offenbar eine Rolle für den schnellen lateralen Wassertransport: Am Weganschnitt neben dem Messprofil wurde nach Feuchtperioden regelmäßig ein Austropfen aus der ca. 15 cm mächtigen Humusauflage entlang von Wurzeln oder an Makroporen beobachtet. Durch Auffangen und Auslitern des austropfenden Wassers wurden nach extremen Regenfällen am 2.11.98 an einem 70 cm breiten Anschnitt ein Abfluss von 2,6 l min⁻¹ bezogen auf 1 m Hangbreite ermittelt. Aus den Geländebeobachtungen wurde

die Modellvorstellung von zwei unterschiedlich schnellen Zwischenabflusshorizonten an steilen Ortstein-Hängen entwickelt (vgl. Abb. 122). Beide Zwischenabflusssysteme können interagieren und als Return Flow zutage treten.

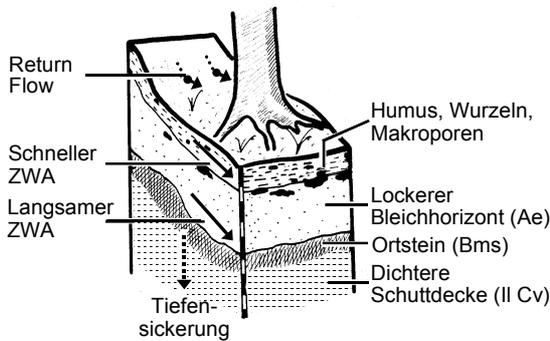


Abb. 122: Modellvorstellung zur Bildung von Zwischenabfluss (ZWA) an steilen Ortstein-Hängen im Dürreychgebiet

8.4.3.3 Profilbeschreibung

Ermöglicht wird der laterale Abfluss durch die Stauwirkung eines bändchenartigen Ortsteinhorizonts, wie sie auch für die Sättigungsflächen (Kap. 8.3) typisch sind. Hinsichtlich des Bodentyps ist das Profil daher den Bändchenstagnogleyen der Hochlagen vergleichbar und unterscheidet sich von diesen hauptsächlich durch die starke Hangneigung von 24°. Dementsprechend ist das Profil (Abb. 123, Abb. 124) im oberen Teil kaum stauwasserbeeinflusst: Unter einer organischen Auflage aus rohhumusartigem Moder beginnt der Mineralboden mit dem korngebleichten Aeh-Horizont aus schwach lehmigem bis schwach tonigem Sand. Er ist mit einem nur noch schwach humosen Übergangshorizont (Ahe) unscharf nach unten abgegrenzt. Die organische Auflage und die beiden genannten Mineralbodenhorizonte bilden beinahe ausschließlich den Wurzelraum.

Der stauwasserbeeinflusste Teil des Profils ist zwischen 73 und 85 cm Tiefe scharf mit einem

2-3 cm starken, welligen Sesquioxidbändchen (Sd-Bbms) nach unten abgegrenzt. Darüber hat sich ein Stauwasser führender, nassgebleichter Horizont (sSerw) und ein Übergangshorizont (sSew-Ae) aus schwach lehmigem bis schwach tonigem Sand entwickelt, der mit stark lehmigen, sesquoxidreicheren Linsen verzahnt ist. Unter dem Bändchen liegt ein fuchsbrauner, dichtgelagerter II Bms-Horizont aus schwach tonigem Sand ohne hydromorphe Merkmale, der allmählich in den II Cv-Horizont übergeht. Der Bodentyp ist ein hangwassergeprägter Bändchenstagnogley¹.

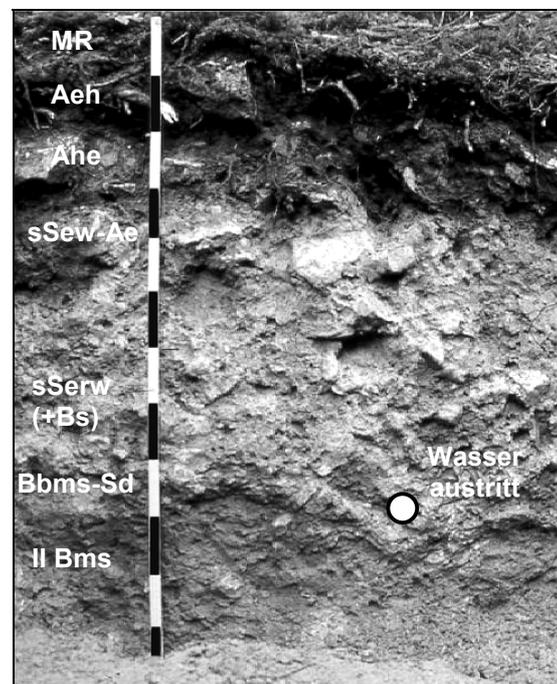
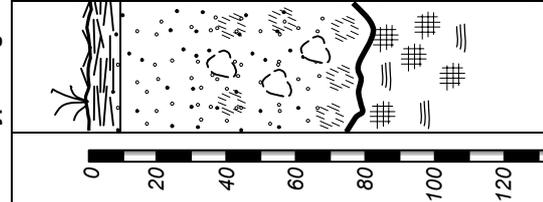


Abb. 124: Intensivmessprofil P 1: Hangwasser beeinflusster Bändchenstagnogley, Profiltiefe ca. 1,2 m

Die Verbreitung des Stauhorizonts am Hang ist vermutlich auf die Quellmulde und ihre Flanken beschränkt. Nur 50 m nördlich des Profils ist der für die Standortseinheit typische, tiefgründige und von Hangwasser unbeeinflusste Ortste-Podsol entwickelt.

¹ Von der Bezeichnung als Hanggley wurde abgesehen, da diese Bezeichnung die pedogenetischen Merkmale nicht abbildet.

Standortseinheit: SWH Mäßig frischer sandiger Winterhang - Sonderstandort) Ökoserie: Sandige Steilhänge		Lokalität: Intensivmessprofil P 1 am Alten Dürreychtalweg, südlich des Seemißkars, Fichten-Tannenforst (80-100-jährig)		Standort-ID: 1					
Geologie: smc1-Obergrenze		Bodenfeuchteregime: In der Tiefe hangfeucht durch Hangwasserzufluss; zeitweise Wasseraustritte am Weganschnitt		Hydrotyp: ZWA2 (Sonderstandort) 					
Relief: Steiler Hang unterhalb Karschwelle 745 m NN, 24° ESE									
Bodentyp: Hangwasserbeeinflusster Bändchenstagnogley (SG)									
									
Horizontbezeichnung	Horizonttiefe	Bodenart	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Skelettingehalt [%]	Durchwurzelung	Ks* [m s ⁻¹]	LK** [%]	Bemerkungen
MR	7	O	-	-	-	W4	-	-	z.T. Blocküberlagerung
Aeh / Ahe	23 / 28	St2...St2	Ld2 / Ld2	h3 / 2	20...50	W4 / W2	1·10 ⁻⁵	16...18	einzelne Wurzelröhren
sSew-Ae	48	St2...St3	Ld2	h0	20...40	W1	1·10 ⁻⁵ ...5·10 ⁻⁶	16,5...12,5	Skelett teilweise gebleicht
sSenw (+Bs)	73 (85)	St2 (St4)	Ld3 (...Ld4)	h1	20...60	W0	9·10 ⁻⁶ (2·10 ⁻⁶)	15,5 (10)	St4-Linsen, Skelett stark gebleicht
Bbms-Sd	75 (87)	n.b.	Ld5	n.b.	20...30	W0	n.b.	n.b.	stark wellig, Wasseraustritt
II Bms	> 105 (Profiltiefe)								
Übergang in II ilCv		St2	Ld4	h2	30	W0	4·10 ⁻⁶	11	Verdichtet, plattige Textur
Ab 140 cm II ilC aus rosafarbenem grusigen Sand (Bohrstockbefund)									

Angabe der Klassen gemäß AG BODEN (1994). * Ks abgeleitet nach AG BODEN (1994:305) ** nFK abgeleitet nach AG BODEN (1994:297, 300)

Abb. 123: Bodenkundliche Standortaufnahme des Intensivmessprofils P 1 (vgl. auch Anhang A4)

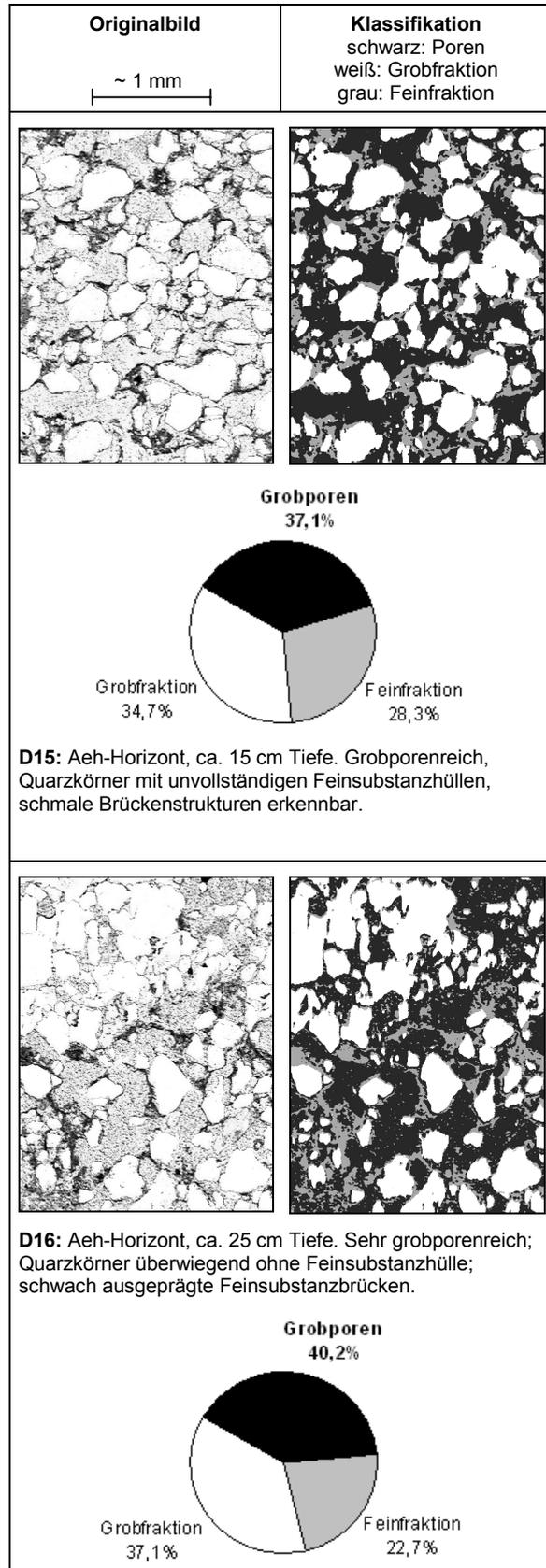
Skelettreicher, stark verwitterter Schuttsand, überwiegend aus Material des Bausandsteins (sm), bildet den Substrattyp des Profils. Der Skelettgehalt ist horizontal und vertikal recht veränderlich und schwankt zwischen ca. 20 und 60%. Im stauwasserbeeinflussten Profilteil ist das Skelett mürbe-brüchig verwittert; das hämatitische Bindemittel des Sandsteins ist z.T. bis in den Kern stark reduktionsgebleicht oder in orangefarbene Eisenminerale (Lepidokrokit, Goethit) umgewandelt. Auffällig ist der geringere Anteil an grobem Skelett im II Bms-Horizont, wie er an tieferen Schuttdecken im Dürreychgebiet häufig festzustellen ist. Die meist damit einhergehende plattige Textur konnte an der frischen Profilwand jedoch nicht sicher festgestellt werden.

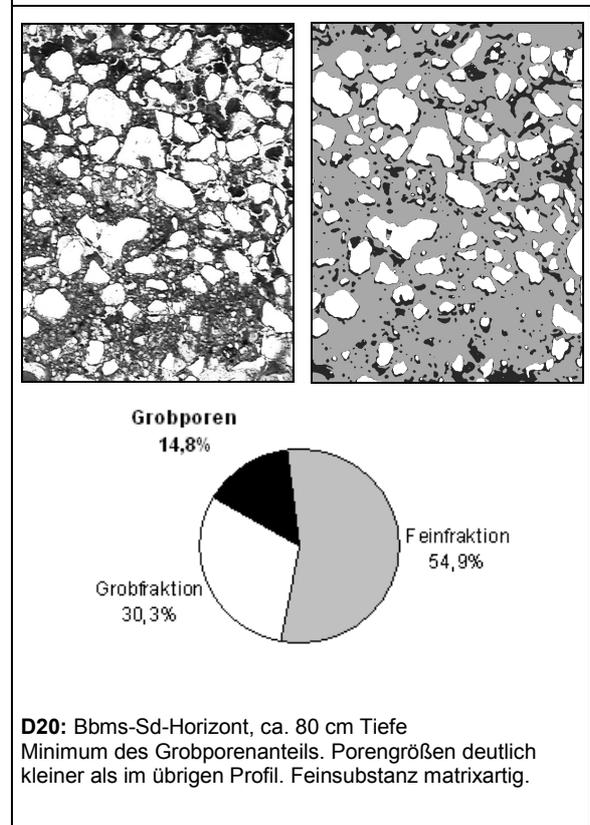
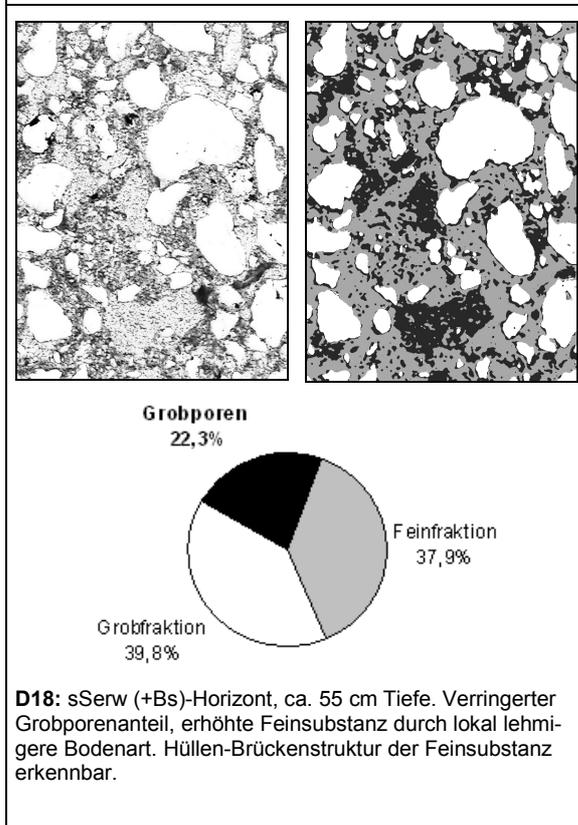
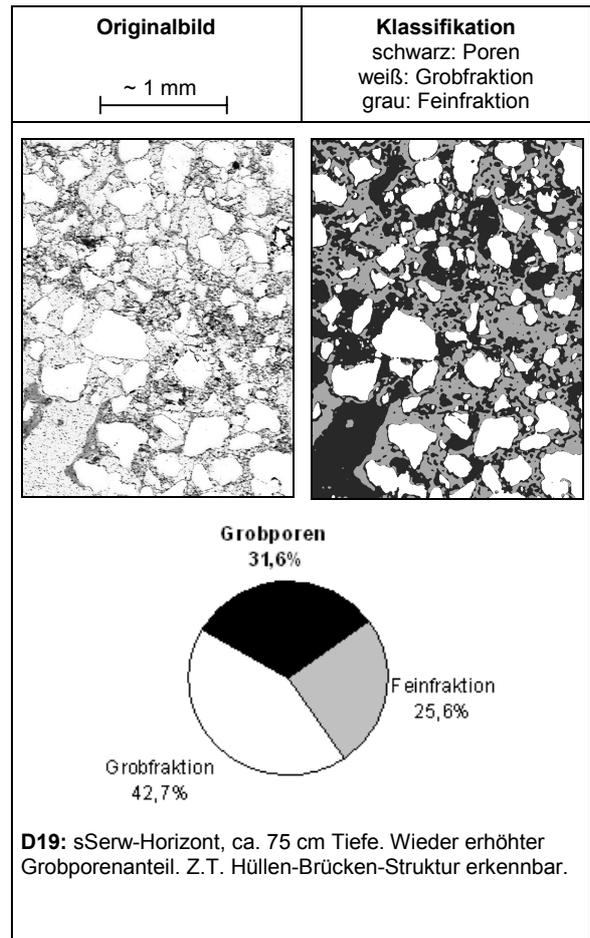
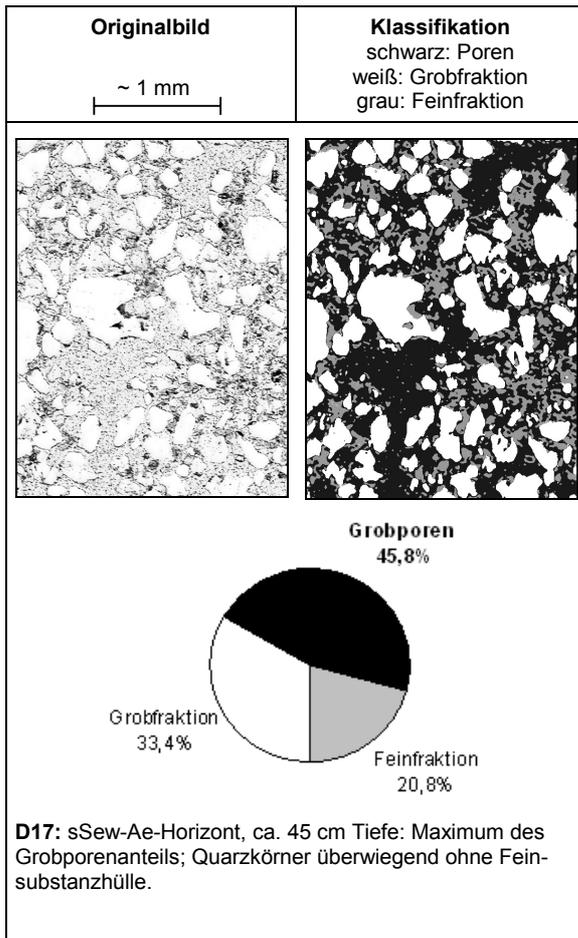
Die Tiefenlage des verdichteten II Bms-Horizonts stimmt im Bereich des Messprofils sehr gut mit den seismischen Untersuchungen überein (Anhang 7-5). Unterhalb des Profils vergrößert sich die Mächtigkeit des gering verfestigten Schuttdeckenmaterials auf bis zu 4 m.

8.4.3.4 Dünnschliffuntersuchungen

Die hydraulische Wirksamkeit bändchenartiger Ortsteinbildungen ist in Kap. 8.3.2 bereits belegt worden. Auch beim vorliegenden Profil wurden Bodendünnschliffuntersuchungen (D15 bis D21) herangezogen, um den sickerwasserwirksamen Porenanteil, insbesondere des Bändchenhorizonts, direkt ermitteln zu können. Abb. 125 zeigt ausgewählte Ausschnitte aus Dünnschliffen der Horizonte im Messprofil P 1. Jeweils darunter sind die mittleren Grobporen-, Fein- und Grobsubstanzanteile aus je drei Ausschnitten dargestellt.

Abb. 125: Nachfolgend 7 Dünnschliffausschnitte der Horizonte P 1. Kreisdiagramme: Mittlere Grobporen-, Fein- und Grobsubstanzanteile aus je drei Ausschnitten.





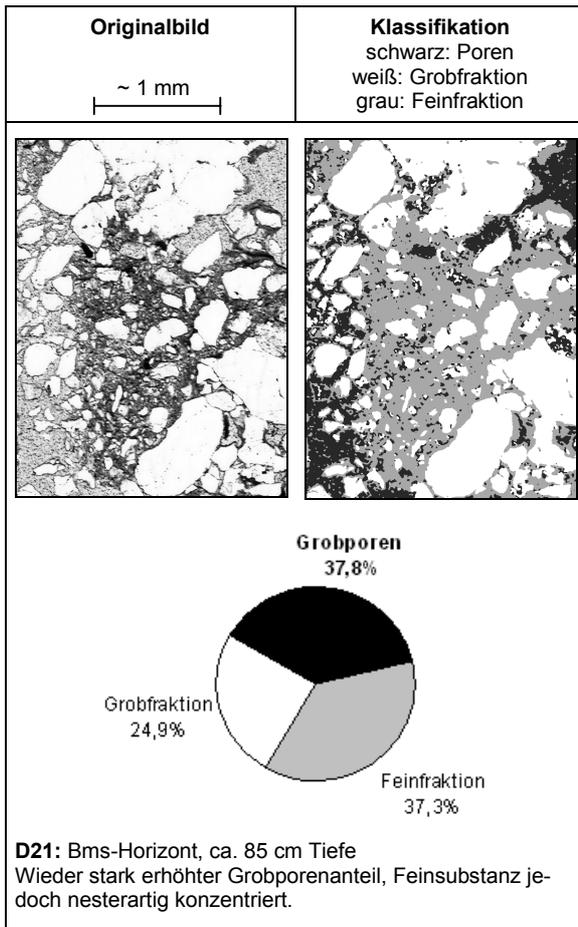


Abb. 126 zeigt die aus jeweils drei Dünnschliffausschnitten gemittelten Grobporenanteile in 7 Tiefen des Messprofils 1. Zur Veranschaulichung wurden die Punkte zu einem Tiefenprofil verbunden.

Aus Abb. 126 lassen sich zwei Minima der Grobporenanteile und damit Minima der hydraulischen Leitfähigkeit ablesen:

- 55 cm Tiefe: Das vermutlich nur lokal auftretende Minimum ist bedingt durch die lokal lehmigere Bodenart (SI4) und die Sesquioxid-Anreicherung.
- 80 cm Tiefe: Das Minimum ist bedingt durch das Kittgefüge des Ortsteinbändchens.

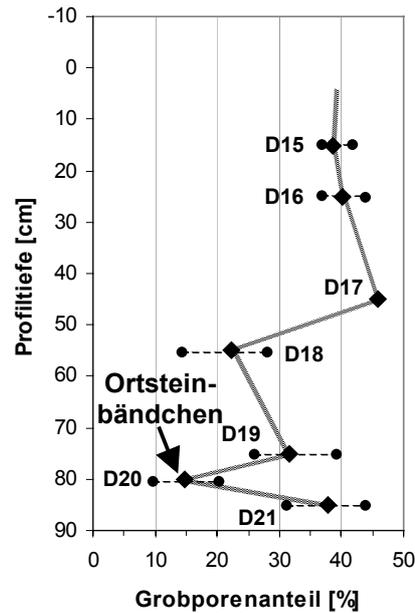


Abb. 126: Mittlere Grobporenanteile von Dünnschliffen (D 15-D 21) im Messprofil P 1 mit Angabe der Schwankungsbreiten

Die Feststellung eines Porenminimums im Bereich des Ortsteinbändchens stehen zunächst scheinbar im Widerspruch zu den Befunden von STAHR (1973:137): Hier wurden in Bb- und Bs-Horizonten die höchsten Porenvolumina festgestellt. Diese setzen sich allerdings v.a. aus nicht Sickerwasser verfügbaren Feinporen zusammen. Auch weisen die eigenen Dünnschliffuntersuchungen nicht wie bei STAHR (1973) darauf hin, dass der oberhalb des Ortsteinbändchens liegende Horizont bereits eine durchgängige Stauwirkung besitzt. Hier können Dünnschliffuntersuchungen im Vergleich zur Bestimmung aus Stechzylinderproben und Sondenuntersuchungen eine geeignetere Methode sein, um Sickerwasser wirksame Poren zu identifizieren.

Der absolute Grobporenanteil des Ortsteinbändchens von im Mittel 15 % ist verhältnismäßig hoch: Dieser Wert entspricht der Luftkapazität eines schwach tonigen Sands (St2) mittlerer Lagerungsdichte (AG BODEN

1994:297). Für diese Bodenart kann eine hohe hydraulische Leitfähigkeit von $K_s = 9 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ abgeleitet werden (AG BODEN 1994:305). Wenn auch der Vergleich von methodisch unterschiedlich ermittelten Grobporenanteilen streng genommen nicht zulässig ist, wird dadurch doch der Widerspruch zwischen den festgestellten Hydromorphiemarkmalen und einer theoretisch hohen Durchlässigkeit deutlich. Folglich kann hier erneut angenommen werden, dass infolge des ausgeprägten Hüllen- und Brückengefüges ein hoher Anteil der Poren allseits umschlossen und somit für die Sickerwasserbewegung unwirksam ist (vgl. Kap. 8.3.2).

Nicht bändchenförmige Ortsteinbildungen:

Einen sehr ähnlichen widersprüchlichen Befund ergab die Dünnschliffuntersuchung D 12 eines weiteren nicht bändchenförmigen, stark verfestigten Ortsteinhorizonts Bms (Abb. 127) an einer steilen konvexen Karflanke der Hirschklunge (Anhang 4-4). Oberhalb des Bms-Horizonts fand sich – ähnlich wie am Messprofil P 1 – ein zweifellos hangwasserbeeinflusster, stark feuchter sSw-Horizont mit orangefarben verwittertem Skelett. In Abb. 127 (unten) sind gut ausgeprägte Grobporen zu erkennen. Das Kreisdiagramm zeigt darüber hinaus den hohen mittleren Grobporenanteil von 27,7 %.

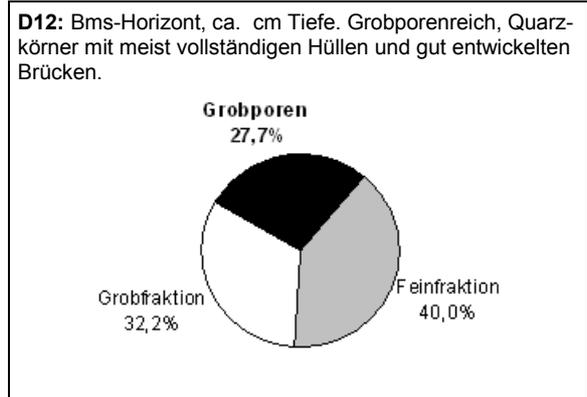
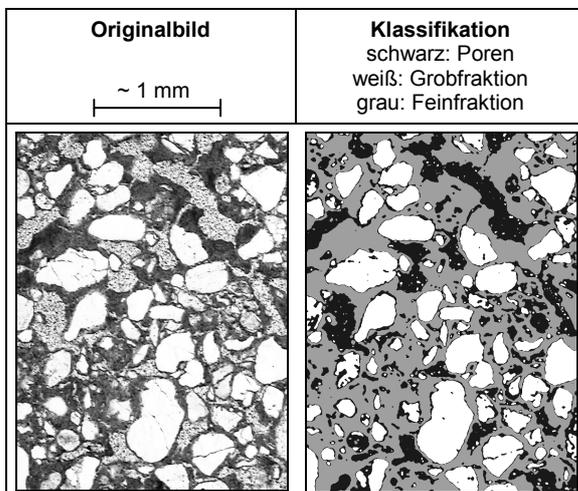


Abb. 127: Dünnschliff D 12 mit Mittelwerten (n=3) der Flächenanteile von Poren, Fein- und Grobfraction

Hier wird wiederum deutlich, dass für die stauende Wirkung von Ortsteinhorizonten Gefügeeigenschaften maßgeblich sind, die hier nur qualitativ beschrieben werden können.

8.4.3.5 Bodenfeuchtemessungen

Nachfolgend werden Bodenfeuchte- und Saugspannungsmessungen am Messstandort P 1 zunächst im Jahresüberblick vorgestellt. Anschließend werden einzelne Witterungs- bzw. Gebietszustände herausgegriffen. Die Anordnung der ausgewerteten Messsonden im Profil geht aus Abb. 128 hervor.

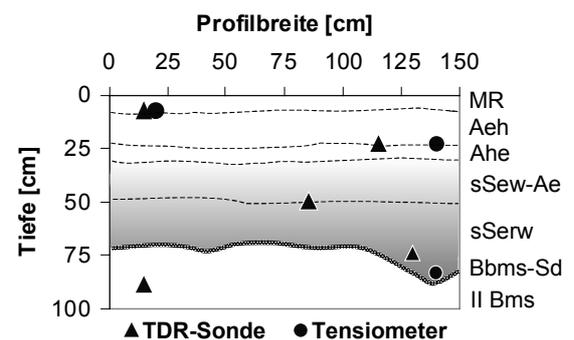


Abb. 128: Anordnung der TDR-Sonden und Tensiometer im Messprofil 1. Der Grauton symbolisiert den nach unten zunehmenden Stauwassereinfluss

Jahresüberblick: Abb. 129 zeigt den Verlauf der Niederschläge und der Bodenfeuchte am Messprofil 1 vom 1.03. bis 15.11.1998 in fünf Tiefen, getrennt nach Oberboden (7 und 23 cm) und Unterboden (48, 73 und 88 cm).

Auswahlkriterien für diese Periode waren:

- Weitgehendes Fehlen von Schneeniederschlägen
- Ausschluss von Werten, die von Messdrift nach dem Extremereignis Ende Oktober 1998 beeinflusst waren.

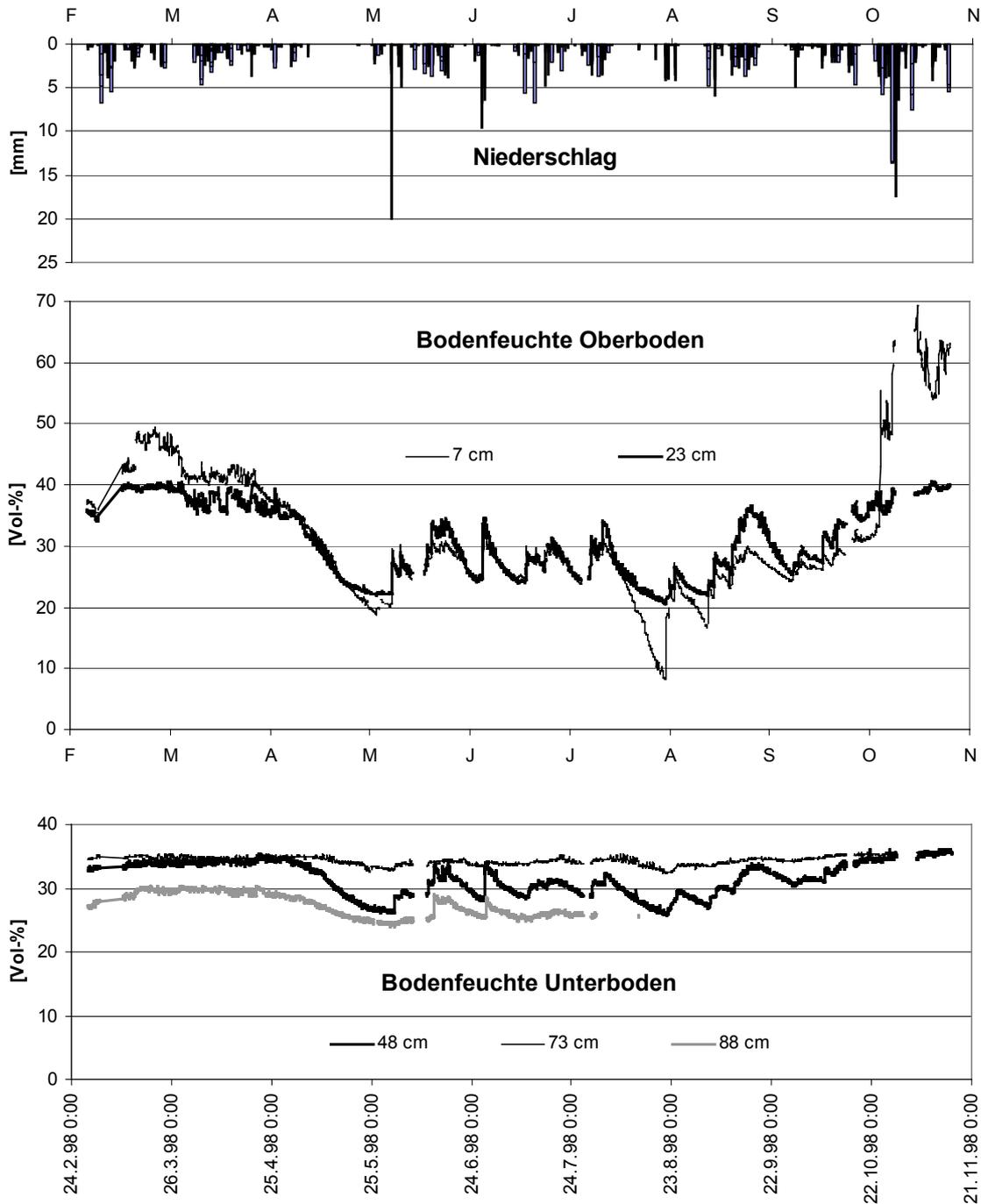


Abb. 129: Verlauf der Niederschläge und der Bodenfeuchte im Ober- und Unterboden des Messprofils 1 im Zeitraum vom 1.03. bis 15.11.1998

Bereits auf den ersten Blick sind die hohen Amplituden der Feuchtwerte im Oberboden zu erkennen. Extreme Werte werden gegen Ende der Messreihe nach dem Extremereignis vom 28./29.10.98 mit 178 mm Niederschlags-summe erreicht: Möglicherweise kommt es hier zu Ausspülungen und damit zu veränderten Messbedingungen in 7 cm Tiefe.

Im Unterboden sind die Amplituden dagegen gedämpft; knapp oberhalb des Ortsteinbändchens in 73 cm Tiefe ist die Bodenfeuchte mit Werten um 34 Vol-% nahezu über den gesamten Messzeitraum konstant. Diese Zusammenhänge drücken sich auch quantitativ in den statistischen Momenten der Datenreihen aus (Tab. 51): Die Messwerte der TDR-Sonde in 73 cm zeigen mit 0,7 Vol-% die geringste Standardabweichung und den höchsten Mittelwert aller TDR-Sonden.

Tab. 51: Deskriptive Statistik der Bodenfeuchtemessungen [Vol-%] am Messprofil 1 (1.03. bis 15.11.1998)

Tiefe	Standardabweichung	Mittelwert	Max.	Min.
7 cm	10,5	31,4	69,3	8,2
23 cm	5,8	30,8	40,6	20,7
48 cm	2,6	31,5	36,1	25,8
73 cm	0,7	34,4	35,8	32,4
88 cm	1,9	27,4	30,4	24,0

Bis Ende April liegen die Messwerte in 48 cm, 73 cm, 88 cm und anfangs auch in 23 cm Tiefe nahe an ihrem Maximalwert, bevor im Mai eine Austrocknungsphase beginnt. Diese Plateauphase nahe dem Maximum kann als Phase mit Sättigung interpretiert werden. In den genannten Horizonten ist somit auf eine gesättigte Wasserbewegung in Grob- und Makroporen zu schließen. Unter der Annahme eines oberflächenparallel verlaufenden Stauhorizontes ergibt sich bei einer Neigung von $\beta = 24^\circ$ eine erhebliche laterale Komponente von $\sin\beta = 0,41$ und

somit ein hohes Potenzial für die Bildung von Zwischenabfluss.

Bemerkenswert ist der Verlauf der Messwerte unterhalb des Stauhorizontes in 88 cm Tiefe, der gedämpft den Feuchteverlauf des Horizonts in 48 cm Tiefe nachzeichnet. Auch nach Regenereignissen während des Sommers sind die Feuchteanstiege leicht nachvollziehbar, bevor die Sonde im August ausfällt. Aus diesem Verhalten ist zu folgern, dass das stauende Ortsteinbändchen lediglich als wasserhemmend bezeichnet werden kann, und noch relativ schneller Wassertransport erfolgen muss. Die fehlende Hydromorphierung und der hohe Grobporenanteil des II Bms-Horizonts lässt auf relativ ungehinderte Tiefensickerung unterhalb des Ortsteinbändchens schließen.

Vieles spricht dafür, dass für die Stauwirkung im Profil weniger die absoluten Grobporenanteile bzw. Durchlässigkeitsbeiwerte von Stauwasserleiter und Stauwasserohle verantwortlich sind, als vielmehr ihr Verhältnis zueinander. Diese Erkenntnis wurde im Konzept des Interflow-Index umgesetzt, welcher gleichfalls das Verhältnis aus den K_s -Werten von Ober- und Unterboden nutzt (Kap.6.1.4)

Im Folgenden soll der Saugspannungs- Bodenfeuchteverlauf auf der Stundenskala an zwei Beispielen dargestellt werden:

- Kurzes konvektives Niederschlagsereignis vom 31.5.98 mit hoher Intensität nach einer niederschlagsfreien Phase (Abb. 130)
- Lang andauerndes Extremereignis, hohe Vorfeuchte nach voran gegangenen advektiven Niederschlägen (Abb. 131)

Konvektives Ereignis, geringe Vorfeuchte:

Abb.130 zeigt den scharfen Niederschlagsimpuls und die Reaktion der Tensiometer und TDR-Sonden am 31.05.98. Nach einer Austrocknungsphase herrschen trockene Vorbedingungen: Die Bodenfeuchtwerte in allen

Tiefen außer in 7 cm liegen, bezogen auf den Messzeitraum, nahe dem Minimum (vgl. Tab. 51). Infolgedessen wurde für das Ereignis

mit 30 mm Niederschlagshöhe trotz der hohen Intensität von bis zu 20 mm h⁻¹ ein Abflussbeiwert von nur 0,006 ermittelt (Anhang 8).

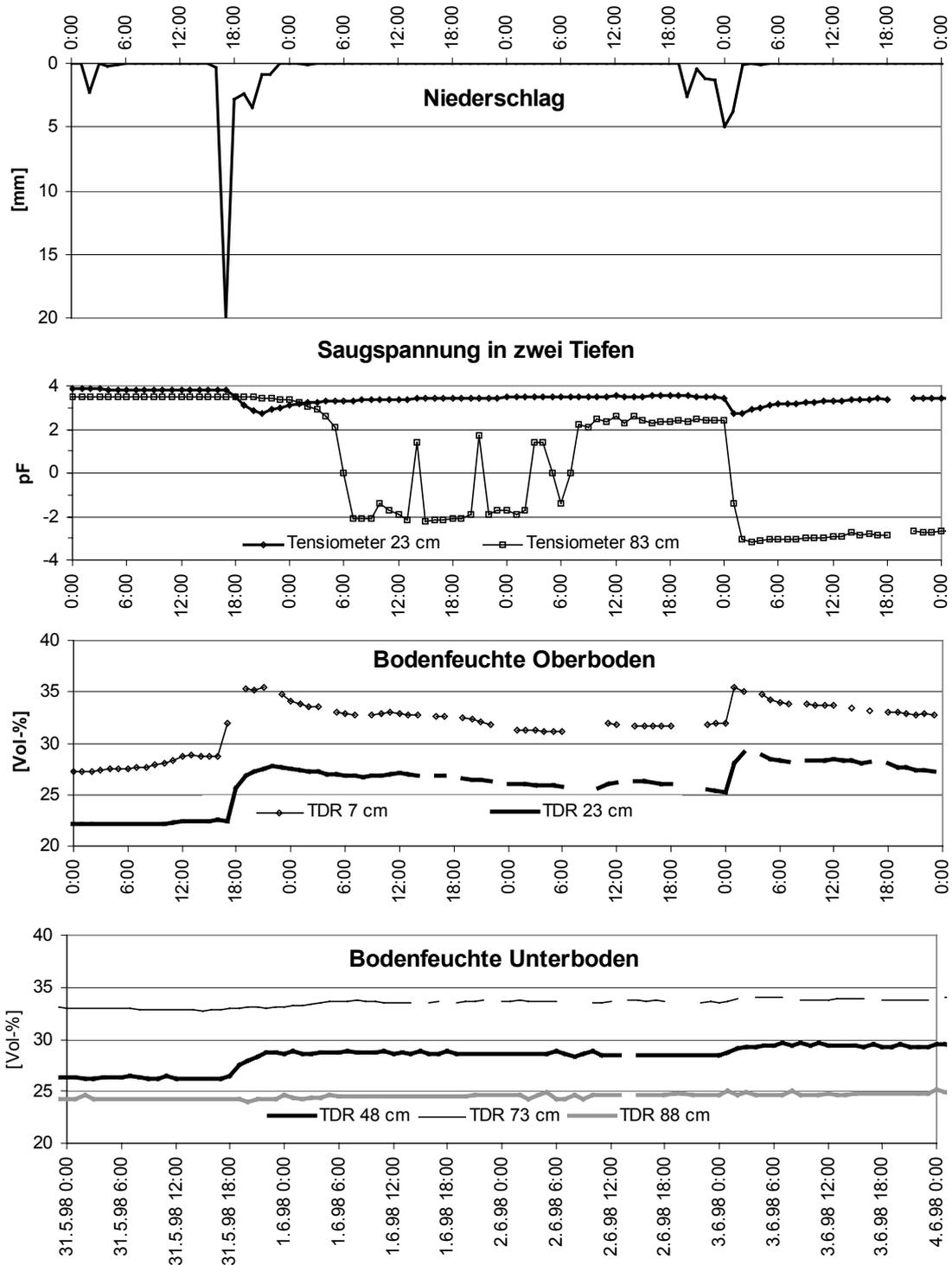


Abb. 130: Niederschlag, Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil P 1 nach einem konvektiven Ereignis vom 31.5. bis 3.6.1998.

Im Bereich der Humusaufgabe sinkt die Saugspannung (pF-Wert) zeitgleich mit der Niederschlagsspitze um 17 Uhr ab; ohne jedoch Sättigung zu erreichen. Möglicherweise spielen hier Benetzungswiderstände (vgl. Kap. 8.1) eine Rolle. Der pF-Wert in 83 cm Tiefe (noch oberhalb des Ortsteins) reagiert mit einem Zeitversatz von 4 Stunden erstmals, sinkt aber erst nach ca. 8 Stunden stark ab, um dann 14 Stunden nach dem Niederschlagsimpuls ein Minimum von $pF = -2,1$ zu erreichen¹. Dies entspricht einer Überstauhöhe von 1,3 m. Die Bodenfeuchteänderung in 73 cm Tiefe beträgt im gleichen Zeitraum weniger als 1 %. Unter der Voraussetzung, dass die absoluten pF-Werte verlässlich sind, lässt diese Tatsache auf die hohe Sensitivität des grobporenen Stauwasserleiters gegenüber Wassergehaltsänderungen schließen: Der Sew-Horizont befindet sich nahezu ganzjährig an einem Schwellenwert der Sättigung und zeigt deshalb einen steilen Wechsel von positiven zu negativen pF-Werten.

Nahe der Geländeoberkante sind erwartungsgemäß die stärksten Feuchteanstiege zu verzeichnen, die sich in einstündigem Abstand von oben nach unten fortpflanzen. Die erreichten Feuchtegehalte in 48 cm und 23 cm Tiefe liegen jedoch deutlich unterhalb der in Tab. 51 dargestellten Mittelwerte; Sättigung wird also hier nicht erreicht. Die durchlaufende Feuchtefront ist gegenüber der nach AG BODEN (1994:305) geschätzten mittleren Wasserdurchlässigkeit für schwach lehmige Sande von ca. 2 cm h^{-1} rund eine Größenordnung schneller und liegt im Bereich von 25 cm h^{-1} oder $7 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Etwa 40 Stunden nach der Niederschlagsspitze vom 31.05. steigt der pF-Wert in 83 cm

Tiefe wieder sprunghaft auf einen positiven Wert an; eine Feuchteänderung in 73 cm Tiefe ist dabei nicht feststellbar.

Der geringe Niederschlag am 2./3.06.98 reicht aus, um die Saugspannung – diesmal ohne Zeitversatz – auf Werte von $pF = -3,1$ absinken zu lassen; mithin auf einen Wert, der dem Druck einer Wassersäule von 12,6 m entspricht. Dieser hohe hydrostatische Druck ist nur durch den Hangwasserkörper zu erklären, der den Horizont lateral mit Wasser versorgt. Die sofortige Reaktion des Tensiometers in 83 cm Tiefe kann nicht durch Matrixsickerung erklärt werden sondern muss als Druckreaktion des Hangwasserkörpers infolge von oberhalb infiltrierendem Wasser interpretiert werden. Auf diese Weise ist sog. piston flow (→ Glossar) möglich. Für eine Druckreaktion spricht auch die Beobachtung, dass die im gleichen Horizont installierten Saugkerzen zur Bodenwassergewinnung auch ohne Anlegen eines Vakuums oft innerhalb kurzer Zeit mit Wasser gefüllt waren.

Auch die TDR-Sonden sprechen mit maximal einstündiger Verzögerung auf die zweite Niederschlagsspitze an. Die erreichten Feuchtwerte in den Horizonten oberhalb des Ortsteinbändchens liegen nun höher als nach dem ersten Niederschlagsereignis. Sie liegen jedoch – von 7 cm Tiefe abgesehen – weiterhin unter dem Mittelwert und damit unterhalb der Sättigung.

Aus der Analyse der Werte kann hinsichtlich der Bildung von Zwischenabfluss zusammenfassend gefolgert werden:

- Der Stauwasserleiter (Sew-Horizont) ist der maßgebliche Zwischenabflusshorizont während der zwei Ereignisse.
- Der Sew-Horizont wird bereits durch geringe Feuchteänderungen abflussbereit

¹ Negative Saugspannungen bzw. Überdrücke werden hier als $-\log [\text{cm Wassersäule}]$ dargestellt.

- Saugspannungen im Sew-Horizont von $pF < -3$ weisen auf einen zusammenhängenden Hangwasserkörper hin.
- Schnelle Zwischenabflussreaktionen werden durch Druckantwort des Hangwasserkörpers ermöglicht.
- Das Auffeuchtungsverhalten lässt auf schnellere Sickerungsprozesse schließen, als aus der Bodenart abgeleitet werden kann. Mögliche Ursache sind Makroporen.

Auf der Einzugsgebietskale ist die Abflussreaktion auf den scharfen Niederschlagsimpuls von 20 mm h^{-1} gering. Der Abflussbeiwert am Gebietsauslass beträgt nur $\psi = 0,006$. CASPER (2002) zeigte für das Ereignis, dass für die Abflussreaktion nur die bachnahen Flächen verantwortlich sind; Sättigungsflächenabfluss und Zwischenabfluss spielen für die Gebietsreaktion unter trockenen Vorbedingungen keine Rolle. Langsamer Zwischenabfluss in tieferen Horizonten, wie er am Messprofil 1 nachgewiesen werden kann, wird also nicht abflusswirksam.

Extremereignis, hohe Vorfeuchte: Abb. 131 zeigt eine Reihe von kleineren Niederschlagsereignissen, die mit dem Extremereignis um den 28.10.98 abschließt. Dieser Niederschlag löste das größte gemessene Hochwasser (HHQ) im Dürreychgebiet mit einer Jährlichkeit von > 100 a aus. Für das Abflussereignis wurde am 28.10.98 ein Abflussbeiwert von 0,368 nach 247,9 mm Gebietsniederschlag bestimmt (CASPER 2002). Die Niederschläge führten zum Ausfall der Messsysteme am Messprofil 1. Aus Abb. 129 geht die stetig wachsende Auffeuchtung des Messprofils 1 hervor, bis sich die Feuchtwerte im Oktober ihren Maxima vom Frühjahr 1998 annähern (vgl. Tab. 51). Demnach zeigen die TDR-Sonden in 73 und 48 cm Tiefe kaum mehr Schwankungen zwischen dem 25. und 29.10.98. Die TDR-Sonde in

23 cm Tiefe reagiert noch auf Niederschlagsimpulse und erreicht mit Einsetzen des Extremereignisses Sättigung.

Die pF -Werte in 83 cm Tiefe schwanken um $pF = -3,2$ oder ca. 16 m Wassersäule. Der Wert entspricht etwa dem Wert, der auch nach dem zweiten, kleineren Niederschlagsimpuls des konvektiven Ereignisses erreicht wird (s.o.). Auch durch den am 29.10.98 einsetzenden Extremniederschlag ändert sich dieser pF -Wert nicht mehr. Diese Tatsache lässt darauf schließen, dass hiermit ein für den Hang am Messprofil 1 charakteristischer Maximalzustand erreicht ist.

Bemerkenswert ist der noch niedrigere pF -Wert von im Mittel $-3,5$ (≈ 32 m Wassersäule) in 7 cm Tiefe im Bereich der Humusauflage. Unter der Voraussetzung, dass die Messungen verlässlich sind, lässt sich damit auch ein Zwischenabfluss in der Humusauflage vermuten. Der Tensiometerwert in 23 cm Tiefe zeigt konstant Null an, da technisch bedingt an diesem Sensor keine Messwerte < 0 erfasst werden können. Wird von einer Sättigung bis zum Oberboden ausgegangen, so ist auch hier ein negativer pF -Wert zu vermuten.

Hinsichtlich der Abflussbildung lässt sich für die Phase vom 25.10. bis 29.10.98 zusammenfassen:

- Im Unterboden des Profils (73 cm und 48 cm Tiefe) herrscht bereits vor dem Extremniederschlag Sättigung und Zwischenabflussaktivität.
- Während der Ereignisse am 25.10., 27.10. und 29.10. herrscht auch in 23 cm Tiefe annähernd Sättigung und damit Zwischenabfluss.
- Die niedrigen pF -Werte deuten auf Zwischenabfluss auch in der Humusauflage, ohne dass ein Sättigungswert erkennbar ist.

- Vermutlich kommt es durch vollständige Sättigung bis zur Geländeoberkante zeitweise auch zum Sättigungsflächenabfluss oder schnellem Zwischenabfluss in der Humusauflage

CASPER (2002) weist auf den Zusammenhang zwischen Sättigung des Messprofils P 1 in 28 cm Tiefe und dem Abflussbeginn im Teil-einzugsgebiet Hirschklänge (HI) hin, das im unteren Teil ähnliche Standortsbedingungen und Böden aufweist.

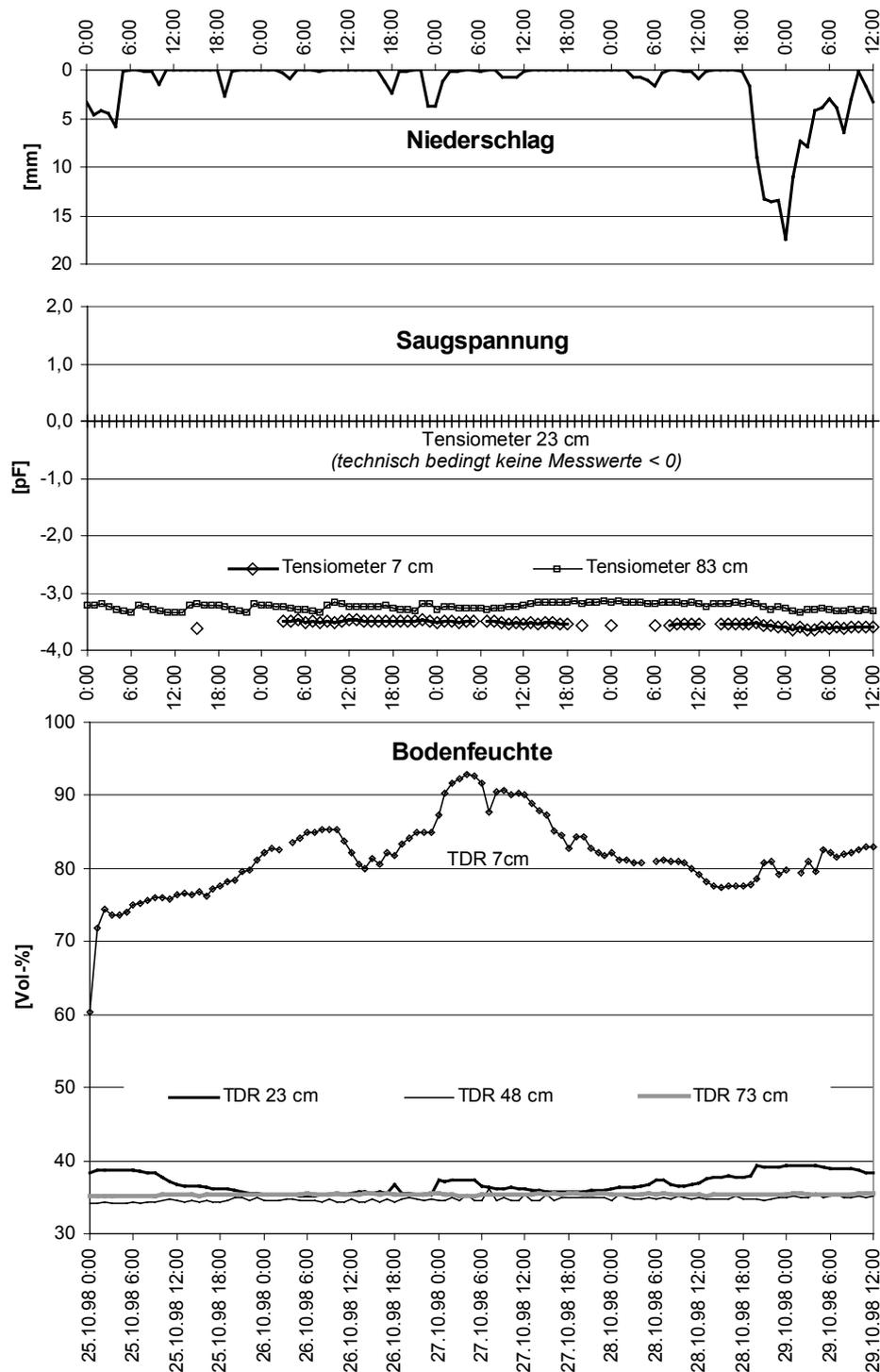


Abb. 131: Niederschlag, Saugspannung und Bodenfeuchte Messprofil P 1, 25.10. bis 29.10.1998.

