

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Matthias Bents

Hydrologische Prozessuntersuchungen
in einem
Permafrostgebiet in der Mongolei

Referent: PD Dr. Jens Lange
Korreferent: Prof. Dr. Lucas Menzel

Masterarbeit unter der Leitung von Dr. Jens Lange
Freiburg i. Br., Januar 2013

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die hydrologischen Prozesse nach Starkregenereignissen, in einer von diskontinuierlichen Permafrost geprägten Gebirgswaldsteppe in der nördlichen Mongolei untersucht. Zu diesem Zweck wurden Tracerexperimente durchgeführt, um zum einen Oberflächenabfluss nachweisen zu können, zum anderen um das Fließverhalten und die Fließdynamik des Hangabflusses zu ermitteln. Zur Bewertung der abflussgenerierenden Eigenschaften der Böden, wurde die Brilliant Blue-Methode angewendet. Des Weiteren wurden Wasserproben zur Bestimmung der Hauptionen und der stabilen Isotope genommen.

Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass die steilen Südhänge, nach Starkniederschlägen, Oberflächenabfluss generieren. Durch Tracerversuche konnten die Fließigenschaften des Hangabflusses am Nordhang erfasst werden. Es zeigte sich, dass es zwei verschiedene, von der Lage des Permafrosts abhängige Fließformen am Nordhang gibt. An manchen Stellen floss das Wasser in Spalten, während es anderorts in der organischen Auflage als Matrixfluss abfloss. An dem untersuchten Nordhang kam es, nach Starkregenereignissen, stellenweise zu oberflächlichem Fließen. Eine durchgeführte Ganglinienseparation erbrachte hingegen kein akzeptables Ergebnis, da das Einzugsgebiet, mit 100 km², zu groß für die Anwendung dieser Methode ist. Trotzdem konnten einige Informationen aus den Messergebnissen der Wasserproben gewonnen werden.

Schlagwörter: Permafrost, Fließwege, Oberflächenabfluss, Tracerversuche, Brilliant Blue, Mongolei

Abstract

The subject of this master thesis is the investigation of hydrologic processes after rainstorms, in a forest-steppe ecotone, which is characterized by discontinuous permafrost, in northern Mongolia. Tracer experiments were conducted to verify surface flow on the steep south facing slopes and to determine the dynamic of slope runoff from north facing slopes. The infiltration characteristics of the different soils were visualized using the Brilliant Blue method. Finally, water samples were taken to analyse the content/concentration of the stable isotopes (^2H , ^{18}O) and main ions.

The occurrence of surface flow on the south facing slopes could be verified and the dominant drainage characteristics of a north facing slope were studied. Here, different types of flow pathes occur, which depend on the depth of the permafrost layer. Burned forest sites show quikflow in soil pipes and areas, covered by vegetation, reveal matrix flow in the thick organic layer. Also overland flow occurred at the reviewed north facing slope. The results of the hydrograph separation were not significant, as the catchment area (100 km²) is too big to succesfully apply this method. However, some useful information could be extracted from the results of the water sample analyses.

Keywords: permafrost, flow pathes, surface flow, tracer experiments, Brilliant Blue, Mongolia

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
Vorwort.....	XI
1 Einleitung	1
1.1 Das MoMo-Projekt.....	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Das Untersuchungsgebiet.....	3
2.1 Messnetz	6
3 Stand der Forschung	7
4 Methodik	10
4.1 Untersuchung des Oberflächenabfluss am Südhang	10
4.2 Tracerexperimente am Nordhang im verbrannten Wald	15
4.3 Experimente mit Brilliant Blue	19
4.4 Ganglinienseparation.....	23
5 Ergebnisse	27
5.1 Tracerversuch am Südhang	27
5.2 Tracerexperimente am Nordhang im verbrannten Wald	29
5.3 Brilliant Blue-Methode.....	30
5.4 Messergebnisse der Haptionen- und Isotopenanalyse.....	33
6 Diskussion.....	38
6.1 Untersuchung des Oberflächenabflusses am Südhang.....	38
6.2 Fließeigenschaften und –dynamik auf dem Permafrostboden am Nordhang.....	42
6.3 Ganglinienanalyse	48
7 Zusammenfassung	53

