

Gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (DOC) im Dürreychbachtal (Nordschwarzwald)

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Biol. Holger Nils Volkmann
aus Marburg an der Lahn

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 2002

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. E.h. H.H. Hahn, Ph.D.
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Karlsruhe 2002

Danksagung

Für das Zustandekommen dieser Arbeit bedurfte es dem Zusammenwirken vieler Kräfte. Prof. Dr. rer. nat. J. Winter hat mich mit dem Thema dieser Dissertation betraut, für die sich Prof. Dr.-Ing. E.h. H.H. Hahn, Ph.D dankenswerterweise als Hauptreferent zur Verfügung gestellt hat. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann für die Bemühungen als Korreferent.

Die Durchführung dieser Arbeit fand im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs "Ökologische Wasserwirtschaft" statt, das besonders durch die fachlich sehr breite Zusammensetzung ihrer Kollegiaten stets einen gelungenen Rahmen für wissenschaftliche Diskussionen darstellte. So war mir besonders die intensive Auseinandersetzung Dr.-Ing. Erwin Zehes mit einigen meiner Thesen hilfreich. An dieser Stelle sei vor allem auch Frau Dr. rer. nat. C. Kämpf für ihre Koordinationsarbeit, ihre Begleitung des Graduiertenkollegs, so wie ihre persönliche Unterstützung gedankt.

Vor allem aber erwies sich die teamorientierte und freundschaftliche Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe Dürreych mit Dr.-Ing. Markus Casper (Promotion im Jahre 2002), Dr. rer. nat. Guido Waldenmeyer (Promotion im Jahre 2002), Dipl.-Geogr. Andrea Zielke und Dr.-Ing. Jochen Aberle (Promotion im Jahre 2000) als notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung eines solchen umfangreichen, fächerübergreifenden Projektes. In diesem Umfeld fanden neben vielen teils recht mühsamen, überwiegend aber spannenden Feldarbeiten auch die wichtigsten fachlichen Diskussionen statt, in denen häufig neue Anregungen und Hypothesen geformt wurden, die unsere Arbeiten stimuliert und vorangetrieben haben.

Die Erstellung umfangreicher Messeinrichtungen im Dürreychgebiet und die regelmäßigen Messfahrten wurden uns durch das Entgegenkommen der Forstdirektion Karlsruhe und des Forstamts Gernsbach ermöglicht und durch die Gastfreundschaft von Herrn Axel Gulde erleichtert.

Von den zahlreichen Diplomanden und wissenschaftlichen Hilfskräften, die im Rahmen des Dürreychprojektes tätig waren, möchte ich hier beispielhaft Martin Henning erwähnen, der uns bei Messfahrten und technischer Instandhaltung unterstützte, sowie Mailin Eberle und Christina DosSantos, die einen großen Teil der Datenaufbereitung bewältigten.

Nicht zu vergessen seien auch Herr Dr.-Ing. J. Ihringer, der mir in seiner Abteilung den notwendigen Raum für die schriftliche Ausarbeitung zu Verfügung stellte, und PD Dr. Ursula Obst, die mit dem notwendigen sanften Druck auf das Einhalten eines angemessenen Zeitrahmens einwirkte.

Letztlich gilt mein Dank aber auch meiner Frau und meinen Kindern, die mir immer mit Motivation und Geduld zur Seite standen.

Zusammenfassung

Die mathematische, physikalisch basierte Abbildung von Niederschlags-Abfluss-Beziehungen kleinerer Wassereinzugsgebiete setzt ein Kenntnis der ihnen zu Grunde liegenden dominierenden Prozesse voraus. In dieser Arbeit wurde die Dynamik des Transportes gelöster organischer Substanz des Dürreychbaches in geschachtelten Teileinzugsgebieten und auf unterschiedlichen Skalen untersucht, um daraus vor allem schnelle Abflussbildung zu beschreiben.

Zwischen Oktober 1997 und Oktober 1999 gelangten durchschnittlich 21 t a^{-1} DOC in das Gewässernetz und wurden aus dem Dürreychbachtal ausgetragen. Die DOC-Konzentrationen im Dürreychbach wiesen sowohl eine hohe räumliche Variabilität als auch eine zeitliche Dynamik auf. An Bodenprofilen traten deutliche vertikale Konzentrationsgradienten auf. An Hand der DOC-Einträge ins Gewässernetz konnte daher auf verschiedene Abflussprozesse zurückgeschlossen werden.

Für dessen Transport hoher DOC-Frachten ins Gewässer waren schnelle laterale Abflusskomponenten verantwortlich, die zu Konzentrationen von bis zu 80 mg im Bach führten. Unter Einbeziehung meteorologischer, geomorphologischer, pedologischer und hydrologischer Daten ließen sich die flachen Kuppenlagen als maßgebliche DOC-Quellen und Flächen der Entstehung schneller Abflusskomponenten identifizieren. Sie kamen durch Bildung von Interflow im Oberboden und im Extremfall über Oberflächenabfluss in den Bach zustande. An Hand von Bodenmessprofilen konnte die Entstehung lateraler Wasser- und DOC-Transporte auch an den Hangflächen des Untersuchungsgebietes nachgewiesen werden. Die Höhe des DOC-Exportes und die Abflusswirksamkeit oberflächennaher Wasserflüsse war abhängig vom Gewässeranschluss. Durch ein enges künstliches Dränagenetz und die Nähe zum Hauptgewässer reagierte das Kopfeinzugsgebiet des Dürreychbaches am schnellsten auf Niederschläge. Erst bei

ausreichender Vorfeuchte und intensiven Niederschlägen wurden die Hangflächen durch eine Ausdehnung des Gewässernetzes und lateraler Abflusskomponenten abflusswirksam.

Die beobachteten dominierenden Abfluss- und DOC-Exportprozesse ließen sich durch ein einfaches dynamisches Modell abbilden, das als konzeptionelle Grundlage zur Beschreibung dominierender Abflussprozesse in Abhängigkeit des Gebietszustandes durch Ermittlung der DOC-Konzentration genutzt werden kann.

Vorbemerkung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des Dürreprojektes, das von einer Arbeitsgruppe aus Kollegiaten des interdisziplinären DFG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“ unter Beteiligung von Dr.-Ing. Jochen Aberle (Promotion im Jahre 2000, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe), Dr.-Ing. Markus Casper (Promotion im Jahre 2002, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe) Dr. rer. nat. Guido Waldenmeyer (Institut für Geographie, Universität Karlsruhe, Promotion im Jahre 2002), Andrea Zielke (LUFA Augustenburg) und dem Autor durchgeführt wurde. Die Fragestellungen des Untersuchungsvorhabens erforderten eine fächerübergreifende Betrachtungsweise z.B. unter Einbeziehung von Geologie, Geomorphologie, Bodenkunde, Botanik, Hydrologie, Hydraulik, Geochemie und Biogeochemie. Das machte übereinstimmende Begriffsdefinitionen erforderlich, die im Anhang tabellarisch aufgeführt sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	2
1.2	DOC in Boden- und Oberflächenwasser	9
2	Untersuchungsgebiet	13
3	Material und Methoden	16
3.1	Probengewinnung	16
3.1.1	Bodenproben	16
3.1.2	Wasserproben	16
3.2	Analytik	17
3.2.1	DOC	17
3.2.2	Organischer Bodenkohlenstoff	17
3.2.3	SAK	17
3.2.4	Fluoreszenz	18
3.3	Laborversuche	19
3.3.1	Bodenatmung	20
3.3.2	Perkulationsversuche	21
3.4	Geländemessungen	22
3.4.1	Das Geländemessnetz	22
3.4.2	Bodenmessprofile	25
3.5	Sonstige Berechnungen	26
3.5.1	Berechnung der DOC-Frachten längerer Zeitreihen	26

Inhaltsverzeichnis

3.5.2	Berechnung der DOC-Frachten einzelner Ereignisse	26
3.5.3	Abflussbeiwert	27
3.5.4	Ganglinienseparation	28
4	Ergebnisse	29
4.1	Bodenatmung	29
4.2	Perkulationsversuche	29
4.3	Überblick über die Zeitreihen von DOC-Konzentration und Abfluss an den permanenten Messstationen	32
4.3.1	Die Bodenprofile	32
4.3.2	Gesamtgebiet DÜ	35
4.3.3	Teileinzugsgebiete SH und LE	36
4.3.4	Die Stillwasserquelle	38
4.4	DOC-Dynamik und Abflussgeschehen einzelner Niederschlag-Abfluss-Ereignisse	39
4.4.1	Abhängigkeit des DOC vom Abfluss	40
4.4.2	Das Teileinzugsgebiet Lerchenstein (LE)	43
4.4.3	Das Teileinzugsgebiet Stillwasserhütte (SH)	50
4.4.4	Das Teileinzugsgebiet DÜ-SH	50
4.5	DOC-Bilanzen des Dürreychgebiets und der einzelnen Teileinzugsgebiete	73
4.6	Räumliche Verteilung des DOC-Exportes bei Basisabfluss	74
4.7	Räumliche Verteilung des DOC-Exportes bei Niederschlagsereignissen	76
4.8	Gebietsreaktionen auf unterschiedliche Niederschlagsereignisse	79

Inhaltsverzeichnis

4.9	Trennung von Abflusskomponenten mittels DOC	83
5	Diskussion	87
5.1	Die Plot-Skale	87
5.2	Die Hang-Skale	91
5.3	Die Teileinzugsgebiets-Skale	95
5.4	Das Gesamtgebiet	96
5.5	DOC als Tracer	97
6	Dynamisches Prozesskonzept	99
7	Ausblick	107
8	Literatur	110
	Anhang	

Abb. 1: Konzept des Dürreychprojektes.	3
Abb. 2: Abflüsse im Dürreychbach mit an der Färbung erkennbaren Unterschieden der DOC-Konzentrationen: an der Stillwasserhütte (SH), an der Stillwasserquelle (SQ), am Ausflusspegel DÜ).	7
Abb. 3: Topographische Karte des Dürreychbachtals mit allen permanenten Messpunkten.	13
Abb. 4: Geologie im Bereich des Dürreychbachtals.	15
Abb. 5: Versuchsaufbau zur Perkolation von Bodenproben.	21
Abb. 6: Untergliederung des Untersuchungsgebietes in die geschachtelten Wassereinzugsgebiete LE, SH und DÜ (die Teileinzugsgebiete SE und HI wurden in CASPER 2002 gesondert betrachtet).	23
Abb. 7: Horizontierung und Instrumentierung der Messprofile.	25
Abb. 8: Konzeptionelle Darstellung der Abtrennung des Basisabflusses und Extrapolation der auslaufenden Äste von sich überlappenden Hydrographen.	27
Abb. 9: Verlauf der DOC-Konzentrationen bei Perkolation von Bodenproben der organischen Auflage von Profil 1 bei 13 C, 5 parallele Ansätze.	31
Abb. 10: Verlauf der DOC-Konzentrationen bei der Perkolation von Bodenproben der organischen Auflage des Hanges von Profil 1 bei wechselnden Temperaturen.	31
Abb. 11: Messprofile 1 und 2 mit ihrer Lage an den Hangtransekten.	32
Abb. 12: Zeitlicher Verlauf der DOC-Konzentrationen im Bodenwasser in einem Bändchenstaupodsol (Profil 1).	33
Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der DOC-Konzentrationen im Bodenwasser in einem schwach podsoligen Kolluvisol (Profil 2).	34

- Abb. 14: Tiefenprofile der mittleren DOC-Konzentration im Bodenwasser (a), der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden (b) und der Verhältnisse von DOC und Bodenkohlenstoff (c), mit Standardabweichungen. _____ 35
- Abb. 15: Abfluss und DOC-Konzentrationen am Hauptpegel DÜ von Oktober 1997 bis November 1999. _____ 36
- Abb. 16: Abfluss und DOC-Konzentrationen am Pegel Stillwasserhütte (SH) von November 1997 bis November 1999. _____ 37
- Abb. 17: Abfluss und DOC-Konzentrationen am Pegel LE von Dezember 1997 bis November 1999. _____ 38
- Abb. 18: Abfluss- und DOC-Dynamik der Stillwasserquelle. _____ 39
- Abb. 19: Beziehungen von Abfluss Q und DOC-Konzentration an den drei Pegeln DÜ, SH und LE. _____ 42
- Abb. 20: Autokorrelationen von Zeitreihen der Bodentemperatur-Tagesmittelwerte und der Mittelungszeiträume mit Zeitreihen der DOC-Konzentration. _____ 44
- Abb. 21: Güte der linearen und exponentiellen Regressionen bei zunehmendem Mittelungszeitraum (links), die optimalen linearen und exponentiellen Regressionen (rechts). _____ 45
- Abb. 22: Gemessene DOC-Konzentrationen am (C_{DOC}) Pegel LE und modellierter DOC-Verlauf, wobei t_m die über vier Tage gemittelte Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (gemessen an FF) darstellt. _____ 46
- Abb. 23: Anstieg der Bodenfeuchte nach einem Niederschlag an der Wetterstation Freifläche (FF) in den Bodentiefen 10, 20, 30 und 50 cm. _____ 47
- Abb. 24: Reaktion der Hochflächen auf Niederschläge bei unterschiedlichen Vorfeuchten. ____ 49

- Abb. 25: Schematische Darstellung der dominierenden Abflussprozesse im Teileinzugsgebiet SH: (i) Anstieg des Wasserstandes bei Wassersättigung, (ii) lateraler Zufluss im Boden (Interflow), (iii) Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss (saturation excess flow), (iv) return-flow, (v) lateraler Abfluss (Intrflow) aus dem O-Horizont, (vi) lateraler Abfluss (Intrflow) aus dem Ah-Horizont, (vii) lateraler Abfluss (Intrflow) aus dem B-Horizont, (viii) Grundwasserneubildung, (ix) Abfluss von Wegen, (x) Gewässerabfluss. _____ 49
- Abb. 26: Bodenfeuchte-Messungen mit TDR-Sonden am Profil 1. _____ 53
- Abb. 27: Korrelation von DOC-Konzentration (Saugkerzen S7, S8, S9) und Bodentemperatur in 7 cm Tiefe mit einer Zeitachsenverschiebung von 3 Tagen. _____ 55
- Abb. 28: Aus den Temperaturkorrelationen berechnete Erwartungswerte der DOC-Konzentrationen in der organischen Auflage während einer Wiederbefeuchtung nach starker Austrocknung. _____ 56
- Abb. 29: Die optimalen Korrelationen von DOC-Konzentration in 13 bis 28 cm Tiefe (Saugkerzen S4-S6) und Bodentemperatur in 7 cm Tiefe: Zeitachsenverschiebung von 13 bis 46 Tagen. _____ 57
- Abb. 30: Die optimalen Korrelationen von DOC-Konzentration in 53 bis 78 cm Tiefe (Saugkerzen S1-S3) und Bodentemperatur in 7 cm Tiefe: Zeitachsenverschiebung von 80 Tagen. _____ 57
- Abb. 31: Bodenfeuchtedynamik am Profil 1 in den Tiefen 7, 23 und 73 cm. Die Bodenfeuchte ist als Wasserspannung dargestellt und wurde mit Tensiometern erfasst. _____ 58
- Abb. 32: Tiefenausbreitung von Bodenwasser am Profil 2 nach Niederschlagsereignissen bei (a) trockenen und (b) feuchten Vorbedingungen. _____ 60
- Abb. 33: Korrelation von DOC-Konzentration und Bodentemperatur am Profil 2. _____ 61

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 34: Gebietszustand am 23.3.2001. Die Abflusskurve bezieht sich auf den Pegel DÜ, Niederschlagsintensitäten auf FF. _____ 64
- Abb. 35: Probennahmestellen am Hang Stillwasser (links) und Häuserwald (rechts) am 23.3.2001 mit ihren Hangprofilen. _____ 65
- Abb. 36: Auftragung von DOC-Konzentration gegen die Geländehöhe _____ 66
- Abb. 37: Auf 357 nm normierte synchrone Fluoreszenzspektren der Wasserproben von Häuserwald und Stillwasser, mit $\Delta\lambda = 60$ nm. _____ 67
- Abb. 38: Zerlegung des Fluoreszenzspektrums der Probe P19 in vier Komponenten mit einer Anpassung zwischen 300 und 470 nm. _____ 68
- Abb. 39: Variabilität der Spektralkomponenten der Wasserproben von Hang Stillwasser (links) und Häuserwald (rechts). _____ 70
- Abb. 40: Abgrenzung von lateralen Abflüssen am Hang Stillwasser an Hand von Verschiebungen der Spektralkomponente D. _____ 71
- Abb. 41: Gradienten der Spektralkomponenten A und D (links) entlang von oberflächigen und oberflächennahen Fließwegen (rechts). _____ 72
- Abb. 42: DOC-Konzentrationen und -Frachten im Längsverlauf des Dürreychbaches bei Trockenwetterabfluss. _____ 75
- Abb. 43: DOC-Frachten bei Trockenwetterabfluss von kleinen Teileinzugsgebieten (definiert durch die Messpunkte 1 bis 7 im Gewässer). _____ 76
- Abb. 44: Bilanzierung des DOC-Exportes der Ereignisse D, E und G aus den drei geschachtelten Einzugsgebieten LE, SH und DÜ bei unterschiedlichen Vorfeuchten (von links nach rechts steigend) und unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen. (Der Maßstab der y-Achse ist für Abfluss und DOC-Konzentration bei Ereignis G verschoben!) _____ 78

Abb. 45: Konvergenz der Einzugsgebietsreaktionen bei zunehmendem Abflussbeiwert am Beispiel der mittleren massengewichteten DOC-Konzentrationen.	80
Abb. 46: Auftragung der mittleren massegewichteten DOC-Konzentrationen einzelner Niederschlag-Abflussereignisse von LE mit gemessenen und Temperaturkorrigierten Werten.	82
Abb. 47: Ganglinienseparation eines Hydrographen des Pegels DÜ mittels DOC-Bilanzierung mit einem Regen mit geringer Gebietsfeuchte.	85
Abb. 48: Trennung von Abflusskomponenten aus den Abfluss- und DOC-Ganglinien der Pegel LE, SH und DÜ bei einem Gewitter mit geringer Gebietsvorfeuchte.	86
Abb. 49: Diskontinuität der temperaturabhängigen DOC-Mobilität im Boden am Profil 1.	91
Abb. 50: Humusformen nach der Forstlichen Standortskarte am Hang Stillwasser (rechts) und am Häuserwald (links).	94
Abb. 51: Ökologische Feuchte nach der Forstlichen Standortskarte am Hang Stillwasser (rechts) und am Häuserwald (links).	94
Abb. 52: Verteilungsfunktion der abflussaktiven Flächen in Abhängigkeit von der Gebietsfeuchte.	102
Abb. 53: Relativer Abfluss durch Interflow an LE bei steigendem Feuchtegrad.	103
Abb. 54: Oberflächenabfluss an LE bei steigendem Feuchtegrad.	104
Abb. 55: Wegeabfluss in Abhängigkeit des Feuchtegrades.	105
Abb. 56: Schematische Darstellung des relativen Abflusses der Abflusskomponenten Q_s , Q_{ex} und Q_w in LE in Abhängigkeit des Feuchtegrades und Zuordnung einer mittleren DOC-Konzentration zu den Abflusskomponenten.	106

Abb. 57: Modellbildung für die Gebietsreaktion bezüglich der DOC-Konzentration in Abhängigkeit des Feuchtegrads unter Anpassung der Parameter a , μ und σ berechnete DOC-Konzentration aus der Abfluss-Summenkurve g der Abflusskomponente. _____ 107

1 Einführung

Unter vielerlei Aspekten wasserwirtschaftlicher Fragestellungen werden detaillierte Kenntnisse über Wasser- und Stofftransporte in Wassereinzugsgebieten benötigt, z.B. als Arbeitsgrundlage für gewässerbauliche Planungen, Hochwasserschutz oder Hochwasservorhersage. Üblicherweise kommen dafür stochastische Modelle zum Einsatz. Diese reichen jedoch nicht immer für eine zuverlässige Prognose aus, da sie meist wenig Prozessbezug besitzen. Daher ist die Kenntnis über Abfluss generierende Prozesse eine Grundvoraussetzung, um Niederschlag-Abfluss-Modelle zu testen oder zu verbessern. Darüber hinaus machen eine erwartete Klimaänderung sowie Änderungen in der Landnutzung Modelle notwendig, die uns in die Lage versetzen, die daraus resultierenden Änderungen der Abflussdynamik und der Wasserqualität vorhersagen zu können. Solche Modelle müssen dann aber physikalisch basiert und parametrisiert sein, so dass die gewonnenen Informationen auf andere, ähnlich strukturierte Gebiete übertragen (Regionalisierung, KLEEGERG et al., 1999) oder veränderte Rahmenbedingungen berücksichtigt werden können (BONELL, 1998; BUTTLE 1994; MEHLHORN et al. 1998). Um das erforderliche Prozessverständnis zu erlangen, ist Forschung an geeigneten Untersuchungsgebieten gefordert. Bisher haben sich schon einige Studien mit kleineren und mittleren Wassereinzugsgebieten im Bereich der Zuflüsse des Oberrheins befasst, die Gebiete unterschiedlicher Reliefeigenschaften und mit verschiedenem geologischem Untergrund abdecken: Das „Weiherbachprojekt“ (z.B. PLATE 1995, ACKERMANN 1998) hatte Wasser- und Stofftransportprozesse im Lössgebiet des Kraichgaus zum Gegenstand. Untersuchungen an der Brugga und im Conventwald (z.B. MEHLHORN et al. 1998, HOEG et al. 2000, HANGEN et al. 2001) beschäftigten sich mit hydrologischen Prozessen im Gneis und Granit des Hochschwarzwaldes. Es blieb jedoch eine wissenschaftliche Lücke bezüglich Untersuchungen zu Abflussprozessen im Buntsandstein. Mit dem „Dürreychprojekt“ im Nordschwarzwald wurde nun versucht, die hydrologischen Studien über die wichtigsten geologischen Räume des Oberrheins zu vervollständigen. Zwar haben

schon Arbeiten von SEEGER (1990), EINSELE & HINDERER (1992) sowie MEESENBURG & MÜLLER (1992) hydrologische Prozesse im Seebachgebiet des Nordschwarzwaldes verfolgt, jedoch mit überwiegend geologischen Ansätzen und dem Fokus auf langsame Abflusskomponenten. Beim „Dürreychprojekt“ und in dieser Arbeit stand aber besonders die Untersuchung der Entstehung schneller Abflusskomponenten im Vordergrund des Interesses.

1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Innerhalb des DFG-Graduiertenkollegs „Ökologische Wasserwirtschaft“ wurde Anfang 1997 das „Dürreychprojekt“ ins Leben gerufen. Es hatte zum Ziel, an Hand des Dürreychbachtals mit einem gegliederten, prozessorientierten Niederschlag-Abfluss-Modell ein besseres Verständnis der raum-zeitlichen Verteilung von Abflussbildungsprozessen kleiner Wassereinzugsgebiete zu geben. Daten zum System-Input "Niederschlag", zum System-Output "Abfluss" und zu Systemeigenschaften wie Relief, Substrat, Vegetation und Vorneuchte wurden in einer Datenbank zentral gesammelt und an ein GIS-System angebunden. Sie lieferten die Arbeitsbasis für drei Teilprojekte (CASPER (2002), WALDENMEYER (2002) und die vorliegende Arbeit) zur Identifikation der maßgeblichen Prozesse für die Umformung von Niederschlag in Abfluss (Abb. 1). Dabei stand sowohl die Beschreibung der zeitlichen Dynamik einzelner Abflusskomponenten wie auch eine räumliche Prozessgliederung im Vordergrund. Die so gewonnene Kenntnis über das Realsystem konnten dann genutzt werden, um bestehende Niederschlags-Abfluss-Modelle auf ihre Fähigkeit zur Abbildung der dominierenden Prozesse hin zu testen.

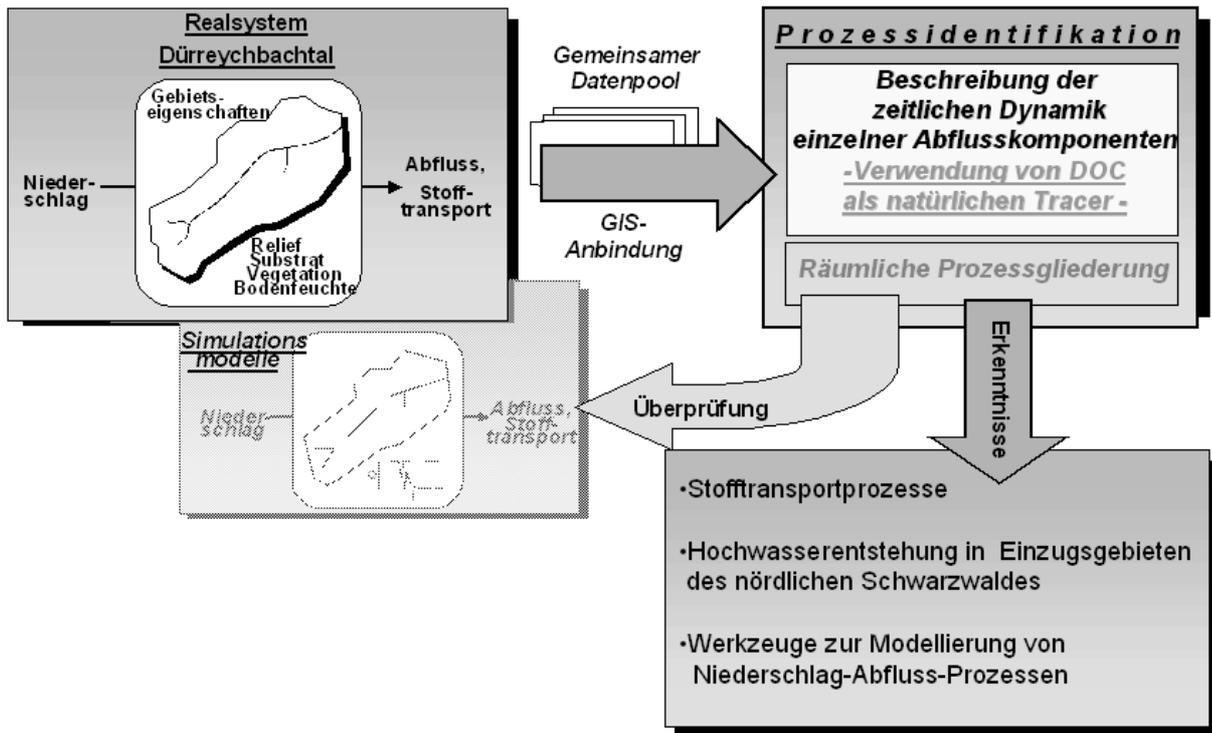


Abb. 1: Konzept des Dürreychprojektes.

Misst man den Abfluss am Gebietsauslass, so besteht die Abflussganglinie aus der Überlagerung verschiedener Teilprozesse (Oberflächenabfluss, Deckschichten-/Zwischenabfluss, verschiedene Grundwasserabflusskomponenten). Durch sinnvolle Ausgliederung von Teilräumen lassen sich diese Prozesse weitgehend voneinander separieren. Für alle Teilräume wurde versucht, eine enge Korrelation zwischen den verfügbaren Informationen über Topographie, Vegetation, Boden, Geologie, Biogeochemie und den jeweils dominierenden hydrologischen Prozessen zu finden.

Die Erfassung des Abflussgeschehens eines kleinen Einzugsgebietes, wie im Dürreychprojekt angestrebt, macht es auch notwendig, Fließwege des Wassers durch den Boden in das Gewässer zu verfolgen. Dabei können gelöste Wasserinhaltsstoffe wertvolle Information liefern (HOOPER et al 1990; BISHOP 1991; BISHOP et al. 1994; MCDOWELL & WOOD 1984, MCDOWELL & LIKENS 1988; CHRISTOPHERSEN et al. 1990). Viele Wasserinhaltsstoffe sind im Dürreychbachtal für die Nutzung als natürliche Tracer problematisch.

- Si ist ein Tracer zur Indikation der Kontaktzeit des Wassers mit silikatischem Ausgangsgestein und wird zur Unterscheidung von Boden- und Grundwasser verwendet, die Interpretierbarkeit so gewonnener Daten jedoch kontrovers diskutiert, da die Dynamik der Bildung des Lösungsgleichgewichts unklar ist (UHLENBROOK 1999). Zudem findet sich im Dürreychgebiet auf Grund der dortigen Bodenbildungsprozesse kein deutlicher Kontrast zwischen Grundwasser und oberflächennahem Wasser: durch geringe Tongehalte und starke Tonauswaschung aus dem Oberboden haben die skelettreichen und sandigen Böden einen ähnlich hohen Quarzanteil wie der darunter liegende Buntsandstein. Daher ist Si hier kein geeigneter Tracer.
- Na wird überwiegend atmosphärisch oder über Straßensalzung eingetragen. Konzentrationskontraste im Dürreychgebiet sind aber zu gering für eine Nutzung als Tracer von Ereigniswasser.
- Al gilt bei niedrigen Boden-pH-Werten, die dessen Mobilisierung ermöglichen, als Indikator für den Anteil an Bodenwasser im Abfluss, ist jedoch ein sehr reaktives Element, das bei Erhöhungen des pH-Wertes schnell wieder immobilisiert wird oder Reaktionen mit anderen Wasserinhaltsstoffen eingehen kann.
- Ca und Mg können als Indikatoren für Bodenwasser genutzt werden. Zwar sind im Dürreychgebiet Ca und Mg in geringen Konzentrationen im Grundgestein zu erwarten, großflächige Kalkungen des Waldbodens seitens der Forstwirtschaft vermögen mögliche Grundwassersignale jedoch zu überdecken.

Als weiterer Wasserinhaltsstoff zur Untersuchung von Abflusswegen im Nordschwarzwald bietet sich die Nutzung von Informationen durch gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (=„dissolved organic carbon“, DOC) an. Natürliche organische Kohlenstoffverbindungen spielen im Verständnis von Ökosystemen eine zentrale Rolle, da sie auf energetischer Ebene die

Vernetzung von Organismen und ihrer Umgebung charakterisieren. Der Boden spielt dabei als Ort der Speicherung, Umsetzung und des Exportes eine bedeutende Rolle (EASTHOUSE ET AL. 1992). Kohlenstoffflüsse mit Wasser als Transportmedium bilden daher einen wichtigen Aspekt bei der hydrologischen Betrachtung von Wassereinzugsgebieten. Dennoch waren Arbeiten zur Nutzung von DOC als natürlichen Tracer dem Verfasser der vorliegenden Arbeit bis dato nicht bekannt.

Durch geologische, klimatische und vegetationsbedingte Einflüsse weist der Dürreychbach eine sehr hohe Dynamik der Konzentrationen von DOC auf. Basenarmer Buntsandstein als hauptsächlich Ausgangsgestein der Bodenbildung im Nordschwarzwald verwittert zu sandigen, mineralstoffarmen Böden. Die sich darauf entwickelnde Vegetation bildet eine nährstoffarme Streu, die unter den niedrigen Durchschnittstemperaturen der montanen Lagen nur langsam mineralisiert werden kann. Dadurch reichert sich organischer Kohlenstoff im Boden an und bildet stellenweise mächtige Humusaufgaben. Bei hohen Niederschlagssummen (bis zu 1800 mm a^{-1}) verlagern sich im gut perkolierbaren Boden leicht lösliche Komponenten besonders gut oder werden vom Wasser ausgetragen. Durch diese Prozesse haben sich typischerweise podsolige oder moorige Böden ausgeprägt (REHFUESS 1990). Je nach Fließweg des Wassers können die ausgewaschenen Stoffe ins Gewässer gelangen. Besonders auffallend sind dabei im Dürreychbach die tief gelbbraun färbenden Huminstoffkomponenten, die in diesem Gewässer besonders bei Starkregen-Ereignissen festzustellen sind (Abb. 2). Durch das periodische Auftreten dieser bräunlich färbenden Komponenten tritt DOC im Dürreychbachtal in großen Konzentrationsspannen auf. Gewinnt man Erkenntnisse über ihre Mobilisierung sowie die räumliche und zeitliche Verteilung ihres Eintrags in Gewässer, können daraus hydrologische Aussagen abgeleitet werden. In dieser Arbeit wurden Untersuchungen zu Charakteristika des Kohlenstoffexportes aus dem Boden sowie deren räumlicher und zeitlicher Konzentrationsdynamik im Dürreychbach durchgeführt, um

- festzustellen, inwieweit sich DOC als Tracer zur Erfassung schneller Abflusskomponenten eignet,
- die Möglichkeiten zur Nutzung von DOC als natürlichem Tracer aufzuzeigen. Dazu musste eine Erfassung der Herkunft des DOC sowie eine Charakterisierung der DOC-Mobilität vorgenommen werden,
- Erkenntnisse über DOC- und Wasserflüsse im Boden zu gewinnen,
- das hydrologische Bild des Dürreychbachtals durch eine Beschreibung von dominierenden Abflusskomponenten mittels gelöstem organischem Kohlenstoff als natürlichem Tracer zu komplettieren,
- Ganglinienseparationen flächenhaft und vertikal verteilter Abflusskomponenten durchzuführen.

Anschließend sollten Modelle erstellt werden, die es ermöglichen, Wege des Abflusses an unterschiedlichen Flächen des Dürreychgebietes bei unterschiedlichen Niederschlägen und unterschiedlichen Systemzuständen vor Einsetzen des Niederschlages zu erkennen.



Abb. 2: Abflüsse im Dürreychbach mit an der Färbung erkennbaren Unterschieden der DOC-Konzentrationen: an der Stillwasserhütte (SH), an der Stillwasserquelle (SQ), am Ausflusspegel DÜ).

Da sich hydrometrische und hydrochemische Daten in ihrer Information über Abflussprozesse komplementieren (BONELL 1998), wurde einerseits im Rahmen des Dürreychprojektes ein umfangreicher Datensatz von Geländemessungen erhoben, um eine weite Spanne von Niederschlagsereignissen und Gebietszuständen zu erfassen. Andererseits ließen sich in dieser Arbeit Transport und Export von DOC auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen und im Vergleich von verschiedenen Hängen betrachten. Auf diese Weise sollten hydrologische Erkenntnisse über unterschiedliche Abflussbildungsprozesse in den verschiedenen Raum- und Zeitskalen gewonnen werden. Voraussetzung hierfür war, Teilgebiete und einzelne Hänge, Transekte und Bodenprofile auszugliedern, um sie unter verschiedenen Gesichtspunkten zu untersuchen. Zusätzlich fand eine Gegenüberstellung von Prozessen der Hochflächen und der steileren Hangflächen des unteren Tales statt. Für eine Beschreibung der Kohlenstoffflüsse im Dürreych-Einzugsgebiet wurden aus dem Untersuchungsgebiet drei hierarchisch ineinander geschachtelte Teileinzugsgebiete (nested catchments) definiert. Der an deren Auslass erfasste Abfluss und die gemessenen DOC-Frachten ermöglichten eine Bilanzierung des DOC für einzelne Abflussereignisse und eine Zuordnung des Beitrages von Wasserflüssen und

Kohlenstoffexport zu den Abflussgebieten während des Messzeitraums. Geeignete Niederschlag-Abfluss-Ereignisse wurden analysiert, um die zeitliche Abfolge dominierender hydrologischer Prozesse zu beschreiben, den Beitrag des jeweiligen Teileinzugsgebietes zum Abfluss abzuschätzen und eine Abflussganglinienseparation nach Abflusskomponenten und Teileinzugsgebieten durchzuführen. Diese Abflussereignisse waren nach den jeweiligen hydrologischen Ausgangssituationen (Vorfeuchte, Dauer der vorausgegangenen Trockenheit, Höhe des Basisabflusses, Niederschlagsverteilung) zu ordnen, da diese zu unterschiedlichen Reaktionen von Abfluss und DOC-Export auf Niederschläge führen können. Es sollte analysiert werden, ob sich zu solchen allgemeinen Parametern der Beschreibung von Gebietszuständen auch dominierende Prozesse der Abflussbildung und des DOC-Exportes zuordnen lassen.

Um allgemeine Eigenschaften der Mobilisierbarkeit von DOC aus dem Boden abzuleiten, wurden Laborversuche mit Bodensäulen entwickelt. An Hand von Proben typischer Bodenprofile war ein möglicher Zusammenhang von Bodentemperatur und DOC-Mobilität zu prüfen. Im Untersuchungsgebiet wurden zwei Meßprofile angelegt, an denen sich die Laborergebnisse auf reale Bodenbedingungen übertragen en. Außerdem erlaubte dies in-situ Untersuchungen zur vertikalen Verteilung von Wasser und DOC-Transport im Boden. Laborversuche und Messkampagnen an Bodenprofilen stellen Erkenntnisse auf der Punkt-Skale zur Verfügung, die auf ein- oder mehrdimensionale Skalen transponiert werden mussten.

Mit einer Beprobung von Hangaustrittswasser an zwei Hangflächen war an Hand einer Charakterisierung der gelösten organischen Substanz zu eruieren, ob sich bei intensiven Niederschlagsereignissen hangparallele Abflüsse bis in den Bach verfolgen lassen. Ziel war es, eindimensionale Prozesse auf der Hang-Skale abzubilden. Ein Vergleich von DOC-Export- und dominierenden Standorteigenschaften sollte die flächenhafte Beschreibung unterschiedlicher DOC-Export- und Abflusseigenschaften unterstützen. Daran knüpfte eine Darstellung der

Abflusswirksamkeit von Abflusskomponenten der Hangflächen durch Ankoppelung an das Gewässernetz an.

1.2 DOC in Boden- und Oberflächenwasser

DOC tritt in vielen aquatischen Systemen wie z.B. in natürlichen Gewässern, in Abwässern oder Sickerwässern von Mülldeponien sowie in Trinkwasser auf. Die Konzentrationen können zwischen 0,1 und 80 mg C l⁻¹ liegen (MCDOWELL, W.H. & LIKENS, G.E 1988; SCOTT et al. 1998; WETZEL & CORNERS 1977). Die Bedeutung von DOC in aquatischen Systemen ist vielfältig. Sowohl in marinen Systemen wie auch in Seen und Fließgewässern spielt es eine entscheidende Rolle im Nahrungsnetz: Gelöste energiereiche Verbindungen sind die Nahrungsgrundlage der organo-chemotrophen Bakterien und werden über den „microbial loop“ wieder in das Nahrungsnetz zurückgeführt (AZAM et al. 1983; FISCHER, PUSCH & SCHWOERBEL 1996). Im Gegensatz zu den autochthon geprägten Seen, stammt der größte Teil des organischen Kohlenstoffs in Fließgewässern aus terrestrischer Primärproduktion. Besonders Bergbäche in der Größenordnung des Dürreychbaches sind allochtone Systeme (HYNES 1963, VANNOTE et al. 1980). Terrestrische organische Substanz, die dem Boden ständig nachgeliefert wird, kann dort über unterschiedliche Zwischenprodukte abgebaut, zum Teil mineralisiert oder auch zu größeren Molekülen polymerisiert werden. Durch Niederschläge gelangt DOC aus dem Boden in die Gewässer (MULHOLLAND et al. 1990). In Fließgewässern liegen die DOC-Gehalte zwischen von 0,1 bis 10 mg C l⁻¹ (THURMANN 1985), sie können aber auch bis zu 80 mg C l⁻¹ erreichen. Neben gelösten organischen Komponenten findet man in Gewässern auch partikuläre organische Substanz. Der Anteil des DOC am gesamten organischen Kohlenstoff in Bächen beträgt jedoch meistens über 90% (HYNES 1970).

DOC setzt sich aus einer vielfältigen Mischung unterschiedlicher organischer Säuren zusammen (PERDUE & GJESSING 1989). Der biologisch rasch abbaubare Anteil liegt in Fließgewässern

jedoch auf Grund sehr schneller Umsetzungen im Boden und im Bachsediment meist unter 10% des gesamten organischen Kohlenstoffs (FRIMMEL 1990). Ein Großteil des DOC im Gewässer besteht aus Huminstoffen. Es handelt sich dabei um gelbbraun gefärbte, gelöste organische Substanzen natürlichen Ursprungs, die aus biologischen Umsetzungen hervorgegangen sind (ALLARD et al. 1991) und sich mit einem Trennvorgang durch Adsorption an ein XAD-2 oder – XAD-8 Gel aus einer wässrigen Lösung extrahieren lassen (THURMANN 1981; MALCOM 1989). An ihrer Entstehung sind neben biotischen auch abiotische Faktoren beteiligt. Hauptsächlich werden sie im Boden beim Humifizierungsprozess gebildet und machen dort einen Bestandteil des Humus (=die Gesamtheit der abgestorbenen organischen Substanz, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989) aus.

Das Gemisch von Makromolekülen bei Huminstoffen hat einen Anteil von etwa 50 Gewichtsprozenten aus Kohlenstoff (FRIMMEL 1993). Eine Identifizierung von Einzelsubstanzen mit Summen- und Strukturformel ist wegen der riesigen Vielfalt der Moleküle nicht möglich. Jedoch lassen sich Huminstoffe an Hand ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften fraktionieren und charakterisieren. Üblicherweise werden sie in die säurelöslichen und kleineren Fulvinsäuren und die nicht säurelöslichen Huminsäuren unterteilt (MALCOM 1989, Aiken 1985). Elementaranalysen (ABBT-BRAUN et al. 1990), Spektroskopie (SENESI et al. 1991, ABBT-BRAUN & FRIMMEL 1991) und chromatographische Methoden (HUBER et al. 1990) stellen weitere Schritte der Analyse zuvor gewonnener und fraktionierter Huminstoffkomponenten dar. Darüber hinaus finden sich vielfältige Möglichkeiten zu deren Auftrennung und Charakterisierung z.B. bei ALLARD et al. (1991).

An Hand von $\Delta^{13}\text{C}$ und $\Delta^{14}\text{C}$ Analysen kann das Alter von Huminstoffen ermittelt werden (LICHTFOUSE et al. 1995; LEAVITT et al. 1996; DÖRR & MÜNICH 1986, 1980, 1989). Für Huminsäuren und Fulvinsäuren wird ein mittleres Alter von bis zu 3000 Jahren angegeben

(HEAD et al. 1989). Unter Zunahme des Anteils schwer abbaubarer Substanz können sie daher im Ökosystem akkumulieren.

Huminstoffe reagieren in der Umwelt sehr unterschiedlich. Neben dem biologischen Abbau unterliegen sie einer ständigen, wenn auch mitunter langsamen Transformation durch bio-, photo- und geochemische Prozesse, die zu einer Verringerung des C/N-Verhältnisses und einer Erhöhung des Anteils an hydrolysierbarem N einhergeht (HARGITAL 1994). Mit zunehmendem Alter steigt auch der Anteil an biologisch schwer abbaubarer Substanz. Durch die sowohl hydrophilen wie auch hydrophoben Eigenschaften können Huminstoffe einerseits stark auf die Mobilität von Metallen, Pestiziden, haloorganischen Lösungsmitteln u.s.w. einwirken, andererseits auch durch mineralische Komplexierung selbst an der Gewässersohle oder anderen Oberflächen immobilisiert werden (TIPPING 1986). Auch lässt sich das Verhalten von Huminstoffen in der Umwelt durch anthropogene Einwirkungen stark beeinflussen. Bei Eingriffen in Waldökosysteme wie Kahlschlag, Windbruch, Entwässerung oder Kalkung ist mit verstärktem Austrag von Huminstoffen zu rechnen (NAKANE & LEE 1995; BORMANN et al. 1969; BORMANN et al. 1974; LIKENS 1977, VELDKAMP 1994). Bei der Abwasserreinigung und Trinkwasseraufbereitung kann dies zu Problemen führen:

- Bei der Chlorung zur Entkeimung entstehen gesundheitsschädliche chlororganische Verbindungen (BECHER et al. 1985). Die Bildung von deren Vorstufen können durch UV-Bestrahlung induziert werden (FUJII et al. 1998).
- Ozonierung oder UV-Bestrahlung von Trinkwasser kann eine Wiederverkeimung begünstigen, indem Huminstoffe durch Aufoxidierung aufgebrochen und damit bioverfügbar werden (BRADFORD et al. 1994).