8.4.3.6 Vergleich mit den Regionalisierungsansätzen

Im Folgenden werden die Untersuchungen am Messprofil 1 mit den Regionalisierungsansätzen FSK-Regelwerk zur Hydrotopausgliederung, Interflow-Index und Gewichteter Topographischer Index ohne Reinfiltration verglichen.

FSK-Regelwerk: Die Standortseinheit am Messprofil P 1 SWH (Mäßig frischer sandiger Winterhang, Abb. 132) wurde dem Hydrotyp Infiltrationsflächen (INF) mit undeutlich ausgeprägter Bodenschichtung und untergeordnetem Zwischenabfluss zugeordnet (vgl. Kap. 7.2, Tab. 24). Diese Zuordnung zum Messprofil 1 ist auf der Profilskala unzutreffend: Der laterale Wasserzufluss bedingt eine Sonderstellung des Profils innerhalb der Standortseinheit, wie bereits bei der Standortbeschreibung (Kap. 8.3.3.1, s.o.) dargelegt wurde. Die quellige Mulde muss den 30 % Kleinstandorten zugeordnet werden, die stärkere Abweichungen von der FSK-Legende zeigen (Kap. 7.1). – Warum für ein Intensivmessprofil ein offensichtlicher Sonderstandort ausgewählt wurde, wird aus der Projektgeschichte verständlich: Die Intensivmesspunkte wurden zu Projektbeginn aufgrund besonders augenfälliger Erscheinungen im Gelände ausgewählt, um hier Abflussbildungsprozesse exemplarisch zu identifizieren. Die vorgestellten Regionalisierungsansätze wurden erst im Projektverlauf mit wachsendem Prozessverständnis entwickelt.

Interflow-Index: Abb. 132 zeigt das Berechnungsergebnis des Interflow-Index I_{pot} auf Basis eines 10 m-Rasters.

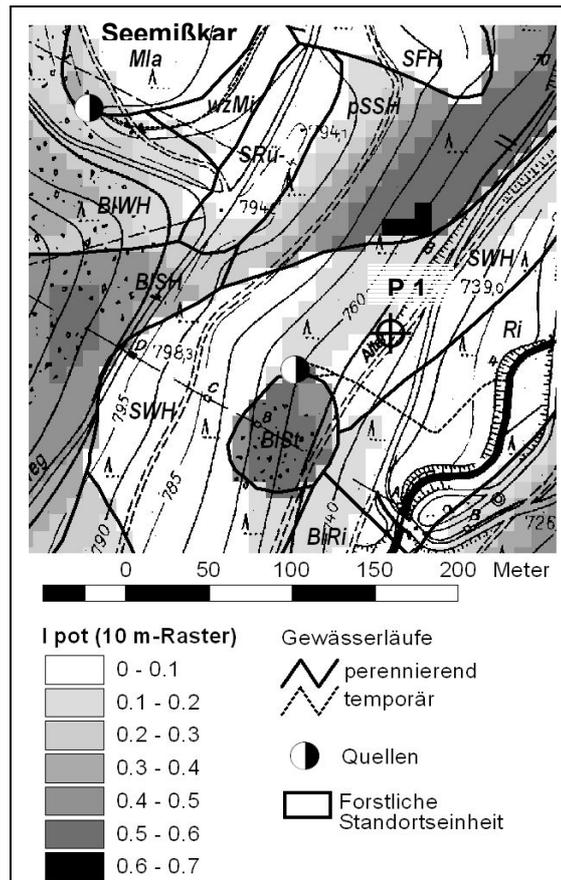


Abb. 132: Interflow-Index I_{pot} (10 m-Raster) und Forstliche Standortseinheiten am Messprofil 1

Für den Messhang oberhalb P 1 ergibt sich trotz der recht hohen Hangneigung ein relativ niedriger I_{pot} um 0,17. Grund dafür ist die Zuordnung des Profilstandortes zur Forstlichen Standortseinheit SWH: Für diese Einheit wurde – wie für Standorte mit dominierender Infiltration typisch – nur ein kleiner Schichtungsquotient aus den gesättigten Leitfähigkeiten des Ober- und Unterbodens von $\log(K_{s_o}/K_{s_u}) = 0,33$ angesetzt. Die angrenzenden Standortseinheiten BISH, pSSH und BIST erreichen mit Schichtungsquotienten von $\log(K_{s_o}/K_{s_u}) = 1,24$ hohe I_{pot} -Werte.

Die Übertragung des I_{pot} auf die Punktskala gelingt damit letztlich nicht. Für das Messprofil 1 kann aus den Profilbeobachtungen ein ähnlich hoher effektiver Schichtungsquotient

abgeleitet werden, wie für die genannten Nachbareinheiten.

Gewichteter Topographischer Index: Lateraler Wasserzufluss über längere Phasen des Jahres ist das bestimmende Standortmerkmal für das Messprofil 1. Die Zusammenschau der Standortbeobachtungen und Messungen zeigt, dass dieser Zufluss zumindest teilweise aus langsameren Abflusskomponenten gespeist wird. Abb. 133 präsentiert das Berechnungsergebnis des Gewichteten Topographischen Index auf Basis eines 10 m-Rasters:

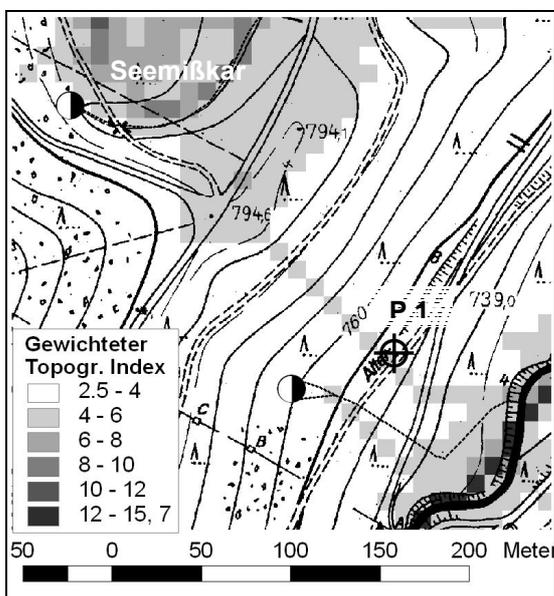


Abb. 133: Gewichteter Topographischer Index (10 m-Raster) am Messprofil 1

Deutlich sind die Sättigungsflächen mit hohen Indexwerten auf dem flachen Karboden des Seemißkars im Nordwesten sowie der Auenbereich mit dem Lauf des Dürreychbachs im Südosten zu erkennen. Vom Seemißkar verläuft ein Fließfinger mit erhöhten Indexwerten direkt von Nordwesten nach Nordosten durch das Messprofil P 1. Ein zweiter Fließfinger stimmt recht gut mit der Lage des temporären

Gewässerlaufs unterhalb der Quellmulde überein. Das Ergebnis legt nahe anzunehmen, dass Sättigungsflächenabfluss und Schichtquellwasser aus den Feuchtfächen des Seemißkars den flachen Karriegel durchsickert, in den Hangschutt eintritt und so den lateralen Zufluss zum Messprofil auch während trockenerer Perioden aufrecht erhält.

Die Indexwerte der beschriebenen Fließfinger sind mit Werten zwischen 4 und 5 absolut gesehen klein und damit vergleichsweise wenig aussagekräftig; auch die exakte Übereinstimmung von Fließweg und Profilverlauf muss als glückliche Koinzidenz von Punktskala und 10 m-Raster gewertet werden. Das Ergebnis ist jedoch konsistent mit den Geländebefunden und stellt die am Punkt nachgewiesenen lateralen Abflusskomponenten in einen plausiblen räumlichen Zusammenhang.

8.4.4 Simulation des Zwischenabflusses mit CATFLOW

Am Beispiel der Standortseinheit BISH (Mäßig frischer Block-Sommerhang) soll die Bildung und Akkumulation von Zwischenabfluss auf der Hangskale mit dem Simulationsmodell CATFLOW simuliert werden. Dazu wurde auf Basis der FSK-Angaben ein für die Standortseinheit repräsentatives synthetisches Profil erstellt. (Abb. 134). Es repräsentiert die steilen Hanglagen vom Hydrotyp ZWA1 (ausgeprägter Zwischenabfluss), wie sie v.a. an den Mittelhängen im Ostteil des Dürreychgebiets auftreten.

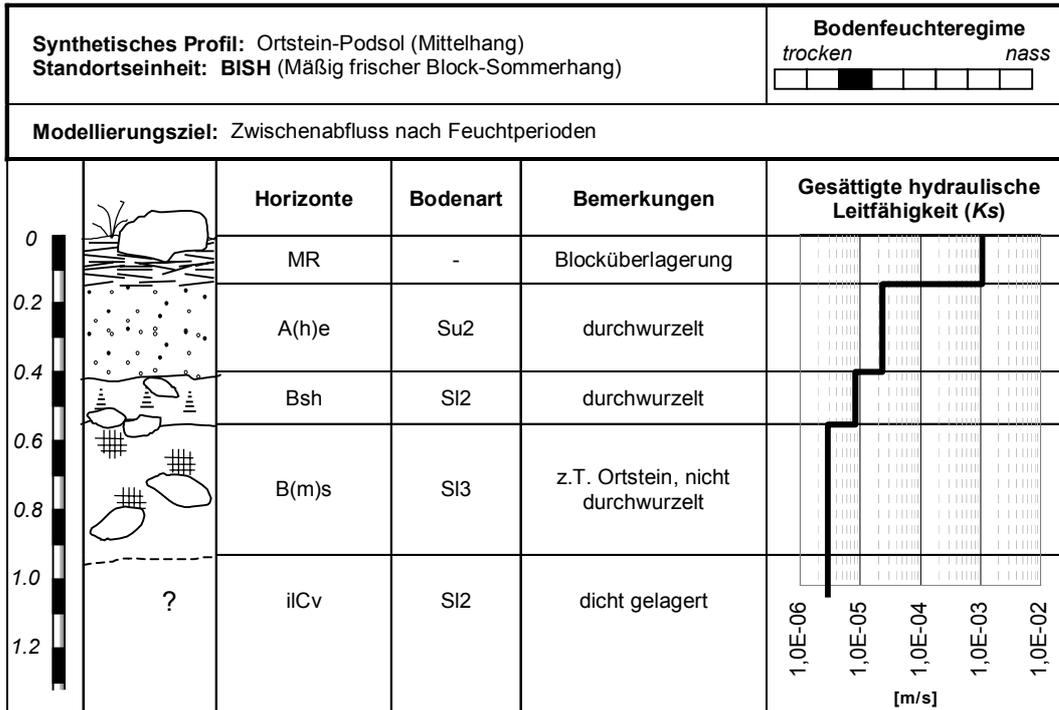


Abb. 134: Synthetisches Profil BISH als Grundlage für die Modellierung eines Standorts mit Zwischenabfluss

Profilbeschreibung: Das Profil beginnt mit einer 15 cm mächtigen, sehr gut durchlässigen organischen Auflage aus rohhumusartigem Moder (MR) bis Rohhumus. Darunter schließt sich ein locker gelagerter Eluvialhorizont aus Sand bis schwach lehmigem Sand (im Mittel Su2) an. Die Anreicherungszone lässt sich in zwei Horizonte gliedern: Der humusangereicherte, nur mäßig dichte Bsh-Horizont aus schwach lehmigem Sand ist nicht durchgängig ausgebildet. Durch die Anreicherung von Humus als Nährstoffträger ist er meist noch gut durchwurzelt. Der darunterliegende mächtige Sesquioxid-Anreicherungs-horizont B(m)s aus lehmigem Sand (Sl3) ist teilweise zu massigem Ortstein verfestigt und erlaubt kaum mehr das Eindringen von Wurzeln. Nach unten geht er allmählich in eine dicht gelagerte Sandsteinschuttdecke aus schwach lehmigem Sand (Sl2) über. Im gesamten Profil wird ein hoher Skelettgehalt von über 50 % angenommen.

Der deutlichste Sprung in der Leitfähigkeit tritt zwischen Humusauflage und Mineralboden auf. Zwischen Ahe und B(m)s ergibt sich ein Ks-Gradient von etwa einer Zehnerpotenz. Der Gradient verschärft sich noch durch die bei der Parametrisierung berücksichtigte Durchwurzlung bis zum B(m)s-Horizont. Die wichtigsten verwendeten pedohydrologischen Parameter zeigt Tab. 52. Weitere verwendete Parameter sind aus Anhang 5-2 ersichtlich.

Tab. 52: Wichtige pedohydrologische Parameter für das repräsentative Profil BISH (Ableitungen aus LGRB (1998))

Horizont	Tiefe	Ks	GPV	FK	FK/GPV
MR	0,15	1,0·10 ⁻³	80	40	0,50
Ahe	0,40	2,3·10 ⁻⁵	41	25,5	0,62
Bsh	0,55	8,1·10 ⁻⁶	39	27,5	0,71
B(m)s	0,95	2,9·10 ⁻⁶	30,5	23,5	0,8
ilCv	> 0,95	2,9·10 ⁻⁶	37	26	0,70

Tiefe: Horizonttiefe [m] Ks: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m s⁻¹]; GPV: Gesamtporenvolumen [%], FK: Feldkapazität [%], FK/GPV: relative Feldkapazität

Die Eigenschaften des Profils wurden den Knoten eines gleichmäßig geneigten Hang-segments mit 22° Gefälle zugeordnet. Wegen fehlender Daten wurden die Parameterwerte für den iCv-Horizont bis in 2 m Tiefe als konstant angenommen.

Der Hang wurde mit den in den Jahren 1997 bis 1999 gemessenen realen Niederschlägen beaufschlagt. Im Folgenden wird die Wirkung des Extremereignisses vom 28./29.10.98 (Tag 666/667) vorgestellt. Auf sehr feuchte Vorbedingungen fallen 52 mm Niederschlag in 4 Stunden. Die Niederschlagsganglinie geht aus Abb. 130 (Kap. 8.4.3.5) hervor. Weitere Randbedingungen für die Modellierung der Standortseinheit BISH sind aus Tab. 53 zu entnehmen.

Tab. 53: Randbedingungen für die Modellierung der Standortseinheit BISH

Simulationsziel:	Zwischenabfluss
Simulationsdauer:	3 a
Hangabmessungen:	Rechteckig Breite: 50 m Länge: 100 m
Profiltiefe:	2 m
Diskretisierung:	Tiefe: 0,05 m-Schritte Länge: 5 m-Schritte
Gefälle:	40 % (ca. 22°)
Vegetation:	Gras, Wurzeltiefe begrenzt auf 60 cm (Ortstein)

Ergebnisse: Abb. 135 zeigt ein Segment des synthetischen Hanges nach 666 Tagen Simulationsdauer. Dargestellt ist die relative Sättigung der Horizonte, gemessen an ihrem Gesamtporenvolumen. Zusätzlich wird die Größe der lateralen Flussdichte oberhalb des Ortsteinhorizonts durch Pfeile dargestellt. In den einzelnen Profilabschnitten ergibt sich folgendes Muster der Feuchte und der Flussdichten:

- Hohe relative Sättigung der organischen Auflage (um 0,7). Bei einer relativen Feld-

kapazität von 0,50 liegt damit viel freies Sickerwasser vor (vgl. Tab. 52)

- Geringere rel. Sättigung im Ahe-Horizont; meist kleiner als relative Feldkapazität (0,62 vgl. Tab. 53).
- Hohe bis vollständige Sättigung im Bereich des Ortsteins (Bsh- und B(m)s-Horizont). Flussdichten akkumulieren sich an der Horizontobergrenze von Segment zu Segment.
- Feuchte unterhalb des Ortsteins etwa im Bereich der relativen Feldkapazität (0,7)

Der *Ks*-Sprung im Bereich des Ortsteinhorizonts reicht demnach aus, um bei feuchten Vorbedingungen und starken Regenfällen Zwischenabfluss zu erzeugen. Die auftretenden Flussdichten am unteren Rand des synthetischen Hanges sind in Abb. 136 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der entstandene Zwischenabfluss im Vergleich zum Oberflächenabfluss um zwei Größenordnungen geringer ausfällt. Der Zwischenabfluss setzt etwa drei Stunden vor dem Oberflächenabfluss ein und erreicht eine maximale Flussdichte von $q = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Die Ganglinie des Zwischenabflusses zeigt im Gegensatz zum Oberflächenabfluss ein Nachlaufen über etwa einen Tag. Dieses Verhalten entspricht den Geländebeobachtungen von Wasseraustritten an Hanganschnitten: diese fallen in aller Regel ein bis zwei Tage nach einem Ereignis wieder trocken.

Allerdings lässt sich Zwischenabfluss an vielen Hängen auch schon bei weniger extremen Gebietsfeuchten beobachten. Um auch in diesen Fällen Zwischenabfluss zu generieren, muss die für den Ortsteinhorizont angenommene Durchlässigkeit von $K_s = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ noch unterschritten werden. Ein als realistisch anzunehmender Wert von 10^{-6} m s^{-1} entspricht etwa dem von STAHR (1973) festgestellten häufigs-

ten Wert von Bs-Horizonten im Nordschwarzwald.

Untersuchungen mit einem zweiten Parametersatz nach CARSEL & PARRISH (1988) zeigten, dass im gesamten Simulationszeitraum weder Zwischenabfluss oder Oberflächenabfluss erzeugt wird, wenn die Lagerungsdichte bei der Abschätzung bodenhydraulischer Parameter

nicht berücksichtigt wird (ZEHE & WALDENMEYER 2001). Damit erweist sich die aus der FSK ableitbare und in Dünnschliffuntersuchungen bestätigte Texturinformation als wesentliche Information für eine realitätsnahe Modellparametrisierung.

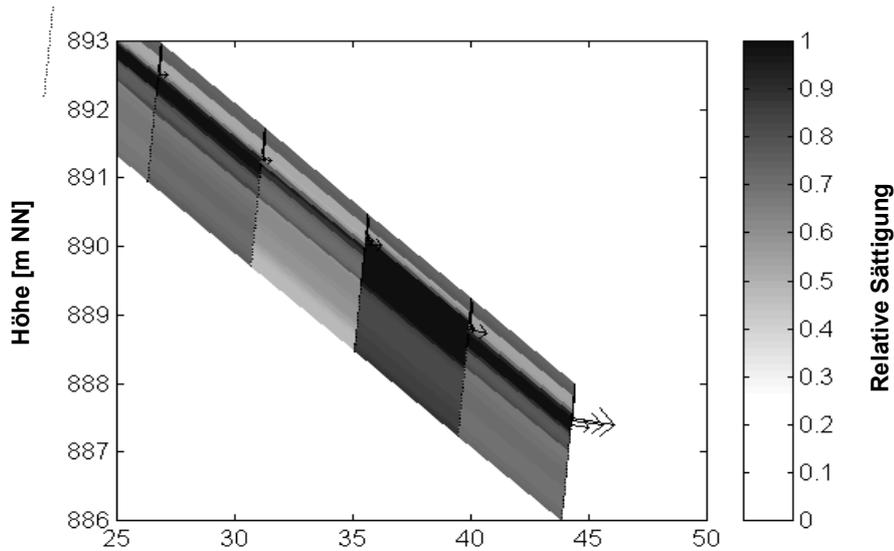
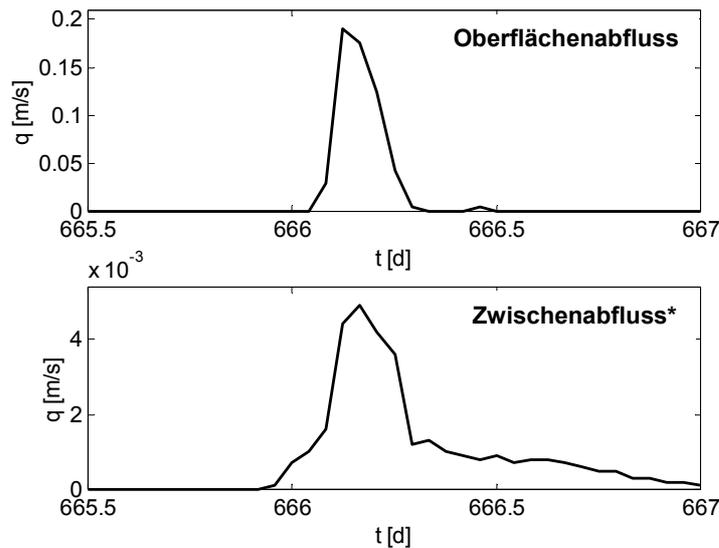


Abb. 135: Hangsegment mit akkumulierendem Zwischenabfluss nach 666 Tagen Simulationsdauer. Die Pfeillängen stellen die simulierten Flussdichten q dar.



*Die Ordinaten sind unterschiedlich skaliert!

Abb. 136: Simulierte Flussdichten q für Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss in der Zeit t in Tagen $[d]$ seit t_0 .

8.5 Flächen mit Infiltration (INF)

Im Folgenden werden die Standortseinheiten mit dominierender Infiltration (INF) zunächst im Überblick und dann am Einzelbeispiel beschrieben. Den Standorten ist gemeinsam:

- Mittlere Ökologische Feuchte (meist mäßig frisch)
- Geringer Ks-Sprung zwischen Ober- und Unterboden
- Meist flachere bis mittel geneigte Hänge

Infiltrationsstandorte spielen für die schnelle Abflussbildung praktisch keine Rolle und sind daher hier von untergeordnetem Interesse. Die Flächen können jedoch mit anderen Hydrotoptypen lateral verknüpft sein.

8.5.1 Standortseinheiten und Böden

Flachhänge: In besonders guter Ausprägung finden sich die genannten Eigenschaften bei den Forstlichen Standortseinheiten in Tab. 54.

Tab. 54: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der flacheren Lagen mit guter Infiltration

FSE	Langform	Profil-Bsp.
IS	Mäßig frischer lehmiger Sand	-
SFH	Mäßig frischer sandiger Flachhang	304
SFH-	Mäßig trockener sandiger Flachhang	11 (untyp.), 13
sIFH	Mäßig frischer sandig-lehmiger Flachhang	-

Zumeist handelt es sich um mehr oder weniger podsolige Braunerden, die gelegentlich pseudovergleyt sein können (Profile 11 und 13). Profil P11 stellt dabei einen stark von Hangwasser beeinflussten Sonderstandort dar.

Steilere Hänge: In den steileren Einheiten des Hydrotoptyps sind die Böden in der Regel stärker podsoliert als auf den Flachlagen: Es dominieren Braunerde-Podsole. Aufgrund der et-

was stärkeren Schichtung und der höheren Hangneigung kann in den Einheiten in Tab. 55 untergeordnet Zwischenabfluss auftreten. Stärkere Ortsteinbildungen oder stauende Bändchen kommen in diesen Einheiten jedoch nicht vor.

Tab. 55: Forstliche Standortseinheiten (FSE) der stärker geneigten Lagen mit Infiltration und untergeordnetem Zwischenabfluss

FSE	Langform	Profil-Bsp.
SWH	Mäßig frischer sandiger Winterhang	29
SSH+	Frischem sandigem Sommerhang	-
SSH	Mäßig frischer sandiger Sommerhang	-
BIWH	Mäßig frischer Block-Winterhang	7, 103

8.5.2 Intensivmessstandort Infiltration (P 2)

Um einen Standort mit dominierender Infiltration exemplarisch studieren zu können, wurde in der Standortseinheit SFH (Mäßig frischer sandiger Flachhang) ein Intensivmessprofil (P 2, Lageplan im Anhang 1-1) auf einer Hangverebnung ergraben und mit TDR-Sonden und Tensiometern bestückt (Kap. 6.2.6).

8.5.2.1 Standortsbeschreibung

Das Messprofil P 2 befindet sich im mittleren Talabschnitt des Dürreychbachs unterhalb des Nordteils des Seemißkars. Der Hang ist hier im nördlichen, breit-rinnenartig entwickelten Teil des Zwillingskars durch einzelne kleine Hangverebnungen und Blockansammlungen morphologisch gegliedert. Das Profil liegt im Bereich einer solchen Verebnung, unterhalb der undeutlich ausgeprägten Karnische in einem 60-80-jährigen Fichtenbestand. Von Norden läuft eine schmale Blockhalde zungenartig in die Verebnung hinein und setzt sich möglicherweise im Untergrund fort.

Infolge der Rinnenlage ist an diesem Standort bei sehr nassen Gebietszuständen lateraler Zufluss möglich und auch in Form von Oberflächenabfluss bzw. Erosionsspuren beobachtet worden. In der Blockhalde oberhalb des Profils konnte nach Nassperioden (30.10.1998, 3.03.99) bodeninnerer Abfluss im Sinne von pipe flow (→Glossar) durch Gluckern diagnostiziert werden – eine Methode, wie sie auch von ATKINSON (1980) für das britische Hochland beschrieben wird. Nach den Extremniederschlägen um den 28.10.1998 waren zudem am Boden aufgestellte Hellmann-Niederschlags-Totalisatoren von Oberflächenabfluss umgeworfen worden. Etwa im Bereich des Profils P 2 infiltriert der Oberflächenabfluss schließlich. Abb. 137 zeigt zur Illustration die im Bereich der Tiefenlinie festgestellten flächenhaften Erosionsspuren. Zumeist handelte es sich um Feinmaterialabspülungen und niedergedrückte Pflanzenbestände.

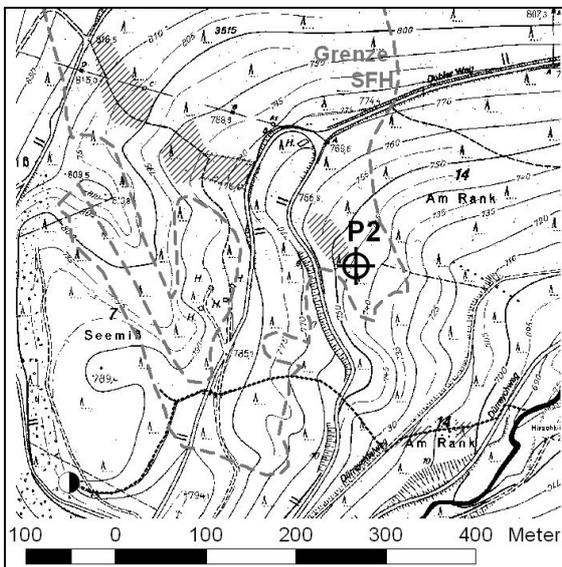


Abb. 137: In den schraffierten Bereichen wurden Erosionsspuren festgestellt.

8.5.2.2 Vegetation und Feuchte

Die zuvor beschriebene Zone mit gelegentlichem Oberflächenabfluss wird auch von der Vegetation in der Krautschicht nachgezeichnet. Es handelt sich im Wald überwiegend um schütterere *Luzula-sylvatica*-Dominanzbestände (Abb. 138) sowie darüber hinaus um eine kleine Wiesenfläche. Die Wiesenfläche (V 40) ist durch *Juncus effusus* (Flatter-Binse) *Cirsium palustre* (Sumpf-Kratzdistel) und *Ranunculus repens* (Kriechender Hahnenfuß) schwach als Feuchtwiese gekennzeichnet (vgl. Vegetationstabelle Anhang 6-2).

Die *Luzula-sylvatica*-Dominanzbestände erreichen bei weitem nicht jene hohen Deckungswerte wie sie in der Tiefenlinie der Hirschklänge auftreten (vgl. Kap. 8.2.3). Diese geringe Deckung wird auf den vergleichsweise seltenen Oberflächenabfluss in diesem Bereich zurückgeführt. Der Vegetationsbestand enthält ansonsten keine Feuchtezeiger (vgl. V 41, Vegetationstabelle Anhang 6-3). Daher werden die Bestände zur Unterscheidung von den Rinnen- und Quellflächen als *Luzula*-Hangflächen bezeichnet (in der Vegetationstabelle als *Luzula sylvatica* -Bestände fast ohne Feuchtezeiger bezeichnet). Wie das räumliche Muster in der Abb.138 beispielhaft zeigt, kommt diesen Flächen jedoch immer noch eine Indikatorfunktion für den oberflächennahen Abfluss zu.

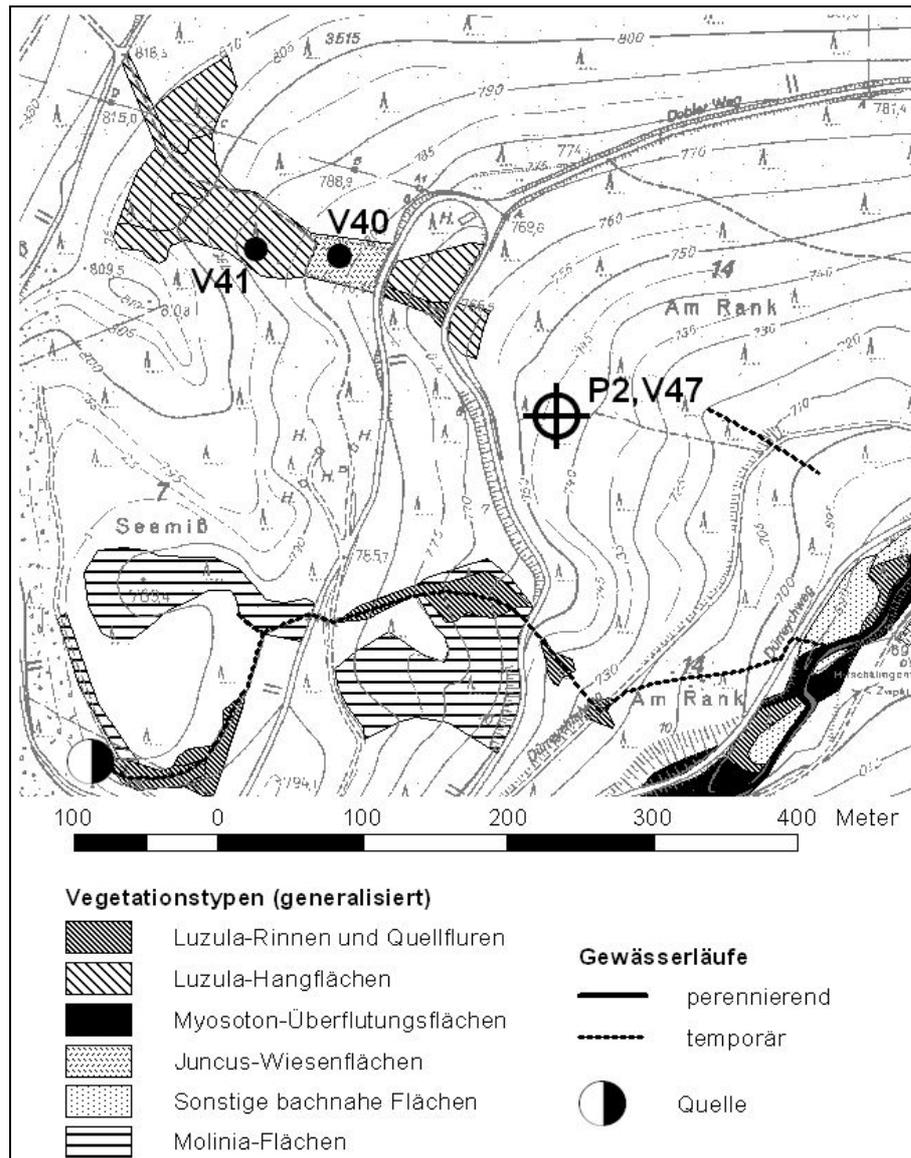


Abb. 138: Lageplan und Vegetationstypen im Bereich von Intensivmessprofil P 2, Vegetationsaufnahmepunkte V 40, V 41 und V 47 (vgl. Vegetationstabelle Anhang 6-3)

Die Vegetationsaufnahme V 47 am Messstandort selbst dokumentiert im Durchschnitt frische bis etwas feuchte Verhältnisse (Mittlere Feuchtezahl 5,8). *Cardamine flexuosa* (Waldschaumkraut), *Circaea intermedia* (Mittleres Hexenkraut) und *Stellaria uliginosa* (Bachstermiere) weisen auf Sickerfeuchte und bewegtes Bodenwasser hin (vgl. Anhang 6-1). Vereinzelt auf Wechselfeuchte deutende Arten sind *Carex distans* (Entferntährige Sumpfsagge) und *Ranunculus repens* (Kriechender

Hahnenfuß). Die Vegetationsaufnahme V 47 wurde daher zu den *Luzula-sylvatica*-Beständen mit Feuchtezeigern gestellt (vgl. Vegetationstabelle Anhang 6-3), die sich jedoch durch die geringere Feuchte von den sonstigen Beständen der Quellfluren abhebt. Die Artenkombination aus Frischezeigern einerseits und deutlichen Feuchtezeigern andererseits spiegelt gut die ambivalenten Verhältnisse am Standort wieder.

Tab. 56: Vegetationsaufnahme V 47 am Messprofil P 2 mit Feuchtezahlen (ELLENBERG et al. 1992). Aufnahme­fläche: 30 m², Gesamtdeckung der Krautschicht: 70 %, einzelne Blöcke

	Artname	Feuchte
2b	<i>Oxalis acetosella</i>	5
2a	<i>Luzula sylvatica</i>	5
2a	<i>Luzula luzuloides</i>	5
2a	<i>Agrostis tenuis (=capillaris)</i>	X
2m	<i>Senecio fuchsii</i>	5
2m	<i>Circaea intermedia</i>	7
2m	<i>Cardamine flexuosa</i>	8
2m	<i>Avenella flexuosa</i>	X
1	<i>Digitalis purpurea</i>	5
1	<i>Carex distans</i>	6~
1	<i>Galium hircynicum (=saxatile)</i>	5
1	<i>Mycelis muralis</i>	5
1	<i>Rubus idaeus</i>	X
1	<i>Abies alba</i>	X
+	<i>Vaccinium myrtillus</i>	X
+	<i>Stellaria uliginosa</i>	8
+	<i>Stellaria media</i>	X
+	<i>Picea abies</i>	X
+	<i>Geranium robertianum</i>	X
+	<i>Galeopsis tetrahit</i>	5
+	<i>Epilobium montanum</i>	5
+	<i>Dryopteris dilatata</i>	6
+	<i>Athyrium filix-femina</i>	7
r	<i>Chamaecytisus hirsutus</i>	4
r	<i>Ranunculus repens</i>	7~
Ungewichteter Mittelwert		5,8

8.5.2.3 Profilbeschreibung

Der beschriebene laterale Wasserzufluss wirkt nur während kurzer Phasen auf den Standort ein. Hydromorphe Merkmalen sind demzufolge im gesamten Profil nicht nachzuweisen. Der gelegentliche Oberflächenabfluss führt jedoch Feinmaterial mit sich und bildet so ein Kolluvium auf der Hangverebnung.

Unter einer nur 5 cm mächtigen Moderauflage findet sich ein schwach korngebleichter A(e)h-Horizont aus stark lehmigem Sand (SI4), der unscharf in einen A(e)h-M-Horizont aus tonigem Sand übergeht (vgl. Abb 139). Hoher Humusgehalt, Holzkohlestückchen und fehlendes Skelett weisen auf die kolluviale Entstehung der Horizonte hin. Die Holzkohle ist auf

die historische, im Nordschwarzwald verbreitete Köhlerei zurückzuführen (Kap. 4.7).

Unterhalb von ca. 25 cm Tiefe schließen sich zwei verbrauchte Unterbodenhorizonte mit ca. 70 % Steinen (fX) und Blöcken (mX) an. Der extrem hohe Skelettgehalt macht eine kolluviale Entstehung unwahrscheinlich. Offenbar setzt sich die nördlich anschließenden Blockhalde im Untergrund fort. Andererseits enthalten die Unterbodenhorizonte beträchtliche Humusmengen sowie Spuren von Holzkohle, wie sie für Kolluvien typisch sind. Allochthones kolluviales Feinmaterial könnte die Zwischenräume im Bereich der Hangverebnung z.T. verfüllt haben und autochthon verbraunt sein. Um diese pedogenetische Zwischenstellung auszudrücken, werden die Horizonte – abweichend von der gültigen Nomenklatur (AK BODENSYSTEMATIK 1998) – als II M-Bv1 und II M-Bv2 bezeichnet. Die beiden Horizonte unterscheiden sich durch den nach unten zunehmenden Tongehalt und den abnehmenden Humusgehalt. Der Bodentyp kann zusammenfassend als schwach podsolige Kolluvisol-Braunerde beschrieben werden.

Das Profil ist trotz des hohen Skelettgehalts bis in 70 cm Tiefe gut durchwurzelt und weist besonders im Unterboden ausgeprägte Wurzelröhren auf. Die hohe Makroporosität sowie der Skelettgehalt müssen die Ursache für die äußerst hohe Infiltrationsfähigkeit des Standorts sein: Eine sinnvolle Messung mit dem Doppelringinfiltrometer war hier aufgrund der hohen Sickerrate nicht möglich. Eine Einschränkung der Infiltrationsfähigkeit durch das Anstehende kann nach den Ergebnissen der refraktionsseismischen Untersuchungen ausgeschlossen werden: Die Tiefe des Felshorizonts wird auf mindestens 10 m geschätzt (Anhang 7-4).

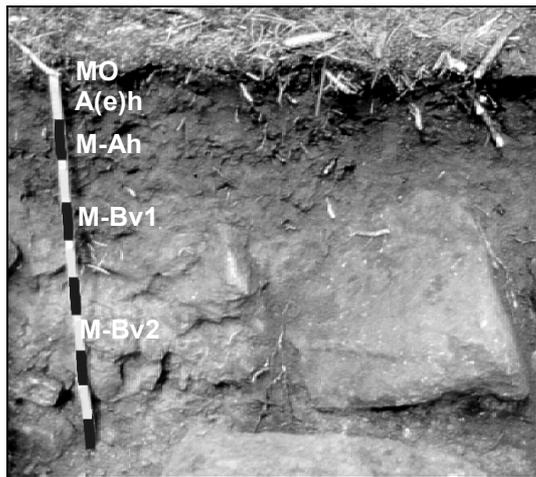


Abb. 139: Intensivmessprofil P 2. (vgl. Erläuterungen im Text sowie Abb. 141)

8.5.2.4 Bodenfeuchtemessungen

Nachfolgend werden die Bodenfeuchte- und Saugspannungsmessungen am Messstandort P 2 zunächst im Jahresüberblick vorgestellt. Anschließend werden einzelne Witterungs- bzw. Gebietszustände herausgegriffen. Die Anordnung der ausgewerteten Messsonden im Profil geht aus Abb. 140 hervor.

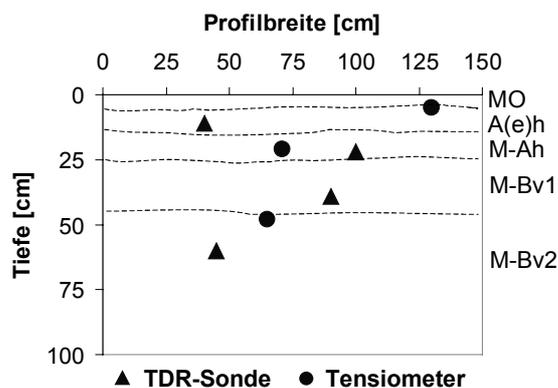


Abb. 140: Anordnung der TDR-Sonden und Tensiometer im Messprofil 2.

Jahresüberblick: Abb. 142 zeigt den Verlauf der Niederschläge und der Bodenfeuchte am Messprofil 2 vom 1.03. bis 15.11.1998 in vier Tiefen, getrennt nach Oberboden (11 und 22 cm) und Unterboden (39 und 60 cm). Auswahlkriterien für diese Periode waren:

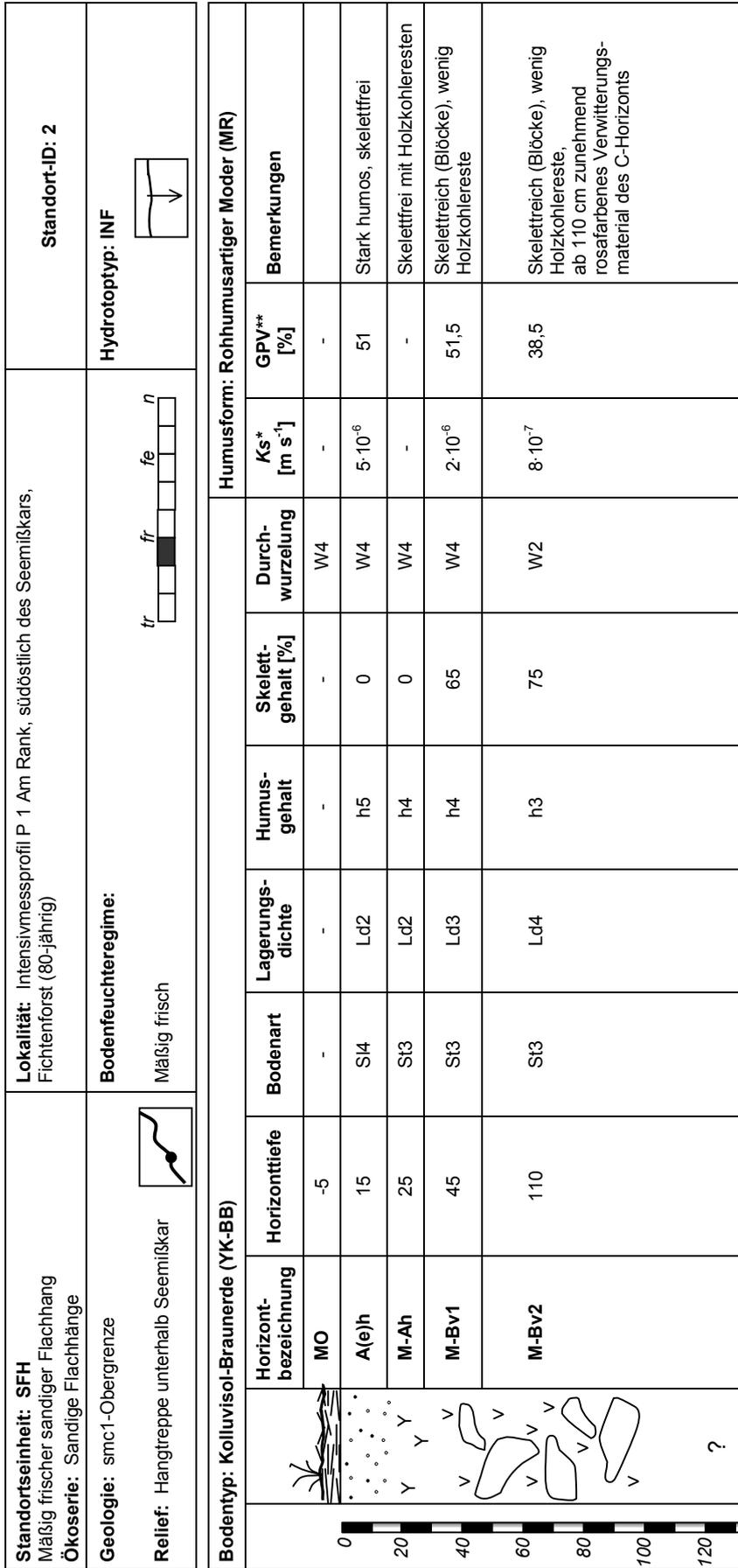
- Weitgehendes Fehlen von Schneeniederschlägen
- Ausschluss von Werten, die von Messdrift nach dem Extremereignis Ende Oktober 1998 beeinflusst waren.

Die Zeitreihe beginnt mit auffälligen Extrema der Feuchtwerte in 22 cm Tiefe (16.03.) sowie in 39 cm Tiefe (9.03. und 16.03.). Die Wassergehalte liegen mit bis zu 65 Vol-% auch bei Berücksichtigung des hohen Humusanteils deutlich über den zu erwartenden Gesamtporenvolumina für die Bodenarten (Abb. 141). Die Maximalwerte (vgl. Tab. 56) werden gegen Ende der Zeitreihe erreicht.

Tab. 57: Deskriptive Statistik der Bodenfeuchtemessungen [Vol-%] am Messprofil 2 vom 1.03. bis 15.11.1998

Tiefe	Mittelwert	Standardabweichung	Max.	Min.
11 cm	26,5	6,6	80,8	9,7
22 cm	31,2	5,6	70,4	15,2
39 cm	36,1	3,9	59,0	30,2
60 cm	35,5	2,3	42,8	30,4

Diese hohen Werte können Makroporen – etwa den zahlreichen Wurzelröhren – zugeschrieben werden, die nur unter extrem feuchten Bedingungen mit Wasser gefüllt sind. Diese Bedingungen sind im März 1998 durch Schneeschmelze sowie im Oktober 1998 durch Extremniederschläge gegeben. Nur zu diesen Terminen wurden zugleich negative Saugspannungswerte und somit Überstau in 21 cm und 48 cm Tiefe registriert. Möglicherweise ist die nach den Extremniederschlägen im Oktober 1998 beobachtete Drift zu höheren Messwerten eine Folge von bodeninneren Erosionserscheinungen durch intensive Makroporenflüsse (Subrosion → Glossar).



Angabe der Klassen gemäß AG BODEN (1994). * Ks abgeleitet nach AG BODEN (1994:305) ** GPV abgeleitet nach AG BODEN (1994:297, 300)

Abb. 141: Bodenkundliche Standortaufnahme des Intensivmessprofils P 2 (vgl. auch Anhang A4)

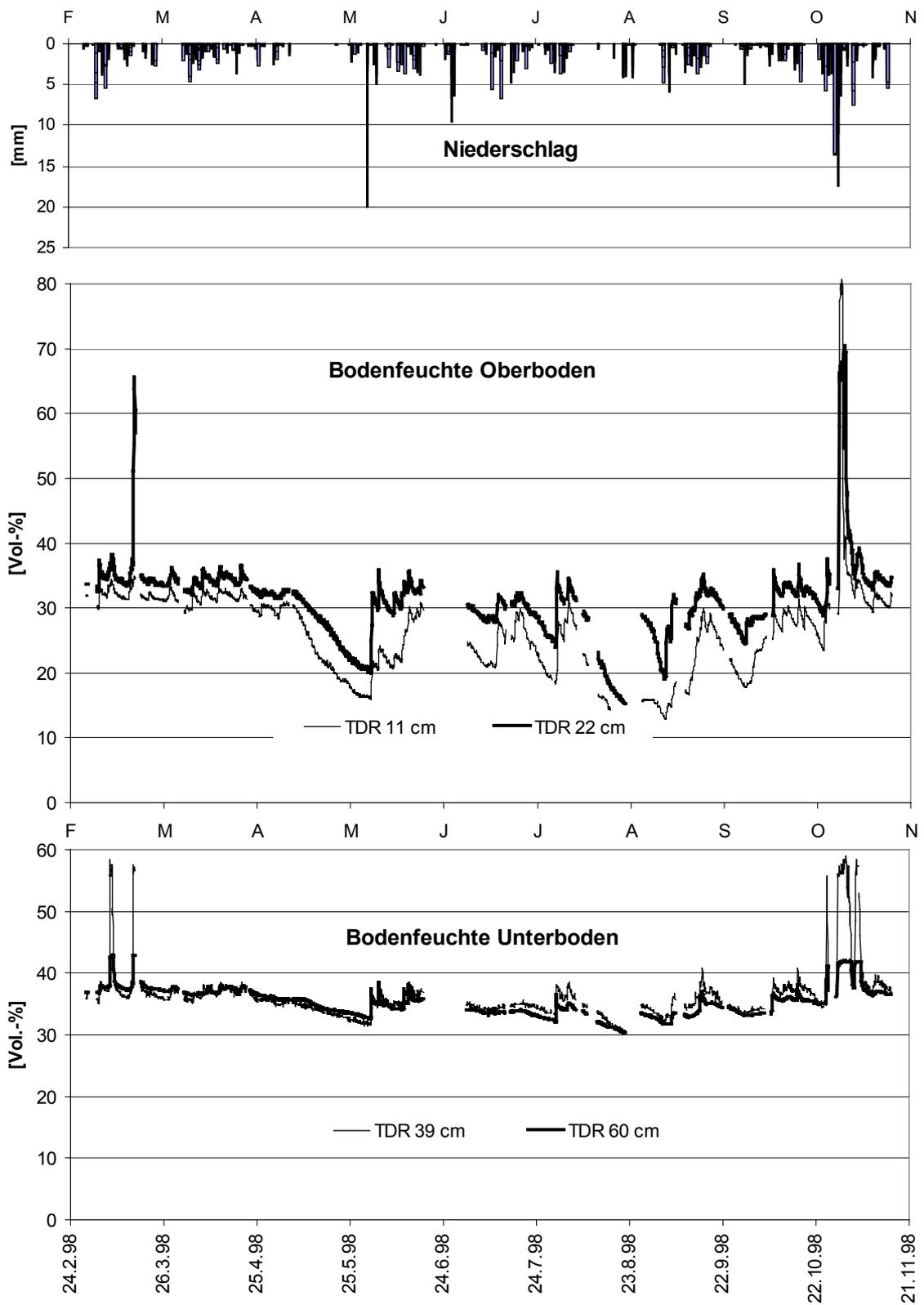


Abb. 142: Verlauf der Niederschläge und der Bodenfeuchte im Ober- und Unterboden des Messprofils 2 im Zeitraum vom 1.03. bis 15.11.1998

Extremereignis: Im Verlauf des Jahres deuten sich Sättigung anzeigende Werteplateaus, wie sie bei Sättigungsflächen auftreten (vgl. Kap. 8.3.3.3), lediglich während der genannten Extremzustände an. Gut sichtbar ist dies Ende Oktober 1998 (Abb. 143). Für das Abflussergebnis wurde am 28.10.1998 ein Abflussbeiwert von 0,368 nach 247,9 mm Gebietsniederschlag bestimmt (CASPER 2002). Es entsprach dem größten gemessenen Hochwasser (HHQ) im Dürreychgebiet mit einer Jährlichkeit von > 100 a.