Literaturverzeichnis	56
Erklärung	61
Anhang.....	i
7.1 Brilliant Blue-Plot Nr. 1	i
7.2 Brilliant Blue-Plot Nr. 2	ii
7.3 Brilliant Blue-Plot Nr. 3	i
7.4 Brilliant Blue-Plot Nr. 4	ii
7.5 Brilliant Blue-Plot Nr. 5	iv
7.6 Kalibrierung der Naphthionatbestimmung (Oberflächenabfluss)	vi
7.7 Spektren der Naphthionatbestimmung (Oberflächenabfluss)	vii
7.8 Kalibrierung des Uranins (Hangwasserexperiment)	viii
7.9 Spektren des Uranindurchgangs	ix
7.10 Kalibrierung des Naphthionats (Hangwasserexperiment).....	x
7.11 Spektren des Naphthionatdurchgangs	xi
7.12 Finale Parameter, des Durchgangskurvenanpassung mit dem CXTFIT- Modells	xii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Landkarte der Mongolei, mit Makierung des Khentii - Gebirges und der Position des Untersuchungsgebietes.	3
Abbildung 2.2: Ansicht des untersuchten Teils des Bärenals (Blickrichtung nach Süden).	4
Abbildung 2.3: EZG Bärenal mit dem rot umrandeten Teil, in dem die Untersuchungen gemacht wurden. Der Rote Punkt zeigt die Position des Pegels, der blaue Punkt die Einspeisestelle am Nordhang und die grünen Punkte die Südhänge S1 und S2.	5
Abbildung 3.1 Schematische Darstellung des typischen Bodenaufbaus und der Lage des Permafrostes und der gesättigten Zone. Die Abbildung erklärt, unter welchen Bedingungen es zu Makroporenfluss kommt. (Carey & Woo, 2000)	8
Abbildung 4.1: Mit Aktivkohle gefüllte Teeeier, wie sie im Gelände ausgebracht wurden.	10
Abbildung 4.2: Mit Tracer gefüllte Teebeutel zur Ausbringung des Tracers, mit verminderter Gefahr eines aerosiven Transportes.	10
Abbildung 4.3: Anordnungsprinzip der Teeeier innerhalb eines hangparallen Profils am Hang.	11
Abbildung 4.4: Übersicht der Tracer- und Teeeierpositionen am Südhang S1.	12
Abbildung 4.5: Positionen der ausgebrachten Tracerbeutel und der Teeeier am Südhang S2.	13
Abbildung 4.6: Filtern und Abfüllen der Probelösung nach der Elution.	14
Abbildung 4.7: Verwendetes Fluoreszenzfotometer von PerkinElmer.	14
Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Bodenbedeckung über der Fließstrecke, im verbrannten Wald, am Nordhang.	16
Abbildung 4.9: Überblick des Tracerversuchs am Nordhang mit den Positionen der Einspeise- und Probenahmestellen.	17
Abbildung 4.10: Uranineinspeisung am 20. Juni um 17:40 Uhr.	18
Abbildung 4.11: Naphthionateinspeisung am 21. Juni um 11:40 Uhr (18 Stunden nach der Uranineinspeisung).	18
Abbildung 4.12: Übersicht über die Positionen der berechneten Plots und der Bodenfeuchtemessprofilen.	20
Abbildung 4.13: Brilliant Blue-Plot Nr. 1 im natürlichen Zustand.	20
Abbildung 4.14: Brilliant Blue-Plot Nr. 2 vor dem Zurückschneiden der Vegetation.	21
Abbildung 4.15: Der selbe Plot nach der Entfernung der Vegetation.	21
Abbildung 4.16: Position des Brilliant Blue-Plots am Südhang S2.	21
Abbildung 4.17: Plot mit natürlicher Vegetation, vor der Bearbeitung.	21
Abbildung 4.18: Plot Nr. 4 am Nordhang im verbrannten Wald mit abgestorbenen Wurzeln und Moosen.	23
Abbildung 4.19: Im Vergleich der Plot Nr. 5 am Nordhang, auf einem Bereich mit vitaler Waldbodenvegetation aus Gräsern und Moosen.	23
Abbildung 4.20: Beprobungsstelle am Bärenalbach.	24