Diese biologisch schwer verfügbaren Komponenten dominieren besonders bei Gewässern mit moorigen Einzugsgebieten. Ihre hohe biologische Stabilität macht diese Stoffgruppe besonders interessant als Tracer für oberflächennahe Abflusskomponenten, die sich im Bach wiederfinden.

Für natürliche, gelöste organische Kohlenstoffverbindungen finden sich unterschiedliche Bezeichnungen mit teilweise identischen oder sich überschneidenden Definitionen. Im Gegensatz zu „Huminstoffen“ und „DOC“ sind andere häufig gebrauchte Begriffe nicht streng operationell definiert: „natural organic matter“ (NOM) bezieht sich auf feste und gelöste organische Bestandteile ohne die feste Bezugsgröße Kohlenstoff. Unter „refractory organic substances“ versteht man Stoffe, deren Umwandlungs- oder Abbaugeschwindigkeit im Ökosystem relativ gering ist und die daher eine große Verweil- oder Lebensdauer besitzen (FISCHER 1993). Die biologische Abbaubarkeit hängt jedoch von vielen Umgebungsparametern ab, so dass wir es hier mit veränderlichen Größen zu tun haben. In dieser Arbeit bezieht sich daher die Bezeichnung DOC auf die Fraktion des gesamten organisch gebundenen Kohlenstoffs, die als Filtrat nach einer Passage durch einen Membranfilter der Porengröße 0,45 µm (EN 1484, 1997; EATON *et al.* 1995) erhalten wird. Diese Definition umfasst auch die Fraktion der Huminstoffe.

2 Untersuchungsgebiet

Das Wassereinzugsgebiet des Dürreychbachtals ist ein 700 ha großes Tal im Nordschwarzwald und liegt zwischen Gernsbach und Bad Wildbad im Forstbezirk Kaltenbronn (Abb. 3).

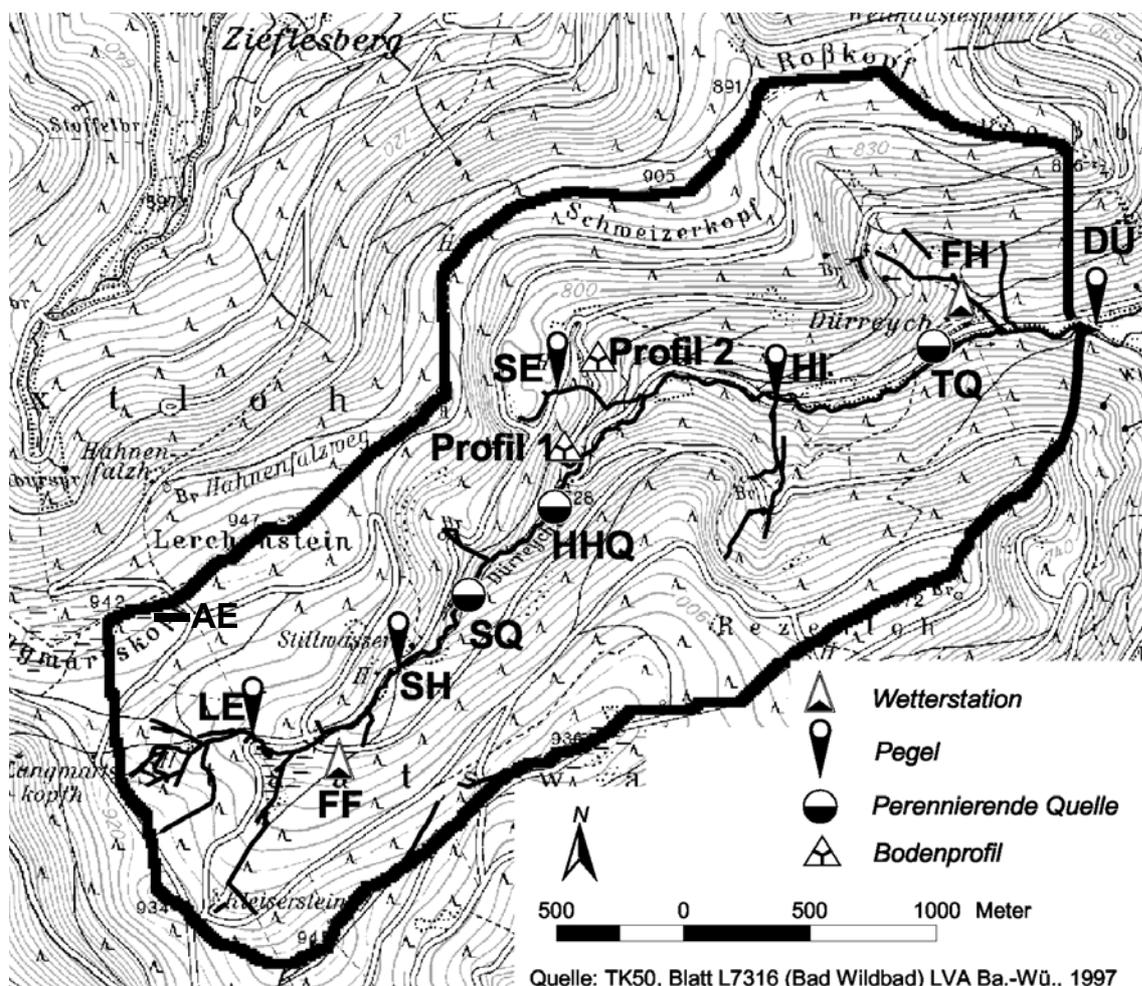


Abb. 3: Topographische Karte des Dürreychbachtals mit allen permanenten Messpunkten.

Großräumig gesehen, gehört der Dürreychbach zum Einzugsgebiet des Neckars, in den das abfließende Wasser über Eyach und Enz mündet. Die Grenze des Untersuchungsgebietes markiert das oberflächliche Wassereinzugsgebiet des Dürreychbaches, das durch den Ausflusspegel am Talanfang definiert ist. Der nördliche Bergkamm des Dürreychbachtals bildet gleichzeitig die Wasserscheide zum Rhein, den das Wasser, das unmittelbar unterhalb des

Langmartskopfes entspringt, über die Alb erreicht. Der Untere und Mittlere Buntsandstein prägt geologisch das Untersuchungsgebiet hauptsächlich (Abb. 4). Es erstreckt sich über Geländehöhen von 600 m NN am Dürreychpegel bis 947 m NN am Lerchenstein. Dazwischen liegt ein V-förmig eingeschnittenes Tal, dessen Seiten von breiteren Höhenrücken flankiert werden, die eine typische „Sargdeckelform“ aufweisen. Obwohl es sich nach Nordosten hin öffnet und sich somit auf der Regenschattenseite des westlichen Schwarzwaldanstieges befindet, beträgt der mittlere Jahresniederschlag 1530 mm a^{-1} bei einer mittleren Jahrestemperatur von $6\text{--}7^\circ\text{C}$. Auf Grund der Höhenabhängigkeit von Niederschlag und Temperatur können innerhalb des Untersuchungsgebietes Unterschiede von ca. 5% dieser Jahresmittelwerte auftreten. Das sehr basenarme Gestein ist Ausgangsmaterial für die nährstoffarmen Bodenbildungen auf zum Teil sehr mächtigen Schuttdecken. Auf dem meist sandigen, skelettreichen Substrat der Hangflächen dominieren Podsole mit häufig hydromorphen Merkmalen. Durch frühere Landnutzung in Form von Beweidung und Abholzung für Köhlerei und Pottaschegewinnung sind die Böden weiter verarmt und versauert (FETZER 1979). Heute ist das Gebiet überwiegend mit Fichtenwald bestanden. Im flachen Kuppenbereich finden sich Moorböden, die sogenannten „Missen“, deren Bildung durch hohe Niederschläge, niedrige Temperaturen, geringe Hangneigung, wasserstauende Bodenbildung und nährstoffarme Böden bedingt ist. Durch Entwässerung sind die Torfhorizonte zum Teil stark zersetzt. Auch in ehemaligen Karen entstanden Moore, aber Entwässerung führte dort ebenfalls zu starker Zersetzung. Neben wenigen kleinen Wiesen weist eine verebnete Höhenlage einen durch Windbruch verursachten waldfreien Standort von ca. 20 ha auf. Der Dürreychbach wird von einigen kleinen Nebenbächen mit periodischem Abfluss, 2 größeren und verschiedenen kleineren, z.T. ebenfalls nur periodisch schüttenden Quellen gespeist.

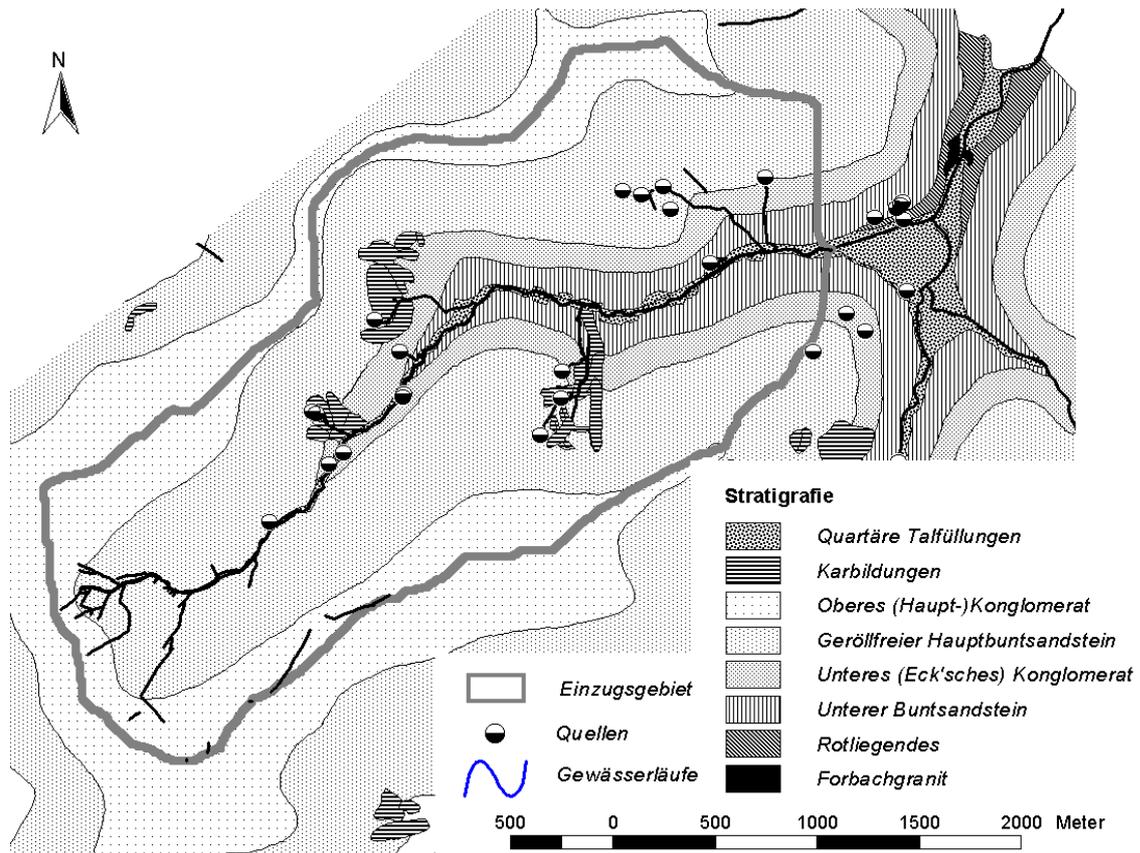


Abb. 4: Geologie im Bereich des Dürreychbachtals.

3 Material und Methoden

3.1 Probengewinnung

3.1.1 Bodenproben

Um die Mobilisierung von löslichem organischem Kohlenstoff zu untersuchen, wurden am Profil 1 (Abb. 3) Bodenproben für Laborversuche entnommen. Die Probenentnahme geschah mit Hilfe von Stechzylindern (Durchmesser 7 cm, 100 ml Volumen), die mit einem Hammer in den Boden geschlagen und vorsichtig abgehoben wurden. Um für alle Bodensäulen einen gleichen Ausgangszustand herzustellen, mussten die Proben im Labor mit destilliertem Wasser bis zur Feldkapazität angefeuchtet und bis zur Verwendung bei -28°C gelagert werden.

3.1.2 Wasserproben

Die Wasserentnahme aus dem Bach bewerkstelligten in 48 h- bis 3 h-Abständen in Abhängigkeit der Abflusshöhe programmierbare Probennehmer mit einer Kapazität von 24 Wasserproben a 1 l (ISCO, USA). An der Stillwasserquelle (SQ), der Hirschklunge (HI) und den Karen (bei Abfluss) wurden Proben im wöchentlichen Rhythmus manuell gezogen. An vier zusätzlichen Messstellen im Längsverlauf des Gewässers erfolgten spezielle Messkampagnen. Wöchentlich wurde Bodenwasser an den Messprofilen Profil 1 und Profil 2 (Abb. 3, Abb. 7) mittels PE/Nylon-Saugkerzen durch Anlegen eines Unterdruckes gewonnen. Für eine minimale Störung des Bodengefüges und der Wasserflüsse waren die Saugkerzen (wie auch die anderen Messgeräte) von einem Bodenanschnitt an der hangabwärts liegenden Seite des Bodenprofils aus horizontal in den Boden eingeführt und zum besseren Anschluss an die Bodenmatrix mit Quarzmehl eingeschlemmt (DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 1990).

3.2 Analytik

3.2.1 DOC

Die DOC-Konzentrationen in wässrigen Proben aus Bach-, Boden- und Bodenextraktwasser ließen sich nach DEV mittels IR-Detektion von CO₂ nach Verbrennung bei 950°C unter synthetischer Luft mit einem HighTOC Analysengerät (Elementar, Hanau) mit einer Genauigkeit von ± 2% bestimmen. Ein Messwert stellte immer den Mittelwert einer Dreifachanalyse dar.

3.2.2 Organischer Bodenkohlenstoff

Die Daten zum Gehalt von organischem Kohlenstoff im Boden stammten aus gemäß DEV über Verbrennung und anschließender IR-Detektion von CO₂ ermittelten Analysen der LUFA Augustenburg.

3.2.3 SAK

Der spektrale Absorptionskoeffizient (SAK) ist eine Konstante für jede Substanz (Lambert-Beer'sches Gesetz). Da es sich bei NOM um ein Gemisch aus Produkten vielfältiger Umsetzungsprozesse organischer Substanz handelt, konnte eine Variation des SAK bei DOC unterschiedlicher Quellen erwartet werden. Daher wurden nach FRIMMEL (1990) zur Charakterisierung von filtrierten wässrigen Proben die Absorption bei 254 und 436 nm gemessen (Spectronic 3000 ARRAY, Milton Roy) und der Quotient aus Absorption und DOC-Konzentration gebildet.

Da die spektralen Eigenschaften von Huminstoffen pH-abhängig sind, garantierte eine 1:1 Verdünnung der Proben mit 0,1 M Essigsäure-Ammoniumacetat-Puffer einen pH 6,26.

3.2.4 Fluoreszenz

Fluoreszenzspektroskopie ist ein empfindliches Verfahren zur Charakterisierung von NOM im Boden und in natürlichen Wässern (HABERER 1985, FRIMMEL 1990, SENESI et al. 1991, BLASER et al. 1999). Das Fluoreszenzsignal stammt hauptsächlich aus einfach- und hochkonjugierten oder aromatischen Komponenten, die in Huminstoffen besonders häufig vorkommen. Unterschiede in der Zusammensetzung aromatischer Komponenten und Komplexierung von Metallionen führen zu variierenden Fluoreszenzspektren. Diese können zu einer Unterscheidung verschiedener Quellen der natürlichen Kohlenstoffverbindungen herangezogen werden. Dabei besteht die Möglichkeit, erstens Fluoreszenzspektren bei feststehender Anregungsenergie, zweitens Emissionskurven bei einer Emissionswellenlänge und einem bestimmten Anregungsspektrum oder drittens synchrone Fluoreszenzspektren aufzunehmen. In dieser Arbeit wurden synchrone Fluoreszenzspektren (KUMKE et al. 1999) mit einem Kontron SFM 25 (Kontron Instruments) erstellt und bei der Anregungsenergie ein Spektralbereich von 250 bis 550 nm genutzt, so dass bei den zu untersuchenden Proben Emissionsspektren mit sehr charakteristischen Mustern gefunden werden konnten, die sich zur Differenzierung unterschiedlicher Zusammensetzungen des DOC bei den gesammelten Hangwasserproben eigneten. Die Differenz zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge $\Delta\lambda$ betrug 60 nm. Spektrale Linien lassen sich durch die Überlagerung einer endlichen Zahl von Gauß'schen Verteilungsfunktionen darstellen, wobei jede Funktion durch die Parameter Standardabweichung, Schwerpunkt (Erwartungswert) und einen die Höhe bestimmenden Faktor charakterisiert wird (Gl. 1). Jede Gauß-Kurve beschreibt dann eine operationell definierte Stoffkomponente.

$$f_n(x/a; \lambda; \sigma^2) = a \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\lambda_\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{Gl. 1})$$

a: Faktor

λ_μ : Wellenlänge des Kurvenschwerpunktes

σ : Standardabweichung

wobei *a* sich berechnet aus:

$$a = h \cdot \sigma\sqrt{2\pi} \quad (\text{Gl. 2})$$

h: Kurvenhöhe

Jedes Fluoreszenzspektrum charakterisiert die organische Zusammensetzung einer Wasserprobe. Zur besseren Darstellung der Unterschiede zwischen einzelnen Spektren wurde eine möglichst kleine Anzahl von Gauß'schen Verteilungskurven gesucht, die die Spektren gut abbilden können. Jede Gaußkurve sollte dabei eine theoretische Stoffkomponente der Wasserprobe definieren. Eine Anpassung der Funktionen erfolgte nach dem Prinzip der kleinsten quadratischen Abweichung für jedes Fluoreszenzspektrum unter Verwendung von Matlab (Release 11, Math Works, Inc.).

3.3 Laborversuche

Bei Podsolen, wie sie im Dürreychgebiet dominieren, sind die oberen Bodenhorizonte Quellen für mobilisierbaren organischen Kohlenstoff. In Laborversuchen sollte die Funktion von Bioaktivität und Temperatur auf die Freisetzung von DOC getestet werden. Dazu wurden natürlich gelagerte Bodenproben mit Wasser perkoliert, um die Freisetzung von DOC bei unterschiedlichen Temperaturen sowie unterschiedlicher Bodenatmung miteinander zu vergleichen.

3.3.1 Bodenatmung

Podsole sind sehr nährstoffarme Böden mit geringer Abbauleistung bezüglich organischer Substanz. Dennoch können aus ihnen erhebliche Mengen an DOC exportiert werden. Zur Gegenüberstellung von DOC-Freisetzung und Bioaktivität wurden Inkubationsversuche mit Bodenproben unter Anwendung einer einfachen Methode nach ROBERTZ et al. (1999) durchgeführt, die auf dem Prinzip der Messung der Druckdifferenz in geschlossenen Systemen basiert. Eine Messeinheit bestand aus einem geschlossenen Reaktionsgefäß mit weitem Hals zur Aufnahme der Probe ohne Zerstörung des Bodengefüges. Im Reaktionsgefäß befand sich ein Schälchen mit Natronkalk, der das aus der Respiration entstandene CO₂ fixierte. Da in gleichem Maße O₂ verbraucht wurde, entsprach die Druckabnahme im System der Respiration. Ein Manometer zeigte die Druckabnahme mittels Quecksilbersäule an. Ein Thermoschrank gewährleistete eine Temperaturkonstanz (20°C). Der Berechnung der Bodenatmung lag folgende Gleichung zu Grunde.

$$r = \frac{M(O_2)}{R \cdot T} \cdot \frac{V_{fr}}{m_{Bt}} \cdot \frac{\Delta p}{t} \quad (\text{Gl. 3})$$

r: Bodenatmung [mg O₂/(kg TS·h)]

M(O₂): Molmasse Sauerstoff: 3200 [g/mol]

V_{fr}: freies Gasvolumen[l]

R: allg. Gaskonstante: 83,144 [l mbar mol⁻¹ k⁻¹]

m_{Bt}: Masse Bodentrockensubstanz (TS) [kg]

Δp: Druckabnahme [mbar]

T: Temperatur [°K]

Δt: Zeitintervall (d)

Die Inkubationstemperatur betrug 20°C. Die Datenaufnahme erfolgte im linearen Bereich der Sauerstoffzehrung, in dem keine Limitierung von Substrat oder O₂ herrschte. Regressionsgeraden durch die Messungen lieferten über die Geradengleichung die Bodenatmung als O₂-Zehrungsrate.

3.3.2 Perkulationsversuche

Zur Untersuchung der Mobilität von DOC im Boden unter definierten Parametern diente ein nach HILDEBRAND (1986) modifizierter Versuchsaufbau zur Perkolation von natürlich gelagerten Bodenproben, mit dem sich unter kontrollierbaren Bedingungen wässrige Bodenextrakte gewinnen ließen (Abb. 5).

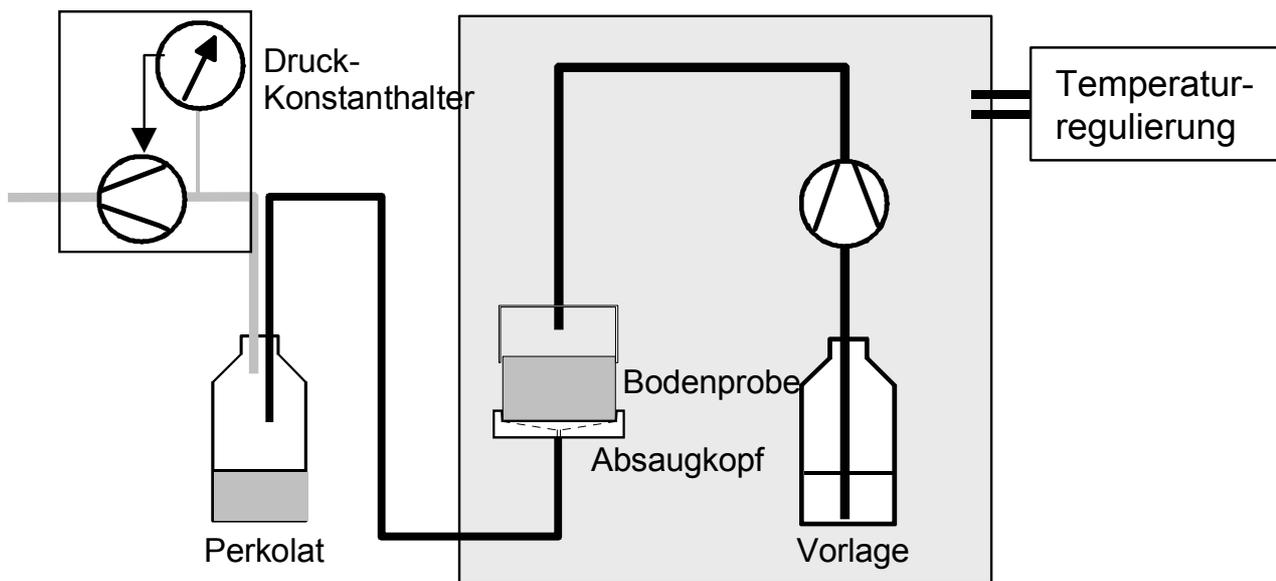


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Perkolation von Bodenproben.

Bodenproben, im Stechzylinder auf einen Absaugkopf gestellt, lag eine mittels Vakuumpumpe erzeugte Saugspannung von 0,4 Bar an. Dies entspricht in etwa der Saugspannung bei Feldkapazität. Das Anlegen einer konstanten Saugspannung hatte zum Ziel, einen gleichen Zustand der relativen Bodenfeuchte bei allen Proben zu gewährleisten. Das Auffüllen von

Hohlräumen an der Unterseite der Stechzylinderprobe zwischen Absaugkopf und Bodenprobe mit Quarzmehl und die Auflage eines Glasfaserfließes stellten ein hydraulisches Kontinuum über den ganzen Bodensäulenquerschnitt sicher. Eine Peristaltikpumpe tropfte destilliertes Wasser mit einer Flussrate von 4 ml/h von oben auf die Bodenproben auf. Anschließend ließ sich der DOC-Gehalt des in Sammelflaschen abgesaugten Wassers bestimmen. Kühlung und Heizung regelten die Perkolationstemperatur thermostatisch. Neun Parallelproben wurden auf diese Weise über einen Zeitraum von 7 Tagen bei unterschiedlichen Temperaturen perkoliert und hinsichtlich ihrer DOC-Konzentrationen im Zeitverlauf analysiert.

3.4 Geländemessungen

3.4.1 Das Geländemessnetz

Im Untersuchungsgebiet waren mehrere Messstationen zur Erfassung von meteorologischen und hydrologischen Daten, Bodenparametern sowie zur Gewinnung von Wasserproben eingerichtet (Abb. 3, Tabelle 1). An zu permanenten Messzwecken errichteten Wehren zeichneten Pegel über Schwimmer analog bzw. Drucksonden oder Ultraschallsonden digital die Abflusshöhen auf. Zur Umrechnung in Abflüsse wurden für die jeweilige Wehrform geeignete Schlüsselkurven benutzt und durch Gefäßmessungen und Abflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode nach RODEL (1993) kalibriert. Drei permanente Pegel unterteilten das Untersuchungsgebiet in die geschachtelten Wassereinzugsgebiete LE (27 ha), SH (156 ha) und DÜ (688 ha) (Abb. 6).

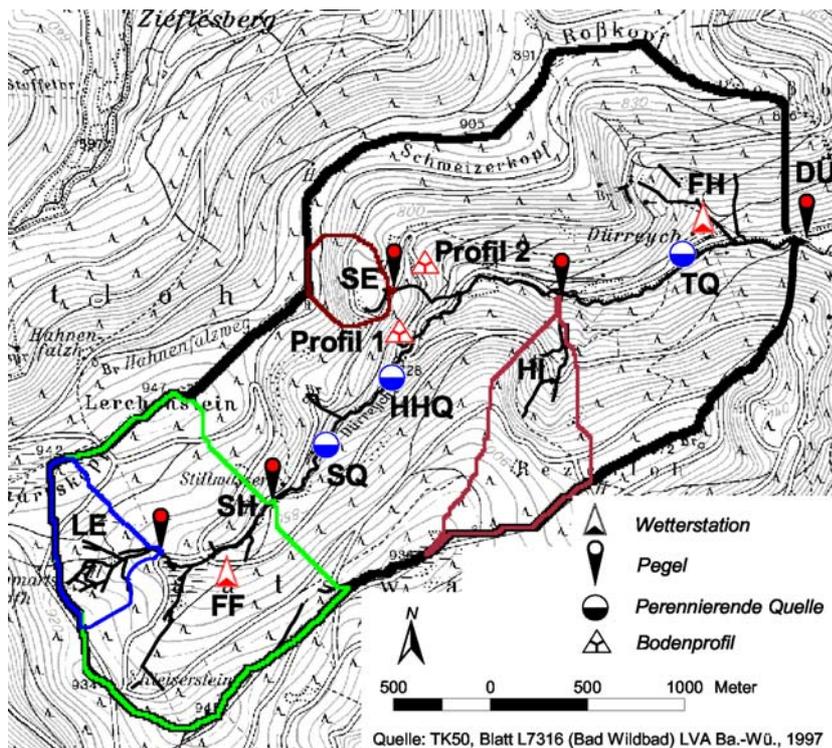


Abb. 6: Untergliederung des Untersuchungsgebietes in die geschachtelten Wassereinzugsgebiete LE, SH und DÜ (die Teileinzugsgebiete SE und HI wurden in CASPER 2002 gesondert betrachtet).

Niederschläge wurden an bewaldeten (bei Profil 1 und 2) und freien (Messstelle FF) Standorten als Wochensummen mit Hellmann-Gefäßen gemessen. Niederschlagswippen an den Wetterstationen erfassten Niederschlagsintensitäten. Aus Messungen mit TDR-Dreistabsonden (UMS München) an Profil 1/2 und FF ließen sich über die Dielektrizitätskonstante die Wassergehalte im Boden ableiten, mit Tensiometermessungen (UMS München) die Wasserspannungen im Boden als Maß für die relative Bodenfeuchte ermitteln.

Entlang dem Hauptgewässer wurden für bestimmte Messkampagnen an vier weiteren Stellen Wasserproben zur DOC Bestimmung entnommen und zur Abflussbestimmung die Salzverdünnungsmethode nach Rodel (1993) angewendet.

Tabelle 1: Ausstattung fester Messeinrichtungen im Dürreychbachtal.

Messtelle	Abkürzung	Messgröße	Methode	Wasserprobenintervall
Hauptpegel	DÜ	Abflusshöhe Niederschlagssummen Niederschlagsintensität Wassertemperatur	Rechtecküberfall, analoge Aufzeichnung mit Schwimmpegel und Drucksonde Hellmann-Gefäß Niederschlagswippen (Süba), 0,1 mm Auflösung Temperatursonde	48 h, bei erhöhtem Abfluss 3 h, Analyse der DOC-Konzentration
Wetterstation Forsthaus	FH	Niederschlagssummen Niederschlagsintensität Bodentemperatur Bodenfeuchte	Hellmann-Gefäß Niederschlagswippen (Süba), 0,1 mm Auflösung Temperatursonden in den Tiefen 10, 20, 40, 80cm TDR-Sonden in den Tiefen 15, 20 30, 45 cm	keine Wasserproben
Hirschklänge	HI	Abflusshöhe	Ultraschallsonde (Züllig, Ch)	Bei Abfluss: wöchentlich, Analyse der DOC-Konzentration
Stillwasserquelle	SQ	Abflusshöhe	Analoge Aufzeichnung mit Schwimmpegel	Wöchentlich, Analyse der DOC-Konzentration
Stillwasserhütte	SH	Abflusshöhe	Analoge Aufzeichnung mit Schwimmpegel, Drucksonde	Wöchentlich, ab Installation von ISCO-Probennehmer (Sept. '98): 48 h, bei erhöhtem Abfluss 3 h, Analyse der DOC-Konzentration
Lerchensteinweg	LE	Abflusshöhe	Ultraschallsonde (Züllig, CH), Drucksonde (ISCO , USA)	wöchentlich, ab Installation von ISCO-Probennehmer (Sept. '98): 48 h, bei erhöhtem Abfluss: 3 h, Analyse der DOC-Konzentration
Wetterstation Freifläche	FF	Niederschlagssummen Niederschlagsintensität Bodentemperatur in den Tiefen Bodenfeuchte in den Tiefen	Hellmann-Gefäß Niederschlagswippen (Süba), 0,1 mm Auflösung Temperatursonden in den Tiefen 10, 20, 40, 50cm TDR-Sonden in den Tiefen 10, 20, 35, 50 cm	keine Wasserproben

Die Ausstattung der Boden-Intensivmessprofile ist gesondert in Abb. 5 dargestellt.

3.4.2 Bodenmessprofile

An Hand zweier für das Einzugsgebiet typischen Bodenprofile (siehe Abb. 3) erfolgten exemplarisch Messungen im Boden. Profil 1 befand sich in einem als Bändchenstau podsol angesprochenen Boden (nach deutscher bodenkundlicher Kartieranleitung) einer steilen Lage am Mittelhang und zeichnete sich durch einen stark kornegebleichten, humusreichen Aeh-Horizont, einen gleichfalls stark gebleichten Ahe-Horizont mit geringer Humuseinwaschung und die Ausbildung eines wasserstauenden Ortsteines im Bs-Horizont aus. Die Humusform konnte als feinhumusarmer rohhumusartiger Moder bezeichnet werden. Profil 2 befand sich in einer verebneten Mittelhanglage mit einem feinhumusarmen Moder als Humusform und der Bodenart „schwach podsoliger Kolluvisol“ (nach deutscher bodenkundlicher Kartieranleitung, detaillierte Profilbeschreibungen im Anhang). An beiden Standorten wurden in verschiedenen Tiefen Temperatur, Bodenfeuchte und Saugspannung in 10 min. Intervallen elektronisch auf Datenloggern erfasst und in Stundenmittelwerte umgerechnet, an Saugkerzen (PE/Nylon, Porengröße 0,45µm) wöchentlich an 1 l Flaschen eine Saugspannung von 0,7 bar angelegt und das in der Saugflasche gesammelte Bodenwasser eine Woche später zur DOC-Messung entnommen. Messsonden und Saugkerzen waren so angeordnet, dass sich die wichtigsten Horizonte, teilweise mit parallelen Messungen, erfassen ließen (Abb. 7).

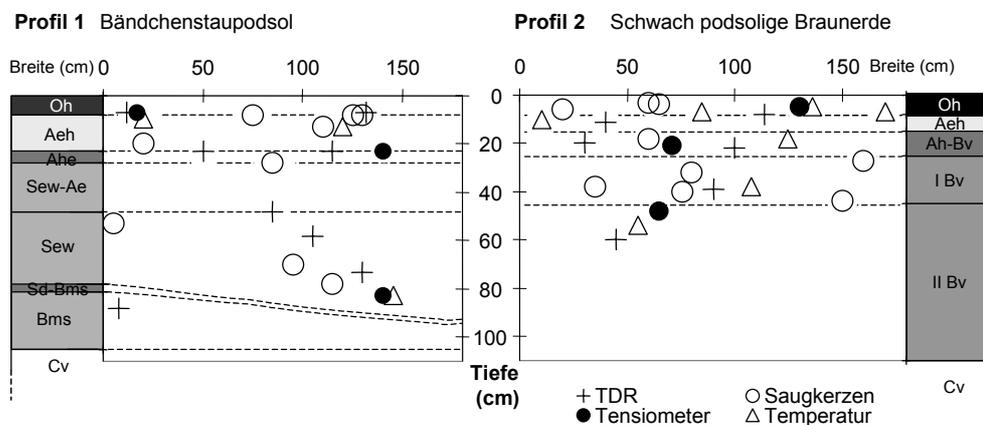


Abb. 7: Horizontierung und Instrumentierung der Messprofile.

3.5 Sonstige Berechnungen

3.5.1 Berechnung der DOC-Frachten längerer Zeitreihen

Bei den Zeitreihen der Abflüsse $Q(t)$ an den einzelnen Pegeln lagen Daten mit kürzeren Messintervallen vor als bei der Erfassung der DOC-Konzentrationen $C_{DOC}(t)$. Zur Berechnung von Stoffflüssen aus solchen Zeitreihen existieren verschiedene Methoden zur Interpolation von Stoffkonzentrationen, die den Interpunkten der Abflussmessungen Werte der Stoffkonzentration zuordnen. HINTON et al. (1997) berücksichtigten dabei die Abflussabhängigkeit der Stoffkonzentration. Diese Abhängigkeit war im Dürreychbachtal bei den einzelnen Teileinzugsgebieten unterschiedlich stark ausgeprägt und nicht für alle Ereignisse anwendbar. Daher fand eine zeitgewichtende Methode nach DANN (1986) ihre Anwendung: Um aus einer Zeitreihe von Abfluss und DOC-Konzentration den DOC-Export durch einen Gewässerquerschnitt während eines bestimmten Zeitraumes für das Wassereinzugsgebiet DÜ, SH und LE berechnet zu können, mussten die DOC-Konzentrationen zwischen zwei Messungen in gleichen Zeitintervallen der Messungen von $Q(t)$ linear interpoliert werden, so dass daraus die DOC-Fracht berechnet werden konnte:

$$F_{DOC}(t) = Q(t) \cdot C_{DOC}(t) \quad (\text{Gl. 4})$$

C_{DOC} : DOC-Konzentration

Q : Abfluss

3.5.2 Berechnung der DOC-Frachten einzelner Ereignisse

Für einzelne Ereignisse wurden die DOC-Frachten nach Gl. 4 berechnet. Wenn jedoch die Dauer einer Abflussreaktion eines Ereignisses den Zeitraum zwischen zwei Niederschlägen überschreitet, können sich Niederschlag-Abfluss-Ereignisse überschneiden, so dass sich deren

Abflussganglinien überlagern. Um einem Ereignis dennoch entsprechende Abflussmengen und DOC-Frachten zuordnen zu können, ließ sich der auslaufende Ast der Abflussganglinie über eine exponentielle Regression extrapolieren und die aus dem Extrapolationszeitraum berechnete Stoffmenge und Abflussmenge vom nächsten Ereignis subtrahieren. (Abb. 8).

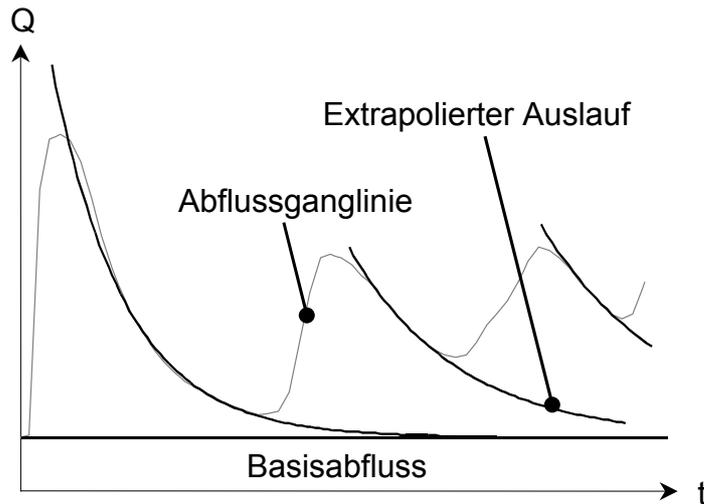


Abb. 8: Konzeptionelle Darstellung der Abtrennung des Basisabflusses und Extrapolation der auslaufenden Äste von sich überlappenden Hydrographen.

3.5.3 Abflussbeiwert

Als Abflussbeiwert α wird der Anteil des Niederschlages bezeichnet, der während eines Ereignisses zum Abfluss ins Gewässer gelangt.

$$\alpha = \frac{R}{P \cdot A} \quad (\text{Gl. 5})$$

R: Abflusssumme während eines Niederschlag-Abfluss-Ereignisses

P: Gebietsniederschlag

A: Fläche des Wassereinzugsgebietes

Dabei stellt $1-\alpha$ die Summe aus Grundwasserneubildung und Gebietsrückhalt (die Summe von Interzeptions- und Evapotranspirationsverlusten sowie langsamen Abflusskomponenten) dar. Zur Berechnung von α musste gegebenenfalls ein Basisabfluss abgezogen werden, der für die Dauer kürzerer Ereignisse als konstant gelten (Abb. 8) oder auch aus dem Anstieg des Abflusses zwischen Beginn und Ende eines Ereignisses linear interpoliert werden konnte.

3.5.4 Ganglinienseparation

Für eine Ganglinienseparation auf der Einzugsgebiets-Skala kann ein Massenerhaltungs-Ansatz gewählt werden, bei dem sich der Abflussbeitrag eines Teileinzugsgebietes zum Zeitpunkt t aus Gl. 6 errechnet, wenn man näherungsweise für den gemessenen Wasserinhaltsstoff $C_S(E) = \text{konstant}$ annimmt. Dieser Ansatz war auf die Verwendung von DOC als Wasserinhaltsstoff zu übertragen.

$$Q_E(t) = \frac{C_S(t) - C_S(t=0)}{C_S(E)} \quad (\text{Gl. 6})$$

$Q_E(t)$: Abflussbeitrag eines Teileinzugsgebietes E zum Zeitpunkt t

$C_S(t)$: Konzentration eines Wasserinhaltsstoffes S zum Zeitpunkt t

$C_S(t=0)$: Hintergrundkonzentration eines Wasserinhaltsstoffes S am Gebietsauslass

$C_S(E)$: Konzentration des Wasserinhaltsstoffes S im Teileinzugsgebiet E

4 Ergebnisse

4.1 Bodenatmung

Die humushaltigen Bodenhorizonte Oh und Ah eines für das Dürreychgebiet typischen Podsols repräsentierten die potentiellen Quellen des DOC im Bodenwasser. Als Maß für die biologische Aktivität wurden Bodenproben unter kontrollierten Bedingungen zur Messung der Sauerstoffzehrung inkubiert. In Tabelle 2 sind deren Respirationraten angegeben.

Tabelle 2 : Bodenatmung organischer Horizonte eines Podsols.

Horizont	Proben Nr.	Bodenatmung $\frac{g O_2}{kg TS \cdot d}$
Oh	1	4,20
Oh	2	3,26
Oh	3	2,41
Aeh	4	0,67
Aeh	5	0,89
Aeh	6	0,47
Aeh	7	0,18

Die organische Auflage des Podsols hatte eine deutlich höhere Bodenatmung als der darunter liegende mineralische Horizont und resultierte vor allem aus dem höheren pH-Wert.

4.2 Perkulationsversuche

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Mobilisierung organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden von der Bodentemperatur wurden Perkulationen von Bodenproben der organischen

Auflage von Profil 1 durchgeführt. Abb. 9 zeigt den Verlauf der DOC-Konzentration im Perkolat mehrerer Parallelproben während konstanter Temperatur über einen Zeitraum von sieben Tagen. Die anfänglich hohen DOC-Konzentrationen lagen zwischen 28 und 90 mg C l⁻¹ und fielen innerhalb von zwei Tagen um ca. 50% ab. Zwischen Tag 2 und Tag 7 sanken sie langsamer: Eine weitere Halbierung der DOC-Konzentration war über einen etwa doppelt so langen Zeitraum zu verzeichnen. Während der Perkolation kam es zu erheblichen Durchflussschwankungen, die sich aus Druckschwankungen durch Störungen des Absaugsystems und durch ungleichmäßige Pumpleistung beim Auftragen des Wassers erklären ließen. Dennoch verliefen die DOC-Konzentrationen über die gesamte Versuchsspanne sehr stetig.

Dem gegenüber schwankten die DOC-Konzentrationen bei Perkolation mit wechselnden Temperaturen deutlich (Abb. 10). Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die DOC-Konzentrationen als relative Größen dargestellt, die an den jeweiligen Konzentrationen nach zwei Tagen Perkolation bei 13°C normiert wurden. Eine Erhöhung der Temperatur von 13°C auf 28°C induzierte deutliche Anstiege in den DOC-Konzentrationen. Nach weiterer Perkolation der Bodenproben nahm die Mobilisierung von DOC wieder ab, und die DOC-Konzentrationen im Perkolat sanken. Bei Absenkung der Temperatur nach weiteren zwei Tagen auf 4°C zeigten sie eine stärkere Abnahme. Innerhalb von 3 Tagen verringerten sie sich auf 50 bis 20% der Werte zum Zeitpunkt der letzten Temperaturabsenkung.