Bereits zwei Stunden nach Einsetzen des intensiven Niederschlagspeaks am 28.10.1998 werden in allen vier Tiefen Plateauwerte der Bodenfeuchte auf Niveau der Maximalwerte erreicht (vgl. Tab. 56). Gleichzeitig sinkt die Saugspannung auf Werte um $pF = -3,5$ was einem Überdruck von 32 m Wassersäule entspricht. Wie bereits beim Intensivmessprofil P 1 diskutiert wurde (Kap. 8.4.3.5), baut sich auch hier durch lateralen Zufluss möglicherweise ein hydrostatischer Druckgradient auf (Piston Flow-Effekt, →Glossar). Für diesen Effekt sprechen der ungewöhnliche artesische Return Flow an Makroporen oder Pipes, der in der Verebnung nach extrem feuchten Gebiets-

zuständen beobachtet wurden (30.10.1998, 3.03.99).

Die schnelle Reaktion der Sonden auf den Niederschlagsimpuls kann also durch Druckreaktion in Verbindung mit Makroporenflüssen erklärt werden. In jedem Fall liegt die beobachtete Reaktionsgeschwindigkeit mehrere Größenordnungen über dem Erwartungswert für die Substratdurchlässigkeit (vgl. Abb. 140). Dies veranschaulicht die folgende überschlägige Rechnung: Legt man eine mittlere Matrixdurchlässigkeit für tonige Sande (St3) von $2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ zugrunde (AG BODEN 1994:305), so wäre eine Feuchtereaktion in 60 cm Tiefe bei ausschließlicher Matrixsickerung erst nach vier Tagen zu erwarten.

Nach Abklingen der Niederschläge um den 31.10.1998 steigt die Saugspannung wieder auf positive Werte an. Allerdings reichen aufgrund der hohen Vorsättigung bereits kleine Niederschläge aus, um die Werte wieder in den negativen Bereich zu bringen. Die Bodenfeuchte nimmt währenddessen gleichmäßig treppenförmig vom obersten zum untersten Horizont ab.

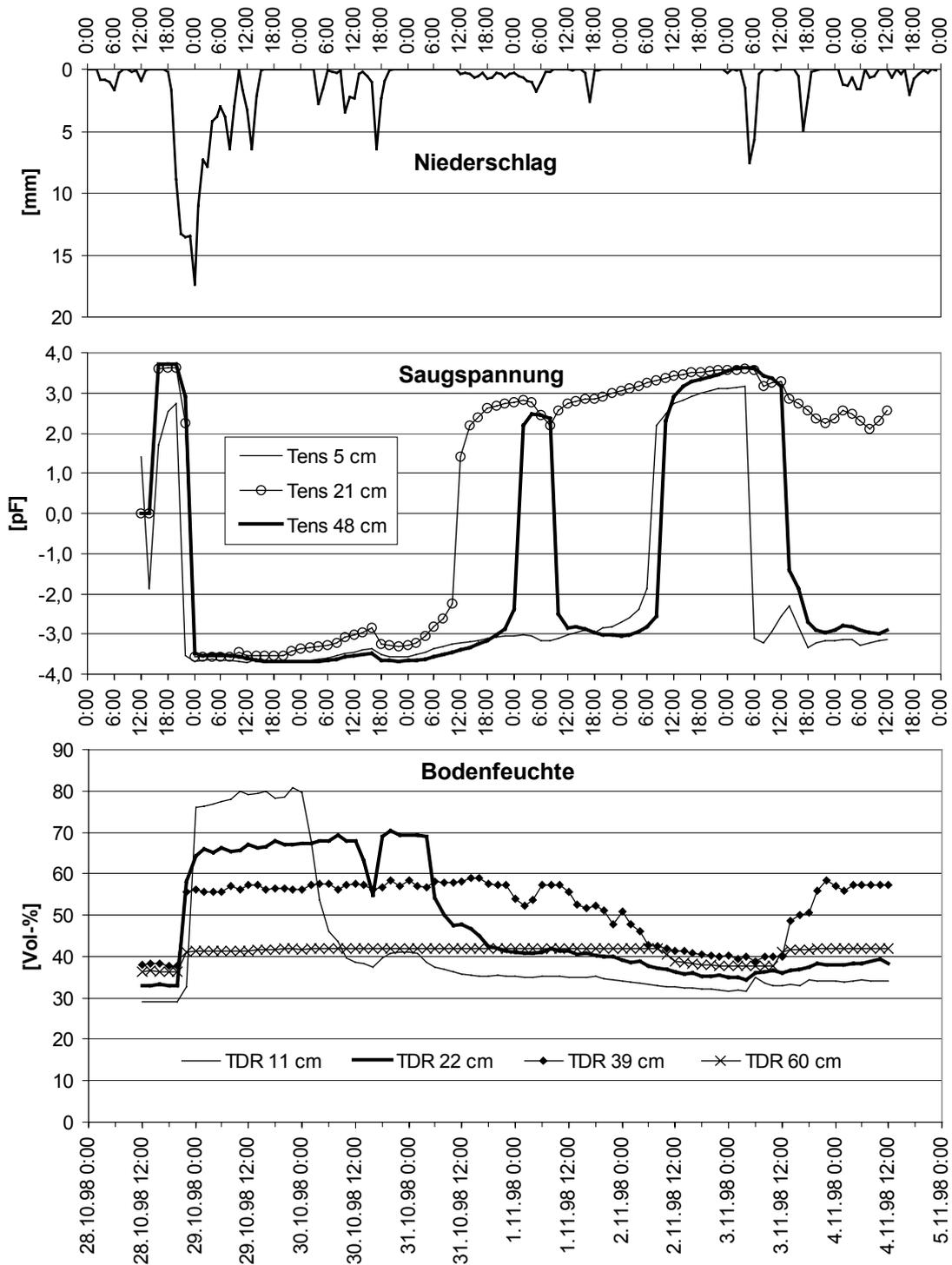


Abb. 143: Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil 2 vom 28.10. bis 5.11.1998 um das extreme Niederschlagsereignis vom 29.10.

Advectives Ereignis: Unter weniger feuchten Bedingungen ist der Standort von Infiltration dominiert. Abb. 144 zeigt eine einwöchige Niederschlagsperiode im September 1998. Für das Abflussereignis wurde am 14.9.1998 ein Abflussbeiwert von 0,077 nach 60,7 mm Gebietsniederschlag bestimmt (CASPER 2002). Nur das Tensiometer an der Untergrenze der organischen Auflage in 5 cm Tiefe zeigt zeitweise Überstau an. Möglicherweise ist es hier durch laterales Zuschusswasser zu Oberflächenabfluss oder Abfluss innerhalb der Humusaufgabe gekommen. Die absoluten Werte des oberflächennächsten Tensiometers (pF-Werte bis -3,5) müssen infolge möglicher Messwertverfälschung durch Austrocknung mit Vorbehalt interpretiert werden.

Die Saugspannung in 21 und 48 cm Tiefe sinkt dagegen nur auf Werte bis $pF = 2,5$ ab. Dies entspricht etwa der Feldkapazität.

Die Bodenfeuchtwerte beginnen unterhalb ihrer jeweiligen Mittelwerte (vgl. Tab. 56), also bei relativ geringer Vorfeuchte. Im Verlauf der Zeitreihe überschreiten sie langsam die Mittelwerte, bleiben jedoch weit unterhalb der Maxima. Die TDR-Sonden in 11 und 22 cm Tiefe reagieren auf den Niederschlagsimpuls am 10.09.1998 mit wenigen Stunden Verzögerung; die Sonde in 39 cm Tiefe reagiert nach weiteren mäßigen Niederschlägen geringer Intensität drei Tage später, die Sonde in 60 cm Tiefe vier Tage später. Die Reaktionszeiten entsprechen der überschlägig aus der Bodenart abgeschätzten Matrixsickergeschwindigkeit (s.o.). Hier kann mithin ein langsamer Infiltrationsvorgang angenommen werden, der weitgehend ohne die Beteiligung von Makroporen und lateralem Zufluss stattfindet. Der Standort hat in diesem Zeitraum keinen Beitrag zur schnellen Abflussbildung geleistet.

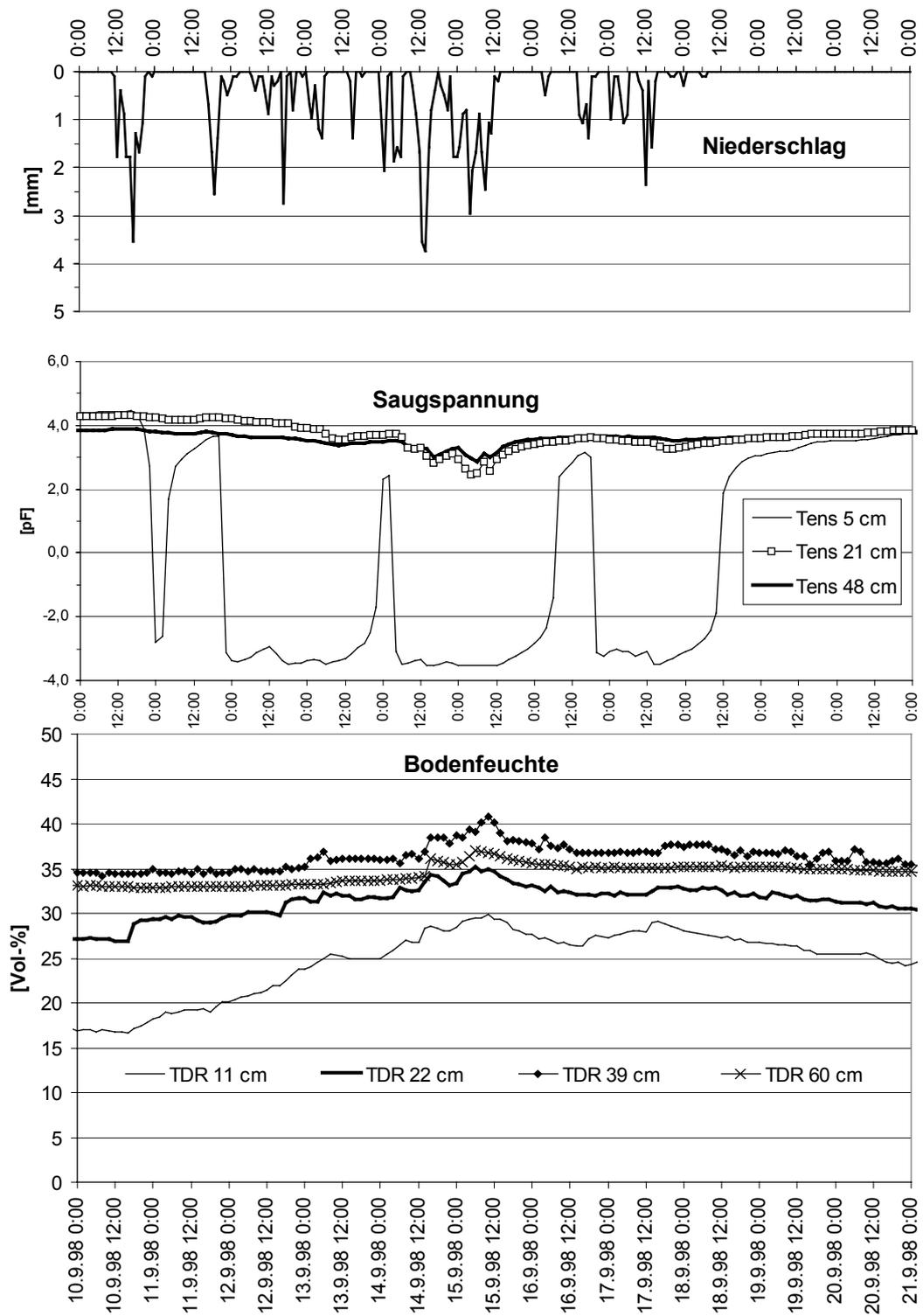


Abb. 144: Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil 2 vom 10.09. bis 21.09.1998

Konvektives Ereignis: Abb. 145 zeigt den scharfen Niederschlagsimpuls und die Reaktion der Tensiometer und TDR-Sonden am 31.05.1998. Für das Ereignis vom 31.05.1998 wurde trotz der hohen Intensität von bis zu 20 mm h^{-1} und 30 mm Niederschlagshöhe ein Abflussbeiwert von nur 0,006 ermittelt (CASPER 2002). Verantwortlich dafür sind die trockenen Vorbedingungen: Die Bodenfeuchtwerte in allen Tiefen, bezogen auf den Messzeitraum, liegen deutlich unterhalb des Mittelwertes (vgl. Tab. 56).

Bemerkenswert ist das sofortige Ansteigen der Bodenfeuchte auf mittlere Werte in allen Tiefen. Diese spontane Reaktion kann ausschließlich durch ein äußerst wirksames Makroporensystem erklärt werden. Eine Reaktion durch Druckübertragung scheidet aufgrund der ungesättigten Verhältnisse aus. Die Messungen bestätigen damit die hohe Infiltrations-

leistung des Standorts. Die Entwicklung der Saugspannungswerte fällt aufgrund der geringen Vorfeuchte sehr moderat aus. Während die Saugspannung in 21 cm und in 48 cm ebenfalls fast ohne Verzögerung reagieren, zeigt sich beim obersten Tensiometer erst nach drei Stunden eine unerwartet schwache Reaktion. Benetzungswiderstände der Streuauflage (vgl. Kap. 8.1) sind zwar denkbar, jedoch muss nach Ende der Trockenperiode auch eine Messwertverfälschung durch Lufteintritt ins Tensiometerrohr in Betracht gezogen werden.

Am 2./3.06. reagieren die Messsonden auf einen Niederschlagsimpuls mit einer Intensität von nur 5 mm h^{-1} prinzipiell in gleicher Weise. Dabei sinkt der Saugspannungswert in 5 cm Tiefe jedoch ebenso spontan ab auf niedrige Werte ($pF = -3,3$, mit Vorbehalt s.o.).

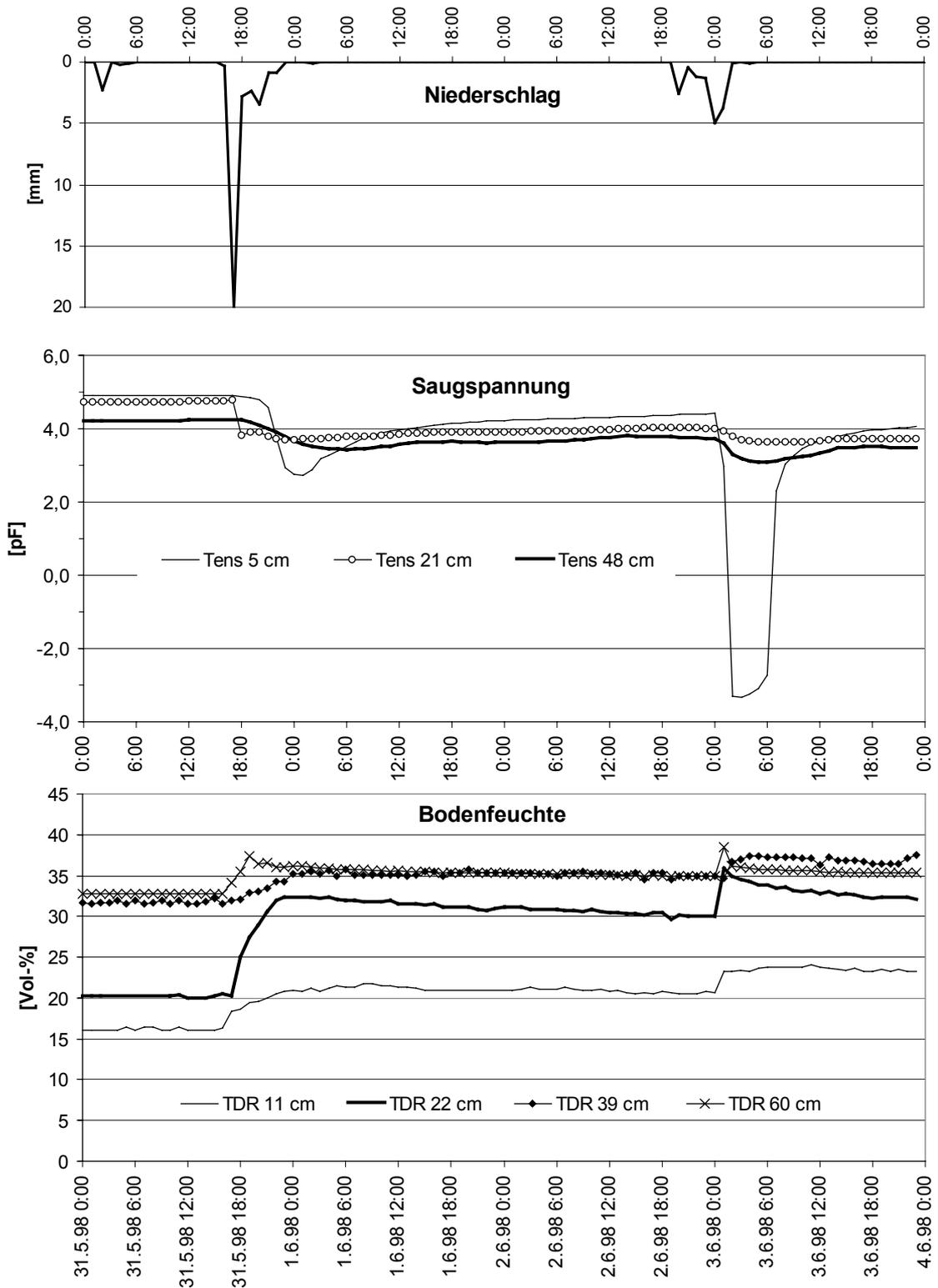


Abb. 145: Niederschlag, Saugspannungs- und Bodenfeuchteverlauf am Messprofil P 2 nach einem konvektiven Ereignis vom 31.5. bis 3.06.1998.

Zusammenfassende Charakterisierung: Aus dem Vergleich der Ereignisse kann für das Verhalten am Messstandort P 2 geschlossen werden:

- Dominante Matrixsickerung bei geringen Intensitäten und langsamer Auffeuchtung
- Dominante Infiltration über Makroporen bei höheren Niederschlagsintensitäten
- Dominanter lateraler Zufluss durch pipe flow mit vermuteter Druckübertragung bei extrem feuchten Bedingungen

8.5.2.5 Vergleich mit den Regionalisierungsansätzen

Im Folgenden werden die Untersuchungen am Messprofil P 2 mit den Regionalisierungsansätzen FSK-Regelwerk zur Hydrotopausgliederung, Interflow-Index und Gewichteter Topographischer Index verglichen.

FSK-Regelwerk: Die Standortseinheit am Messprofil P 1 SFH (Mäßig frischer sandiger Flachhang, vgl. Abb. 137) wurde dem Hydrotopotyp Infiltrationsflächen (INF) zugeordnet (vgl. Kap. 7, Tab. 24). Wie die Standort- und Bodenfeuchteuntersuchungen gezeigt haben, ist diese Zuordnung für mittlere Gebietszustände auch auf der Profilskala zutreffend. Das reliefbedingte Sonderverhalten bei extremen Gebietszuständen kann und soll durch das FSK-Regelwerk nicht abgebildet werden.

Interflow-Index: Die Standortseinheit SFH gehört zu den Einheiten mit den niedrigsten Schichtungsquotienten. Die Werte des Interflow-Index werden dadurch im Bereich des Messprofils und seinem lokalen Einzugsgebiet auch bei höheren Hangneigungen nur selten größer als $I_{pot} = 0,1$. Die potenzielle Zwischenabflussaktivität wird damit als sehr gering eingestuft.

Gewichteter Topographischer Index: Abb. 146 zeigt, dass der laterale Wasserzu-

fluss am Messprofil P 2 ganz überwiegend durch Abflusskonzentration zustande kommt: Die hohen Indexwerte zeichnen die Tiefenlinien der breiten Rinne nach, in denen die Entstehung von Oberflächenabfluss wahrscheinlich ist. Schmale Plateaulagen mit höherer Ökologischer Feuchte (nordwestlich außerhalb des Kartenausschnitts) verstärken zusätzlich die Fließakkumulationsbeträge. Das Messprofil P 2 liegt im Bereich des lokalen Hauptfließwegs mit Indexwerten zwischen 7 und 8 und macht somit den lateralen Wassereinfluss und die kolluviale Bodenentwicklung verständlich. Die kartieren Erosionsspuren (gestrichelt eingefasst) entsprechen in ihrer Lage ebenfalls gut den Zellen mit hohen Indexwerten. Der parallel verlaufende Nebenfließweg zeigt dagegen keine Erosionsspuren. Dies ist konsistent mit den niedrigeren Indexwerten zwischen 6 und 7. Zusätzlich wird die Abflusskonzentration auf dem Hauptfließweg durch die ungünstige Wegführung in Hangfallrichtung begünstigt

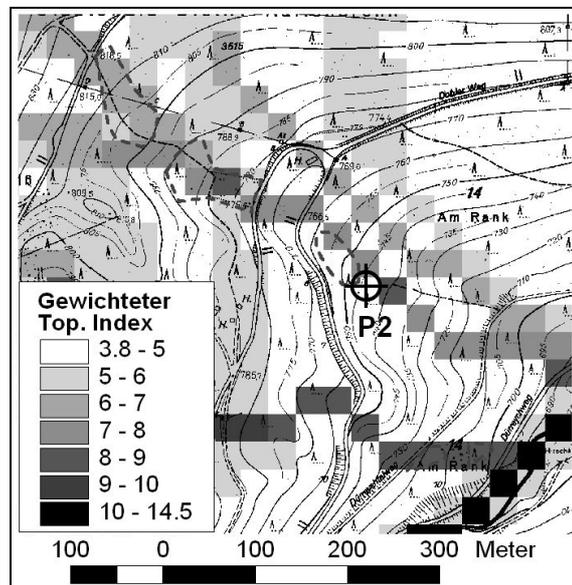


Abb. 146: Gewichteter Topographischer Index (30 m-Raster) am Messprofil P 2. Gestrichelt eingefasst: Erosionsspuren (Abb. 137)

Ansatz mit Reinfiltration: Abb. 147 verdeutlicht, dass bei trockeneren Gebietszuständen

der laterale Zufluss am Messprofil P 2 versiegt. Der Hauptfließweg ist nur noch oberhalb des Profils durch schwach erhöhte Indexwerte erkennbar; P 2 ist nunmehr ein reiner Infiltrationsstandort. Dagegen bleibt der Fließweg südlich des Profils erhalten, der den südlichen Teil des Seemißkars entwässert. Auch dieses Ergebnis ist konsistent mit den Geländebefunden.

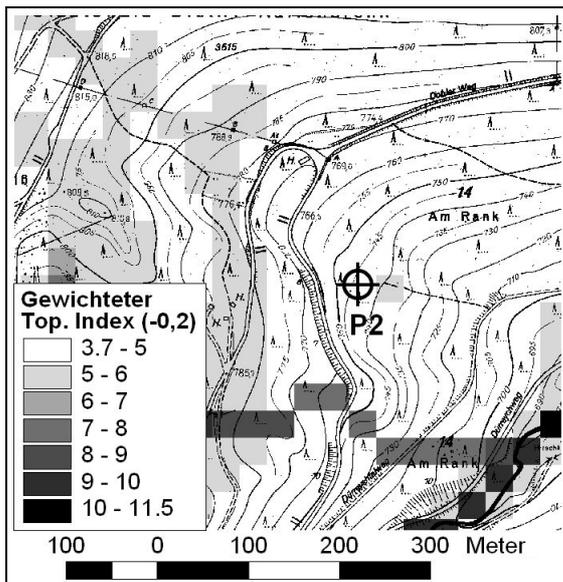


Abb. 147: Gewichteter Topographischer Index mit Reinfiltration (30 m-Raster) am Messprofil P 2.

Infolge des niedrigen Schichtungsquotienten zeigt der mit dem Interflow-Index kombinierte Gewichtete Topographische Index prinzipiell ein sehr ähnliches Bild. Die Schichtung verstärkt dennoch merkbar den Effekt der Abflusskonzentration auf dem Hauptfließweg und

simuliert einen lateralen Zufluss auch noch bei geringeren Gebietsfeuchten (Abb. 148).

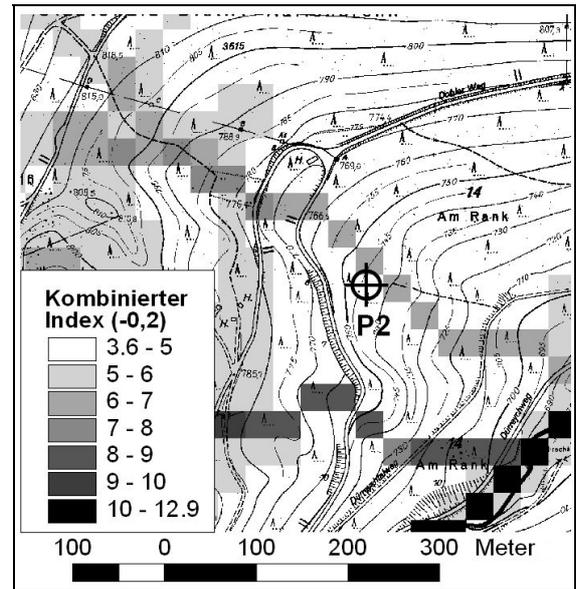


Abb. 148: Kombiniertes Topographisches Index mit Reinfiltration (30 m-Raster) am Messprofil P 2.

Zusammenfassender Vergleich: Die Regionalisierungsergebnisse entsprechen in hohem Maße den Geländebefunden. Insbesondere durch den gewichteten Topographischen Index mit Reinfiltration kann das vom Gebietszustand abhängige dynamische Abflussverhalten abgebildet werden. Die Zuordnung zum Hydrotyp Infiltration (INF) durch das FSK-Regelwerk gibt den im Jahresmittel dominierenden Prozess korrekt wieder.

9 Zusammenfassende Diskussion

Die Einzeluntersuchungen zur Abflussbildung und ihrer räumlichen Verteilung im Dürreychgebiet wurden bereits im Rahmen der vorangegangenen Kapitel diskutiert. Die abschließende Diskussion greift die wesentlichen Ergebnisse heraus und reflektiert sie im Hinblick auf die Literatur, Forschungsziele und Hypothesen, wie sie in den einleitenden Kapiteln formuliert wurden.

Einordnung des Forschungsansatzes

Die im Dürreychgebiet entwickelten Raumgliederungsansätze für Flächen gleicher Abflussbildung (Hydrotope) lassen sich zwei Forschungssträngen zuordnen:

- Hydrotopklassifikation auf Grundlage eines wissensbasierten Systems
- Weiterentwicklung von Topographischen Feuchteindizes

Dabei wird der bisher wenig verbreitete Ansatz verfolgt, Forstliche Standortseinheiten (FSK) als Grundlage für die Hydrotopklassifikation zu nutzen. Über diesen Gliederungsprozess hinaus werden insbesondere die bodenkundlichen FSK-Daten zur weitergehenden Berechnung von Feuchte-Indizes auf Grundlage eines Digitalen Höhenmodells (DHM) verwendet. Abgesehen von der gemeinsamen Informationsbasis, der FSK, können beide Ansätze getrennt voneinander betrachtet werden.

Insgesamt erwies sich die FSK als geeignete Grundlage für die Ausweisung hydrologischer Prozesseinheiten. Für Vergleiche mit kleinskaligen Prozessuntersuchungen traten die DHM-basierten Ansätze als deutlich schlagkräftiger hervor.

Auf Basis der FSK lassen sich Hydrotop-typen ableiten

Der Klassifikationsansatz ist verwandt mit der Flächenklassifikation durch wissensbasierte Systeme (PESCHKE et al. 1999a) oder Abflussprozess-Beurteilungsschemata (IHW 2000). Anhand eines Regelwerks werden den Forstlichen Standortseinheiten dominante Abflussbildungseigenschaften zugeordnet. Dieses Vorgehen rechtfertigt sich durch die Verwandtschaft von Ökoserien bzw. Standortseinheiten mit Hydrotop-typen: Beide bilden eine strukturelle Synthese von Relief- Boden- und Wasserhaushaltseigenschaften, aus der sich eine Prozessähnlichkeit ableiten lässt. Das vergleichsweise einfache Regelwerk für das Dürreychgebiet lässt sich in Form eines Entscheidungsbaums darstellen, wie er etwa von UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997b) für hydrologische Konzeptmodelle gefordert wird.

Vorteile dieser Vorgehensweise sind:

- Die Verschneidung mehrerer Informationsebenen in kleinste gemeinsame Geometrien und ihre nachfolgende Reaggregation entfällt. Dieser Syntheseprozess erfolgt bereits im Gelände durch den Standortskartierer.
- Das Regelwerk nutzt die z.T. expliziten Hinweise der FSK auf Abflussbildungsprozesse (z.B. Hangwasserzufluss, Stauwassereinfluss bis in den Oberboden etc.)
- Die Ökologische Feuchte als Summenparameter des Standortwasserhaushalts gibt einen schnellen und differenzierten Überblick über die mittlere Gebietsfeuchte. Insbesondere lassen sich die für die Abflussbildung besonders bedeutsamen Feuchtfächen leicht identifizieren.

Als Flächentyp dominiert der Zwischenabfluss

Abb. 149 zeigt die zu Klassen zusammen gefassten Anteile der Hydrotoptypen im Einzugsgebiet, wie sie nach dem Regelwerk bestimmt wurden.

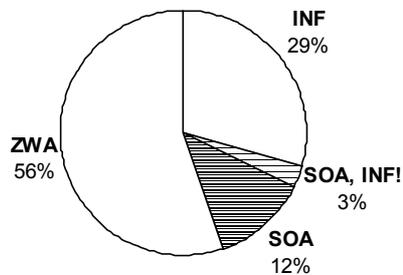


Abb. 149: Flächenanteile der Hydrotopklassen am Gesamteinzugsgebiet (7 km²). ZWA = Zwischenabfluss; INF = Infiltration; SOA, INF! = Sättigungsflächenabfluss und abflusswirksame Infiltration in der Aue; SOA = Sättigungsflächenabfluss (auf 4% der Sättigungsflächen kann bei Starkregen Horton'scher Oberflächenabfluss HOA auftreten)

Das Überwiegen von Flächen mit potenziellem Zwischenabfluss ist klar ersichtlich und entspricht den prinzipiellen Überlegungen für steil reliefierte Einzugsgebiete (z.B. ANDERSON & BURT 1990). Die summarische Verteilung sagt jedoch zunächst wenig über die tatsächliche Abflusswirksamkeit dieser Flächen aus, da der Abflusskonzentrationsprozess nicht berücksichtigt wird. Diese Tatsache wird als Hauptgrund dafür gesehen, dass die Übereinstimmung oberflächennaher Hangwasseraustritte mit Flächen der Hydrotopklasse ZWA nicht überzeugen konnte und erst bei DHM-basierten Ansätzen bessere Ergebnisse erzielt wurden.

Als Prozesstyp dominiert der Sättigungsflächenabfluss

Faktisch zeigt sich, dass das Abflussgeschehen im Dürreychgebiet stark vom flächenmäßig viel kleineren Anteil an Sättigungsflächen

gesteuert wird, die im Kopfeinzugsgebiet gehäuft auftreten. Besonders klar konnte der Zusammenhang zwischen Sättigung im Oberboden und Abflussbeginn durch Bodenfeuchtemessungen an der Messstation FF im 1,5 km² großen Kopfeinzugsgebiet SH gezeigt werden. CASPER (2002) und VOLKMANN (2002) legen hierzu weitere Untersuchungen vor.

Für die Teileinzugsgebiete SH, LE, SE und HI wurden die jeweiligen Abflussbeiwerte von 80 Ereignissen als n-Faches des Abflussbeiwertes am Hauptpegel DÜ dargestellt (Abb. 150). Bei feuchten, aber nicht extremen Gebietszuständen zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Abflussbeiwerte und relativen Feuchtflächenanteilen, wie sie aus der FSK bestimmt wurden. Das stark dränierte Untereinzugsgebiet LE gehorcht erwartungsgemäß diesem Zusammenhang nicht und weist überproportionale Abflussbeiwerte auf. Die dominante Rolle der Feucht- und Sättigungsflächen bei mittleren Gebietsfeuchten wird auch durch CASPER (2002) bestätigt, der für diese Bedingungen einen Abflussanteil der feuchten Hochlagen am Gesamtabfluss von bis zu 80 % angibt.

Abflussbeiwerte sind zeitvariabel und nichtlinear

Alle vier Teileinzugsgebiete lassen ein ähnliches Muster von Abflussbeiwerten erkennen, das auf ein nichtlineares Gebietsverhalten schließen lässt. Abb. 150 zeigt dieses Verhalten exemplarisch am Kopfeinzugsgebiet SH, das einen etwa doppelt so hohen Anteil an Feuchtflächen hat, wie das Gesamtgebiet DÜ.

- (a) Bei kleinen Abflussbeiwerten des Gesamtgebiets DÜ streuen die Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet SH maximal.
- (b) Innerhalb einer Spanne von Abflussbeiwerten des Gesamtgebiets zwischen etwa 3 und 8 % verjüngt sich die Punktwolke

stark: Die Abflussbeiwerte sind hier in der Tat etwa doppelt so hoch wie im Gesamtgebiet.

- (c) Oberhalb dieser Spanne gleichen sich die Abflussbeiwerte der Teileinzugsgebiete dem Wert des Gesamtgebiets an. Die Feuchtflächen verlieren ihre steuernde Eigenschaft, und die Abflussprozesse im Gebiet nivellieren sich. Klar ist hier ein Schwellenwert zwischen (b) und (c) erkennbar.

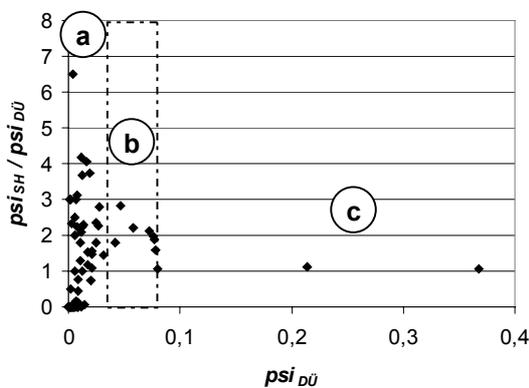


Abb. 150: Verhältnis der Abflussbeiwerte ψ am Pegel SH zum Gesamtgebiet (DÜ). Erklärung der Bereiche a, b und c im Text.

Zu einem sehr ähnlichen Ergebnis kommen PESCHKE et al. (1998) bei der Analyse der Abflussbildung im Wernersbachgebiet (Erzgebirge): Hier konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Abflussbildung jenseits eines Schwellenwertes der Vorsättigung nicht mehr von Einzugsgebietseigenschaften, sondern maßgeblich durch das Niederschlagsereignis gesteuert wird.

VOLKMANN (2002) belegt die Konvergenz der Einzugsgebietsreaktionen bei zunehmender Gebietsfeuchte auch anhand von DOC-Messungen in den Abflüssen des Dürreychgebiets: Mit steigenden Abflussbeiwerten nähern sich die recht unterschiedlichen DOC-

Konzentrationen der Teileinzugsgebiete einander an (Abb. 151).

Die Folgerungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Abflussbeiwerte sind zeitvariabel und besitzen gebietstypische, von der Gebietsfeuchte abhängige Schwellenwerte. Ein lineares Abflussverhalten kann nur für bestimmte Gebietszustände innerhalb dieser Schwellenwerte als gültig angenommen werden.

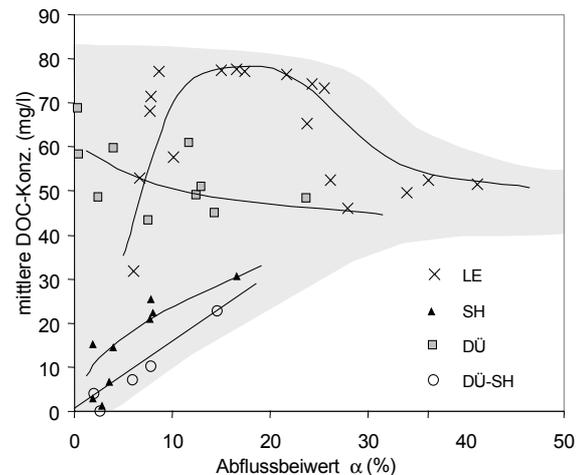


Abb. 151: Konvergenz der DOC-Konzentrationen im Dürreychgebiet bei zunehmendem Abflussbeiwert. Wiedergabe aus: VOLKMANN (2002)

In der wasserwirtschaftlichen Praxis, wo Abflussbeiwerte z.T. als konstante Gebietsgrößen behandelt werden, sollten diese Folgerungen zukünftig stärkere Beachtung finden.

Der Gewichtete Topographische Index bildet Feuchtflächen realistisch ab

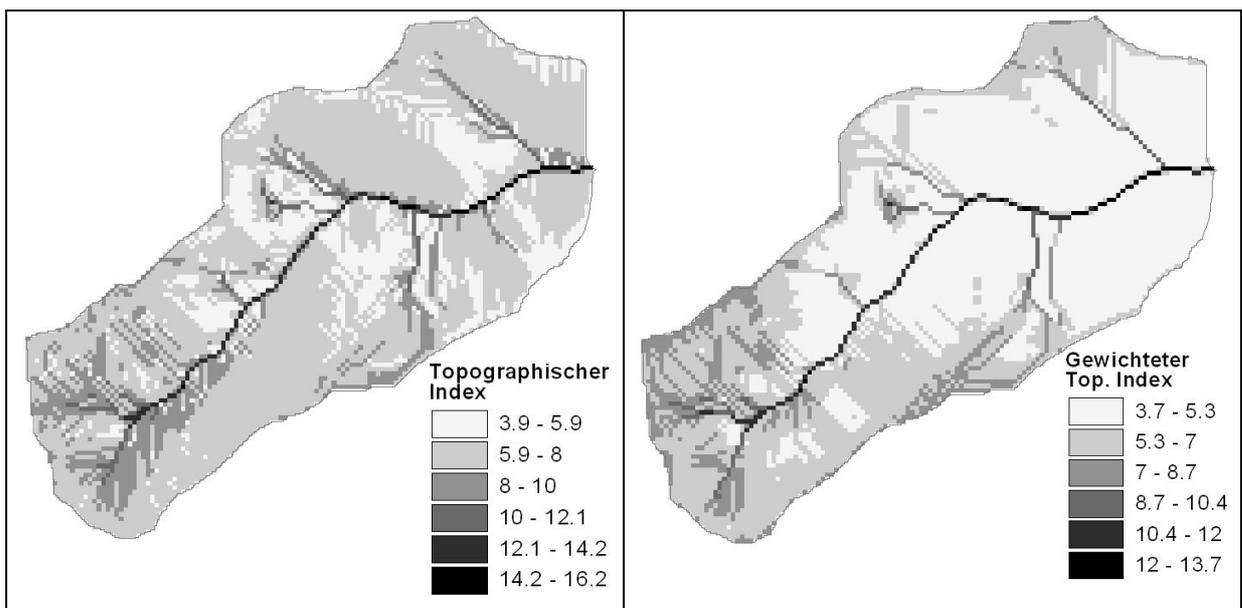
Im Rahmen dieser Arbeit wird der auf BEVEN & KIRKBY (1979) zurück gehende Topographische Index modifiziert, um das dokumentierte hohe Abflussbildungspotenzial der feuchten Hochlagen im Dürreychgebiet realistischer abzubilden.

Der herkömmliche Topographische Index simuliert auf Grundlage von Hangneigung und Fließakkumulation die Tendenz einer Fläche

zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss. Kern des modifizierten Topographischen Index ist die Gewichtung des Fließakkumulations-terms mit einem aus der Ökologischen Feuchte erzeugten Wichtungsfaktor. Durch die Gewichtung tragen nur jene Zellen maßgeblich zur Fließakkumulation bei, die im Bereich hoher Ökologischer Feuchtwerte liegen (vgl. Abb. 152).

Ohne Wichtung liefern die vernässten Flächen der Hochlagen infolge ihrer Nähe zur Wasserscheide systematisch zu kleine Fließakkumulationswerte; die Indexwerte der Hangflächen sind dagegen überrepräsentiert. Beim Gewichteten Topographischen Index hingegen wird in Übereinstimmung mit den Geländebe-funden deutlich, dass überwiegend das Kopfeinzugsgebiet und die Einzugsgebietsränder zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss neigen. FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) nutzt den herkömmlichen Topographischen Index zur Identifikation abflussrelevanter Flächen. Sie stellt dabei zwar eine Übereinstimmung mit höheren Indexwerten „in kleinen Anteilen auf

den Hochflächen und am Talbeginn von Dür-reych und Brotenau“ fest (S. 198). Der Ansatz wird jedoch nicht weiter verfolgt. Vielmehr werden durch die zusätzliche Berücksichtigung des Kriteriums „konkave Wölbung“ die häufig schwach konvexen vernässten Hochlagen im Widerspruch zur Beobachtung letztlich nicht mehr als abflussbildende Flächen ausgewie-sen. Die wenigen als abflusswirksam identi-fizierten Flächen (Kap. 2, Abb. 14) stehen in keinem Verhältnis zu den festgestellten vari-ablen Direktabflüssen, obschon darauf hinge-wiesen wird, dass die minimal abflusswirksame Fläche eines Ereignisses „nicht als repräsen-tativ für die aktuelle Größe der Abflussbil-dungsflächen im Einzugsgebiet gehalten wer-den“ sollte (S. 171). Hier zeigt sich, dass die für den Nordschwarzwald typischen feuchten Plateaulagen nicht allein durch morphographi-sche Analyse abgebildet werden können. Ein einfacher, im Gelände erhobener Summenpa-rameter wie die Ökologische Feuchte, gekop-pelt mit der digitalen Reliefanalyse, kann hier ein wesentlich wirklichkeitsnäheres Bild liefern.



Anmerkung: Zwecks besserer Vergleichbarkeit sind die unterschiedlichen Wertespannen in sechs gleich breite Klassen geteilt.

Abb. 152: Gegenüberstellung von Topographischem Index (links) und Gewichtetem Topographischen Index (rechts) für das Dürreychgebiet (30 m-Raster).

Dabei ist die Umsetzung der Ökologischen Feuchte in einen Wichtungsfaktor nicht unproblematisch: Zum einen wird eine ordinal skalierte unscharfe Ausgangsklasse in einen numerischen Wert übersetzt. Letztlich sprechen hier die Ergebnisse aber für sich. Zudem ist die numerische Verwendung ordinal skalierten Daten in der Landschaftsökologie nicht unüblich und wird etwa bei der statistischen Auswertung von Vegetationsaufnahmen seit langem mit Erfolg betrieben. Zum anderen sind die verwendeten Wichtungsfaktoren nicht kalibriert und beruhen ausschließlich auf konzeptionellen Überlegungen. Hier besteht sicherlich Bedarf, die Annahmen empirisch abzusichern. Die genannten Punkte gelten für die nachfolgend diskutierten Indexberechnungen entsprechend.

Der Gewichtete Topographische Index mit Reinfiltration simuliert variable Beitragsflächen

Das Konzept der sich ausdehnenden Beitragsflächen (zurückgehend auf HEWLETT & HIBBERT 1967) nimmt üblicherweise die Ausdehnung einer Sättigungsfront von einer Mulde oder Rinne hangaufwärts an. Im Dürreychgebiet dehnen sich die Feuchtfächen der Hochlagen dagegen von oben nach unten aus und koppeln z.T. an den Dürreychbach an. Das Ausdehnen bzw. Schrumpfen kann durch Subtraktion eines konstanten Wertes vom Wichtungsfaktor des gewichteten Topographischen Index konzeptionell nachgebildet werden („Ansatz mit Reinfiltration“). Rasterzellen mit geringer Ökologischer Feuchte werden dadurch negativ und führen zu abnehmenden Fließakkumulationswerten. Dabei zeigt sich, dass sich vorfluterferne Sättigungsflächen der Hochlagen erst bei hoher Feuchte an den Dürreychbach an-koppeln. Dieses Verhalten wird in Abb. 153 am

Beispiel des Einzugsgebiets FH mit seinem nur temporär ausgebildeten Gewässernetz illustriert. Hier spricht ein nur selten Wasser führender Murkanal im unteren Teil des Einzugsgebietes dafür, dass die Hochflächen und Hänge nur bei extremen Bedingungen große Abflüsse produzieren.

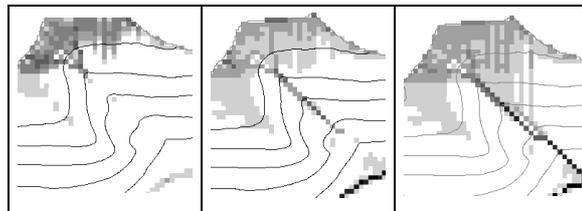


Abb. 153: Gewichteter Topographischer Index mit Infiltration (30 m-Raster) im Einzugsgebiet FH. Erst bei hoher Gebietsfeuchte (rechts) liefert das Einzugsgebiet nennenswerte Abflussbeiträge (vgl. auch Abb. 38-40)

Die durch die Indexberechnung simulierte Dynamik konnte durch den Vergleich mit standörtlichen Untersuchungen am Messprofil FF, P 1 und P 2, Beobachtungen zur Ausdehnung des Gewässernetzes sowie gemeinsame Untersuchungen zur DOC-Qualität an den Hängen Stillwasser und Häuserwald (VOLKMANN 2002) wiederholt bestätigt werden.

Die direkte Validierung der Feuchte-Indexberechnungen durch Auswertung von Landsat TM-Daten erbrachte nur in einem Fall ein bedingt verwertbares Ergebnis. Eine Aussage zur Variabilität der Feuchtfächen zu unterschiedlichen Zeiten war damit nicht möglich. Obwohl kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Bildklassifikation Feuchteindex nachgewiesen werden konnte, zeigt die Satellitenszene stellenweise eine augenfällige Übereinstimmung der Feuchtemuster. Deutlich machte sich bei der Bildklassifikation der störende Einfluss von Sturmwurfflächen bemerkbar.

***Luzula sylvatica*-Dominanzbestände indizieren schnelle oberflächennahe Abflüsse**

Wie am Beispiel in Abb. 153 deutlich wird, sind Indexberechnungen auf Grundlage der Fließakkumulation eo ipso besonders geeignet, um Tiefenlinien und Gewässerläufe abzubilden. Daher ist der Topographische Index mit einigem Erfolg zur Identifikation der hochwasserwirksamen vorfluternahen Flächen mit potenziellem Sättigungsabfluss verwendet worden (Literatur-Review BONELL 1998).

Im Dürreychgebiet sind, bedingt durch die enge Kerbtalform, klassische vorfluternahe Sättigungsflächen nur in kleinen Anteilen vorhanden. Die vorfluternahen Beitragsflächen und Nebengerinne mit schneller oberflächennaher Wasserbewegung konnten durch Kartierung von *Luzula sylvatica*-Dominanzbeständen (Wald-Hainsimse) abgegrenzt und durch Feuchtezeiger weiter differenziert werden. Die Bindung dieser Bestände an rasch durchströmte, z.T. überflutete Rinnenstandorte ist offensichtlich und wurde für den Nord-schwarzwald bereits durch MURMANN-KRISTEN (1987) sowie SCHWABE (1987) aus vegetationskundlicher Sicht beschrieben. Beim Vergleich der Kartierung mit dem Gewichteten Topographischen Index zeigt sich auch eine deutliche Bindung der *Luzula*-Bestände an Flächen mit hohen Indexwerten. Der Zusammenhang konnte durch Vergleiche mit Erosionsspuren und bodenkundlichen Untersuchungen auch für temporär durchströmte Tiefenlinien mehrfach bestätigt werden. Somit wird *Luzula sylvatica*-Dominanzbeständen ein zumindest lokal gültiger Indikatorwert für schnelle oberflächennahe Abflüsse beigemessen. An Standorten mit stagnierender Wasserbewegung, v.a. in der Quellmulde des Dürreychbachs, wurden hingegen bevorzugt *Molinia caerulea*-Bestände (Blaues Pfeifengras)

festgestellt. Die schnellen Abflussbeiträge der Rinnenstandorte umfassen die Prozesse Sättigungsflächenabfluss, schnellen Zwischenabfluss und schnell abflusswirksame Infiltration. Sie lassen sich infolge der hohen Durchlässigkeiten der Böden und des geringen Grundwasserflurabstands kaum voneinander trennen.

Vorfluternahe Feuchflächen sind für den Direktabfluss wenig bedeutend

Bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet hat nur rund 1 % der Vegetationsbestände nahe des Dürreychbachs einen Indikatorwert für die schnelle Abflussbildung. Die Bedeutung der vorfluternahen Feuchflächen für den Direktabfluss ist daher vergleichsweise gering. Übereinstimmend stellt CASPER (2002) fest, dass der Abfluss aus der Bachaue mit maximal 1,2 % beitragender Fläche nur bei trockenen Vorbedingungen die dominierende Abflusskomponente ist.

Unter feuchten Bedingungen dehnt sich das Gewässernetz aus und schließt die Indikatorstandorte der Seitengerinne abflusswirksam an den Dürreychbach an. Der potenziell abflusswirksame Flächenanteil mit Indikatorwert vergrößert sich damit auf knapp 3 %. Da bei feuchten Gebietszuständen jedoch die Sättigungsflächen den Abfluss bestimmen, ist diese Vergrößerung der Beitragsfläche von untergeordneter Bedeutung.

Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA) ist für den Direktabfluss gering bedeutend

Etwa 4 % der Sättigungsflächen im Dürreychgebiet wird auf Grundlage von FSK-Angaben zugleich das Potenzial zur Bildung von HOA bei Niederschlagsintensitäten über ca. 17 mm h^{-1} zugesprochen. Es handelt sich um gering durchlässige zersetzte Torfe der Müssen und Moore. Ferner kann auf den rund 2 % Wegflächen z.T. HOA entstehen. Bei drei

Starkregenereignissen auf trockene Vorbedingungen wurden jedoch in der zweijährigen Messphase im Gesamteinzugsgebiet lediglich Abflussbeiwerte um 1 % erreicht, die sich – zumindest für das untere Dürreychtal – eher mit dem Anteil an vorfluternahen Feuchtflächen in Beziehung bringen lassen (s.o.). Im oberen Einzugsgebiet lässt sich HOA kaum von Sättigungsabfluss trennen. Für die geringe Reaktion der zersetzten Torfe auf Starkregenereignisse sind vermutlich Makroporen infolge der starken Durchwurzelung verantwortlich. Die Beobachtungen korrespondieren insofern mit den allgemeinen Literaturbefunden, wonach Wald die Entstehung von Oberflächenabfluss auch unter ungünstigen Bedingungen meist vollständig unterbindet (z.B. BONELL 1998, WOHLRAB et al. 1992).

Die Grenze Schuttdecke/Festgestein liegt für schnelle Zwischenabflüsse zu tief

Durch refraktionsseismische Messungen konnte gezeigt werden, dass die Grenze Lockergestein / Festgestein im Dürreychgebiet meist in beträchtlichen Tiefen von häufig > 10 m anzutreffen ist. Die auflagernden Lockersedimente lassen sich nach der Wellengeschwindigkeit in gering verdichtete und verdichtete Schuttdecken gliedern. Die gering verdichteten Schuttdecken erreichen meist 1 bis 2 m Mächtigkeit, können aber talseitig auf über 4 m anwachsen. In der Summe übertreffen die Schuttdeckenmächtigkeiten damit noch die Werte, die von SEEGER (1990) im nahe gelegenen Seebachgebiet ermittelt wurden. Sie liegen damit wesentlich höher, als die von FEZER (1957) für den Nordschwarzwald angegebenen Werte bis < 3 m.

Die große Schuttdeckenmächtigkeit lässt den Schluss zu, dass im größten Teil des Dürreychgebiets das Interface Schuttdecke / Fest-

gestein für schnelle Zwischenabflüsse keine Rolle spielt. Eine Rolle spielt jedoch die Grenze zwischen gering verdichteten und verdichteten Schuttdecken, insbesondere wenn diese Grenze mit der Lage des Podsol-illuvialhorizonts zusammen fällt.