Abbildung 4.21: Aus einer Erdspalte, unter einem Stein, austretendes Hangwasser.	24
Abbildung 5.1: Graphische Darstellung der Naphthionatkonzentrationen, am Südhang S1, über den drei Sammelterminen.	27
Abbildung 5.2: Graphische Darstellung der gemessenen Naphthionatkonzentrationen in der Aktivkohle aus den Teeeiern am Südhang S2.	28
Abbildung 5.3: Gemessene Uranin-durchgangskurve des Tracerversuchs am Nordhang.	29
Abbildung 5.4: Naphthionatdurchgangs-kurve der gemessenen Konzentrationen.	29
Abbildung 5.5: Zu Beginn der Beregnung war stellenweise ein Abperlen des Wassers erkennbar (Hydrophobie).	31
Abbildung 5.6: Ergebnisse der Laboranalysen, von den Proben des Ereignisses am 19. Juni 2012.	34
Abbildung 5.7: Ergebnisübersicht der Messergebnisse von dem Ereignisses am 31. August 2012.	35
Abbildung 5.8: Messergebnisse der Hangwasserbachproben, des Niederschlags vom 19. Juni und des Permafrosts.	37
Abbildung 6.1: Überblick über die Bodenfeuchte im Oberboden (5 cm Tiefe) der beiden Messfelder am Südhang S1, der Niederschlagsverteilung und des Termine der Ausbringung des Tracers und der Teeeier (grüne Linie), sowie der Sammeltermine (gelbe Linien).	40
Abbildung 6.2: Bodenfeuchten der beiden Messfelder und Niederschlagsverteilung der einzelnen Zeitabschnitte zwischen den Sammelterminen.	41
Abbildung 6.3: Hanganschnitt des Südhangs mit Fließspuren von Oberflächenabfluss.	42
Abbildung 6.4: Fließspuren von konzentriertem Oberflächenabfluss eines Südhangs.	42
Abbildung 6.5: Gemessene Uranin-Durchgangskurve (blaue Punkte) und der modellierte Durchgang (rote Linie).	43
Abbildung 6.6: Gemessene (blue Punkte) und modellierte (rote Linie) Naphthionat- Durchgangskurve.	43
Abbildung 6.7: Stelle mit "returnflow" am Nordhang.	46
Abbildung 6.8: Die gleiche Stelle wie in Abb. 6.7 nach dem Aufgraben.	46
Abbildung 6.9: Weitere Austrittsstelle am Nordhang.	46
Abbildung 6.10: Auch hier zeigt sich durch das Aufgraben, dass große Steine den Austritt auslösen.	46
Abbildung 6.11: Abflusspeak des Bärenalbaches und der Niederschlagsverteilung des Ereignisses vom 19. Juni, sowie die Isotopensignatur des Niederschlags (Kreise) und des Bachwassers (Punkte).	48
Abbildung 6.12: Darstellung des Abflusspeaks und des Niederschlags vom 19. Juni, sowie der Nitratkonzentrationen im Niederschlag (Kreis) und Bachwasser (Punkte).	49
Abbildung 6.13: Ergebnis der Ganglinienseparation des Niederschlagsereignisses vom 31. August, mit dem Nitratgehalt des Niederschlags und Hangwassers als Endmember. Die hellblaue Fläche stellt den Oberflächenabfluss und die dunkelblaue Fläche den SSF dar.	52

Abbildung 7.1: Schematischer Querschnitt des untersuchten Teils des Barentals, mit den dominierenden Fließwegen nach Starkniederschlägen (Südhang - links, Nordhang mit verbranntem Wald - rechts).	55
Abbildung A1: Typisches Infiltrationsmuster am Südhang S1 unterhalb der Bodenfeuchtemesstelle.....	i
Abbildung A2: Nahaufnahme eines Ausschnitts aus dem oben gezeigten Profil. Es ist zu erkennen, dass das Wasser kaum tiefer als 5 cm infiltrierte.....	i
Abbildung A3: Nahaufnahme einer Rharbarberwurzel. Es ist auffällig, dass es zu keiner tieferen Infiltration entlang der Wurzel kommt.	ii
Abbildung A4: Skelettreiches Bodenprofil mit flachem Infiltrationsmuster am Südhang S2.	i
Abbildung A5: Ausschnitt eines Bodenprofils, mit einer erkennbar flachen Infiltrationsfront und dem Fehlen von präferentiellen Fließwegen an der Grenzfläche zwischen den großen Steinen und dem Boden.	i
Abbildung A6: Aufgegrabenes Profil des Brilliant Blue Plots Nr. 4 am Nordhang.....	ii
Abbildung A7: An der Grenze zwischen der Organischen Auflage und dem skelettreichen Boden sind deutlich die präferentiellen Fließwege zu erkennen.....	ii
Abbildung A8: Abgeschählter Wurzelfilztepich nach der Beregnung mit Brilliant Blue.	iii
Abbildung A9: Blick in die Arbeitsmulde vor dem Bodenprofil. Auf dem Permafrost fließt das gelöste Brilliant Blue hanglateral ab.....	iii
Abbildung A10: Profil des Brilliant Blue-Plots Nr. 5. Das Wasser sammelt sich auf dem sehr hochliegenden Permafrost und fließt unterhalb der organischen Auflage hanglateral ab.	iv
Abbildung A11: Profil mit dem bis auf den Permafrost reichenden, gesättigten Moospolster. Das Brilliant Blue infiltrierte flächig und sammelt sich auf dem gefrorenen Boden.	iv
Abbildung A12: Eislinse im gefrorenen Boden unter dem gesättigten Moospolster.....	v