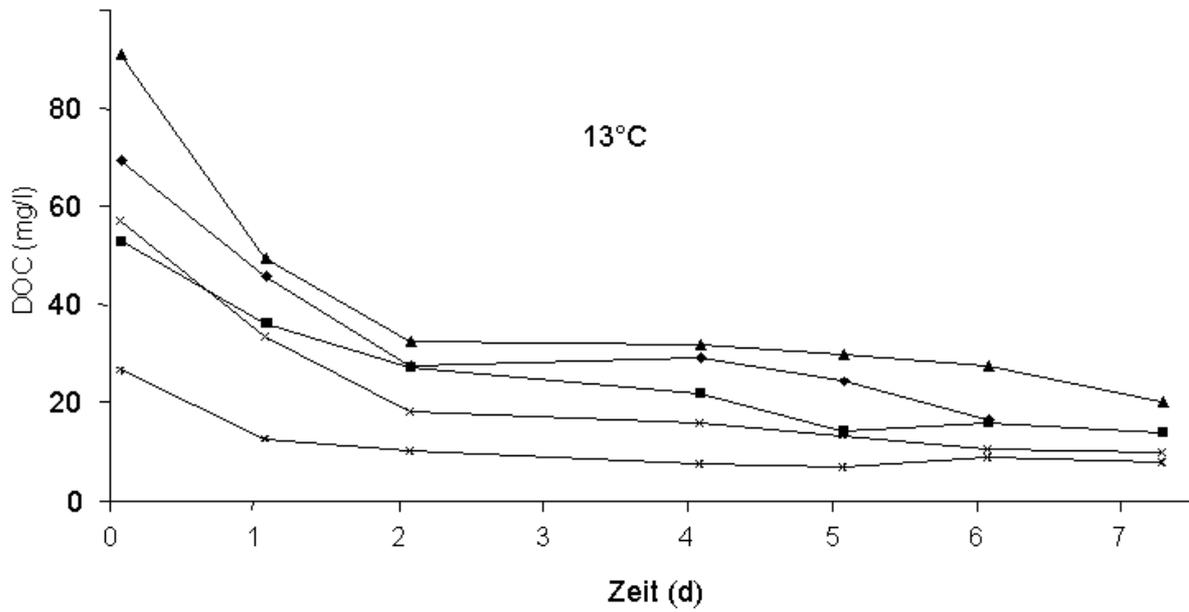


Abb. 9: Verlauf der DOC-Konzentrationen bei Perkolat von Bodenproben der organischen Auflage von Profil 1 bei 13 C, 5 parallele Ansätze.

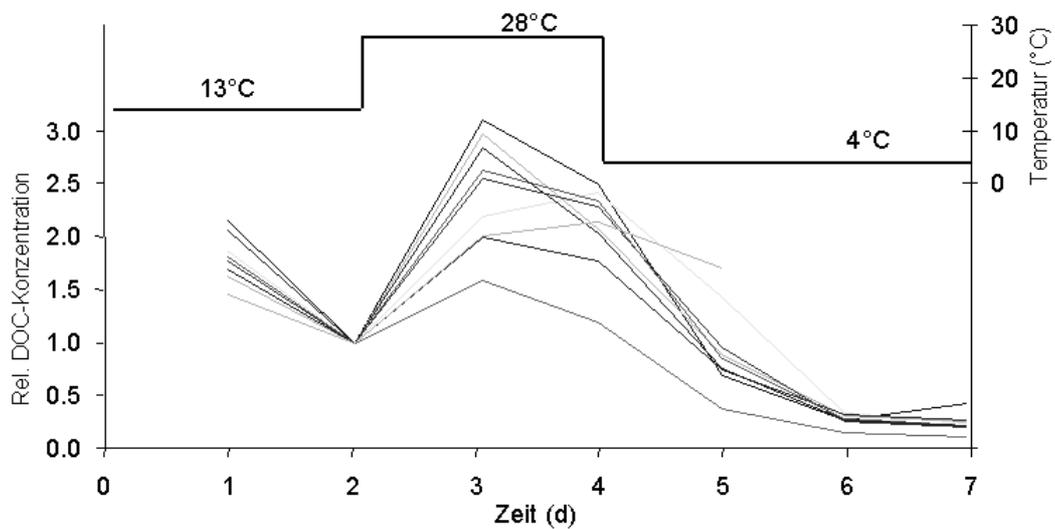


Abb. 10: Verlauf der DOC-Konzentrationen bei der Perkolat von Bodenproben der organischen Auflage des Hanges von Profil 1 bei wechselnden Temperaturen.

4.3 Überblick über die Zeitreihen von DOC-Konzentration und Abfluss an den permanenten Messstationen

4.3.1 Die Bodenprofile

Die beiden Intensivmessprofile (Profil 1, Profil 2, Abb. 7) lagen im Teileinzugsgebiet DÜ-SH, das sich aus der Fläche des gesamten Dürreychgebietes abzüglich des Einzugsgebiets SH ergibt. Profil 1 repräsentierte Standorte in steilen Hanglagen, Profil 2 etwas flachere Standorte (Abb. 11).

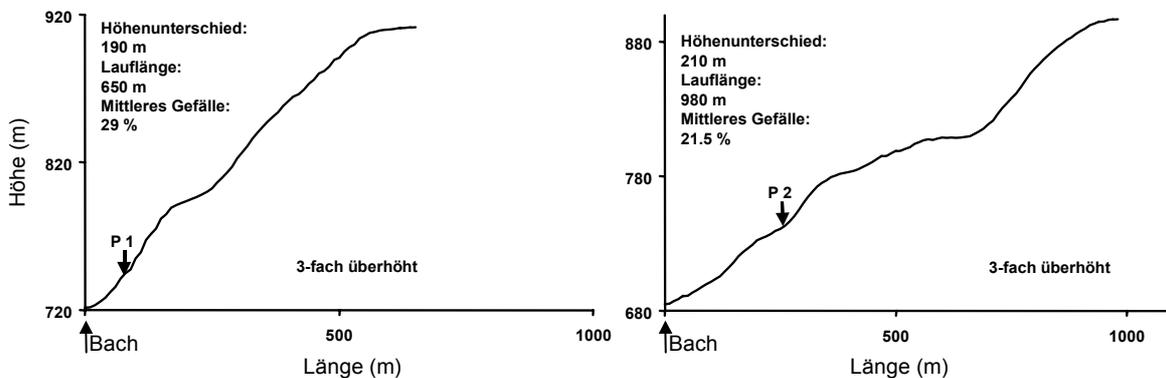


Abb. 11: Messprofile 1 und 2 mit ihrer Lage an den Hangtransekten.

Am Bodenprofil 1 wurde im Messzeitraum vom 10.12.1997 bis 17.11.1999, am Bodenprofil 2 bis zum 28.7.1999, im wöchentlichen Rhythmus Bodenwasser in einem Gesamtumfang von 867 Proben entnommen und deren DOC-Gehalt bestimmt. Auffällig war die jahreszeitliche Schwankung der DOC-Dynamik in beiden Profilen: Im Winter wurde deutlich weniger DOC mobilisiert als im Sommer. Während der Monate Mai bis August konnte wegen der Austrocknung des Bodens am Profil 2 mit den Saugkerzen bis 18 cm Tiefe zeitweise kein Bodenwasser gewonnen werden. Dem gegenüber zeichnete sich Profil 2 durch einen ständig feuchten Zustand in Tiefen ab 13 cm aus. Nur unter dem Oh-Horizont zeigten geringer

werdende Volumen des gewonnenen Bodenwassers zeitweise eine deutlich zunehmende Austrocknung des Bodens.

DOC-Konzentrationen im Bodenwasser fielen mit zunehmender Tiefe. Profil 1 (Abb. 12) zeigte eine deutlich höhere Dynamik sowohl im zeitlichen Verlauf als auch in vertikaler Richtung gegenüber Profil 2 (Abb. 13). Je tiefer Wasser durch den Boden sickerte, um so mehr DOC adsorbierte an der Bodenmatrix und konnte teilweise mikrobiologisch abgebaut werden. Die höchsten DOC-Konzentrationen im Bodenwasser wurden im Oberboden von Profil 1 gefunden.

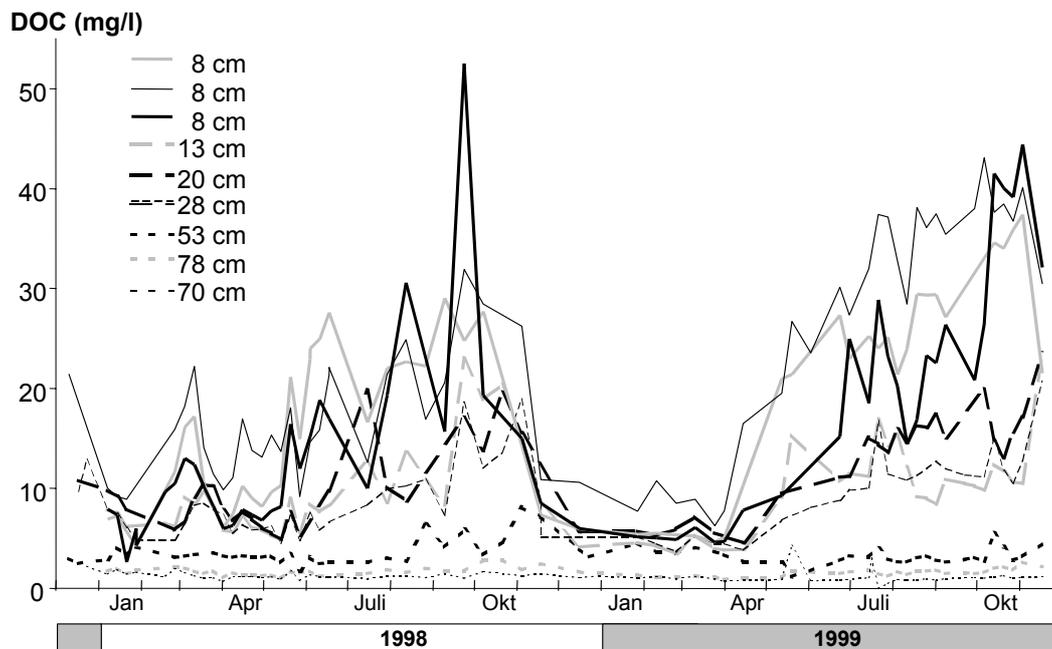


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf der DOC-Konzentrationen im Bodenwasser in einem Bändchenstaupodsol (Profil 1).

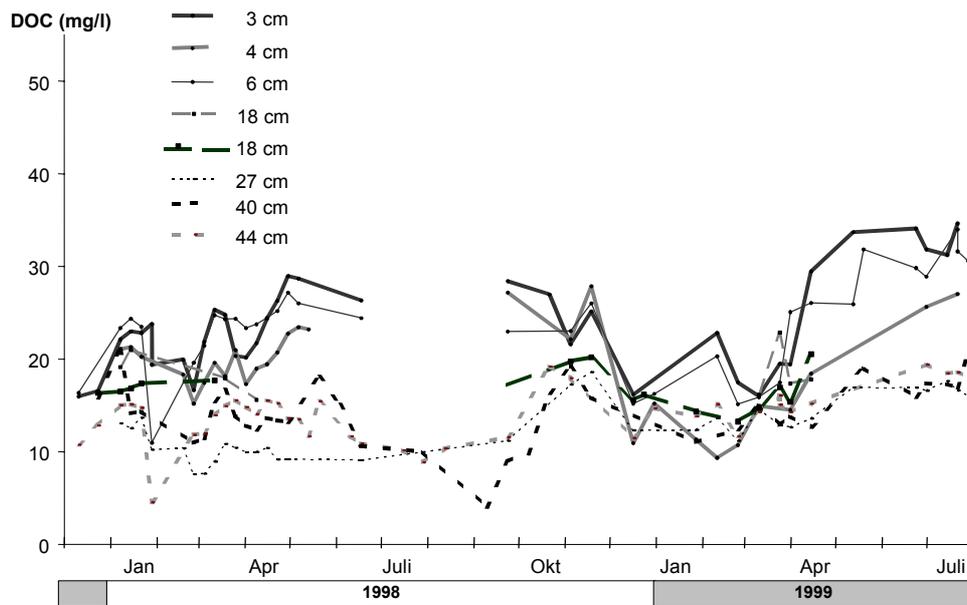


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der DOC-Konzentrationen im Bodenwasser in einem schwach podsoligen Kolluvisol (Profil 2).

In Abb. 14 sind Tiefendiagramme der Messprofile mit den mittleren DOC-Konzentrationen, dem Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff und deren beider Quotienten abgebildet. Die mittleren DOC-Konzentrationen in den oberen 8 cm stellten sich bei beiden Profilen bezüglich dieser Parameter als annähernd gleich heraus, auch wenn im Profil 1 größere Schwankungsbreiten auftraten. Profil 1 wies einen steileren Gradienten der DOC-Konzentration mit der Tiefe auf als Profil 2. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff in der Bodenmatrix spiegelte sich jedoch nicht in der mittleren Konzentration an DOC im Bodenwasser wider. Obwohl der Anteil an organischem Boden-C zwischen dem Oh-Horizont und 30 cm Tiefe bei Profil 1 und bis 45 cm Tiefe bei Profil 2 stetig abnahm, errechnete sich für Profil 1 aus DOC-Konzentration und organischem Boden-C ein mit der Tiefe zunehmender Quotient. Für die Höhe der DOC-Konzentration im Bodenwasser ist zum einen das Angebot an organischem Kohlenstoff im Humus der Humusaufgabe oder des A-Horizontes, zum anderen aber vor allem die Mobilität des organischen Kohlenstoffs ausschlaggebend.

Die beobachtete Quotientenverschiebung wies also auf eine steigende DOC-Mobilität mit zunehmender Bodentiefe hin, die im Profil 1 höher war als im Profil 2.

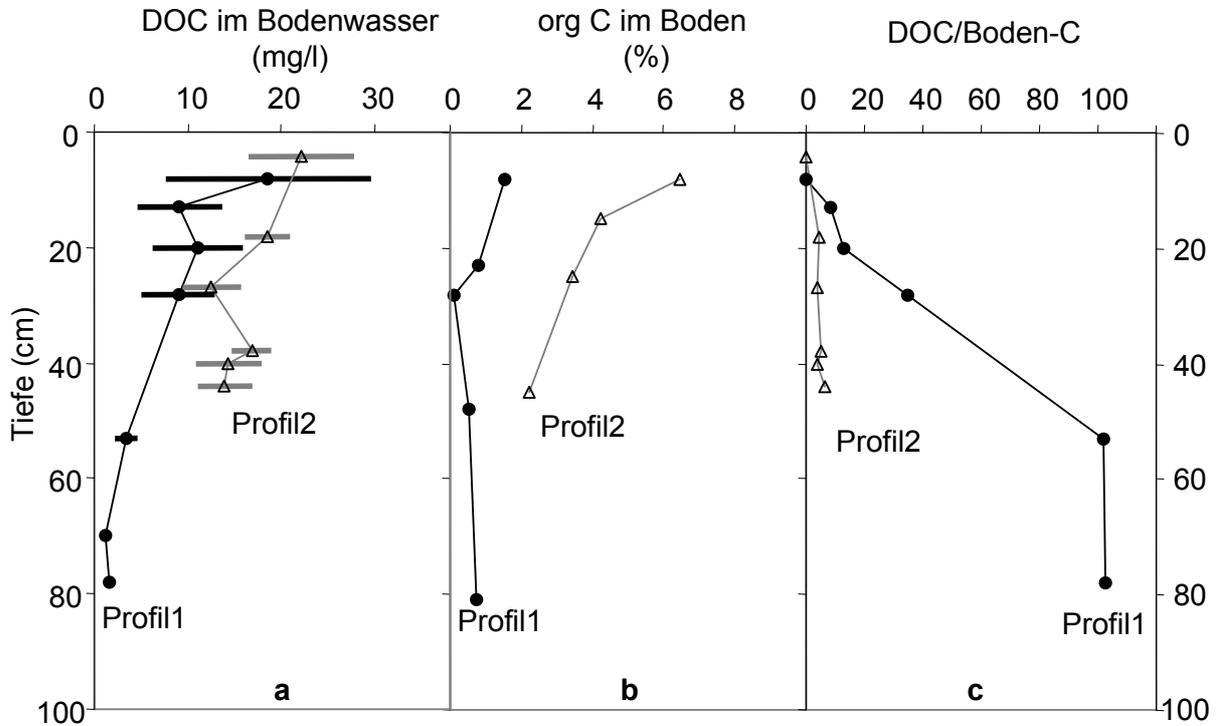


Abb. 14: Tiefenprofile der mittleren DOC-Konzentration im Bodenwasser (a), der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden (b) und der Verhältnisse von DOC und Bodenkohlenstoff (c), mit Standardabweichungen.

4.3.2 Gesamtgebiet DÜ

Über einen Zeitraum von 2 Jahren sind am Hauptpegel des Dürreychbachtals (DÜ) Abfluss- und DOC-Daten aufgezeichnet worden (Abb. 15). Während dieser Zeit traten mehrere Hochwasserereignisse ein. Bei acht von ihnen wurden Abflüsse von über 1 m³ gemessen. Am 28. Oktober 1998 kam es zu einem Spitzenabfluss von 13,6 m³s⁻¹. Deutlich war nach Absinken der kurzen Hochwasserwelle das breite Auslaufen des erhöhten Basisabflusses zu erkennen. Parallel zu diesen Hochwasserereignissen stiegen die DOC-Konzentrationen an, die mit einer

tief braunen Färbung des Wassers einher gingen. Gegenüber dem Niedrigwasserabfluss, der kaum über 5 mg C l^{-1} lag, wurden bei höheren Abflüssen bis zu 30 mg C gemessen.

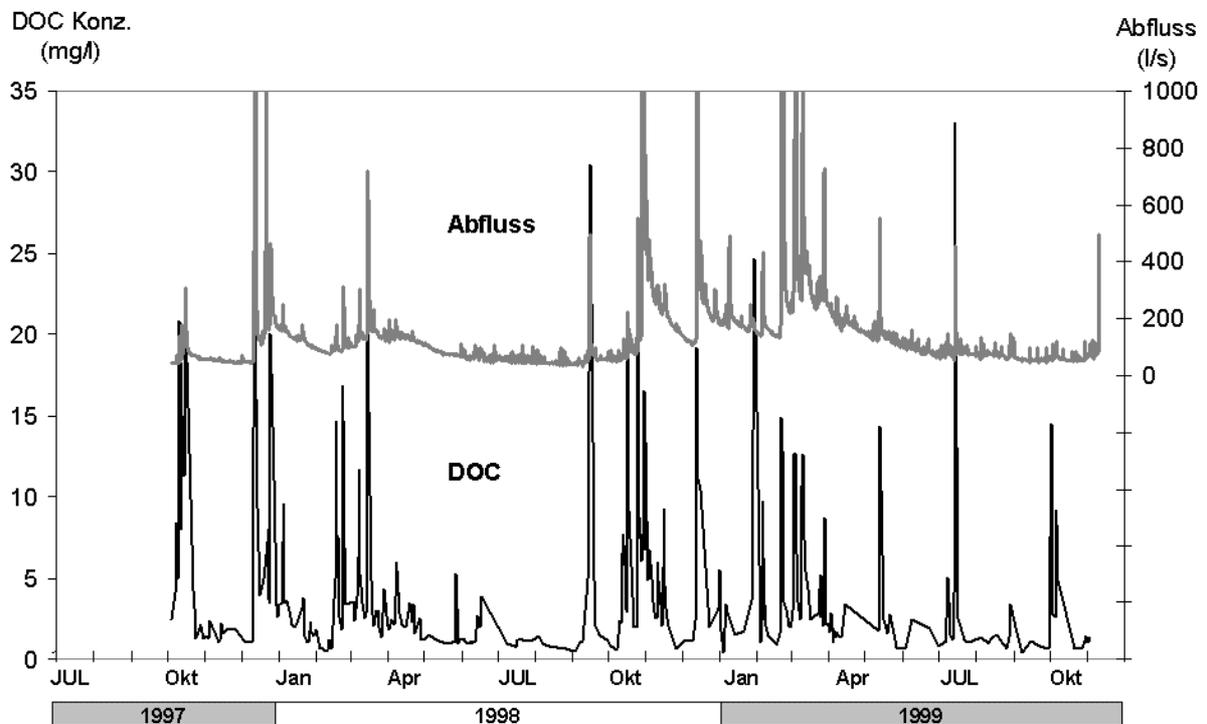


Abb. 15: Abfluss und DOC-Konzentrationen am Hauptpegel DÜ von Oktober 1997 bis November 1999.

4.3.3 Teileinzugsgebiete SH und LE

Die beiden Einzugsgebiete Stillwasserhütte (SH) und Lerchenstein (LE) unterschieden sich sowohl in der Abfluss- als auch in der DOC-Dynamik deutlich vom Gesamteinzugsgebiet. Auf Grund des kleineren Einzugsgebietes waren die Abflüsse deutlich niedriger. Pegel SH überschritt 200 l s^{-1} (Abb. 16), Pegel LE 80 l s^{-1} (Abb. 17) nur selten. SH zeigte zwar auch bei aufeinanderfolgenden Abflussereignissen einen Anstieg des Basisabflusses, den eine periodisch schüttende Quelle speiste. Zeitweise fiel der Bach jedoch trocken. Am 28. Oktober 1998 konnte allerdings ein Spitzenwert von fast $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ gemessen werden. Auch hier wurden DOC-Anstiege mit zunehmendem Abfluss beobachtet. DOC-Konzentrationen erreichten

Ergebnisse

dabei bis zu 81 mg C l^{-1} am Pegel LE mit deutlicher Braunfärbung des Wassers. Von November 1997 bis August 1998 wurden die beiden Pegel nur wöchentlich beprobt. Um die hohe DOC-Dynamik im Dürreychbach zu erfassen, waren während Niederschlags-Abflussereignissen kürzere Beprobungsintervalle notwendig. Nach der Verkürzung auf einen 3 h-Abstand zwischen den Probenahmen konnten die Konzentrationsverläufe des DOC gut nachgezeichnet werden.

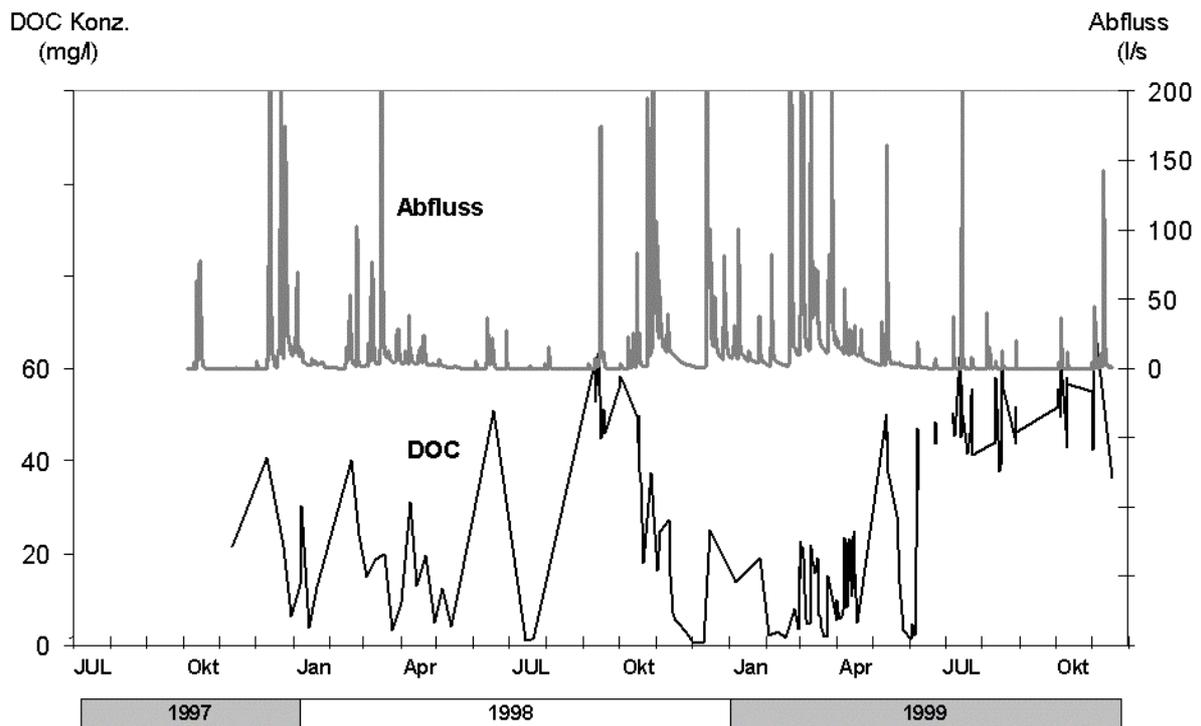


Abb. 16: Abfluss und DOC-Konzentrationen am Pegel Stillwasserhütte (SH) von November 1997 bis November 1999.

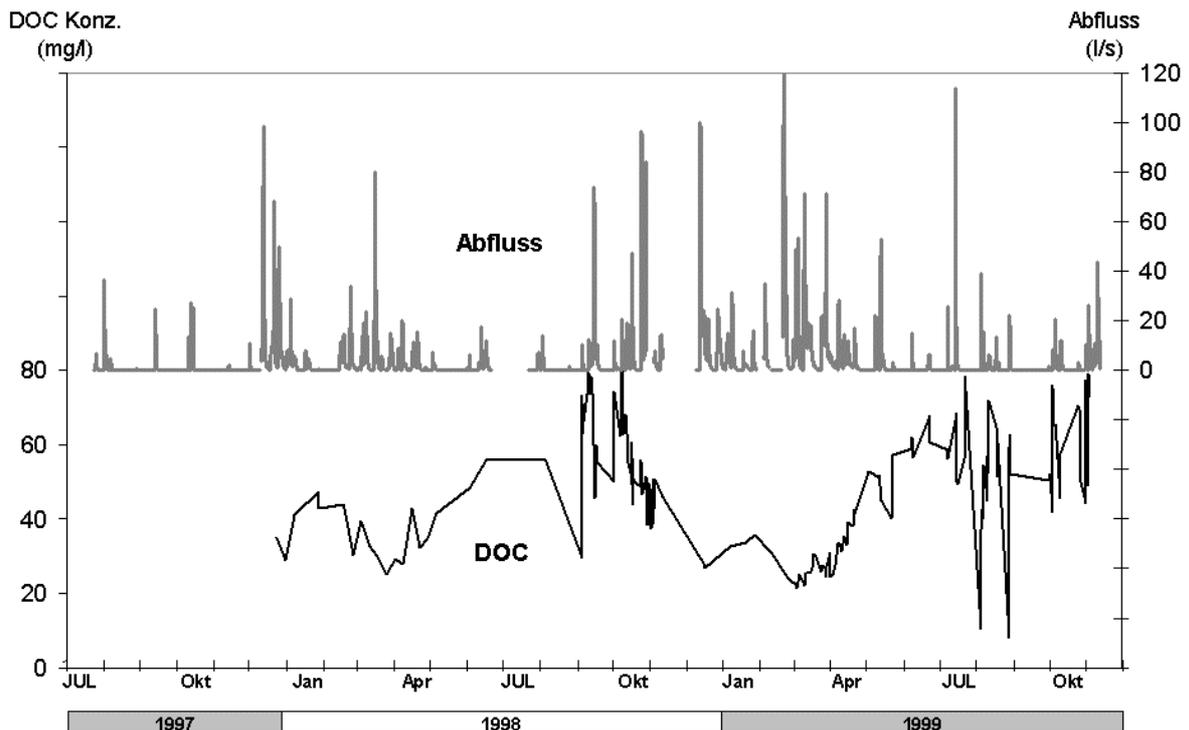


Abb. 17: Abfluss und DOC-Konzentrationen am Pegel LE von Dezember 1997 bis November 1999.

4.3.4 Die Stillwasserquelle

Die Stillwasserquelle liegt im mittleren Bereich des Kerbtales und entspringt am Hangfuß wenige Meter über dem Bach. Sie tritt an der Grenze zwischen dem Geröllfreien Hauptbuntsandstein und dem Eck'schen Konglomerat aus und wird durch den Hangschutt verschleppt.

Abb. 18 zeigt die Zeitreihen von Abfluss und DOC-Konzentration zwischen Oktober 1997 und November 1999. Die Quelle schüttete ganzjährig klares Wasser mit DOC-Konzentrationen zwischen weniger als $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ bis zu $3,7 \text{ mg l}^{-1}$. Die trägen Abflussreaktionen auf Niederschläge zeigen deutlich den dominierenden Einfluss von Abflusskomponenten aus mineralischen Horizonten. Anstiege des DOC-Gehaltes sind auf flachere Abflusskomponenten zurückzuführen. Bei trockenem Gebietszustand schüttete die

Quelle wahrscheinlich ausschließlich Wasser, das aus dem Grundgestein stammte, bei feuchteren Bedingungen können sich jedoch auch Komponenten aus dem Hangschutt und dem Quellsumpf dazumischen.

Während trockener Witterungsperioden versiegt der Dürreychbach oberhalb der Stillwasserquelle vollständig. Mit ihrer perennierenden Schüttung repräsentierte die Stillwasserquelle den Trockenwetterabfluss des Dürreychbaches, der sich mit wenigen gewässerabwärts liegenden Quellen mit ähnlichen Schüttungseigenschaften zum Basisabfluss addierte.

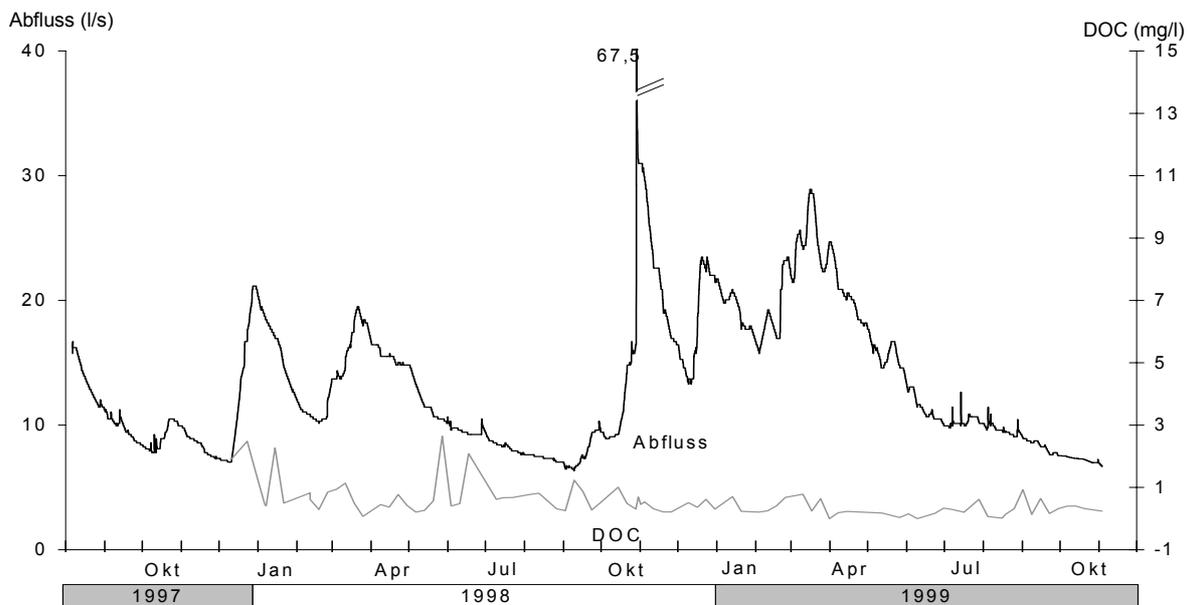


Abb. 18: Abfluss- und DOC-Dynamik der Stillwasserquelle.

4.4 DOC-Dynamik und Abflussgeschehen einzelner Niederschlag-Abfluss-Ereignisse

Für die Untersuchung von Prozessen zur Abflussbildung wurden die Zeitreihen der Messgrößen in einzelne Niederschlag-Abfluss-Ereignisse unterteilt. Ereignisse, die im einzelnen in dieser Arbeit betrachtet wurden, sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Ereignisbeschreibung

Ereignis	Datum	Niederschlag- summe [mm]	Maximale NS- Intensität [mm h ⁻¹]	Gebietszustand vor dem Ereignis*
A	5.9.1998	20	7	trocken
B	24.10.1998	43	4	mittlere Bodenfeuchte
C	8.5.1999	30	13	nass
D	12.5.1999	60	6	nass
E	7.7.1999	30	13	mittlere Bodenfeuchte
F	14.7.1999	39	21	mittlere Bodenfeuchte
G	16.9.2000	86	12	trocken
H	23.3.2001			nass

* nass: Wassersättigungslinie in weniger als 20 cm Tiefe; mittlere Bodenfeuchte: Sättigungslinie zwischen 20 und 35 cm Tiefe; trocken: Sättigungslinie in über 35cm Tiefe (TDR –Sonden an der Wetterstation Freifläche (FF) im Teileinzugsgebiet Stillwasserhütte (SH)).

4.4.1 Abhängigkeit des DOC vom Abfluss

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der DOC-Konzentration von hydrologischen Prozessen sind in Abb. 19 die DOC-Konzentration gegen den Abfluss aufgetragen. Messungen einiger einzelner Niederschlag-Abfluss-Ereignisse sind durch Linien miteinander verbunden. Pfeile deuten den zeitlichen Verlauf an. Besonders am Gesamtgebiet DÜ ist eine Beziehung zwischen DOC-Konzentration und Abfluss zu erkennen. Häufig sind dabei positive wie negative Hysteresen zu beobachten. Dennoch streuten die Messungen stark. Bei den stromaufwärts liegenden Pegeln SH und LE war eine DOC-Abfluss-Beziehung undeutlicher und trat nur bei Ereignissen mit kleineren Schüttungen auf (SH bis ca. 25 l s⁻¹, LE bis ca. 15 l s⁻¹). Bei höheren Abflusswerten blieben die DOC-Konzentrationen relativ konstant. Am

Pegel LE lagen die DOC-Konzentrationen bis auf einzelne Ausnahmen zwischen 25 und 80 mg C l⁻¹. Daraus wird deutlich, dass den Dynamiken der DOC-Konzentrationen bei verschiedenen Teileinzugsgebieten unterschiedliche Gebietseigenschaften zu Grunde liegen mussten, die sowohl die Abfluss- als auch die DOC-Export-Prozesse steuerten.

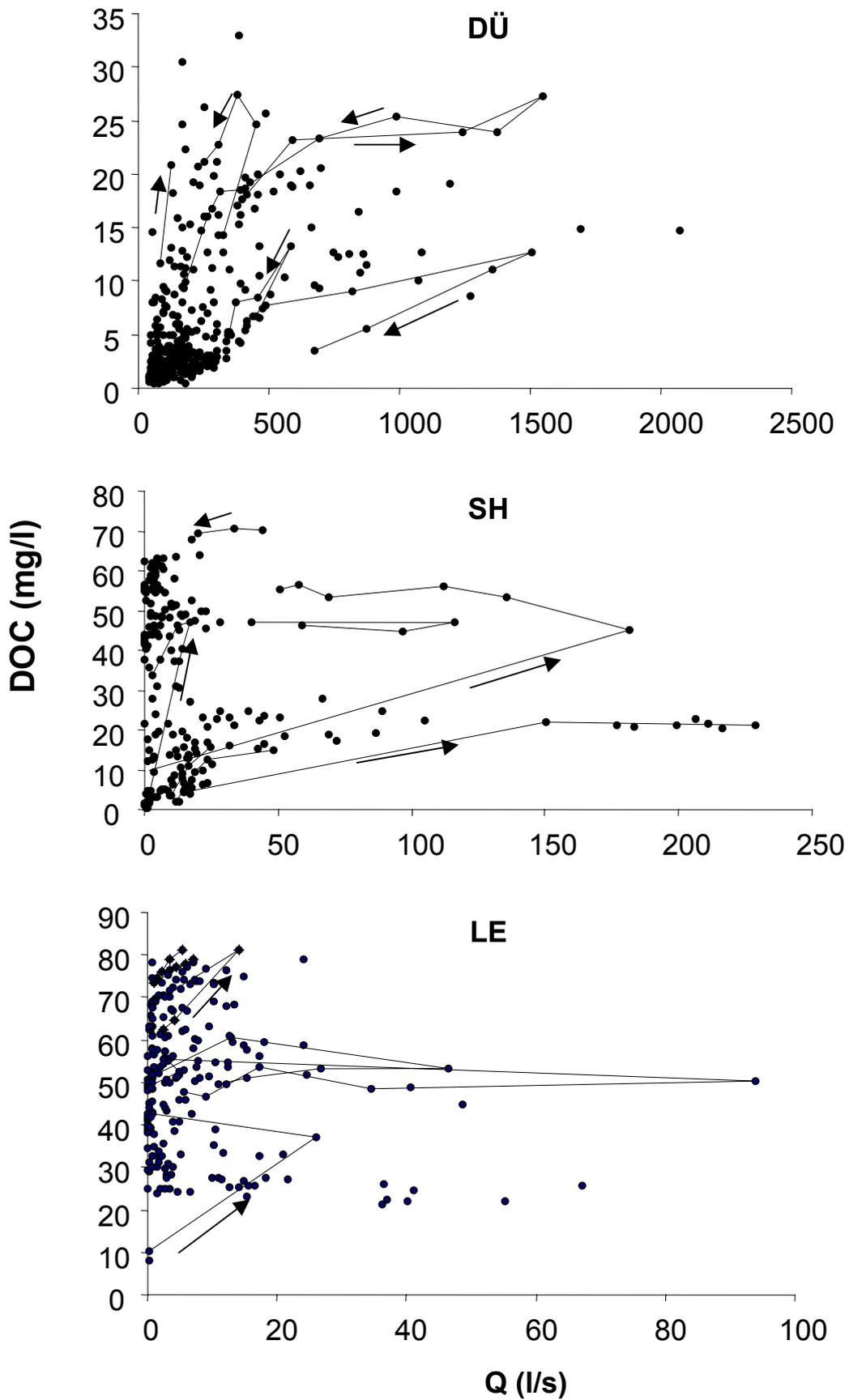


Abb. 19: Beziehungen von Abfluss Q und DOC-Konzentration an den drei Pegeln DÜ, SH und LE.

4.4.2 Das Teileinzugsgebiet Lerchenstein (LE)

Gelände- und Bodeneigenschaften

Das Teileinzugsgebiet LE hat eine Größe von 27 ha und besteht überwiegend aus einem flachen Höhenrücken, der in Hänge mit relativ geringer Neigung übergeht. Böden mit moorigem Charakter oder Stagnationsmerkmalen bedecken über 50 % der Fläche, die von einem dichten Netz eines künstlichen Dränagesystems zur Entwässerung durchzogen ist.

Temperaturabhängigkeit des DOC-Exportes

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Korrelation von Temperatur und DOC-Konzentration von den Perkolationsversuchen im Labor auf die Böden der Hochflächen wurden lineare und exponentielle Autokorrelationen von Zeitreihen durchgeführt. Dabei variierte der Zeitversatz zwischen Bodentemperatur-Tagesmittel und der Zeitreihe der DOC-Konzentration am Pegel Lerchenstein (LE) (Abb. 20) bzw. der Zeitraum der gemittelten Werte. Da durch die kürzeren Beprobungsintervalle während Niederschlags-Abfluss-Ereignissen höhere Abflüsse stärker repräsentiert waren, wurden auch Zeitreihen von wöchentlichen Proben zur Autokorrelation verwendet. Die Abflusshöhen waren dadurch zufällig gewählt.

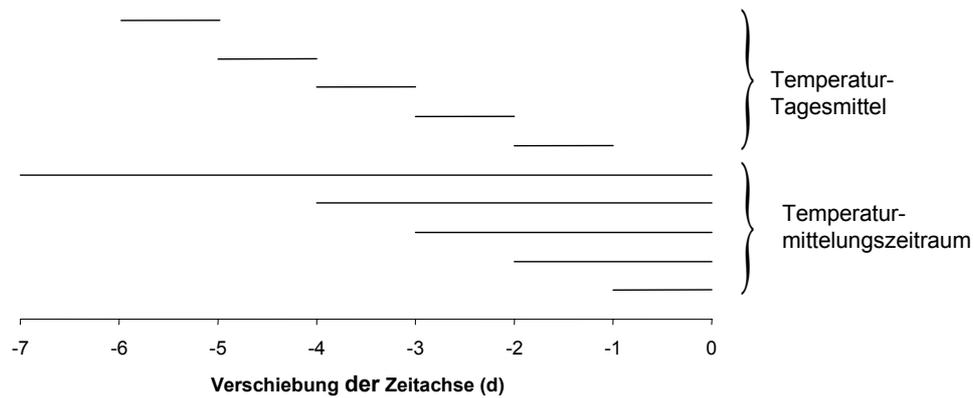


Abb. 20: Autokorrelationen von Zeitreihen der Bodentemperatur-Tagesmittelwerte und der Mittelungszeiträume mit Zeitreihen der DOC-Konzentration.

Durch Auftragung von Korrelationskoeffizienten gegen den Mittelungszeitraum konnte die optimale Regression ermittelt werden (Abb. 21). Es ergab sich unter Verwendung aller Messwerte ein Optimum des Korrelationskoeffizienten $r = 0,790$ bei einer exponentiellen Korrelation von DOC und dem Temperaturmittelwert über 20 Tage in einer Bodentiefe von 20 cm (gemessen an der Wetterstation FF) mit der Regressionsgleichung:

$$C_{DOC} = 27,18 e^{0,0762t_m} \quad (Gl. 7)$$

C_{DOC} : DOC-Konzentration

t_m : Bodentemperatur über 20 Tage gemittelt, 20 cm Tiefe

Bei der Verwendung der Werte wöchentlicher Messungen lag der Korrelationskoeffizient der optimalen Regression (exponentiell, Mittelung der Temperatur über vier Tage) bei $r = 0,906$.

$$C_{DOC} = 25,912 e^{0,0778t_m} \quad (Gl. 8)$$

C_{DOC} : DOC-Konzentration

t_m : Bodentemperaturmittelwert über vier Tage, 20 cm Tiefe

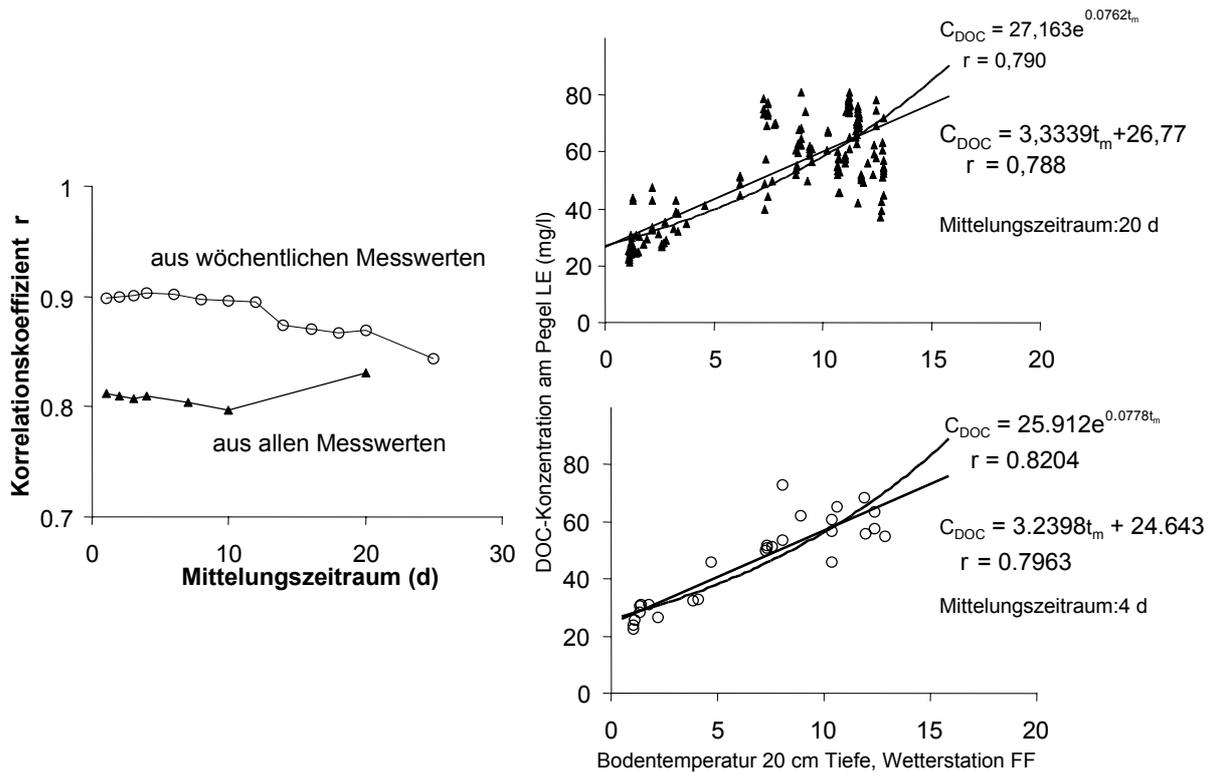


Abb. 21: Güte der linearen und exponentiellen Regressionen bei zunehmendem Mittelungszeitraum (links), die optimalen linearen und exponentiellen Regressionen (rechts).