Ortsteinbildungen und verdichtete Schuttdecken wirken sickerwasserhemmend

Zahlreiche Hangwasseraustritte sowie Rutschungen oberhalb von Ortsteinbildungen und plattig verfestigten Substraten belegen trotz sandiger Substrate die Sickerwasser hemmenden Eigenschaften dieser Horizonttypen. Insbesondere bändchenartige Ortsteinbildungen können bei flacher Relieflage zu Stagnogleyen mit Vermoorung – den klassischen Sättigungsflächen – führen, oder in Hanglage Zwischenabfluss begünstigen. Sogar an steilen Hängen können sich unter häufigem Hangwassereinfluss Bändchenstagnogleye entwickeln (P 1, P 105).

Oft löst die Stauwirkung jedoch nur kurzfristig Zwischenabfluss aus und ist nicht profilprägend. Die hydraulische Wirksamkeit von Ortsteinbildungen im Nordschwarzwald wurde auch von STAHR (1973), SEEGER (1990), ANDRUSCHKEWITSCH et al. (1999) und SOMMER et al. (2001) bestätigt.

Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung von Dünnschliffproben aus einem Hangwasser geprägten Bändchenstagnogley (P 1) konnte die starke Abnahme des sickerwasserwirksamen Grobporenanteils im Bereich des Ortsteinbändchens gezeigt werden

Simulationsversuche mit dem physikalisch basierten N-A-Modell CATFLOW lassen auf eine effektive hydraulische Leitfähigkeit von Ortstein-Stauhorizonten in der Größenordnung von 10^{-7} m s^{-1} schließen. Unter diesen Verhältnissen können Standorte mit ausgeprägter

Vernässung und SOA entstehen. Dieser Wert entspricht den Angaben von SEEGER (1990) für Ortstein und dem unteren Rand der von STAHR (1973) ermittelten Werte für Bändchenhorizonte. Dass dennoch eine gewisse Wasserbewegung durch Ortsteinbändchen erfolgt, belegen übereinstimmend mit STAHR (1973) die Bodenfeuchtemessungen am Messprofil P 1.

Eine effektive Durchlässigkeit von etwa 10^{-6} m s^{-1} für Ortsteinhorizonte, abgeleitet aus Bodenart, Humusgehalt und Lagerungsdichte – reicht den Simulationsergebnissen zufolge gerade aus, um an einem steilen Modellhang Zwischenabfluss zu ermöglichen.

Die im Dünnschliff festgestellten recht hohen Grobporenanteile in entsprechenden Bms-Horizonten sowie in den darunter anschließenden plattig verfestigten II C-Horizonten suggerieren eine wesentlich höhere Durchlässigkeit. Sie stehen damit im Widerspruch zu den häufig im Gelände beobachteten sickerwasserhemmenden Eigenschaften. Dem wird mit zwei Erklärungsversuchen begegnet, die sich auf die qualitative Auswertung der Dünnschliffproben stützen:

- Durch das ausgeprägte Hüllen-Brückengefüge von Ortstein-Horizonten können allseits umschlossene Grobporen entstehen, die nicht für den Sickerwassertransport zur Verfügung stehen.
- Die plattig verfestigten Horizonte weisen durch eingeregeltere Poren eine anisotrope, die laterale Wasserbewegung begünstigende Durchlässigkeit auf.

Hier besteht Bedarf nach weiteren Detailuntersuchungen sowie nach Weiterentwicklung der Untersuchungsmethode.

Die Druckantwort des Hangwasserkörpers ermöglicht schnellen Zwischenabfluss

Schnelle Reaktionen der Bodenfeuchte auf Niederschläge sowie stark negative Saugspannungen in einem Hangwasser beeinflussten Bändchenstagnogley (Messprofil P 1) weisen darauf hin, dass sich unter feuchten Bedingungen ein zusammenhängender Hangwasserkörper entwickeln kann. Durch Druckübertragung, wie sie aus Lysimeterversuchen bekannt sind (MÜLLER & PESCHKE 2000), kann auf diese Weise schnell Vorereigniswasser (→ Glossar) zum Zwischenabfluss (Piston Flow → Glossar) kommen. Prinzipiell kann ein ähnliches Verhalten auch für die Stagnogleye der flacheren Lagen angenommen werden. Die Sauerstoffisotopen- und DOC-Messungen von CASPER (2002) und VOLKMANN (2002) weisen auf den hohen Anteil an Vorereigniswasser hin und stützen somit diese Annahme.

Auch am Messprofil P 2, einem Standort mit dominierender Infiltration, konnte episodisch ein hoher hydrostatischer Druckgradient detektiert werden. Piston Flow entsteht hier durch Abflusskonzentration in der Tiefenlinie bei extremen Feuchtezuständen und konnte in Form kleiner artesischer Wasseraustritte auch direkt beobachtet werden. An diesem Standort sind zudem Makroporen für den schnellen Wassertransport verantwortlich, dessen Geschwindigkeit die aus der Matrixdurchlässigkeit zu erwartende Fließgeschwindigkeit um mehrere Größenordnungen übersteigt.

Der Interflow-Index lokalisiert Flächen mit erhöhter Zwischenabflussaktivität

Während der Topographische Index und dessen Weiterentwicklungen zur Lokalisierung von Flächen mit Sättigungsabfluss weite Verbreitung gefunden haben, sind entsprechende Konzepte für den Zwischenabfluss in der For-

schung unterrepräsentiert. Mit dem Interflow-Index wird ein einfaches Konzept vorgeschlagen, das die bisher auf den Sättigungsabfluss orientierten, rein morphographischen Raumgliederungskonzepte im Eyachgebiet (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996) sinnvoll ergänzt.

Der Interflow-Index beruht im Wesentlichen auf der Hangneigung und dem Quotienten aus den Durchlässigkeitsbeiwerten (K_s) von Ober- und Unterboden. Der auf Basis des DHM einfach zu berechnende Index ist durch die Verwendung des K_s -Quotienten recht robust. Schwierigkeiten bereiten vielmehr die Verfügbarkeit treffender K_s -Werte.

Für das Dürreychgebiet konnte ein Zusammenhang zwischen hohen Interflow-Indexwerten im 30 m-Raster mit kartierten Hangwasseraustritten und kleineren Rutschungen an Weganschnitten nachgewiesen werden. Erosionsspuren auf Forstwegen erwiesen sich dagegen nicht als geeigneter Indikator für zwischenabflussaktive Hangzonen. Hierfür werden Interferenzen mit Einflussfaktoren wie Wegneigung, Bewuchs, Ableitungseinrichtungen u.a. verantwortlich gemacht.

Gewichteter Topographischer Index und Interflow-Index lassen sich kombinieren

Um die mögliche Akkumulation von Zwischenabfluss und Sättigungsabfluss gemeinsam abzubilden, wurde der Interflow-Index in den aus der Ökologischen Feuchte ermittelten Wichtungsfaktor zur Berechnung des Gewichteten Topographischen Index einbezogen. Auf diese Weise tragen auch Zellen mit zwar geringer Ökologischer Feuchte, aber erhöhtem Zwischenabflusspotenzial zur Fließakkumulation bei. Bei der gewählten Verfahrensweise zeigt sich, dass das Indexmuster nur unter feuchten Bedingungen stärkere Abweichungen gegen-

über dem Gewichteten Topographischen Index ohne Zwischenabfluss zeigt: Erst unter diesen Umständen werden erhöhte Indexwerte auch an den Unterhängen erreicht, wie sie vom herkömmlichen Topographischen Index erzeugt werden (Abb. 154).

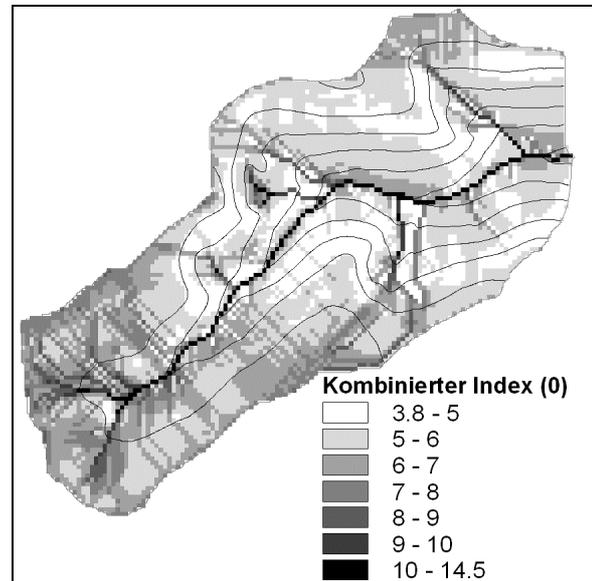


Abb. 154: Kombination von Gewichtetem Topographischem Index und Interflow-Index ohne Reinfiltration (0)

Die Ergebnisse lassen eine qualitative Übereinstimmung mit den Prozessbeobachtungen erkennen: CASPER (2002) nutzt den kombinierten Index, um fünf verschiedenen feuchte Zustände des Dürreychgebiets darzustellen. Er zeigt an Abflussganglinien der Teileinzugsgebiete sowie Bodenfeuchtemessungen an den Messprofilen P 1, P 2 und der Messstation FF, dass deutliche Zwischenabflussanteile in der Tat erst bei hohen Vorfeuchten auftreten. Mit zunehmender Feuchte sinkt der Abflussbeitrag aus dem Sättigungsflächen geprägten Kopfeinzugsgebiet von rund 80 % auf rund 40 % ab. Folglich müssen zusätzliche Flächen mit dominierendem Zwischenabfluss im Rest-einzugsgebiet abflusswirksam werden.

10 Resümee und Ausblick

Die Regionalisierungsansätze auf Basis der Forstlichen Standortskarte (FSK) und des damit kombinierten Digitalen Höhenmodells (DHM) haben sich in vielen Fällen als kompatibel mit den Prozessuntersuchungen zur Abflussbildung erwiesen. Diese Ergebnisse sind umso erfreulicher, als für die Datenbasis mit etwa 30% Abweichungen von den in der FSK-Legende angegebenen Standortmerkmalen gerechnet werden muss. Zum Beleg wurden auf verschiedenen Skalen zahlreiche Indizien zusammengetragen: Feuchte-Indexmuster stimmen mit beobachteten Indikatoren wie Feuchtezeigern und Hangwasseraustritten überein, Feuchtfächenanteile lassen sich mit Gebietsreaktionen in Beziehung setzen. Die Bedeutung von Ortsteinhorizonten für die Abflussbildung lässt sich vom mikroskopischen Dünnschliff über die Profilskaale bis zur Hangskale verfolgen. Am Messprofil FF konnte ein direkter Zusammenhang zwischen punktuellen Bodenfeuchtemessungen und Abflussreaktion des Teileinzugsgebiets festgestellt werden. Sicherlich kann hier kein geschlossenes Konzept für ein lückenlosen Auf- und Abwärtsskalieren vorgelegt werden. Dies war auch nicht Ziel der Untersuchungen. Vielmehr ging es darum, prozessgemäße mesoskalige Regionalisierungsansätze für das Dürreychgebiet zu entwickeln und die damit postulierten Prozesse exemplarisch durch mikroskalige Struktur- und Prozessuntersuchungen zu belegen.

Nutzen für physikalisch basierte Modelle:

Für forstlich genutzte Einzugsgebiete wie das Dürreychgebiet ist die FSK nicht selten die einzig verfügbare großmaßstäbige Bodeninformation. Insofern kommt ihr als Informationsquelle für die Ableitung pedohydrologischer Parameter ein unbestreitbarer Wert zu. Für die

Niederschlags-Abfluss-Simulation mit dem physikalisch basierten Modell CATFLOW waren jedoch die oft unscharfen und z.T. lückenhaften Angaben der FSK Kaltenbronn bei weitem nicht ausreichend, und es muss betont werden, dass ohne bodenkundliche Zusatzuntersuchungen kein geschlossener Parametersatz für die Simulation ableitbar gewesen wäre.

Der eigentliche Wert der FSK für die hydrologische Modellierung liegt vielmehr in der Möglichkeit, das Simulationsziel an den qualitativen Angaben zum mittleren Standortwasserhaushalt der Forstlichen Standortseinheiten „eichen“ zu können. Wie konkret die Hinweise der FSK sein können, soll an folgenden Beispielen noch einmal verdeutlicht werden (GRABMANN 1996):

- „Sommerliche Austrocknung des Oberbodens“ (SSH)
- „Lang anhaltende Vernässungsphasen. Hochanstehender Wasserstand“ (HMi+)
- „Seitlicher Wasserzug mit beidseitiger Drainage“ (SRü)

Diese mittleren Standortseigenschaften müssen von einem prozessorientierten Modell richtig nachgebildet werden, um ein realitätsnahes Abflussverhalten zu simulieren. Die adäquate Modellskaale ist dabei die untere Mesoskaale.

Anhand von Simulationsexperimenten mit CATFLOW konnte auf der Profil- bzw. Hangskale exemplarisch gezeigt werden, wie wichtig eine genaue Vorstellung von den zu erwartenden Abflussprozessen im Einzugsgebiet ist: Bereits Parameteränderungen innerhalb der Schätzunsicherheit können hier zwischen Realitätsnähe und Inkompatibilität entscheiden. Dies gilt um so entschiedener für größere Simulationseinheiten: Simulationsex-

perimente an einem Hangsegment mit sechs Standortseinheiten (ZEHE & WALDENMEYER 2001) sowie die Untersuchungen von CASPER (2002) lassen erkennen: Während bei kleinen Simulationseinheiten noch Prozess- und Modellskaale vereinbart werden können, so wären für ein vernünftiges Upscaling auf die Einzugsgebietskaale neben Modellanpassungen v.a. umfangreiche weitere Parameterstudien mit CATFLOW notwendig.

Nutzen für Konzeptionelle Modelle: Um wie viel mehr konzeptionelle Modelle auf Informationen über den Anteil und die räumliche Verteilung hydrologischer Prozesseinheiten angewiesen sind, liegt damit auf der Hand: Diese zumeist auf Speicheransätzen beruhenden semidistribuierten Modelle wie z.B. das HBV-Modell (BERGSTRÖM 1995) oder PRMS (LEAVESLEY & STANNARD 1995) können in den seltensten Fällen das leisten, was nicht einmal physikalisch basierten Modellen gelingt: nämlich allein aus Strukturinformationen eine prozessgerechte räumliche Verteilung verschiedener Abflusskomponenten zu generieren. Die Fähigkeit dieser Modelle, Abflussganglinien durchaus gut nachzubilden, bleibt davon unberührt. Dazu ist jedoch ein sorgfältiges Parameterfitting unerlässlich. Oft ergibt sich dabei eine Vielzahl möglicher Parametersätze, von denen nur wenige sinnvoll sind:

„Viele Parametersätze können existieren, die nahezu die gleichen Abflussvorhersagen liefern, obwohl die gebietsinternen Flüsse, welche den Gesamt-Abfluss bedingen, völlig unterschiedlich sein können“ (MÜLLER & PESCHKE 2000:103).

Dies gilt für räumlich fein diskretisierte Modelle naturgemäß in besonderem Maße. Durch ein vorgeschaltetes, Prozess bezogenes Gliederungskonzept lässt sich die Zahl der Parameter beträchtlich reduzieren (MÜLLER & PESCHKE 2000:102).

In diesem Sinne können FSK-Informationen in forstlich genutzten Einzugsgebieten künftig zur

Parameterreduktion beitragen. Der Entwurf eines entsprechenden Regelwerks zur Prozessableitung sowie die Aufbereitung der z.T. unscharfen FSK-Legendenangaben erfordern allerdings Struktur- und Prozesskenntnisse über den jeweiligen Naturraum. Eine Übertragung der vorgeschlagenen Methode auf andere Waldeinzugsgebiete ist daher erst nach Anpassung an die individuellen naturräumlichen Gegebenheiten möglich.

Die Hydrotopklassifikation auf Basis Forstlicher Standortseinheiten ist für große Einzugsgebiete unpraktikabel: Schon im 7 km² großen Dürreychgebiet mussten 35 verschiedene Standortseinheiten zugeordnet werden. Für größere Einzugsgebiete sollten Ökoserien (Substratreihen) als nächst größere Einheit der forstlichen Standortkartierung einer Ausgliederung zugrunde gelegt werden.

Nach Aussagen der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg liegen Forstliche Standortskarten für das Bundesland Baden-Württemberg geschlossen vor; ein Teil davon bereits in digitaler Form. Diese Breitenverfügbarkeit macht die FSK als alternative Informationsquelle für mesoskalige hydrologische Fragestellungen interessant. Besonders leicht zugänglich ist dabei die Ökologische Feuchte: ein Summenparameter, der die mittleren relativen Feuchteunterschiede im Einzugsgebiet repräsentiert. Die Ökologische Feuchte kommt der Forderung KLEEBERGS nach effektiven Parametern entgegen (KLEEBERG et al. 1999) und kann in vereinfachten konzeptionellen Modellen etwa an die Stelle des Abflussbeiwerts oder der Feldkapazität treten bzw. diese sinnvoll ergänzen.

Modelle mit TOPMODEL-Ansatz: FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) hatte in Fortführung ihrer Untersuchungen im Eyachgebiet Niederschlags-Abfluss-Simulationen auf Basis des verbreiteten TOPMODEL-Ansatzes

(BEVEN et al. 1995) angeregt. Dieser Ansatz enthält den Topographischen Index als wichtiges Kernstück. Die AG Dürreych hat diese Anregung aufgegriffen und mit dem TOPMODEL-orientierten N-A-Modell WASIM-ETH der ETH Zürich Simulationen für das Gebiet durchgeführt (CASPER 2002). Dabei bewertet CASPER das Ergebnis als „sehr unbefriedigend“,

„...da hier weder die räumliche Lage der [Topographischen] Indexwerte zum eigentlichen Abflussgeschehen passte, noch Sättigungsflächenabfluss unabhängig vom Grundwasserstand simulierbar war.“

Hier bietet der mit der Ökologischen Feuchte Gewichtete Topographische Index die Perspektive, prozessnähere Simulationsergebnisse zu erzielen. Leider war es im Rahmen des Projektes nicht mehr möglich, diesen Ansatz in ein TOPMODEL-Konzept zu integrieren. Hier besteht Bedarf nach einer vergleichenden Untersuchung beider Ansätze im Modell.

Wie die Anwendung des Gewichteten Topographischen Index in einem kleinen Einzugsgebiet in Vorarlberg zeigten (DITTFURTH 2002), ist eine Wichtung des Topographischen Index auf Grundlage der Feuchtezahlen nach ELLENBERG et al. (1992) ebenso geeignet wie die damit verwandte Ökologische Feuchte, um Abflussbildungsprozesse pointierter nachzubilden. Um die Wichtungsfaktoren zu kalibrieren, wären Geländeuntersuchungen an repräsentativen Flächen verschiedener Ökologischer Feuchte auf der Hangskale mit gleichzeitiger Abflussmessung erforderlich.

Nutzen für Blockmodelle: Auch für wesentlich weniger komplexe Blockmodelle kann die Ökologische Feuchte bzw. die prozentuale Verteilung der Hydrotypen in einem Einzugsgebiet eine wichtige prozessbezogene a priori-Information bieten: Der festgestellte Zusammenhang zwischen Feuchtfächen und Abflussbeiwerten legt beispielsweise nahe, in einem Blockmodell für das Dürreychgebiet ei-

nen Sättigungsflächenanteil von etwa 15 % anzusetzen und diesen Flächenanteil zur Kalibrierung des Direktabflusses zu nutzen.

Dabei haben die Untersuchungen gezeigt, dass das Abflussverhalten charakteristische Schwellenwerte aufweist, die in Blockmodellen als separate Gebietszustands- bzw. Ereignisklassen mit unterschiedlichen Parametern abgebildet werden sollten. Im Dürreychgebiet wären in diesem Fall die großen Flächenanteile mit potenziellem Zwischenabfluss „zuzuschalten“. Die gleiche Notwendigkeit konstatieren DYCK & PESCHKE (1995) bei Simulationsexperimenten mit der Einheitsganglinie: Erst vier Einheitsganglinien waren in der Lage den Abfluss zufrieden stellend zu simulieren. Der Begriff der Einheitsganglinie hat sich damit selbst konterkariert. Ebenso wie der Begriff des Abflussbeiwerts stammt er aus einem veralteten linearen Prozessdenken und sollte, wie jener, „moderner“ definiert werden.

Weitere Anknüpfungspunkte: Im Rahmen der Prozessuntersuchungen wurden eine Reihe von Detailfragen bearbeitet, die weitere Anknüpfungspunkte für die Forschung bieten.

- Überprüfung der regionalen Indikatorfunktion von *Luzula sylvatica* für schnelle oberflächennahe Wasserbewegung
- Nutzung von Bodenfeuchtemessungen an neuralgischen Punkten des Einzugsgebiets für die Hochwasserwarnung
- Nähere Untersuchung des Piston-Flow-Effekts durch Kombination von Tensiometermessungen und Tracermethoden
- Weiterentwicklung der Feuchteklassifikation von Landsat TM-Daten
- Weiterentwicklung von Mikrotextruntersuchungen für die Ableitung pedohydrologischer Parameter mit Hilfe der Bildverarbeitung (z.B. SCHAAP & LEBRON 2001)

Breite versus Detailschärfe – Ein Nachwort

Der exemplarische Charakter mancher Einzeluntersuchung im Rahmen dieser Arbeit mag unbefriedigend sein. Ein breit angelegter geökologischer Untersuchungsansatz muss aber zwangsläufig Kompromisse beim Detaillierungsgrad eingehen. Dieser Mangel wurde bereits bei der Projektplanung bewusst in Kauf genommen. Statt dessen wurde auf die Kombination verschiedener Methoden auf unterschiedlichen Mess- und Modellskalen gesetzt, welche die Hypothesen aus dem Blickwinkel verschiedener Teildisziplinen stützen sollten.

Die AG Dürreych und vielleicht besonders der vorliegende Projektteil Regionalisierung hat in

den Jahren 1997 bis 2002 sehr von den Synergieeffekten des interdisziplinären Arbeitens profitiert: Hypothesen zur Abflussbildung im Dürreychtal wurden durch die gemeinsame Prozessidentifikation tragfähig gemacht, und es wurde ein ganzheitliches Verständnis des Einzugsgebiets angestrebt. Auch wenn dabei viele Detailfragen offen bleiben mussten oder neu entstanden sind, hat sich diese Arbeitsweise für einen so komplexen Untersuchungsgegenstand, wie es ein Wassereinzugsgebiet ist, für das Dürreychprojekt bewährt.

Guido Waldenmeyer (Mai 2002)

Kurzfassung

Thema und Zielsetzung: Untersuchungsobjekt dieses Beitrags zur Abflussbildung und Regionalisierung ist das 7 km² große, forstlich genutzte Einzugsgebiet Dürreychtal im Nord-schwarzwald, das im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“ (GRK 147) von 1996-2001 als Hydrologisches Testgebiet betrieben wurde. Gemeinsames Ziel der Arbeitsgruppe war die Identifikation von Abflussprozessen, insbesondere hinsichtlich der Hochwasserentstehung. Die Hypothesen zur Abflussbildung wurden in einem iterativen Prozess im Kollektiv entwickelt. Schwerpunkt des vorliegenden Beitrags ist die räumliche Verteilung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet. Für derartige Gliederungskonzepte, die als Preprocessing für vereinfachte Niederschlags-Abfluss-Modelle benötigt werden, wird ein entsprechender Forschungsbedarf aus der Literatur abgeleitet.

Vorgehensweise: Als breitenverfügbare Datengrundlagen für die Regionalisierung dienen die Forstliche Standortskarte (FSK) und ein Digitales Höhenmodell (DHM). Darauf aufbauend werden zwei Regionalisierungsstrategien verfolgt:

- Anhand eines Regelwerks werden den Forstlichen Standortseinheiten dominante Abflussbildungseigenschaften zugeordnet (Hydrotopklassifikation).
- Auf Basis von DHM und FSK wird der verbreitete Topographische Index als Maß für die Neigung zu Sättigungsabfluss modifiziert und mit einem neuen Index für den Zwischenabfluss kombiniert.

Zur Überprüfung der Regionalisierungsansätze kommt ein breites Methodenspektrum in verschiedenen Skalen zum Einsatz, das hydrologische, bodenkundliche, geomorphologische

und vegetationskundliche Untersuchungen sowie exemplarische Luftbildauswertung und Simulationsversuche umfasst.

Ergebnisse: Das Regelwerk zur Hydrotopklassifikation ergab einen dominierenden Anteil von Flächen mit potenziellem Zwischenabfluss (56 %). Die im Kollektiv erhobenen Bodenfeuchte- und Abflussmessungen der AG Dürreych sowie ¹⁸O-Isotopen- und DOC-Bestimmungen (CASPER 2002, VOLKMANN 2002) zeigen jedoch übereinstimmend, dass das Abflussverhalten maßgeblich vom viel kleineren Anteil an Feucht- und Sättigungsflächen (15 %) gesteuert wird. Erst bei höheren Gebietsfeuchten treten größere Zwischenabflussanteile auf. Die Abflussbeiwerte von vier Teileinzugsgebieten lassen auf ein nichtlineares Gebietsverhalten mit deutlichen Schwellenwerten schließen. Nur bei feuchten, aber nicht extremen Gebietszuständen lassen sich Abflussbeiwerte und Feuchtflächenanteile ins Verhältnis setzen.

Trotz eines Flächenanteils von 4 % schlecht durchlässigen, zersetzten Torfen spielt Infiltrationsüberschuss (Horton'scher Oberflächenabfluss) bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet keine Rolle. Der Grund für die hohe Infiltrationsleistung der Torfe wird in der Makroporensickerung infolge der starken Durchwurzelung gesehen. Abflussbeiwerte von nur ca. 1 % nach drei Starkregenereignissen auf trockene Vorbedingungen lassen sich eher mit dem Anteil häufig abflussaktiver Feuchtflächen nahe des Dürreychbachs in Verbindung bringen: Ihr Flächenanteil entlang des Hauptgerinnes wurde anhand von Vegetationskartierungen zu 1 % bestimmt. Im Rahmen dieser Kartierung konnten Dominanzbestände von *Luzula sylvatica* (Wald-Hainsimse) als regionaler Indikator

für schnelle oberflächliche bzw. oberflächen-nahe Abflüsse im Bereich der Tiefenlinien erkannt werden.

Verteilung und Umfang der prozessbedeutsamen Flächen mit Sättigungsabfluss konnten mit dem Gewichteten Topographischen Index realistischer abgebildet werden, als mit dem herkömmlichen Topographischen Index nach BEVEN & KIRKBY (1979), der bereits in früheren Forschungsarbeiten im Bereich des Dürreychgebiets angewandt wurde (DIKAU 1994, FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996). Grundlage des modifizierten Index ist die Wichtung des Fließakkumulationsterms im herkömmlichen Index auf Basis der Ökologischen Feuchte. Durch negative Wichtungswerte lässt sich das Ausdehnen und Schrumpfen der Sättigungsflächen bei unterschiedlichen Feuchtezuständen konzeptionell abbilden.

Prozessuntersuchungen zeigen, dass die erzeugten dynamischen Feuchte-Indexmuster das Gebietsverhalten recht gut wiedergeben: So gelang es etwa, durch Tensiometeruntersuchungen einen temporär zusammenhängenden Hangwasserkörper mit Piston Flow im Bereich hoher Gewichteter Topographischer Indizes nachzuweisen. In gemeinsamen Untersuchungen mit VOLKMANN (2002) konnten unterschiedliche DOC-Qualitäten von Hangwasseraustritten an zwei Vergleichshängen mit deren sehr unterschiedlichen Index-Mustern plausibel erklärt werden.

Ortsteinbildungen führen infolge reduzierter hydraulischer Leitfähigkeiten zu Staunässe auf Flachlagen und zu Zwischenabfluss an Hängen. An Dünnschliffen bändchenartiger Ortsteinbildungen konnte ein stark verringerter Sickerwasser leitender Grobporenanteil festgestellt werden. Die hydraulische Wirksamkeit dieser oft nur 1-2 cm mächtigen Horizonte spiegelt sich in Bodenfeuchtemessungen wie-

der. Auch diffuse Ortsteinbildungen sowie verdichtete Schuttdecken wirken den Geländeuntersuchungen zufolge zumindest temporär Sickerwasser hemmend. Die Wirkung lässt sich jedoch nicht durch geringe Grobporenanteile, sondern vielmehr durch das ausgeprägte Hüllen-Brücken-Gefüge erklären. Simulationsexperimente auf der Grundlage von FSK-Daten und eigenen bodenkundlichen Erhebungen trugen dazu bei, eine effektive gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) von abflusswirksamen Ortsteinbildungen zwischen $K_s = 10^{-6}$ und $K_s = 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ zu bestimmen.

Der für den Zwischenabfluss entscheidende K_s -Quotient von Ober- und Unterboden wurde mit der Hangneigung zu einem neuen Index für den Zwischenabfluss (Interflow-Index) verknüpft, der die bislang auf den Sättigungsabfluss orientierten Indexansätze sinnvoll ergänzt. Die Tauglichkeit des Konzepts konnte am Zusammenhang zwischen hohen Interflow-Indexwerten und Hangwasseraustritten gezeigt werden. Um die mögliche Akkumulation von Zwischenabfluss und Sättigungsabfluss gemeinsam abzubilden, kann der Interflow-Index in den Wichtungsfaktor zur Berechnung des Gewichteten Topographischen Index einbezogen werden.

Insgesamt haben sich die Regionalisierungsansätze auf Basis der Forstlichen Standortskarte und des Digitalen Höhenmodells in vielen Fällen als kompatibel mit den Untersuchungen zur Abflussbildung erwiesen. Für Vergleiche mit kleinskaligen Prozessuntersuchungen traten die DHM-basierten Ansätze als deutlich schlagkräftiger hervor. Die entwickelten Ansätze lassen sich für vereinfachte, aber dennoch stärker prozessorientierte Simulationsmodelle nutzen: Aus den FSK-Angaben zum Standortwasserhaushalt lassen sich klare Simulationsziele formulieren. Die Gliederung in

Hydrotope kann als wichtige a priori-Information in konzeptionelle Modelle und Blockmodelle einfließen und dazu beitragen, Parameter zu reduzieren. Die Ökologische Feuchte eignet sich als effektiver Parameter für den mittleren Feuchtezustand eines Ge-

biets und kann als Wichtungsfaktor Modelle auf Basis des Topographischen Index möglicherweise verbessern. Insbesondere zu dieser Frage sowie zur Verwendung des Interflow-Index in Simulationsmodellen wären weitere Untersuchungen wünschenswert.

Summary

Subject: This dissertation contributes to the body of knowledge about runoff generation and regionalisation in mountainous catchments and focuses on the Dürreych valley in the humid Northern Black Forest, Germany. The 7 km² forested catchment was investigated by a work group of the DFG Graduate School (GRK 147) from 1996 to 2001. The collected data were available for each member of the workgroup. The general purpose of the Dürreych project was to identify runoff generation and, subsequently, the processes causing floods. This part of the project deals with the spatial delineation of areas with similar runoff generation (hydrotopes) which is required for a more complete understanding of runoff generation processes in mountainous catchments in general and as pre-processing for improved rainfall-runoff-models.

Research concept: A digital elevation model (DEM) and a forestry site map (FSM) provide a common data base to identify hydrotopes:

- Hydrotopes are determined by processing site information of the FSM with a decision tree.
- The widely used topographical index which indicates potential saturation excess flow is modified by a weighting factor derived from the FSM and is combined with a new index for potential interflow.

Methods from hydrology, soil sciences, geomorphology and vegetation sciences are applied to test the results of the regionalisation. Moreover, examples from processed Landsat TM images and simulations with a physically based rainfall-runoff model support the testing.

Results: The processed site information forms into a dominant portion of potential interflow areas (56 %). However, soil moisture probes

and runoff measurements as well as ¹⁸O-isotopes and DOC-contents in soil water and stream (see also CASPER 2002 and VOLKMANN 2002) gave proof that the runoff dynamics mostly depend on the much smaller portion of saturated or temporarily saturated areas (15 %) during periods of moderate rainfall. Interflow will only be a more dominant runoff component during wet periods. The runoff coefficients of four subcatchments indicate non-linear runoff dynamics with decisive thresholds for what reason saturated areas can only be sufficiently related for moderately moist but not for dry or extremely wet situations.

Despite an area of 4 % badly permeable degraded peat, Hortonian overland flow is not of remarkable degree; macropores such as root channels are due to cause high infiltration rates. The low runoff coefficients (1 %) found during three summer rainstorms correspond to the narrow riverbanks showing a rapid runoff reaction. As discovered by vegetation mapping, these areas also amount to 1 % of the catchment. Vegetation mapping also revealed abundant populations of *Luzula sylvatica* to be a useful regional indicator for rapid shallow interflow and overland flow along episodic runnels and some other concave parts of the slopes.

The spatial pattern and the amount of areas with saturation excess flow was more realistically modelled using the weighted topographical index than by the original version (BEVEN & KIRKBY 1979) which had been applied to the Dürreych catchment in earlier studies (DIKAU 1994, FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996). This modification is based on the calculation of a flow accumulation which is weighted by a factor derived from the ecological wetness class

of either forestry site unit. The typical contracting of wet areas can be conceptually modelled by allowing negative weighting factors for drier conditions.

Investigations of the processes showed that the modelled dynamic wetness patterns sufficiently meet the runoff reaction of the catchment under different conditions. Soil suction measurements gave proof to a temporary water table along a slope site which, under very wet conditions, induces piston flow in an area with high values for the weighted topographical index. Collaborating with VOLKMANN (2002) different qualities of DOC detected in the outflows of two different slope types could be sufficiently interpreted by their different pattern of index values.

Concrete podsollic layers (thin iron pans) cause the stagnant properties on plateaux or interflow along slopes due to their low hydraulic conductivity. Thin cut sections of iron pans verified a much smaller portion of conductive soil pores than in the horizons above. Soil moisture measurements give proof to the stagnant effect of the iron pans which often are but 1-2 cm thick. Even less concrete diffuse ortstein as well as compressed periglacial debris layers can at least cause temporal stagnation. Following the results of thin cut sections this cannot be explained by the amount of conductive soil pores but is supposed to be due to a well developed coat-and-bridge structure of the particles. Simulation experiments based on data from the forestry site map as well as further soil investigations helped to figure out a realistic hydraulic conductivity of $K_s = 10^{-6}$ to 10^{-7} ms^{-1} for ortstein horizons.

Since the ratio of the hydraulic conductivity of the upper and the lower soil horizon is decisive for interflow generation, this ratio was com-

bined with the slope inclination to create a new index for potential interflow intensity. This index is a supplement to existing indices which mostly focus on saturation excess flow. High interflow indices could be related to many outflows from slope incisions mapped along forest tracks in the Dürreych catchment. The interflow index can also be blended with the above mentioned modified topographical index in order to model the flow accumulation of both saturation excess flow and interflow.

Altogether the regionalisation concepts based on the forestry site map and the digital elevation model have proved to be compatible with the field investigations in the Dürreych catchment. The concepts based on the DEM have become more evident concerning small scale investigations. Both concepts can be useful for reduced but nevertheless more realistic rainfall-runoff models. The forestry site units provide information about the long term soil moisture and help to postulate a realistic simulation target. The delineation of hydrotopes can be an important a-priori information for conceptual and block models as well as a means to reduce the number and range of their parameters. The ecological wetness class as an integral of the long term soil water regime can be useful as an effective parameter and can possibly improve models which are based on the topographical index when used as a weighting factor. Further research is required to study the possible benefit of the weighted topographical index and the interflow index for appropriate rainfall-runoff models.

Literaturverzeichnis

- ABERLE, J. (2000): Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß. Univ. Karlsruhe, Diss.
- AG BODEN (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. (3.Auflage). Hannover.
- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. (4.Auflage). Hannover.
- AGSTER, G. (1986): Wasser- und Grundwasserhaushalt der Einzugsgebiete des Schönbuchs in Abhängigkeit von Waldbestand und Untergrund. In: EINSELE, G. (Hrsg.): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch - Wasser- und Stoffhaushalt, Bio-, Geo- und Forstwirtschaftliche Studien in Südwestdeutschland. DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft Forschungsbericht: 85-112. Weinheim.
- AK BODENSYSTEMATIK (Hrsg.) (1998): Systematik der Böden und bodenbildenden Substrate Deutschlands – Systematik der Böden, Systematik der bodenbildenden Substrate, Gliederung periglaziärer Lagen. Mitt. d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd.86. Oldenburg.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (1996): Forstliche Standortsaufnahme - Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. (5.Auflage). Eching b. München.
- ANDERSON, M.G. & T.P. BURT (1990): Subsurface runoff. In: Anderson, M.G. & T.P. Burt (Hrsg.): Process Studies in Hydrology: 365-400. Chichester u.a.
- ANDRUSCHKEWITSCH, I., SOMMER, M. & STAHR, K. (1999): Ortsteingeneese im Buntsandstein-Schwarzwald. Mitt. d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd.91 H.2:913-916. Oldenburg.
- ANDRUSCHKEWITSCH, I., SOMMER, M. & STAHR, K. (2001): Mikromorphologie und Stoffverteilung in Ortsteinhorizonten im N-Schwarzwald. Mitt. d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd.96 H.2:469-470. Oldenburg.
- ATKINSON, T.C. (1980): Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes. In: KIRKBY, M.J. (Hrsg.) (1980): Hillslope Hydrology, 73-120. (3.Auflage). Chichester u.a.
- BARSCHE, D. & W.-A. FLÜGEL (Hrsg.) (1988): Niederschlag, Grundwasser, Abfluß - Ergebnisse aus dem hydrologisch-geomorphologischen Versuchsgebiet „Hollmuth“. Heidelberger Geographische Arbeiten, H. 66. Heidelberg.
- BARTELS, H. (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland: KOSTRA.. Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes. Offenbach a. Main.
- BAUER, M. (2000): Ergebnisse isotopehydrologischer Untersuchungen im Dürreychbachgebiet (Analysenprotokoll), Analysen der Firma Hydroisotop, Schweitenkirchen. Unveröff.
- BECKER, A. & W. LAHMER (1999): GIS-basierte großskalige hydrologische Modellierung. In: KLEEBERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U.STREIT (Hrsg.) (1999): Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 115-129. Weinheim u.a.
- BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: KLEEBERG, H. B. (Hrsg.) (1992): Regionalisierung in der Hydrologie - Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, 16-32. Weinheim u.a.
- BELZ, S. (2000): Nutzung von Landsat Thematic Mapper Daten zur Ermittlung hydrologischer Parameter. Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik Universität Karlsruhe (TH):206. Diss. Karlsruhe
- BERGSTRÖM, S. (1995): The HBV model. IN: SINGH, V.P. (1995) (Hrsg.): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications:443-476. Littleton, Colorado.
- BEVEN, K.J. & KIRKBY, M.J. (1979): A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull. 24:43-69.
- BEVEN, K.J. & GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. Water Res. Research 18(5), 1311-1325.

- BEVEN, K., R. LAMB, P. QUINN, R. ROMANOWICZ & J. FREER (1995): TOPMODEL. In: SINGH, V.P. (1995) (Hrsg.): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications:627-668. Littleton, Colorado.
- BISDOM, E., DEKKER, LW. & J.F.T SHOUTE (1993): Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationship with organic material and soil structure. *Geoderma* 56:105-118.
- BISHOP, K.H. (1991): Episodic Increases in Stream Acidity, Catchment Flow Pathways and Hydrograph Separations. Dissertation Dep. of Geography, University of Cambridge.
- BLEICH, K.E. et al. (1986): Podsoles and Pseudogleys of Baden-Württemberg. *Mitt. d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Bd.46:121-156.
- BLÖSCHL, G.(1996): Scale and scaling in hydrology. *Wiener Mitteilungen Techn. Univ. Wien, Inst. für Hydraulik, Gewässerkunde u. Wasserwirtschaft* 132. Wien.
- BLUME, H.P. (1968): Stauwasserböden. Stuttgart.
- BONELL, M. (1993): Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology* 150 (1993):217-275.
- BONELL, M. (1998): Selected Challenges in Runoff Generation Research in Forests from Hillslope to Headwater Drainage Basin Scale. In: *Journal of the American Water Resources Association*, Vol.34 No.4:765-786. Herndon, Virginia.
- CAREY, S.K. & WOO, M.-K. (2000): The role of pipes as a slope runoff mechanism , Subarctic Yukon, Canada. *Journal of Hydrology* 233 (2000):206-222
- CARSEL, R. F. & PARRISH, R. S. (1988): Development of joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24 (5): 755 – 769.
- CASPARY, H.J. (1990): Auswirkungen neuartiger Waldschäden und der Bodenversauerung auf das Abflussverhalten von Waldgebieten. *Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft* Bd.37. Diss. Karlsruhe.
- CASPER, M.; ABERLE, J; WALDENMEYER, G. (1999): Das Hochwasser vom 28./29.10.1998 im Einzugsgebiet der Eyach, *Proceedings zum Symposium "Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen"*, 11./12.10.1999, Karlsruhe
- CASPER, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald), *Mitt. d. Inst. f. Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Univ. Karlsruhe*, Heft 210, Karlsruhe.
- CRIST, E. & CICONE, R. (1984): Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 50(3): 343-352.
- DIEKKRÜGER, B., M.J. KIRKBY & U. SCHRÖDER (Hrsg.) (1999b): Regionalization in Hydrology. IAHS Publications no.254. Wallingford, Oxfordshire.
- DIEKKRÜGER, B., O. RICHTER, H. BORMANN, C. RENSCHLER (1999a): Heraufskalieren von landwirtschaftlich genutzten Ökotope. In: KLEEGERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999): *Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998)*. Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 150-174. Weinheim u.a.
- DIERSCHKE, H. (1994): *Pflanzensoziologie : Grundlagen und Methoden*. Stuttgart.
- DIKAU, R. & SAURER, H. (Hrsg.) (1999): *GIS for earth surface systems: analysis and modelling of the natural environment*. Berlin, Stuttgart.
- DIKAU, R. (1994): Computergestützte Geomorphographie und ihre Anwendung in der Regionalisierung des Reliefs. In: *Petermanns Geogr. Mitt.* Bd.138:99-114
- DIN 19683 Blatt 1 (1973): *Physikalische Laboruntersuchungen: Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung*.
- DIN 19683 Blatt 2 (1973): *Physikalische Laboruntersuchungen: Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat*.
- DIN 19684, Teil 3 (1977): *Chemische Laboruntersuchungen: Bestimmung des Glühverlustes*
- DIN 4187 (ISO 565-T1): *Siebböden; Lochplatten für Prüfsiebe, Quadratlochung*

- DITTFURTH, A. (2002): Abschätzung des Infiltrationsverhaltens auf Grundlage boden- und vegetationskundlicher sowie morphologischer Untersuchungen am Heumöser Hang in Ebnit / Vorarlberg. Diplomarbeit am Inst. f. Geographie u. Geoökologie, Univ. Karlsruhe (TH) / Geographisches Inst. der Univ. Heidelberg. Unveröff.
- DOERR, S.H, SHAKESBY, R.A. & R.P.D. WALSH (2000): Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science-Reviews* 51:33-65.
- DUNNE, T. & R.D. BLACK (1970): An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res.* 6:478-490.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): *Grundlagen der Hydrologie*. (3. Auflage). Berlin.
- EDER, W. (1980): Quantifizierung von bodenkundlichen Standortfaktoren als Grundlage für eine leistungsbezogene Standortkartierung insbesondere auf Buntsandsteinböden der Pfalz. Mitteilungen aus Forsteinrichtung u. Waldbau Nr.23. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen. Mainz.
- EINSELE, G. & M. HINDERER (1992): Stoffbilanzierung und langfristige Trends im Chemismus saurer, oberflächennaher Quell- und Bachabflüsse im kalkfreien, basenarmen Mittleren Buntsandstein. Abschlußbericht des PWAB-Projektes PW98.074. Geologisches Institut der Universität Tübingen.
- ELLENBERG, H., H.E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRH, W. WERNER & D. PAULIßEN (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, Bd. 18. (2.verb. u. erw. Auflage). Göttingen.
- FARRENKOPF-HILDEBRANDT, D. (1996): Die Steuerfunktion des Reliefs für die Abflußbildung. Diss. Geograph. Inst. Ruprecht-Karls-Univ. Heidelberg.
- FEYEN, H., WUNDERLI, H., WYDLER, H. & PAPRITZ, A. (1999): A tracer experiment to study flow paths of water in a forest soil. *Journal of Hydrology* 225 (1999) :155-167.
- FEZER, F. (1957): Eiszeitliche Erscheinungen im nördlichen Schwarzwald. *Forschungen zur deutschen Landeskunde* Bd.87. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.). Regensburg/Rh. Arb. aus d. Geogr. Inst. d. T.H. Stuttgart.
- FEZER, F. (1971): Zur quartären Formung des Nordschwarzwalds. *Jahresberichte u. Mitteilungen ober-rhein. Geol. Verein* 53:183-194.
- FINKE, L. (1994): *Landschaftsökologie*. (2. Auflage). Braunschweig.
- FLINSPACH, M. (1999): Seismische Messungen im Einzugsgebiet des Dürreychbaches, Bericht GUS - Geophysikalische Dienstleistungen Karlsruhe. Unveröff.
- GAUER, J. (1996): Quantifizierung des Wasserhaushaltes am forstlichen Standort - Bedarf der praktischen Standortkartierung an Daten und Modellergebnissen. In: *Mitt.d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* Bd. 79: 181-184. Oldenburg.
- GÜNTNER, A. (1997): Anwendung des Niederschlags-Abfluß-Modells TOPMODEL im Brugga-Einzugsgebiet. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau (unveröffentlicht). Freiburg.
- HECHT, S. (2000): Anwendung refraktionsseismischer Methoden zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes - mit Fallbeispielen aus Südwestdeutschland. <http://www.geographie.uni-stuttgart.de/~steve/seismik/>. Institut für Geographie, LS Physische Geographie, Univ. Stuttgart.
- HERBINGER, W (1996): Analyse von Möglichkeiten zur Unterstützung der Bodenkartierung durch Photogrammetrie und Fernerkundung. Diplomarbeit am Inst. f. Geographie u. Geoökologie, Univ. Karlsruhe (TH). Unveröff.
- HEWLETT J.D. & A.R. HIBBERT (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: SOPPER, W.E. & H.W. LULL: *International Symposium on Forest Hydrology*. Pennsylv. State Univ. 1965, 275-290. Oxford.
- HINTERMAIER-ERHARD, G. & W. ZECH (1997): *Wörterbuch der Bodenkunde – Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Böden*. Stuttgart.
- HÖLTING, B. (1996): *Hydrogeologie – Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie*. 5., überarb. u. erw. Aufl.. Stuttgart.
- HORTON, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrological cycle; *Transaction AGU* 14:446-460.