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Teeeierproben mit Sammeldatum, Anzahl der Tage im Feld, Anzahl der Ereignisse > 10mm im Sammelabschnitt, Niederschlagsmenge seit Ausbringung der Teeeier, Niederschlagsmenge im Sammelabschnitt, maximale Niederschlagsintensität im Sammelabschnitt und maximale Anzahl an trockentagen vor einem Niederschlagsereignis > 10 mm.	39
Tabelle 2: Hydraulische Parameter des Tracer Versuches mit Naphthionat.	44
Tabelle 3: Literaturübersicht der Studien mit vergleichbaren SSF-Fließgeschwindigkeiten.	45

Abkürzungsverzeichnis

AK	Aktivkohle
DOC	Dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
EZG	Einzugsgebiet
IWRM	Integriertes Wasser-Ressourcen Management
SpC	Specific conductance (spezifische Leitfähigkeit)
SSF	Subsurface stormflow
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit wurde in Verbindung eines großen Projektes, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wird erstellt. Durch seine guten Kontakte in der Wissenschaft konnte mir mein Betreuer Dr. Jens Lange ermöglichen, den praktischen Teil meine Masterarbeit in Mongolei zu bearbeiten. Er stand mir bei der Versuchsplanung und Durchführung mit Rat und Tat zu Seite und war während der Erstellung der Masterarbeit steht's ein guter Ansprechpartner. Dafür möchte ich mich dieser Stelle herzlich bedanken. Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Lucas Menzel von der Universität Heidelberg, da er mich in sein Forschungsprojekt mit einbezogen hat. Großer Dank gebührt auch den beiden Doktoranten der Universität Heidelberg Stefanie Minderlein und Benjamin Kopp, die mich sowohl bei der Arbeit im Feld, als auch durch den Austausch von Daten und Informationen sehr gut unterstützten. Auch möchte ich mich bei Benjamin Kopp für das Korrekturlesen meiner Arbeit bedanken. Weiterer Dank gilt der Dipl. Hydrologin Barbara Herbstritt, die mich bei der Arbeit, im Labor der Universität Freiburg, unterstützte.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Schwager Khayankhyarvaa Damdim bedanken, bei dem ich während meinem Aufenthalt in Ulaanbaatar wohnen konnte.

Besonders möchte ich mich bei meiner Frau bedanken, die mir stets den Rücken frei gehalten hat, damit ich an meiner Masterarbeit arbeiten konnte.

1 Einleitung

Die hydrologische Grundlagenforschung wird in der Mongolei zunehmend wichtiger. Da sich das Land in einem sozio-ökonomischen Wandel befindet, welcher sich in hohem Maße auf den Wasserbedarf auswirkt, ist es wichtig genauere Kenntnisse über das Wasserdargebot und die Herkunft des Wassers zu erlangen. Um die Herkunft des Wassers zu untersuchen, müssen vor allem die Prozesse der Quellgebiete in den Gebirgsregionen genauer erforscht werden. Dabei liegen zunächst die abflussbildende Prozesse, sowie die Wasserspeicher im Vordergrund. Da diese bisher, in der Mongolei nur wenig untersucht wurden, ist es von großem Interesse Prozessstudien zu diesem Thema, in der Mongolei, durchzuführen.