Bei Verwendung aller Messwerte war die Streuung um die Regressionsfunktion deutlich höher als bei der Verwendung von wöchentlichen Messwerten, die besonders während intensiver Abflussereignisse auftraten. Dies macht Abb. 22 deutlich, in der die Zeitreihe der am Pegel LE gemessenen DOC-Werte über die Kurve der aus der Regressionsgleichung Gl. 8 ermittelten DOC-Werte gelegt ist. Zwar wurden durch die modellierten Daten die ansteigenden DOC-Konzentrationen im Frühjahr gut wiedergegeben, doch lagen die Messpunkte im Sommer bei den kurzen Messintervallen von Ereignissen zum überwiegenden Teil unter der erwarteten Konzentration. Diese Abweichungen sollen im Folgenden durch hydrologische Prozesse erklärt werden.

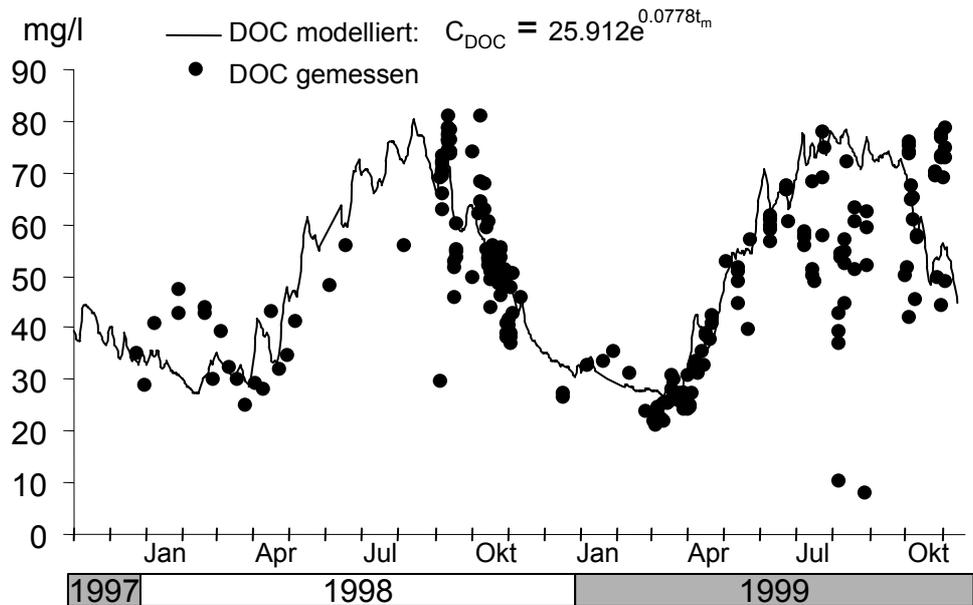


Abb. 22: Gemessene DOC-Konzentrationen am (C_{DOC}) Pegel LE und modellierter DOC-Verlauf, wobei t_m die über vier Tage gemittelte Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (gemessen an FF) darstellt.

Abfluss- und DOC-Exportprozesse

Am Pegel LE wurden im Messzeitraum lange Perioden ohne Abfluss aufgezeichnet. Bei ausreichenden Niederschlägen zeigte das Gebiet kurzzeitige, heftige Abflussreaktionen (Abb. 17). Die Reaktion der Bodenfeuchte auf einen solchen Niederschlag zeigt Abb. 23.

Zu Beginn des Ereignisses verursachte der infiltrierende Niederschlag durch die Perkolation in tiefere Bodenhorizonte nur eine leichte Erhöhung der Bodenfeuchte. Die Füllung der Bodenporen mit Wasser nahm aber rasch zu, so dass der Spiegel der Wassersättigung von unten nach oben anstieg, bis das Porenvolumen des Bodenkörpers über das gesamte Profil mit Wasser gefüllt war. Die Zeitverzögerung zwischen Niederschlag und Anstieg der Bodenfeuchte einerseits, und der rasche Anstieg des Spiegels der Wassersättigung andererseits deuten auf starke laterale Fließkomponenten in oberflächennahen Horizonten hin. Der sinkende Wassergehalt nach dem Niederschlag, zuerst durch die TDR-Sonden in 10 cm Tiefe, dann auch in 20 cm Tiefe gemessen, demonstriert das Leerlaufen des Bodens von oben

nach unten. Wegen der geringen Hangneigung stellten die Hochflächen ein Gebiet mit potentiell „saturation excess flow“ dar. Horton'scher Oberflächenabfluss kann hier auf Grund einer hohen Infiltrationskapazität des Bodens ausgeschlossen werden.

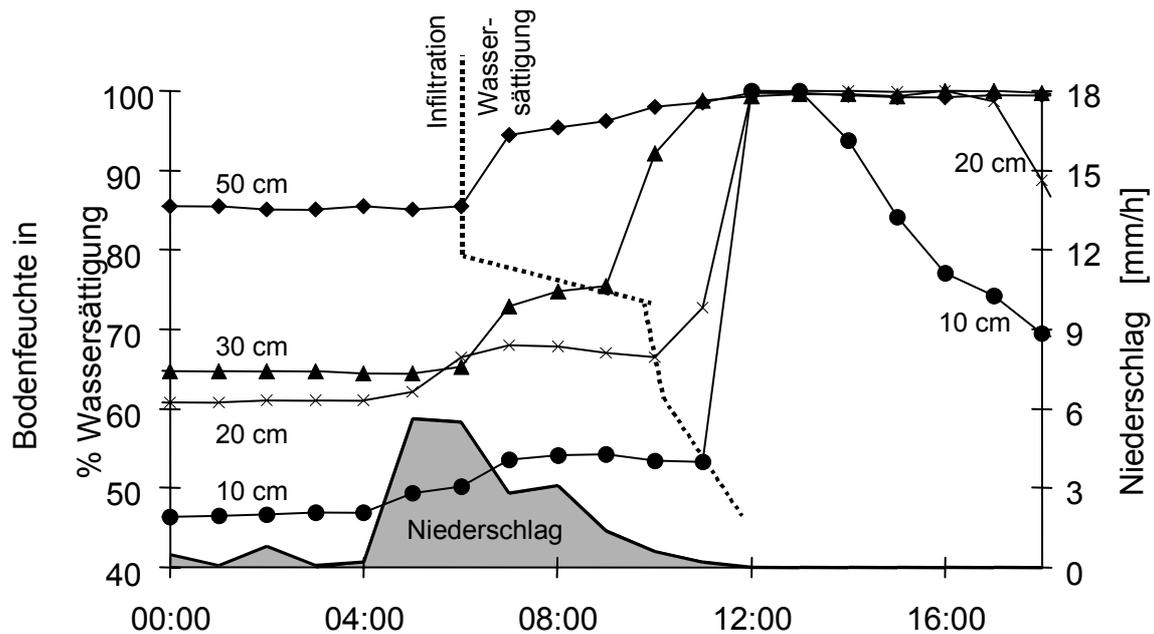


Abb. 23: Anstieg der Bodenfeuchte nach einem Niederschlag an der Wetterstation Freifläche (FF) in den Bodentiefen 10, 20, 30 und 50 cm.

Drei typische Niederschlag-Abfluss-Ereignisse (Ereignisse A, B, G, Tabelle 3) mit den dazugehörigen Reaktionen von Bodenfeuchte, Abfluss und DOC-Konzentration im Teileinzugsgebiet LE sind in Abb. 24 dargestellt. Die Niederschläge reichten von 20 mm über 43 mm bis 100 mm und verursachten alle schnelle Abflüsse. Trotz unterschiedlicher Niederschlagsintensitäten bewirkten alle drei Ereignisse einen Einbruch der DOC-Konzentration, als auf wassergesättigten Boden weitere Niederschläge fielen. An Hand von Ereignis A in Abb. 24 soll die Folge der dominierenden Abflussprozesse, die in Abb. 25 schematisch dargestellt sind, beschrieben werden:

Bei Einsetzen des Abflusses war die DOC-Konzentration niedrig. Der Abfluss dieser am schnellsten in das Gewässer gelangenden Komponenten stammte aus Niederschlag direkt in das Gewässer und überwiegend aus Abfluss von versiegelten Flächen. Im Dürreychbachtal kommt dafür nur Oberflächenabfluss von Forstwegen in Frage (Abb. 25 (ix)). Darauf folgend setzte auch Abfluss aus kleinen Flächen ein, die unmittelbar an den Bach angrenzten und schnell wassergesättigt waren (vi, vii). Ein weiterer, stärkerer Regen führte zu einer Wassersättigung des Bodens bis zur Geländeoberkante. So wurden von unten nach oben weitere laterale Abflusskomponenten aktiviert (v-vii). Die DOC-Konzentration erreichte ein erstes Maximum, nachdem laterale Abflusskomponenten durch die organische Auflage des Bodens (v) dominierten und dadurch altes Bodenwasser in den Bach transportierten, das gleichzeitig langsam, überwiegend durch lateralen Zufluss, ersetzt wurde. Eine weitere Infiltration von Regenwasser in den Boden war dann durch die Wassersättigung eingeschränkt. Dies führte zu einem Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss („saturation excess flow“), der das DOC-reiche Wasser aus dem Oberboden verdünnte und die DOC-Konzentration senkte (grau unterlegte Fläche). Sie stieg wieder zu einem neuen Maximum an, nachdem der Oberflächenabfluss zum Erliegen kam. Eine zunehmende Bodentiefe der Wassersättigung auf Grund von lateralen Abflüssen (v-vii) und Grundwasserneubildung (viii) ging einher mit einem Absinken der DOC-Konzentration, da mit zurückgehendem Gewässerabfluss der Anteil von tieferen, DOC-ärmeren Abflusskomponenten zunahm.

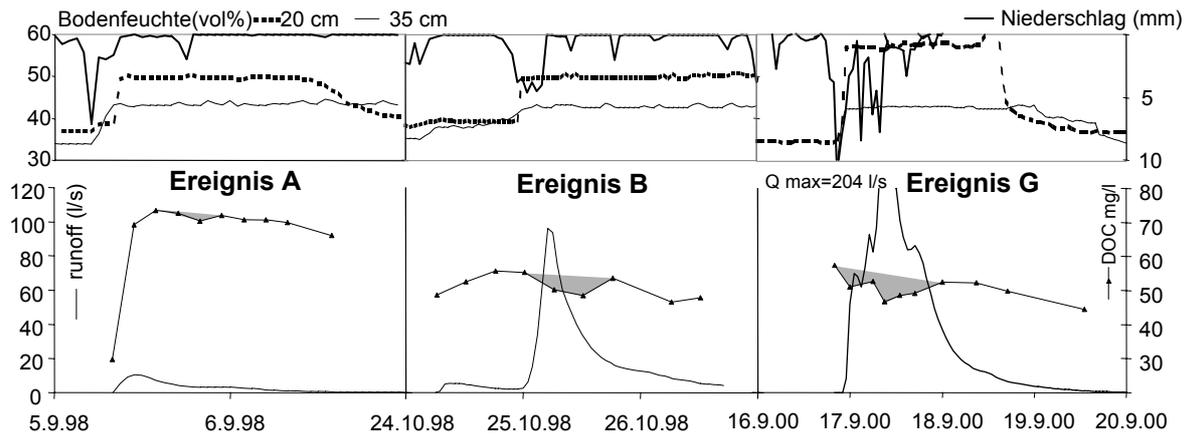


Abb. 24: Reaktion der Hochflächen auf Niederschläge bei unterschiedlichen Vorfeuchten.

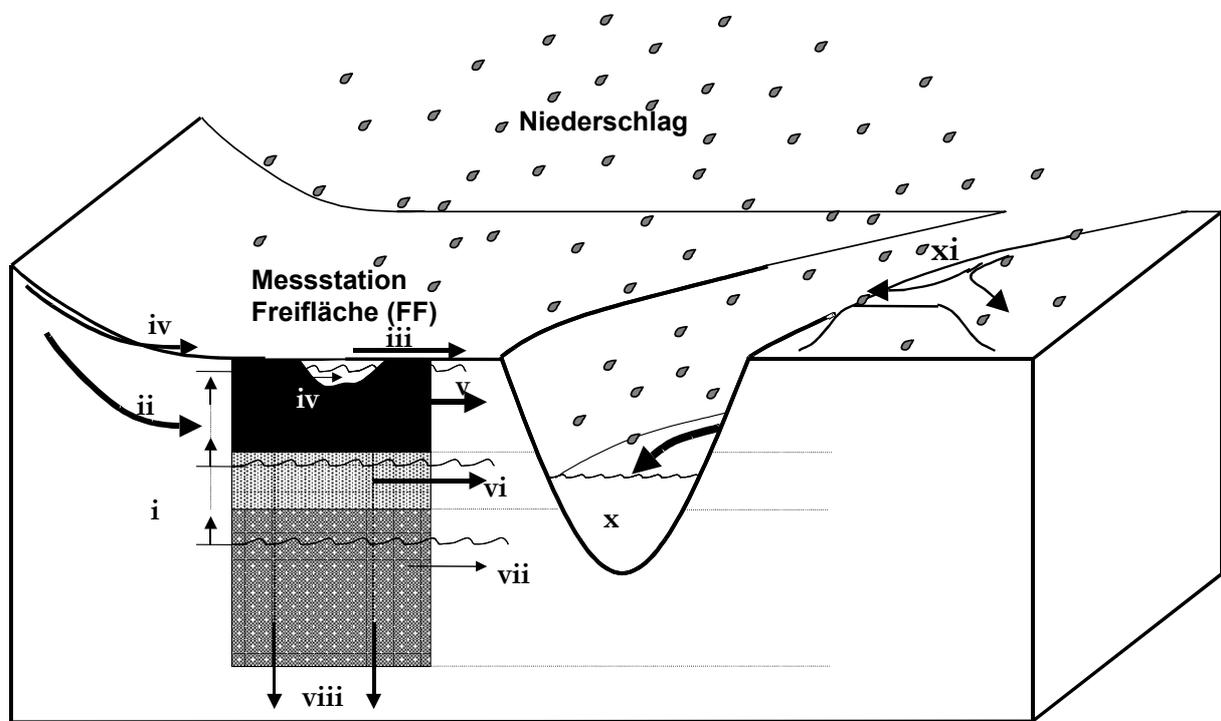


Abb. 25: Schematische Darstellung der dominierenden Abflussprozesse im Teileinzugsgebiet SH: (i) Anstieg des Wasserstandes bei Wassersättigung, (ii) lateraler Zufluss im Boden (Interflow), (iii) Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss (saturation excess flow), (iv) return-flow, (v) lateraler Abfluss (Intrflow) aus dem O-Horizont, (vi) lateraler Abfluss (Intrflow) aus dem Ah-Horizont, (vii) lateraler Abfluss (Intrflow) aus dem B-Horizont, (viii) Grundwasserneubildung, (ix) Abfluss von Wegen, (x) Gewässerabfluss.

Bei Ereignis B überdeckte der Sättigungsabfluss den Wegabfluss. Der Niederschlag hielt nach der Wassersättigung des Bodens noch länger an und hatte einen stärkeren Oberflächenabfluss zur Folge, als bei Ereignis A. Daher sank hier die DOC-Konzentration noch deutlicher.

Ereignis G wurde durch einen besonders heftigen und lang andauernden Niederschlag verursacht. Auch hier kam es zu einem erheblichen Einbruch der DOC-Konzentrationen, die dabei dennoch in ähnlicher Höhe lagen wie bei Ereignis B. Daran ist zu erkennen, dass selbst bei starken Niederschlägen der Pool an mobilisierbarem DOC nicht erschöpft wurde. Die Unterschiede der mittleren DOC-Konzentration der verschiedenen Ereignisse lassen sich vielmehr auf unterschiedliche Bodentemperaturen zurückführen.

4.4.3 Das Teileinzugsgebiet Stillwasserhütte (SH)

Gelände- und Bodeneigenschaften

Das Teileinzugsgebiet SH wies gegenüber LE ähnliche Eigenschaften auf. Mit seiner Größe von 156 ha schließt es noch eine Windbruchfläche mit ein. Der Flächenanteil an Mooren und Stagnation geprägter Böden beträgt 32%, 29,6% des Gebietes sind nach Forstlicher Standortkarte als Feuchtfläche ausgewiesen. Außerdem trägt eine periodisch schüttende Quelle ca. 50 m oberhalb des Messpegels zum Abfluss bei. Dadurch existierte hier zeitweise ein Basisabfluss. Prinzipiell konnten die gleichen Prozesse zur Bildung von schnellen Abflusskomponenten angenommen werden, wie im Gebiet LE. Durch längere Laufstrecken des Wassers auf Grund einer größeren Fläche überlagern sich diese Prozesse jedoch stärker und können nicht so gut voneinander unterschieden werden. Auch SH ist durch ein Dränagenetz gut an den Dürreychbach angekoppelt. Die Gewässerdichte beträgt 3 km/km².

4.4.4 Das Teileinzugsgebiet DÜ-SH

Das Teileinzugsgebiet, dessen Abflüsse zwischen den Pegeln SH und DÜ in den Dürreychbach gelangten, ergibt sich aus der Subtraktion der Fläche SH von der des gesamten Gebietes DÜ und wird daher im Folgenden als DÜ-SH bezeichnet.

Gelände- und Bodeneigenschaften

Morphologie, Bodeneigenschaften und Abflussdynamik dieses unteren 566 ha großen Teileinzugsgebietes unterscheiden sich deutlich von den Hochflächen. Unmittelbar unterhalb des Pegels SH schneidet sich der Dürreychbach tief zu einem Kerbtal ein. An dessen Rändern schließen sich im oberen Teil noch etwas flachere Hänge an, die überwiegend vom Hauptkonglomerat und von dessen Schuttdecken geprägt sind. Die Gewässernetzung ist mit 2 km/km^2 deutlich niedriger als bei den beiden oberen Einzugsgebieten. Der Anteil an Feuchtflächen beträgt nur 15,2%.

Beiträge zum Abfluss und zum DOC-Export können nur indirekt aus den Differenzen zwischen den Pegeln DÜ und SH errechnet werden (Kapitel 4.7 und 5.2.2). Während der langen Laufzeiten des Wassers von den Hängen bis ins Gewässer und im Gerinne zwischen Pegel SH und DÜ werden die Durchgangskurven einzelner Abflusskomponenten stark gestreckt und überlagern sich am Pegel DÜ zeitlich versetzt. Am Pegel DÜ ist dadurch eine Zuordnung von dominierenden Prozessen in ihrer zeitlichen Dynamik zu den zum Abfluss beitragenden Flächen erschwert. Information über Abfluss bildende Prozesse im Teileinzugsgebiet DÜ-SH wurden daher auf der Punkt-Skale an den Bodenprofilen 1 und 2 sowie auf der Hang-Skale durch die Beprobung von Hangaustrittswasser untersucht.

Transportprozesse im Boden an den Bodenprofilen

Ein Überblick über die DOC-Dynamik in unterschiedlichen Horizonten wurde bereits in Kapitel 4.3.1 (Abb. 12, Abb. 13) gegeben. An Hand der Zeitreihen von Bodenfeuchte und DOC-Konzentration im Bodenporenwasser werden im folgenden die Reaktionen der Hangflächen auf Niederschläge untersucht. Als Messgrößen der Bodenfeuchte standen die durch TDR-Messungen erlangten Wassergehalte (Abb. 26) und die mit Tensiometern ermittelten Wasserspannungen zur Verfügung. Die Zeitreihen bereiteten einige

messtechnische Probleme, die es notwendig machten, Informationen von Tensiometer- und TDR-Messungen zur gegenseitigen Ergänzung zu nutzen. Durch die zeitweise extreme Austrocknung der Tensiometer im Oberboden von Profil 1 kam es zu einer starken Verschiebung des Null-Punktes der Saugspannung (=100% Wassersättigung, Porenvolumen vollständig mit Wasser gefüllt). TDR-Sonden unter der organischen Auflage zeigten während intensiver Niederschläge Wassergehalte von bis zu 100% an, obwohl in der organischen Auflage nur ein Bodenporenanteil von bis zu 80% möglich ist. Unter Umständen ist dieses Messprinzip für organische Bodenhorizonte bei hohen Wassergehalten offensichtlich nicht geeignet, da es für Mineralböden kalibriert wurde. Nach einem Niederschlag kam es bei Messungen mit TDR-Sonden zwischen dem 1.1.99 und dem 13.3.99 zu einer Drift der Messwerte. Starke Wasserflüsse im Oberboden können Ausschwemmungen der Sonde verursacht haben, so dass das Porenvolumen in unmittelbarer Nähe der Sonde vergrößert wurde. Spätere Niederschläge koppelten die Sonde durch Einschwemmungen wieder enger an den Boden an.

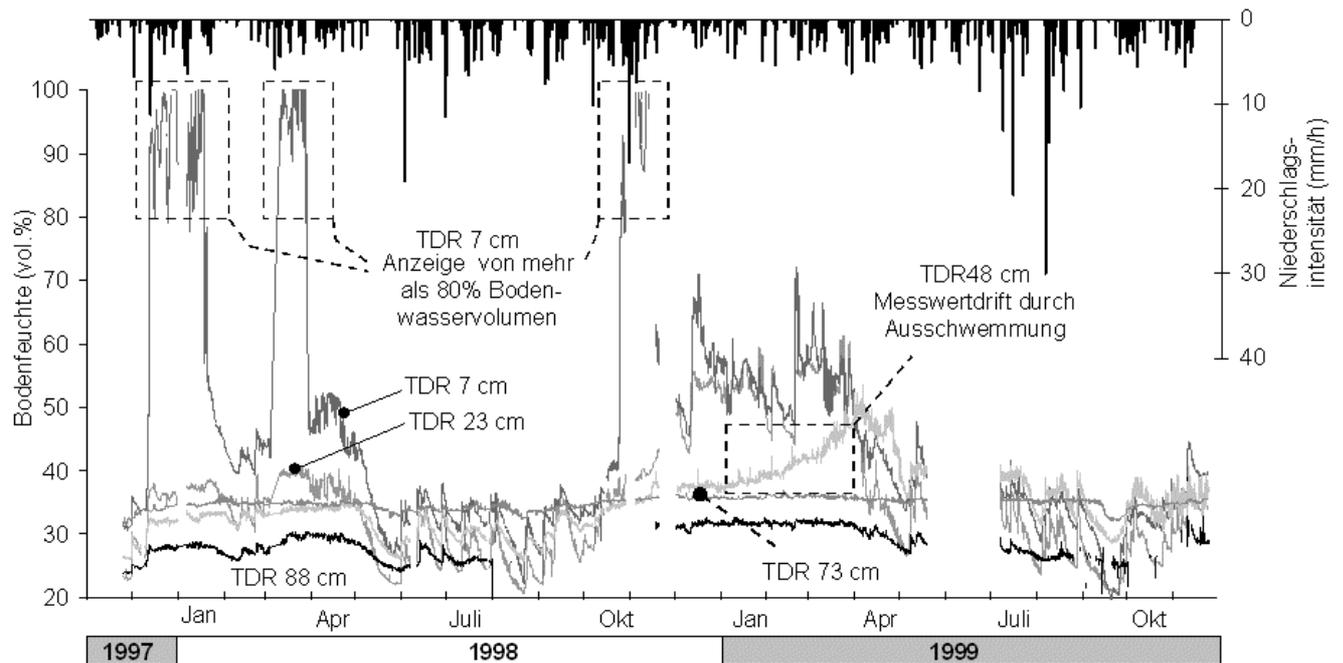


Abb. 26: Bodenfeuchte-Messungen mit TDR-Sonden am Profil 1.

In den Böden der Hochflächen fand eine Aufsättigung durch Niederschläge von unten nach oben statt. Daher ließ sich dort der Zeitraum der Wassersättigung leicht feststellen und einem Wassergehalt (in % Bodenvolumen) zuordnen (Abb. 26). Wegen der starken Hangneigung konnte an den Messprofilen dieser Sättigungsprozess bei anhaltenden Niederschlägen nicht beobachtet werden. Daher war es nur unter Zuhilfenahme von Tensiometermessungen möglich, den einzelnen Bodenhorizonten zu den Zeitpunkten mit einer Wasserspannung kleiner als 0 den angezeigten Wassergehalt in entsprechender Tiefe als Bodenporenvolumen zuzuordnen. Am Bodenprofil 1 gelang dies nur in 23 cm Tiefe. Dort betrug dann das Porenvolumen ca. 57%. Zeitweise zeigten die Tensiometer auch negative Saugspannungen an, die teilweise auf einen Überstau mit Bodenwasser zurückzuführen, teilweise durch eine Verschiebung des Null-Punktes verursacht waren. Daher wurden je nach Datenqualität und Messbereich entweder TDR- oder Tensiometerdaten benutzt und zum besseren Vergleich mit TDR-Daten entgegen der üblichen Darstellungsweise die Größenachsen umgekehrt, so dass steigende Bodenfeuchte nach oben wies.

Die Perkolationsversuche im Labor (Kapitel 4.1) haben eine deutliche Abhängigkeit der DOC Mobilität im Boden von der Bodentemperatur gezeigt. An Hand von Autokorrelationen zwischen den Zeitreihen der Bodentemperatur und der DOC-Konzentration ließ sich diese Abhängigkeit auch auf das Teileinzugsgebiet LE übertragen (Kapitel 4.5.2.) und sollte auch an den Bodenprofilen überprüft werden. Bei den durchgeführten Autokorrelationen waren sowohl das Temperaturmittelungsintervall wie auch der Zeitversatz zwischen DOC-Probennahme und der ihr zugeordneten Bodentemperatur variabel. Außerdem kamen Korrelationen mit Temperaturen aus unterschiedlichen Bodentiefen zur Durchführung. In den folgenden Abbildungen wurden die Autokorrelationen mit den höchsten Korrelationskoeffizienten ausgewählt und dargestellt.

Profil 1

In 7 cm Tiefe korrelierten die DOC-Konzentrationen gut mit den mittleren Tagestemperaturen, die jeweils drei Tage vor der DOC-Messung herrschten (Abb. 27). Die Bodenwasserlösungen, die mit Saugkerzen in unterschiedlichen Bodentiefen gewonnen wurden, wiesen aber heterogene Muster im Zeitverlauf der DOC-Konzentration auf. So ergaben sich für die drei Probestellen in gleicher Tiefe drei unterschiedliche Regressionsgeraden mit unterschiedlich starker Streuung der Messwerte. Für die Wasserproben der Saugkerze S8 wurde der kleinste Korrelationskoeffizient ermittelt. Dies spiegelt die starke kleinräumige Variabilität des Bodens wider, die von Erosion und Akkumulation organischer Substanz, der Vegetationsverteilung, dem Muster von Kronen- und Zwischenkronenbereich eines Bestandes sowie dem hohen Bodenskelettanteil durch Geröll und evtl. weiteren Faktoren geprägt wurde. Ein Teil der Streuung um die Regressionsgerade kann durch eine Vermischung von DOC-reichem Feinporenwasser und Grobporenwasser aus Niederschlag zu erklären sein. Darüber hinaus war es wegen der hohen Porosität der organischen Auflage schwierig, die Saugkerzen gut an die Bodenmatrix anzukoppeln,

Ergebnisse

wodurch sie Bodenwasser aus Poren mit unterschiedlicher Größenverteilung entnahmen. Porenwasser aus Feinporen unterliegt auf Grund einer höheren Saugspannung einer höheren Verweilzeit im Boden, als Wasser in Grobporen. So kann man in Feinporen durch einen längeren Lösungsvorgang von organischer Substanz im Wasser mit höheren DOC-Konzentrationen rechnen.

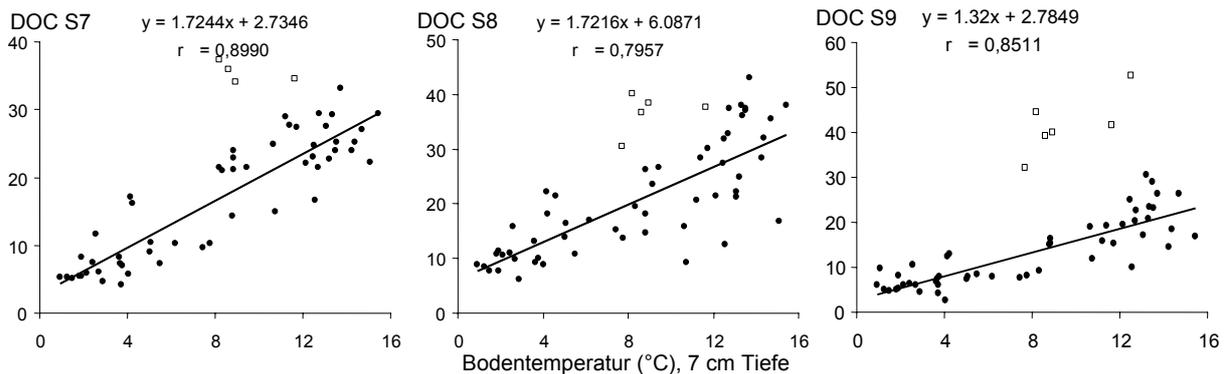


Abb. 27: Korrelation von DOC-Konzentration (Saugkerzen S7, S8, S9) und Bodentemperatur in 7 cm Tiefe mit einer Zeitachsenverschiebung von 3 Tagen.

In Phasen geringer Wasser- und Stoffflüsse konnte ein DOC-Pool im Boden durch Lösung und Diffusion an Aggregatoberflächen mobilisiert werden, der während Niederschlägen durch Transport mit dem Wasser aufgenommen wurde. Dennoch sank selbst während intensiver Niederschläge die DOC-Konzentration nicht deutlich unter den aus der Temperaturkorrelation errechneten Wert. Der zur Lösung in Bodenporenwasser zur Verfügung stehende Pool an organischer Substanz war offensichtlich groß genug, um für größere Mengen an Niederschlag eine von der Bodentemperatur gesteuerte Menge an DOC zur Verfügung zu stellen. Deutliche Abweichungen von der aus der Bodentemperatur erwarteten DOC-Konzentration traten lediglich zwischen dem 6.10.99 und 17.11.99 auf (Abb. 27). Nach extremer Trockenheit, gefolgt von hohen Niederschlägen, kam es in diesem Zeitraum zu erhöhten DOC-Konzentrationen.

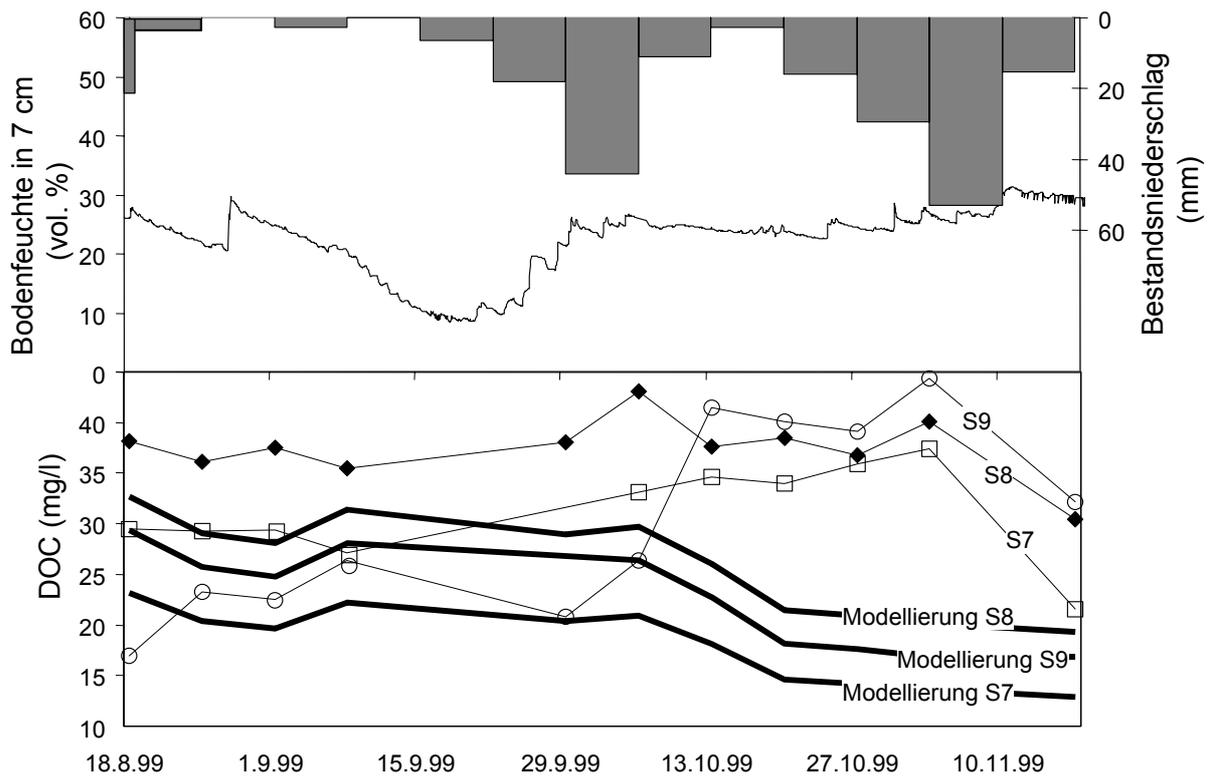


Abb. 28: Aus den Temperaturkorrelationen berechnete Erwartungswerte der DOC-Konzentrationen in der organischen Auflage während einer Wiederbefeuchtung nach starker Austrocknung.

Bis in tiefere Horizonte fand eine Temperaturübertragung innerhalb von nur ein bis zwei Stunden statt. In diesem Zeitraum pflanzten sich die Tagestemperaturschwankungen fort. Dennoch konnte die DOC-Dynamik in den Tiefen von 20 bis 78 cm deutlich besser mit Bodentemperaturen bei einem zeitlichen Versatz von 13 bis 80 Tagen korreliert werden (Abb. 28, Abb. 29).

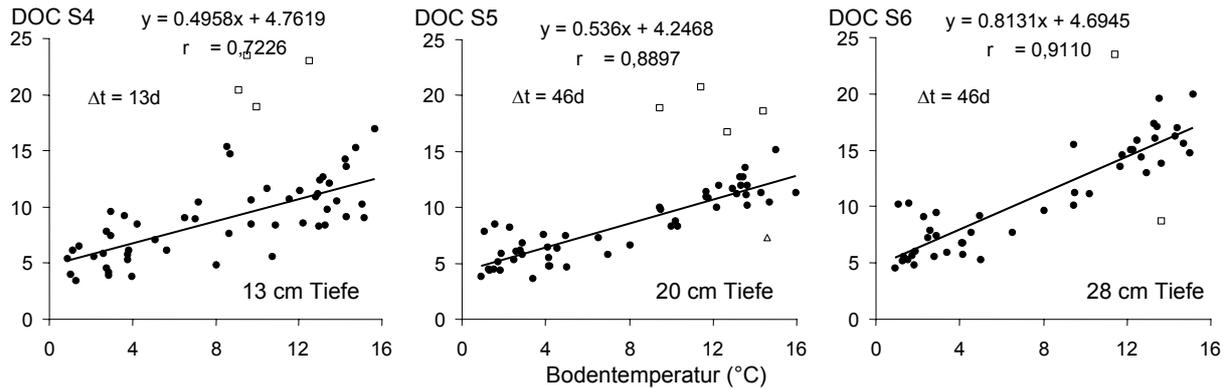


Abb. 29: Die optimalen Korrelationen von DOC-Konzentration in 13 bis 28 cm Tiefe (Saugkerzen S4-S6) und Bodentemperatur in 7 cm Tiefe: Zeitachsenverschiebung von 13 bis 46 Tagen.

Bis in 70 cm Tiefe stieg die zeitliche Verzögerung der Abhängigkeit von DOC-Konzentration und Bodentemperatur auf 80 Tage an. Die Schärfe der linearen Regressionen nahm dabei deutlich ab (Abb. 30). Diese Tendenz wurde zwischen 70 und 78 cm unterbrochen. Trotz einer Verzögerung von 80 d nahm die Schärfe der Temperatur-DOC-Regression wieder zu. Bei einem nur vertikal nach unten gerichteten DOC-Fluss ist ein solcher Sprung nicht erklärbar. Hier muss angenommen werden, dass DOC in 78 cm Tiefe lateral transportiert wurde und aus Flächen mit schnellerem vertikalen Transport stammte.

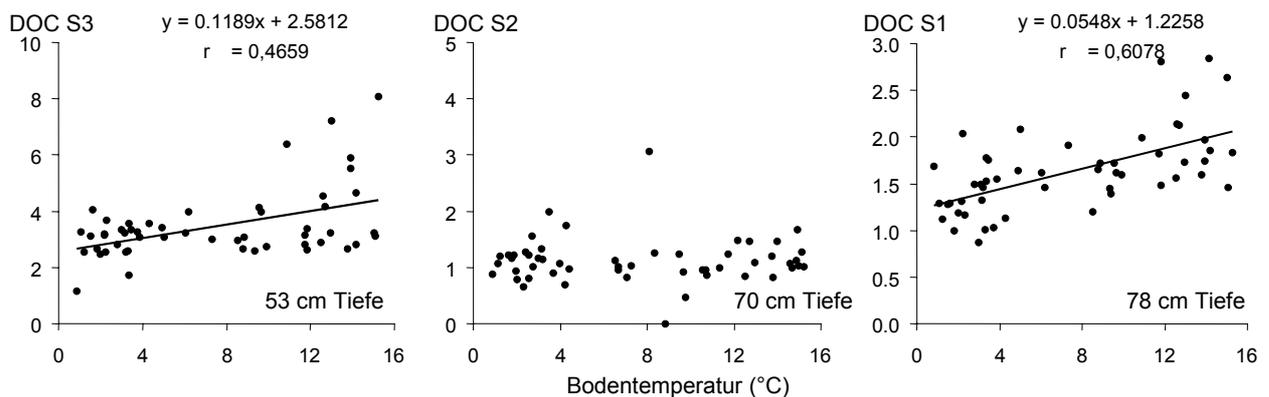


Abb. 30: Die optimalen Korrelationen von DOC-Konzentration in 53 bis 78 cm Tiefe (Saugkerzen S1-S3) und Bodentemperatur in 7 cm Tiefe: Zeitachsenverschiebung von 80 Tagen.

Ergebnisse

In Abb. 31 sind zwei Niederschlag-Abfluss-Ereignisse mit der Bodenfeuchtedynamik in unterschiedlichen Tiefen am Profil 1 während eines Zeitraumes mit feuchteren Bedingungen abgebildet. Zwischen dem Bodenfeuchteanstieg in 7 cm und 73 cm Tiefe lag eine Verzögerung, die kleiner war als die zeitliche Auflösung durch die Messintervalle von einer Stunde. Die Feuchtefront benötigte somit höchstens 1 h zur Ausbreitung über eine Tiefe von 66 cm. Daraus ergab sich eine Fließgeschwindigkeit von mindestens $2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Hingegen lag die Übertragung von Mobilisierungsprozessen im Oberboden in die Tiefe gemäß der Ermittlung durch Autokorrelationen von Temperatur und DOC-Konzentration nur im Bereich von 10^{-7} m s^{-1} . Dies deutet auf die Existenz von zwei Systemen des wässrigen Stofftransportes hin: Transport von DOC-reichem Wasser in Feinporen und im wasserungesättigten Bereich bzw. gesättigter Wassertransport von DOC-ärmerem Wasser über der Makroporen.

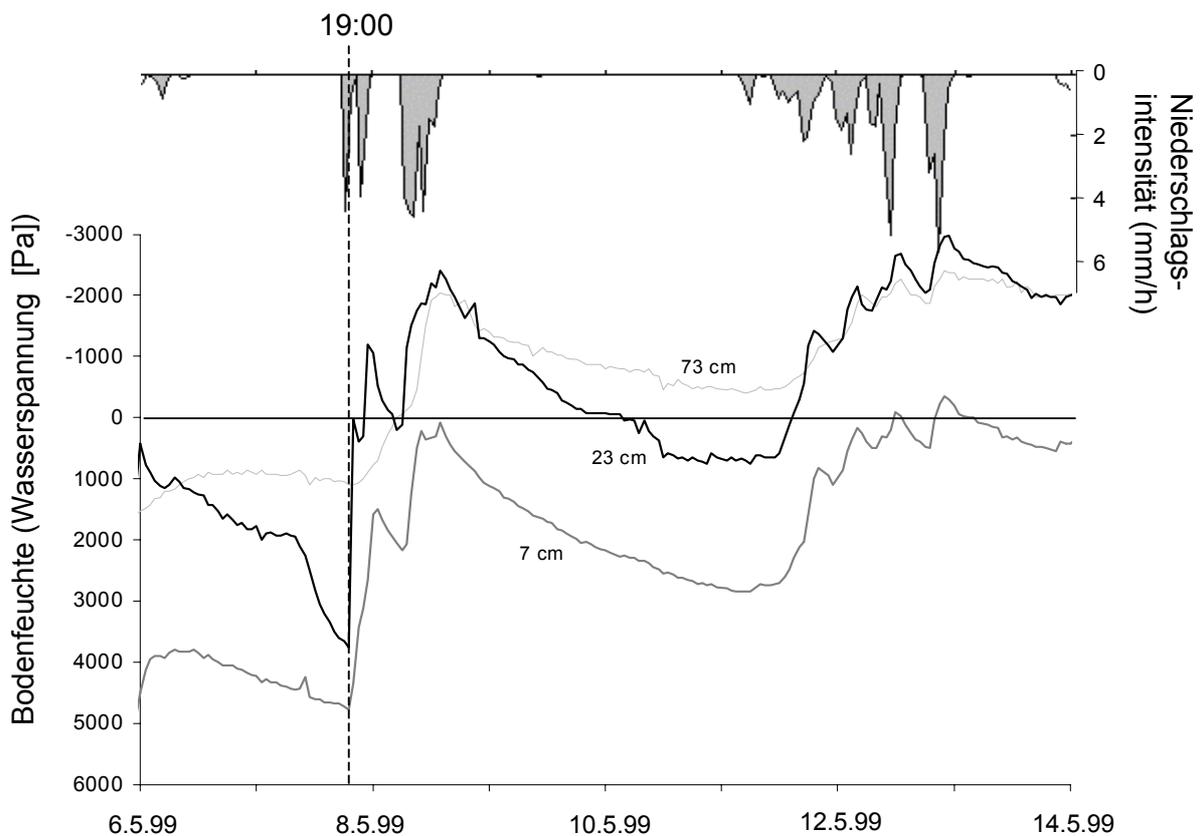


Abb. 31: Bodenfeuchtedynamik am Profil 1 in den Tiefen 7, 23 und 73 cm. Die Bodenfeuchte ist als Wasserspannung dargestellt und wurde mit Tensiometern erfasst.