- IHW (INST. F. HYDROMECHANIK U. WASSERWIRTSCHAFT) (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Bericht Nr. B003 des Inst. f. Hydromechanik u. Wasserwirtschaft, Professur für Hydrologie und Wasserwirtschaft, ETH Zürich. Zürich
- JAHN, R. (1957): Forstliche Standortskartierung im Buntsandstein-Hochschwarzwald. Mitt. Ver. Forstl. Standortskunde 6:39-56.
- KASSEBEER, P. (1997): Geologische und hydrogeologische Voruntersuchungen im Dürreychtal (Nord-schwarzwald). Dipl.arbeit am Inst. f. Angewandte Geologie, Univ. Karlsruhe (TH). Unveröff.
- KIRKBY, M.J. (Hrsg.) (1980): Hillslope Hydrology. (3.Auflage). Chichester u.a.
- KLEEBERG, H. B. (Hrsg.) (1992): Regionalisierung in der Hydrologie - Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Weinheim u.a.
- KLEEBERG, H.-B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie. In KLEEBERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999): Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 3-12. Weinheim u.a.
- KLEEBERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999a): Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft. Weinheim u.a.
- KLEEBERG, H.-B., T. MOLNÁR, G. KASPER (1999b): Parametermodelle und effektive Parameter zur Simulation von Wasserflüssen im Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“. In: KLEEBERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999a): Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 218-234. Weinheim u.a.
- KNÖDEL, K., H. KRUMMEL & G. LANGE (Hrsg.) (1997): Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 3., 1063 S., Berlin.
- KOBAYASHI, N. (1999): Hydrologische Gebietseigenschaften des oberen Dürreychtals im Nord-schwarzwald. Dipl.arbeit am Inst. f. Geographie u. Geoökologie Univ. Karlsruhe. (TH). Unveröff.
- KÖRNER, J. (1996): Abflußbildung, Interflow und Stoffbilanz im Schönbuch Waldgebiet. Tübinger geowissenschaftliche Arbeiten / Reihe C, Hydro-, Ingenieur- und Umweltgeologie / Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen; Bd.27. Diss. am Inst. für Geologie und Paläontologie, Univ. Tübingen. Tübingen.
- KREBS, A. (1979): Grundwasserhaushalt und Vergleich zwischen Stoffeintrag und –austrag im Eyachtal. Diss. an der Geowiss. Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Tübingen.
- KÜHN, P. & D. SCHRÖDER (2001): Mikromorphologisch-stratigraphische Befunde zur spätglazialen Bodengenese in NO-Deutschland. Mitt. d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd.96 H.2:523-524. Oldenburg.
- KUTILEK, M. & D.R. NIELSEN (1994): Soil hydrology.- text book for students of soil science, agriculture, forestry, geocology, hydrology, geomorphology or other related disciplines. Cremlingen-Destedt, Germany.
- LANGBEIN, W.D. & S. MÜLLER (1986): Entwicklung hydropedologischer Forstkartiermethoden am Beispiel kleiner Bacheinzugsgebiete im Naturpark Schönbuch. In: EINSELE, G. (Hrsg.): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch - Wasser- und Stoffhaushalt, Bio-, Geo- und Forstwirtschaftliche Studien in Südwestdeutschland. DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft Forschungsbericht: 245-270. Weinheim.
- LEAVESLEY, G.H.; LICHTY, R.W.; TROUTMAN, B.M.; SAINDON, L.G. (1983): Precipitation-Runoff-Modeling System: User's Manual. Water-Resources Investigations Report 83-4238. Denver.
- LEAVESLEY, G.H. & L.G. STANNARD (1995): The Precipitation-Runoff Modeling System -PRMS, In: SINGH, V.P. (1995) (HRSG.): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications

- LESER, H. & H.-J. KLINK (Hrsg.) (1988): Handbuch und Kartieranleitung Geoökologische Karte 1 : 25.000 (KA GÖK 25). Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 228. Trier.
- LESER, H. (Hrsg.) (1997): DIERCKE-Wörterbuch Allgemeine Geographie. Vollk. überarb. Ausg. München u. Braunschweig.
- LGRB (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG) (1998): EDV-Datensammlung pedohydraulischer Parameter. Unveröff.
- MATTHESS, G. (Hrsg.) (1983): Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. Lehrbuch der Hydrogeologie Bd.1. Berlin, Stuttgart.
- MAURER, T. (1997): Physikalisch begründete zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Mitt. d. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft Univ. Karlsruhe (TH), H.61. Karlsruhe.
- MAUS, H.J. & K. STAHR (1977): Auftreten und Verbreitung von Lößbeimengungen in periglazialen Schuttdecken des Schwarzwaldwestabfalls. Catena, Jhrg.3, H.3/4 A:369-386.
- MEESBURG, H. & H.E. MÜLLER (1992): Simulation des Stofftransportes im Sickerwasser, Interflow und Bachwasser basenarmer Einzugsgebiete des Nordschwarzwaldes. Abschlußbericht PWAB - Projekt PW 89.076. Institut für Physische Geographie Universität Freiburg.
- MEHLHORN, J. (1998): Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlags-Abfluß-Modellierung. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 8. Freiburg.
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluß-Vorgangs in kleinen ländlichen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität Mitt. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft Univ. Karlsruhe (TH), H.56. Karlsruhe.
- MOESCHKE, H. (1998): Abflussgeschehen im Bergwald : Untersuchungen in drei bewaldeten Kleineinzugsgebieten im Flysch der Tegernseer Berge. Forstliche Forschungsberichte München 169. München.
- MOSIMANN, T. & R. DUTTMANN (1992): Die digitale geoökologische Karte als Ergebnis einer prozeßorientierten Landschaftsanalyse am Beispiel der Nienburger Geest. In: Ber. z. dt. Landeskunde. Bd.66, H.2:335-361. Trier.
- MÜLLER, S. (1967): Südwestdeutsche Waldböden im Farbbild. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Bd. 23. Stuttgart.
- MÜLLER, G. & G. PESCHKE (2000): Hydrologische Prozessuntersuchungen auf der Basis adäquater Messnetze. Österr. Wasser- u. Abfallwirtschaft, Jhg. 52 H.5/6:94-104.
- MÜLLER, U.; C. DEGEN & C. JÜRGING (1992): Dokumentation zur Methodenbank des Fachinformationssystems Bodenkunde: (FIS Boden), Technische Berichte zum NIBIS / Bodenkunde ; Bd.3, 5., überarb. Aufl. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung. Hannover.
- MURMANN-KRISTEN, L. (1987): Das Vegetationsmosaik im Nordschwarzwälder Waldgebiet. Diss. Botanicæ, Bd. 104. Berlin u.a.
- NEEF, E. (1967): Die theoretischen Grundlagen der Landschaftslehre. Gotha.
- NLFB (NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG, Hrsg.) (1996): Wald und Boden. Arbeitshefte Boden H.2:3-81. Hannover.
- OBERDORFER, E. (1994): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. 7. überarb. u.erg. Aufl. Stuttgart.
- PESCHKE, G., C. ETZENBERG, G. MÜLLER (1998): Experimental analysis of different runoff generation mechanisms. In: BUCEK, J. et al.(1998): Proceed. ERB Conference on Catchment Hydrological and Biochemical Process in Changing Environment. Liblice.
- PESCHKE, G. (1999): Skalenwechsel über Modelle. In KLEEGERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999): Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 13-24. Weinheim u.a.
- PESCHKE, G., C. ETZENBERG, S. ZIMMERMANN, J. TÖPFER & G. MÜLLER (1999a): Die Abflußbildung in ihrer Abhängigkeit von der wirksamen Kombination flächenvariabler Einflußfaktoren und vom Gebietszustand. In: KLEEGERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999): Hydrolo-

- gie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 268-281. Weinheim u.a.
- PESCHKE, G.; C. ETZENBERG; G. MÜLLER, J. TÖPFER & S. ZIMMERMANN (1999b): Das wissensbasierte System FLAB –ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflußbildung. IHI-Schriften H.10; Jhg. 1999. Internationales Hochschulinstitut Zittau.
- PESCHKE, G. (2001): Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung. Geogr. Rundschau H.3211, 5/2001:18-23.
- PLATE, E. (1992): Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. In: Kleeberg, H. B. (Hrsg.) (1992): Regionalisierung in der Hydrologie – Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, 33-44. Weinheim u.a.
- PLATE, E. (1994): Weiherbachprojekt: Zwischenbericht. (BMBF-Verbundvorhaben "Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus kleinen Einzugsgebieten" - Weiherbachprojekt). Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW), Universität Karlsruhe Karlsruhe, 1995.
- PLATE, E., A. BÁRDOSSY, B. MERZ, J. FORLANI (1999): Berücksichtigung der stochastischen Unsicherheit bei der Aggregation von Niederschlags-Abfluß-Modellen für homogene Teilflächen in Einzugsgebietsmodelle. In: KLEEGERG, H.-B., W. MAUSER, G. PESCHKE & U. STREIT (Hrsg.) (1999): Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 282-304. Weinheim u.a.
- POTSCHIN, M. & S. HEILAND (2001): „Praxisferne“ versus „Schema F“? – Anmerkungen zum Verhältnis zwischen ökologischer Wissenschaft und Planungspraxis. Naturschutz und Landschaftsplanung, 33. Jhg.,H.2-3:90-94..
- REHFUESS, K.E. (1990): Waldböden - Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. (2.Auflage). Hamburg; Berlin.
- REICHELDT, G. (1961): Über Schotterformen und Rundungsanalyse als Feldmethode. Petermanns Geograph. Mitteilungen 105:15-25.
- SANDER, S. (1998): Erosion auf Forstwegen als Hinweis auf oberflächennahe Abflussvorgänge im Einzugsgebiet des Dürreychbaches. Wissenschaftl. Examensarbeit im Fach Geographie (Lehramt), Inst. f. Geographie u. Geoökologie Univ. Karlsruhe (TH). Unveröff.
- SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) (i.e. SCHACHTSCHABEL, P., H.-P. BLUME, G. BRÜMMER, K.H. HARTGE, U. SCHWERTMANN (Hrsg.) (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14. neu bearb. u. erw. Aufl. Stuttgart.
- SCHMIDT, J. & R. DIKAU (1999): Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models – Semantics, methods, future needs. In DIKAU, R. & SAURER, H. (Hrsg.) (1999): GIS for earth surface systems: analysis and modelling of the natural environment 153-173. Berlin, Stuttgart.
- SCHÜTZ, L. (2001): Böden des Nordschwarzwalds im Dünnschliff – Ein Beitrag zur Abschätzung bodenhydraulischer Kenngrößen. Wissenschaftl. Examensarbeit im Fach Geographie (Lehramt), Inst. f. Geographie u. Geoökologie Univ. Karlsruhe (TH). Unveröff.
- SCHWABE, A. (1987): Fluß- und bachbegleitende Pflanzengesellschaften und Vegetationskomplexe im Schwarzwald. Diss. Botanicae, Bd.102. Berlin u.a.
- SCHWEIKLE, V. (1971): Die Stellung der Stagnogleye in der Bodengesellschaft des Schwarzwaldhochfläche auf so-Sandstein. Diss. Univ. Hohenheim.
- SEEGER, T. (1990): Abfluß- und Stofffrachtseparation im Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. Tübinger geowissenschaftliche Arbeiten / Reihe C, Hydro-, Ingenieur- und Umweltgeologie. Diss. am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, Bd.6. Tübingen.
- SHRIVASTAVA, M.B. & B. ULRICH (1977): Schätzung quantitativer Bodenparameter bei der forstlichen Standortskartierung am Beispiel des hessischen Berglands. Forstwissenschaftliches Centralblatt, H.96, S.186-200. Hamburg.
- SIDLE, R.C., TSUBOYAMA, Y., NOGUCHI, S., HOSODA, I., FUJIEDA, M., SHIMIZU, T. (2000): Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. Hydrological Processes 14:369-385.

- SOMMER, M., GEISINGER, C., HALM, D. & STAHR, K. (1997): Laterale Podsolierung – ein pedogenetischer Prozess auf Landschaftsebene. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges. Bd. 85 H.III:1251-1254. Oldenburg.
- SOMMER, M., HALM, D., GEISINGER, C., ANDRUSCHKEWITSCH, M., ZAREI & K. STAHR (2001): Lateral podzolization in a sandstone catchment. *Geoderma* 103:231–247.
- STACHEDER, M. (1996): Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Schriftenreihe Inst. f. Angew. Geol. Karlsruhe Bd.40. Karlsruhe.
- STAHR, K. (1973): Die Stellung der Böden mit Fe-Bändchen-Horizont (thin-iron-pan) in der Bodengesellschaft der nördlichen Schwarzwaldberge. In: Arb. Geol. Paläontol. Universität Stuttgart NF 69: 85-183. Stuttgart.
- STEININGER, A. (1993): Anleitung zur Erfassung und Umsetzung Forstlicher Standortsprofilbeschreibungen. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung. Hannover (unveröff.)
- SUMNER, M.E. (Hrsg.) (2000): Handbook of Soil Science. Boca Raton/Florida u.a.
- THIEMANN, K. (1998): Hydrologische und hydrochemische Untersuchungen zur Typisierung der Quellen des Dürreychtales/Nordschwarzwald. Diplomarbeit am Inst. f. Geographie u. Geoökologie, Univ. Karlsruhe (TH). Unveröff.
- TROLL, C. (1950): Die geographische Landschaft und ihre Erforschung. In: *Studium Generale*, III: 163-181.
- UCHIDA, T., KOSUGI, T. & MIZUYAMA, T. (1999): Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. *Journal of Hydrology* 222(1999):18-36.
- UHLENBROOK, S. & C. LEIBUNDGUT (1997a): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. *Wasser und Boden*, 49.Jhg. H.9.
- Uhlenbrook, S. & C. Leibundgut (1997b): Abflußbildung bei Hochwasser. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Ministerium f. Umwelt u. Forsten Rheinland-Pfalz. o.O.
- Uhlenbrook, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. Diss. Geowissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. Freiburg.
- VOGT, T. & M. LENCO (1995): Wetland mapping and monitoring in the Rhine Alluvial Plain (Alcace, France). *Sistema Terra*, 4: 75-78.
- VOGT, T. & H. VOGT (1996): Neotektonische Bedingtheit geoökologischer, durch Fernerkundung erkannter Verhältnisse im Nordelsaß und Bienwald (südliche Rheinpfalz). *Heidelberger Geographische Arbeiten* Bd.104:82-88. Heidelberg
- VOLKMANN, H. (2002): Gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (DOC) im Dürreychbachtal (N-Schwarzwald) – Transportdynamik und Nutzung als natürlicher Tracer zur Identifizierung dominierender Abflussprozesse. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (in Vorber.). Karlsruhe
- WEISE, O.R. (1983): Das Periglazial –Geomorphologie und Klima in gletscherfreien, kalten Regionen. Berlin, Stuttgart.
- WIEDERHOLD, J. (2002) Fraktionierung von Eisenisotopen in einer Stagnogley-Ockererde-Catena auf Buntsandstein. Diplomarbeit am Inst. f. Geographie u. Geoökologie, Univ. Karlsruhe (TH). Unveröff.
- WINKLER, N. (1992): Spezielle hydrologische Probleme im Forststraßenbau. Dissertation am Inst. f. Forsttechnik., Universität für Bodenkultur. Wien.
- WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A. & V. SOKOLLEK (1992): Landschaftswasserhaushalt – Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Hamburg; Berlin.
- ZEDLACHER, D. Güterwegebau und Hochwasserabfluß in Wildbachgebieten. *Österreichische Forstzeitung* 1/1993:54-55.
- ZEHE, E., MAURER, T., PLATE, E. (2000): Modeling water flow and mass transport in a loess catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, Vol 26/7-8:487-507.

- ZEHE, E. & G. WALDENMEYER (2001): Physically based Simulation of Runoff Processes using estimated Data from a Forestry Site Map. Posterbeitrag, XXVI General Assembly of the European Geophysical Society (EGS), section HSA5: Hydrological processes and distributed hydrological modelling. Nice.
- ZEPP, H. (1995): Klassifikation und Regionalisierung von Bodenfeuchtereime-Typen. Relief Boden Paläoklima Bd.9. Berlin, Stuttgart.
- ZIMMERMANN, S. (1999): Wissensbasierte Regionalisierung in der Hydrologie. Dissertation am Internationalen Hochschulinstitut Zittau (IHI). Zittau
- ZIMMERMANN, L. (1995): Der Bodenwasserhaushalt an einem Hochlagenstandort im Südschwarzwald. Inst. f. Waldernährungslehre. Freiburg.

Kartengrundlagen

- FORSTDIREKTION KARLSRUHE (1995): Forstkarte 1 über den Staatswald Kaltenbronn, Gemeinde Gernsbach, Vermessungsbüro der Forstdirektion Karlsruhe 1985, Stand 1.10.1995
- GLA BW (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1967): Geologische Karte 1:25.000, Bl. 7216 Gernsbach.
- GLA BW (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1994a): Geologische Karte 1:25.000 von Baden-Württemberg – Erläuterungen zu Blatt 7216 Gernsbach. unveränd. Nachdruck der 1. Aufl. (1936)
- GLA BW (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1994b): Bodenübersichtskarte von Baden-Württemberg 1:200.000. Blatt CC 7910 Freiburg Nord –Karte und Tabellarische Erläuterung. Freiburg i. Br.
- GRAßMANN, A. (1996): Standortskarte 1991, Forstbezirk Kaltenbronn, Staatswald Kaltenbronn, Gemeinde Gernsbach mit Erläuterungen zu den Standortskarten des Forstbezirks Kaltenbronn. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt, Abt. Botanik und Standortskunde. Freiburg.
- INSTITUT FÜR LANDESKUNDE (Hrsg.) (1967): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 170 Stuttgart. Geographische Landesaufnahme 1:200.000 – Naturräumliche Gliederung Deutschlands. Bad Godesberg.
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1989): Deutsche Grundkarte 1 : 5.000 Bl. 7216.17 Lerchenstein
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1989): Deutsche Grundkarte 1 : 5.000 Bl. 7216.11 Am Rank
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1989): Deutsche Grundkarte 1 : 5.000 Bl. 7216.12 Dürreych
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1989): Deutsche Grundkarte 1 : 5.000 Bl. 7216.18 Lochbrunnen
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1989): Deutsche Grundkarte 1 : 5.000 Bl. 7216.16 Orgelfelsen
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1989): Deutsche Grundkarte 1 : 5.000 Bl. 7216.23 Kleiserstein
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1992):Topographische Karte 1 : 25.000, Bl. 7216 Gernsbach
- LVA BW (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; Hrsg.) (1997): Topographische Karte 1 : 50.000, Bl. L 7316 Bad Wildbad

Gemäß Vertrag über die Nutzung von topographischen und kartographischen Basisinformationen zwischen dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg und dem Institut für Geographie und Geoökologie der Universität Karlsruhe wird hiermit auf die Datenquelle der genutzten Karten hingewiesen:

Grundlage: Topographische Karten Baden-Württemberg, wie zuvor aufgeführt © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), vom 21.05.03, Az.: 2851.3-A/318.

Software

BMDP (1992): (Bio Medical Data Package) BMDP statistical software manual: to accompany the 7.0 software. BMDP Statistical Software, Inc.

ESRI Inc. (2000): ArcView 3.2a (Software), Online-Hilfe, Redlands, USA

HIRSCH, J. & SCHNEIDER, C. (1983): Cartel. Manuel d'utilisation du logiciel de traitement d'images et de cartographie de données de télédétection. Strasbourg. Laboratoire Environnement, Cartographie, Télédétection Université Louis Pasteur de Strasbourg

MEDIA CYBERNETICS, L.P. (1999): Image Pro Plus, Version 4.1 für Windows

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Erläuterungen
Abflussbeiwert (ψ)	Verhältnis von Direktabfluss zum Niederschlag: $0 \leq \psi \leq 1$ (DYCK & PESCHKE 1995)
DHM	Digitales Höhenmodell. Im Dürreychgebiet auf 10 m- und 30 m-Basis erstellt.
Dominanter Abflussprozess	Im Mittel vorherrschender Abflussbildungsprozess eines Raumausschnitts ungeachtet seines aktuellen Feuchtezustands. Gleichzeitig sind alle anderen Prozesse untergeordnet möglich! Unterscheidung von <i>potenziell</i> dominantem Abflussprozess (bedingt durch Einzugsgebietseigenschaften) und <i>aktuell</i> dominantem Abflussprozess (ereignisbedingt).
Ereigniswasser	Abflusskomponente, die in ihrer chemisch-physikalischen Signatur dem unmittelbar vorausgegangenen Niederschlag entspricht
Feuchthfläche	Raumausschnitt mit dauerhaften boden-/vegetationskundlichen Feuchtemerkmalen (z.B. Vergleyung, Pseudovergleyung, Vermoorung, Auftreten von Feuchteindikatorpflanzen etc.), ungeachtet des Abflussbildungsprozesses. Häufig \rightarrow Sättigungsflächen.
FSE	Forstliche Standortseinheit. Forstökologische Grundeinheit, die Standorte mit ähnlichen waldbaulichen Möglichkeiten und Gefährdungen zusammenfasst (AK STANDORTSKARTIERUNG 1996:15f).
FSK	Forstliche Standortskarte. Im Dürreychgebiet die FSK des Forstbezirks Kaltenbronn mit Erläuterungsband (GRAMMANN 1996).
Groporen	Poren mit Äquivalentdurchmessern von $> 10 \mu\text{m}$ (AG BODEN 1994:296). Man unterscheidet enge G. (10 bis $50 \mu\text{m}$) und weite G. ($> 50 \mu\text{m}$). Der Anteil an weiten G. ist identisch mit der sickerwasserwirksamen Luftkapazität.
Groundwater Ridging	Ähnlich \rightarrow Piston Flow. Der Effekt ist auf größere Talauen beschränkt (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997) und somit für das Dürreychgebiet unbedeutend.
grundfeucht	Mittlerer scheinbarer \rightarrow Grundwasserstand 8-16 dm unter Geländeoberfläche; kapillare Wassernachlieferung in den Oberboden (AK STANDORTSKARTIERUNG 1996). Der Begriff wird in der Standortskarte Kaltenbronn auch für stauwasserbeeinflusste Böden verwendet.
Grundwasser	Unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung überwiegend von der Gravitation und den aus der Bewegung resultierenden Reibungskräften bestimmt wird (HÖLTING, 1989; ehem. DIN 4049). Gliederung in tiefes G. (Festgesteinsklüfte/-poren) und flaches G. (Auensedimente, Schuttdecken).
Hangskale	Meist streifenförmig verstandener Raumausschnitt zwischen Wasserscheide und Tiefenlinie.
Hangwasser, Hangzugwasser	Oberflächennahes, hangparallel abfließendes \rightarrow Grundwasser oder \rightarrow Stauwasser
HOA	\rightarrow Horton'scher Oberflächenabfluss
Horton'scher Oberflächenabfluss	Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss
Hydrotop	Hydrologisch homogenes Teilgebiet (DYCK & PESCHKE 1995:112). Die AG Dürreych verwendet den Begriff „Hydrotop“ und versteht darunter Flächen mit gleichen dominierenden Abflussprozessen (\rightarrow Hydrotoptyp). Oft synonym verwendet: Pedohydrotop, Ökotop, HSU (Hydrological Similar Unit) und HRU (Hydrological Response Unit). HRU: eher funktionelle Homogenität (gleiche dominierende Prozesseigenschaften) HSU: eher strukturelle Homogenität (Relief, Boden, Nutzung), REA (Representative Elementary Area, WOOD et al. 1988). Z.T. werden die Begriffe mit bestimmten Modellkonzepten assoziiert: So etwa HRU mit dem hydrologischen Modell PRMS des U.S. Geological Survey (LEAVESLEY et al., 1983).
Hydrotopklasse	Zusammenfassung von \rightarrow Hydrotoptypen bzw. Hydrotopen
Hydrotoptyp	\rightarrow Hydrotop, explizit verstanden als Prozesstyp im Sinne der AG Dürreych
INF	Infiltration. Dominanter Prozess: \rightarrow Tiefensickerung
INF!	Schnell abflusswirksame Infiltration auf vorfluternahen Flächen mit geringem Flurabstand
Laborskale -	Aus dem topographischen Zusammenhang gelöster Raumausschnitt von $< 10^{-1} \text{ m}$
Langsame Abflusskomponente	Stark verzögerter und gedämpfter Beitrag zum Abflussgeschehen als Reaktion des Grundwassersystems auf Niederschläge. Entspricht dem Basisabfluss.
Makroporen	Porengrößen und -strukturen, die eine deutlich schnellere Wasserbewegung als in der Bodenmatrix zulassen (BEVEN & GERMANN 1982). Die Größenordnung wird in der Literatur uneinheitlich angegeben (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997). Für das Dürreychgebiet: $> 2 \text{ mm}$ bis mehrere cm.

Begriff	Erläuterungen
Makroskale	Auf Einzugsgebietsgrößen bezogen: > 100 km ² (KLEEBERG et al. 1999)
Mesoskale	Auf Einzugsgebietsgrößen bezogen: 0,01 bis 100 km ² (KLEEBERG et al. 1999)
Mikroskale	Auf Einzugsgebietsgrößen bezogen: <0,01 km ² (KLEEBERG et al. 1999)
Misse	Regionale Bezeichnung für abflussträge Hochflächen im Nordschwarzwald mit z.T. ausgeprägter Vermoorung. Vgl. auch LFU BADEN-WÜRTTEMBERG (1993)
Modell	1.) Modellkonzept: Verbale, illustrative oder mathematische Abstraktion von Niederschlags-Abfluss-Prozessen 2.) Simulationsmodell: Software zur Berechnung von Niederschlags-Abfluss-Prozessen auf Grundlage eines Modellkonzepts
N-A-Modell	Niederschlags-Abfluss-Modell im Sinne von → Simulationsmodell
Nested Catchments	Hierarchisch ineinander geschachtelte Einzugsgebiete. Charakteristisch: Mit zunehmender Größe abnehmende Komplexität
Oberflächenabfluss	1.) → I.e.S. Horton' scher O.: Oberflächlich abfließender Infiltrationsüberschuss infolge Aufsättigung von oben 2.) → Sättigungsflächenabfluss 3.) Abfluss in offenen Gerinnen
Ockererde	Mit Stagnogleyen vergesellschaftete Braunerden mit Ockerausfällungen durch laterale Zufuhr von gelöstem Eisen. Die bodensystematische Stellung wird noch diskutiert (JAHN & FIEDLER 2001). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Ockererde der Pseudogley-Braunerde gleichgestellt.
Pipe Flow	Schneller Fluss in größeren Röhren (Größenordnung 10 ⁻² m). Oft Wurzelbahnen, Subrosionsröhren (im Dürreychgebiet oft unter Wurzeltellern, Hangrinnen), Grabegänge
Piston Flow	Herausdrücken von vorfluternahem Wasser durch vorfluterfern infiltrierendes Wasser infolge Druckfortpflanzung vom Oberhang zum Unterhang. Notwendige Voraussetzung: Durchgängige hydraulische Verbindung.
Plot- oder Punktskale	Raumausschnitt von einigen m ² bis wenigen 10er m ² . Im angloamerikanischen Sprachraum gebräuchlicher Terminus.
Profilskale	Vorwiegend vertikal verstandener Raumausschnitt, Größenordnung 1 m ² . Synonym: Punktskale (MERZ, 1996)
Regionalisierung	In KLEEBERG (1992): „Ausweisung von Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften“ oder von „hydrologisch ähnlichen Gebieten“. Der Begriff schließt auch die „Regionale Übertragung“ als flächenhafte Verallgemeinerung hydrologischer Größen ein – etwa vom Punkt zur Fläche oder geographische Übertragung (KLEEBERG et al. 1999:4). Übertragen werden Berechnungsvorschriften, Modellparameter und Zustandsgrößen.
Return Flow	Exfiltrierender Bodenwasseranteil
SOA	→ Sättigungsflächenabfluss
Sättigungsflächenabfluss, Sättigungsabfluss	Form des → Oberflächenabflusses. Die → Grundwasseroberfläche oder → Stauwasseroberfläche erreicht die Geländeoberfläche (engl.: Saturation Excess Flow). Bei Neigung entsteht → Oberflächenabfluss. Dieser setzt sich aus → Return Flow und Niederschlag auf bereits gesättigte Flächen zusammen (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997). Enge, in der Praxis nicht trennbare Wechselwirkung mit oberflächennahem → Zwischenabfluss.
Schnelle Abflusskomponenten	Beitrag zum Abflussgeschehen innerhalb weniger Stunden bis zu 2 Tagen. Entspricht dem Direktabfluss.
Schuttdecke	Hauptsächlich im Periglazial entstandenes Lockersediment über Festgestein.
Schuttquelle	Wasseraustritte aus Schuttdecken, i.d.R. aus flachem → Grundwasser bestehend
Sesquioxide	Sammelbezeichnung für Oxide des Eisens, Aluminiums und Mangans (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997)
Stagnogley	Stauwasserboden mit ausgeprägter, langer Nassphase (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). Kennzeichen: Starke Nassbleichung des Oberbodens, Feuchthumus.
Stauwasser	Zeitweilig auftretendes bewegliches Bodenwasser über hoch anstehendem StauhORIZONT, meist oberhalb 13dm u GOK (AG BODEN 1994)
Subrosion	Sammelbegriff für unterirdische Abtragung (LESER 1997), oft durch Erweiterung von → Makroporen, Tunnelerosion
Tiefensickerung	Synonym: Perkolation. Gravitationsbedingte Wasserbewegung aus der Bodenzone in die Grundwasserzone

Begriff	Erläuterungen
Vorereigniswasser	Abflusskomponente, die in ihrer chemisch-physikalischen Signatur weiter zurückliegenden Niederschlagsereignissen entspricht und im Boden/Grundwasser gespeichert wurde (Alter von Tagen bis zu mehreren Jahren)
ZWA	→ Zwischenabfluss
Zwischenabfluss	Synonym: Interflow, Bodeninnerer Abfluss, Hypodermischer Abfluss, Oberer Deckschichtenabfluss, Interflow, Shallow Subsurface Flow, Subsurface Stormflow etc. Überbegriff für verschiedene laterale, meist oberflächennahe Matrix- und/ oder Makroporenflüsse. Voraussetzung: Nach unten abnehmende hydraulische Leitfähigkeit sowie ausreichende Hangneigung. Auch Gliederung in schnellen Z. (z.B. Makroporenfluss in der Humusauflage, Subrosionsröhren über Ortstein) und langsamen Z. (tiefere Horizontgrenzen).

Anhang A1: Übersichtskarten

A1-1: Messeinrichtungen der AG Dürreych:

Klimastationen mit Bodenfeuchtemessung:

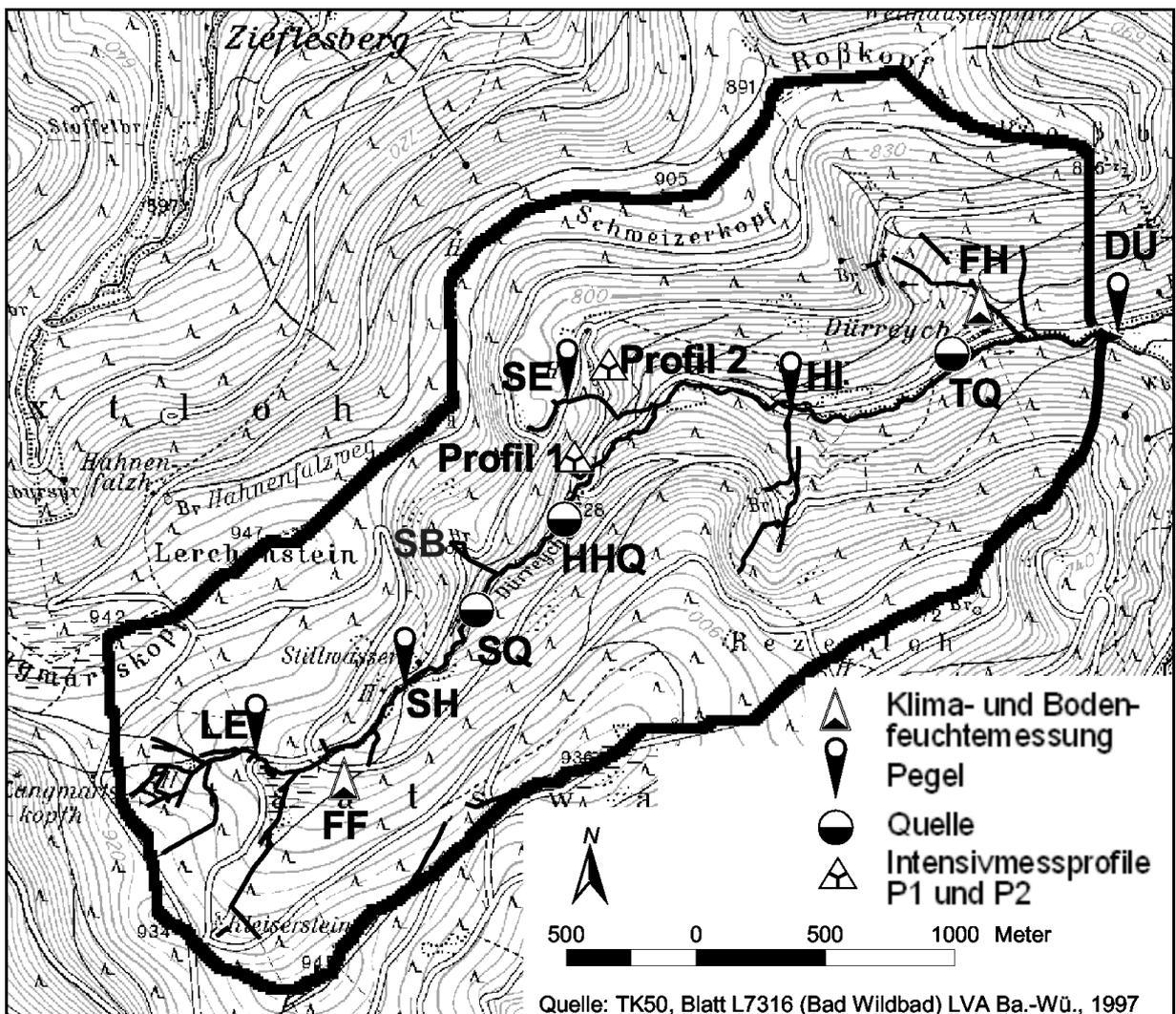
FF Freifläche (875 m NN) FH Forsthaus (625 m NN)

Pegel und Quellmesstellen:

DÜ Hauptpegel Dürreych	SE Seemißkar
HHQ Quelle Hirschhalde	SH Stillwasserhütte
HI Hirschklinge	SQ Stillwasserquelle
LE Lerchenstein	TQ Quelle Teich Forsthaus
SB Seebergkar	

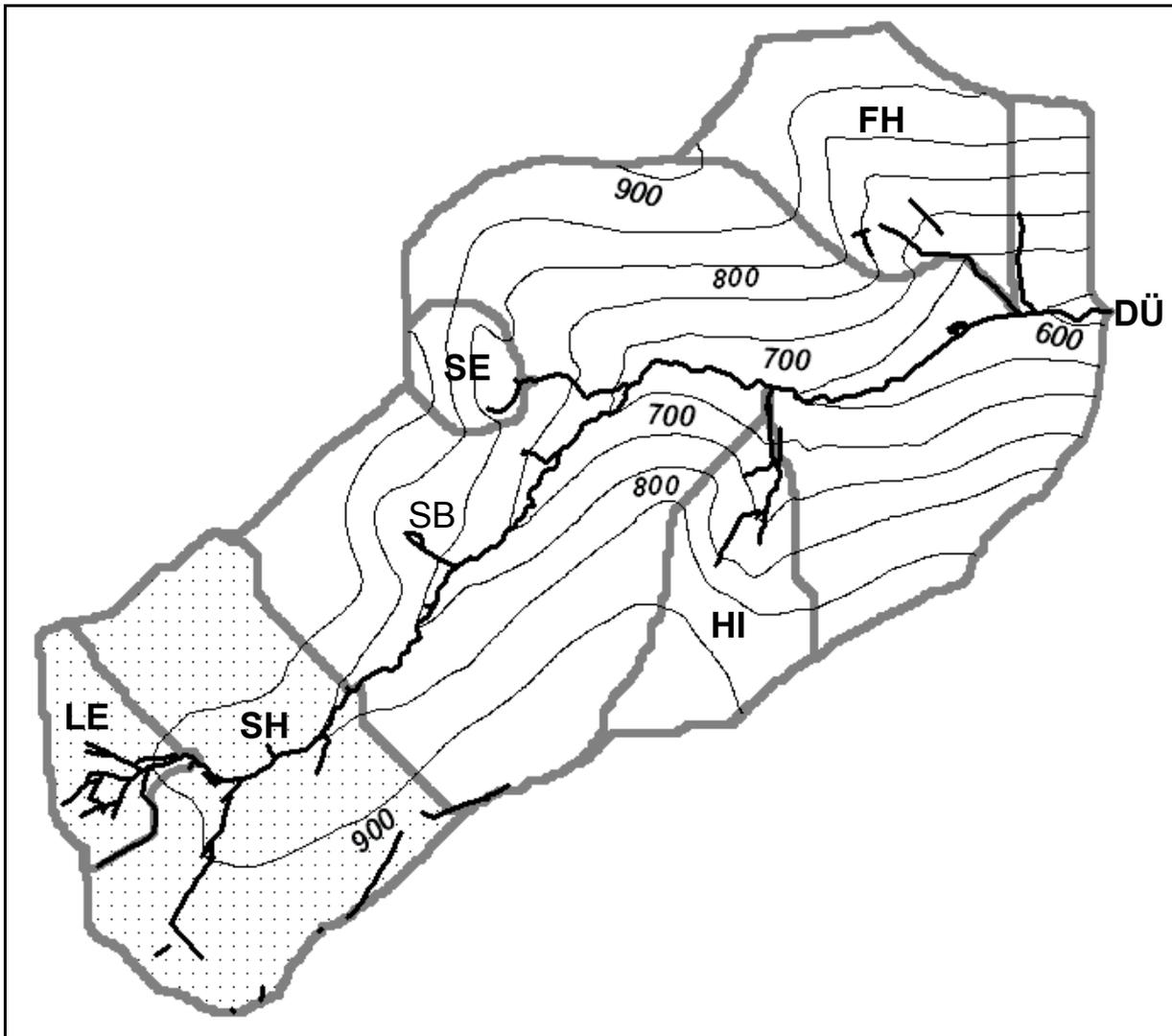
Intensivmessprofile:

Profil 1 Bändchenstagnogley mit Zwischenabfluss
 Profil 2 Braunerde-Kolluvisol mit Infiltration



A1-2: Die wichtigsten Teileinzugsgebiete des Dürreychgebiets:

DÜ:	Gesamteinzugsgebiet Dürreych	(6,99 km ²)
FH:	Forsthaus	(0,73 km ²):
HI:	Hirschklinge	(0,49 km ²)
LE:	Lerchenstein (Untereinzugsgebiet des Teileinzugsgebiets SH)	(0,27 km ²)
SE:	Seemißkar	(0,16 km ²)
SH:	Stillwasserhütte (gerasterte Fläche), darin enthalten: Teileinzugsgebiet LE	(1,57 km ²)
SB:	Seebergkar; keine flächenbezogenen Untersuchungen	-



Anhang A2: Forstliche Standortseinheiten (FSE)

A2-1: Ökoserien im Dürreychgebiet (GRAßMANN, 1996, verändert):

Montane Stufe

Ebene und schwach geneigte Lagen (0-15°)	Flachhänge (15-30°)	Steilere Hänge (>30°)	Sonstige morphologisch bedingte Einheiten
<i>Durchlässige Sande</i>	<i>Sandige Flachhänge</i>	<i>Sandige Steilhänge</i>	<i>Rücken und Kuppen</i>
<i>Nicht vernässende lehmige Sande</i>	<i>Sandig-lehmige Flachhänge</i>	<i>Blockhänge</i>	<i>Rinnen, Bachtäler und Senken</i>
<i>Vernässende lehmige Sande</i>			
<i>Missen und vermoorte Lagen</i>			

Hochmontane Stufe

Ebene und schwach geneigte Lagen (0-25°)	Steilere Hänge (>25°)	Sonstige morphologisch bedingte Einheiten
<i>Lehmige Hochlagensande</i>	<i>Keine Unterteilung in Ökoserien</i>	<i>Keine Unterteilung in Ökoserien</i>
<i>Hochlagensande</i>		
<i>Hochlagenmissen und Moore</i>		

A2-2: Forstliche Standortseinheiten im Dürreychgebiet (GRAßMANN, 1996, verändert):

Montane Stufe

Ebene und schwach geneigte Lagen (0-15°)	Flachhänge (15-30°)	Steilere Hänge (>30°)	Sonstige morphologisch bedingte Einheiten
<i>Durchlässige Sande</i>	<i>Sandige Flachhänge</i>	<i>Sandige Steilhänge</i>	<i>Rücken und Kuppen</i>
pS BuTa* auf mäßig frischem podsoliertem Sand	SFH BuTa auf mäßig frischem sandigen Flachhang	SWH BuTa auf mäßig frischem sandigem Winterhang	sRü- mäßig trockener Rücken
<i>Nicht vernässende lehmige Sande</i>	SFH- TaKi(Ei) auf mäßig trockenem sandigen Flachhang	pSWH BuTa auf mäßig frischem Podsol-Winterhang	<i>Rinnen, Bachtäler und Senken</i>
gIS BuTa auf mäßig frischem vergütetem lehmigen Sand	<i>Sandig-lehmige Flachhänge</i>	SSH+ BuTa auf frischem sandigem Sommerhang	Ri Rinnen und Senken
IS BuTa auf mäßig frischem lehmigen Sand	sIFH BuTa auf mäßig frischem sandig-lehmigem Flachhang	SSH BuTa auf mäßig frischem sandigem Sommerhang	BIRi Blockrinnen
<i>Vernässende lehmige Sande</i>		pSSH BuTa(Ki) auf mäßig frischem Podsol-Sommerhang	gLa Grundfeuchte Lagen (Sammeleinheit)
gfs Grundfeuchter Sand (Sonderausprägung)		SSH- TaKi(Ei) auf mäßig trockenem sandigem Sommerhang	
<i>Missen und vermoorte Lagen</i>		<i>Blockhänge</i>	
wzMi Wasserzügige Misse		BIWH+ Frischer Block-Winterhang	
MLa Moorlagen		BIWH BuTa auf mäßig frischem Block-Winterhang	
		BISH BuTa(Ei) auf mäßig frischem Block-Sommerhang	
		BISt Blockströme	

A2-2 (Forts.)

Hochmontane Stufe

Ebene und schwach geneigte Lagen (0-25°)	Steilere Hänge (>25°)	sonstige morphologisch bedingte Einheiten
Lehmige Hochlagensande	<i>Keine Angabe zur Ökoserie</i>	<i>Keine Angabe zur Ökoserie</i>
HIS Lehmiger Hochlagensand TaFi(Bu)	HSH Hochlagen-Sommerhang TaFi(Ki)	HBIRü Rauhe blockreiche Bergrücken und Hochlagen
HgflS+ Schwach grundfeuchter lehmiger Hochlagensand TaFi(Bu)	HWH Hochlagen-Winterhang TaFi(Bu)	
HgflS Grundfeuchter lehmiger Hochlagensand TaFi(Ki)	HBIWH Hochlagen-Block-Winterhang TaFi(Bu)	
Hochlagensande		
HpS Podsolierter Hochlagensand TaFi(Ki)		
Hgfs+ Schwach grundfeuchter Hochlagensand TaFi(Ki)		
Hgfs Grundfeuchter Hochlagensand TaFi(Ki)		
Hochlagenmissen und Moore		
HMi Abflussträge Hochlagen-Misse Fi(Ki)		
HMi+ Wasserzügige Hochlagen- Misse Fi(Ki)		
MR Moorrandlege Fi(Ki)		

- Bu=Buche, Fi=Fichte, Ki=Kiefer, Ta=Tanne. Die Baumarten sind Angaben zur potentiell natürlichen Vegetation

A2-3: Übersetzung bodenkundlicher FSE-Angaben in die Nomenklatur der AG BODEN (1994)

Tiefe bis	Umsetzung halbquantitativer Angaben: „Schmal, schwächlich, kurz“: bis 5 cm „Mächtig“: bis 40 cm (oft bei Ae-Horizonten)
Bodentyp	Bodentypbezeichnung in Langform wurden nachrichtlich übernommen und entsprechen nicht immer der Nomenklatur nach AG Boden (1994). Bodentypenkürzel wurden gem. AK Bodensystematik (1998) angegeben. Sonderfälle: „Verockerte Braunerde“: (SS)-BB. Die Angabe „Ranke“ wurden zum Regosol (RQ) berichtigt.
Horizont	Horizontbezeichnung entsprechen nicht immer AG Boden (1994). Verockerte Horizonte wurden als Horizonte mit Pseudovergleyung durch laterales Zuschusswasser gedeutet.
Farbe	Angabe als Abkürzungen ohne Farbtafel nach AG Boden (1994:106f).
Humus	h2: „schwach humos oder humusinfiltriert“ h3: „humos“, „mittel humos“; ebenso bei fehlender Angabe für Ah-Horizonte h4: „stark humos“ h2...h4: „wechselnd humos“
Oxidationsmerkmale	e: „orangefarbene Flecken“, „verockert“, „Ockerflecken“
Reduktionsmerkmale	r: „naßgebleicht“
Gefüge	sub: „schwach aggregiert“ kit: „verfestigt“ bro: „bröckelig“ klu: „brockig“
Lagerungsdichte	Ld1: „lose, schwach locker“ Ld2: „locker“ Ld2...3: „mäßig locker“ Ld3: „mäßig fest“ Ld3...4: „ziemlich fest“ Ld4: „fest“ Ld4...5: „auffallend fest“
Bodenart	SI2: „anlehmiger Sand“ SI3: „lehmiger Sand“ Bei Angabe von Wertespannen wurde eine Einzelbodenart angegeben, die im Korngrößendreieck (AG BODEN 1994:134) auf der Mitte zwischen den Flächenschwerpunkten der angegebenen Klassen liegt: z.B. „Lehmiger Sand bis sandiger Lehm“: Ls4 „Sand, stellenweise schwach lehmig“: Ss „Sand bis schwachlehmiger Sand“: Su2 etc. Bei fehlenden Angaben wurden für eng verwandte Horizonte die gleichen Bodenarten angenommen: z.B. Ae- und Ahe –Horizont.
Skelett	X2: „schwach steinig“ (bis 10 %) X3: „mittel steinig“ (bis 40 %) X4: „stark steinig“ (> 40 %) Die gewählte Einteilung entspricht <u>nicht</u> AG BODEN (1994), die für extreme Skelettgehalte ungeeignet ist! Die Prozentangaben entstammen eigenen Geländebeobachtungen.
Skelettfraktion	Lediglich das Vorkommen von Blöcken wird angegeben, i.d.R. werden kleinere Fraktionen nicht unterschieden
Sonstiges	Ergänzt wurden die Abkürzungen Hko: Holzkohle Oc: Ockerflecken

Anhang A3: Profile der Forstlichen Standortskarte (FSK)

Vgl. zu diesem Anhang die Anmerkungen zur Erfassung der FSK-Legendeninformationen in A2-3!

A3-1: Standortbeschreibung der FSK-Leitprofile (Quelle: GRABMANN 1996)

Abkürzungen und Erläuterungen:

ID= Profil-Identifikations-Nr.; FSE = Forstliche Standortseinheit; EZG = (Teil-)Einzugsgebiet (vgl. Karte A1-2, „Sonst.“ = sonstiges benachbartes Einzugsgebiet im Bereich der FSK Kaltenbronn); Bodentyp: Bezeichnung nach GRABMANN (1996), vgl. dazu Anm. in A2-3; Bodentyp-Kürzel = Abkürzung des Bodentyps nach AK BODENSYSTEMATIK (1998); Pos. = Reliefposition (Unter-, Mittel-, Oberhang); Höhe in m NN; Neig. = Hangneigung in °; Expos. = Exposition; Wölbg. = Wölbung; Jahr = Jahr der Profilaufnahme. Die Abkürzungen für Bodentyp und Wölbung richten sich nach AG BODEN (1994).

ID	FSE	EZG	Bodentyp	Bodentyp-Kürzel	Relief	Pos.	Höhe	Neig.	Expos.	Wölbg.	Jahr
402	gfS	SH	(stark) podsolierte verockerte Braunerde (pods. Pseudogley-Braunerde)	(SS)-pBB	Hang	U	870	3	N		1988
405	gfS	HI	Podsol-Pseudogley	PP-SS	Sattel	O	865	0		(X, X)	1988
406	HMi+ HgfS	Sonst.	Podsol-Pseudogley	PP-SS	Hochfläche	O	930	0		(X, X)	1988
407	HMi	Sonst.	Stau-Podsol	SG-PP	Hochfläche	O	960	0	(SE)		1988
409	HWH	Sonst.	Humus-Eisen-Podsol	PPn	Flachhang	O	950	8	E		1988
410	HpS	Sonst.	etwas verockerter Humus-Eisen-Podsol... Braunerde-Podsol	(SS)-BB-PP...BB-PP	Hang		940	6	SE		1988
412	MLa	Sonst.	Stagnogley-Hochmoor (Hochmoor)	HH	k.A.		900		k.A.		1988
413	BISH	DÜ	Humus-Eisen-Podsol (Norm-Podsol)	PPn	Hang		820	17	SE		1988
416	pSWH	Sonst.	Humus-Eisen-Podsol	PP...(PPd)	Hang		600	17	NE	X, X	1988
417	pSWH	DÜ	Humus-Eisen-Podsol... Braunerde-Podsol	PP...BB-PP	Hang	U	680	14	N...N E		1988
418	HgfS	Sonst.	Podsol-Pseudogley... Podsol-Stagnogley	PP-SS...SG-PP	Hochfläche	O	945		SE		1988
420	HpS	Sonst.	bis in den Oberboden verockerter Humus-Eisen-Podsol (Pseudogley-Podsol)	SS-PP	Hochfläche	O	920	0		(V, V)	1988
421	HgflS+	Sonst.	durch Bearbeitung tief humose Ockererde-Braunerde	(SS)-BB	Hochfläche	O	922	0		(V, V)	1988
422	HIS	Sonst.	stark podsolierte Braunerde...(Ockererde)	pBB...(SS)-pBB			922				1988
423	HgflS	Sonst.	verockerte podsolierte Braunerde/Braunerde-Podsol (pods. Pseudogley-Braunerde)	(SS)-pBB...BB-PP	Hochfläche	O	928			(X, X)	1988
424	HgflS	Sonst.	verockerter Podsol-Pseudogley	PP-SS			930				1988
428	HgfS	Sonst.	verockerte Podsol-Braunerde (Pseudogley-Braunerde)	(SS)-pBB	Mulde		910			(V, V)	1988

A3-2: Horizontbeschreibung der FSK-Leitprofile (Quelle: GRAßMANN 1996)ß

Abkürzungen und Erläuterungen:

ID= Profil-Identifikations-Nr.; FSE = Forstliche Standortseinheit; Hor.-Nr. = Horizontnummer, Tiefe = Horizonttiefe in [cm]; Horizont = Horizontbezeichnung nach AK BODENSYSTEMATIK (1998); Farbe = Horizontfarbe, qualit. Angabe nach AG BODEN (1994:106 f.); Ox. = Oxidationsmerkmale; Red. = Reduktionsmerkmale; Sonst. = Sonstiges; Ld = Lagerungsdichte bzw. Z/SV = Zersetzungsgrad und Substanzvolumen von Torfen; Wurz. = Durchwurzelung. Skel. = Skelettgehalt [%]; B.-Art = Bodenart; Hum. = Humusklasse. Die Abkürzungen für die zuvor genannten Horizontmerkmale richten sich nach AG BODEN (1994). Kursiv gedruckte Bodenarten und Humusklassen wurden im Labor bestimmt (vgl. nachfolgende Tabelle A4-3).

ID	FSE	Hor.-Nr.	Tiefe	Horizont	Farbe	Ox.	Red.	Sonst.	Gefüge	Ld Z/SV	Wurz.	Skelett	B.-Art	Hum.
402	gfS	1	-15	RO									O	
402	gfS	2	25	Ahe	dgr				koh	2,5		X3	SI3	4
402	gfS	3	55	Ae	hgr			Hu				X2	SI2	2
402	gfS	4	70	SBv	hbn, gebn	e		Hu, Oc	koh... (agg)	1		X3	SI2	1
402	gfS	5		Bv						4		X4	SI2	0
405	gfS	1	-15	RO									O	
405	gfS	2	20	Ahe	dgr			Sgb	koh	1			SI3	3
405	gfS	3	35	Ae-Sw	bnligr				koh-ein	1,5		X2	Ss	
405	gfS	4	45	rBs-Sw	dbngr			Hu, Rwu	(agg), klu	2,5			SI3	3
405	gfS	5	55	Sd-Bs	bn, ocbn	e			(kit)	3,5		X3	SI2	
405	gfS	6	75	SBv-Cv										
406	HMi+, HgfS	1	-20	RO									O	
406	HMi+, HgfS	2	5	Ahe	dbn				koh	1,5			SI2	4
406	HMi+, HgfS	3	25	Ae(?Sew)	bnli, hgr			Hu	koh-ein	1		X2	Ss	2
406	HMi+, HgfS	4	50	Bv-Sw	hgrbn	e		Rwu	(agg)-bro	3		X2	SI3	1
406	HMi+, HgfS	5	80	Sd-Cv	hro	e	r		sub-bro	3,5			St3	
407	HMi	1	-30	ROF									O	
407	HMi	2	20	SAeh	swgr			Hko	koh-pl				SI3	4
407	HMi	3	35	Shew	bnli-hgr			Rwu	koh	2,5			SI2	2
407	HMi	4	60	Ae-Sd	bnli-hgr	e				4		X3	Ss	
409	HWH	1	-20	GMO									O	
409	HWH	2	10	Aeh	dgr			Sgb	ein	2			SI2	3
409	HWH	3	50	Ae	grw				ein	2		X3	Ss	3
409	HWH	4	65	Bsh	rbn-swbn							X3	SI3	3
409	HWH	5	90	Bs	geli					4		X3	SI3	
410	HpS	1	-10	RO									O	
410	HpS	2	15	Aeh	dbngr				koh-ein	2		X3	SI2	3
410	HpS	3	20	Bsh	ocbn, swbn				(agg)	2,5		X3	SI3	2
410	HpS	4	60	Bvs	geocbn	e		Oc	(kit)	3,5		X3	SI2	
410	HpS	5	75	Bv-Cv	hbnro					4		X4	Ss	
412	MLa	1	50	hH	bn...sw			Rwu		3/4			O	
412	MLa	2	55	fAeh	sw									
412	MLa	3	60	fAeh	bligr			Hko		2			SI3	2
412	MLa	4	120	Sew	w		r		koh	3		X3	Ls3	
413	BISH	1	-10										O	
413	BISH	2	10	Aeh					ein	1		X4	SI2	4
413	BISH	3	23	Ahe	gr				ein (koh)	2		X3	SI2	2
413	BISH	4	38	Ae					ein	1		X4	Ss	
413	BISH	5	45	Bh	dbn				bro	2,5		X3	SI4	
413	BISH	6	60	Bhs	swbn, ocbn				(kit)	3		X4	SI3	3
413	BISH	7	75	Bs	leoc, gebn				kit	3,5		X4	SI3	
416	pSWH	1	-5	MOM									O	
416	pSWH	2	5	Ahe	dgr				ein	1			SI2	3

ID	FSE	Hor.-Nr.	Tiefe	Horizont	Farbe	Ox.	Red.	Sonst.	Ge-füge	Ld Z/SV	Wurz.	Ske-lett	B.-Art	Hum.
416	pSWH	3	30	Ae					ein	2		X4	SI2	2
416	pSWH	4	55	Bsh... (Bb)										
416	pSWH	5	63	Bs	oc, gebfn				kit	3		X3		
416	pSWH	6	80	Bv-Cv	fabn					4,5		X4		
417	pSWH	1	-5	MUO... MOM									O	
417	pSWH	2	5	Aeh	dgr-swli				koh	2		X2	SI3	4
417	pSWH	3	25	Ae	vilihgr				ein	1		X3	Ss	
417	pSWH	4	30	Bsh	dbn				bro	3		X4	SI4	
417	pSWH	5	50	Bvs	gebfn, ocbn				(agg)- (ein)- (kit)	2		X4	SI2	
417	pSWH	6	55	Bv-Cv	hbnröli				bro- koh	3		X3	SI2	
417	pSWH	7	70	Cv	hro					4		X3	Ss	
418	HgfS	1	-15	RO									O	
418	HgfS	2	5	Ahe	swli				koh- ein	2			SI3	4
418	HgfS	3	23	Ae	bngr				koh- ein	2		X3	SI2	2
418	HgfS	4	75	Ae-Sw		e	r	Oc	ein...- (agg)	2		X2	SI2	2
418	HgfS	5	90	Sd-Bv	robn	e			koh	3		X3	SI2	
420	HpS	1	-10	RO									O	
420	HpS	2	12	Ahe	dgr				koh	2,5			SI3	4
420	HpS	3	25	Ahe+k	bngr	e		Oc	koh	2,5			SI3	3
420	HpS	4	33	Ae+k	bnligr	e		Oc	koh				SI2	2
420	HpS	5	60	Bks... (Bb)	ocbn, fabn	e		Oc	agg... (kit)	3			SI3	
421	HgflS+	1	-8	MR... GMO									O	
421	HgflS+	2	12	Aeh	swbn			Sgb	koh- (bro)	2,5			Ls3	3
421	HgflS+	3	40	Ah-Bkv	gr, gebfn	e		Oc	bro- klu	2,5		X2	SI3	2
421	HgflS+	4	60	keine Angabe	gebfn	e		Oc	bro	2,5		X3	SI3	
422	HIS	1	-10	MOR									O	
422	HIS	2	12	Aeh	vili-gbn				kru- (koh)			X2	Ls3	3
422	HIS	3	20	Ah-Bv	dbn, bnge				koh- bro	2,5			Ls4	3
422	HIS	4	40	Bv	hbn, gbn				bro- klu	2,5		X2	SI3	
422	HIS	5	85	Bkv	hbn, gbn	e		Oc	sub- klu	2,5		X3	SI3	
423	HgflS	1	-13	RO									O	
423	HgflS	2	8	Ahe	bngr, hgr			Sgb	koh	2,5			SI3	4
423	HgflS	3	35	Bksv	gebfn	e		Oc	(agg)- bro- klu	2,5		X2	SI4	
423	HgflS	4	55	Bv+k	hbn	e		Oc	klu	3		X3	SI3	
423	HgflS	5	60	SBv	hbn	e	r	Oc	klu	3		X3	SI3	
424	HgflS	1	-10	RO									O	
424	HgflS	2	20	Ahe	dgr, (swli)			Hu	bro	2,5		X2	SI3	4
424	HgflS	3	80	GkSw	bnligr	e		Oc	sub- bro- klu	3		X3	SI3	
428	HgfS	1	-18	RO									O	
428	HgfS	2	15	Ahe	bnli-dgr				koh	2			SI3	2
428	HgfS	3	50	Bkv	rölibn	e		Oc	(agg)- bro	2,5			SI2	
428	HgfS	4	75	Cv-Bv	rölibn					4		X3	SI2	

A3-3: Horizontbeschreibung der Forstlichen Standortseinheiten (FSK-Legende, GRAßMANN 1996)

Abkürzungen und Erläuterungen:

ID= Profil-Identifikations-Nr.; FSE = Forstliche Standortseinheit; Hor.-Nr. = Horizontnummer, Tiefe = Horizonttiefe in [cm], meist jedoch fehlende oder qualitative Angaben; Horizont. = Horizontbezeichnung laut GRAßMANN (1998), teilweise ergänzt (vgl. A2-3); Farbe = Horizontfarbe, qualit. Angabe nach AG BODEN (1994:106 f.); Ox. = Oxidationsmerkmale; Red. = Reduktionsmerkmale; Sonst. = Sonstiges; Ld = Lagerungsdichte bzw. Z/SV =:Zersetzungsgrad/Substanzvolumen von Torfen; Wurz. = Durchwurzelung. Skel. = Skelettgehalt: X2 = schwach, X3 = mittel, X4 = stark; B.-Art = Bodenart; Hum. = Humusklasse. Die Abkürzungen für die zuvor genannten Horizontmerkmale richten sich nach AG BODEN (1994).