1.1 Das MoMo-Projekt

Die Masterarbeit ist ein Teil eines von dem Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt, welches als Ziel die „Entwicklung und Implementierung eines auf die nachhaltige Nutzung ausgerichteten Integrierten Wasser-Ressourcen Management (IWRM) in der Mongolei als Modellregion für Zentralasien“ hat (Zitat: Homepage: Momo-Project). In der Mongolei herrschen extreme klimatische Bedingungen und das Land unterliegt einem umfassenden Landnutzungswandel, welche die Ansprüche an die Wasserquantität stark beeinträchtigt. So steigt der Abbau von Bodenschätzen, wie Gold und Kupfer, für welchen viel Wasser benötigt wird. Des Weiteren steigt die ackerbauliche Nutzung des Bodens, der durch die notwendige Bewässerung ebenfalls zu einem höheren Wasserverbrauch führt. Ein weiteres Arbeitsfeld des Projektes ist die schlecht entwickelte Siedlungswasserwirtschaft, welche sowohl Defizite in der Trinkwasserversorgungssicherheit, als auch in der Abwasserversorgung aufweist (Momo-Project). Als Untersuchungsgebiet wurde für das Projekt das Einzugsgebiet des Kharaa ausgewählt, da dieses verhältnismäßig gut erschlossen und exemplarisch für die Wasserprobleme der Mongolei ist. Das Momo-Project befindet sich bereits in der zweiten Phase, welche eine Laufzeit von drei Jahren hat. Im April 2013 wird die zweite Phase auslaufen.

Ein Mitglied dieses großen Projektes ist die Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, welche das Themenmodul „Hydrologie und Landnutzung“ bearbeitet. Die Universität Heidelberg betreibt unter der Leitung von Prof. Dr. Lucas Menzel Grundlagenforschung in einem kleineren Teileinzugsgebiet in dem Khentii-Gebirge. Im Rahmen dieses Teilprojektes wurde diese Masterarbeit erarbeitet.

1.2 Zielsetzung

Durch die Arbeit von Professor L. Menzel, St. Minderlein und B. Kopp (Universität Heidelberg) lagen, zu Beginn dieser Arbeit, Beobachtungen vor, die es erlaubten Forschungsziele zu definieren. So war durch Messungen der Bodenfeuchte bekannt, dass die steilen unbewaldete Südhänge in den Sommermonaten sehr trocken sind (Minderlein & Menzel, 2012). Des Weiteren haben Messungen der Infiltrationsraten ergeben, dass diese auf den südexponierten Hängen sehr gering sind (Kopp & Menzel, 2012). Die Bodenfeuchte der von Permafrost unterlagerten Nordhänge, mit moderatem Gefälle und Gebirgstaiga, ist hingegen vergleichsweise hoch und auch die Infiltrationsraten übersteigen die an den Südhängen gemessenen Raten (Kopp & Menzel, 2012). Die Ganglinie des untersuchten Vorfluters zeigt eine schnelle Reaktion auf Starkniederschlagsereignisse, was darauf schließen lässt, dass ein großer Teil des effektiven Niederschlags auf schnellen Fließwegen zum Abfluss kommt (Kopp & Menzel, 2012).

Durch diese Forschungsergebnisse können folgende Hypothesen formuliert und die Zielsetzung für diese Masterarbeit definiert werden.

Hypothesen

- Bei Starkniederschlägen kommt es zu Oberflächenabfluss an den südexponierten Hängen.
- Es gibt schnellen Interflow auf dem Permafrost an den Nordhängen.
- Der Gebietsabfluss wird nach Starkniederschlagsereignissen von Oberflächenabfluss und schnellem Interflow dominiert.
- Das Hangwasser der nordexponierten Hänge beinhaltet geschmolzenen Permafrost.