Profil 2

Wie schon Abb. 14 gezeigt hat, unterlagen die DOC-Konzentrationen am Profil 2 geringeren zeitlichen Schwankungen als am Profil 1. Dennoch waren hier die wetterabhängigen Temperaturschwankungen größer. Dies erklärt sich teilweise aus der flacheren Hangneigung und stärkerer Sonnenexposition. Bei Sonneneinstrahlung heizte sich der Boden stärker auf, im Winter konnten sich nachts in der Muldenlage kalte bodennahe Luftschichten ausbilden. Darüber hinaus kann sich aber auch der Wasserhaushalt des Bodens auf die Temperaturdynamik auswirken. Der Boden unterlag im Sommer einer starken Austrocknung. Infolge dessen ließ sich auch im A-Horizont zwischen Ende Juni und Anfang September 1998 nicht genügend Bodenwasser für DOC-Analysen gewinnen. Die Tiefenausbreitung von Bodenwasser nach Niederschlägen ließ unterschiedliche Prozesse in Abhängigkeit von der Vorfeuchte des Bodens erkennen (Abb. 32). Durch einen Niederschlag bei sehr trockenem Zustand (Abb. 32a) setzte eine Erhöhung der Bodenfeuchte über den gesamten Profilschnitt bis 22 cm Tiefe gleichzeitig ein, in 5 cm Tiefe dauerte der Bodenfeuchteanstieg jedoch länger bis ein Maximum erreicht wurde. Zwischen 39 cm und 60 cm Tiefe setzte erst eine Zunahme des Wassergehaltes nach 100%iger Wassersättigung in 21 cm Tiefe ein. Bei Trockenheit benötigte das Niederschlagswasser längere Zeit, um das große Porenvolumen des Oh-Horizontes aufzufüllen. Feinere Poren im mineralischen Oberboden füllten sich wegen der geringen Fließgeschwindigkeit nur langsam mit Wasser auf. Über Makroporenfluss passierte das Wasser in dieser Zeit den Oberboden und gelangte in tiefere Horizonte, die sich auf Grund eines kleineren Porenvolumens und einer höheren Restfeuchte schneller aufsättigen konnten. In Form von gesättigtem Porenfluss füllte das Wasser dann auch die Horizonte in 39 cm und 60 cm Tiefe an.

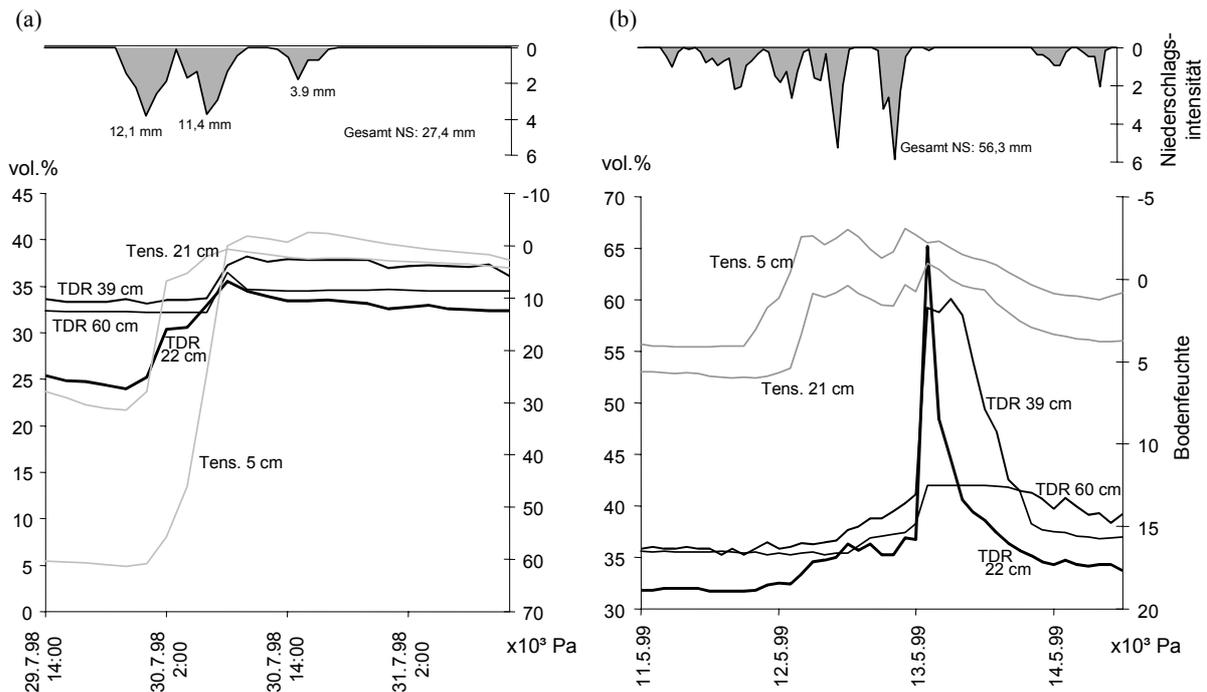


Abb. 32: Tiefenausbreitung von Bodenwasser am Profil 2 nach Niederschlagsereignissen bei (a) trockenen und (b) feuchten Vorbedingungen.

Durch einem Niederschlag unter feuchtem Ausgangszustand verzeichnete der Oberboden als erstes einen Anstieg der Bodenfeuchte. Das freie Porenvolumen war durch Restwasser kleiner und dadurch schneller aufgefüllt als bei trockenem Ausgangszustand. Wassertransport in tiefere Bodenbereiche konnte sofort in Form von ungesättigtem und gesättigtem Porenfluss stattfinden. Zwischen 5 cm und 21 cm Tiefe erzeugten weitere Niederschläge auf Überstau zurückzuführende und daher über der Wassersättigung liegende Druckmaxima. In 39 cm und 60 cm Tiefe kam es durch die anhaltenden Niederschläge zu einem kontinuierlichen Anstieg des Wassergehaltes. In 60 cm Tiefe fand mit ca. 42 Vol.% die Wassersättigung statt. Die TDR-Sonden in 22 cm und 39 cm Tiefe verzeichneten nach dem letzten Niederschlagschub steile Anstiege des Wassergehaltes auf über 55 Vol.%. Hier ist es wahrscheinlich zu Ausspülungen der Sonden gekommen, die auch durch laterale Wasserflüsse im Boden verursacht sein konnten. Bei heftigen Niederschlägen und sehr nassem Gebietszustand wurden am Profil 2 Wasseraustritte aus Wurzelröhren, Tiergängen und Subrosionsrinnen beobachtet, die streckenweise zu einem oberflächigen Abfluss über das Messprofil führten.

Ergebnisse

Die Aufsättigung des Bodens an diesem Standort ist überwiegend aus seiner Lage in einer leichten Verebnung zu erklären, wo die Abflussakkumulation größer ist, als in steileren Hanglagen.

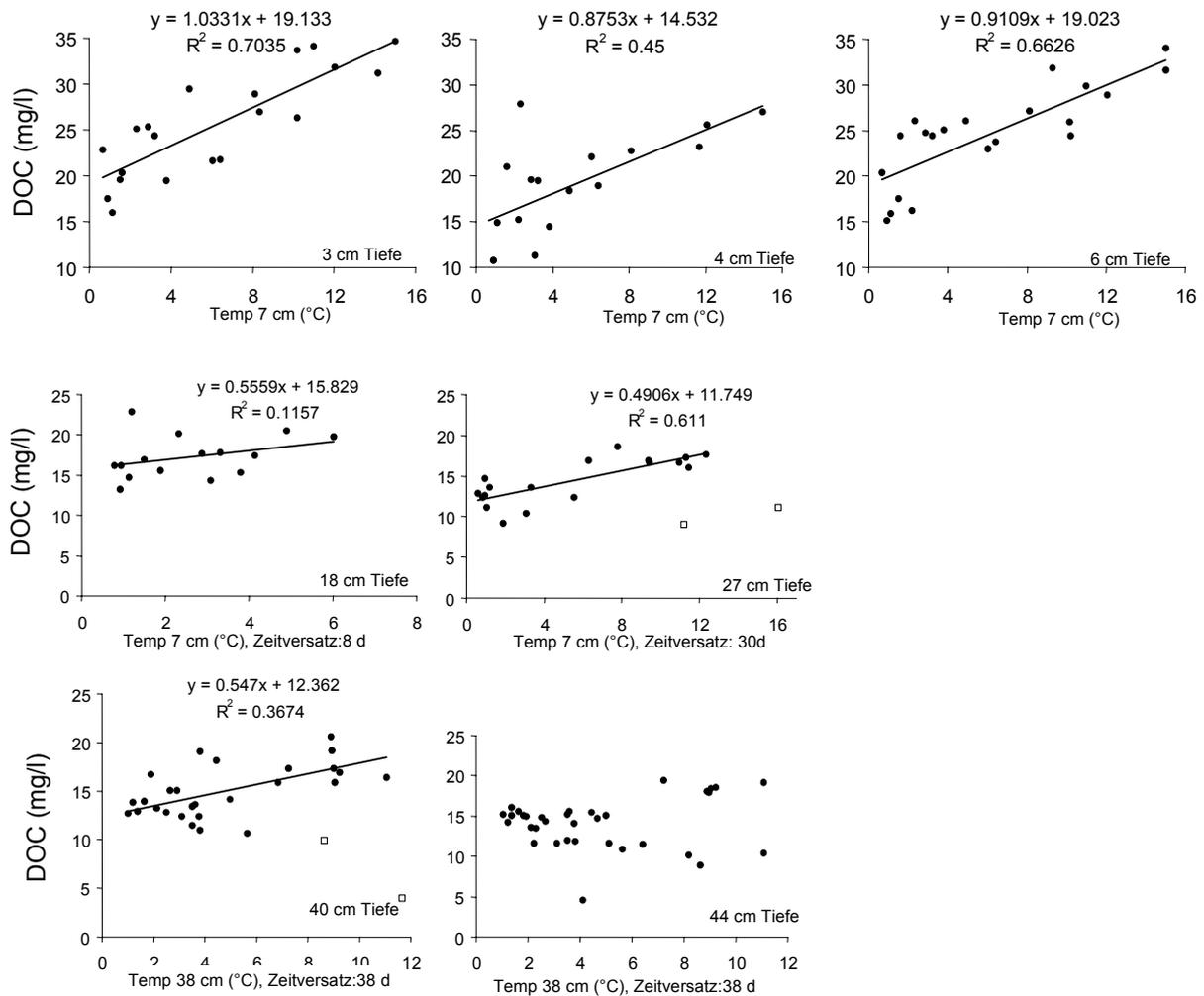


Abb. 33: Korrelation von DOC-Konzentration und Bodentemperatur am Profil 2.

Am Profil 2 korrelierte die DOC-Konzentration schlechter mit der Temperatur, als am Profil 1. Mit den Messwerten des Oberbodens wurde ein maximales Bestimmtheitsmaß von 0,7035 berechnet, das mit zunehmender Bodentiefe stark abnahm (Abb. 33). In 44 cm Tiefe ließ sich kein Zusammenhang mehr zwischen Bodentemperatur und DOC-Konzentration im Bodenwasser feststellen. Zum einen kann eine Überlagerung von unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten eine Überdeckung der temperaturabhängigen DOC-Mobilisierung im

Oberboden erzeugt haben. Außerdem enthielt der Mineralboden des Profils 2 einen größeren Humusanteil als Profil 1. Er stellte zum einen selbst eine Quelle für DOC im Bodenwasser dar. Zum anderen besaß er aber wegen seines höheren Tongehaltes (siehe Profilbeschreibung im Anhang) eine größere Adsorptionsfähigkeit für DOC. Dadurch konnten Schwankungen des Boden-DOC verringert werden.

Untersuchung von Abflussprozessen an den Hangflächen durch Beprobung von Hangaustrittswasser

An Hängen des Teileinzugsgebietes DÜ-SH sollte untersucht werden, ob sich oberflächennahe Abflüsse durch den Hang hindurch bis in das Gewässer verfolgen lassen. Dazu müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Für die Bildung einer lateralen Abflusskomponente ist zunächst eine wasserstauende Schicht notwendig, ohne die infiltrierendes Wasser tiefere Bodenhorizonte erreichen würde oder durch das anstehende Gestein perkoliert und so zu Grundwasserneubildung führt. Auf Grund der im Nordschwarzwald typischen bodenbildenden Prozesse finden sich auch im Dürreychbachtal häufig kompakte Bänder aus Ortstein (WALDENMEYER 1999). Man kann dabei jedoch nicht von einer großflächigen Durchgängigkeit solcher Konkretionen ausgehen. Die Ausdehnung solcher Flächen ist noch umstritten. Dennoch ist es vorstellbar, dass bei ausreichend hohen Perkolationsraten über den Ortstein ablaufendes Wasser auch an den ortsteinfreien Flächen die Wasserleitfähigkeit überschritten wird und somit sich lateraler Abfluss fortsetzen kann. Eine weitere Möglichkeit zur Ausbildung von Stauhorizonten bei genügend hoher Bodenfeuchte und hohen Niederschlagsintensitäten stellen Sprünge in der ungesättigten Wasserleitfähigkeit dar, wie sie z.B. zwischen der organischen Auflage und dem Ah-Horizont möglich sind.

Bei Flächen, die durch eine zu große Distanz nicht direkt an einen Vorfluter angeschlossen sind, ist eine Erfassung von Abflussprozessen durch Messungen im Gewässer kaum möglich. Das Teileinzugsgebiet DÜ-SH wird nur durch das Hauptgerinne des Dürreychbaches und die periodisch wasserführenden Gewässerrinnen der Hirschklinge und der Forsthausklinge entwässert. Obwohl die Höhenrücken den Hochflächen des Einzugsgebietes LE ähnlich sind und laterale Abflüsse aus Sättigungsflächen vermuten lassen, können deren oberflächennahe Abflüsse meist nicht direkt in das Gewässernetz gelangen. Dennoch lassen sich an Hängen laterale Abflusskomponenten auch gewässerfern noch gut an Geländeanrissen untersuchen. Im Dürreychbachtal bieten zahlreiche Forstwege und Rückegassen diese Möglichkeit. Werden laterale Abflüsse im Boden angeschnitten, so können sie an dieser Stelle an die Oberfläche treten. Dadurch ist ein Abflussweg zunächst unterbrochen. An Wegen wird das Wasser meist in Gräben gesammelt, wo es ein Stück weit wegeparallel weiterfließt. An den Hängen des Dürreychbachtals gelangt es aber an Abschlagen wieder durch Versickerung in den Boden. Um den Einfluss der Hangflächen dieses Teileinzugsgebietes auf die Abflussdynamik und den Kohlenstoffexport einschätzen zu können, wurden Untersuchungen zur Anbindung der Hänge an den Dürreychbach durchgeführt. Durch eine Beprobung von Wasseraustritten an den Hängen Stillwasser und Häuserwald (Abb. 35a) während eines Niederschlagsereignisses sollte festgestellt werden, ob hangparallele Abflüsse im Oberboden auf den Hochflächen oder an den Hängen generiert werden, und ob sie lateral ins Gewässer gelangen können.

Eine flächenhafte Beprobung von Wasseraustritten an zwei Hängen des Dürreychbachtals wurde am 23.03.2001 nach heftigen und lang andauernden Regenfällen während des abfallenden Astes der Abflussganglinie vorgenommen (Abb. 34). Am Verlauf der Abflusskurve ist zu erkennen, dass die schnellsten Abflusskomponenten bereits den Messpegel am Einzugsgebietauslass passiert hatten.

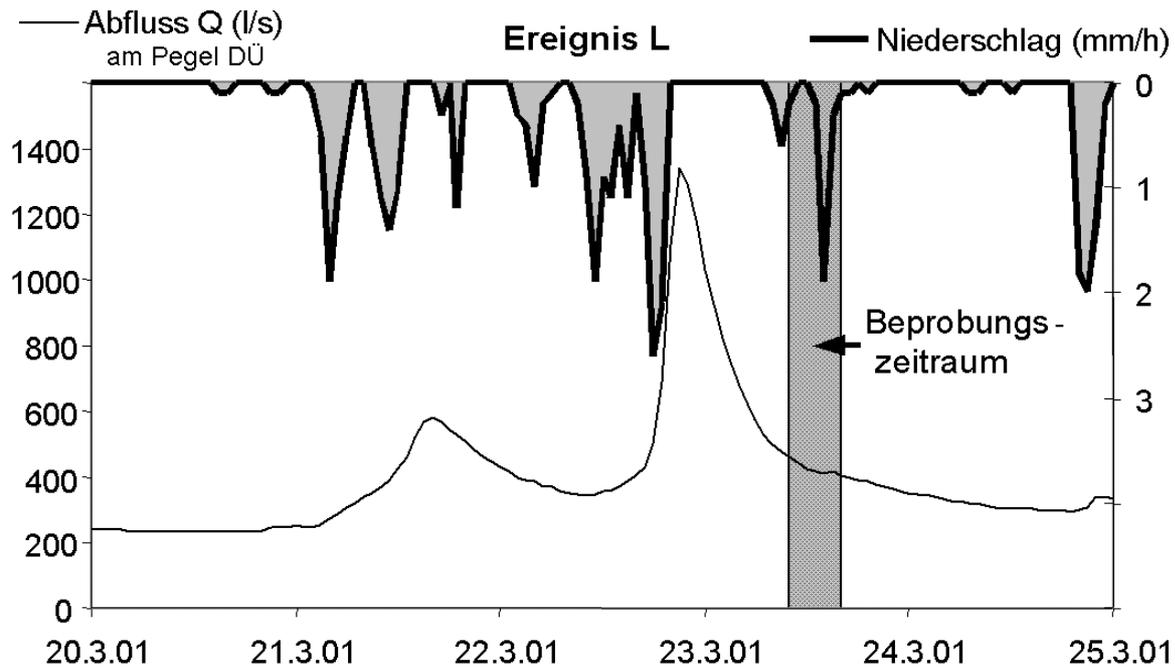


Abb. 34: Gebietszustand am 23.3.2001. Die Abflusskurve bezieht sich auf den Pegel DÜ, Niederschlagsintensitäten auf FF.

Obwohl die Abflussreaktionen des Dürreychgebietes häufig schon nach ein bis zwei Tagen wieder zu ihrem Basisabfluss abfielen, konnten zur Zeit der Probennahme wegen der immer noch sehr hohen Bodenfeuchten zahlreiche Wasseraustritte an Hanganrissen beobachtet werden. Die Probestellen erstreckten sich über eine Höhe von 810 bis 930 m ü. NN am Hang Stillwasser bzw. von 610 bis 780 m ü. NN am Hang Häuserwald (Abb. 35a).

Der Hang Häuserwald repräsentiert einen typischen Steilhang im Geröllfreien Bausandstein des unteren Dürreychbachtals. Er hat ein mittleres Gefälle von 30% mit einem gestreckten Oberhang, einem schwach konkaven Unterhang und einer Hangtreppe am Hangfuß, die aus einer Hochterrasse besteht (Abb. 35b). In horizontaler Richtung ist der Hang leicht konvex. Der Hang Stillwasser liegt am oberen Ende des Kerbtals im Hauptkonglomerat und den sich unterhalb davon anschließenden Geröllfreien Hauptbuntsandstein und durch deren Blockschutt überlagerten Flächen. Sein mittleres Gefälle beträgt 20%. Im Gegensatz zum Häuserwald wird der Hang Stillwasser von einer fast ebenen Misenfläche abgeschlossen. Der

Oberhang ist konvex, am Hangfuß befindet sich eine leichte Verebnung, an die sich Blockmassen und der Einschnitt des Dürreychbaches anschließen.

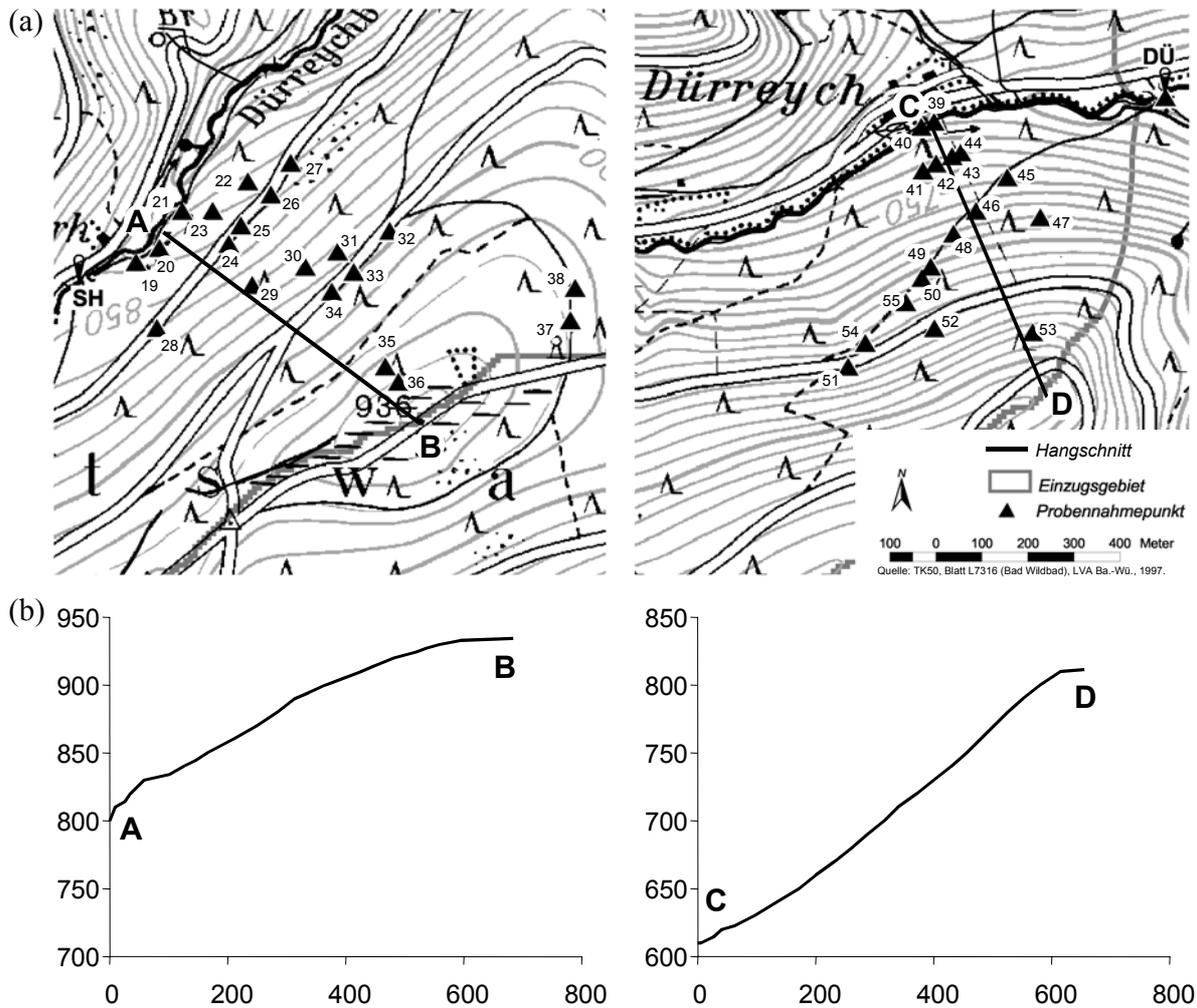


Abb. 35: Probennahmestellen am Hang Stillwasser (links) und Häuserwald (rechts) am 23.3.2001 mit ihren Hangprofilen.

Wasseraustritte und Probestellen

Durch die hohe Gebietsfeuchte trat an zahlreichen Stellen Wasser an Hanganschnitten von Wegen aus, das meist auffällig gelbbraun gefärbt war. Durch die anhaltenden Niederschläge bildeten am Hang Stillwasser dann Abflüsse über Weggräben und Abschlänge ein ausgeprägtes aber nicht zusammenhängendes Gewässernetz. Es wurde durch oberflächennahen Abfluss

gespeist, dessen Lauf durch Böschungen angeschnitten war. Die Messpunkte der jeweiligen Flächen lagen zwar nicht auf einer Abflusslinie entlang des Geländeprofiles, standen jedoch durch Weggräben teilweise miteinander in Verbindung. Die meisten Wasseraustritte waren schon zwei Tage später wieder versiegt. Die Beprobung der Wasseraustritte erfolgte an einigen repräsentativen Punkten möglichst nah an der Austrittsstelle. Die DOC-Konzentrationen zeigten eine deutlich größere Spannbreite am Häuserwald als am Hang Stillwasser. Hier konnte auch ein Anstieg des DOC mit zunehmender Geländehöhe festgestellt werden. An einem tiefen Hanganschnitt am Dürreychbach ließen sich Wasseraustritte in bis zu 4 m Tiefe beobachten (Abb. 35, Probestellen 19, 20, 21), die dort DOC-Konzentrationen bis zu 37 mg C l^{-1} aufwiesen (Abb. 36).

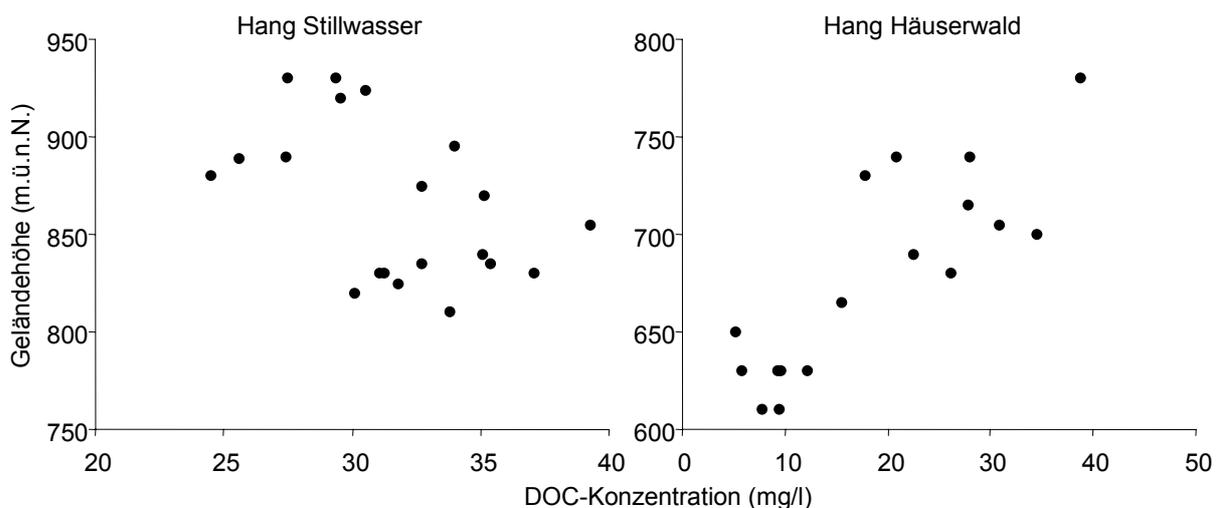


Abb. 36: Auftragung von DOC-Konzentration gegen die Geländehöhe

Absorptionen bei 254 nm und 436 nm korrelierten sehr stark mit der DOC-Konzentration. Diese Parameter gaben daher kaum Aufschluss über eventuelle Unterschiede in der Zusammensetzung des DOC und wurden daher nicht zur qualitativen Beschreibung des DOC herangezogen.

Fluoreszenzspektren

Ergebnisse

Die synchronen Fluoreszenzspektren zeigten alle ein charakteristisches Muster mit einem Hauptpeak und mehreren Schultern zum längerwelligen Bereich hin. Um die Spektren besser vergleichen zu können, sind sie auf 357 nm normiert dargestellt (Abb. 37).

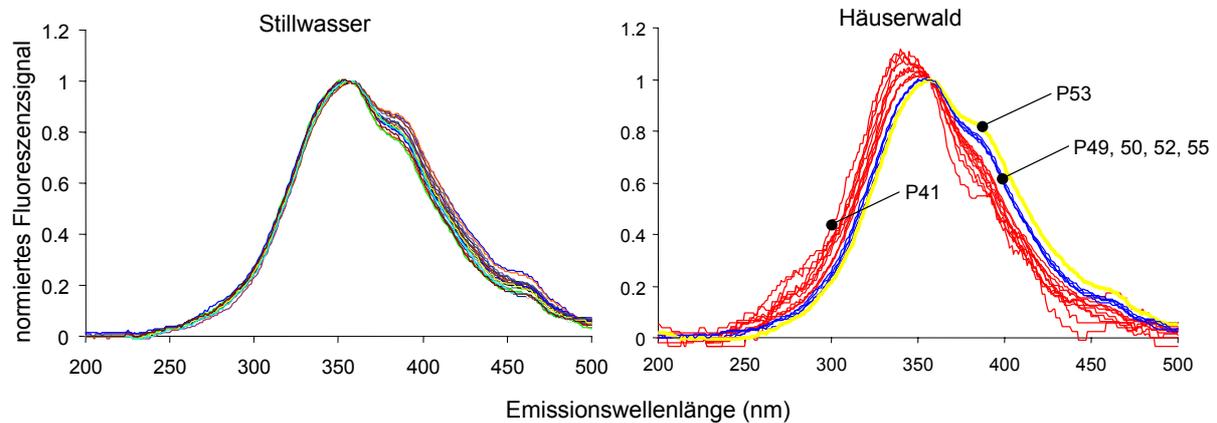


Abb. 37: Auf 357 nm normierte synchrone Fluoreszenzspektren der Wasserproben von Häuserwald und Stillwasser, mit $\Delta\lambda = 60$ nm.

Während sich die Proben vom Hang Stillwasser kaum voneinander unterschieden, waren die Fluoreszenzspektren am Häuserwald heterogener. Dort ließ sich eine graduelle Abstufung der Spektren erkennen, die sich zwischen den Proben P53 und P41 erstreckte. Außerdem bilden die Spektren von P49, P50, P52 und P55 eine Kurvenschar mit sehr ähnlichem Verlauf. Zur detaillierten Analyse wurden die gemessenen Spektren rechnerisch in einzelne operationelle Komponenten in Form von Gauss-Verteilungskurven aufgetrennt, für eine Kurvenanpassung der Spektren ein Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 470 nm gewählt. Vier Fluoreszenzkomponenten (A - D) ermöglichten eine gute Kurvenanpassung. Eine solche Anpassung ist beispielhaft in Abb. 38 dargestellt. Die dabei entstandenen Residuen in den Spektralbereichen zwischen 300 nm und 470 nm wurden beim Vergleich der Wasserproben außer Acht gelassen, da dort die Messsignale ein zu starkes Hintergrundrauschen zeigten.

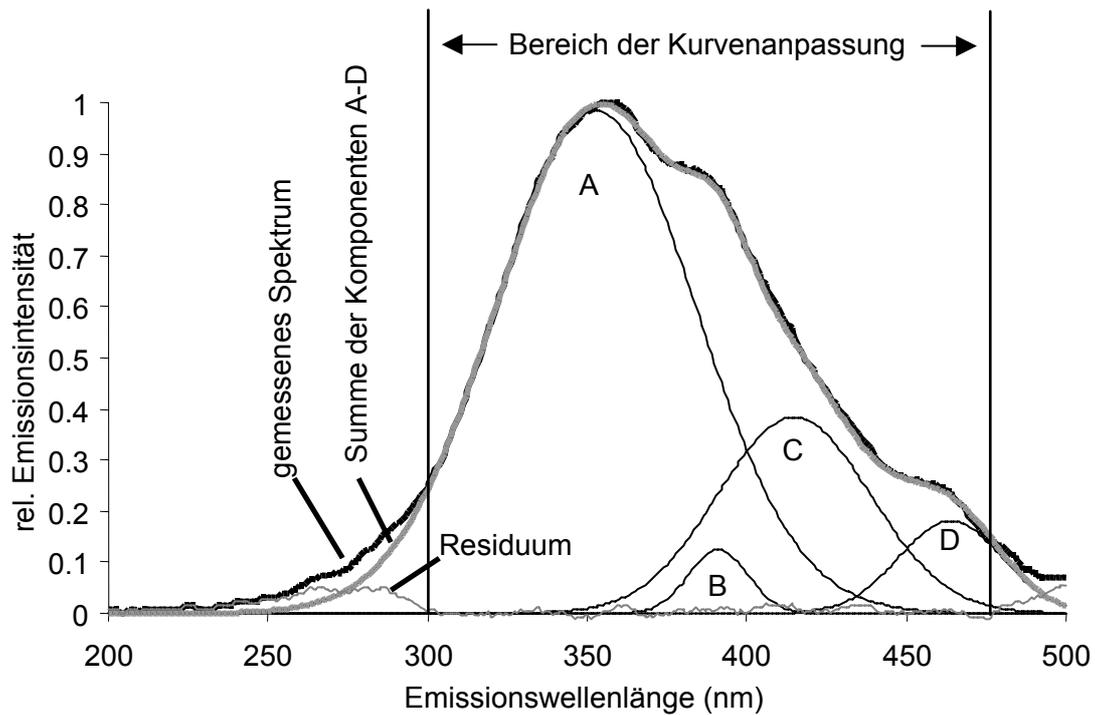


Abb. 38: Zerlegung des Fluoreszenzspektrums der Probe P19 in vier Komponenten mit einer Anpassung zwischen 300 und 470 nm.

Alle Spektren wiesen eine Hauptkomponente A mit einem Maximum zwischen 340 und 360 nm auf. Die meist sehr kleine Komponente B prägte ein Fluoreszenzmaximum zwischen 370 und 390 nm. Aus der zweiten Schulter ließ sich Komponente D mit Maxima zwischen 430 und 470 nm ableiten. Die breite, meist zweitgrößte Komponente C ging aus der Streckung der Spektren zwischen den beiden Kurvenhöckern hervor. Die Spektralkomponente A zeichnet sich durch Lage und Höhe ihres Schwerpunktes am deutlichsten von den übrigen Komponenten ab. Beim Vergleich der Spektralkomponenten wurde vor allem auf Unterschiede der Lage der Schwerpunkte geachtet. Die Erhöhung der Amplitude mit zunehmender Entfernung zwischen den Schwerpunkten von Normkurve und Spektralkomponente war ein aus dem Normierungsverfahren bedingter Effekt. Durch die starke Überlappung der Komponenten B, C und D können Verschiebungen der Schwerpunkte durch eine hohe Variabilität bei der Kurvenanpassung bei Proben mit kleinen Fluoreszenzsignalen entstanden sein. Einen Vergleich der aufgetrennten Fluoreszenzkomponenten verdeutlicht

Abb. 39. Traten bei unterschiedlichen Proben Spektralkomponenten mit gleichem Schwerpunkt, aber mit unterschiedlicher Höhe auf, wurde der Anteil einer DOC-Komponente zu Gunsten einer anderen zurückgedrängt. Auf Grund ihrer operationellen Definition veränderte sich bei einer Verschiebung des Schwerpunktes die chemische Charakteristik der ausgegliederten Spektralkomponente.

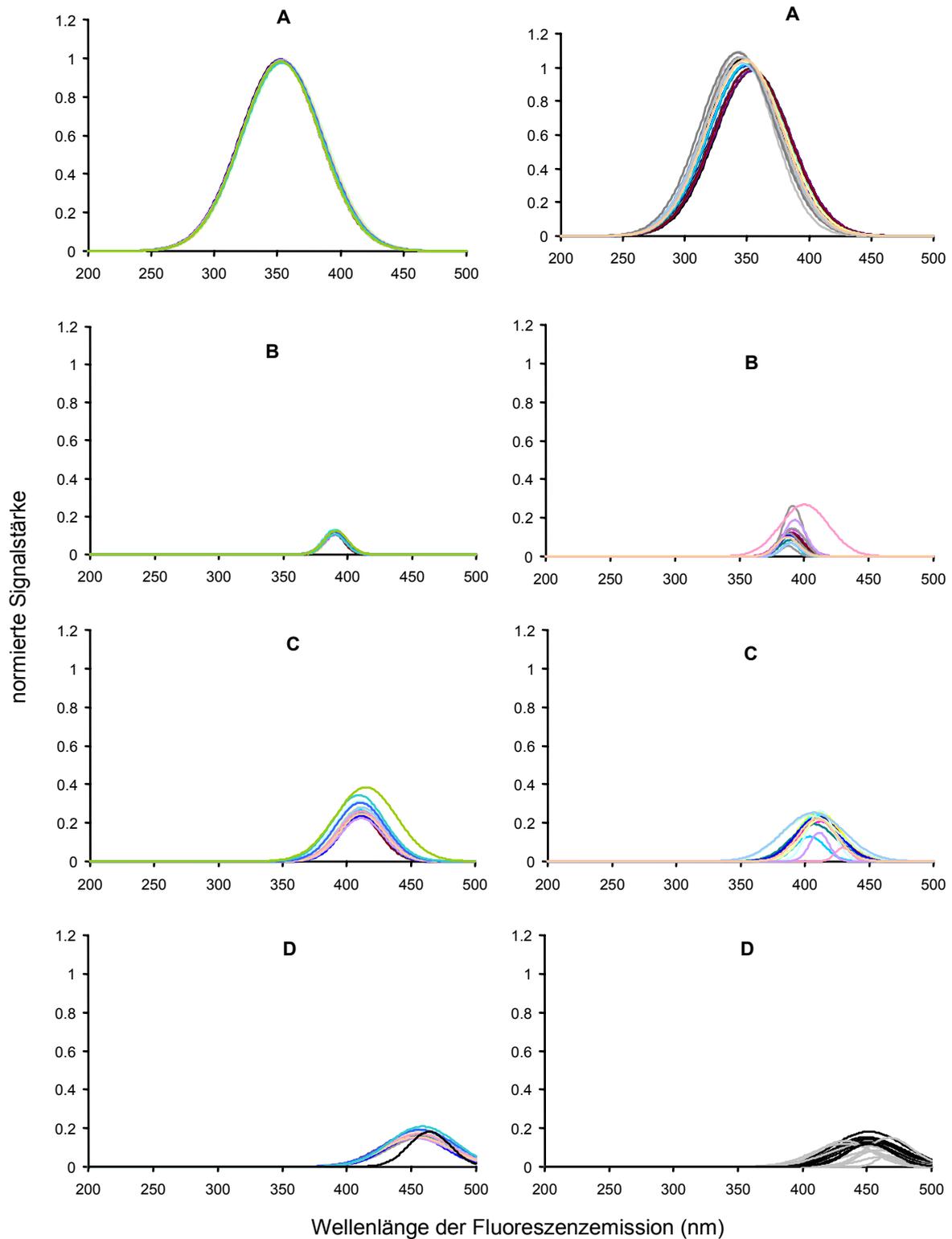


Abb. 39: Variabilität der Spektralkomponenten der Wasserproben von Hang Stillwasser (links) und Häuserwald (rechts).

Die Zerlegung der Spektren in Spektralkomponenten der Stillwasser-Proben lieferte nur geringfügig voneinander abweichende Kurven. Am deutlichsten hob sich jedoch die Probe

P19 von den übrigen ab. Sie hatte die höchste und breiteste Komponente C und eine schmalere, zum längerwelligen Bereich hin verschobene Komponente D als die übrigen Proben dieses Hanges. Somit konnte nur der oberflächennahe Abfluss, der den Wasseraustritt P19 speiste, vom übrigen Hangaustrittswasser unterschieden werden (Abb. 40).

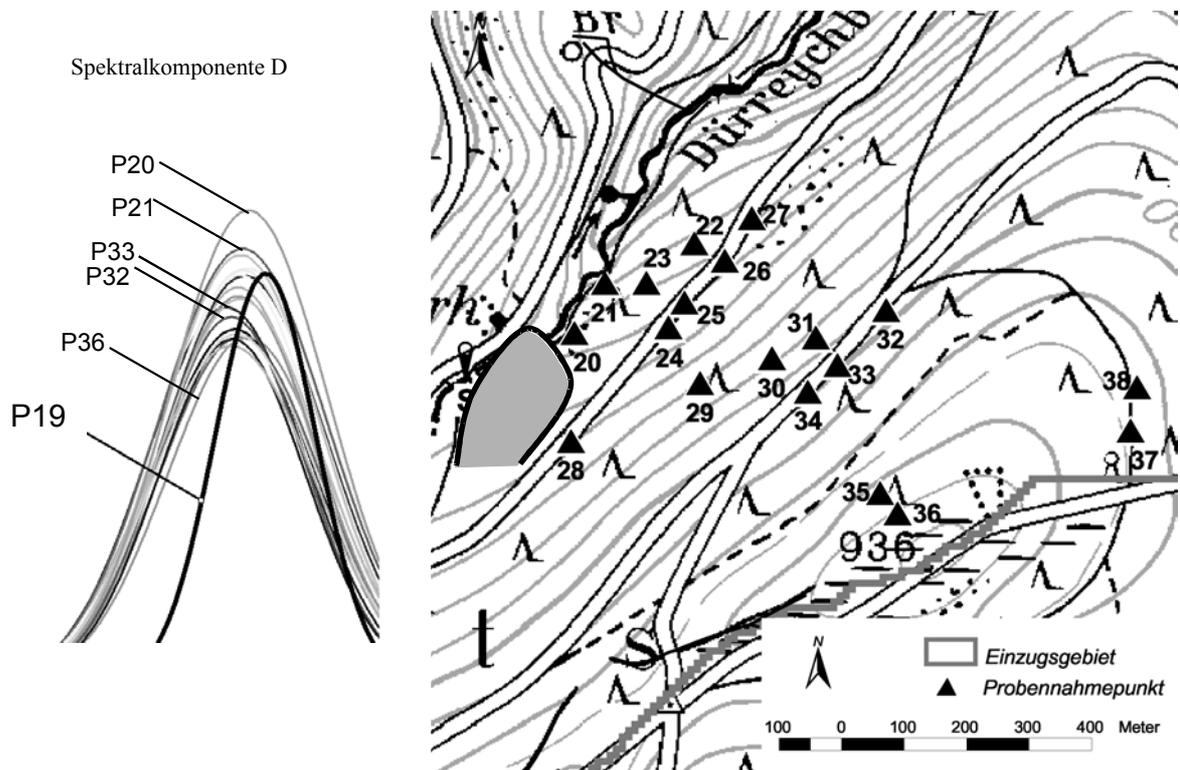


Abb. 40: Abgrenzung von lateralen Abflüssen am Hang Stillwasser an Hand von Verschiebungen der Spektralkomponente D.