ID	FSE	Hor.-Nr.	Tiefe	Horizont	Farbe	Ox.	Red.	Sonst.	Gefüge	Ld Z/SV	Wurz.	Skelett	B.-Art	Hum.
501	pS	1		RO,(MO)									O	
501	pS	2	40	Ahe...Ae	dgr...gr							X3	Ss	
501	pS	3		B(s)h... (Bm)				(Ost)					Ss	
503	IS	1		MR-RO									O	
503	IS	2	20... 30	Aeh... Ahe	gbn... gr			Sgb	kru...s ub			X2	Sl3	
503	IS	3		Bv	hbn... bn				sub			X2	Sl4	
503	IS	4		Bv...Cv									Sl4	
506	gfS	1	15	RO									O	
506	gfS	2	30?	S(e)w*		e	r					X3	Ss	
506	gfS	3	50... 60?	Bbms- Sd*					kit				Sl3	0
507	wzMi	1	10... 35	RO... ROF									O	
507	wzMi	2	20	Sw-Aeh	grsw				kru...s ub			X2... X3	Sl4	
507	wzMi	3		Sew	hgr		rb		koh			X2... X3	Sl4	
507	wzMi	4		Sd	rovigr... (ocgr)				pol				Ts3	
508	MLa	1	bis 60	hH									O	
508	MLa	2		Sew?	w								Sl2	0
509	SFH	1		MO... (RO)									O	
509	SFH	2		Aeh...Ah e	grbn, vili				ein			X2	Ss	
509	SFH	3	tief- gründig	Bv	hbn... gbn				ein			X2... X3	Ss	
509	SFH	4		(IIBv)... Cv									St2	
510	SFH-	1		MO...RO									O	
510	SFH-	2		Aeh... Ahe	swgr... gr, vili				ein			X2	Ss	
510	SFH-	3		Ae	gr								Ss	
510	SFH-	4		Bsv...Bvs Bs...Bsh	robn... swbn				ein			X2... X3	Su2	
510	SFH-	5		(IIBv)... Cv									St2	
511	sIFH	1		MO									O	
511	sIFH	2		Aeh...Ah	bngr... dbngr				kru...s ub			X2	Ls3	
511	sIFH	3		Bv	hbn... bn				sub			X2	Sl4	
511	sIFH	4		Cv	hro								Sl2	
512	SWH	1		MO									O	
512	SWH	2		Aeh... Ahe	grsw				ein				Ss	
512	SWH	3	tief- gründig.	Bv...Bvs	bn... hbn				ein			X2... X3	Su2	
513	pSWH	1		MO									O	
513	pSWH	2		Aeh... Ahe	grsw				ein			X2... X3	Ss	
513	pSWH	3		Bh...Bhs ...Bs	swbn... robn			(Ost)	(kit)			X3	Su2	
513	pSWH	4		Bv...Cv									Sl2	
514	SSH+	1		MO									O	
514	SSH+	2		Ah...Aeh ...Ahe	sw... swgr				ein			X2	Ss	
514	SSH+	3	tief-	Bv	bn				ein			X3	Su2	

ID	FSE	Hor-Nr.	Tiefe	Horizont	Farbe	Ox.	Red.	Sonst.	Gefüge	Ld Z/SV	Wurz.	Skelett	B.-Art	Hum.
602	HgflS+	2		Aeh(Sw)	bngr				kru...sub			X2	Sl3	
602	HgflS+	3		Bv-Sw	hbn...fabn	e	r		sub			X2	Sl4	
602	HgflS+	4		Sd	robn				sub...pol			X3	St3	
603	HgflS	1		RO									O	
603	HgflS	2		Aeh(Sw)	bngr		r		kru...sub			X2	Sl3	
603	HgflS	3		Bv-Sw	h	e	r		sub			X2	Sl4	
603	HgflS	4		Sd	robn				sub...pol			X3	St3	
604	HpS	1		RO									O	
604	HpS	2	mächtig	Ae, (Sew)	gr							X3	Ss	
604	HpS	3		Bh...Bs, (Bb-Sd)				(Ost)					Sl3	
605	HgflS+	1		RO									O	
605	HgflS+	2	tiefgründig	„Oberboden“ (Sw-Ae?)	bnli							X3	Ss	
605	HgflS+	3		„Unterboden“ (Sd-Bs?)		e	r					X3	Ss	
606	HgflS	1		RO									O	
606	HgflS	2	mächtig	Sw	gr		r					X3	Ss	
606	HgflS	3		Bbms-Sd				Ost	kit				Sl3	
607	HMi	1	5... 30	hH...ROF						3/3			O	
607	HMi	2		Ahe-Sw	dgr								Ss	
607	HMi	3	mächtig	Sw	w		rb		ein				Ss	
607	HMi	4		Sd		e			pol			X3	Sl4	
608	HMi+	1	5... 30	hH...ROF						4/3			O	
608	HMi+	2	mächtig	Ahe-Sw	dgr								Ss	
608	HMi+	3		Sw	w		rb		ein				Ss	
608	HMi+	4		Sd		e			pol			X3	Sl4	
612	MR	1	bis 60	hHm						3/3			O	
612	MR	2		Srw	w		rb		ein			X3	Ss	0
613	HBIRü	1		RO									O	
613	HBIRü	2		Ahe	swgr			Sgb	ein	2		X3...X4	Ss	
613	HBIRü	3		Ae					ein			X3...X4	Ss	
613	HBIRü	4		Bsh...Bhs... (Bbms)	swgr...bnro			(Ost)	(kit)			X3...X4	Su2	
613	HBIRü	5	schmal	(Bvs)	hbn								Sl2	
613	HBIRü	6		Cv	hro								Sl2	0
614	HSH	1		RO									O	
614	HSH	2		Ahe	swgr			Sgb	ein			X3...X4	Ss	
614	HSH	3		Ae					ein			X3...X4	Ss	
614	HSH	4		Bsh...Bhs	swgr...bnro			(Ost)	kit			X3...X4	Su2	
614	HSH	5	schmal	Bvs	hbn								Sl2	
614	HSH	6		Cv	hro								Sl2	
615	HWH	1		RO									O	
615	HWH	2		Ahe	swgr			Sgb	ein			X3...X4	Ss	
615	HWH	3		Ae					ein			X3...X4	Ss	
615	HWH	4		Bsh...Bhs... (Bbms)	swgr...bnro			(Ost)	(kit)			X3...X4	Su2	
615	HWH	5	schmal	(Bvs)	hbn								Sl2	
615	HWH	6		Cv	hro								Sl2	0
616	HBIWH	1		RO									O	
616	HBIWH	2		Ahe	swgr			Sgb	ein			X3...X4	Ss	
616	HBIWH	3		Ae					ein			X3...	Ss	

A3-4: Datenbankabfragegerechte Aufbereitung der FSK-Legendeninformationen zur Hydrotopklassifikation im Regelwerk (vgl. Kap. 6.1.2)

Abkürzungen und Erläuterungen:

FSE = Forstliche Standortseinheit; ID= Profil-Identifikations-Nr.; Rinne = Rinnenlage, K_s (Oberb.) = Effektive gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Oberboden < $K_s = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$; Ök. Feuchte = Ökologische Feuchte, GW, StauW, Grund- oder Stauwasserstand unter GOK; Podsol-B =Wasser hemmender Podsol-Unterboden; C-Sd = Wasser hemmender C-Horizont; Zu-/Abfluss = lateraler Zu- oder Abfluss. Die Zahlenwerte sind in Kap. 6.1.2 aufgeschlüsselt.

FSE	ID	Rinne	K_s (Oberb.)	Ök. Feuchte	GW, StauW	Podsol- B	C-Sd	Zu-/ Ab- fluss	Wöl- bung	Nei- gung	Konver- genz	Dräna- ge
BIRi	524	1	0	6	1	0	0	1	1	-0,25	0,75	0
BISH	520	0	0	3,75	0	1,5	0	0	0	-0,75	-0,75	0
BISst	521	0	0	2	0	1	1,5	0	0	-0,75	-0,75	0
BIWH	519	0	0	3,75	0	0,5	0	0	0	-0,75	-0,75	0
BIWH+	518	0	0	5	0	1	0	1	0	-0,75	-0,75	0
gfLa	525	0	0	7,75	2	0	0	0	0,5	-0,25	0,25	0
gfS	506	0	0	8	2	2	0	0,5	0	-0,25	-0,25	0
HBIRü	613	0	0	3,75	0	1,5	0	0	-0,5	-0,5	-1	0
HBIWH	616	0	0	6	0	1,5	0	0,5	0	-0,75	-0,75	0
HgflS	603	0	0	7,5	1	0	2	0,5	0	-0,25	-0,25	0
HgflS+	602	0	0	6,5	1	0	2	0,5	0	-0,25	-0,25	0
HgflS	606	0	0	7	2	2	0	0	1	-0,25	0,75	0
HgflS+	605	0	0	6,5	1	0	0	0,5	1	-0,25	0,75	0
HIS	601	0	0	4	0	0	1	0	0	-0,25	-0,25	0
HMi	607	0	1	8,5	2	1,5	2	0	0	0	0	1
HMi+	608	0	1	8,5	2	1,5	2	0	0	-0,25	-0,25	1
HpS	604	0	0	3,75	0	1	0	0	-1	0	-1	0
HWH	615	0	0	6	0	1,5	0	0,5	0	-0,5	-0,5	0
IS	503	0	0	4	0	0	0	0	0	-0,25	-0,25	0
MLa	508	0	1	9	2	0	0	0	0	-0,25	-0,25	0,5
MR	612	0	1	9	2	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5
pS	501	0	0	3,75	0	1	0	0	0	-0,25	-0,25	0
pSSH	516	0	0	3,5	0	1,5	0	0	0	-1	-1	0
pSWH	513	0	0	3,75	0	1	0	0	0	-1	-1	0
Ri	523	1	0	6	1	0	0	1	1	-0,25	0,75	0
SFH	509	0	0	4	0	0	0,5	0	0	-0,5	-0,5	0
SFH-	510	0	0	4	0	0,5	0,5	0	0	-0,5	-0,5	0
sIFH	511	0	0	4	0	0	0	0	0	-0,5	-0,5	0
SRü-	522	0	0	3,25	0	1,5	0	-1	-1	-0,25	-1,25	0
SSH	515	0	0	4	0	0	0	0	0	-1	-1	0
SSH-	517	0	0	3	0	1,5	0	0	-0,5	-1	-1,5	0
SSH+	514	0	0	5	0	0	0	1	0	-1	-1	0
SWH	512	0	0	3,75	0	0	0	0	0	-1	-1	0
wzMi	507	0	0	8	2	0	2	0	0	-0,25	-0,25	1

Anhang A4: Eigene Profilaufnahmen

A4-1: Standortbeschreibung eigener Leitprofile

Abkürzungen und Erläuterungen:

ID= Profil-Identifikations-Nr.; FSE = Forstliche Standortseinheit; EZG = (Teil-)Einzugsgebiet (vgl. A1-2), Bodentyp/Abkürzg. = Bodentyp mit Abkürzung nach AK BODENSYSTEMATIK (1998); Relief = Reliefcharakterisierung; Position = Reliefposition (Unter-, Mittel-, Oberhang), Feinrelief: B = Blöcke, RH = höckerig, RR = rinnig, RW = wellig; Höhe in m NN; Neig. = Neigung in °; Expos. = Exposition und Wölbg. = Wölbung nach AG BODEN 1994; Baumarten = Baumarten der zugehörigen Forstabteilung (FORSTDIREKTION KARLSRUHE 1995): Fi = Fichte, Fo = Forche (Kiefer), Ta = Weißtanne, Bu = Buche, Dgl, SFi, Ofi, JLä = nicht einheim. Nadelbäume, Vb = Vogelbeere, Bi = Birke; Alter = mittleres Alter der Baumarten (FORSTDIREKTION KARLSRUHE 1995); Witterung = Witterung bei Profilaufnahme (nach AG BODEN 1994), Datum = Aufnahmedatum

ID	FSE	EZG	Bodentyp/ Abkürzg.	Relief	Position	Feinrelief	Höhe	Neigung	Expos.	Wölbung	Baumarten	Alter	Witterung	Datum
1	SWH	DÜ	Bändchenstagnogley SGd	Flanke Mulde	UM	B	745	24	ESE	G,(V)	Fi,Ta	100	WT4	14.11.97
2	SFH	DÜ	Kolluvisol-Braunerde YK-BB	Hangtreppe	UM	eben	745	2	ESE	(V),G	Fi	80	WT3	21.11.97
3	BISH	FH	Norm-Podsol PPn	Flanke Tiefenlinie	M	B	715	21	S	G,G	Ta,Fo	200	WT2	20.05.98
4	BISH	FH	Braunerde-Podsol BB-PP	Flanke Tiefenlinie	M	RW,B	720	14	SE	X,X	Fi	120	WT2	20.05.98
5	wzMi	FH	(Anmoor)-Stagnogley SGm	Hang	O	RW	880	6	S	X,V	Ta,Fo	20	WT3	20.05.98
6	pSWH	FH	Braunerde-Podsol BB-PP	steiler Hang	M	RW,R R,B	770	33	E	G,G	Fi,Ta	110	WT3	26.05.98
7	BIWH	FH	Braunerde-Podsol BB-PP	u.halb Verebnung	OM	B	790	28	ENE	G,V	Fi	70	WT3	26.05.98
8	SRü-	FH	(Ortstein)-Podsol PPd	Rücken	U	RW	660	21	E	X,G	Ta, Fi	120	WT2	14.05.98
9	SSH-	FH	Norm-Podsol PPn	Hang	MO	B	810	21	S	G,(X)	Ta,Fo	200	WT4	16.06.98
10	SSH-	FH	(Ortstein)-Podsol PPd	Hang	MO	(B)	785	22	S	X,X	Fo,Fi, JLä	50	WT5	16.06.98
11	SFH-	FH	Hangpseudogley SSg	Hang	O	eben	835	17	SW	X,X	Fi	50	WT4	17.06.99
12	wzMi	FH	Moor-Stagnogley SG	Kuppe, Rücken	O	RW	880	4	SSE	(X;X)	Ta,Fo	20	WT4	17.06.98
13	SFH-	FH	Podsol, schwach psgl. (SS)-PP	Hang	O	RW	870	11	E	(X),G	SFi,Fi	50	WT3	24.06.98
14	gfS	FH	Bändchenstagnogley SGd	Rückenrand	O	RW	890	4	E	(X),G	Ta,Fi, Fo	20	WT3	24.06.98
15	BISH	DÜ	(Ortstein)-Podsol, schw. psvgl. (SS)-PPd	Hang	OM	RW	840	22	SS W	na	Fo,JL ä,Fi	50	WT2	24.06.99
16	BISH	FH	Norm-Podsol PPn	Rücken	M	B	715	18	SE	G,X	Fi,Ta	120	WT2	14.05.98

ID	FSE	EZG	Bodentyp/ Abkürzg.	Relief	Position	Feinrelief	Höhe	Neigung	Expos.	Wölbung	Baumarten	Alter	Witterung	Datum
17	HgflS	LE	Podsol-Pseudogley PP-SS	flacher Hang	O	RR,RW	910	2	ESE	(X),G	Fi	40	WT3	02.07.98
18	HpS	LE	Bändchen-Stagnogley SGd	flacher Hang	O	RW	905	3	NE	(X),G	Fi,Ta,Vb;Bu	20	WT4	08.07.98
19	pS	LE	Bändchenstagnogley SGd	flacher Hang	O	RW,B	900	2	ESE	G,(V)	Fi,SFi	30	WT4	15.07.99
20	HMi+	LE	Stagnogley, entwässert PP-SG	flacher Hang	O	RW,B	920	4	SSE	(X),(X)	Fi,Fo, JLa	50	WT3	22.07.99
21	HIS	LE	schwach podsolige Braunerde pBBn	Sattel	O	RW	920	0	keine	(X),(V)	Fi, SFi	40	WT3	22.07.99
22	HBIRü	LE	Podsol, schwach psvgl. (SS)-PP	getreppter Flachhang,	O	RW,B	925	11	SE	(X),G	Fi,Ta, SFi,Ofi	30	WT3	24.07.98
23	pS	DÜ	Braunerde-Podsol BB-PP	flacher Hang	O	RW,B	905	10	SSE	(X),G	Fi,Sfi	50	WT3	24.07.98
25	pS	SH	Podsol-Pseudogley PP-SS	flacher Hang	M	RW	875	2,5	NNW	G,(V)	Ta,Fi, Bu	10	WT3	29.07.98
27	HMi	SH	Entwäss. Moorstagnogley SGo	Rücken	O/A	RW	940	1	SE	(X),G	Fi,Ta,(Fo)	30	WT4	12.08.98
28	HMi	SH	Entwäss. Moorstagnogley SGo	Rücken	O/A	RW	940	1	SE	(X),G	Fi,Ta,(Fo)	30	WT4	12.08.98
29	SWH	SH	Braunerde-Podsol BB-P	flacher Hang	O	RW	910	9	NNW	(X),G	Fi	10	WT3	20.08.98
101	HWH	DÜ	Braunerde-Podsol BB-PP	Hang	O	RW,B	900	4	NW	(X),G	Fi,SFi	40	WT3	20.08.98
102	HWH	DÜ	Bändchenpodsol PPd	Riedel	M	RW,RR	890	16	NW	(X),X	Fi,SFi	40	WT3	20.08.98
103	BIWH	DÜ	Norm-Podsol PPn	Hang	OM	B	860	10	NW	(X),G	Fi,Fo, Ta	30	WT3	20.08.98
104	BIWH+	DÜ	Braunerde-Podsol BB-PP	Altterrasse	F	RW	710	3	NW	G,G	Fi,Ta, Fo	160	WT3	02.09.99
105	pSWH	HI	Bändchenstagnogley SGd	Hang	U	RW	650	25	N	(X,X)	Fi	80	WT3	25.06.99
106	pSWH	DÜ	Bändchenpodsol, schw. psvgl. (SS)-PPd	Hang	M	RW	665	21	N	(X),(V)	Dgl,Fi, SFi	50	WT3	30.08.99
107	SFH	DÜ	Braunerde-Regosol BB-RQ	übersteilter Hangfuß	U	RW	810	35	NW	G,G	Fi,Fo, Ta	170	WT3	01.09.99
301	HgflS	LE	mäß. pods. Pseudogley (PP)-SS	flacher Hang	O	RE, RW	940	1	SE	G,G	Fo	30	WT2	12.08.98
302	HgflS+	LE	mäß. pods. Pseudogley (PP)-SS	flacher Hang	M	RW, RH	937	3	SE	G,G	FiTa	30	WT4	13.08.98

ID	FSE	EZG	Bodentyp/ Abkürzg.	Relief	Position	Feinrelief	Höhe	Neigung	Expos.	Wölbung	Baumarten	Alter	Witterung	Datum
303	HpS	SH	PseudogleyPodsol (PP)-SS	flacher Hang	O	RW	927	5	NW	G,G	Fi,Ta (SFi)	30	WT3	19.08.98
304	SFH	SH	mäßig podsolige Braunerde p3BBn	flacher Hang	M	RW	893	5	N	G,(V)	Ta,Fi, Bu	10	WT3	26.08.98
305	HgfS	SH	Podsol PP	flacher Hang	M	RE, (RW)	915	2	N	G,G	Fi,SFi, Ta	40	WT2	02.09.98
306	gfS	SH	Bändchen-Stagnogley SGd	flacher Hang	M	RW	870	3	NN W	G,(V)	(Bi)	10	WT3	09.09.98
307	pSWH	SH	Podsol PP	Hang	M	(RW)	875	9	NW	G,G	Fi,Ta	40	WT5	16.09.98
308	HpS	SH	Braunerde-Podsol BB-PP	flacher Hang	M	RW, RH	925	5	SE	G,G	Ta,Fi, Bu	30	WT3	23.09.98

A4-2: Horizontmerkmale der eigenen Leitprofile

Abkürzungen und Erläuterungen zu A4-2:

ID = Profil-Identifikations-Nr.; FSE = Forstliche Standortseinheit; Hor.-Nr. = Horizontnummer, Tiefe = Horizonttiefe in [cm] Horizont. = Horizontbezeichnung nach AK BODENSYSTEMATIK (1998); Farbe : Horizontfarbe, qualitat. Angabe nach AG BODEN (1994:106 f.); Ox. = Oxidationsmerkmale; Red. = Reduktionsmerkmale; Sonst. = Sonstiges; Ld = Lagerungsdichte bzw. Z/SV = Zersetzungsgrad/Substanzvolumen von Torfen; Wurzeln = Durchwurzelungsgrad. Skelett = Skelettgehalt [%]; Bodenart: kursiv gedruckte Bodenarten wurden im Labor bestimmt (vgl. nachfolgende Tabelle A4-3).; Humus = Humusklasse (kursiv gedruckte Humusklassen wurden im Labor bestimmt, vgl. nachfolgende Tabelle A4-3). Die Abkürzungen für die zuvor genannten Horizontmerkmale richten sich nach AG BODEN (1994).

ID	FSE	HorNr.	Tiefe	Form	Hori- zont	Farbe	Ox.	Red	Feu- chte	Sonsti- ges	Gefüge	Ld Z/SV	Wur- zeln	Skelett	Boden- art	Humus
1	SWH	1	-7		MR								4		O	
1	SWH	2	16	de,w	Aeh1	sw			3		ein	2	4	40	SI2	3
1	SWH	2a			Aeh2										St2	
1	SWH	3	5	di,w	Ahe1	bngr			3	Sgb	ein	2	2	30	St2	2
1	SWH	3a			Ahe2										St2	
1	SWH	4	20	di,w	sSew- Ae1	hegr,or		rb	4	Sgb, Vw	ein	2	1	30	SI2	0
1	SWH	4a			sSew- Ae2										SI3	
1	SWH	5	39	s,w	sSerw1	hebng		rg	5		koh	3	0	40	St2	1
1	SWH	5a			sSerw2										SI4	
1	SWH	6	2	de,w	Bbms- Sd	drobn	(ed)		3	Ost	kit	5	0	30	SI3	-
1	SWH	7			II B(m)s	robn			3	Oe	ein (kit)	4	0	30	St2	2
2	SFH	1	-5	z,di	MO								4			0
2	SFH	2	15	z,di	A(e)h	dbn			3	Sgb	ein	2	4	0	SI4	5
2	SFH	3	25	z,di	M-Ah	grbn			3	Hu,R wu	ein	2	4	0	St3	4
2	SFH	4	45	z,di	M-Bv1	bnge			3	Rwu!	sub	3	4	65	St3	4
2	SFH	5	110		M-Bv2	hbng			2	Rwu	sub	4	2	75	St3	3
3	BISH	1	-80		X										X	
3	BISH	2	10	di,w	Aeh	dgrbn			2		ein	1	4	65	Ss	
3	BISH	3	30	de,w	Ae+Bh	hgrbn			2		ein	2	4	75	Ss	3
3	BISH	4	70		IIBhs	robn			3	Hu, (Oe)	sub	3	1,5	75	St3	4
4	BISH	1			RO- MR										O	
4	BISH	2	15	de,z	Aeh	hegr			2		ein	2	4	40	SI2	4
4	BISH	3	45	di,e,g	Bvh	geb			2		sub	3	4	45	SI2	4
4	BISH	4	85		IIICv	rölibn			3		ein	3	3,5	55	Ls4	0
6	pSWH	1			RO										O	
6	pSWH	2	15	de,z	Ahe	dgr			2	Sgb	ein	1	5	60	Ss	
6	pSWH	3	20	di,z	Bh	smgrbn			2	Sgb	ein	1,5	5	60	Ss	
6	pSWH	4	60	di,we	IIB(v)s	lerobn			3	Hu		2,5	2	15	SI3	2
6	pSWH	5	100		IIBsv	rö- libn,ge bn			3			3	2	40	SI3	2
7	BIWH	1													O	
7	BIWH	2	15	de,w	Ahe	dgr			2	Sgb	ein	2	4	60	Ss	
7	BIWH	3	25	di,w	Bsh	dgeb			3	Sgb	sub	2	3	60	SI3	4
7	BIWH	4	80	de,z	IIBvs	lrölibn			3		(sub)	3	2	30	SI4	4
7	BIWH	5	120		IIICv	geb			3		(sub)	3	2	50	Su3	2
8	SRü-	1	-10		RO- MR										O	
8	SRü-	2	35	de,w	Ae	hgr			2	Sgb	ein	2	4	35	Su2	

ID	FSE	HorNr.	Tiefe	Form	Hori- zont	Farbe	Ox.	Red	Feu- chte	Sonst- ges	Gefüge	Ld Z/SV	Wur- zeln	Skelett	Boden- art	Humus
8	SRü-	3	45	di,z	Bsh	grbn			3	Hu	sub	3	3	35	Ls4	
8	SRü-	4	60	di,w	(Bms)	rostbn			3	Ost	kit	4,5	2	35	Ls4	0
8	SRü-	5	90	di,w	Bs	lerobn			3		sub	2	4	35	SI4	3
8	SRü-	6	120		IIICv	bnro			3		ein	2	2	55	Ss	
9	SSH-	1			ROR										O	
9	SSH-	2	17	de,e, h	Ahe	hgr			3	Sgb	ein	1	2	50	Su2	3
9	SSH-	3	30	di,z	Bh	bnsbw			3		ein	2	4	50	Su3	4
9	SSH-	4	40	di,t	Bhs	smbn			2	Hu	(sub)	2,5	4	75	SI3	
9	SSH-	5	80		II(M)- Bvs	legebn			2	Rwu, Hko	(sub)	3,5	4	75	Ls4	4
10	SSH-	1	-15		MOR										O	
10	SSH-	2	17	di,z	Aeh	dgr			4	Sgb	ein	1	3	20	Su2	4
10	SSH-	3	50	di,z	(Sw)- Ae	hgrvili		rb?	4	Sgb	ein	1	2	40	Ss	2
10	SSH-	4	60	di,z	Bh	dbr			3	Hu	ein	2	3	40	SI2	
10	SSH-	5	95		IIBmhs	legebn			3	Hu, Ost	kit	4,5	1	45	SI3	4
11	SFH-	1	-20		ROF										O	
11	SFH-	2	10	di,z	Aeh	grsw		rb	4	Sgb	ein	2	3	5	Ss	3
11	SFH-	3	25	di,w	Ae- sSew	brligr		rb	5	Sgb?	ein	1,5	1	5	Ss	2
11	SFH-	4	90		sSew	gr, or	Sk or		6		ein	3	1	45	Ss	1
12	wzMi	1	-25	s,e,h	hHm							5/4			O	
12	wzMi	2	5	de,w	Sw- Aeh	swgr		(rb)	5	Sgb	ein	2	1	10	Ss	4
12	wzMi	3	55		Srw	bnligr, fleckig	eh	rb	5		ein	2,5	1	50	Ss	1
13	SFH-	1	-15		ROR										O	
13	SFH-	2	27	de,w	(Sw)- Ae	hgr	eh	rb,S kel	3	Sgb	ein	2	4	20	Ss	2
13	SFH-	3	35	di	Bh	smbn			4	Hu	ein- kit	2	3	60	Ss	3
13	SFH-	4	65	de,w	Bs	lerobn			3	Oe	ein- (kit)	3	0	60	Ss	3
13	SFH-	5	100		IICv	gebnd			3		ein- kit?	4,5	0	60	Ss	2
14	gfS	1	-20		hHm							5/4			O	
14	gfS	2	25		Sw- Aeh	dgr	es	rb	4	Sgb	ein	2	4	15	Su2	
14	gfS	3	40		Bh- Serw	hgr	es, eh	rg	6		ein	2	1	20	SI2	3
14	gfS	4	41		Sd- Bbms	robn	ed		3	Ost	kit	5	0	20	Su2	1
14	gfS	5	50		IIBs	leorbn			3	Oe	ein- koh	4	0	30	Ss	
15	BISH	1	-15												O	
15	BISH	2	60		(sSw)- Ae	hgr	Sk or		2	Sgb	ein	1,5	4	60	Ss	
15	BISH	3	80		Bsh	smbn			2	Hu	ein (kit)	3	3	75	SI2	
15	BISH	4	125		Bms	lerobn			2	Ost	kit	4,5	0	60	Ss	
16	BISH	1													O	
16	BISH	2	15	de,w	Aeh	bngr			2	Sgb	ein	1,5	3	55	Ss	
16	BISH	3	20	de,w	Bh	bngr			2,5	Sgb, Hu	ein	1,5	4	55	Ss	
16	BISH	4	60	di,w	Bs	lerobn			2,5		ein	2,5	4	60	SI4	
17	HgflS	1	-23		ROF							3/3			O	
17	HgflS	2	30	de,z	Ahe- Sw	smhgr	eh, es	rb	4	Sgb, Hu	ein	2,5	2	15	SI3	2
17	HgflS	3	60	di,e	Bs-Sd	gebnd	eh,		3		ein-	4	0	7	SI2	1

ID	FSE	Hor.Nr.	Tiefe	Form	Hori-zont	Farbe	Ox.	Red	Feu-chte	Sonstiges	Gefüge	Ld Z/SV	Wurzeln	Skelett	Boden-art	Humus
							eo				koh					
17	HgflS	4	75		IISd	legebn	eo, eh!		4		ein-koh	4	0	25	SI4	2
18	HpS	1	-20		GMO										O	
18	HpS	2	15	di,z	Aeh	smbng r	eh, es?	rb?	3		ein	2	1	7	Su2	2
18	HpS	3	45	de,e,h	Sw-Ae	hgrbn, or	eh, es	rb	4		ein-koh	3	0	20	Su2	2
18	HpS	4	115	di	Sw	hgr		rb	5		koh	2	0	30	SI2	3
18	HpS	6	118	de	Sd-Bbms	robn	ed		3		ein-kit	3,5	0		SI2	
18	HpS	7	130		IIBs-ilCv	hbn			3		ein	3	0		Ss	
19	pS	1	-17		ROF							3/3			O	
19	pS	2	15	di,w	Aeh	dgr,vili	(eh)		4	Sgb	ein-koh	2	1	60	SI2	4
19	pS	3	45	s,z	Ae-Sw	smhgr	ed, eh, Sk	rb	4	Sgb	sub	3	0	70	SI2	2
19	pS	4	46	s,z	Sd-Bbms	robn	ed		3	Ost	kit	5	0	5	SI3	4
19	pS	5	65		IIBms	legebn			3	(Oe)	ein-sub	3,5	0	5	SI3	1
20	HMi+	1	-17		ROF-MR							3/3			O	
20	HMi+	2	25	di,w,(t)	Aeh	dgr	Sk or		4	Sgb	ein-sub	2	1	65	SI2	4
20	HMi+	3	50	di,t	Ae-Srw	hgr	eh, (es)	rb	4	Sgb?	ein	2,5	0	35	SI3	3
20	HMi+	4	70	de,w	B(b)s+Sw	orbn	eo, es	(rb)	4	(Oe)	ein-sub	4	0	10	SI3	3
20	HMi+	5	115		IIBms-Sd	röli orbn	eh		3	Oe, Ost	pl,kit	5	0		St2	1
21	HIS	1	-6		MR				3						O	
21	HIS	2	20	de,z	A(e)h	grbn	(es)		3	Sgb	ein	2	2	1	SI3	4
21	HIS	3	60	di,e	Bv1	röli-gebn	(es)		3		ein-sub	3	1	10	SI4	3
21	HIS	4	105	de	Bv2	gebn			2		sub	3,5	0	10	SI3	1
22	HBIRü	1	-13		MR										O	
22	HBIRü	2	15	di,e,g	Aeh	gr			3		ein	2	4	40	Ss	
22	HBIRü	3	20	di,t	Ahe	hgr			3		ein	3	2	40	Ss	
22	HBIRü	4	40		(IISw)-Bhs	grbn,or	eh, Sk or		3	Hu	sub-koh	3	2	80	SI3	
23	pS	1	-9		MR										O	
23	pS	2	8	de,z	Ah	dbn			2	Sgb	ein-sub	2	3	15	Su2	6
23	pS	3	20	de,e,h	Ahe	bngr			2	Sgb	ein	2,5	1	15	Su2	3
23	pS	4	25	de,z	Bh	grbn			2	Hu	sub-ein	3	1	15	SI3	4
23	pS	5	50	di,w	IIBvs	bn			2	Oe, Hu	sub-koh	3,5	1	20	SI4	3
23	pS	6	75		IIBsv	bn			2	Hu	sub-koh	3,5	2	20	SI4	4
25	pS	1	-14		GMO										O	
25	pS	2	6	de,e,h	Aeh	swgr	(eh)		3	Sgb	ein-sub	2,5	2	50	Su2	3
25	pS	3	25	de,z	Ae	hgr-bnligr			3	Sgb	ein	2	1	50	Su2	1
25	pS	4	70	de,e,h	Bhs-Sw	smbnli gr	eo, ed	rs	4	Hu	ein-koh	2	0	80	SI2	3

ID	FSE	HorNr.	Tiefe	Form	Hori- zont	Farbe	Ox.	Red	Feu- chte	Sonst- ges	Gefüge	Ld Z/SV	Wur- zeln	Skelett	Boden- art	Humus
25	pS	5	110		(II) Bhs- Sw	rölibn	eh		4		ein- koh	3	0	35	Ss	3
27	HMi	1	-10		GMO										O	
27	HMi	2	5	de,e,h	hHm	sw			4		koh	4/4	4	0	O	
27	HMi	3	10	de,e,h	IIhHv	dbn			4		koh	3/4	1	0	O	
27	HMi	4	30	de,w	IIIHvm	sw			4		koh	4/4	0	0	O	
27	HMi	5	50		Serw	hbn	(eh)	rb	3	Hu, vw	koh	3,5	1	70	SI3	4
28	HMi	1	-10		GMO										O	
28	HMi	2	10	de,z	hHm	sw			4		koh	5/4	1	1	O	
28	HMi	3	20	di,tr	Aeh- Srw	hgeligr		rb	4	Sgb, Hu,v w	koh	2,5	0	3	SI4	4
28	HMi	4	50	de,w	Srw	bnge	(eh)	rb	3	Hu, vw	koh	3,5	0	25	SI4	3
28	HMi	5	65		II(ilCv- Sd	bnliro		(rb)	3		kit?	4,5	0	25	SI3	0
29	SWH	1	-10		GMO										O	
29	SWH	2	15	de,z	Aeh	dbngr			3	Sgb	ein	2	4	7	Su2	4
29	SWH	3	20	di,k	Bsh	smgrb n			3		ein- sub	2,5	3	7	Ss	
29	SWH	4	40	de,w	IIBs	lerölibn			3		sub	3	3	40	SI3	4
29	SWH	5	100	s,w	IIBv	fabn			3		ein- koh	4	0	45	SI2	1
29	SWH	6	140		IIIIIC	hro			4		ein	4,5	0		Ss	0
101	HWH	1													O	
101	HWH	2	25	de,w	A(h)e	hgr			1	Sgb, Hu	ein	1	2	50	Ss	1
101	HWH	3	30	di	Bsh	smgrb n			2	Hu	sub	3	4	50	SI4	2
101	HWH	4	45	di	Bvs				3		ein- sub	3	4	60	SI3	0
101	HWH	5	55	de,e,h	Bv				3		ein	3	0	50	SI2	0
101	HWH	6	70		IIICv	hro			3		ein	4,5	0		Su2	0
102	HWH	1	-16												O	
102	HWH	2	15	di	Ahe	dgr			2	Sgb	ein	1	4	45	Ss	2
102	HWH	3	30	de,e,g	Ae	hgr			3	Sgb	ein	2	2	45	Ss	1
102	HWH	4	50	de,z	Ae-Sw	hgr,bnr o,or	eh, (es ?)	rb	3	Sgb, Hu	ein	3	0	35	Ss	2
102	HWH	5	65	s,z	B(h)s	dbn,s mbnro	(eh)		3	Oe,H u	ein- kit	4	0	35	Ss	1
102	HWH	6	66	s,z	Bbms	robn	(ed)		2	Ost	kit	5	0	40	Ss	0
102	HWH	7	100	di,w	Bsv	hbn			3	(Ost)	ein	4	0		Su2	0
102	HWH	8	115		IIIC	hro						45			Ss	0
103	BIWH	1													O	
103	BIWH	2	20		Ahe	grbn			3	Sgb	ein	1,5	3	75	Ss	3
103	BIWH	3	50		Ae	hgr			3	Sgb	ein	2	2	75	Ss	1
103	BIWH	4	60		Bh	smgrb n			3	Hu	sub	3	3	75	Ls4	4
103	BIWH	5	110		II?B(h) s	leocbn			3	(Oe), Hu	ein- kit	3,5	2	75	Su2	1
104	BIWH+	1	-5		GMO										O	
104	BIWH+	2	15	di	Aeh	swgr				Sgb	ein	1	3	70	SI3	4
104	BIWH+	3	40	de,z	Ahe	hgr				Sgb	ein	1,5	2	70	SI2	3
104	BIWH+	4	50	di	Bsh	gebnd	(eh)				pl	2,5	4	40	SI4	3
104	BIWH+	5	65	de,w	Bhs	rölibn					sub- koh	3,5	2	40	SI4	1

ID	FSE	HorNr.	Tiefe	Form	Hori- zont	Farbe	Ox.	Red	Feu- chte	Sonst- ges	Gefüge	Ld Z/SV	Wur- zeln	Skelett	Boden- art	Humus
304	SFH	2	15	de,w	Aeh	bngr			3,5	Sgb	sub- koh	2,5	4	25	Su2	3
304	SFH	3	31	di,w	IIB(s)v	rölibn	(eh)		3		sub- koh	3	3	25	SI4	4
304	SFH	4	80		IIIIcV	bn			3		ein	2,5	2	30	SI2	3
305	HgfS	1	-15		RO										O	
305	HgfS	2	17	de,e,w	Aeh	swgr			3	Sgb	sub- koh	2	3	20	SI2	4
305	HgfS	3	44	di,w	IIBhs	bn	(eh)		2,5		sub- koh	3	2	15	SI4	4
305	HgfS	4	80		IIIIcV	bn			2,5		sub- koh	3,5	0	10	SI3	2
306	gfS	1	-22		RO										O	
306	gfS	2	15	de,w	Ahe	hgr	(eh)		3	Sgb	ein- (koh)	2	3	10	Su2	1
306	gfS	3	34	di,e,h	Sw-Ae	gr	eh	rb	3,5	(Sgb)	ein- (koh)	2,5	0	20	SI3	2
306	gfS	4	75	de,z	Srw-Bs	grbn	eh	rb	4,5		ein	2,5	0	20	SI2	2
306	gfS	5	76		(Bbms)	dbn						4			SI4	0
306	gfS	6	85		Sd	robn			3		ein	3	0	25	SI4	0
307	pSWH	1	-8		MO										O	
307	pSWH	2	30	di,w	Aeh	swgr			4	Sgb	ein- (koh)	2	4	20	SI2	4
307	pSWH	3	60	di,z	Bsh	bn	eh		4		ein- (koh)	3,5	2	30	SI3	3
307	pSWH	4	70	di,w	Bs	rölibn			5		ein	2,5	1	40	Su2	3
307	pSWH	5	100		IIIIcV	rölibn							0	40	St2	2
308	HpS	1	-18		RO										O	
308	HpS	2	10	di,w	Ahe	dgr			3	Sgb	ein	2	4	40	Su2	3
308	HpS	3	25	di,w,(z)	IIBh	swgr			3,5	(Sgb)	ein- (koh)	2,5	3	50	SI4	5
308	HpS	4	27	de,z	(IIBbhs)	rölibn					(kit)					
308	HpS	5	43	di,w	IIBhs	rölibn	(eh)		3		sub- koh	3,5	3	40	Ls4	4
308	HpS	6	70	di,w	IIIBv	grbn	(eh)		3,5	Hu,R wu	sub- koh	3,5	2	25	SI3	3
308	HpS	7	80		IIIIcV	rölibn			4	Hu,R wu	ein- (koh)	4	0	15	SI3	1

A4-3: Korngrößenanalysen und Humusgehaltbestimmungen eigener Leitprofile

Abkürzungen und Erläuterungen:

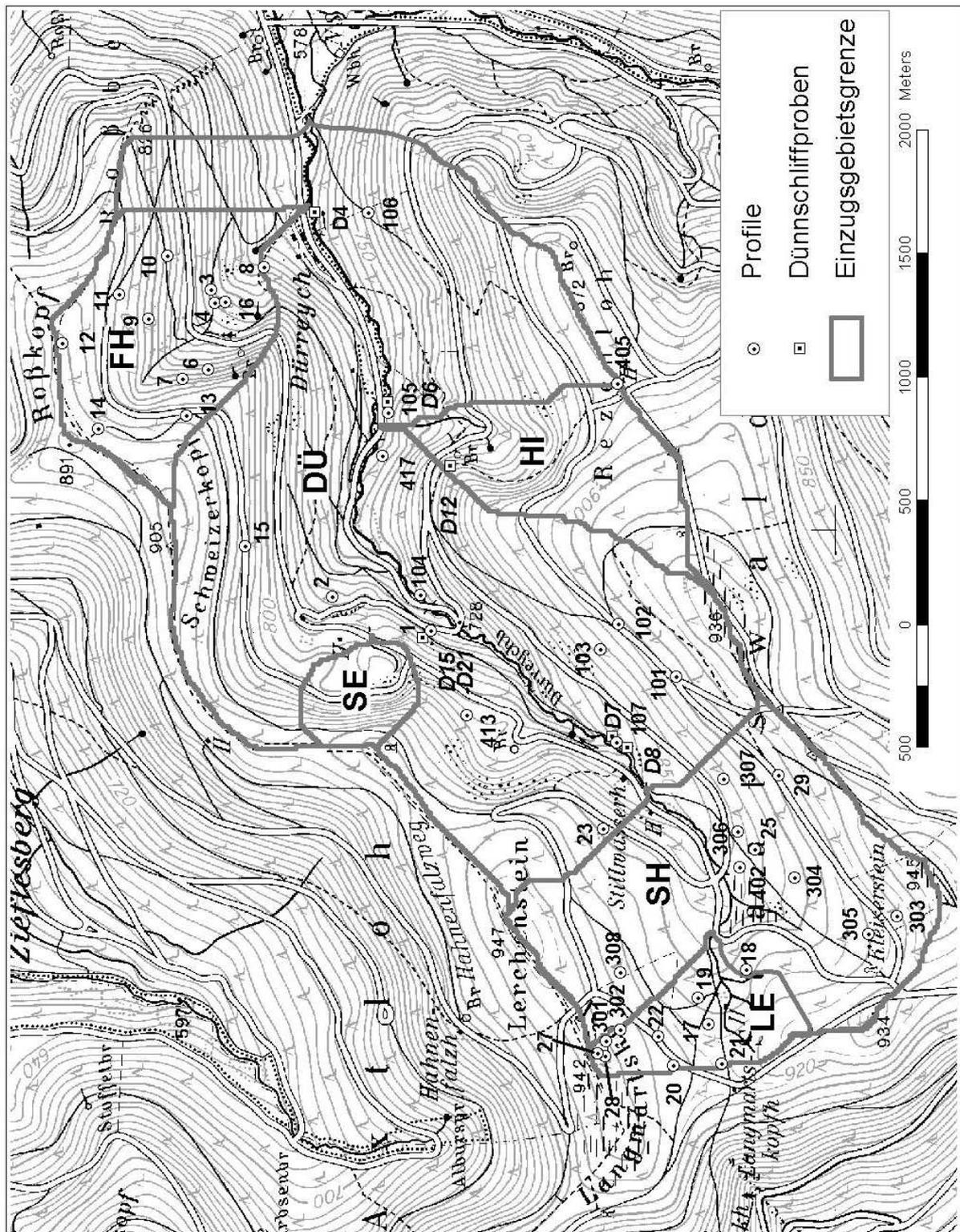
ID= Profil-Identifikations-Nr.; FSE = Forstliche Standortseinheit; Bod.typ = Abkürzung des Bodentyps nach AK BODENSYSTEMATIK (1998); Horizont = Horizontbezeichnung nach AK BODENSYSTEMATIK (1998), gS, mS, fS = Grob-, Mittel-, Feinsand; gU, mU, fU = Grob-, Mittel-, Feinschluff, T = Ton (keine Fraktionierung); U = Summe Grob-, Mittel-, Feinschluff, S = Summe Grob-, Mittel-, Feinsand; Glühverl. = Glühverlust; Ton-Korr. = Ton-korrigierter Glühverlust (vgl. Kap. 6.2.8); Hu % = Humusgehalt in % aus Ton-Korr.-Faktor (vgl. Kap. 6.2.8), Hu-Kl. = Humusklasse nach AG Boden (1994)

ID	FSE	Bod.-typ	Horizont	gS %	mS %	fS %	gU %	mU %	fU %	T %	U %	S %	Glühverl.	Ton-Korr.	Hu. %	Hu. Kl.
1	SWH	SGd	Aeh1	4,8	50,8	26,4	5,2	4,3	0,1	7,8	10,2	82,0	2,3	1,6	2,7	3
1	SWH	SGd	Aeh2	7,2	53,3	23,0	4,7	4,0	0,0	7,7	8,8	83,5	0,0	0,0	0,0	0
1	SWH	SGd	Ahe1	7,1	51,7	25,2	2,8	3,9	1,5	7,8	8,2	84,0	1,6	0,8	1,4	2
1	SWH	SGd	Ahe2	9,8	49,9	22,0	4,4	5,0	2,0	6,9	11,4	82,7	0,0	0,0	0,0	0
1	SWH	SGd	sSew-Ae1	7,3	47,4	24,4	6,8	3,8	0,7	9,6	11,3	79,1	1,1	0,1	0,2	0
1	SWH	SGd	sSew-Ae2	11,0	47,5	21,4	5,0	4,3	0,4	10,4	9,7	79,9	0,0	0,0	0,0	0
1	SWH	SGd	sSerw1	8,3	45,3	22,4	4,0	3,2	1,1	15,7	8,3	76,0	2,1	0,5	0,9	1
1	SWH	SGd	sSerw2	7,6	40,1	20,8	9,7	6,1	0,6	15,1	16,4	68,5	0,0	0,0	0,0	0
1	SWH	SGd	II B(m)s	8,7	42,4	25,5	6,0	2,6	0,0	14,8	8,6	76,6	2,2	0,8	1,3	2
2	SFH	YK-BB	A(e)h	3,5	46,2	20,4	6,6	5,0	3,1	15,2	14,7	70,1	8,0	6,4	11,1	5
2	SFH	YK-BB	M-Ah	2,6	43,7	21,9	5,5	5,7	2,3	18,3	13,5	68,2	6,1	4,2	7,3	4
2	SFH	YK-BB	M-Bv1	3,0	45,3	19,7	5,4	5,1	3,6	17,9	14,1	68,0	5,2	3,4	5,9	4
2	SFH	YK-BB	M-Bv2	3,3	41,2	18,2	5,4	6,3	3,0	22,6	14,7	62,7	4,5	2,2	3,8	3
3	BISH	PPn	Ae + Bh	4,6	55,5	27,2	3,6	1,9	2,0	5,2	7,5	87,3	2,7	2,2	3,7	3
3	BISH	PPn	II Bhs	7,0	46,6	17,7	6,4	2,2	2,9	17,3	11,5	71,2	4,8	3,0	5,3	4
4	BISH	BB-PP	Aeh	9,4	48,8	16,1	5,8	6,1	5,4	8,4	17,3	74,3	5,8	4,9	8,5	4
4	BISH	BB-PP	Bvh	11,9	50,7	18,7	6,3	3,7	2,7	6,0	12,7	81,3	5,8	5,2	9,0	4
4	BISH	BB-PP	IIICv	9,2	41,6	15,1	4,3	6,4	6,0	17,5	16,7	65,8	1,3	0,0	0,0	0
6	pSWH	BB-PP	II B(v)s	5,9	42,2	29,1	3,4	2,7	4,9	11,8	11,0	77,2	2,5	1,3	2,2	2
6	pSWH	BB-PP	II Bsv	6,7	44,1	27,1	4,0	2,7	4,2	11,2	10,8	78,0	1,8	0,7	1,2	2
7	BIWH	BB-PP	Bsh	4,3	39,2	21,8	8,4	9,3	6,2	10,9	23,9	65,2	4,9	3,8	6,6	4
7	BIWH	BB-PP	II Bvs	6,9	41,7	17,8	9,2	5,8	4,9	13,8	19,9	66,4	4,5	3,1	5,4	4
7	BIWH	BB-PP	IIICv	9,3	39,5	14,8	13,0	11,6	3,7	8,4	28,2	63,5	1,7	0,9	1,5	2
8	SRü-	PPd	(Bms)	12,8	35,6	13,7	7,8	6,2	5,4	18,5	19,4	62,1	1,5	0,0	0,0	0
8	SRü-	PPd	Bs	11,9	39,2	15,4	7,2	6,3	6,3	13,8	19,8	66,4	3,0	1,6	2,8	3
9	SSH-	PPn	Ahe	10,0	55,6	19,8	5,7	4,4	3,0	1,5	13,1	85,4	2,2	2,0	3,4	3
9	SSH-	PPn	Bh	8,7	44,3	19,1	9,5	2,4	15,0	1,1	26,8	72,1	5,9	5,7	9,9	4