Ziele

- Das Auftreten von Oberflächenabfluss auf den Südhängen soll bewiesen werden.
- Der Hangabfluss der nordexponierten Hänge soll mittels Tracerversuche untersucht werden um Erkenntnisse über Fließverhalten und –dynamik auf dem Permafrost zu erhalten.
- Durch Ganglinienseparation sollen die Komponenten des Abflusses getrennt und Aussagen über die Herkunft des Wassers getroffen werden.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das Forschungsgebiet liegt am westlichen Rand des Khentii-Gebirges auf der Höhe des Ortes Batsumber, ca. 60 km nördlich der Hauptstadt Ulaanbaatar. Das Khentii-Gebirge befindet sich im Nordosten der Mongolei. Es dehnt sich über eine Länge von 200 km von Ulaanbaatar im Süden bis über die russische Grenze hinweg nach Norden aus und bildet einen Teil des transbaikalischen Gebirgssystem. Die Höhenlagen reichen von 600 – 2800 m AMSL. Die Gipfel haben meist runde Erscheinungsformen und die Täler sind in ostwestlicher Richtung exponiert. Da die Winde hauptsächlich aus Norden oder nordwestlicher Richtung kommen, bilden sich deutlich unterschiedlichen Mesoklimaten an den Nord- und Südhängen aus. So kommt es aufgrund von Luv-Lee-Effekten zu höheren Niederschlagsmengen an den Nordhängen (Wyss, 2007).

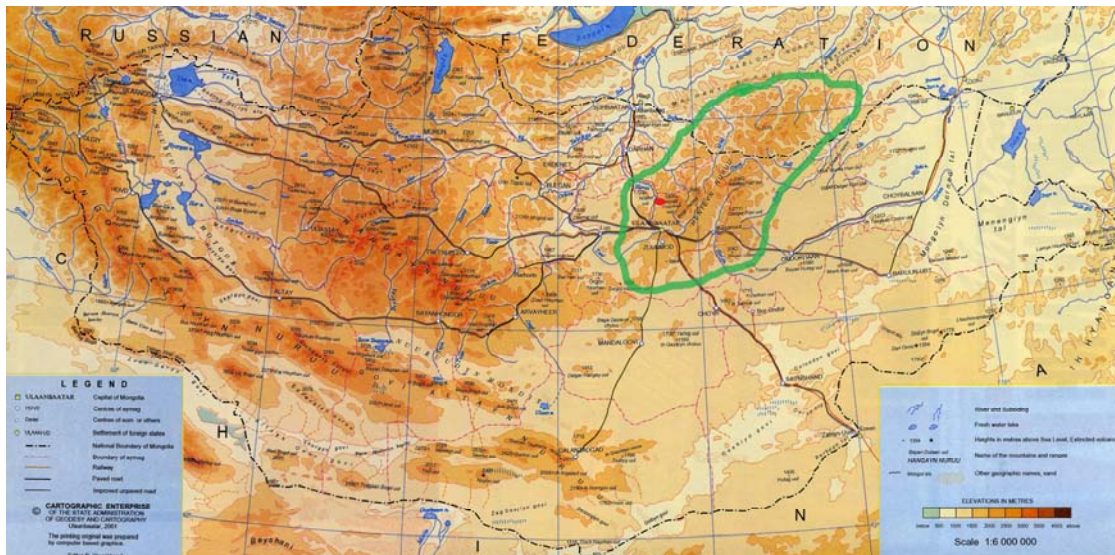


Abbildung 2.1: Landkarte der Mongolei, mit Makierung des Khentii - Gebirges und der Position des Untersuchungsgebietes.

Die Forschungsarbeit wurde in einem Tal (N 48° 26,896, E 107° 11,404) durchgeführt, in dem der Sugnugur Fluss (Bärentalbach) von Osten kommend in westliche Richtung fließt. Der Sugnugur ist ein Zufluss des Kharaa, welcher in Richtung Norden in den größten Fluss der Mongolei, dem Selenge, mündet. Der Selenge entwässert in den sibirischen Baikalsee.

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Übergangszone der semi-ariden Steppe und der Gebirgstaiga (Minderlein & Menzel, 2012). Der Jahresniederschlag im Jahr 2011, lag in diesem Teil des Khentii-Gebirges bei 317 mm (Minderlein & Kopp, 2012). Rund 70% des Jahresniederschlags fallen in den Monaten Juni bis August (Menzel, et al., 2011). In den Sommermonaten können kräftige Sommergewitter mit Niederschlagsintensitäten

von über 30 mm/h auftreten. Die für das Jahr 2011 gemessene Jahresmitteltemperatur betrug $-1,8^{\circ}\text{C}$ (Minderlein & Kopp, 2012). Auf Grund der starken kontinentalen Einflüsse kommt es zu großen Temperaturunterschieden, sowohl zwischen Winter und Sommer, als auch zwischen Tag und Nacht (Minderlein & Menzel, 2012). Das Klima ist als stark kontinentalbeeinflusstes boreales Klima, bzw. als Dwc-Klima (nach Köppen) zu bezeichnen.