Die Proben vom Hang Häuserwald hingegen wiesen heterogene Spektralkomponenten auf. Bei Komponente A fand eine kontinuierliche Verschiebung der Schwerpunkte von 357 nm bei Probe P53, nach 344 nm bei Probe P41 statt. Es zeigten sich Gruppen von Spektren mit dicht zusammen liegenden Kurvenverläufen, deren Probenstellen auf einer Karte zu Flächen zusammengefasst wurden (Abb. 41a und c). Bei Komponente B zeichnete sich die Probe P41 mit dem höchsten und breitesten Peak am deutlichsten von den übrigen Proben ab. Bei den Komponenten C und D traten sehr vielfältige Ausprägungen der Spektren auf, wobei sich besonders die Proben P40, P41 und P42 durch stärkere Abweichungen von den übrigen

Spektralen unterschieden. Die Verschiebung der spektralen Eigenschaften der Wasserproben vom Hang Häuserwald lassen sich an Hand der räumlichen Anordnung der Probestellen und den daraus resultierenden möglichen Verbindungen durch Abflusswege nachzeichnen. Es fanden sich Proben, deren Spektralkomponente D Spektrallinien mit gleichem Schwerpunkt aufwiesen (Abb. 41b). Diese Proben zogen sich an Fließlinien, bestehend aus Hang- und Wegeabfluss sowie einer Tiefenlinie im Gelände, entlang. Entlang dieser Linie fand sich auch ein Gradient fallender Peakhöhen. Diese Abflusslinie ist in Abb. 41c mit Pfeilen nachgezeichnet. Am Hang Häuserwald konnte der Probe P53 wegen des höchsten DOC-Gehalts eine Ausgangs-Fluoreszenzsignatur zugeordnet werden, mit der die Proben P55, P52, P50 und P49 große Ähnlichkeit hatten. P48, P47 und P46 bildeten eine Übergangsgruppe zu den Proben am Hangfuß, mit denen die Proben 51 und 54 hohe spektrale Übereinstimmung aufwiesen.

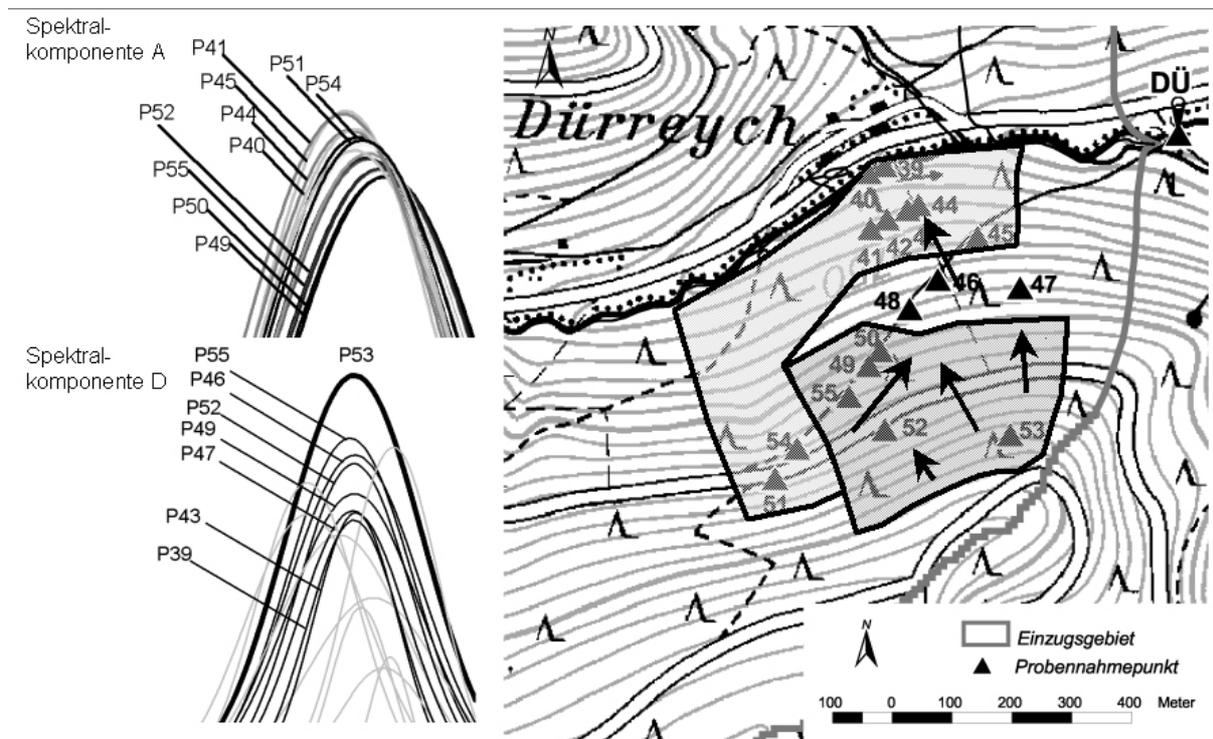


Abb. 41: Gradienten der Spektralkomponenten A und D (links) entlang von oberflächigen und oberflächennahen Fließwegen (rechts).

4.5 DOC-Bilanzen des Dürreychgebiets und der einzelnen Teileinzugsgebiete

Nach Gl. 4 sind die Beiträge des gesamten Einzugsgebiets DÜ berechnet worden. Die Ermittlung der DOC-Fracht aus dem Teileinzugsgebiet SH wurde modifiziert, da der Abflussverlauf während des Messzeitraums teilweise nicht von einer ausreichenden Probendichte zur DOC-Bestimmung für eine Interpolation abgedeckt war. Daher wurde die Fracht als Produkt der Wassermasse und der mittleren DOC-Konzentration berechnet. Tabelle 4 zeigt eine Gegenüberstellung der DOC-Exporte aus den Teileinzugsgebieten.

Tabelle 4: DOC-Exporte im Dürreychgebiet

Zeitraum	Einzugs- gebiet	Tagesexport (kg d ⁻¹)	Jahresexport (kg a ⁻¹)	Export (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	Export (g m ⁻² a ⁻¹)
gesamter Messzeitraum	DÜ	56,8	20725	30	3,0
4.10.1997 - 10.11.1999	SH	51,1	18642	119	11,9
	DÜ-SH	5,7	2083	5	0,5
Hydrologisches Jahr	DÜ	41,3	15064	22	2,2
Okt. 1997-Okt 1998	SH	29,6	10819	69	6,9
	DÜ-SH	11,7	4245	8	0,8
Hydrologisches Jahr	DÜ	76,6	27970	41	4,1
Okt. 1998-Okt 1999	SH	75,9	27695	177	17,7
	DÜ-SH	0,5	275	1	0,1

Die mittels Abfluss- und DOC-Ganglinien ermittelten DOC-Frachten verdeutlichen, dass das höher gelegene Teileinzugsgebiet SH eine wesentlich höhere flächenbezogene DOC-Fracht in

das Gewässer abgab als das restliche Einzugsgebiet. Dies lässt sich durch einen hohen Flächenanteil von Böden mit ausgeprägten Torf- und Wurzelfilzhorizonten erklären. Wie die Betrachtung einzelner Niederschlag-Abfluss-Ereignisse gezeigt hat, unterlag jedoch das Muster der Verteilung des DOC-Exportes einer starken zeitlichen Heterogenität. Auch die beiden hydrologischen Jahre unterschieden sich deutlich in der Menge ihres DOC-Exportes. Im Einzugsgebiet SH variierte er um den Faktor 2,5, im Einzugsgebiet DÜ-SH sogar um den Faktor 8. Dies lag in den unterschiedlichen Niederschlagsmengen und Intensitätsverteilungen begründet. Im Jahr 1997/1998 fielen für SH 1633 mm (gemessen an FF), für DÜ-SH 1494 mm (gemessen an FH) gegenüber 1851 mm bzw. 1770 mm im Jahr 1998/1999.

4.6 Räumliche Verteilung des DOC-Exportes bei Basisabfluss

Um ein feiner aufgelöstes Bild der DOC-Frachten bei Basisabfluss im Längsverlauf des Dürreychbachs zu bekommen, wurden an vier verschiedenen Messtagen (jeweils im absteigenden Ast der Abflussereignisse, so dass Abflussschwankungen vernachlässigt werden konnten) Abflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode nach RODEL (1993) durchgeführt. Abb. 42 zeigt den Längsverlauf der DOC-Konzentration und der mit dem Abfluss berechneten DOC-Fracht und im Bach. Die zunächst hohen DOC-Konzentrationen aus dem Ablauf von LE und SH wurden entlang der Fließstrecke mit DOC-armem Wasser verdünnt. Die aus Abfluss und DOC-Konzentration berechneten Frachten stiegen jedoch kontinuierlich an. Fast jedes der ausgegliederten Teileinzugsgebiete trug deutlich zur DOC-Fracht bei.

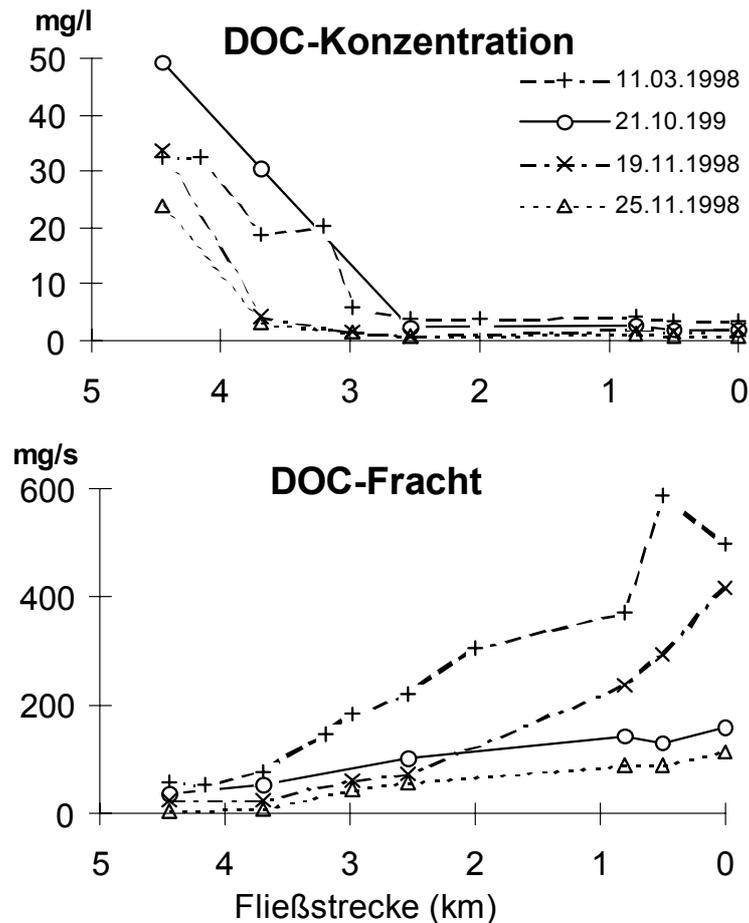


Abb. 42: DOC-Konzentrationen und -Frachten im Längsverlauf des Dürreychbaches bei Trockenwetterabfluss.

Aus den DOC-Frachten zwischen zwei Messpunkten ergaben sich die DOC-Frachten der durch die Messpunkte definierten Teileinzugsgebiete. In Abb. 43 ist deren Beitrag zur DOC-Fracht als Anteil an der Gesamtfracht dargestellt. In dem Diagramm sind die vier Messtage nach zunehmendem Abfluss sortiert. Die Muster der Frachtenanteile der Teileinzugsgebiete waren im Gewässerverlauf und zu unterschiedlichen Messtagen sehr variabel. Die Bodenmessprofile haben gezeigt, dass der DOC-Transport durch den Boden von dessen Feuchteprofil abhängig ist. Die unterschiedlichen Gebietseigenschaften, die sich aus Faktoren wie Niederschlagsverteilung, Relief, Bodenparametern, Mikroklima und Vegetation zusammensetzen, führten offenbar zu einem räumlich und zeitlich sehr heterogenen Muster der Gebietsfeuchteverteilung.

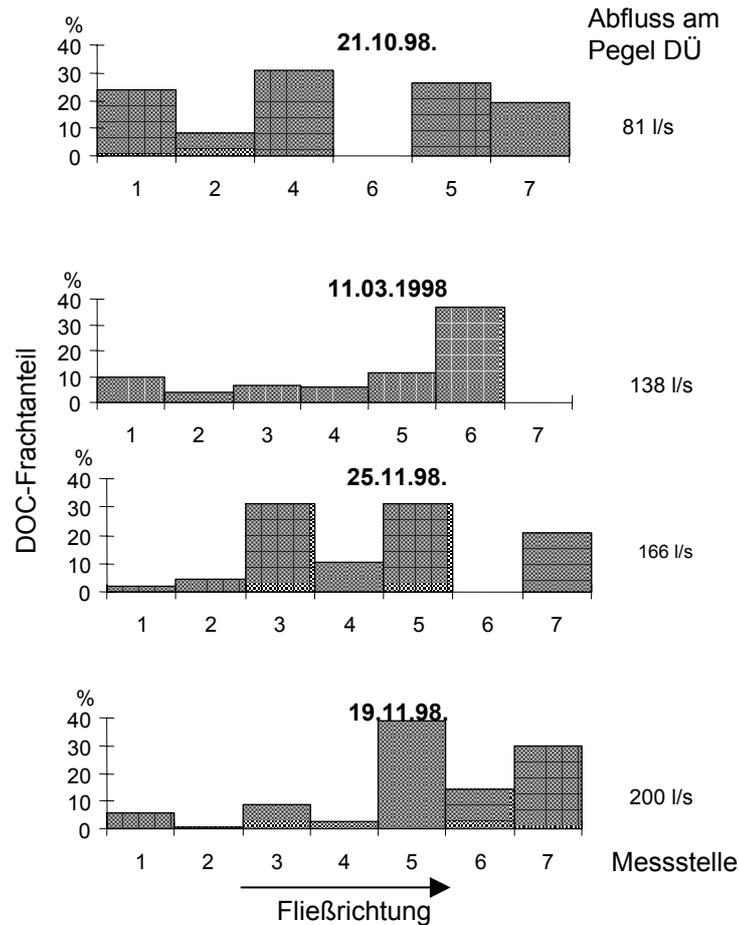


Abb. 43: DOC-Frachten bei Trockenwetterabfluss von kleinen Teileinzugsgebieten (definiert durch die Messpunkte 1 bis 7 im Gewässer).

Solche Export-Bilanzen für Teileinzugsgebiete in kleiner Auflösung können nur bei einem flachen Verlauf der Abflussganglinie durchgeführt werden, da nur dann die lateralen Beiträge von Wasser und DOC für den Messzeitraum und die Laufzeit des Wassers durch das Gerinne als konstant anzusehen sind.

4.7 Räumliche Verteilung des DOC-Exportes bei Niederschlagsereignissen

Für drei Niederschlagsereignisse mit unterschiedlichen Ausgangszuständen und Niederschlagsverteilungen wurden Bilanzierungen nach Gl. 5 der Wasser- und DOC-Frachten durchgeführt (Abb. 44). Die oberen Abbildungen zeigen die jeweiligen Abflussreaktionen und

die Kurven der DOC-Frachten. Die unteren Abbildungen verdeutlichen die Summenkurven der DOC-Frachten an den Pegeln LE, SH und DÜ. Die Vorfeuchte war vom Ereignis auf der Abbildung links zum Ereignis rechts abnehmend.

Die heterogene Verteilung der Niederschlagsintensität von Ereignis D führte zu zweigipfeligen Abflussereignissen an den Pegeln SH und LE. Am Pegel DÜ bewirkte der Niederschlag ein Abflussmaximum von 550 l s^{-1} mit zwei Nebenschultern. Das Einzugsgebiet LE leistete einen DOC-Exportbeitrag von 171 kg, aus dem Einzugsgebiet SH wurden 499 kg DOC transportiert. Erst am Ende des auslaufenden Astes der Abflussganglinie von DÜ hatte diese Menge das Dürreychgebiet verlassen. Aus dem Resteinzugsgebiet DÜ-SH wurde also kaum DOC exportiert. Da die DOC-Frachten aus den höheren Einzugsgebieten nur verdünnt wurden, blieb die DOC-Konzentration am Pegel DÜ mit $14,4 \text{ mg l}^{-1}$ relativ niedrig.

Bei Ereignis E war offensichtlich die räumliche Niederschlagsverteilung sehr ungleichmäßig, wie sie nur in Einzelfällen bei Gewittern zu beobachten war. Der aufgezeichnete Niederschlag führte bei den Einzugsgebieten der Hochfläche nur zu einem Abflussmaximum. Dabei dominierte das Einzugsgebiet den DOC-Export. Zwischen den Pegeln LE und SH wurden zu den 46 kg aus LE nur noch 7 kg hinzugefügt. Aus den Abflussbeiträgen des Gebietes DÜ-SH entstand eine zweigipfelige Abflussganglinie. Auch bei diesem Ereignis leistete das untere Einzugsgebiet DÜ-SH kaum einen Beitrag zum DOC-Export. Die DOC-Konzentration am Pegel DÜ blieb unter 5 mg C l^{-1} .

Ereignis G wurde vom stärksten Niederschlag mit 86 mm ausgelöst bei heftigster Abflussreaktion mit einem Q_{\max} von $2,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Das abfließende Wasser transportierte während des Ereignisses 3,3 t DOC aus dem Dürreychgebiet. Das Teileinzugsgebiet SH lieferte mit 1,6 t knapp die Hälfte davon.

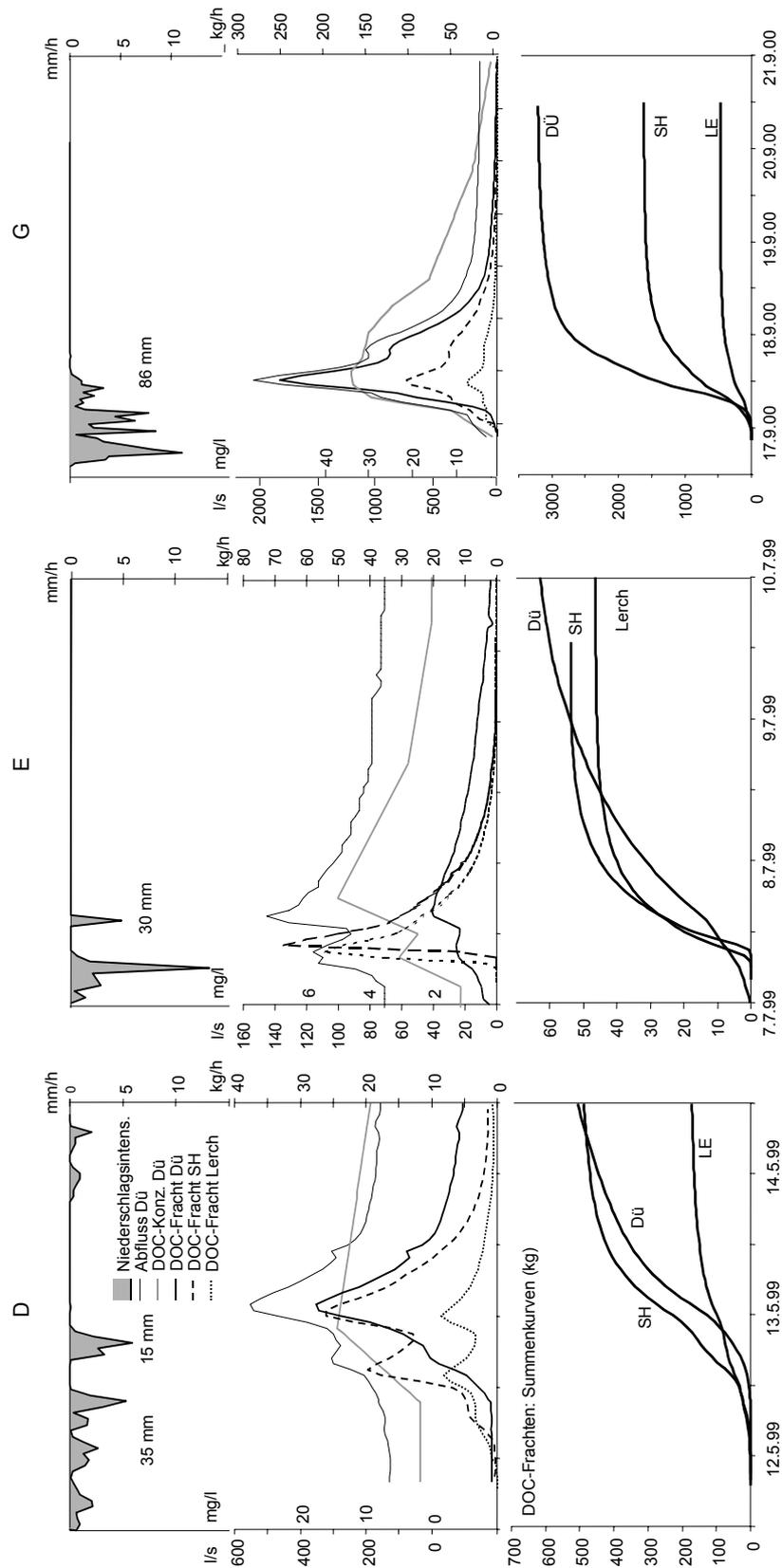


Abb. 44: Bilanzierung des DOC-Exportes der Ereignisse D, E und G aus den drei geschachtelten Einzugsgebieten LE, SH und DÜ bei unterschiedlichen Vorfeuchten (von links nach rechts steigend) und unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen. (Der Maßstab der y-Achse ist für Abfluss und DOC-Konzentration bei Ereignis G verschoben!)

4.8 Gebietsreaktionen auf unterschiedliche Niederschlagsereignisse

Die vorangegangenen Untersuchungen von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen haben gezeigt, dass zu deren Einordnung neben Niederschlagseigenschaften auch der Vorzustand des Gebietes von Bedeutung ist. Diese Größen sollen im Folgenden als Feuchtegrad zusammengefasst werden, der als Funktion von (Vor-)Feuchte, Niederschlag und Niederschlags-(Intensitäts)-Verteilung angesehen werden kann und durch Gebietseigenschaften wie Feldkapazität des Bodens maßgeblich gesteuert wird. Der Abflussbeiwert (Gl. 5) stellt ein Maß für den Anteil von abflussbeitragenden Flächen dar und soll als eine Funktion des Feuchtegrades angesehen werden.

Die DOC-Konzentration gilt als Indikator für oberflächennahe, schnelle Abflusskomponenten. Für alle mit Abfluss und DOC-Konzentration erfassten Ereignisse wurden Massebilanzen des Wasser- und DOC-Transportes der Einzugsgebiete LE, SH, DÜ und DÜ-SH erstellt.

In Abb. 45 sind die aus den Wasser- und DOC-Bilanzen errechneten mittleren massengewichteten DOC-Konzentrationen gegen den Abflussbeiwert α aufgetragen. Ordnet man den Flächen der Teileinzugsgebiete typische Abfluss generierende Prozesse zu, können aus dem Diagramm deren abflussbeitragende Bedeutung bei steigendem Feuchtegrad abgelesen werden.

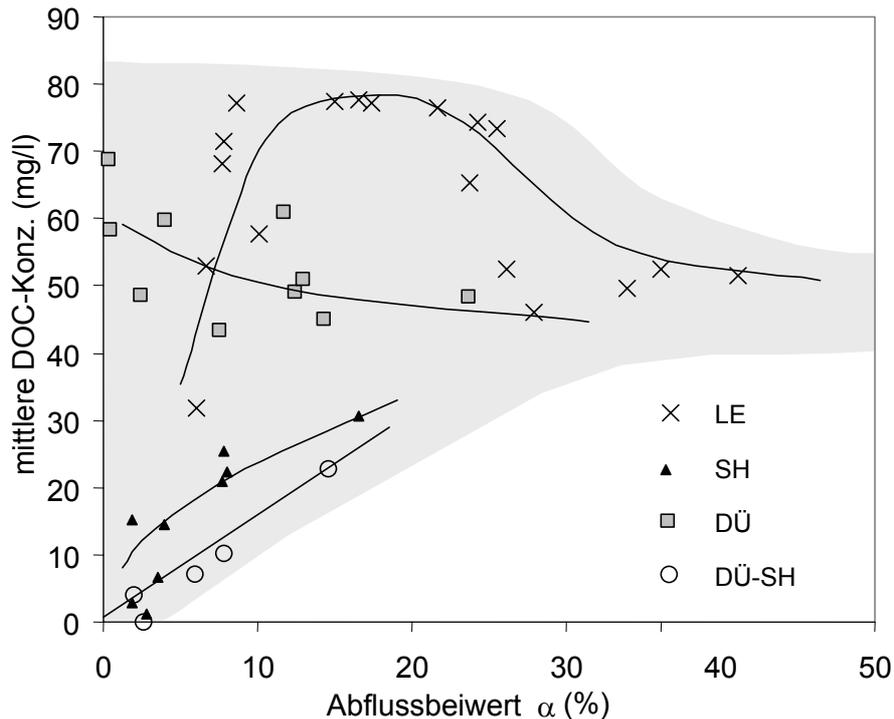


Abb. 45: Konvergenz der Einzugsgebietsreaktionen bei zunehmendem Abflussbeiwert am Beispiel der mittleren massengewichteten DOC-Konzentrationen.

Am Pegel LE wurden die breitesten Spannweiten von Abflussbeiwerten und mittleren DOC-Konzentrationen gemessen. Diese Streuung nahm über SH bis zu DÜ ab. Bei steigendem Abflussbeiwert zeigte sich bei LE zunächst eine Zunahme der DOC-Konzentration bis 80 mg l^{-1} . Bei Abflussbeiwerten größer als 25% näherten sich die DOC-Konzentrationen 50 mg l^{-1} an. Abflussreaktionen mit kleinem α wurden meist von Gewitterschauern auf trockenen Boden ausgelöst. Dabei trugen versiegelte Flächen in besonders hohem Verhältnis zum Abfluss bei, transportierten aber kaum DOC. Der Abflussbeiwert war bei diesen Ereignissen relativ niedrig, da der Boden noch viel Wasser aufnehmen konnte. Bei stärkeren Niederschlägen und bei höherer Vorfeuchte setzte schnell Sättigungsabfluss mit hoher DOC-Konzentration und höherem α ein. Lang anhaltende Niederschläge und Gewitterregen auf hohe Vorfeuchte führten mit zunehmender Stärke zu einem steigenden Anteil von Oberflächenabfluss der wassergesättigten Flächen, die durch Verdünnung des Bodenwassers die mittlere DOC-Konzentration senkten.

Da die DOC-Konzentrationen bei LE starke Temperaturabhängigkeit aufwiesen, wurden auch temperaturkorrigierte DOC-Werte für LE durch Verwendung von Gl. 8 der Temperaturkorrelation ermittelt als

$$C_K = C_M - C_T + \overline{C_M} \quad (\text{Gl. 9})$$

C_K : temperaturkorrigierte DOC-Konzentration

$\overline{C_M}$: massengewichtete mittlere DOC-Konzentration aller Ereignisse

C_M : massengewichtete mittlere DOC-Konzentration eines Ereignisses

C_T : aus Gl. 8 ermittelte DOC-Konzentration

und gegen α aufgetragen (Abb. 46). Diese Darstellung eliminiert den aus der Regression von Kapitel 4.2.2.2 angenommenen Temperatureinfluss auf die DOC-Konzentration. Eine solche Temperaturkorrektur war jedoch nur für DOC-Werte des Gebietes LE möglich. Zwar dominierte bei den meisten Ereignissen der DOC-Eintrag aus den Gebieten LE und SH den DOC-Transport im Bach, jedoch überdeckten mit zunehmender Lauflänge Wassereinträge mit unterschiedlicher DOC-Fracht das temperatureprägte DOC-Konzentrationsmuster der Hochflächen. Somit konnten hydrologische und temperaturbedingte Einflüsse schon ab dem Pegel SH abwärts nicht mehr von einander getrennt werden. Auch die Daten der temperaturkorrigierten DOC-Konzentrationen zeichnen das Gebietsverhalten von LE bei steigendem Abflussbeiwert nach. Die Werte streuten breiter und lagen auf einem niedrigeren Niveau. Dies kann einerseits darauf hindeuten, dass die Erfassung vieler Ereignisse während der Sommermonate zu einer stärkeren Gewichtung höherer DOC-Konzentration führte. Andererseits ist es möglich, dass Umgebungsparameter, die sowohl mit der Temperatur korrelierten als auch den Abflussbeiwert beeinflussten, sich auf die DOC-Mobilisierung

auswirkten. Dafür kommen z.B. die Bodenfeuchte oder aus ihr abgeleitete Größen in Frage. Solche Parameter können sich mit hinter der in Kapitel 4.3.2.2 erstellten Korrelation verbergen. Bei einer auf dieser Korrelation beruhenden Datenberechnung gehen dann Informationen über diese hydrologischen Parameter verloren.

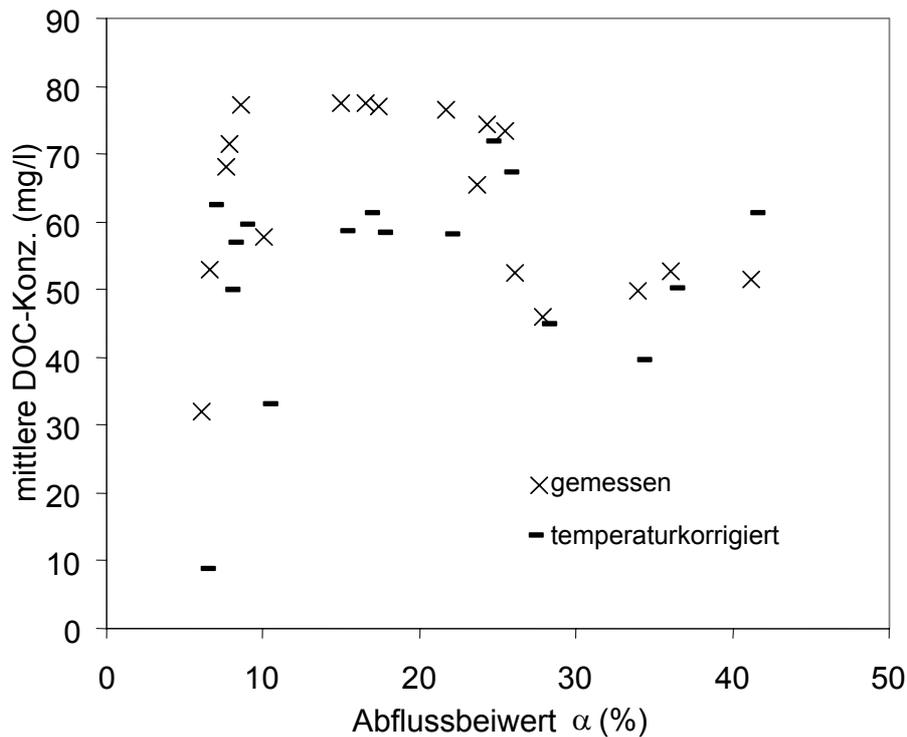


Abb. 46: Auftragung der mittleren massegewichteten DOC-Konzentrationen einzelner Niederschlag-Abflussereignisse von LE mit gemessenen und Temperaturkorrigierten Werten.

Die Verteilung der mittleren DOC-Konzentrationen von SH zeigte eine abfallende Tendenz bei zunehmendem Abflussbeiwert. Schon bei kleinen Abflüssen wurden relativ hohe DOC-Konzentrationen gemessen. Sie belegen den dominierenden Einfluss des DOC-Exportes aus LE. Hingegen waren geringe Abflusshöhen, die am Pegel LE mit niedrigen DOC-Konzentrationen erfasst wurden, am Pegel SH wegen zu geringen Abflusses nicht mehr zu messen. Wegen der längeren Laufzeiten in dem größeren Einzugsgebiet wurden solche Abflüsse wahrscheinlich auch von der Abflusswelle mit hohen DOC-Konzentrationen eingeholt und überdeckt. Bei Zunahme des Abflussbeiwertes α kam auch im Einzugsgebiet

SH eine Zunahme von Oberflächenabfluss generierenden Flächen zum Tragen, die die mittlere DOC-Konzentrationen senkte.

Das Teileinzugsgebiet DÜ-SH reagierte bei steigender Gebietsfeuchte mit einer Zunahme an DOC exportierenden Flächen. Der maximale Abflussbeiwert konnte auf Grund einer kleineren Abflussakkumulation an den steilen Hängen bei den erfassten Ereignissen nie das gleiche Niveau erreichen wie die Flächen von LE und SH. Das gesamte Einzugsgebiet DÜ zeigte ein intermediäres Verhalten. Gegenüber dem Teileinzugsgebiet DÜ-SH lagen die mittleren DOC-Konzentrationen deutlich höher. Da DÜ-SH aber den größten Flächenanteil hat, setzte sich die Gebietsreaktion von DÜ deutlich von LE und SH ab.

Da nur wenige Ereignisse an allen Probestellen gleichzeitig erfasst werden konnten, standen für die Berechnung von Bilanzen des Teileinzugsgebietes DÜ-SH nur Daten von drei Ereignissen zur Verfügung. Außerdem konnten auch an Ereignissen, die nur kleine Abflüsse am Pegel DÜ verursachten, keine Berechnungen von Massebilanzen angestellt werden: Das Wehr des Pegels DÜ mit einem Rechtecküberfall über eine Breite von 3,98 m verursachte bei niedrigen Abflusshöhen große Messungenauigkeiten bei der Abflussbestimmung. Zudem wußte CASPER (2002) nachzuweisen, dass sich wegen unterirdischer Abflüsse bis zu 300 mm Niederschlag pro Jahr am Pegel DÜ nicht erfassen ließ. Bei niedrigen Abflüssen kamen dadurch rechnerisch negative DOC-Bilanzen zustande.

4.9 Trennung von Abflusskomponenten mittels DOC

Auf der Einzugsgebietskale wurde zur Durchführung einer Ganglinienseparation ein Massenerhaltungs-Ansatz nach Gl. 6 gewählt, der den Abfluss in die Komponenten $Q_{SH}(t)$ und $Q_{DÜ-SH}(t)$ unterteilte. In Abb. 47 und Abb. 48 sind zwei Niederschlag-Abfluss-Ereignisse mit den Abflussbeiträgen aus den Gebieten SH und DÜ-SH abgebildet. Sie stellen die Abflussganglinie am Pegel SH, die Abflussganglinien des Gesamtabflusses und den

Basisabfluss am Pegel DÜ, sowie die errechneten Durchgangskurven des Abflusses von SH am Pegel DÜ und des Abflussbeitrags aus der Fläche DÜ-SH dar. Ebenso ist der Verlauf der DOC-Konzentration am Pegel DÜ abgebildet. Bei den gewählten Ereignissen wurde der Basisabfluss als konstant angenommen, da der Hydrograph dieses Ereignisses im auslaufenden Ast wieder annähernd auf den Ausgangswert zurückfiel. Als weitere Voraussetzung für die Anwendung von Gl. 6 zur Separation von Abflussganglinien musste die DOC-Konzentration des Abflusses Q_{SH} näherungsweise als konstant angenommen werden. Die DOC-Konzentrationen der Abflusskurven von LE und SH besaßen zwar immer eine charakteristische Dynamik (Kapitel 4.3.2 und 4.3.3), die zur Beschreibung von Abflussprozessen dieser Einzugsgebiete herangezogen wurde, für eine Bilanzierung am Pegel DÜ bildeten diese Konzentrationsschwankungen jedoch eine zu vernachlässigende Größe.

Am 7.7.99 (Abb. 47) erbrachte ein Niederschlag mit einer mehrgipfeligen Intensitätsverteilung 30 mm Regen. Er führte am Pegel SH zu einer eingipfeligen Abflussantwort, die ihren maximalen Abfluss am Pegel DÜ 6 h später erreichte. Während der Laufstrecke wurde dieser Abflussbeitrag stark gestreckt und dadurch in seiner Dynamik gedämpft. Für den Verlauf der Ganglinie SH am Pegel DÜ ließ sich ein Abfluss berechnen, der den gleichzeitig gemessenen Abfluss am Pegel SH überstieg. Dieser Abflussbeitrag kann nicht dem Einzugsgebiet SH zugeordnet werden, da mit einer Abflussdauer zwischen den Pegeln SH und DÜ von drei bis sechs Stunden zu rechnen ist. Dieser Abfluss und der dazugehörige DOC-Export müssen Teilflächen des Einzugsgebietes DÜ-SH zugeschrieben werden. Am 7.7.99 wurde um 12:00 am Pegel HI eine Wasserstichprobe gezogen, die bei einem Abfluss von 2 l s^{-1} eine DOC-Konzentration von $12,9 \text{ mg C l}^{-1}$ enthielt. Dieses Teileinzugsgebiet repräsentierte Flächen des Gebietes DÜ-SH, die bei ausreichender Gebietsfeuchte einen beträchtlichen Beitrag zum DOC-Export leisten konnten. Das

Teileinzugsgebiet DÜ-SH verursachte vollständig die erste Abflussspitze und prägte die Dynamik der zweiten. Dabei erreichte der Gesamtabfluss Werte von maximal 145 l s^{-1} .

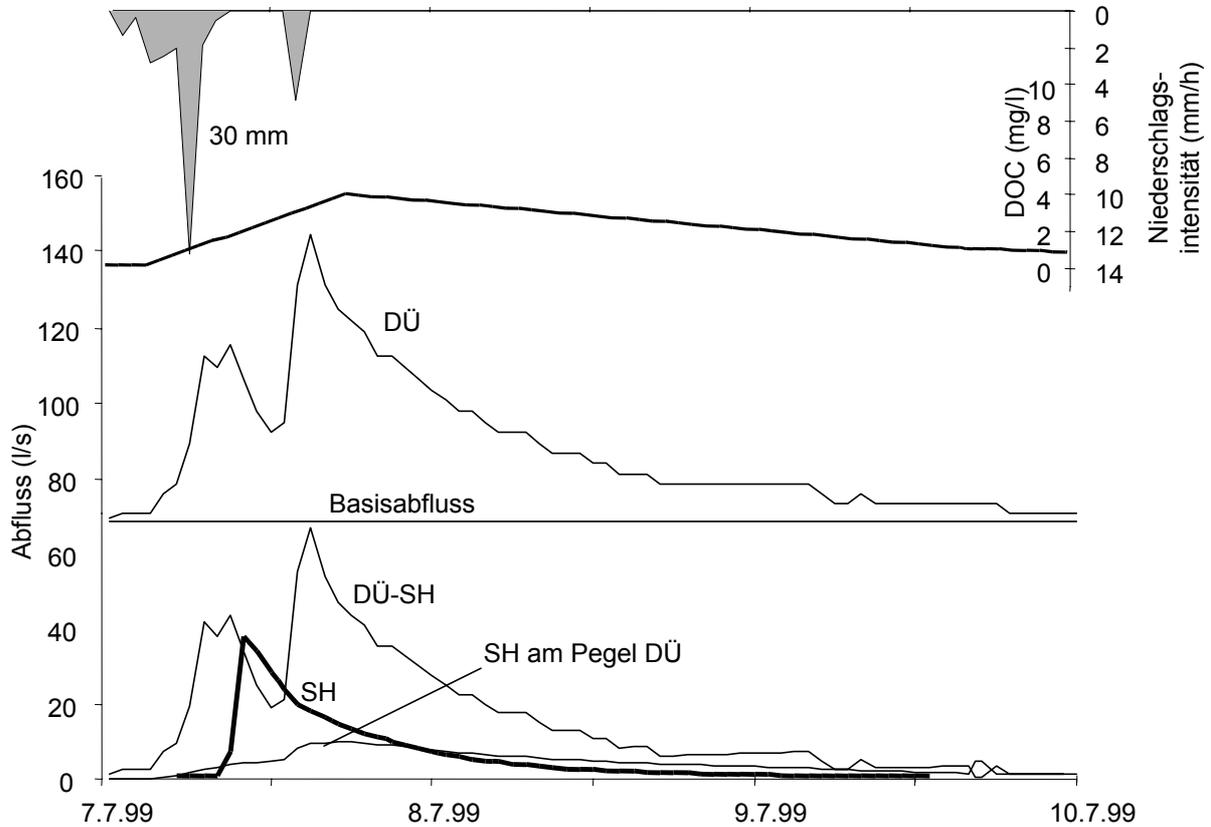


Abb. 47: Ganglinienseparation eines Hydrographen des Pegels DÜ mittels DOC-Bilanzierung mit einem Regen mit geringer Gebietsfeuchte.

Ein starker Regen bei geringer Gebietsfeuchte am 14.7.99 verursachte eine heftige Abflussreaktion mit hohen DOC-Frachten in Dürreychgebiet (Abb. 48). Wegen des starken Abflusses, den das Teileinzugsgebiet SH generierte, erreichte sein Abflussmaximum schon 3 h später den Pegel DÜ. Dort trug er zum überwiegenden Teil zur Abflussbildung bei. Als sehr rasche Antwort der Einzugsgebietes DÜ-SH durchlief er den Pegel noch kurz vor dem Abflussmaximum von SH, so dass die beiden Abflussspitzen nicht direkt zusammenfielen, sondern eine gestrecktere Abflusslinie bildeten. Wieder lieferte das in DÜ-SH enthaltene Einzugsgebiet HI einen Beitrag von $14,7 \text{ mg C l}^{-1}$ bei einem kurzzeitigen maximalen Abfluss

Ergebnisse

von 14 l s^{-1} , der aber auf Grund des hohen Abflusses von SH und DÜ nicht mehr ins Gewicht fiel.

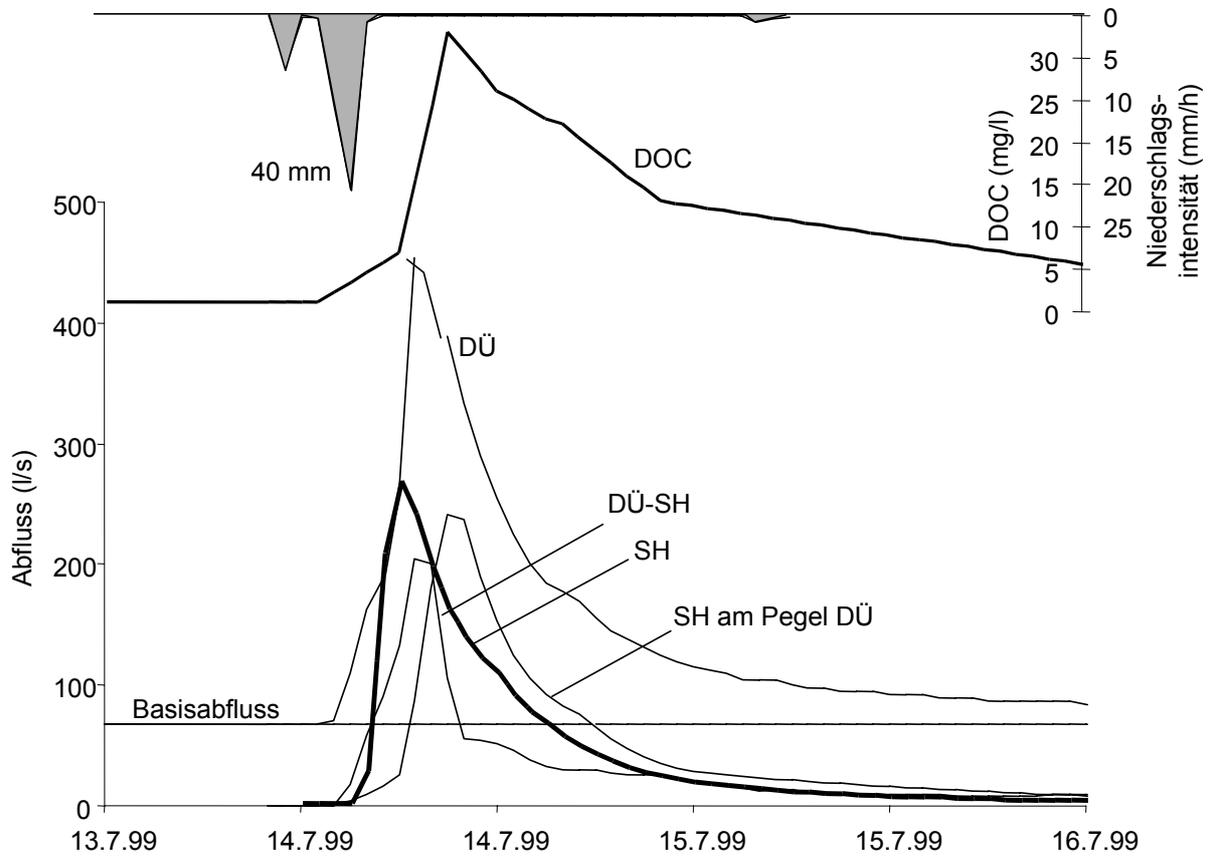


Abb. 48: Trennung von Abflusskomponenten aus den Abfluss- und DOC-Ganglinien der Pegel LE, SH und DÜ bei einem Gewitter mit geringer Gebietsvorfeuchte.