ID	FSE	Bod- typ	Horiz- zont	gS %	mS %	fS %	gU %	mU %	fU %	T %	U %	S %	Glüh- verl.	Ton- Korr.	Hu. %	Hu. Kl.
9	SSH-	PPn	II(M)- Bvs	7,9	40,8	17,0	4,5	5,4	3,8	20,7	13,7	65,6	7,0	4,9	8,4	4
10	SSH-	PPd	Aeh	10,2	52,3	24,8	5,7	3,5	2,2	1,4	11,4	87,2	4,3	4,1	7,1	4
10	SSH-	PPd	(Sw)- Ae	13,3	53,8	24,0	3,3	2,4	2,4	0,8	8,2	91,1	0,9	0,8	1,4	2
10	SSH-	PPd	II Bmhs	12,2	47,8	23,2	2,0	1,6	3,5	9,7	7,1	83,2	4,7	3,7	6,5	4
11	SFH-	SSg	Aeh	19,2	50,1	19,9	3,2	2,0	2,0	3,7	7,2	89,2	3,0	2,6	4,5	3
11	SFH-	SSg	Ae- sSew	15,5	51,0	23,9	3,3	0,5	3,3	2,6	7,1	90,3	1,2	1,0	1,6	2
11	SFH-	SSg	sSew	16,7	55,0	21,5	1,6	1,6	1,8	1,9	5,0	93,2	0,6	0,4	0,8	1
12	wzMi	SGo	Sw-Aeh	6,3	58,8	27,5	1,8	1,3	2,4	1,8	5,6	92,6	3,5	3,3	5,8	4
12	wzMi	SGo	Srw	7,3	65,4	22,7	1,9	0,6	0,7	1,6	3,1	95,3	0,4	0,3	0,5	1
13	SFH-	(SS)- PP	(Sw)- Ae	13,1	56,3	21,4	1,9	4,1	0,7	2,5	6,7	90,8	0,9	0,7	1,2	2
13	SFH-	(SS)- PP	Bh	16,1	56,8	17,0	2,6	1,4	1,4	4,7	5,4	89,9	2,0	1,5	2,6	3
13	SFH-	(SS)- PP	Bs	18,9	55,5	19,2	0,8	2,1	1,3	2,2	4,2	93,6	1,6	1,3	2,3	3
13	SFH-	(SS)- PP	II Cv	11,4	57,5	23,0	4,2	3,1	0,3	0,4	7,6	92,0	1,0	1,0	1,7	2
14	gfS	SGd	Bh- Serw	5,9	57,4	15,1	5,0	4,9	4,3	7,4	14,3	78,4	3,5	2,8	4,8	3
14	gfS	SGd	Sd- Bbms	9,6	57,8	15,5	4,4	4,7	3,3	4,6	12,4	83,0	1,0	0,6	1,0	1
17	HgflS	PP- SS	Ahe-Sw	9,6	50,4	15,0	5,5	5,7	3,1	9,9	14,3	75,0	2,6	1,6	2,8	2
17	HgflS	PP- SS	Bs-Sd	11,0	51,1	14,2	8,6	5,5	2,5	7,4	16,6	76,3	1,2	0,5	0,8	1
17	HgflS	PP- SS	II Sd	4,5	51,2	16,2	4,1	3,9	4,8	15,9	12,8	71,9	2,2	0,7	1,1	2
18	HpS	SGd	Aeh	8,2	54,8	20,5	5,0	4,0	2,4	4,9	11,4	83,5	1,4	0,9	1,6	2
18	HpS	SGd	Sw-Ae	10,1	55,5	18,5	4,8	4,0	2,4	4,7	11,2	84,1	1,5	1,0	1,7	2
18	HpS	SGd	Sw	7,6	56,8	17,8	5,5	3,4	2,9	6,2	11,8	82,2	1,9	1,2	2,1	3
19	pS	SGd	Aeh	12,6	45,5	13,3	8,2	6,9	5,3	7,0	20,4	71,4	4,4	3,7	6,3	4
19	pS	SGd	Ae-Sw	8,3	47,4	16,8	10,0	7,3	4,1	5,3	21,4	72,5	1,4	0,9	1,5	2
19	pS	SGd	Sd- Bbms	10,3	39,3	20,0	9,6	5,4	2,8	11,7	17,8	69,6	4,6	3,5	6,0	4
19	pS	SGd	II Bms	8,9	41,1	13,9	14,4	6,5	4,2	9,6	25,1	63,9	1,5	0,5	0,9	1
20	HMi+	PP- SG	Aeh	7,3	56,2	13,8	5,8	6,3	3,8	6,4	15,9	77,3	3,9	3,3	5,6	4
20	HMi+	PP- SG	Ae-Srw	9,1	51,8	12,7	8,5	6,6	2,9	8,2	18,0	73,6	2,1	1,2	2,1	3
20	HMi+	PP- SG	B(b)s+ Sw	9,3	45,9	20,3	7,9	5,5	2,4	8,6	15,8	75,5	2,3	1,4	2,4	3
20	HMi+	PP- SG	II Bms- Sd	3,7	28,7	45,0	2,6	2,4	2,6	14,6	7,6	77,4	1,8	0,4	0,6	1
21	HIS	pBB n	A(e)h	5,8	54,8	7,9	6,1	6,8	6,6	11,3	19,5	68,5	5,5	4,4	7,6	4
21	HIS	pBB n	Bv1	7,3	49,2	13,0	6,5	5,8	3,6	13,9	15,9	69,5	2,9	1,5	2,6	3

ID	FSE	Bod.- typ	Hori- zont	gS %	mS %	fS %	gU %	mU %	fU %	T %	U %	S %	Glüh- verl.	Ton- Korr.	Hu. %	Hu. Kl.
21	HIS	pBB n	Bv2	10,7	43,5	11,8	9,0	8,6	5,1	11,1	22,7	66,0	1,6	0,5	0,8	1
23	pS	BB- PP	Ah	10,0	53,2	20,3	5,1	6,1	1,8	3,3	13,0	83,5	10,2	9,9	17, 0	6
23	pS	BB- PP	Ahe	10,0	44,8	22,0	8,0	6,6	3,7	4,2	18,3	76,8	2,3	1,9	3,2	3
23	pS	BB- PP	Bh	6,4	43,2	21,4	8,0	6,6	3,6	11,5	18,2	71,0	5,9	4,8	8,2	4
23	pS	BB- PP	IIbvs	8,8	42,3	16,5	6,6	5,3	3,7	16,3	15,6	67,6	4,1	2,5	4,3	3
23	pS	BB- PP	IIbvs	8,2	42,4	19,7	7,3	5,3	2,8	14,2	15,4	70,3	4,8	3,4	5,8	4
25	pS	PP- SS	Aeh	10,1	54,7	17,3	6,2	5,1	2,6	3,5	13,9	82,1	2,4	2,1	3,5	3
25	pS	PP- SS	Ae	13,4	51,7	18,3	6,5	4,3	2,5	2,8	13,3	83,4	0,7	0,4	0,7	1
25	pS	PP- SS	Bhs-Sw	18,7	43,1	18,2	5,9	4,4	2,1	6,4	12,4	80,0	1,9	1,3	2,2	3
25	pS	PP- SS	(II) Bhs-Sw	23,3	50,3	12,4	4,3	2,9	1,3	4,0	8,5	86,0	1,9	1,5	2,5	3
27	HMi	SGo	Serw	6,8	49,6	5,2	10,0	8,6	6,4	13,4	25,0	61,7	5,8	4,4	7,7	4
28	HMi	SGo	Aeh- Srw	7,4	42,3	6,0	10,1	10,9	5,2	18,1	26,2	55,7	6,8	5,0	8,5	4
28	HMi	SGo	Srw	6,2	39,5	5,2	10,9	13,7	6,3	18,3	30,8	50,9	4,4	2,6	4,4	3
28	HMi	SGo	II(ilCv) Sd	5,2	38,2	4,6	10,9	13,4	8,6	19,1	32,9	48,0	1,8	0,0	0,0	0
29	SWH	BB- PP	Aeh	12,4	50,8	15,6	14,7	1,1	0,6	4,8	16,4	78,8	5,0	4,5	7,8	4
29	SWH	BB- PP	IIbvs	10,0	39,1	16,6	9,9	8,3	6,3	9,8	24,6	65,7	4,3	3,3	5,6	4
29	SWH	BB- PP	IIbv	20,7	45,4	14,7	5,4	4,2	1,7	8,0	11,3	80,8	1,2	0,4	0,8	1
29	SWH	BB- PP	IIIilC	7,1	71,1	14,5	2,4	1,6	1,3	1,9	8,1	83,7	0,5	0,0	0,0	0
105	pSWH	SGd	Aeh	10,4	56,2	17,1	3,4	2,6	2,1	8,2	8,1	83,7	3,5	2,7	4,6	3
105	pSWH	SGd	Ae-sSw	17,1	56,0	15,2	2,5	2,3	1,1	5,9	5,8	88,3	0,9	0,3	0,5	1
105	pSWH	SGd	sSerw	13,3	44,3	20,7	4,7	4,2	2,3	10,6	11,2	78,2	1,7	0,6	1,0	1
105	pSWH	SGd	Bbms- Sd	14,0	43,6	19,0	3,3	4,4	2,0	13,7	9,8	76,5	3,3	1,9	3,3	3
105	pSWH	SGd	IIIilCv	15,6	52,3	20,1	2,1	1,7	1,3	6,9	5,1	88,0	0,7	0,0	0,0	0
106	pSWH	(SS)- PPd	sSw-Ae	8,5	52,0	21,8	8,6	3,1	3,7	2,3	15,3	82,4	0,0	0,0	0,0	0
106	pSWH	(SS)- PPd	(IISd)- B(m)sh	15,7	44,8	12,9	5,0	4,1	5,1	12,4	14,2	73,5	0,0	0,0	0,0	0
106	pSWH	(SS)- PPd	IIbvs	10,3	44,6	17,9	6,0	2,5	5,1	13,6	13,6	72,8	0,0	0,0	0,0	0
106	pSWH	(SS)- PPd	IIIilC	9,0	50,1	21,2	5,7	3,8	4,3	5,9	13,9	80,3	0,0	0,0	0,0	0
107	SFH	BB- RQ	IIIilC	7,5	41,3	13,5	13,5	11,2	5,5	7,5	30,2	62,3	1,7	0,9	1,6	2
301	HgflS	(PP)- SS	Aeh	5,6	46,9	6,6	11,4	11,9	5,6	11,6	28,9	59,1	5,8	4,6	8,0	4

ID	FSE	Bod.- typ	Hori- zont	gS %	mS %	fS %	gU %	mU %	fU %	T %	U %	S %	Glüh- verl.	Ton- Korr.	Hu. %	Hu. Kl.
301	HgflS	(PP)- SS	Ahe-Sw	4,4	42,9	7,4	14,5	10,9	5,6	15,3	31,0	54,7	5,2	3,7	6,3	4
301	HgflS	(PP)- SS	Sd	5,8	45,9	5,5	10,7	10,6	4,8	16,0	26,1	57,2	3,8	2,2	3,8	3
301	HgflS	(PP)- SS	IIISd	11,6	47,7	7,0	7,2	7,0	5,1	13,2	19,3	66,3	1,7	0,3	0,6	1
302	HgflS+	(PP)- SS	Ae-Sw	5,7	46,8	10,7	9,5	9,0	4,8	12,7	23,3	63,2	1,9	0,6	1,1	1
302	HgflS+	(PP)- SS	II(Sd)- Sw	1,8	23,6	10,2	10,6	8,9	8,8	34,7	28,3	35,6	1,3	0,0	0,0	0
302	HgflS+	(PP)- SS	IIISd	2,7	26,1	14,3	7,6	8,0	7,9	31,6	23,5	43,1	1,2	0,0	0,0	0
303	HpS	(PP)- SS	Sw-Ae	10,0	47,5	21,0	5,2	4,6	3,6	7,1	13,4	78,5	1,5	0,7	1,3	2
303	HpS	(PP)- SS	Sw-Bs	10,1	43,1	22,5	5,8	4,3	3,4	9,9	13,5	75,7	1,3	0,3	0,5	1
303	HpS	(PP)- SS	IIISd	5,6	35,1	32,8	3,9	2,6	1,1	17,9	7,6	73,5	1,0	0,0	0,0	0
304	SFH	p3B Bn	Aeh	10,6	49,9	17,7	7,3	5,9	3,1	4,7	16,3	78,2	2,3	1,8	3,2	3
304	SFH	p3B Bn	IIIB(s)v	8,8	39,5	16,0	7,4	7,2	3,5	16,1	18,1	64,3	4,9	3,3	5,6	4
304	SFH	p3B Bn	IIIICv	17,0	42,9	14,7	8,3	5,4	3,4	7,1	17,1	74,6	3,3	2,6	4,4	3
305	HgfS	PP	Aeh	11,4	49,8	17,3	5,0	5,5	3,4	7,3	13,9	78,5	4,4	3,7	6,3	4
305	HgfS	PP	IIIBhs	13,6	41,8	16,2	6,4	5,3	2,8	13,0	14,5	71,6	4,4	3,1	5,4	4
305	HgfS	PP	IIIICv	12,3	37,6	18,4	12,5	7,3	2,0	9,3	21,8	68,3	1,9	1,0	1,7	2
306	gfS	SGd	Ahe	9,1	52,5	18,9	7,4	5,5	2,4	3,3	15,3	80,5	0,9	0,6	1,0	1
306	gfS	SGd	Sw-Ae	11,8	48,9	15,1	6,5	4,0	2,4	10,7	12,9	75,8	2,1	1,0	1,8	2
306	gfS	SGd	Srw-Bs	14,6	48,6	15,8	5,9	4,2	2,0	7,9	12,1	79,0	1,9	1,1	1,8	2
306	gfS	SGd	Sd	15,4	44,8	14,6	4,0	3,6	4,4	12,9	12,0	74,8	1,9	0,0	0,0	0
307	pSWH	PP	Aeh	11,5	45,6	18,8	5,7	6,1	4,8	6,2	16,6	75,9	4,8	4,2	7,3	4
307	pSWH	PP	Bsh	6,8	41,1	22,0	8,0	5,5	3,8	12,3	17,3	69,9	4,0	2,7	4,7	3
307	pSWH	PP	Bs	9,5	45,6	22,3	8,2	7,4	2,7	4,0	18,3	77,4	2,1	1,7	3,0	3
307	pSWH	PP	IIIICv	14,1	50,7	18,9	2,4	3,2	2,2	5,5	7,8	83,7	1,6	1,0	1,8	2
308	HpS	BB- PP	Ahe	5,4	57,2	12,4	9,0	7,9	3,8	4,0	20,7	75,0	2,5	2,1	3,7	3
308	HpS	BB- PP	IIIBh	5,3	51,4	9,8	7,9	7,0	4,4	13,3	19,3	66,5	8,3	7,0	12, 0	5
308	HpS	BB- PP	IIIBhs	5,6	44,0	9,9	9,4	7,7	4,1	19,1	21,2	59,5	6,8	4,9	8,4	4
308	HpS	BB- PP	IIIIBv	6,7	46,5	8,2	13,4	9,9	4,0	10,0	27,3	61,4	3,3	2,3	4,0	3
308	HpS	BB- PP	IIIICv	11,5	49,5	17,4	4,7	3,2	3,1	9,9	11,0	78,4	1,4	0,4	0,7	1



A4-4: Standorte der Profil- und Dünnschliffuntersuchungen

Anhang A5: Synthetische Musterprofile für die hydrologische Simulation

A5-1: Ermittlung repräsentativer Horizonteigenschaften

Problemstellung: Im Rahmen der Simulationsversuche zum Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Dürreychgebiets war es die Aufgabe der vorliegenden Arbeit, Grundlagen für die räumlich verteilte Modellierung bereitzustellen. Insbesondere waren pedohydrologische Parameter für die 35 Forstlichen Standortseinheiten aus der Forstlichen Standortskarte (FSK) und den eigenen Untersuchungen abzuleiten. Für eine Reihe von Horizonten lagen keine bzw. nur unvollständige Profildaten vor, so z.B. für die im Modell erforderliche Horizontmächtigkeit oder die Bodenart. Naturgemäß besonders spärlich waren die Daten zu C-Horizonten.

Vorgehensweise: Um die fehlenden Daten zu ergänzen wurden für die folgenden Horizonttypen Mittelwerte und Medianwerte auf Grundlage der Bodendatenbank¹ (Anhänge 3 und 4) gebildet:

- organische Auflage, getrennt nach der Humusform
- Orterde und Ortstein-Horizonte (Bs-Horizonte)
- verwittertes Ausgangsmaterial (ilCv-Horizonte)

Um eine mittlere Bodenart abzuleiten, wurden nach den Angaben der AG BODEN (1994:135) mittlere prozentuale Anteile der Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton für die vorkommenden Bodenarten errechnet. In einem zweiten Schritt wurde für jede Fraktion das gewichtete Mittel berechnet und aus der Kombination der Fraktionen die Bodenart abgeleitet. Je nach Horizonttyp variierte die Anzahl n der ausgewerteten Daten. Zur Ableitung pedohydrologischer Parameter aus den Ergebnissen vgl. Kap. 6.

Organische Auflagen

Die mittleren charakteristischen Mächtigkeiten für die Haupthumusformen Mull, Moder und seine Sonderform Graswurzelfilz-Moder, Rohhumus, Feuchtrohumus sowie Torf wurden getrennt für 32 eigene Profile und für 22 FSK-Angaben bestimmt. Tab. A5-1.1 zeigt die ermittelten Mächtigkeiten.

Mächtigkeit: Die verbreitetste Humusform im Dürreychgebiet ist der Rohhumus, der typischerweise zwischen 15 und 18 cm mächtig entwickelt ist. Vermutlich infolge der Waldkalkung kommt es teilweise zum Humusabbau, so dass der Übergang zum Mineralboden nicht so scharf ist, wie bei Rohhumusaufgaben üblich. Infolgedessen sind oft deutliche Anteile gebleichter Quarzkörner in den Humushorizont eingearbeitet.

Auf vergrasteten Stellen – insbesondere auf Schlagfluren – entwickelt sich die Sonderhumusform Graswurzelfilzmoder aus Rohhumus infolge der besseren Erwärmung, Durchwurzelung und Durchlüftung (AG-BODEN, 1994:236) und erreicht, ebenso wie die Waldhumusform Moder, typische Mächtigkeiten von etwa 10 cm. Die Humusform Mull spielt im Dürreychgebiet keine Rolle und kommt lediglich im Bereich von Rinnenböden vor.

¹ Die synthetischen Musterprofile wurden bereits zu einer frühen Projektphase benötigt. Die zugrunde liegende Datenbasis weicht daher geringfügig von der im Anhang präsentierten Endfassung ab.

Unter feuchten Bedingungen bilden sich etwa 20 cm mächtige Feuchtrohhumusauflagen. Bei ständiger Nässe finden sich Torfe, deren Mächtigkeit von einigen cm bis zu einem halben Meter und mehr betragen können. Eine repräsentative Mächtigkeit dürfte zwischen 20 und 30 cm liegen.

Tab. A5-1.1: Mittlere Horizontmächtigkeiten verschiedener Humusformen im Dürreychgebiet [cm]

Humusform	Mittel		Median		Min		Max		n	
	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK
Mull	-	5	-	5	-	5	-	5	-	2
Moder	10	9	10	9	6	8	15	10	7	2
Grasw.filz-Moder	12	-	10	-	5	-	16	-	10	1
Rohhumus	18	14	16,5	15	10	10	26	20	6	10
Feucht-Rohhum.	19	22,5	18,5	20	17	20	23	30	4	4
Torf	17	48	20	50	5	45	25	50	5	3
Einzelsumme									32	22
Gesamtsumme									54	

Durchlässigkeit: Für aeromorphe Humusformen kann generell von einer sehr hohen Durchlässigkeit ausgegangen werden. Die dominierende Wasserbewegung in Makroporen macht die Angabe von gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten fragwürdig. ZIMMERMANN (1998) nimmt für organische Horizonte einen Ks-Wert von 10^{-3} m s^{-1} an. Diese Größenordnung wurde durch einen Tracerversuch mit Kochsalzlösung und Leitfähigkeitsdetektion am Messprofil MP1 bestätigt.

Eine Ausnahme bilden die Torfe: Bei hohem Zersetzungsgrad und Substanzvolumen können Torfe sehr geringe Durchlässigkeiten aufweisen. Bei einem für das Dürreychgebiet typischen Zersetzungsgrad und Substanzvolumen der Stufe 4 ist laut LGRB BADEN-WÜRTTEMBERG (1998) und AG-BODEN (1994:306) mit einem Ks-Wert der Matrix in der Größenordnung von nur 10^{-7} m s^{-1} zu rechnen. Infolge der starken Durchwurzelung der organischen Horizonte müssen jedoch starke Makroporeneffekte angenommen werden, die diese sehr geringe Leitfähigkeit relativieren.

Bs-Horizonte

Die Horizonte mit vorrangigen Bs-Merkmalen wurden aus der Datenbank extrahiert und von geringmächtigen Bb-Horizonten und schmalen Übergangshorizonten gereinigt. Die mittleren charakteristische Werte für die Horizontmächtigkeit, Lagerungsdichte, Humusgehalt, Durchwurzelung, Skelettgehalt und Bodenart wurden wiederum getrennt für eigene Profile und für FSK-Angaben bestimmt (nachfolgende Tabellen Tab. A5-1.2 und Tab. A5-1.3 und Abb. A5-1.1 und A5-1.2).

Mächtigkeit: Entsprechend Tab. A5-1.2 kann für Horizonte vom Bs-Typ eine typische Mächtigkeit von 25 bis 30 cm – allerdings mit einer recht großen Schwankungsbreite – angenommen werden. STAHR (1973) beobachtet eine zunehmende Mächtigkeit von Ah- und Bs-Horizonten in Richtung Unterhang.

Lagerungsdichte: Für Horizonte vom Bs-Typ kann eine typische Lagerungsdichte von Stufe 3 bis 4, bei ortsteinartiger Verfestigung von mindestens Stufe 4 angenommen werden. Weichere Horizonte

vom Bs-Typ sind zuweilen von Ortstein-Bändchen überlagert; diese stellen dann den eigentlichen sickerwasserhemmenden Horizont dar.

ANDRUSCHKEWITSCH et al. (1999) stellen Ortsteinbildungen vorzugsweise im Mittelhangbereich sowie auf westexponierten Hängen fest. Diese Tendenzen können für das Dürreychgebiet bestätigt werden.

Humusgehalt: Da auch Übergangshorizonte vom Bh zum Bs bei der Auswertung berücksichtigt wurden, erreichen Horizonte vom Bs-Typ noch Humusgehalte der Klasse 1 bis 2.

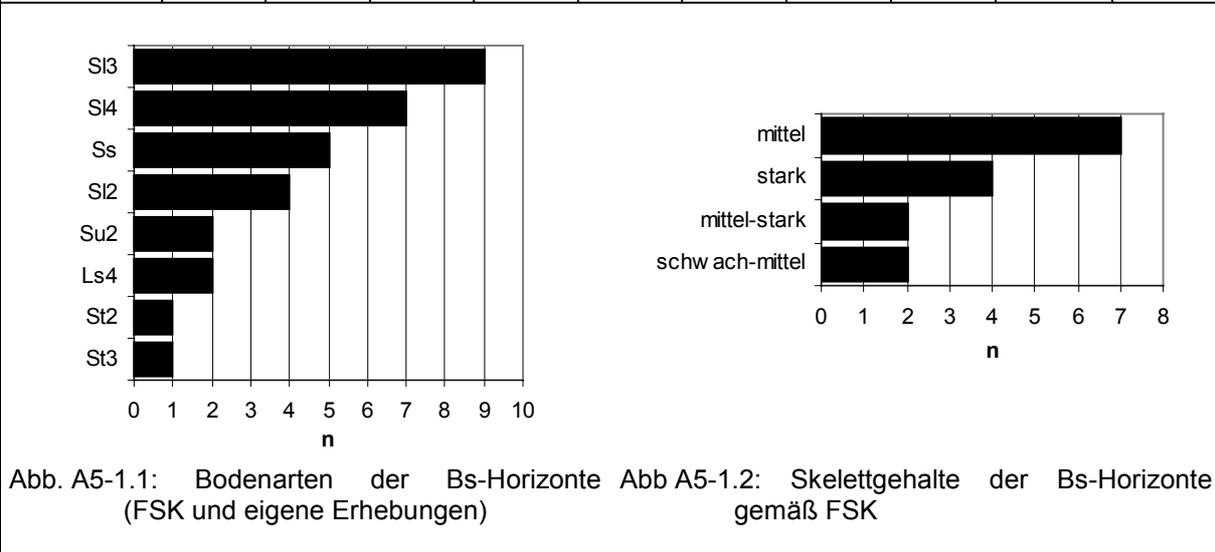
Durchwurzelung: Horizonte vom Bs-Typ können bei geringem Verfestigungsgrad noch gut durchwurzelt sein. Typischerweise kann aber von einer sehr schwachen Durchwurzelung (Klasse 1) ausgegangen werden.

Skelettgehalt: Bei den Skelettgehalten können 40% als repräsentative Zahl gelten; allerdings muss die sehr große Schwankungsbreite berücksichtigt werden.

Bodenart: Als repräsentative Bodenart für die Bs-Horizonte ergibt sich aus Tab. A5-1.3 und Abb. A5-1.1 ein mittel lehmiger Sand (SI3).

Tab. A5-1.2: Übersicht über die statistischen Eigenschaften der Bs-Horizonte (Klassen gemäß AG BODEN 1994)

	Mächtigkeit [cm]		Lagerungsdichte		Humusgehalt		Durchwurzelung		Skelettgehalt [%]	
	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK	eigene Profile	FSK*
Mittelwert	30	29	3,4	3,5	1,6	-	1,5	-	40	
Median	30	27	3,5	3,5	2	-	1	-	40	mittel-stark (vgl. Tab. A5-1.4)
Minimum	9	8	2	2	0	-	0	-	5	
Maximum	50	50	4,5	4	3	-	4	-	75	
n	25	9	25	7	25	0	25	0	24	



Tab. A5-1.3: Bodenarten der Bs-Horizonte

Bodenart	Eigene Profile (n=25)							FSK-Angaben (n=6)		
	Ss	SI3	SI4	Su2	SI2	St2	St3	Ls4	SI2	SI3
Anzahl (n)	5	6	7	2	1	1	1	2	3	3

C-Horizonte

Mächtigkeit: Über die Mächtigkeit können auf Grundlage der Bodenuntersuchungen keine Aussagen gemacht werden. Refraktionsseismische Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Verwitterungsdecke über dem festen Anstehenden i.d.R. mehrere Meter beträgt und stellenweise auf über 15 m anwachsen kann (vgl. Anhang 7). Das Festgestein tritt nur an wenigen, sehr steilen Stellen (> ca. 35°) zutage.

Lagerungsdichte: Nicht selten markiert der Übergang zum C-Horizont einen mehr oder weniger deutlichen Substratwechsel. Den C-Horizonten ist eine hohe Lagerungsdichte (Ld4) zuzuordnen (Tab. A5-1.4). Geländebeobachtungen und Dünnschliffuntersuchungen zeigten zudem, dass die C-Horizonte infolge von periglazialer Überprägung ein plattiges oder lamellenartiges Gefüge aufweisen.

Skelettgehalt: Hohe Skelettgehalte sind für die C-Horizonte typisch, allerdings in einem breiten Schwankungsbereich. Es wird mit einem typischen Anteil von 40- 50 % gerechnet.

Humusgehalt: Wie für C-Horizonte nicht anders zu erwarten, sind Humusgehalte ebenso wie die Durchwurzelung in der Regel vernachlässigbar.

Bodenart: Es ergibt sich eine mittlere Verteilung der Kornfraktionen zu 6 % Ton, 15 % Schluff und 79 % Sand. Damit ist die mittlere Bodenart der C-Horizonte ein schwach lehmiger Sand (SI2). Die festgestellten Bodenarten (n=23) gehören fast ausschließlich zu den eng verwandten Bodenartengruppen der Reinsande und Lehmsande (AG BODEN, 1998:141). Daher ist das beschriebene Vorgehen zur Mittelwertbildung sinnvoll. Die Bodenartenuntergruppen verteilen sich wie in Abb. A5-1.3.

Tab. A5-1.4: Übersicht über die statistischen Eigenschaften der Cv-Horizonte (Klassen gemäß AG BODEN 1994)

	Lagerungsdichte	Skelettgehalt [%]	Humusgehalt
Mittelwert	3,5	40,7	0,5
Median	3,8	55	0
Minimum	2	0	0
Maximum	5,0	65,0	3,0
Anzahl n	24	14	22

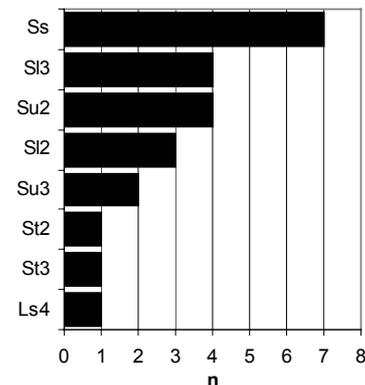


Abb. A5-1.3: Rechts: Bodenarten der Cv-Horizonte (FSK und eigene Erhebungen)

Anmerkung zur Ableitung pedohydrologischer Parameter: Die mittleren Horizonte werden die tatsächlichen Verhältnisse am Punkt nur zufällig einmal genau wiedergeben. Sie markieren lediglich den Schwerpunkt einer Wolke möglicher Eigenschaftskombinationen. Bei der Ableitung pedohydrologischer Parameter (vgl. Kap. 6.1.10) müssen ggf. standort-spezifische Merkmale wie insbesondere Textureigenschaften (Ortsteinbildung, plattiges Gefüge) sowie der Skelettgehalt durch behutsame Modifikation der Werte berücksichtigt werden (Kap. 8.3.4).

A5-2: Synthetische Profile der Forstlichen Standortseinheiten als Grundlage für hydrologische Simulationen der AG Dürreych.

Abkürzungen und Erläuterungen:

FSE = Forstliche Standortseinheit; Hor.-Nr. = Horizontnummer, Horiz.-Bez. = Horizontbezeichnung nach AK BODENSYSTEMATIK (1998), jedoch davon abweichend: „synC“ = mittlerer synthetischer C-Horizont gemäß Untersuchungen in Anhang 5-1; Mächt. [cm] = Horizontmächtigkeit; Ox. = Oxidationsmerkmale; Red. = Reduktionsmerkmale; Sonst. = Sonstiges; Zers.-Grad = Zersetzungsgrad von Torfen; Subst.-Vol. = Substanzvolumen von Torfen; Wurzeln = Durchwurzelung; Skelett = Skelettgehalt [%]; Bodenart B = Bodenart nach AG BODEN (1994); Humus = Humusklasse, Ld = Lagerungsdichte. Die Abkürzungen für die zuvor genannten Horizontmerkmale richten sich nach AG BODEN (1994).

„?“ weist auf unsichere Ausgangsdaten hin. Dennoch musste für die verwendeten Simulationsmodelle ein lückenloser Parametersatz bereit gestellt werden (Anhang A5-3). Die beiden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Simulation verwendeten Profile (BISH und HMi+) sind fett eingerahmt.

FSE	Horiz.-Nr.	Horiz.-Bez.	Mächt. [cm]	Ox.	Red.	Sonstiges	Zers.-Grad	Subst.-Vol.	Wurz.	Skelett [%]	Bodenart B	Humus	Ld
BISH	1	MR,(X)	15								O		
BISH	2	Aeh	25						4	55	Su2	2	2
BISH	3	Bh	15						4	65	Ss...SI2	3	3
BISH	4	B(m)s	40			(Ost)			1	65	SI3...(SI4)	1	4
BISH	5	Cv	30							50?	SI3?	0	3
BISH	6	synC										0	4
BISt	1	Ai-IC	60?						2?	80?	X		
BISt	2	synC										0	4
BIWH	1	MR,(X)	10?							50?	O		
BIWH	2	Ahe	15...(50)						3	65	Ss	2	2
BIWH	3	(Bsh)	10						3	65	SI3...(SI4)	3	3
BIWH	4	Bvs	50						2	40	SI2...(SI3)	2	3
BIWH	5	Cv	30?						2?	50?	Su2?	0	3
BIWH	6	synC										0	4
BIWH+	1	MO	5								O		
BIWH+	2	Ahe	35						3	60	SI2	3	2
BIWH+	3	Bhs	20			(Ost)			2	40?	SI3	1	4
BIWH+	4	Cv	40?						0	50	Su2	0	4
BIWH+	5	synC										0	4
gfLa	1	MR	10?										
gfLa	2	S?	60?							40?	SI3?	2	2
gfLa	3	synSd	20								St3?	0	4
gfLa	4	synC										0	4
gfS	1	RO	15								O		
gfS	2	Ahe	20	(e)	(r)				3	10	SI2	3	2
gfS	3	Sw	15	e	r				0	20	SI2	3	2
gfS	4	Sd-Bs	10	e		(Ost)			0	25	SI2...(SI4)	1	4
gfS	5	synC										0	4
HBIRü	1	RO	15								O		
HBIRü	2	Ahe	25						3	50	Ss	2	2
HBIRü	3	B(m)s	25...30			(Ost)				40?	SI2?	1	4

FSE	Horiz.-Nr.	Horiz.-Bez.	Mächt. [cm]	Ox.	Red.	Sonstiges	Zers.-Grad	Subst.-Vol.	Wurz.	Skelett [%]	Bodenart B	Humus	Ld
HBIRü	4	synC										0	4
HBIWH	1	RO	15?								O,X		
HBIWH	2	Ahe	20?						3?	50?	Ss	2	2
HBIWH	3	B(m)s	25...30			(Ost)				40?	SI3?	1	4
HBIWH	4	synC										0	4
HgflS	1	RO	(10)...15								O		
HgflS	2	Ae	15						2?	5	SI3	3	2
HgflS	3	Sw	30?	e	r				1?	15	SI3...(SI4)	2	2
HgflS	4	Sd	20	e					0	20	SI4	1	4
HgflS	5	synC										0	4
HgflS+	1	MR	15?								O		
HgflS+	2	Ae	10	(e)					2	10	SI3	3	3
HgflS+	3	Sw	30	e	r				0		SI4	1	3
HgflS+	4	Sd	15	e						40	SI4	0	3
HgflS+	5	synC	130									0	4
HgfS	1	RO	15								O		
HgfS	2	Ae	15						3?	30?	SI2	3	2
HgfS	3	Sw	50?	e	r				0?	20?	SI2	2	2
HgfS	4	Sd	20?			Ost			?	20?	SI3?	1	4
HgfS	5	Cv	30??								SI3?	0	4
HgfS	6	synC										0	4
HgfS+	1	RO?	15?								O		
HgfS+	2	Ae?	30?							20?	Ss	2	2
HgfS+	3	Bsw?	50?	e	r					20?	Ss	1	3
HgfS+	4	synC	105									0	4
HIS	1	MR	7								O		
HIS	2	Ae	15						2	5	SI3	3	2
HIS	3	Bv	75						1?	10	SI4	2	3
HIS	4	synC	40						0			0	4
HMi	1	H	20...30				4	4			Hn		3
HMi	2	Sw	40	e	r				0	40?	(Ss)...SI2... (SI3)	3	3
HMi	3	Sd	20							25?	SI3	0	4
HMi	4	synC										0	4
HMi+	1	ROF	20								O		3
HMi+	2	Srw	50	e	r				0	25?	SI2	2	2
HMi+	3	Bms-Sd	40	e		Ost			0	20?	St3?	0	4
HMi+	4	synC										0	4
HpS	1	RO	15								O		
HpS	2	(Sw)Ae	30	(e)	(r)				3	30?	Su2	2	2
HpS	3	SBs	30	e	(r)	(Ost)			1?	30?	SI3	1	4

FSE	Horiz.-Nr.	Horiz.-Bez.	Mächt. [cm]	Ox.	Red.	Sonstiges	Zers.-Grad	Subst.-Vol.	Wurz.	Skelett [%]	Bodenart B	Humus	Ld
HpS	4	synC	125									0	4
HSH	1	RO	15?								O		
HSH	2	Ae	25?						3?	40	Su2	2	2
HSH	3	B(m)s	25...30			(Ost)			1?	40?	SI3	1	4
HSH	4	synC										0	4
HWH	1	RO	15								O		
HWH	2	Ae	35						2	50	Ss	2	2
HWH	3	B(m)s	15			(Ost)			1	40	SI2	1	4
HWH	4	Bv	10						0	50?	SI2?	0	4
HWH	5	synC	115									0	4
IS	1	RO	13?										
IS	2	Ae	25						3?	10?	SI2?	2	2
IS	3	Bv	50?						2?	10?	SI4?	1	3
IS	4	Cv	20??								SI3?	0	4
IS	5	synC										0	4
MLa	1	H	50				3	3			O		3
MLa	2	Sw-Bs	60							30	SI3	0	3
MLa	3	synC										0	4
MR	1	H	30...60				3	3?					3
MR	2	Srw	30??								Ss	0	3
MR	3	Sd	20??								SI3?	0	4
MR	4	synC										0	4
pS	1	RO	13								O		
pS	2	Ae	30						2	40	Su2	2	2
pS	3	Bvs	30?			(Ost)			0	30?	SI2?	2	4
pS	4	synC							0?	50	SI2?	0	4
pSSH	1	MR	10?								O		
pSSH	2	Ae	30						2	25?	Ss	3	2
pSSH	3	B(m)s	30?			(Ost)				60	SI2	1	4
pSSH	4	synC										0	4
pSWH	1	MO	7								O		
pSWH	2	Ae	25						4	40?	Su2	3	2
pSWH	3	Bsh	10						3	40	SI3	3	3
pSWH	4	Bhs	30			(Ost)			1	40	(SI2)...SI3	2	4
pSWH	5	Bv...Cv	40						2	35	SI3	1	3
pSWH	6	synC							0?	50	SI2?	0	4
Ri	1	MU...MOM... (ROF)	5										
Ri	2	aM	60?						3?	40?	(Ss)...SI2...(SI3)	3	3
Ri	3	synC										0	4
SFH	1	MO	10								O		

A5-3 Pedohydrologische Parameter für die synthetischen Profile (Anhang A5-2) nach LGRB (1998) und nach CARSEL & PARRISH (1988). Die beiden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Simulation verwendeten Profile (BISH und HMI+) sind fett eingerahmt.

Abkürzungen und Erläuterungen:

FSE = Forstliche Standortseinheit; Hor.-Nr. = Horizontnummer; GPV [%] = Gesamtporenvolumen; FK [%] Feldkapazität; nFK [%] = nutzbare Feldkapazität; LK [%] = Luftkapazität; K_{SB}-Klasse und K_{SB} [m/s] = Klasse und Mittelwert der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit nach LGRB (1998).

Bodenart A = Bodenart nach US-Nomenklatur; K_{SA} [m/s] = Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit; n = Glätte der Porenverteilung; alpha = Lufteintrittspunkt; theta_s [%] = Sättigungswassergehalt; theta_r [%] = Residualer Wassergehalt.

FSE	Hor.-Nr.	LGRB (1998)						CARSEL & PARRISH (1988)					
		GPV [%]	FK [%]	nFK [%]	LK [%]	K _{SB} -Klasse	K _{SB} [m/s]	Bodenart A	K _{SA} [m/s]	n	alpha	theta _s [%]	theta _r [%]
BISH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
BISH	2	41	25.5	18	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BISH	3	39	27.5	18.5	11.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BISH	4	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
BISH	5	37	26	18	11	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
BISH	6	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BISt	1	17	1	1	16	6	1,0E-03	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
BISt	2	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BIWH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
BIWH	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
BIWH	3	41.5	29.5	18.5	12	3	2,9E-06	CL	7,2E-07	1,31	0,019	41	9,5
BIWH	4	36.5	25.5	18	11	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
BIWH	5	35	21.5	16	13.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BIWH	6	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BIWH+	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
BIWH+	2	45	29.5	20	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BIWH+	3	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SCL	3,6E-06	1,48	0,059	39	10
BIWH+	4	29.5	18.5	13	11	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
BIWH+	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
gfLa	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
gfLa	2	44.5	32	22	12.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
gfLa	3	33	26	12	7	2	5,8E-07	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
gfLa	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
gfS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
gfS	2	45	29.5	20	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
gfS	3	45	29.5	20	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
gfS	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
gfS	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HBIRü	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HBIRü	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
HBIRü	3	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	CL	7,2E-07	1,31	0,019	41	9,5

FSE	Hor.-Nr.	LGRB (1998)						CARSEL & PARRISH (1988)					
		GPV [%]	FK [%]	nFK [%]	LK [%]	K _{SB} -Klasse	K _{SB} [m/s]	Bodenart A	K _{SA} [m/s]	n	alpha	theta_s [%]	theta_r [%]
HBIrÜ	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS-ä	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HBIWH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HBIWH	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
HBIWH	3	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	CL	7,2E-07	1,31	0,019	41	9,5
HBIWH	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HgflS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HgflS	2	47.5	34	22.5	13.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HgflS	3	44.5	32	22	12.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HgflS	4	31	25.5	14.5	5.5	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
HgflS	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HgflS+	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HgflS+	2	41.5	29.5	18.5	12	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HgflS+	3	38.5	28.5	17	10	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HgflS+	4	38.5	28.5	17	10	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
HgflS+	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HgfS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HgfS	2	45	29.5	20	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HgfS	3	42.5	27.5	19.5	15	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HgfS	4	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
HgfS	5	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HgfS	6	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HgfS+	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HgfS+	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
HgfS+	3	36	16.5	10.5	19.5	5	2,3E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
HgfS+	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SCL	3,6E-06	1,48	0,059	39	10
HIS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HIS	2	47.5	34	22.5	13.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HIS	3	40.5	30	17.5	10.5	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
HIS	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SCL	3,6E-06	1,48	0,059	39	10
HMi	1	93	73	60	20	2	5,8E-07	H	1,4E-06	1,3	0,036	70	4
HMi	2	39	27.5	18.5	11.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HMi	3	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
HMi	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
HMi+	1	92	82	65	10	1	1,2E-07	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HMi+	2	42.5	27.5	19.5	15	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HMi+	3	33	26	12	7	2	5,8E-07	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
HMi+	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
HpS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HpS	2	41	25.5	18	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7

FSE	Hor.-Nr.	LGRB (1998)						CARSEL & PARRISH (1988)					
		GPV [%]	FK [%]	nFK [%]	LK [%]	Ksb-Klasse	Ksb- [m/s]	Bodenart A	KsA- [m/s]	n	alpha	theta_s [%]	theta_r [%]
HpS	3	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SCL	3,6E-06	1,48	0,059	39	10
HpS	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HSB	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HSB	2	41	25.5	18	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HSB	3	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	CL	7,2E-07	1,31	0,019	41	9,5
HSB	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HWH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
HWH	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
HWH	3	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SCL	3,6E-06	1,48	0,059	39	10
HWH	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
HWH	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
IS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
IS	2	42.5	27.5	19.5	15	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
IS	3	38.5	28.5	17	10	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
IS	4	30.5	23.5	15.5	7	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
IS	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
MLa	1	93	73	60	20	2	5,8E-07	H	1,4E-06	1,3	0,036	70	4
MLa	2	37	26	18	11	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
MLa	3	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
MR	1	93	73	60	20	2	5,8E-07	H	1,4E-06	1,3	0,036	70	4
MR	2	36	16.5	10.5	19.5	5	2,3E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
MR	3	33	26	12	7	2	5,8E-07	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
MR	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
pS	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
pS	2	41	25.5	18	15.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
pS	3	29.5	22	16.5	7.5	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
pS	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
pSSH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
pSSH	2	43.5	22	13	21.5	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
pSSH	3	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
pSSH	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
pSWH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
pSWH	2	43.5	27.5	18.5	16	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
pSWH	3	41.5	29.5	18.5	12	3	2,9E-06	SCL	3,6E-06	1,48	0,059	39	10
pSWH	4	32	25	16	7	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
pSWH	5	37	26	18	11	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
pSWH	6	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
Ri	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
Ri	2	39	27.5	18.5	11.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5

FSE	Hor.-Nr.	LGRB (1998)						CARSEL & PARRISH (1988)					
		GPV [%]	FK [%]	nFK [%]	LK [%]	Ksb-Klasse	Ksb- [m/s]	Bodenart A	KsA- [m/s]	n	alpha	theta_s [%]	theta_r [%]
Ri	3	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SFH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SFH	2	43.5	27.5	18.5	16	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SFH	3	38.5	27.5	18.5	11	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
SFH	4	35	21.5	16	13.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SFH	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SFH-	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SFH-	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
SFH-	3	36	18	11	18	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SFH-	4	32	14.5	9	17.5	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
siFH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
siFH	2	56.5	46	21.5	10.5	3	2,9E-06	L	2,9E-06	1,56	0,036	43	7,8
siFH	3	38.5	28.5	17	10	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
siFH	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SRü-	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SRü-	2	41	18.5	12	22.5	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
SRü-	3	29.5	22	16.5	7.5	3	2,9E-06	CL	7,2E-07	1,31	0,019	41	9,5
SRü-	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SSH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SSH	2	42.5	27.5	19.5	15	5	2,3E-05	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SSH	3	35	21.5	16	13.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SSH	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SSH+	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SSH+	2	43.5	22	13	21.5	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
SSH+	3	35	21.5	16	13.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SSH+	4	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SSH-	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SSH-	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
SSH-	3	49	33.5	22	15.5	5	2,3E-05	SiCL	1,9E-07	1,23	0,01	43	8,9
SSH-	4	32	25	16	7	3	2,9E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
SSH-	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SWH	1	80	40	8	40	-	1,0E-03	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
SWH	2	41	20	12.5	21	6	3,5E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
SWH	3	39	27.5	18.5	11.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SWH	4	35	21.5	16	13.5	4	8,1E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
SWH	5	32	14.5	9	17.5	5	2,3E-05	S	8,3E-05	2,68	0,145	43	4,5
SWH	6	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	LS	4,1E-05	2,28	0,124	43	5,7
wzMi	1	92	82	65	10	1	1,2E-07	O	1,0E-03	2,68	0,145	43	4,5
wzMi	2	44.5	32	22	12.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5

		LGRB (1998)						CARSEL & PARRISH (1988)					
FSE	Hor.-Nr.	GPV [%]	FK [%]	nFK [%]	LK [%]	K _B -Klasse	K _B -[m/s]	Bodenart A	K _{SA} -[m/s]	n	alpha	theta_s [%]	theta_r [%]
wzMi	3	43	30.5	21.5	12.5	4	8,1E-06	SL	1,2E-05	1,89	0,075	41	6,5
wzMi	4	40	36	10.5	4	2	5,8E-07	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10
wzMi	5	29.5	20.5	16	9	3	2,9E-06	SC	3,4E-07	1,23	0,027	38	10

Anhang A6: Vegetationsaufnahmen

A6-1: Ökologische Artengruppen (AK STANDORTSKARTIERUNG 1996), Zeigerwerte (ELLENBERG et al. 1992) und Charakterisierung der Feuchtezeigerfunktion (dto., OBERDORFER 2001) für wichtige Arten der bachnahen Vegetationstypen

Artname	Ökologische Artengruppe (ÖAG)	Zeigerwerte			Charakterisierung der Feuchtezeigerfunktion
		F	L	N	
<i>Adenostyles alliariae</i>	IV 3-4b	6	6	8	sickerfrisch, feuchte Tannen-Buchenwälder, N-Zeiger
<i>Athyrium filix-femina</i>	III 3	7	3	6	frisch bis feucht (sickerfeucht)
<i>Avenella flexuosa</i>	II 2a	X	6	3	große Feuchteamplitude
<i>Cardamine flexuosa</i>	IV 4-5	8	7	5	sicker- bis grundfeucht (-nass), Quellfluren
<i>Circaea intermedia</i>	II 3b	7	4	6	feucht, bewegtes Bodenwasser, quellig
<i>Deschampsia cespitosa</i>	IV 2-3, IV 3-4	7~	6	3	sicker- und grundfeucht-nass oder wechsellnass
<i>Dryopteris dilatata</i>	III 3	6	4	7	frisch bis feucht (sickerfeucht)
<i>Epilobium angustifolium</i>	II 2c, 01	5	8	8	frisch, Stickstoffzeiger
<i>Galium harcynicum (=saxatile)</i>	III 2	5	7	3	frisch, große Amplitude der ÖAG
<i>Impatiens noli-tangere</i>	III 4a	7	4	6	sickerfeucht bis sickernass, Bäche, auch Störungszeiger
<i>Luzula luzuloides</i>	II 2c	5	4	3	mäßig frisch, ÖAG trockenheitsertragend
<i>Luzula sylvatica</i>	III 1	5	4	4	frisch (vgl. aber Ausführungen im Text!)
<i>Molinia caerulea</i>	IV 1-2a	X~	7	3	wechselfeucht bis nass, auch trocken
<i>Mycelis muralis</i>	-	5	4	6	frisch, Mullzeiger
<i>Myosoton aquaticum</i>	-	10	7	7	grund- bis sickernass, zeitweise überflutet
<i>Oxalis acetosella</i>	III 2 (II-IV,2-4)	5	1	6	frisch bis feucht, große Amplitude
<i>Ranunculus aconitifolius</i>	IV 3-4b	8	6	6	sickerfrisch
<i>Sphagnum spec.</i>	-				überwiegend feucht
<i>Stellaria uliginosa</i>	-	8	5	4	sickernass, Quellfluren, Gräben
<i>Thelypteris limbosperma</i>	-	6~	4	5	sickerfrisch, wechselfeucht, Quellnischen
<i>Vaccinium myrtillus</i>	II1	X	5	4	sehr große Feuchteamplitude: mäßig frisch bis nass

F= Feuchtezahl: 5 = frisch, 7 = feucht, 9 = nass, 10 = Wechselwasserzeiger;

L = Lichtzahl: 3 = Schattenpflanze, 5= Halbschattenpflanze, 7 = Halblichtpflanze

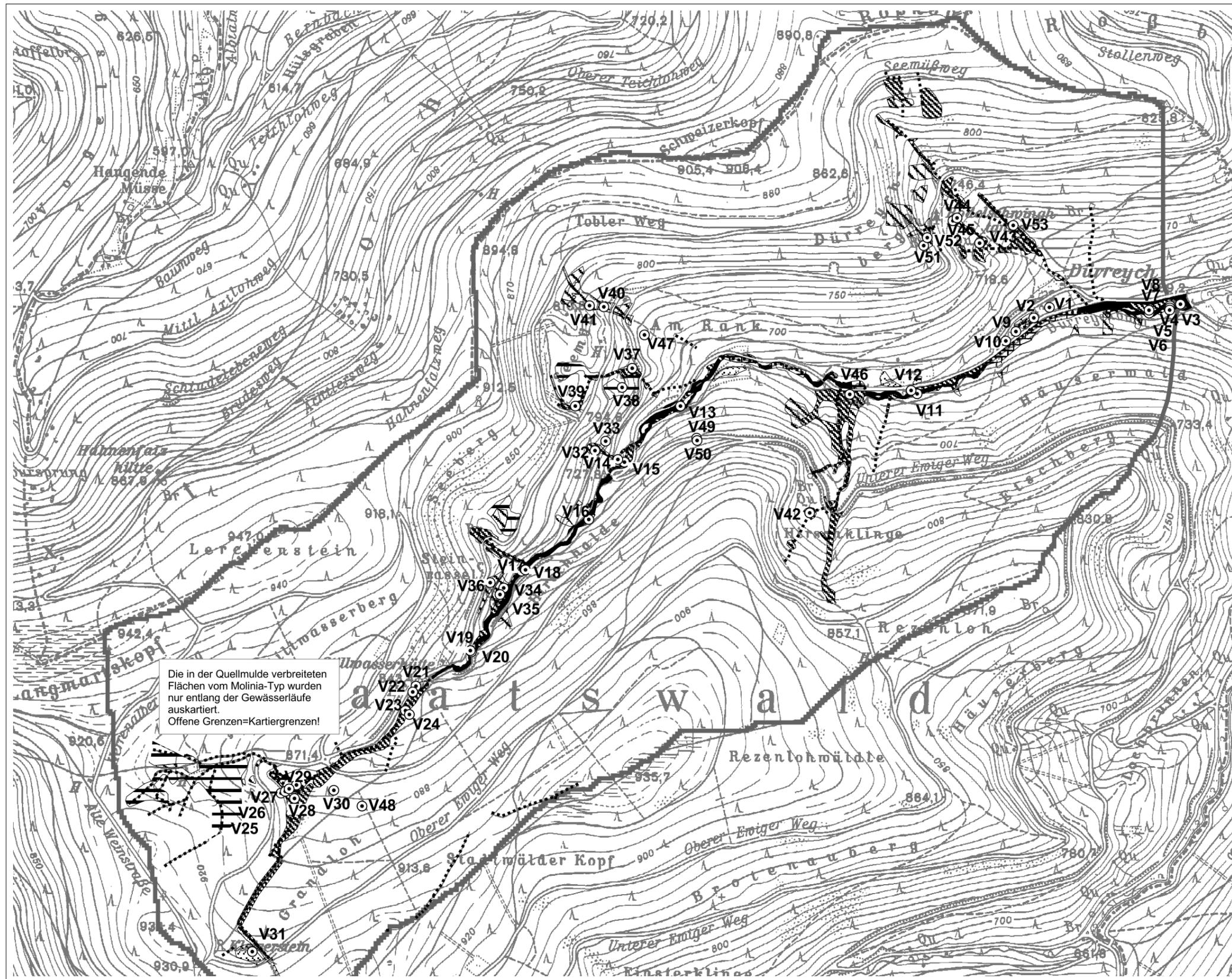
N = Stickstoff-/ Nährstoffzahl: 3 = stickstoffarm, 5= mäßig stickstoffreich, 7 = stickstoffreich, 8 = ausgespr. Stickstoffzeiger

Zusatz ~ = wechselnde Feuchteverhältnisse, X = indifferentes Verhalten

A6-2: Vegetationstabelle der 7 Wiesenaufnahmeflächen. **Fett** eingerahmt sind Arten einer soziologischen Gruppe. **Fett** gedruckt erscheinen Arten mit Feuchtezahlen $F > 7$ oder Wechselfeuchtezeiger. Arten mit geringem Zeigerwert sowie Arten mit geringer Gesamtstetigkeit wurden ans Tabellenende gestellt.