Das extreme kontinentale Klima führt dazu, dass kryogene Prozesse und diskontinuierlicher Permafrost auftreten. So sind die Nordhänge im Untersuchungsgebiet von Permafrost unterlagert (Ishikawa et al., 2005). Aufgrund der klimatischen Bedingungen und dem Auftreten von Waldbränden dominieren in der Region schwach ausgebildete Podsolböden (Wyss, 2007).

Die südexponierten Hänge des Untersuchungsgebiets sind sehr steil und weisen kaum einen Baumbestand auf. Auf den Südhängen wachsen hauptsächlich Gräser und Beifußgewächse, da der Boden keine nennenswerte Humusauflage aufweist.



Abbildung 2.2: Ansicht des untersuchten Teils des Barentals (Blickrichtung nach Süden).

Die nordexponierten Hänge sind flacher und von Taigawald bedeckt. Die häufigsten Baumarten sind *Larix sibirica*, *Betula platyphylla*, *Pinus sylvestris*, *Abies sibirica*. Der Waldboden ist mit dicken Torfmooslagen, Gräsern und stellenweise von Weidenröschen und Preiselbeeren bewachsen. In dem Untersuchungsgebiet ist durch einen Waldbrand mehr als 30% des Waldes abgebrannt. In den verbrannten Teilen des Waldes ist der Boden, ausschließlich an feuchteren Stellen mit Moosen und Gräsern bedeckt, während im vitalen Wald der gesamte Waldboden mit dichten Torfmooslagen bedeckt ist. Der nordexponierte Hang ist flächig von Permafrost unterlagert, wobei der „active layer“, je nach Vegetationsbedeckung unterschiedlich ausgeprägt ist. Besonders im verbrannten Wald sind deutliche Anzeichen von rezenter Gelifluktion (periglaziales Bodenfließen) erkennbar. So ist der Unterhang meist flacher als der Haupthang, bevor dieser in einen steilen Hangknick übergeht. Diese Hangknicke entstanden vermutlich durch fluviale Abtragung des Hangfußes. Auch am Haupthang sind Zeichen von Gelifluktion erkenn-

bar. So sind stellenweise deutliche Gelefluktionszungen vorhanden. Da die Lärchen und Kiefern flache Wurzelteller ausbilden, kommt es nicht zum sonst typischen Sichelwuchs.

Der Talboden besteht aus Flusskiesen, auf denen sich feiner Sand abgelagert hat. Über Jahre hinweg hat sich auf diesem mineralischen Untergrund eine etwa fünfzehn Zentimeter dicke organische Auflage ausgebildet. Die Morphologie des Talbodens ist stark fluvial geprägt; es sind deutlich alte Kiesbänke und Flussläufe erkennbar. Der Talboden ist von kleineren Teilarmen des Flusses durchzogen, die nach niederschlagsreichen Perioden und Starkniederschlägen zeitweise Wasser führen. Der Talboden ist hauptsächlich mit einer kleinen Birkenart (*Betula fusca*) bewachsen. Lediglich auf höheren, trockeneren Bereichen fehlen diese, so dass sich Gräser etablieren konnten. Der nordexponierte Hangfuß ist mit niedrigen Weidengehölzen (*Salix sp.*) bedeckt.