5 Diskussion

An Hand von Untersuchungen der DOC-Konzentrations- und Abflussdynamiken konnten dominierende DOC-Export- und Abflussprozesse des Dürreychbachtals identifiziert werden. Sie müssen nun für verschiedene Niederschlag-Abfluss-Ereignisse und unterschiedliche Skalen diskutiert werden.

5.1 Die Plot-Skale

Die Bodenmessprofile bestätigten eine typische vertikale DOC-Dynamik: Je tiefer Wasser durch den Boden sickerte, um so mehr DOC adsorbierte an der Bodenmatrix oder wurde mikrobiologisch abgebaut. Diese Beobachtungen über die DOC-Verteilung im Bodenwasser finden sich auch in MCDOWELL & WOOD (1984), MCDOWELL & LIKENS (1988), KAPLAN et al. (1980) und DALVA & MOORE (1991). Die Abbaugeschwindigkeit ist dabei sehr langsam: HONGVE (1999) ermittelte für frisches Sickerwasser aus Nadelwaldstreu eine Abbaurrate von weniger als 5% über einen Zeitraum von 7 Wochen.

Viele physikalisch-chemische und biologische Prozesse werden von der Temperatur beeinflusst. Dieser Zusammenhang konnte auch im Untersuchungsgebiet wiedergefunden werden. Die Perkolationsversuche verdeutlichten die starke Abhängigkeit der DOC-Mobilisierung von der Bodentemperatur. Es blieb jedoch unklar, welche Steuerungsmechanismen sich dahinter verbargen: Auch die Bodenfeuchte zeigte einen jahreszeitlichen Verlauf, der sich antizyklisch zur DOC-Konzentration verhielt. Eine negative Koppelung von DOC-Konzentration im Bodenwasser und Bodenfeuchte könnte auf Verdünnungseffekte zurückgeführt werden. Eine solche Abhängigkeit deckte sich jedoch nicht mit der Beobachtung an den Bodenprofilen und dem Einzugsgebiet LE, dass nämlich selbst intensive und andauernde Niederschläge keine Einbrüche in der DOC-Konzentration

verursachten. Zudem stellten CHRIST & DAVID (1996) eine steigende DOC-Mobilisierung mit zunehmender Bodenfeuchte fest und begründeten dies mit einer dadurch geförderten biologischen Aktivität im Boden. Ein Einfluss der Bodenfeuchte auf die Mobilisierung von DOC durch Steuerung der biologischen Aktivität ist dadurch jedoch nicht belegt. Die Bodenfeuchte kann auch noch auf andere Weise die DOC-Konzentration beeinflussen. So ist beispielsweise bekannt, dass Böden bei einer Wiederbefeuchtung nach Austrocknung besonders viel DOC freisetzen. Dies erklärt sich zum einen dadurch, dass Wasserentzug im Boden zur Hydrolyse von Biomasse führen kann. Zum anderen gelangt bei Trockenheit DOC auch durch Transport entlang des Wasserpotentials aus Bodenaggregaten an deren Oberfläche und kann bei Wiederbefeuchtung mit dem Wasser transportiert werden (CHRIST & DAVID 1996, LUNDQUIST et al. 1998, LEIDIG 1998). CHRIST & DAVID (1996) und BROOKS et al. (1999) beschrieben auch eine enge Korrelation von Bodenatmung und DOC-Mobilisierung. Beide Parameter sind jedoch selbst stark temperaturabhängige Größen, so dass zwischen ihnen keine Abhängigkeit bestehen muss. Vielmehr hat der überwiegende Teil des mobilisierten DOC im Boden von Podsolon ein relativ hohes Alter, das zwischen 10^2 und 10^4 a liegen kann (HEAD et al. 1989) und scheidet folglich als rezentes Umsetzungsprodukt der Bodenorganismen aus. Auch wenn überwiegend mikrobiologische Umsetzungen für die Bildung wasserlöslicher organischer Kohlenstoffverbindungen verantwortlich sind, müssen die Prozesse zur Mobilisierung des DOC überwiegend physikalisch-chemischer Natur sein. Es ist daher eher anzunehmen, dass die Bodentemperatur den primären Einfluss auf Diffusionsgeschwindigkeiten und Löslichkeit organischer Substanz ausübt. Indirekt kann die Bioaktivität dennoch über eine Veränderung des pH-Wertes im Boden die Löslichkeit von DOC beeinflussen (CRONAN & AIKEN 1985, ANDERSSON et al. 2000, JARDINE et al. 1989), da Huminstoffe mit sinkendem pH-Wert besser wasserlöslich sind.

HORNBERGER et al. (1994) griffen für die Beschreibung des Reservoirs von DOC das Modell eines Rührreaktors auf, in dem kontinuierlich DOC (physikalisch-chemisch) mobilisiert wird und einen DOC-Pool bildet, der sich mit neu zulaufendem Wasser mischt und ausgetragen wird. Nimmt man für die organische Auflage der Böden des Dürreychbachtals einen sehr großen C-Pool an, so können auch starke Niederschläge nur eine kleine Veränderung der DOC-Konzentration herbeiführen. Wie auch LUNDQUIST et al. (1998) und QUALLS et al. (1991) beobachteten, regelten Mobilisierungsprozesse im Oh-Horizont die Größe des Pools an löslicher organischer Substanz, die für einen Transport durch den Mineralboden zur Verfügung stand. JARDINE et al. (1990) konstatierten auch erhebliche Freisetzungen von DOC aus den B-Horizont. Unser untersuchtes Profil 2 repräsentierte Böden mit entsprechendem C-Gehalt in tieferen Horizonten, die aber im Dürreychbachtal selten sind. Bei den dort flächenmäßig dominierenden Podsolen bieten die oberen mineralischen Horizonte kaum Oberflächen für eine feste Adsorption von DOC, so dass dieses durch sie hindurch relativ schnell in tiefere Horizonte transportiert wird.

Der Wasserhaushalt von Profil 1 war deutlich vom Hangzugwasser über den wasserundurchlässigen Ortsteinbändern geprägt, wodurch ganzjährig feuchtere Bedingungen in allen Horizonten vorherrschten. Daher waren am Profil 1 Merkmale der Pseudovergleyung ausgebildet (Abb. 7), die durch Wasserstau über der Ortsteinbildung verursacht wurde. In diesem Horizont liegen Al- und Fe-Verbindungen überwiegend in reduzierter Form vor, was ein anaerobes Milieu anzeigte (SCHWEIKLE 1973). DOC wird hier kaum biologisch abgebaut und ist wegen der hohen Löslichkeit von Fe und Al auch sehr mobil (REHFUESS 1990). DOC, das bis zum Ortstein gelangt, kann lateral am Hang transportiert werden und durch hangparallelen Abfluss ins Gewässer gelangen (JARDINE et al 1990).

An Hand der Bodenfeuchteausbreitung in die Tiefe unserer beider Profile wurde deutlich, dass bei Niederschlagsereignissen schnelle Wassertransportprozesse dominierten. Bei der

Porengrößenverteilung der Bodenmatrix von Podsolen können Fließgeschwindigkeiten im gesättigten Bereich von 10^{-4} m s^{-1} ($= 6 \text{ mm h}^{-1}$), im ungesättigten Bereich 2 bis 3 Zehnerpotenzen kleinere Geschwindigkeiten (10^{-5} bis 10^{-8} m s^{-1}) angenommen werden (SEEGER 1990, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1984). Aus der Feuchteausbreitung in beiden Bodenprofilen ließen sich aber Geschwindigkeiten von mehr als $2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ableiten, die nur in Form von Makroporenfluss möglich sind. Diesen hohen Transportgeschwindigkeiten standen die langsamen DOC-Flüsse im Boden gegenüber. Mit der zeitliche Verzögerung zwischen Temperaturänderung im Oberboden und der Änderung der DOC-Konzentration im Boden (Abb. 49) ließ sich eine mittlere Transportgeschwindigkeit des DOC von $7 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ bis $8 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ im Profil 1 abschätzen. Sie spiegelt die Fließgeschwindigkeit in der ungesättigten Bodenmatrix wider. Durch die schnellen Wasserflüsse wurde zwar auch DOC in tiefere Horizonte transportiert, wegen mit der Tiefe abnehmender kleinen Porenvolumina und zunehmender relativer Bodenfeuchten riefen aber die geringen Wasser- und DOC-Flüsse nur kleine Konzentrationsveränderungen hervor. Der Gradient der zeitlichen Verzögerung zwischen DOC-Konzentration und Änderungen der C-Mobilität im Oberboden wies zwischen 53 und 80 cm Bodentiefe eine Unterbrechung auf, weil dort keine Abhängigkeit zwischen beiden Parametern festgestellt werden konnte (Abb. 49). Möglicherweise haben sich in diesem Bereich vertikale und laterale DOC- und Wassertransportprozesse durch zeitweisen Überstau überschritten.

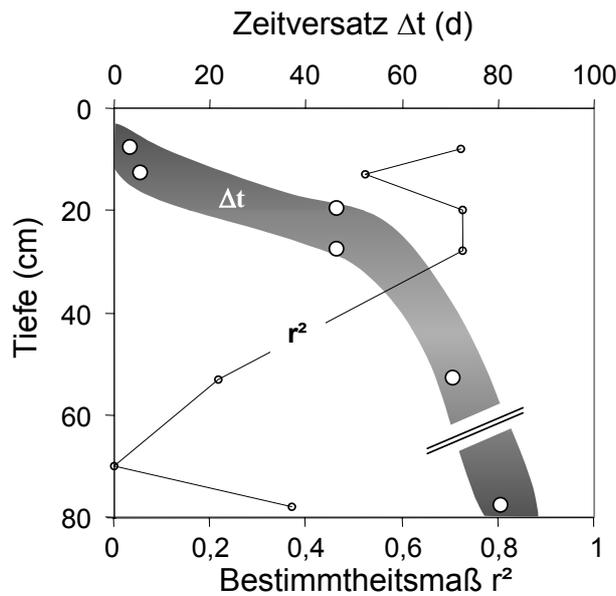


Abb. 49: Diskontinuität der temperaturabhängigen DOC-Mobilität im Boden am Profil 1.

5.2 Die Hang-Skale

An den Bodenprofilen wurden überwiegend die organische Auflage oder der humose Oberboen als DOC-Quellen identifiziert. Daraus lässt sich die These ableiten, dass die Fluoreszenzsignatur des DOC von der Humusform abhängt. Unterschiede in den aus spektralen Eigenschaften definierten DOC-Komponenten ließen sich dann einerseits auf Wasser von Flächen unterschiedlicher Humusformen zurückführen, die sich in den Abfluss generierenden Flächen finden. Andererseits sind Veränderungen der DOC-Zusammensetzung im Wasser auch durch selektive Adsorptions- und Abbauvorgänge während der Passage durch den Boden zu erklären. Unter beiden Voraussetzungen kann es dann bei einer Mischung verschiedener Abflusskomponenten je nach Mengenanteil auch zu graduellen Verschiebungen der DOC-Zusammensetzung kommen.

Abb. 50 zeigt die beiden Hänge Stillwasser und Häuserwald mit den Humusformen nach der Forstlichen Standortskarte. Diese konnten als Moder, Rohhumus und Torfe/Feuchthumusformen nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (1996) bzw. GRAßMANN

(1996) klassifiziert werden. Am Häuserwald fanden sich trotz einer vielfältigen Fluoreszenzsignatur nur die Humusformen Moder bis Mull, während am Hang Stillwasser eine größere Vielfalt an Humusformen vorhanden war, die sich dennoch nicht in einer vielfältigeren Fluoreszenzsignatur widerspiegelte. Daher müssen am Hang Häuserwald für Wasseraustritte mit unterschiedlicher DOC-Zusammensetzung unterschiedliche Fließwege durch den Boden angenommen werden. Es fehlen hier jedoch Flächen, die schnelle Abflusskomponenten in Form von Sättigungsabfluss generieren und das Abflussgeschehen am Hang bestimmen könnten. Sowohl die Hangform als auch die Hangneigung des Häuserwaldes begünstigen laterale Abflusskomponenten weniger als am Hang Stillwasser. Dennoch wurden am Häuserwald Wasseraustritte über den gesamten Hang beobachtet, die auf Bodenstauer schließen lassen. Sie sind aber weitestgehend in größerer Bodentiefe zu vermuten und reichen nur an Wasseraustritten bis nah unter die Bodenoberfläche. Aufschluss über die wasserstauenden und zur Bildung oberflächennaher Abflusskomponenten neigende Flächen können Erhebungen mit Hilfe integrativer Parameter geben, die hydrologisch wirksame Bodeneigenschaften abbilden. Ein solcher Parameter vermag die Ökologische Feuchte darzustellen, wie sie auch die Forstliche Standortskartierung erfasst. Besagte Ökologische Feuchte leitet sich aus Eigenschaften der Bodenstruktur und einer den Wasserhaushalt widerspiegelnde Vegetationsansprache eines Standortes ab. Ihre Verteilung ist in Abb. 51 dargestellt. Danach sind am Hang Häuserwald keine deutlichen Feuchtfächen auszumachen. Die während der Beprobung von Hangwasser beobachteten Wasseraustritte wurden wahrscheinlich nur bei extremen Feuchtezuständen des Hanges aktiv. Wegen hoher vertikaler Wasserleitfähigkeit kann am Hang ausgetretenes Wasser aber auch wieder infiltrieren. Die heterogene Fluoreszenzsignatur des aus dem Boden ausgetretenes Wasser am oberen Bereich des Hanges Häuserwald ließen sich nicht bis zum Gewässer verfolgen. Vielmehr trat an verschiedenen Stellen des Hanges Wasser mit unterschiedlichen Signaturen

hinzu. Der deutliche DOC-Gradient deutet zudem auf eine von oben nach unten zunehmende Dominanz von Wasser mit größerem Bodenkontakt hin. Die oberflächennahen Abflusskomponenten am Häuserwald hatten bei dem beprobten Gebietszustand offensichtlich nur geringen direkten Gewässeranschluss.

Am Hang Stillwasser konnten nur Abflusskomponenten einer kleinen verebneten Fläche am Hangfuß an Hand der Fluoreszenzeigenschaften von den übrigen Hangwasserproben unterschieden werden. Der gesamte Hang war ansonsten von einer Fluoreszenzsignatur dominiert. Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass das am Hang abfließende Wasser aus Sättigungsabfluss der Hochlagen (im Bereich der Proben P36-P39) stammte. Zusätzlich auf den Hangflächen generierter oberflächennaher Abfluss kann aber bei angenommen gleicher Signatur - eine eigene Signatur könnte durch starke Abflüsse der Hochflächen überdeckt werden - nicht vom Wasser der Hochflächen unterschieden werden. Die Einheitlichkeit der Fluoreszenzsignatur zeigte jedoch, dass bei ausreichender Gebietsfeuchte der laterale Hangabfluss den auf den Mitten der Höhenlagen gebildeten Sättigungs- und Oberflächenabfluss ohne direkte Gewässervernetzung an den Dürreychbach ankoppeln kann. Wegen einer geringeren Neigung ist am Hang Stillwasser eine größere Abflussakkumulation möglich als am Häuserwald, die auch in einer höheren Ökologischen Feuchte zum Ausdruck kommt (Abb. 51). Zudem konnte sich oberflächennaher Abfluss in Weggräben sammeln und wurde an Abschlagen wieder gebündelt auf die Hangflächen geleitet. Häufig waren an hangparallelen Wegen direkt unterhalb dieser Abschlage wieder Wasseraustritte aus dem Boden zu verzeichnen.

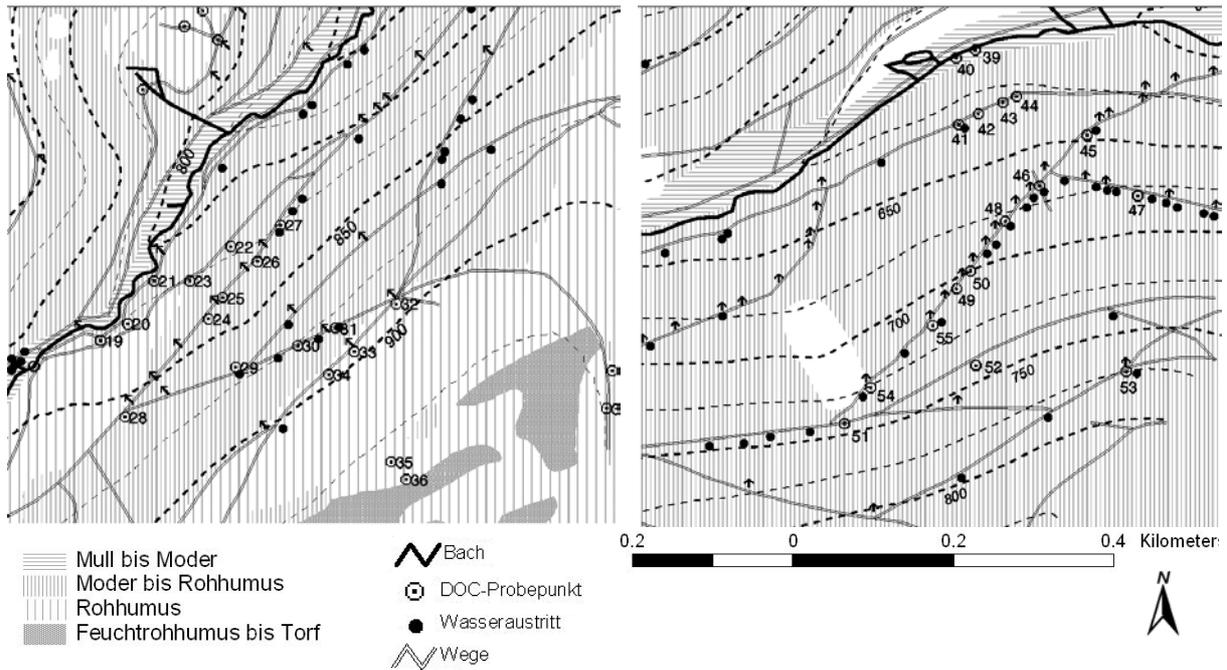


Abb. 50: Humusformen nach der Forstlichen Standortskarte am Hang Stillwasser (rechts) und am Häuserwald (links).

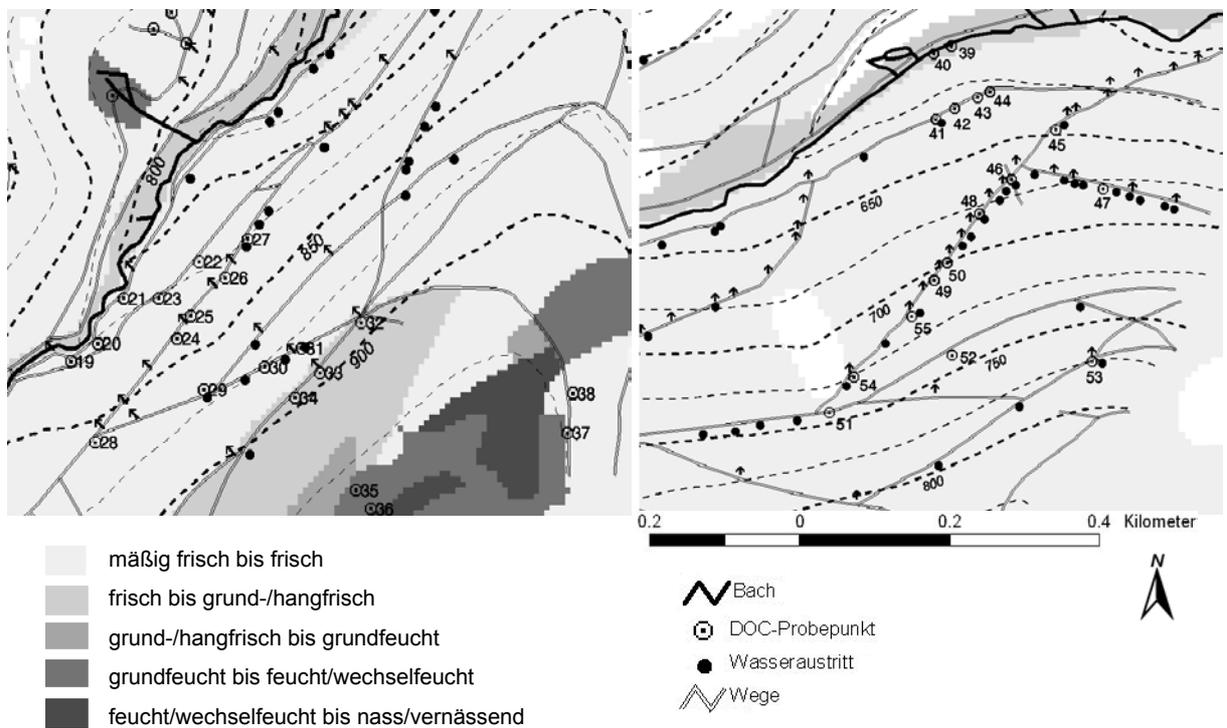


Abb. 51: Ökologische Feuchte nach der Forstlichen Standortskarte am Hang Stillwasser (rechts) und am Häuserwald (links).

5.3 Die Teileinzugsgebiets-Skale

Die beiden Teileinzugsgebiete LE und SH wiesen sehr ähnliche Geländecharakteristika auf. 32% der Flächen fielen durch Stagnationsmerkmale auf bzw. ließen ihren Bodenbildungsprozess aus moorigen Böden ableiten. Das Abflussgeschehen war hier deutlich von Sättigungsabfluss dominiert. Ein dichtes künstliches Dränagenetz koppelte ihn eng an das Gewässer an. Ein echter Basisabfluss fehlte. Obwohl über feuchtere Zeiträume hinweg eine kleine periodisch schüttende Quelle zum Abfluss beitrug, fiel der Bach in diesem Abschnitt regelmäßig trocken. Abfluss wurde nur während Perioden mit hoher Bodenfeuchte oder bei intensiven Niederschlagsereignissen aktiviert. Er bewerkstelligte mit DOC-Konzentrationen bis zu 81 mg C l^{-1} den Transport von ca. 90% des DOC aus dem Dürreychbachtal. Dies entspricht einem Export von $11,9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und typischen Werten von Feuchtflächen gemäßiger Zonen. SCOTT et al. (1998) bilanzierte für ein Moor einen Jahresexport von DOC $15 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Bei Erreichen einer bestimmten Gebietsfeuchte reagierte das Teileinzugsgebiet mit heftigen, schnellen Abflussreaktionen mit hohen Abflussbeiwerten. Durch die chronologische Gliederung der dominierenden Abflussprozesse während einzelner Niederschlag-Abfluss-Ereignisse konnte bei solchen Situationen auch Oberflächenabfluss nachgewiesen werden.

Quellen des unteren Teileinzugsgebietes DÜ-SH steuerten maßgeblich zum Basisabfluss des Dürreychgebietes bei. Über diesen tiefen Abfluss wurden mit Konzentrationen unter 2 mg C l^{-1} nur geringe Mengen DOC exportiert. Die DOC-Konzentration des Direktabflusses war abhängig von der Stärke der Abflussreaktion des Teileinzugsgebietes. Wie die Ganglinienseparationen zur dynamischen Aufteilung von Abflussbeiträgen der Teileinzugsgebiete bei unterschiedlichen Vorfeuchten zeigen konnten, stiegen die DOC-Konzentrationen von DÜ-SH mit dem Abfluss.

5.4 Das Gesamtgebiet

Der DOC-Jahresexport aus dem Wassereinzugsgebiet des Dürreychbachtals lag während des Untersuchungszeitraumes im Mittel bei $3 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Damit bewegen sich die Ergebnisse dieser Untersuchung im Vergleich mit Angaben anderer Arbeiten im zahlenmäßig mittleren Bereich. In einem Überblick über DOC-Exporte von Flusseinzugsgebieten geben MULHOLLAND & WATTS (1982) Werte zwischen 0,01 und $6 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ an. HOPE et al. (1994) ermittelten in einer Review $3,8 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ für gemäßigte Regionen. Diesem DOC-Export steht jedoch eine um mehrere Größenordnungen höhere Kohlenstofffixierung durch Photosynthese gegenüber. In OADES (1988) wird für die Primärproduktion in Wäldern eine Fixierung von 2 bis $4 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ geschätzt. Im Bezug auf den Kohlenstoffhaushalt des gesamten Ökosystems spielt also der DOC-Export nur eine untergeordnete Rolle.

Im Dürreychbachtal zeigte sich eine Skalenabhängigkeit der mittleren DOC-Konzentration. Mit zunehmender Gebietsgröße nahm die DOC-Konzentration ab. Dies lag in der Verteilung von Gebietseigenschaften begründet, die sich mit der Skale verändern. Vom kleinsten ausgegliederten geschachtelten Teileinzugsgebiet hin zum Gebietsauslass nahm die Gewässervernetzung und somit die Ankoppelung von oberflächennahen Abflusskomponenten ab. Gleichmaßen wurde der Anteil von Feuchtflächen und Flächen mit ausgeprägten organischen Auflagen geringer. Auch AITKENHEAD et al. (1999) setzten den Anteil von Feuchtflächen mit der DOC-Konzentration in Bezug. Eine höhere Korrelation fanden sie jedoch mit der Größe des C-Pools im Boden und der DOC-Konzentration. Auf Grund ihrer mächtigen organischen Auflagen stellen die Feuchtflächen im Dürreychgebiet größere C-Pools dar, als die Böden der Hänge.

Durch die Bilanzierung von Kohlenstoffflüssen aus dem Einzugsgebiet SH und dem Gesamtgebiet konnten bei Ereignissen, bei denen der DOC-Eintrag aus dem Teileinzugsgebiet DÜ-SH zu vernachlässigen war, Ganglinienseparationen durchgeführt werden. Dabei ließ sich

den oberen Teileinzugsgebieten eine maßgebliche Rolle bei der Bildung der Abflussspitzen durch Direktabfluss zuordnen. Je weiter man sich von den oberen Teileinzugsgebieten entfernt, desto geringer wird auf Grund sinkenden Flächenanteils deren Bedeutung für das Abflussgeschehen und den DOC-Export. Zunehmend tritt dann die Ankoppelung von Flächen mit lateralen schnellen Abflusskomponenten an das Gewässer in den Vordergrund. PESCHKE (1998) beschrieb bei zunehmender Gebietsfeuchte und anhaltenden Niederschlägen eine Ausdehnung des Gewässernetzes am Wernersbach, das dann neue Flächen an das Gewässer anschließt.

5.5 DOC als Tracer

In der Hydrologie werden häufig zur Verfolgen von Fließwegen des Wassers natürlich vorkommende oder künstlich zugesetzte Stoffe als Tracer verwendet. Um durch Massenbilanzen Aussagen über Anteile einzelner Abflusskomponenten am Gesamtabfluss erhalten zu können, gelten folgende Bedingungen als Voraussetzung:

- Konservatives Verhalten: Der Tracer sollte chemisch stabil sein und sich in ähnlicher Weise bewegen wie das Wasser, mit dem er transportiert wird.
- Bekannte Input-Größen (Menge oder Konzentration)
- Niedrige Hintergrundkonzentrationen, um das Tracersignal deutlich vom Hintergrundsignal abtrennen zu können.

Im Gerinne konnte das Verhalten von DOC als konservativ betrachtet werden. Als mögliche Verluste kommen hier Adsorption und Abbau durch Mikroorganismen und Photooxidation in Betracht. Verglichen mit Böden bietet das Gewässer aber eine recht kleine Oberfläche, mit der huminstoffreiches Wasser nur über wenige Stunden in Kontakt tritt, so dass Verluste an DOC durch Adsorption während der Laufzeit im Bach vernachlässigt werden können. Zudem

fiel die DOC-Konzentration im Bachwasser nach Abflussereignissen sofort wieder auf die Konzentration des Basisabflusses zurück. Es konnte kein verzögerter DOC-Export durch DOC-Desorption festgestellt werden. BATTIN (1999) registrierte bei einem Gewässer 2. Ordnung einen DOC-Verlust im Gewässerverlauf von ca. $0,71 \text{ mg C l}^{-1}$ durch Adsorption am Gewässerbett und mikrobiellen Abbau. DOC-Konzentrationen von Wasser aus den oberen Teileinzugsgebieten wurden nach nur kurzer Fließstrecke im Gewässer erfasst, so dass die Verluste vernachlässigbar sind. HONGVE (1994) untersuchte die Reduzierung von Huminstoffen auf Grund natürlicher Sonnenstrahlung. Nach einer Expositionszeit von 12 Tagen betrug der Verlust bis zu 32%. Dem gegenüber berichten WETZEL *et al.* (1995) von nur 10% durch die UV-Bestrahlung mit der 3-6-fachen Intensität der Sonneneinstrahlung über 6 h. Da der größte Teil des Untersuchungsgebietes jedoch durch dichte Bewaldung beschattet war, und sich die Aufenthaltszeit des Wassers im Dürreychbach bei höheren, huminstoffreichen Abflüssen im Bereich von Stunden bewegte, wurde ein möglicher geringer photooxidativer Abbau von DOC ebenfalls vernachlässigt. Hier konnte die DOC-Konzentration also Aufschluss über Abflussbeiträge verschiedener Flächen geben, deren Bilanzierung zu einer Ganglinienseparation führte.

Beinhaltet das Ziel der Untersuchungen jedoch andere Fragestellungen als die Bilanzierung von Massen, sind durchaus andere Anforderungen an einen Tracer denkbar. Im Gegensatz zu den konservativen Eigenschaften des DOC im Gerinne, erlauben gerade die Wechselwirkungen zwischen Bodenmatrix und DOC an Hand von DOC-Konzentration und Zusammensetzung Rückschlüsse auf die Herkunft des transportierenden Wassers.

6 Dynamisches Prozesskonzept

In der Diskussion über Modellierungsansätze von natürlichen Systemen steht immer wieder die Frage nach der Notwendigkeit von Kenntnissen über kleinskalige Prozesse im Mittelpunkt, da bei einer Vergrößerung der Skale andere Prozesse in den Vordergrund treten (UHLENBROOK *et al.* 2001). Für eine Simulation von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen makroskaliger Flussgebiete reichen auch häufig stochastische Modelle aus. Sie sind aber in der Regel nicht auf andere Flussgebiete übertragbar. Es existiert jedoch bereits eine Vielzahl physikalisch basierter Niederschlag-Abfluss-Modelle wie CATFLOW (MAURER 1997), WASIM-ETH (HENNING 1999), TOPMODEL (BEVEN & KIRKBY 1979), HBV-96 (LINDSTRÖM *et al.* 1997), die von natürlichen Systemen, nach denen sie entwickelt wurden, auf andere anwendbar sein sollen. Hydrologische Systeme werden in der Regel näherungsweise als deterministisch betrachtet, so dass eine bestimmte Eingangsgröße, z.B. eine Niederschlagsverteilung, in eine vorhersagbare Ausgangsgröße, z.B. eine Abflussreaktion, umformbar ist (DYCK & PESCHKE 1995). Bei Kenntnis der dem System zu Grunde liegenden Prozesse lassen sich theoretisch aus Eingabedaten über Systemoperationen die Ausgabedaten berechnen. Durch die Individualität der Wassereinzugsgebiete ist dennoch eine Kalibrierung auf das jeweils nachzubildende System, z.B. mit gemessenen Zeitreihen, notwendig, da bei Modellen immer nur einige ausgewählte Eigenschaften nachbildbar ist. Eine erfolgreiche Anpassung von Abflussganglinien muss allerdings nicht zwangsläufig auf einer Abbildung der dominierenden Prozesse basieren. Steht doch zur Modelloptimierung meist eine große Anzahl variabler Parameter zur Verfügung. Ziel des Dürreychprojektes war es daher, an Hand detaillierter Untersuchungen ein Verständnis dominierender Abfluss bildender Prozesse von der Plot- bis zur Einzugsgebiets-Skale bei unterschiedlichen Gebietszuständen zu erlangen. Am Beispiel des Dürreychbachtals konnten dann bestehende

Niederschlag-Abfluss-Modelle auf ihre Eignung zur Übertragung auf andere Systeme geprüft werden (CASPER 2002).

Die vorliegende Arbeit leistete dazu nicht nur durch die Zuordnung dominierender DOC-Exportcharakteristika, Abflussprozesse und Abflussdynamiken zu einzelnen Standorten, Hangflächen und Teileinzugsgebieten ihren Beitrag. Es ließ sich darüber hinaus durch die Untersuchungen der Transportdynamik gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen im Dürreychbachtal auch nachweisen, dass die Bedeutung einzelner Abfluss bildender Prozesse, die aus einem bekannten Niederschlag mit bekannter Intensität eine bestimmte Abflussreaktion generierten, stark vom Ausgangszustand des Systems abhing, hauptsächlich charakterisiert durch dessen Feuchtegrad. Es konnten drei Systemzustände gegeneinander abgrenzt werden:

- Bei Trockenwetter kam nur Wasser mit niedrigen DOC-Konzentrationen aus tieferen Deckschichten des Hangblockschuttes zum Abfluss. Die Hochflächen waren Abflussinaktiv. Kleinere Niederschläge riefen keine neuen Abflussreaktionen hervor.
- Bei intensiveren Niederschlägen oder Niederschlägen bei höherer Bodenfeuchte prägten schnelle Abflusskomponenten aus Interflow der Hochflächen die Abflussganglinie und den DOC-Export.
- Erst bei ausreichendem Feuchtegrad und anhaltenden Niederschlägen wurden die Hangflächen durch eine Ausdehnung des Gewässernetzes und einsetzender lateraler Abflusskomponenten abflusswirksam und banden dadurch auch die gewässerfernen Hochflächen an das Gewässernetz an. Jetzt trugen auch diese Flächen signifikant zum DOC-Export bei.

Für das Teileinzugsgebiet LE ließen sich die Abflusskomponenten am besten identifizieren. Hier wurden die höchsten DOC-Werte gemessen, was eine genaue Wasser- und C-

Bilanzierung für einzelne Ereignisse ermöglichte. Zudem reduzierte sich im Untersuchungsgebiet mit einer Verkleinerung der Skale die Vielfalt der sich überlagernden Abflussprozesse. Im Einzugsgebiet LE traten nur schnelle, oberflächennahe Abflusskomponenten auf; der Basisabfluss fehlte vollständig.

Im Folgenden wird ein konzeptionelles Modell zur Beschreibung der Beziehung zwischen DOC-Konzentration im Dürreychbach und dem Gebietszustand durch Überlagerung der in LE dominierenden Abflussprozesse unter Verwendung des Feuchtegrades F , der bereits als dimensionslose Größe eingeführt wurde, erstellt. Er kann als ein Gebietszustand betrachtet werden, der von Funktion der zeitlichen (und räumlichen) Niederschlagsintensitätsverteilung sowie der Vorfeuchte abhängig ist. Ein solcher Gebietszustand ist jedoch nicht genau definierbar, da in hydrologischen Systemen kein Anfangszustand erfasst werden kann. Als Behelf ließen sich im Dürreychgebiet Messungen von Bodenfeuchte an repräsentativen Messstellen und DOC-Konzentrationen an den Gebietsauslässen heranziehen. TDR- oder Tensiometermessungen stellen jedoch nur einen eindimensionalen Ausschnitt eines Bodensystems dar. Wie auch Messungen an Gebietsauslässen vermögen sie keinen Aufschluss über die räumlichen Muster der Bodenfeuchteverteilung und deren zeitliche Variabilität zu geben, so dass die Übertragung auf ein Einzugsgebiet mit Fehlern behaftet ist. Anderen räumlich feiner aufgelösten Gebietserfassungen fehlt hingegen meist die zeitliche Auflösung (z.B. Luftbild-/Satellitenaufnahmen). Daraus können Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Gebietszustandes in einer nachfolgend noch anzusprechende Unschärfe der Beschreibung der Gebietsdynamik bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen resultieren, und spiegelt sich durch die Streuung von Messwerten wie Abflussbeiwert und mittlere DOC-Konzentration um eine beschriebene Funktion wider. Als integrative Größe zur Beschreibung des Feuchtegrades wurde daher der Abflussbeiwert α ausgewählt, in dem Einflussgrößen wie Niederschlagsintensität und -dauer, Ausgangsfeuchte des Gebietes sowie Abfluss bildende

Gebietseigenschaften Eingang finden. Die an LE beobachteten wichtigsten Abflussprozesse lassen sich in Abhängigkeit von F wie folgt beschreiben:

Interflow

In LE konnte der Interflow als hauptsächliche Abflusskomponente beobachtet werden. Um das Modell möglichst einfach zu halten, wurde die Dichtefunktion der abflussaktiven Querschnittsfläche des Feuchtegrades als normalverteilt angenommen (Abb. 52).

$$A_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{F - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2}$$

(Gl. 10)

A_i : Interflow [$l \ s^{-1}$]

F : Feuchtegrad zur Aktivierung von Interflow

μ_i : Feuchtegrad bei 50% aktivierter Sättigungsflächen

σ_i^2 : Varianz der Normalverteilung

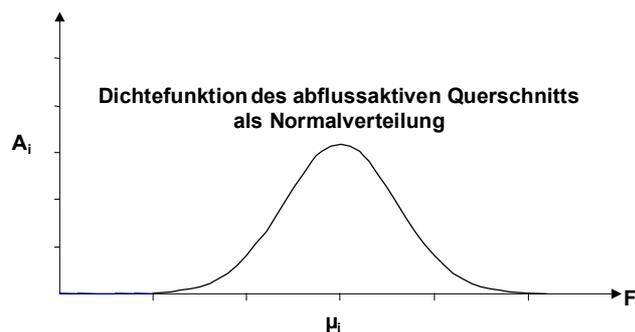
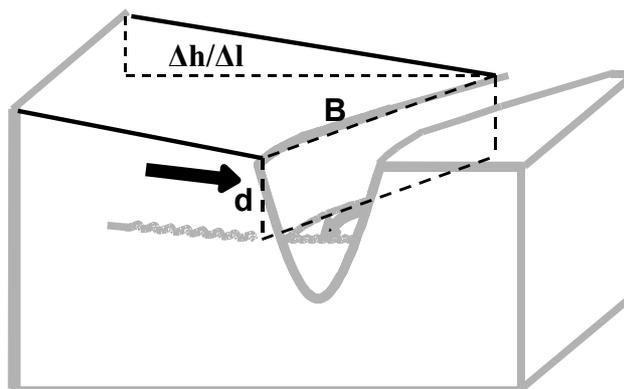


Abb. 52: Verteilungsfunktion der abflussaktiven Flächen in Abhängigkeit von der Gebietsfeuchte.

Daraus abgeleitet stellt sich der Interflow in Gleichung 11 (Abb. 53) als Funktion eines gebietsspezifischen Faktors a_i und dem Integral einer Verteilungsfunktion des Feuchtegrades dar. Der gebietsspezifische Faktor a_i ist dabei als abflussaktiver Bodenquerschnitt mit dessen mittlerer gesättigter Wasserleitfähigkeit und dem Geländepotential zu betrachten.

$$Q_i = a_i \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{F-\mu}{\sigma} \right)^2} dF$$

(Gl. 11)



Q_i [$m^3 s^{-1}$]: Interflow [$l s^{-1}$]

a_i [$m^3 s^{-1}$]: gebietsspez. Faktor

$d \times B \times K_s \times \Delta h / \Delta l$

F : Feuchtegrad

μ_i : Feuchtegrad bei 50%
aktivierter Sättigungsflächen

σ_i^2 : Varianz der Normalverteilung

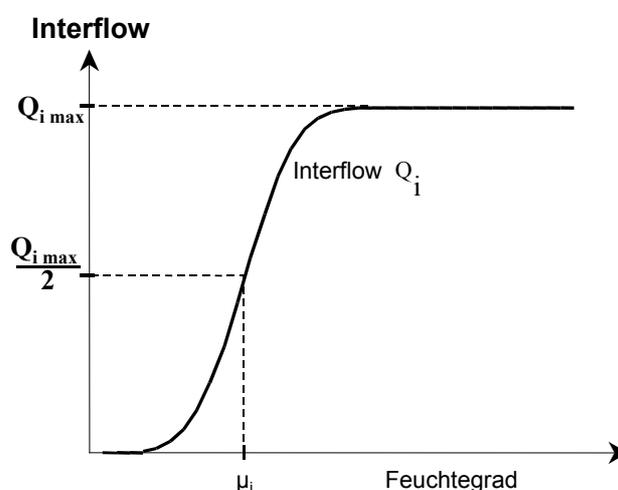


Abb. 53: Relativer Abfluss durch Interflow an LE bei steigendem Feuchtegrad.

Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss (Sättigungsflächenabfluss)

Auf nicht versiegelten Flächen von LE wurde Oberflächenabfluss nur bei wassergesättigtem Boden beobachtet (Sättigungsflächenabfluss). Horton'scher Oberflächenabfluss (Infiltrationsüberschuss) fand nicht statt. Nur Niederschläge, die auf wassergesättigte Flächen fallen, können nicht infiltrieren und führen so zu der schnellsten Abflusskomponente von LE. Die zum Oberflächenabfluss beitragenden Flächenanteile sind jedoch von der Größe der wassergesättigten Fläche abhängig. Auch hier wird als einfachstes Modell der Dichtefunktion des abflussaktiven Flächenanteils eine Normalverteilung in Abhängigkeit des Feuchtegrades angenommen, so dass der Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss als Funktion der

Abflussspende in Abhängigkeit des Niederschlags und des Integrals der Normalverteilung des Feuchtegrades mit einem gebietspezifischen Faktor formuliert werden kann (Abb. 54. Gl. 11). Die Größe $A_{ex\ max}$ stellt hier die maximale Größe der wassergesättigten Fläche dar. Haben sich alle potentiellen Sättigungsflächen mit Wasser gefüllt, ist der Sättigungsflächenabfluss nur noch von der Niederschlagsintensität abhängig.

$$Q_{ex} = A_{ex\ max} \cdot q_{ex}(N) \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_{ex} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{F - \mu_{ex}}{\sigma_{ex}} \right)^2} dF$$

(Gl. 12)

$Q_{ex} [m^3 s^{-1}]$: Oberflächenabfluss auf wassergesättigten Flächen

F : Feuchtegrad

$q_{ex} [m/s]$: Abflussspende

$A_{ex\ max} [m^2]$: gebietspezifischer Faktor (max Ausdehnung der gesättigten Flächen)

μ_{ex} : Feuchtegrad bei 50% aktivierter Sättigungsflächen

σ^2 : Varianz der Normalverteilung

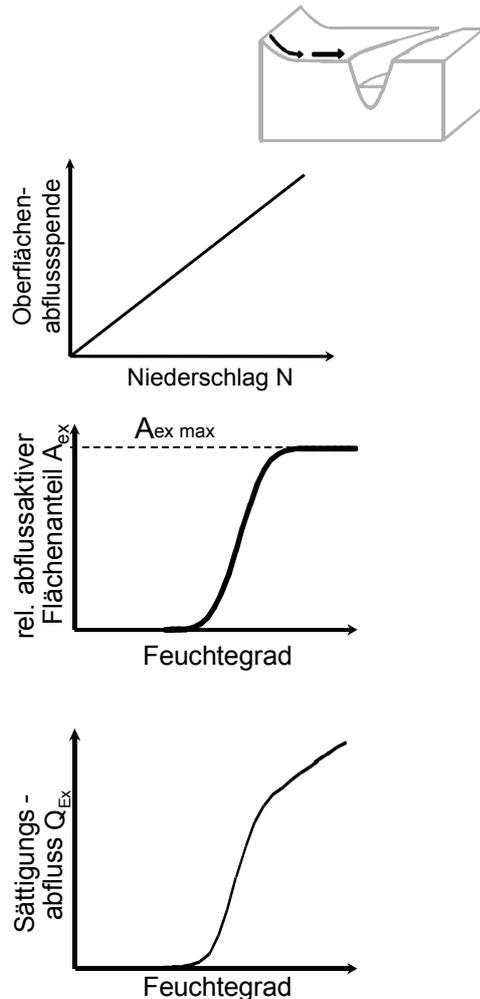


Abb. 54: Oberflächenabfluss an LE bei steigendem Feuchtegrad.

Wegeabfluss

Beim Wegeabfluss handelt es sich ebenfalls um eine Form des Oberflächenabflusses, der durch Infiltrationsüberschuss auf Grund geringer Wasserleitfähigkeit des stark verdichteten oder versiegelten Bodens zustande kommt. Bei annähernd wasserundurchlässiger Oberfläche

ist der Wegeabfluss Q_W nur von der Niederschlagsintensität und der Abflussspende, die einen gebietsspezifischen Faktor darstellt (der den Einfluss von Wegefläche und deren Abflusswirksamkeit durch einen Anschluss ans Gewässernetz beinhaltet), abhängig (Abb. 55).

$$Q_W = a_W \cdot P$$

(Gl. 13)

$Q_W [m^3 s^{-1}]$: Wegeabfluss

a_W : gebietsspezifischer Faktor
mit $a_W = A_W \cdot q_w$

$A_W [m^2]$: Fläche der Wege

$q_w [m s^{-1}]$: Abflussspende
der Wege

P : Feuchtegrad

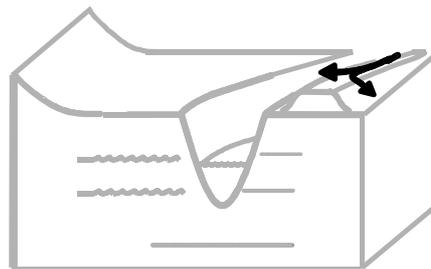


Abb. 55: Wegeabfluss in Abhängigkeit des Feuchtegrades.

Die Abflusskomponenten Q_s , Q_{ex} und Q_W überlagern sich im Einzugsgebiet LE zum Gesamtabfluss Q_{LE} . Sie sind in Abb. 56 zusammen in Abhängigkeit des Feuchtegrades aufgetragen und wurden so dargestellt, dass ihre Abflussanteile qualitativ dem Stellenwert bei der Abflussbildung im Einzugsgebiet LE entsprachen: Dominierend war in fast allen Gebietszuständen der Interflow. „Saturation excess flow“ hingegen konnte nur bei intensiven Niederschlägen beobachtet werden. Auf Grund des geringen Flächenanteils hatte Oberflächenabfluss von Wegen nur bei Gewittern für einen kurzen Zeitraum eine messbare Bedeutung, bis Abflussreaktionen der anderen Flächen diese Abflusskomponenten überdeckten.

Aus den über den Messzeitraum errechneten mittleren DOC-Konzentrationen und den in den Gleichungen 11 bis 13 dargestellten Komponenten Q_s , Q_{ex} und Q_w lässt sich nun auch deren DOC-Fracht und somit die DOC-Konzentration des Gesamtabflusses des Einzugsgebietes LE in Abhängigkeit des Feuchtegrades berechnen:

$$F_{DOC} = C_{DOC} \cdot Q \quad \text{Gl. 14}$$

$F_{DOC} [mg s^{-1}]$: DOC-Fracht

$C_{DOC} [mg l^{-1}]$: DOC-Konzentration

$Q [l s^{-1}]$: Abfluss

Die mittlere DOC-Konzentration der Abflusskomponente ohne Kontakt mit Oberböden (Q_{ex} und Q_w) wurde gemäß ermittelter Stichproben auf 1 mg C l^{-1} festgesetzt.

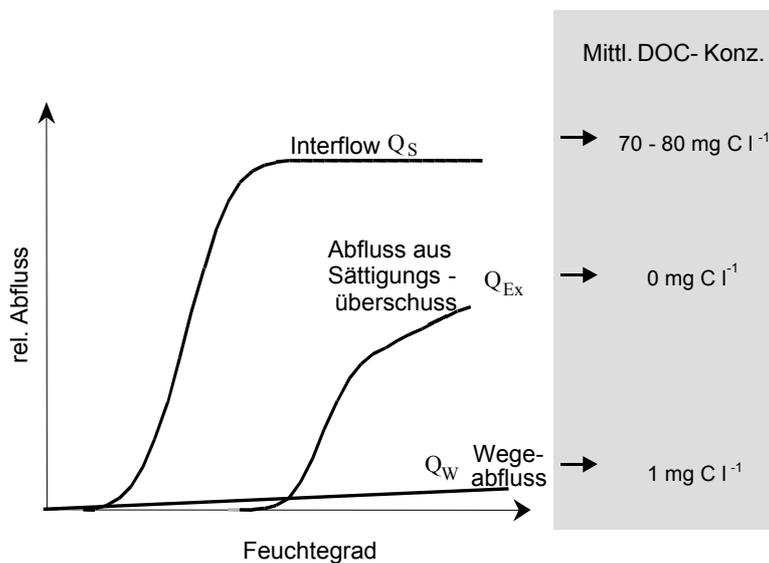


Abb. 56: Schematische Darstellung des relativen Abflusses der Abflusskomponenten Q_s , Q_{ex} und Q_w in LE in Abhängigkeit des Feuchtegrades und Zuordnung einer mittleren DOC-Konzentration zu den Abflusskomponenten.

Die Abflusskomponenten lassen sich mit ihren Variablen a , μ und σ so anpassen, dass die daraus abgeleitete DOC-Konzentration qualitativ die Messwerte für LE, wie sie schon in Kapitel 4.7. (Abb. 45) vorgestellt wurden, nachzeichnet (Abb. 57). Damit zeigte sich, dass die

beschriebenen Abflusskomponenten das Abflussverhalten von LE bei unterschiedlichen Gebietszuständen abbilden können.

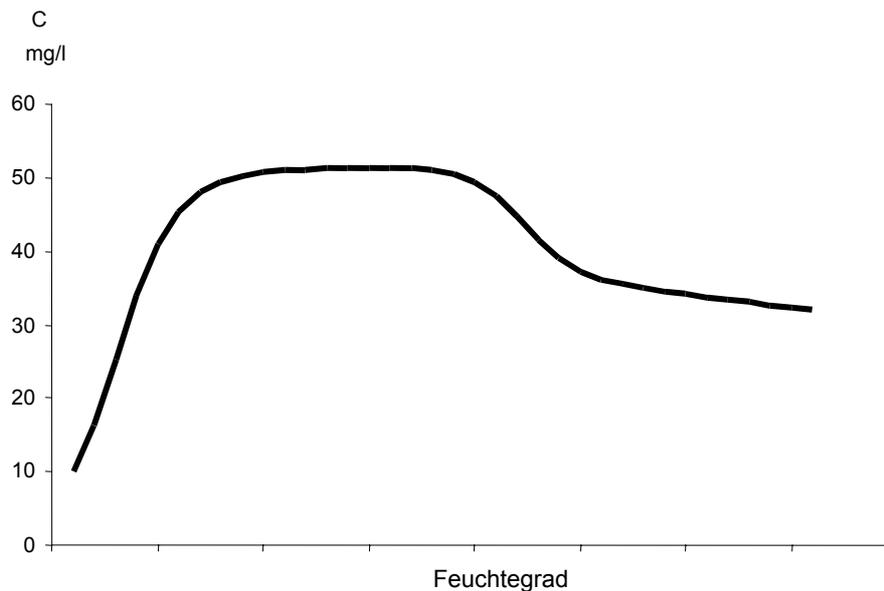


Abb. 57: Modellbildung für die Gebietsreaktion bezüglich der DOC-Konzentration in Abhängigkeit des Feuchtegrads unter Anpassung der Parameter a , μ und σ berechnete DOC-Konzentration aus der Abfluss-Summenkurve g der Abflusskomponente.

Für eine Umkehrung der Aussagen, nämlich eine qualitative oder quantitative Ableitung der Abflusskomponenten aus einem den Feuchtegrad repräsentierenden Parameter wie Abflussbeiwert oder DOC-Konzentration, müssten die bei der Kurvenanpassung ermittelte Werte der Variablen an Hand von Geländemessungen und -beobachtungen plausibilisiert werden.

7 Ausblick

Transportprozesse im Boden haben gezeigt, dass sich vertikale Fließprozesse mit zunehmender Niederschlagsintensität auf größere Bodentiefen ausprägen können, aber bei zu hoher Bodenfeuchte von lateralen Wasserflüssen im Hang überdeckt werden. Eine genaue

Identifizierung eines Grenzzustandes, an dem eine Systemeigenschaft in eine andere umschlug, konnte nicht durchgeführt werden. Diese Unschärfe in der Beschreibung der dominierenden Prozesse ließ sich auch auf größere Skalen übertragen. Die beschriebenen Gebietszustände riefen zwar deutlich unterschiedliche Abfluss- und Stoffexportreaktionen hervor, ließen sich aber nur ungenau voneinander abgrenzen. Diese Unschärfe ist ein Charakteristikum chaotischer Systeme. In hochgradig nichtlinearen Systemen mit rückgekoppelten Prozessen sind räumliche und zeitliche Interpolationen (und erst recht Extrapolationen) mit großen Fehlern behaftet. Diese Problematik natürlicher Systeme wurde schon von LORENZ (1963) bei meteorologischen Prozessen dargestellt. Sie sind aber auch für hydrologische Systeme beschrieben (DYCK & PESCHKE 1995, ZEHE 1999, PESCHKE 1999). Unschärfen der Grenzen eines labilen Systemzustandes ergeben sich vor allem aus einer statistischen Verteilung der räumlichen und zeitlichen Heterogenität von Systemeigenschaften und Systemzuständen. Zur genaueren Beschreibung ist einerseits eine höhere räumliche Auflösung der Parametererfassung notwendig, die mit einem erheblich größeren messtechnischen Aufwand verbunden ist. Zum anderen kann mit Hilfe von Untersuchungen zur Prozessklärung die Breite der Unschärfe durch Hervorheben der dominierenden Prozesse, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurden, eingengt werden. Darüber hinaus ist es an Hand des gewonnenen Prozessverständnisses auch möglich, eine geeignete Parametrisierung der Abflussbildungsprozesse zu suchen, um damit ein Niederschlag-Abfluss-Modell zu konzipieren, das auf den dominierenden Prozessen des jeweils zu simulierenden Systems aufbaut. Des weiteren lässt sich überprüfen, welche geographische Summenparameter - wie ökologische Feuchte oder vom topographischen Index abgeleitete Größen, die eine Vielzahl dieser Prozesse aggregieren und über zeitliche oder räumliche Heterogenitäten integrieren können - für eine Abbildung der räumlichen Verteilung hydrologischer Gebietseigenschaften geeignet sind. WALDENMEYER (in prep.) leitet für das Dürreychbachtal Flächen gleicher

Abflussbildung (Hydrotope) auf der Grundlage der Forstlichen Standortkarte und eines digitalen Höhenmodells ab. Dazu werden aus den Daten der Forstlichen Standortkarte und geomorphologischen Untersuchungen Informationen zum vorherrschenden Standortwasserhaushalt gewonnen und durch ein Regelwerk zu einer statischen Hydrotopklassifikation erarbeitet. So ergibt sich die Möglichkeit, die aus den hier vorgelegten Untersuchungsergebnissen zum DOC-Transport an Hängen abgeleiteten hydrologischen Eigenschaften (Kapitel 4.6.) mit den ausgegliederten Hydrotopen zu vergleichen.

8 Literatur

- ABBT-BRAUN, G., SCHMIEDEL, U., FRIMMEL, F.H. (1990): Elementaranalytische Untersuchungen isolierter Fulvinsäuren unterschiedlichen Ursprungs. *Vom Wasser* 75, 59-73.
- ACKERMANN, M., (1998): Hydrogeologische Systemanalyse und Grundwasserhaushalt des Weiherbach-Einzugsgebietes. Dissertation. Universität Karlsruhe, 144 pp.
- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. (4. Auflage). Hannover
- AIKEN, G.R. (1985): Isolation and concentration techniques for aquatic humic substances. In: Aiken, G.R. et al (Hrsg): *Humic substances in Soil, Sediment and water*. Wiley-Interscience, New York.
- AITKENHEAD, J.A., HOPE, D., BILLETT, M.F. (1999): The relationship between dissolved organic carbon in stream water and soil organic carbon pools at different scales. *Hydrological Processes* 13, 1289-1302.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (1996): Forstliche Standortsaufnahme - Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. (5. Auflage). Eiching b. München.
- ALLARD, B.R., BOREN, H., GRIMVALL, A. (1991): The different roles of humic substances in the environment. In: Allard, B., Boren, H., Grimvall, A. (Eds.): *Humic substances in the aquatic and terrestrial environment*, Springer-Verlag, 3-5.
- ANDERSSON, S., NIELSSON, S.I., SAETRE, P. (2000): Leaching of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in mor humus as affected by temperature and pH. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1-10.
- AZAM, F.T., FENCHEL, J.G., FIELD, J.G., RAY, J.S., MEYER-REH, L.A., THINGSTAD, F. (1983): The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 10, 257-.
- BATTIN, B.J. (1999): Hydrologic flow paths control dissolved organic carbon fluxes and metabolism in an alpine stream hyporheic zone. *Water Resour. Res.* 35(10), 3159-3169.
- BECHER, G., CARLBERG, G.E., GJESSING, E.T., HONGSLO, J.K., MONARKA, S. (1985): High-performance size exclusion chromatography of chlorinated natural humic water and mutagenicity studies using the microscale fluctuation assay. *Environ. Sci. Technol.* 19, 422-426.
- BEVEN, K.J., GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Res. Research* 18(5), 1311-1325.
- BEVEN, G., KIKBY, M.J. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Science Bull.* 24(1), 43-69.

- BISHOP, K., PETTERSON, C., ALLARD, B., LEE, J.H. (1994): Identification of the riparian sources of aquatic dissolved organic carbon. *Environment International* 20(1), 1-19.
- BISHOP, K.H., (1991): Episodic increases in stream acidity, catchment flow pathways and hydrograph separation. Dissertation, University of Cambridge.
- BLASER, P., HEIM, A., LUSTER, J. (1998): Total luminescence spectroscopy of NOM-typing samples and their aluminium complexes. *Environ. Int.* 25(2/3), 285-293.
- BONELL, M., (1998): Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *Journal of the American Water Resources Association* 34(4), 765-785.
- BORMAN, F.H., LIKENS, G.E., EATON, J.S. (1969): Biotic regulation of particulate and solution losses from a forest ecosystem. *Bioscience* 19, 600-611.
- BORMANN, F.H., LIKENS, G.E., SICCAMO, T.G., PIERCE, R.S., EATON, J.S. (1974): The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hubbard Brook. *Ecol. Monogr.* 44, 255-277.
- BRADFORD, S.M., PALMER, C.J., OLSON, B.H. (1994): Assimilable organic carbon concentrations in southern California surface and groundwater. *Water Research* 28 (2), 427-435.
- BROOKS, P.D., MCKNIGHT, D.M., BENCALA, K.E. (1999): The relationship between soil heterotrophic activity, soil dissolved organic carbon (DOC) leachate, and catchment-scale DOC export in headwater catchments. *Water Resour. Res.* 35(6), 1895-1902.
- BUTTLE, J.M., PETERS, D.L. (1997): Interfering hydrological processes in a temperate basin using isotopic and geochemical hydrograph separation: a re-evaluation. *Hydrological Processes* 11, 557-573.
- CASPER, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). Dissertation, Universität Karlsruhe.
- CHRIST, M., DAVID, M.B. (1996): Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol. *Soil Biol. Biochem.* 28(9), 1191-1199.
- CHRISTOPHERSEN, N., NEAL, C., HOOPER, R.P., VOGT, R.D., ANDERSEN, S. (1990): Modelling stream water chemistry as a mixture of soil water end-members: A step towards second-generation acidification models. *J. Hydrol.* 116, 307-320.
- CRONAN, S.C., AIKEN, G.R. (1985): Chemistry and transport of soluble humic substances in forest watersheds of the Adirondack Park, New York. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 1697-1705.

- DALVA, M., MOORE, T.R. (1991): Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchment. *Biogeochemistry* 15, 1-19.
- DANN, M.S., LYNCH, J.A., CORBES, E.S. (1986): Comparison of methods for estimating sulphate export from a forested watershed. *J. Environ. Qual.* 15(2), 140-145.
- DÖRR, H., MÜNICH, K.O. (1986): Annual variations of the ^{14}C content of soil CO_2 . In: Stuiver, M., Kra, R.S. (eds.), *Proceedings of the 12th International ^{14}C Conference*. *Radiocarbon* 28(2A), 338-345.
- DÖRR, H., MÜNNICH, K.O. (1980): Carbon-14 and Carbon-13 in soil CO_2 . *Radiocarbon* 22(3), 909-918.
- DÖRR, H., MÜNNICH, K.O. (1989): Downward movement of soil organic matter and its influence on trace element transport (^{210}Pb , ^{137}Cs) in the soil. *Radiocarbon* 31(3), 655-663.
- DVWK-MERKBLÄTTER ZUR WASSERWIRTSCHAFT 217,, (1990): Gewinnung von Bodenwasser mit Hilfe der Saugkerzen-Methode. DK 628.112.1 Wassergewinnung; DK 556.322.2 Bodenwasser.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1995): *Grundlagen der Hydrologie*. Verl. Für Bauwesen, Berlin, 536 pp.
- EASTHOUSE, K.B, MULDER, J., CHRISTOPHERSEN, N., SEIP, H.M. (1992): Dissolved organic carbon fractions in soil and stream water during variable hydrological conditions at Birkens, southern Norway. *Water Resour. Res.* 28, 6, 1585-1596.
- EATON, A.D., CLESCERI, L.S., GREENBERG, A.E. (EDS.) (1995): *Standard method for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association 42491.
- EICHINGER, L., ABBT-BRAUN, G., FRIMMEL, F. H. (1994): Biodegradation of humic substances. in: Senesi, N., Miano, T.M. (eds.), *Humic substances in the global environment and implications on human health*, Elsevier Science B.V. 283-291.
- EINSELE, G., HINDERER, M. (1992): Stoffbilanzierung und langfristige Trends im Chemismus saurer, oberflächennaher Quell- und Bachabflüsse im kalkfreien, basenarmen Mittleren Buntsandstein. Abschlußbericht des PWAB-Projektes PW 98.074. Geologisches Institut der Universität Tübingen.
- EN 1484,, (1997): *Water analysis - Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC)*. Beuth Verlag, Berlin.
- FETZER, F., (1979): *Topographischer Atlas Baden-Württemberg*. .
- FISCHER, H., PUSCH, M., SCHWOERBEL, J. (1996): Spatial distribution and respiration of bacteria in stream-bed sediments. *Arch. Hydrobiol.* 137, 281-300.

- FISCHER, W.R., (1993): Definition, Abgrenzung und experimentelle Engpässe. Mitteilungen der Senatskommission für Wasserforschung / DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft 12, 5-9.
- FRIMMEL, F.H., (1990): Characterisation of organic acids in freshwater: A current status and limitations. In :Perdue, E.M., Gjessing, E.T., eds.: Organic acids in aquatic ecosystems. Life Sciences Research Report 48, 5-23.
- FRIMMEL, F.H., (1993): Einführung. Mitteilungen der Senatskommission für Wasserforschung / DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft 12, 1-4.
- FUJII, R., RANALLI, A.J., AIKEN, G.R., BERGAMASCHI, B.A. (1998): Dissolved organic carbon concentrations and compositions, an trihalomethane formation potentials in waters from agricultural peat soils, Sacramento-San Joaquin Delta, California: Implications for drinking-water quality. USGS Water-Resources Investigations Report 98-4147.
- GRABMANN (1996): Erläuterungen zu den Standortskarten des Forstbezirks Kaltenbronn. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt, Abt. Botanik und Standortskunde. Freiburg.
- HABERER, K., (1985): Über die Anwendung von Messungen im UV-Bereich bei der Trinkwassergewinnung. Gewässerschutz, Wasser, Abwasser 79, 172-221.
- HANGEN, C., LINDENLAUB, M., LEIBUNDGUT, CH., WILPERT, K. VON (2001): Investigating mechanisms of stormflow generation by natural tracers and hydrometric data: a small catchment study in the Black Forest, Germany. Hydrological Processes 15, 183-200.
- HARGITAI, L., (1994): Biochemical transformation of humic substances during humification related to their environmental functions. Environment International 20(1), 43-48.
- HEAD, M.J., ZHOU, W., ZHOU, M. (1989): Evaluation of ^{14}C ages of organic fractions from loess paleosol sequences near Xian, China. Radiocarbon 31(3), 680-696.
- HILDEBRAND, E.E., (1986): Ein Verfahren zur Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149, 340-346.
- HINTON, M.J., SCHIFF, S.L., ENGLISH, M.C. (1997): The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian Shield catchments. Biogeochemistry 36, 67-88.
- HOEG, S., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, C. (2000): Hydrograph separation in a mountainous catchment - combining hydrochemical and isotopic tracers. Hydrological Processes 14(7), 1199-1216 .
- HONGVE, D., (1994): Sunlight degradation of aquatic humic substances. Acta hydrochim. hydrobiol. 22(3), 117-120.

- HOOPER, R.P., CHRISTOPHERSEN, N., PETERS, N.E. (1990): Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members - an application to the Panola Mountain catchment. *J. Hydrol.* 116, 321-343.
- HOPE, D., BILLET, M.F., CRESSER, M.S. (1994): A review of the export of carbon in river water: Fluxes and processes. *Environmental Pollution* 84, 301-324.
- HORNBERGER, G.M., BENCALA, K.E., MCKNIGHT, D.M. (1994): Hydrological controls on dissolved organic carbon during snowmelt in the snake river near Montezuma, Colorado. *Biogeochemistry* 25, 147-165.
- HUBER, S., GREMM, T., FRIMMEL, F.H. (1990): Chromatographische Trennung natürlicher organischer Wasserinhaltsstoffe mit UV-, Fluoreszenz- und DOC/TOC-Detektion ohne Probenvoranreicherung: Auswahl geeigneter Trennsysteme. *Vom Wasser* 75, 331-342.
- HYNES, H.N.B., (1963): Imported organic matter and secondary productivity in streams. *Proc. XVI. Int. Congr. Zool.* 4, 324-329.
- HYNES, H.N.B., (1970): *The ecology of running waters*. University Press, Liverpool, 555 pp.
- JARDINE, P.M., WILSON, G.V., MCCARTHY, J.F., LUXMOORE, R.J., TAYLOR, D.L., ZELANSKY, L.W. (1990): Hydrogeochemical process controlling the transport of dissolved organic carbon through a forested hillslope. *Journal of contaminant hydrology* 6, 3-19.
- JARDINE, P.M., WILSON, G.V., LUXMOORE, R.J., MCCARTHY, J.F. (1989): Transport of inorganic and natural organic tracers through a isolated pedon in a forest watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 317-323.
- KAPLAN, L.A., LARSON, R.A., BOTT, T.L. (1980): Patterns of dissolved organic carbon transport. *Limnol. Oceanogr.* 25 (6), 1034-1043.
- KLEEBOEG, H.B., MAUSER, W., PESCHKE, G., STREIT, U. (1999): *Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998)*. Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft. Weinheim u.a.
- KUMKE, M.U., ZWIENER, C., ABBT-BRAUN, G., FRIMMEL, F.H. (1999): Spectroscopic characterization of fulvic acid fractions of a contaminated Groundwater. *Acta hydrochim. Hydrobiol* 27, 409-415.
- LEAVITT, S.W., FOLLET, R.F., PAUL, E.A. (1996): Estimation of slow- and fast-cycling soil organic carbon pools from 6n HCl hydrolysis. *Radiocarbon* 38(2), 231-239.
- LEIDIG, E., (1998): *Quantifizierung und modellhafte Beschreibung der Stickstoffverluste durch Denitrifikation im Bearbeitungshorizont landwirtschaftlich genutzter Flächen*. Karlsruhe, Universität, Dissertation, 110 pp.

- LICHTFOUSE, E., DOU, S., HOUOT, S., BARRIUSO, E. (1995): Isotope evidence for soil organic carbon pools with distinct turnover rates -- II. Humic substances. *Organic Geochemistry* 23(9), 845-848 .
- LIKENS, G.E., (1977): *Biogeochemistry of a forested ecosystem* . New York : Springer, 146pp.
- LINDSTRÖM, G., JOHANSSON, B., PERSSON, M., GRDELINA, M., BERGSTRÖM, S. (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J. Hydrol.* 199, 272-288.
- LORENZ, E.N., (1963): The mechanics of vacillation. *Journal of atmospheric science* 20(2), 130-141.
- LUNDQUIST, E.J., JACKSON, L.E., SOW, K.M. (1999): Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soilbiology and Biochemistry* 31, 1031-1038.
- MALCOM, R.L., (1989): Factors to be considered in the isolation and characterization of aquatic humic substances. in: Allard, B., Boren, H., Grimvall A. (Eds.): *Humic substances in the aquatic and terrestrial environment*. Springer Verlag Berlin , 9-36.
- MAURER, T. (1997): *Physikalisch begründete zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransportes in kleinen ländlichen Einzugsgebieten*. Mitt. D. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe 61, Karlsruhe.
- MCDOWELL, W.H., LIKENS, G.E. (1988): Origin, composition, and fluxes of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecol. Monogr.* 58(3), 177-195.
- MCDOWELL, W.H., WOOD, T. (1984): Podzolization: Soil processes control dissolved organic carbon concentrations in stream water. *Soil Sci.* 137(1), 23-32.
- MCDOWELL, W.H., (1985): Kinetics and mechanisms of dissolved organic carbon retention in a headwater stream. *Biogeochemistry* 1, 329-352.
- MEESBURG, H., MÜLLER, H.E. (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., ARMBRUSTER, F., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, CH. (1998): Determination of the geomorphological instantaneous unit hydrograph using tracer experiments in a headwater basin. *IAHS Publications* 248, 327-336.
- 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) 56.
- MULHOLLAND, P.J., DAHM, C.N., DAVID, M.B., DI TORO, D.M., FISHER, T.R., HEMOND, H.F., KÖGEL-KNABER, I., MEYBECK, M.H., SEDELL, J.R. (1990): Group report: What are the temporal

- and spatial variations of organic acids at the ecosystem level. In: Perdue, E.M., Gjessing, E.T. (eds), *Organic Acids in Aquatic ecosystems*, John Wiley, New York, 315-329.
- MULHOLLAND, P.J., WATTS, J.A. (1982): Transport of organic carbon to the oceans by rivers of North America: a synthesis of existing data. *Tellus* 34, 176-186.
- NAKANE, K., LEE, N.J. (1995): Simulation of soil carbon cycling and carbon balance following clear-cutting in a mid-temperate forest and contribution to the sink of atmospheric CO₂. *Vegetatio* 121(1-2), 147-156.
- OADES, J.M., (1988): The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5, 35-70.
- PERDUE, E.M., GJESSING, E.T. (1989): Introduction. In : *Organic acids in aquatic ecosystems*, 1-3.
- PESCHKE, G., (1998): Hydrological processes of storm runoff generation. In: *The Oder flood in summer 1997. Proceedings of the european expert meeting in Potsdam, 18. May 1998.*, PIK Report 48, 75-87.
- PESCHKE, G., (1999): Das wissensbasierte System FLAB - ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflußbildung . *IHI Schriften* 10, 122 pp.
- PLATE, E., (1995): *Weierbachprojekt : Zwischenbericht 1994* / [Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW), Universität Karlsruhe]. , 236 pp.
- QUALLS, R.G., HAINES, B.L., SWANK, B.T. (1991): Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest. *Ecology* 72(1), 254-266.
- REHFUESS, K.E., (1990): *Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 294pp.
- ROBERTS, M., MUCKENHEIM, T., ECKL, S., WEBB, L. (1999): Kostengünstige Labormethode zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung nach DIN 19737. *Boden & Wasser* 51(5), 48-53.
- RODEL, H., (1993): *Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit, des Strömungswiderstandes und des Fliessvorganges in Bergbächen*. . Dissertation, ETH Zürich Nr. 9830.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1989): *Lehrbuch der Bodenkunde* . Stuttgart : Enke.
- SCHULLA, J. (1997): *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung von Folgen von Klimaveränderungen*. Diss. ETH 12018, 161 S. Zürich.
- SCHWEIKLE, V., (1973): Die Stellung der Stagnogleye in der Bodengesellschaft der Schwarzwaldhochfläche. *Transact. Conf. Comm.V and VI ISSS*, 181-186.
- SCOTT, M.J., JONES, M.N., WOOF, C., TIPPING, E. (1998): Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in drainage water from an upland peat system. *Environ. Int.* 24(5/6), 537-546.

- 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 6.
- SENESI, N., MIANO, T.M., PROVENZANO, M.R. (1991): Fluorescence as a means of distinguishing fulvic and humic acids from dissolved and sedimentary aquatic sources and terrestrial sources. in: Allard, B., Boren, H., Grimvall A. (Eds.): Humic substances in the aquatic and terrestrial environment. Springer Verlag Berlin , 63-73.
- THURMAN, E.M., MALCOM, R.L. (1981): Preparative isolation of aquatic humic substances. Environ. Sci. Technol. 15, 463-466.
- THURMANN, E.M., (1985): Organic geochemistry of natural waters. Martinus Nijhoff/ Dr. Junk Publishers, Dordrecht.
- TIPPING, E., (1986): Some aspects of the interaction between particulate oxides and aquatic humic substances. Marine Chem 18, 161-169.
- UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, C. (1997): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. Wasser und Boden 49.
- UHLENBROOK, S., MCDONNELL, J., LEIBUNDGUT, CH. (2001): Foreword to the special issue: Runoff generation and implications for river basin modelling. Freiburger Zeitschriften zur Hydrologie 13, 1-10.
- VANNOTE, R.L., MINSHALL, G.W., CUMMINS, K.W., SEDELL, J.R., CUSHING, C.E. (1980): The river continuum concept. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, 130-137.
- VELDKAMP, E., (1994): Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation . Soil Science Society of America Journal 158(1), 175-180 .
- WALDENMEYER, G., CASPER, C. (2001): Identification of hydrotopes in a small forested catchment (Dürreych, Black Forest, Germany). Freiburger Zeitschriften zur Hydrologie 13, 104-110.
- WALDENMEYER, G., (1999): Ausgliederung von Flächen gleicher Abflußreaktion auf der Grundlage der forstlichen Standortskarte und eines Digitalen Höhenmodells. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 7, 167-172.
- WALDENMEYER, G., (2002):Dissertation, Universität Karlsruhe, in Vorbereitung.
- WETZEL, R.G., CORNERS H., MANNY, B.A., ARBOR A. (1977): Seasonal changes in particulate and dissolved organic carbon and nitrogen in a headwater stream. Arch. Hydrobiol. 80, 1, 20-399.
- ZEHE, E., (1999): Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone auf verschiedenen Skalen. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 227 pp.

Anhang

A. Begriffsdefinitionen

Begriff	Erläuterung
Abflussbildung, langsame	Reaktion des Grundwassersystems auf Niederschläge. =Basisabfluss
Abflussbildung, schnelle	Beitrag zum Abflussgeschehen innerhalb weniger Stunden bis zu 2 Tagen. =Direktabfluss
Abflussprozess, dominierender/ dominanter	Vorherrschender Abflussprozess einer Fläche bei bestimmtem Gebietsfeuchtezustand (gleichzeitig sind alle anderen Prozesse untergeordnet möglich!). Unterscheidung von potentiell dominantem Abflussprozess (bedingt durch Einzugsgebietseigenschaften) und aktuell dominantem Abflussprozess (ereignisbedingt).
Abflussprozess: Oberflächenabfluss	1.) Horton'scher Oberflächenabfluss: Infiltrationsüberschuss (= Sättigung von oben); hier auf Wegen, Rückegassen, verdichteten Torfen und bei extremen Intensitäten, auch auf „Sonderflächen“; 2.) Sättigungsflächenabfluss (s.u.) 3.) Offene Gerinne
Abflussprozess: pipe flow	Schneller Fluss in größeren Röhren (cm-Bereich), z.B. bei uns oft Wurzelbahnen, Subrosionsröhren (oft unter Wurzeltellern, Hangrinnen), Grabegänge
Abflussprozess: return flow	Exfiltrierender Bodenwasseranteil bei Sättigungsflächenabfluss

<p>Abflussprozess: Sättigungsabfluss</p>	<p>=Interflow; laterale oberflächennahe Abflusskomponente, die oberhalb eines Wasserstauers durch Überschreiten des p_f-Wertes entsteht.</p>
<p>Abflussprozess: Sättigungsflächenabfluss</p>	<p>(=saturation excess flow) Grundwasseroberfläche oder Stauwasseroberfläche erreicht Geländeoberfläche, entsprechendes Neigungs-/Rauigkeitsverhältnis induziert oberflächigen Abfluss (saturation excess flow). Dieser setzt sich aus \rightarrowreturn flow und Niederschlag auf bereits gesättigte Flächen zusammen (Uhlenbrook, Leibundgut, 1997), enge Wechselwirkung mit oberflächennahem \rightarrowZwischenabfluss (shallow subsurface flow). Bei uns im Bereich der Hochflächen dominierender Abflussbildungsprozess, dagegen wenig im Bereich der Bachaue.</p>
<p>Abflussprozess: Perkolation</p>	<p>Tiefensickerung, gravitationsbedingte Wasserbewegung aus der Bodenzone in die Grundwasserzone</p>
<p>Abflussprozess: Zwischenabfluss</p>	<p>Syn. interflow, bodeninnerer Abfluss, hypodermischer Abfluss etc. Überbegriff für verschiedene laterale, meist oberflächennahe Matrix- und/ oder Makroporenflüsse. Voraussetzung: Sprung in der hydraulischen Leitfähigkeit und Neigung.</p> <p>Auch Gliederung in schnellen Z. (bei uns z.B. in der Humusaufgabe, Subrosionsröhren) und langsamen Z. (z.B. über Ortstein oder tieferen Horizontgrenzen).</p>
<p>Feuchtfleichen</p>	<p>Flächen mit dauerhaften boden-/vegetationskundlichen Feuchteigenschaften (z.B. Pseudovergleyung, Vermoorung, Feuchtezeiger nach Ellenberg etc.) <u>ungeachtet</u> des Abflussbildungsprozesses. Häufig Sättigungsflächen.</p>

<p>Grundwasser</p>	<p>vg. Hölting (1989) sowie ehem. DIN 4049</p> <p>Gliederung in tiefes G. (bei uns Festgesteinsklüfte/-poren) und flaches G. (Schuttdecken, Auensedimente). Durchschnittliche Verweilzeiten im Dürreychgebiet: 2-3 Jahre (spricht eher für flaches G)</p>
<p>Hangwasser, Hangzugwasser</p>	<p>Oberflächennahes, hangparallel abfließendes →Grundwasser oder →Stauwasser</p>
<p>Hydrotope</p>	<p>„Hydrologisch homogene Teilgebiete“ (DYCK & PESCHKE, 1995). Äquivalent sind HSU (hydrological similar unit) und HRU (hydrological response unit) zu verstehen. WALDENMEYER (1999, 2001). versteht darunter funktionelle Homogenität (Flächen mit gleichen dominierenden Abflussprozessen)</p>
<p>Makroporen</p>	<p>Porengrößen und -strukturen, die eine deutlich schnellere Wasserbewegung als in der Bodenmatrix zulassen (BEVEN & GERMANN, 1982). Größenordnung in der Literatur kontrovers</p>
<p>Geschachtelte Einzugsgebiete</p>	<p>=Nested catchments. Hierarchisch geschachtelte Einzugsgebiete (im Dürreychgebiet: Hauptpegel, SH, LE). Charakteristisch: Mit zunehmender Größe abnehmende Komplexität</p>
<p>Regionalisierung</p>	<p>In KLEEBERG, H.-B. Hrsg. (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). Übertragen werden Berechnungsvorschriften, Modellparameter und Zustandsgrößen</p>

Schuttdecke	Hauptsächlich im Periglazial entstandenes Lockersediment über Festgestein
Skale, Hang-	Meist streifenförmig verstandener Raumausschnitt zwischen Wasserscheide und Tiefenlinie. Bis wenige 100 m lang
Skale, Makro-	Auf Einzugsgebietsgrößen bezogener Raumausschnitt: > 100 km ² (KLEEBERG et al., 1999)
Skale, Meso-	Auf Einzugsgebietsgrößen bezogen: 0,01 bis 100 km ² (KLEEBERG et al., 1999)
Skale, Mikro-	Auf Einzugsgebietsgrößen bezogener Raumausschnitt: <0,01 km ² (KLEEBERG et al., 1999)
Skale, Plot- /Punkt-	Raumausschnitt von einigen m ² bis wenigen 10er m ²
Skale, Profil-	sy. Punktskale (MERZ, 1996), vorwiegend vertikal verstandener Raumausschnitt, Größenordnung 1 m ²
Stauwasser	Zeitweilig auftretendes bewegliches Bodenwasser über hoch anstehendem Stauhorizont meist oberhalb 13 dm unter GOK (AG Boden, 1994)
Subrosion	Unterirdische Ausspülung von Bodenfeinmaterial, oft durch Erweiterung von →Makroporen, Tunnelerosion

B. Salzverdünnungsmethode nach Rodel

$$m_{\text{Salz}} = q \cdot \int_0^{\infty} C(t) dt$$

$$C = \frac{m_{\text{Salz}}}{\int_0^{\infty} d(t) dt}$$

m_{Salz} :	Masse des gelösten Salzes
q :	Abfluss
C :	Salzkonzentration
t :	Zeit

C. Profilbeschreibung Intensivmeßprofil 1

Bodentyp		Bändchen-Staupodsol oder Hanggley
Humusform		feinhumusarmer rohhumusartiger Moder
Höhe		745 m NN
Relief		steiler Hang (24°) in Ost-Südost-Exposition, deutliche Muldenlage mit Hangversteilung etwa 20m oberhalb des Profils. Dort Quellaustritte.
Bestand		Fichte, z.T. Tanne 80-100jährig
Substrat		Schuttdecke mit großen Blöcken aus Bausandstein-Material
L	1 cm (0)	Nadelstreu, z.T. nicht vorhanden bei Vegetationsschluss
Of	3 cm	zersetzte Nadelstreu
Oh	2 cm	
Aeh	bis 23 cm	ca. 40% Skelett, plattige Steine z.T. eingeregelt, gebleicht, einzelne Regenwürmer
Ahe	bis 28 cm	humusfleckig, nach unten unscharfer Übergang, Skelettanteil uneinheitlich (links >50%, rechts 20%), geringer Anteil alte Wurzelröhren
Sew-Ae	bis 48 cm	unterschiedlich feucht, Skelettanteil etwas uneinheitlich (links 30-40%, rechts 20-30%), gebleicht, orange imprägniert, z.T. innen noch rot oder ganz rot - dadurch stark geflammtes Bild, Skelett mürbe-brüchig, einzelne Wurzeln bis 40 cm
Sew	bis 78 cm	feucht bis naß mit Wasseraustritt am Tiefpunkt des Stauers, Skelettanteil uneinheitlich (links 60%, rechts 20-30%), stärker gebleicht als Sew-Ae,.

Sd-Bbms	bis 81 cm	verkittetes, intensiv rostfarbenes Ortsteinbändchen aus schwach lehmigem Sand, Verlauf wellig bis taschenartig, Skelettanteil 20-30%, Bändchen durchzieht auch das Skelett
Bms	Profiltiefe 105 cm	St2, orterdeartig verfestigt, fuchsbraun, mit 30% wenig verwittertem Skelettanteil (Übergang zum Cv)
C(v)	Bohrstock: 140 bis 150 cm	grusiger rosafarbener Sand

nach (WALDENMEYER 2002.)

D. Profilbeschreibung Intensivmeßprofil 2

Bodentyp	Schwach podsolige Braunerde	
Humusform	feinhumusarmer Moder	
Höhe	ca. 745 m NN	
Relief	Verebnung eines getreppten Hanges unterhalb des Seemiskars, Blockhalde angrenzend	
Bestand	Fichte 60-80jährig	
Substrat	z.T. Kolluvium (skelettfrei!)	
L	1 cm (0-1)	
Of	3 cm	
Oh	1 cm (0-2)	
A(e)h	bis 8-15 cm	St4, erkennbare Kornbleichung, außer einem Großblock (gX) skelettfrei, sehr unscharfe Horizontgrenzen mit zungenförmiger Humusinfiltration ausnahmsweise bis 28 cm Tiefe, feine Holzkohlestückchen, einzelne Regenwürmer
Ah-M	bis 25 cm (20-28)	St3, erkennbare Kornbleichung, praktisch skelettfrei, sehr unscharfe Horizontgrenzen, schwach humos, feine Holzkohlestückchen
II M	bis 45 cm (meist um 40, auch 30, 48)	St3, Skelettanteil 60-70% fX sowie mX, stark verkeilt und nicht eingeregelt, unverwittert, sehr unscharfe Horizontgrenzen, Humusfleckung, etwas Holzkohle, ausgeprägte Wurzelröhren
II Bv-M	Profiltiefe 110 cm	St3 mit etwas mehr Ton, Skelettanteil 70-80% fX sowie mX, sehr stark verkeilt und nicht eingeregelt, unverwittert, etwas Holzkohle, Wurzelröhren

III >110 bis 150 zunehmend rosafarbener Gesteinszersatz
ilC(v) cm (Bohrstock)

nach WALDENMEYER (2002)