Aufnahmen mit Feuchtezeigern								
Aufnahmenummer V...	10	2	9	21	40	1	22	Stetigk.
Deckung [%]	120	120	120	120	120	80	120	7
<i>Plantago lanceolata</i>	2a	1	+					3
<i>Lotus uliginosus</i>	2m	1	2b					3
<i>Holcus lanatus</i>	2m	3	1					3
<i>Dactylis glomerata</i>	1	+	1	1				4
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	2b		2m					2
<i>Festuca heterophylla</i>	1		1					2
<i>Cynosurus cristatus</i>	2a		1					2
<i>Taraxacum officinale (agg.)</i>	+	r						2
<i>Juncus acutiflorus</i>		1	3	2m				3
<i>Carex ovalis</i>				+	1			2
<i>Rumex acetosa</i>			1	+	1			3
<i>Ranunculus repens</i>				4	2a	1		3
<i>Cirsium palustre</i>		+		+	+		+	4
<i>Epiobium tetragonum*</i>						1	+	2
<i>Galium uliginosum</i>				+			2m	2
<i>Deschampsia cespitosa</i>		+		1			2b	3
<i>Myosotis palustris**</i>				1				1
<i>Stellaria uliginosa</i>				+				1
<i>Equisetum arvense</i>				+				1
<i>Dactylorhiza majalis****</i>			r					1
<i>Lychnis flos-cuculi</i>			1					1
<i>Viola palustris</i>							1	1
<i>Polygonum hydropiper</i>						1		1
<i>Juncus bufonius (agg.)</i>						1		1
<i>Juncus effusus</i>	2a			2m	+	2a	2a	5
<i>Poa trivialis</i>	2a	2m		1	2a	2a		5
<i>Agrostis tenuis (=capillaris)</i>				2b	3		1	3
<i>Veronica chamaedrys</i>	2a		1		2b			3
<i>Avenella flexuosa</i>	3				2a			2
<i>Galeopsis tetrahit</i>		+					2m	2
<i>Polygonum bistorta</i>		1					1	2
<i>Galium palustre (agg.)</i>		1			1			2
<i>Centaurea jacea</i>	r				+			2
<i>Stellaria graminea</i>				+			+	2
<i>Luzula silvatica</i>					+			1
<i>Vaccinium myrtillus</i>		1						1
<i>Galium hircynicum (=saxatile)</i>					1			1
<i>Pteridium aquilinum</i>					+			1
<i>Urtica dioica</i>				+				1
<i>Rubus fruticosus agg.</i>							+	1
<i>Senecio fuchsii</i>							1	1
<i>Epilobium palustre</i>							1	1
<i>Ranunculus aconitifolius</i>		+						1
<i>Potentilla erecta</i>							+	1
<i>Scirpus silvaticus</i>			1					1
<i>Rhinanthus ...?</i>	2a							1
<i>Trifolium repens</i>					3			1
<i>Trifolium pratense</i>	+							1
<i>Ranunculus acris agg.</i>	2m							1
<i>Prunella vulgaris</i>	+							1
<i>Phleum pratense agg.</i>			1					1
<i>Galium mollugo (agg.)</i>	2a							1
<i>Fragaria vesca</i>					+			1
<i>Cirsium vulgare</i>			r					1
<i>Cerastium holosteoides</i>							+	1
<i>Agropyron repens</i>					2a			1

A6-4: Vegetationsaufnahmepunkte und Vegetationstypen gewässernaher Flächen



Die in der Quellmulde verbreiteten Flächen vom Molinia-Typ wurden nur entlang der Gewässerläufe auskartiert.
Offene Grenzen=Kartiergrenzen!

- ⊙ V 21 Vegetationsaufnahmepunkt
- Vegetationstypen (generalisiert)**
-  Luzula-Rinnen und Quellfluren
-  Luzula-Hangflächen
-  Myosoton-Überflutungsflächen
-  Juncus-Wiesenflächen
-  Bachumgestaltung
-  Sonstige bachnahe Flächen
-  Molinia-Flächen
- Gewässerläufe**
-  perennierend
-  temporär
-  Quellen

500 0 500 1000 1500 Meters

1:15000

Anhang A7: Refraktionsseismische Profile

Die Auswertung der Feldmessungen erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro GUS - Geophysikalische Messungen in Karlsruhe. Die von FLINSPACH (1999) modellierten Profile werden hier in leicht veränderter Form wiedergegeben.

A7-1: Übersichtslageplan der refraktionsseismischen Profile im Dürreychgebiet.

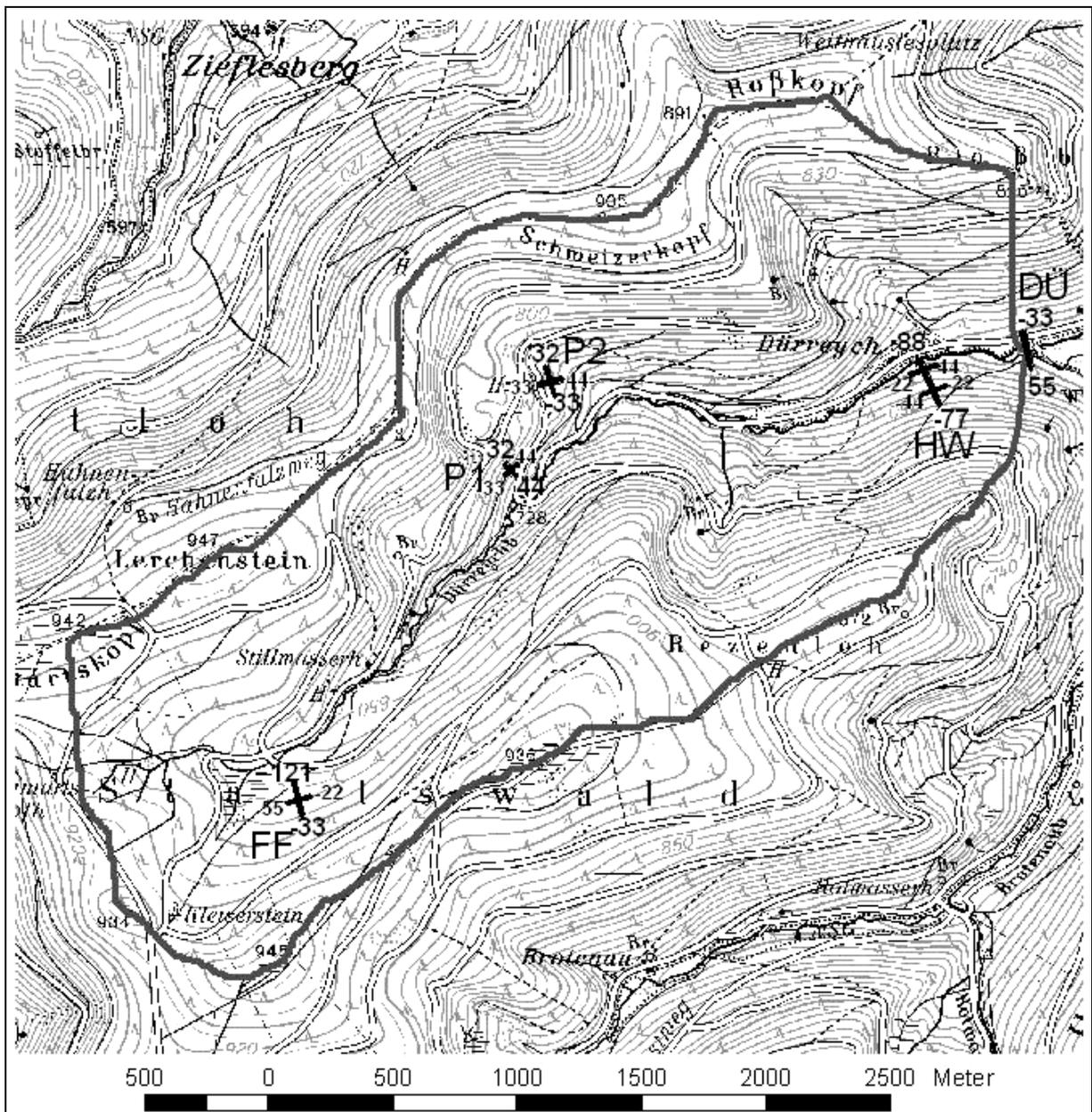
A7-2: Klimastation FF (Hochfläche)

A7-3: Refraktionsseismische Profile Häuserwald HW (Unterhang)

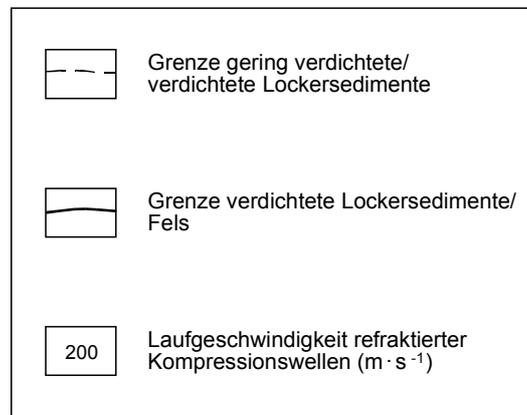
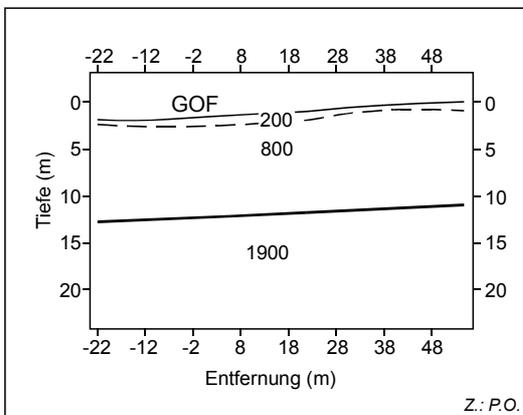
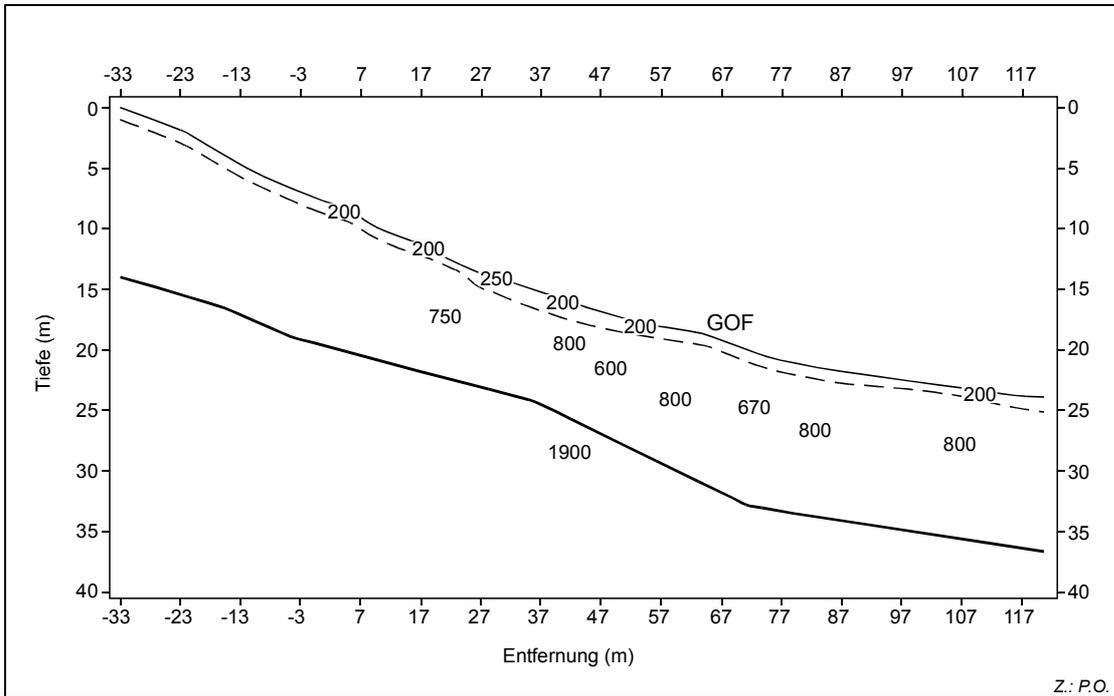
A7-4: Refraktionsseismische Profile Messprofil P 2 (Hangtreppe)

A7-5: Refraktionsseismische Profile. Oben: Messprofil P 1 (steiler Hang). Unten: Hauptpegel DÜ (Talboden Dürreychbach)

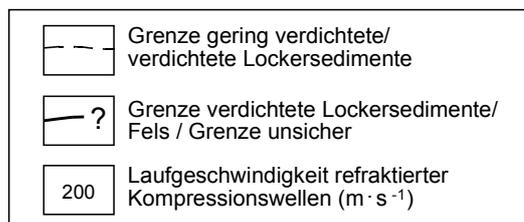
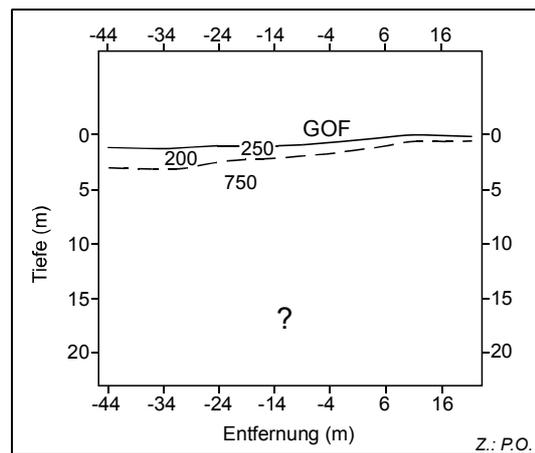
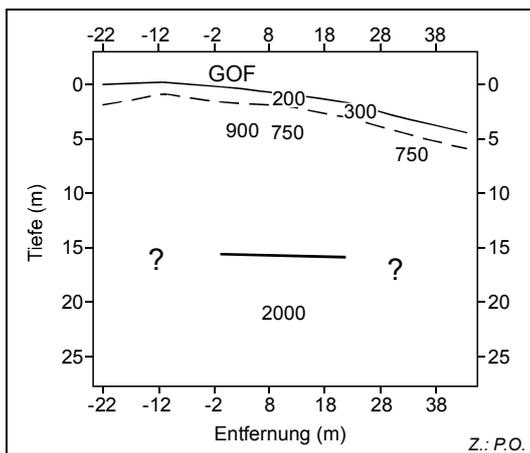
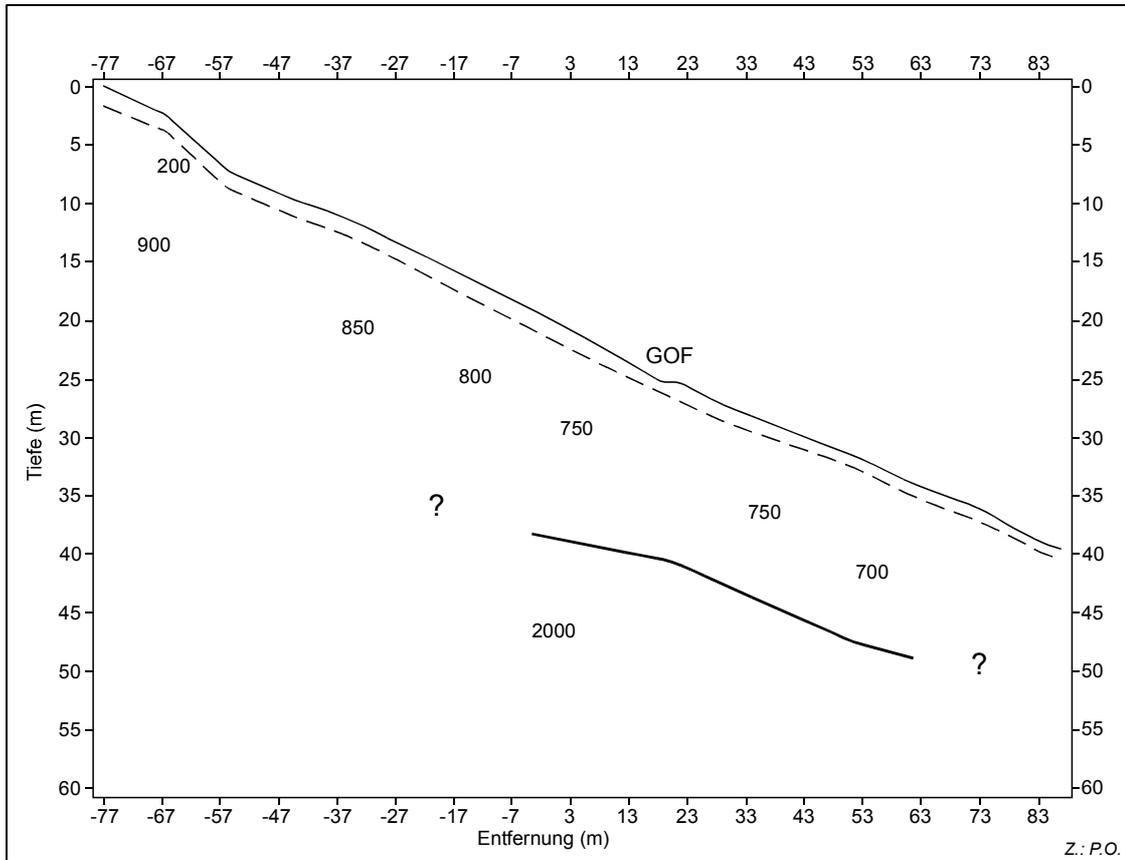
A7-1: Übersichtslageplan der refraktionsseismischen Profile im Dürreychgebiet.



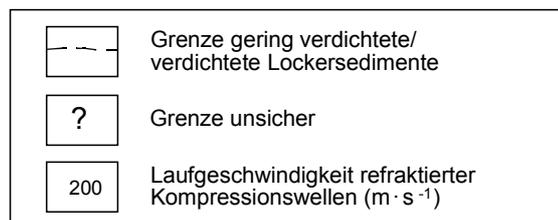
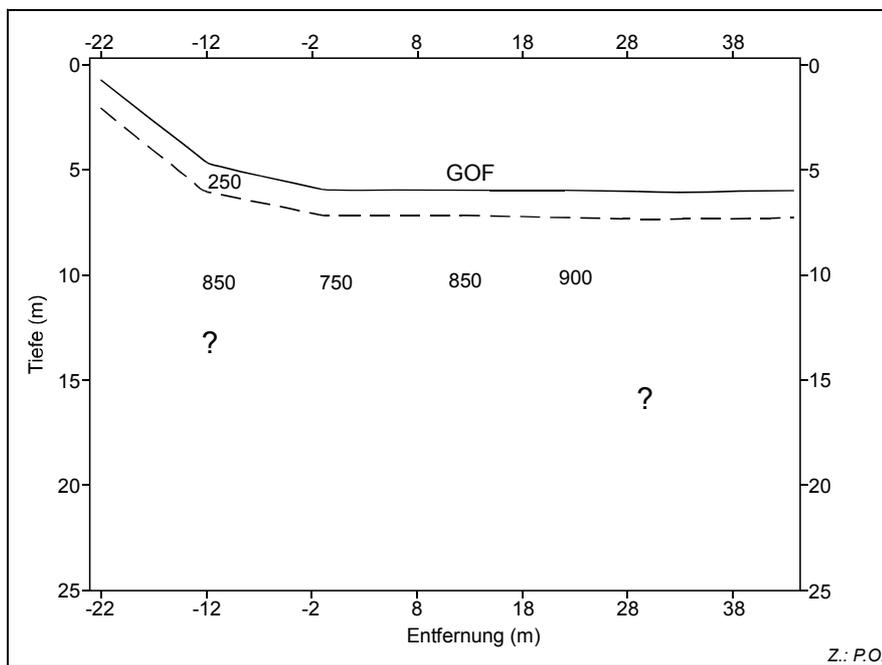
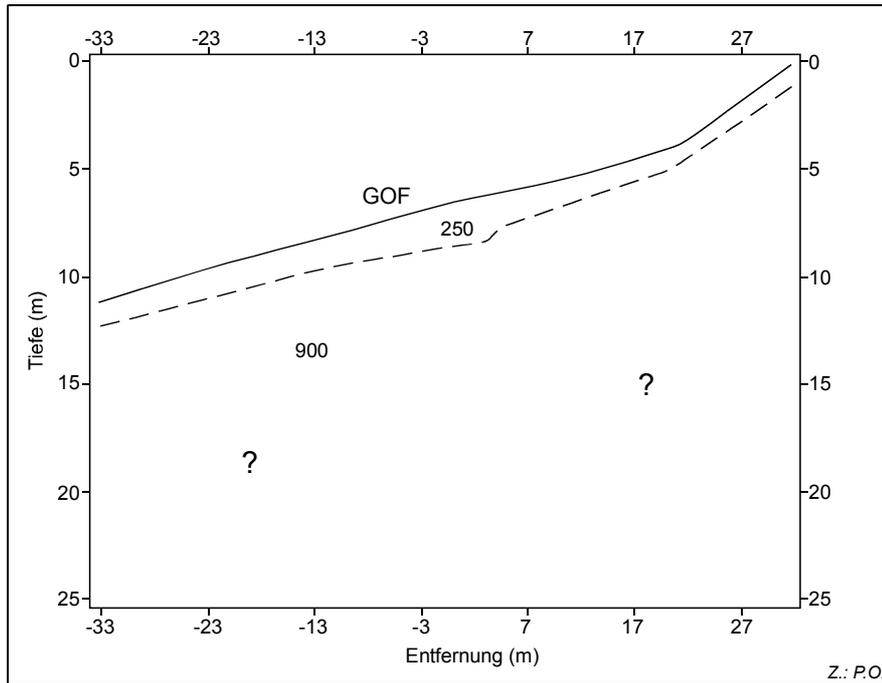
A7-2: Klimastation FF (Hochfläche)



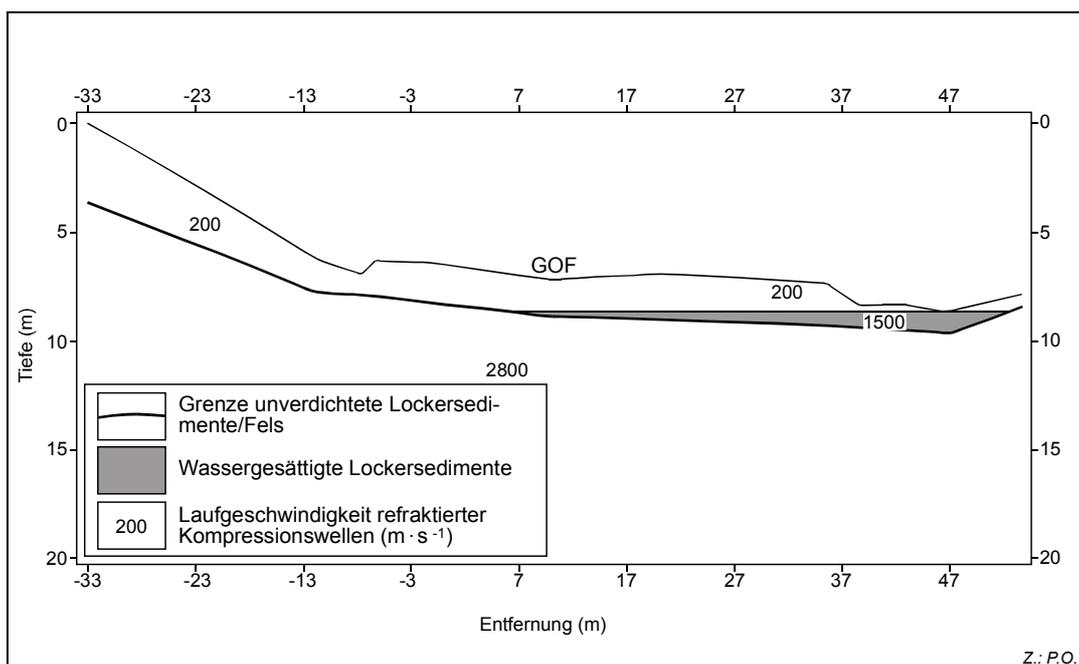
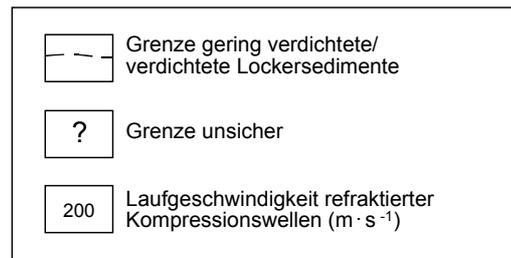
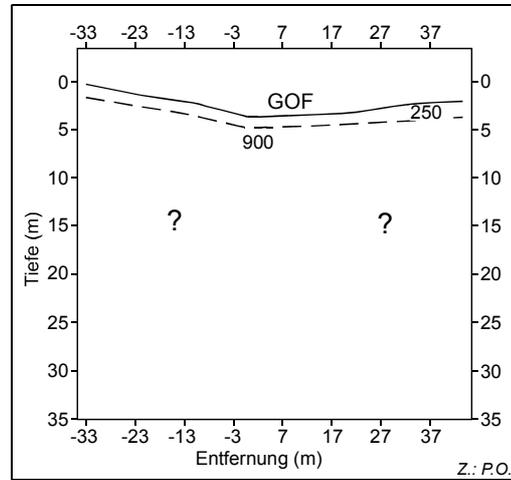
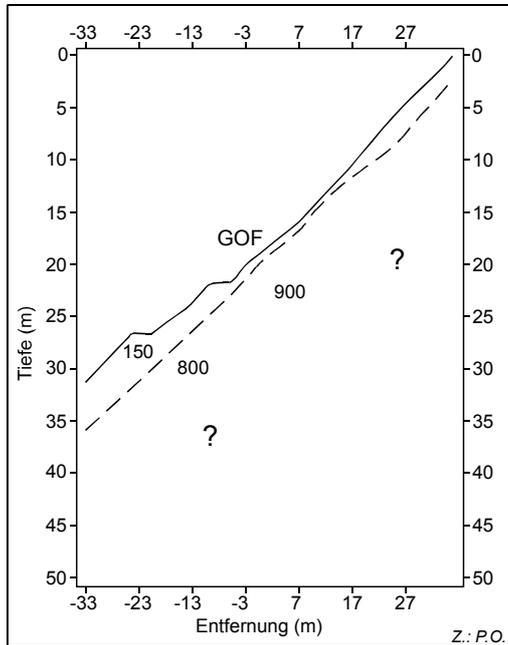
A7-3: Refraktionsseismische Profile Häuserwald HW (Unterhang)



A7-4: Refraktionsseismische Profile Messprofil P 2 (Hangtreppe)



A7-5: Refraktionsseismische Profile. Oben: Messprofil P 1 (steiler Hang). Unten: Hauptpegel DÜ (Talboden Dürreychbach)



Anhang A8: Abflussdaten

A8: Abflussbeiwerte, Niederschlagssummen und maximaler Durchfluss am Pegel DÜ (Wiedergabe der Werte nach CASPER 2002; Kürzel der Einzugsgebiete vgl. Anhang A1-1)

Datum	Abflussbeiwert Ψ [%]					Niederschlag		Max. Durchfluss		Bemerkungen
	DÜ	SH	HI	LE	SE	Summe [mm]	Max. Int. [mm/h]	DÜ [l/s]	Pegel SH [l/s]	
26.02.1997	36,0	-	-	-	-	120	8,3	4400		Scheitelabfluss ca. HQ5
01.05.1998	1,1	2,3	0,0	14,3	-	12,8	3,5	112	8	P1: Schneereste?!
26.05.1998	0,2	0,0	0,0	0,0	-	5,3	3,4	76	0	
27.05.1998	0,2	0,0	0,0	0,0	-	3,9	1,3	73	0	
31.05.1998	0,6	0,0	0,0	0,2	-	30,1	20,0	109	0	
02.06.1998	0,6	1,2	0,2	3,2	-	14,3	5,0	89	6	
07.06.1998	0,2	0,0	0,0	0,0	-	3,7	4,5	68	0	
10.06.1998	0,0	0,0	0,1	0,0	-	12,6	5,3	66	0	
11.06.1998	0,9	0,7	0,0	5,9	-	6,3	2,8	81	5	
12.06.1998	1,6	6,5	0,9	14,2	-	22,3	4,1	106	48	
15.06.1998	0,2	3,0	0,8	9,9	-	8,4	3,4	89	16	
16.06.1998	1,1	4,6	1,3	14,1	-	16,2	3,9	95	28	
17.06.1998	0,6	1,5	0,3	8,5	-	5,3	4,8	78	6	
26.06.1998	0,9	0,0	0,0	-	0,0	8,0	1,9	63	0	Pegelwert fraglich!
27.06.1998	2,1	2,3	0,9	-	6,1	36,4	11,6	106	35	
10.07.1998	0,9	0,0	0,0	-	0,2	20,6	6,2	78	0	
13.07.1998	0,9	0,0	0,0	-	0,0	8,7	6,7	68	0	
16.07.1998	1,1	0,0	0,0	-	0,1	13,3	5,0	71	0	
29.07.1998	0,9	0,4	0,1	5,0	-	25,5	3,8	100	4	
01.08.1998	0,9	0,0	0,0	1,7	-	8,9	4,4	54	0	Pegelwerte fraglich
02.08.1998	2,5	4,5	0,7	19,3	-	14,7	3,9	89	20	
21.08.1998	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2	4,1	50	0	
22.08.1998	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	12,9	4,0	47	0	
24.08.1998	0,4	0,0	0,1	0,9	1,0	22,5	4,2	61	0	Pegelwerte fraglich
03.09.1998	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	7,8	50	0	
05.09.1998	0,6	0,6	0,1	7,7	0,6	23,0	7,1	61	4	
10.09.1998	0,2	0,6	0,0	6,5	0,1	17,3	4,9	54	8	
14.09.1998	7,7	14,4	6,6	36,3	17,3	60,7	4,8	495	200	
30.09.1998	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	8,2	1,4	59	0	
04.10.1998	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0	7,0	10,2	54	0	
07.10.1998	2,7	6,1	1,0	24,3	12,4	15,8	3,4	86	30	
10.10.1998	2,8	7,8	4,7	27,9	11,6	30,3	2,6	125	33	
15.10.1998	4,7	13,3	5,8	31,2	12,4	23,8	4,8	224	107	
17.10.1998	3,1	4,5	3,1	16,3	9,3	13,5	5,5	145	33	
23.10.1998	0,6	0,0	0,9	1,8	1,0	14,4	3,2	131	6	fraglich!!
24.10.1998	7,6	14,9	6,3	29,4	16,6	35,6	5,8	555	220	
26.10.1998	1,7	2,6	3,0	11,6	5,3	18,5	4,3	173	26	
27.10.1998	39,6	48,3	39,7	-	36,7	177,7	17,4	13794	4023	Scheitelabfluss >HQ100
28.10.1998	36,8	38,8	34,8	-	43,2	247,9	17,4	13794	4023	Gesamtabfluss 27.10-4.11.
03.11.1998	8,0	8,5	8,7	-	14,6	36,3	7,5	477	83	2. Teil vom Gesamt ereignis
09.11.1998	4,2	7,5	6,5	21,3	8,9	33,9	4,6	314	50	LE zu niedrig!
05.05.1999	0,7	0,1	-	0,0	-	7,7	3,3	135	4	
07.05.1999	2,1	3,3	-	11,8	-	34,1	5,8	192	44	
11.05.1999	7,2	15,2	6,2	26,9	-	55,2	5,8	555	186	breites Ereignis

Datum	Abflussbeiwert Ψ [%]					Niederschlag		Max. Durchfluss		Bemerkungen
	DÜ	SH	HI	LE	SE	Summe [mm]	Max. Int. [mm/h]	DÜ [l/s]	Pegel SH [l/s]	
19.05.1999	0,9	0,1	2,2	0,0	-	8,5	5,1	138	5	kurzes Ereignis
22.05.1999	1,7	2,0	1,8	10,1	-	5,1	2,5	131	5	kurzes Ereignis
02.06.1999	0,2	0,1	0,0	0,0	-	4,4	3,7	100	1	
03.06.1999	0,7	0,0	0,0	0,0	-	4,2	3,6	119	1	
05.06.1999	0,7	0,1	1,1	0,0	-	25,2	3,8	122	2	
08.06.1999	1,3	3,0	1,6	10,9	-	21,3	5,2	119	25	
13.06.1999	0,5	0,0	0,2	0,0	-	9,2	10,3	115	0	
18.06.1999	0,1	0,0	0,0	0,0	-	2,6	2,7	81	0	
20.06.1999	0,4	0,0	0,2	0,3	-	22,9	8,6	112	0	
20.06.1999	1,2	1,2	0,8	5,2	-	38,3	2,2	76	0	20./21.6 zus.gefasst!!
21.06.1999	1,2	2,7	1,6	11,3	-	15,4	3,5	125	9	
05.07.1999	0,5	0,0	0,1	0,0	-	20,6	6,2	109	0	
07.07.1999	2,1	3,1	1,6	10,1	-	30,6	13,3	145	48	
10.07.1999	0,1	0,0	0,1	13,5	-	6,1	2,3	76	0	
11.07.1999	1,4	0,1	0,1	5,6	-	5,7	4,1	78	0	Pegel fraglich
13.07.1999	5,8	12,8	3,2	23,1	-	34,2	20,7	455	266	Leerlaufen konstruiert
20.07.1999	0,4	0,0	0,6	0,0	-	12,5	6,6	100	0	Gewitter!
23.07.1999	1,0	2,2	1,0	-	-	13,6	4,0	92	10	
04.08.1999	1,0	1,3	0,3	6,0	-	33,0	30,1	131	52	Gewitter
06.08.1999	1,0	1,8	1,6	8,7	-	19,9	15,0	109	20	Gewitter
09.08.1999	0,7	0,1	0,9	4,5	-	9,2	8,5	89	0	kleines Gewitter
11.08.1999	0,7	2,1	0,3	12,1	-	11,1	3,0	78	6	advektiv
14.08.1999	0,4	0,0	0,1	1,7	-	10,2	5,7	0	0	
16.08.1999	0,8	2,5	0,3	14,3	-	10,9	8,3	112	15	
18.08.1999	0,0	0,0	0,0	0,1	-	7,6	4,9	84	2	
26.08.1999	0,0	0,0	0,0	0,0	-	3,0	3,6	61	0	
27.08.1999	2,0	1,5	1,3	9,2	-	29,7	11,6	145	26	2 Gewitter innerhalb 6h!
20.09.1999	0,3	0,0	0,0	0,0	-	8,1	3,0	59	0	
23.09.1999	0,3	0,0	0,0	0,0	-	7,6	4,2	61	0	
25.09.1999	0,3	0,0	0,0	0,0	-	10,4	2,5	61	0	
28.09.1999	0,2	0,0	0,1	0,0	-	8,9	4,3	63	0	
29.09.1999	0,8	0,0	0,1	0,4	-	22,3	3,0	63	0	
02.10.1999	0,1	0,3	0,1	4,0	-	3,3	3,8	73	5	
04.10.1999	2,5	5,9	1,0	19,6	-	22,1	5,6	119	48	
09.10.1999	1,2	4,4	0,3	26,4	-	8,0	2,8	68	15	
24.10.1999	0,5	0,0	0,1	2,8	-	22,1	6,0	71	0	
31.10.1999	0,3	0,7	0,1	9,8	-	14,3	5,1	78	5	
02.11.1999	1,9	7,1	0,7	21,3	-	20,1	3,3	122	58	
06.11.1999	0,8	1,8	1,8	9,9	-	15,3	5,6	78	10	kurzes Ereignis
07.11.1999	0,4	2,6	0,5	12,4	-	7,4	2,8	81	13	kurzes Ereignis
09.11.1999	7,8	12,5	9,6	26,1	-	63,1	4,2	495	169	sehr breites Ereignis
17.09.2000	21,4	23,7	-	38,8	-	90,5	11,2	2097	592	Scheitelabfluss ca. HQ2

*Veröffentlichungen des Institutes für Geographie und Geoökologie I
der Universität Karlsruhe (TH)*

KARLSRUHER SCHRIFTEN ZUR GEOGRAPHIE UND GEOÖKOLOGIE
--

- | | |
|---|----------------------------|
| <p>Band 1: MEURER, M. (Hrsg.) - Geo- und weideökologische Untersuchungen in der subhumiden Savannenzone NW-Benins
mit Beiträgen von MEURER, M., SWOBODA, J., REIFF, K., STURM, H.-J., SCHMÜDDERICH, C., JENISCH, T.O., FRIEBE, G., GRENZ, M., Will H. & M. MIDELL
279 S., 48 Abb., 33 Tab., 6 Farbkarten-Beilagen, Karlsruhe 1998</p> | € 25,00 |
| <p>Band 2: STURM, H.-J. - Produktions- und weideökologische Untersuchungen in der subhumiden Savannenzone Nordbenins – ein Beitrag zur Konzeption ökologisch nachhaltiger Nutzungssysteme
94 S., 30 Abb., 36 Tab., 3 Karten, Karlsruhe 1993</p> | € 15,00 |
| <p>Band 3: HÜBNER, F. - Wachstumsverhalten und Revitalisierungstendenzen innerstädtischer Linden und Ahorne in Karlsruhe nach Wurzelraumsanierungsmaßnahmen
200 S., 89 Abb., 85 Tab., Karlsruhe 1996</p> | € 20,00 |
| <p>Band 4: WILL, H. - Fernerkundung und Weideökologie in der subhumiden Savannenzone NW-Benins – Anwendungen der Satellitenfernerkundung (LANDSAT-TM, SPOT) im Rahmen von weideökologischen Aufgabenstellungen
118 S., 26 Abb., 29 Tab., 6 Farb-Beilagen, Karlsruhe 1996</p> | € 20,00 |
| <p>Band 5: JIANG, Y. - Kleinräumliche Variation der Vegetation und ihrer Standortbedingungen im Pfannwald und in Teilgebieten des Streitwaldes/ Kraichgau
145 S., 41 Abb., 30 Tab. (3 als Beilage), 5 SW-Karten, 3 Farbkarten-Beilagen, Karlsruhe 1996</p> | € 20,00 |
| <p>Band 6: JENISCH, T.O. - Pastorale Nutzungsmechanismen und nahinfrarot-reflexionsspektroskopisch (NIRS) ermittelte Qualität der Futterressourcen in dem Département Atacora/Benin (West-Afrika) – unter dem Aspekt des Landschafts- und Ressourcenschutzes
223 S., 51 Abb., 59 Tab., 1 SW-Beilage, Karlsruhe 1997</p> | € 22,50 |
| <p>Band 7: MEURER, M. & T.K. BUTTSCHARDT (Hrsg.) - Geoökologie in Lehre, Forschung, Anwendung. Beiträge zum 1. Kongreß für Geoökologie am 09.11.1996 an der Universität Karlsruhe (TH) (Kongreßband GEOöKon 1996)
133 S., 33 Abb., 19. Tab., Karlsruhe 1997
Kongreßteilnehmer/VGöD-Mitglieder</p> | <p>€ 15,00
€ 10,00</p> |
| <p>Band 8: SPLETT, G. - Erfolgskontrollen im Naturschutz. Entwicklung einer Evaluationsstrategie für großflächige, integrative Naturschutzprojekte und ihre Erprobung am Beispiel des PLENUM*-Modellprojekts Isny/Leutkirch
*Projekt des Landes zur Erhaltung und Entwicklung von Natur und Umwelt
180 S., 14 Abb., 21 Tab., Karlsruhe 1999</p> | € 17,50 |
| <p>Band 9: RITZ, D. - Computergestützte Bildanalyse des Bodenbedeckungsgrades unter besonderer Berücksichtigung der Regionalisierung pflanzen- und bodenkundlicher Parameter
104 S., 170 Abb., 19 Tab., 1 Farb-Beilage, Karlsruhe 2000</p> | € 15,00 |

- Band 10: NUTZ, L. - Regeneration und Sukzession der Vegetation auf Brandflächen. Eine anwendungsorientierte Fallstudie auf der Kykladeninsel Naxos (Griechenland)
191 S., 31 SW-Abb., 1 Farb-Abb., 31 Tab., 4 SW-Karten, 8 Farb-Karten, 8 SW-Photos, Karlsruhe 2000 € 22,50
- Band 11: HARTENSTEIN, M. - Analyse eines Bergwindsystems im Nordschwarzwald (Michelbachtal bei Gaggenau) unter Berücksichtigung seiner stadtklimatisch-lufthygienischen Bedeutung
104 S., 44 SW-Abb., 3 Farb-Abb., 11 Tab., Karlsruhe 2000 € 15,00
- Band 12: Schwarzwälder, S. - Ökologische Bedeutung von Pflegemaßnahmen auf Energieleitungsstrassen - Wert und Entwicklungsmöglichkeiten trassengeprägter Biotope
134 S., 35 Abb., 24 Tab., Karlsruhe 2000 € 15,00
- Band 13: BUTTSCHARDT, T.K. - Extensive Dachbegrünungen und Naturschutz
275 S., 45 SW-Abb., 2 Farb-Abb., 91 Tab., Karlsruhe 2001 € 20,00
- Band 14: VOGT, J. - Lokale Kaltluftabflüsse und ihre Relevanz für die räumliche Planung
349 S., 143 SW-Abb., 1 Farb-Abb. 4 Tab., Karlsruhe 2001 in Vorb.
- Band 15: JEHN, K. - Vegetationskundliche Erfolgskontrollen an renaturierten Fließgewässern in der badischen Oberrheinebene
219 S., 108 SW-Abb., 6 Farb-Abb., 50 Tab., Datenanhang auf CD-ROM, Karlsruhe 2001 € 17,50
- Band 16: ZOMAHOUN, G.-H. - Landnutzungs- und Managementstrategien für die Puffer- und Siedlungszone des Pendjari-Nationalparks (Bénin)
252 S., 68 SW-Abb., 1 Farb-Abb., 66 Tab., 16 SW-Karten, 3 Farb-Karten, Karlsruhe 2002 € 25,00
- Band 17: MÜLLER, H.-N. - Landschaftsgeschichte Simplon (Walliser Alpen, Schweiz) – Gletscher-, Vegetations- und Klimaentwicklung seit der Eiszeit
423 S., 108 SW-Abb., 15 Farb-Abb., 53 Tab., 2 Farb-Karten, Karlsruhe 2003 in Vorb.
- Band 18: BURGER, D., M. MEURER, J. VOGT (HRSG.): - Studien zur Geographie und Geoökologie
175 S., 87 SW-Abb., 7 Farb-Abb., 5 Tab., Karlsruhe 2003 € 25,00
- Band 19: SAMIMI, C.: Das Weidepotential im Gutu Distrikt (Zimbabwe) - Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung unter Verwendung von Landsat TM-5
134 S., 65 SW-Abb., 13 Farb-Abb., 31 Tab., Karlsruhe 2003 € 30,00
- Band 20: WALDENMEYER, G.: Abflussbildung und Regionalisierung in einem forstlich genutzten Einzugsgebiet (Dürreychtal, Nordschwarzwald)
247 S. 160 SW-Abb., 4 Farb-Abb., 2 SW-Karten, 57 Tab., Karlsruhe 2003 € 27,00

Bezugsadresse:

Institut für Geographie und Geoökologie I
der Universität Karlsruhe (TH)
Prof. Dr. M. Meurer
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe
Tel.: 0721/608-4367, Fax: 0721/696761
E-Mail: IfGG-Schriftenreihen@ifgg.uni-karlsruhe.de

KARLSRUHER BERICHTE ZUR GEOGRAPHIE UND GEOÖKOLOGIE

- | | | |
|----------|--|---------|
| Heft 1: | MEURER, M., JENISCH, T., REIFF, K., STURM, H.-J., SWOBODA, J. & H. WILL -
Weidepotentialanalysen in der Atakora-Provinz Benins
68 S., 17 Abb., 12 Tab., Karlsruhe 1991 | € 10,00 |
| Heft 2: | MEURER, M. - Die Südtiroler Almwirtschaft und das Bracheproblem aus
ökologischer Sicht
72 S., 11 Abb., 13 Tab., Karlsruhe 1992 | € 10,00 |
| Heft 3: | BUTTSCHARDT, T.K. - Ökomorphologische Fließgewässerbewertung und ihre
Bedeutung für die Biotopverbundplanung
85 S., 21 Abb., 22 Tab., 6 Photos, 5 Farbkarten, Karlsruhe 1994 | € 12,50 |
| Heft 4: | ZINOW, L. - Floristisch-vegetationskundliche Untersuchungen zweier Karlsruher
Industrie- und Gewerbegebiete im Hinblick auf ihren Wert für den Arten- und
Biotopschutz unter Berücksichtigung von Nutzung, Pflege und Versiegelung
KÜHNEN, A. - Satellitengestützte Vegetationskartierung im Südtiroler Martelltal als
Grundlage geoökologischer Planung
113 S., 24 Abb., 9 Tab., 34 Photos, 1 SW-Karte, 2 Farbkarten, 1 digitales Geländemodell, Karlsruhe
1994 | € 12,50 |
| Heft 5: | HARTENSTEIN, M. - Phänologische Analysen im Stadtgebiet von Karlsruhe
68 S., 30 Abb., 15 Tab., 1 SW-Karte, Karlsruhe 1994 | € 10,00 |
| Heft 6: | NUTZ, L. - Untersuchungen zur Sukzession von Inselwäldchen der Feuchtsavanne
des Beni-Tieflandes, Bolivien
105 S., 13 Abb., 12 Tab., 5 Photos, 4 Farbkarten, Karlsruhe 1995 | € 12,50 |
| Heft 7: | BÖHLING, N. - Zur pedoökologischen Indikatorfunktion der Vegetation des
Stadtwaldes von Hannover. Untersuchungen zur Parallelisierung von
Zeigerwerten nach ELLENBERG mit Bodendaten im Hinblick auf eine Phy-
siotopdifferenzierung
HERBINGER, W. - Landschaftsökologie und GIS – Strategien zum Umgang mit
Datenunsicherheiten
86 S., 57 Abb., 22 Tab., Karlsruhe 1995 | € 10,00 |
| Heft 8: | JEHN, K. - Regeneration von <i>Chionochloa rigida</i> -Tussockgrasland nach dem
Abbrennen auf der Südinsel Neuseelands
85 S., 42 Abb., 62 Tab., 17 Photos, 1 Farbkarte, Karlsruhe 1997 | € 12,50 |
| Heft 9: | DANNENMAIER, S. - Vegetationskundliche Analysen unterschiedlicher Brachflächen
in SW-Niger
115 S., 36 Abb., 18 Tab., 2 Beilagen, Karlsruhe 1996 | € 10,00 |
| Heft 10: | NORRA, S. - Anorganische Schadstoffbelastung in Stäuben, Straßensedimenten,
Böden und Pflanzen entlang innerstädtischer Straßen von sechs Standorten in
Karlsruhe
104 S., 35 Abb., 32 Tab., 7 Photos, 1 Beilage, Karlsruhe 1997 | € 10,00 |
| Heft 11: | BRANDL, G. - Die Entwicklung und die Auswirkungen des Tourismus auf Naxos
(Griechenland)
89 S., 15 Abb., 12 Tab., 8 SW Karten u. 4 Farbkarten-Beilagen, Karlsruhe 1998 | € 15,00 |
| Heft 12: | SCHWARZWÄLDER, S. - Ökosystemare Auswirkungen von Pflegemaßnahmen
unter Freileitungstrassen – Möglichkeiten und Grenzen der Sukzessionslenkung
121 S., 18 Abb., 33 Tab., 24 Farbphotos, Karlsruhe 1999 | € 12,50 |

- Heft 13: HAMMEN, A. - Auswirkungen von Bränden auf die Böden der Insel Naxos (Griechenland)
87 S., 34 Abb., 16 Tab., 19 SW-Photos, Karlsruhe 2000 € 10,00
- Heft 14: VOGT, J. - Thermische Luftzirkulation in großen Innenräumen. Ergebnisse von Messungen im Dom von Meißen
43 S., 41 Abb., Karlsruhe 2000 € 10,00
- Heft 15: LANGNER, M. – Analysen zur Staubaufgabe auf Bäumen (*Acer platanoides*) innerstädtischer Standorte
75 S., 30 Abb., 12 Tab., Karlsruhe 2002 € 10,00

Bezugsadresse:

Institut für Geographie und Geoökologie I
der Universität Karlsruhe (TH)
Prof. Dr. M. Meurer
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe
Tel.: 0721/608-4367, Fax: 0721/696761
E-Mail: ifgg-schriftenreihen@ifgg.uni-karlsruhe.de