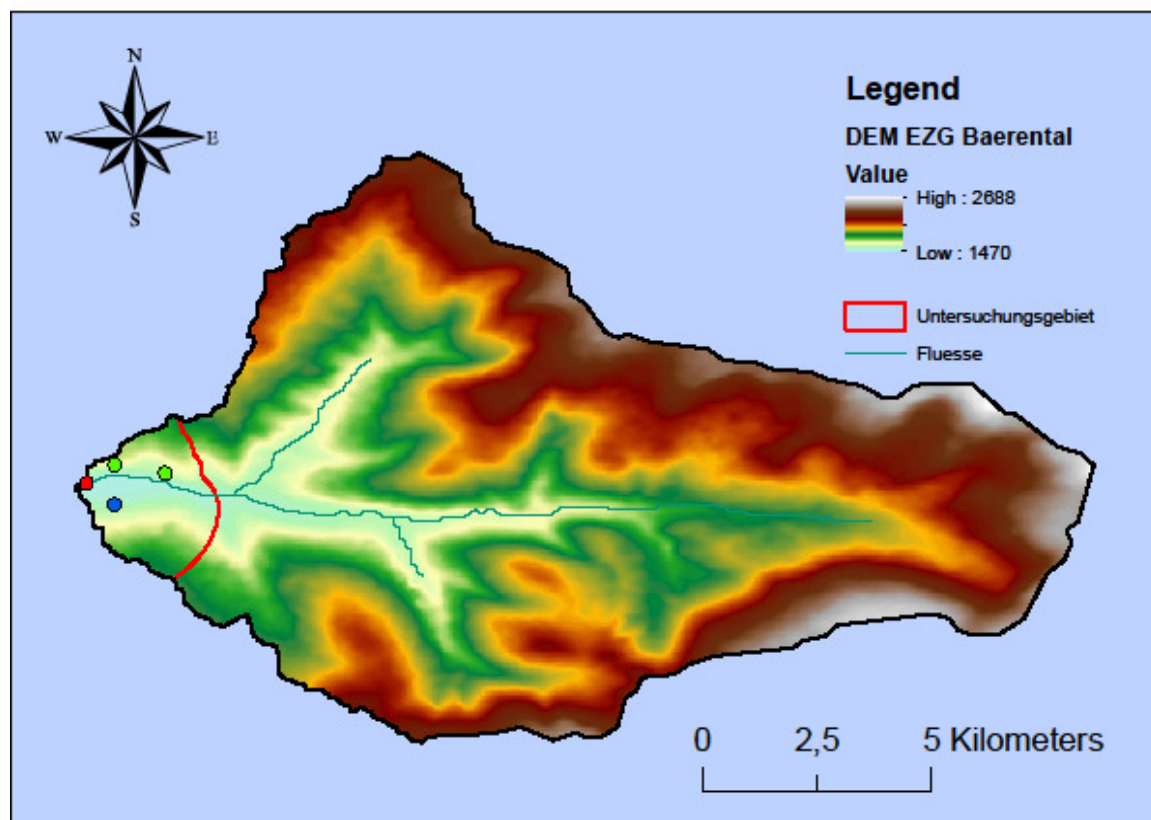


Abbildung 2.3: EZG Bärental mit dem rot umrandeten Teil, in dem die Untersuchungen gemacht wurden. Der Rote Punkt zeigt die Position des Pegels, der blaue Punkt die Einspeisestelle am Nordhang und die grünen Punkte die Südhänge S1 und S2.

Der verwendete Pegel des EZG liegt auf einer Höhe von 1470 m AMSL. Der höchste Punkt liegt am östlichen Rand des EZG und hat eine Höhe von 2688 m AMSL.

Das Einzugsgebiet des Bärenalbaches hat an der verwendeten Pegelstelle eine Größe von rund 100 km². Die in dieser Arbeit verwendeten Proben und Messungen entstammen jedoch nur einem ca. 4,5 km² großen Teil des EZG, oberhalb des Pegels (vgl. Abb. 2.3). Der Talboden in dem untersuchten Teil des EZG liegt auf einer Höhe von 1484 m AMSL. Die südexponierten Hänge ragen bis auf eine Höhe von 1807 m AMSL hinauf. Die Spitze des nordexponierten Hanges liegt auf einer Höhe von 1851 m AMSL.

2.1 Messnetz

Das Untersuchungsgebiet wurde von der Universität Heidelberg mit verschiedenen Messgeräten ausgestattet. So wurde eine Klimastation (KS1) etwa 20 km westlich des Untersuchungsgebietes (48°24,924; 106°56,343) auf einer Höhe von 1193 m AMSL installiert. Der Standort wurde gewählt, da dort die noch Menschen wohnen, die die Klimastation das ganze Jahr über bewachen und einfache Wartungsarbeiten durchführen können. Mit dieser Station wird unter anderem der Niederschlag, mit einem weighing precipitation gauge Pluvio² 200 cm², der Firma Ott, in einer Messhöhe 1.5m und die Lufttemperatur mit dem humidity and temperature probe HMP155 (Vaisala) gemessen. Außerdem wird die Schneehöhe im Winter über einen Sensor (SR 50A, Campbell Scientific) und durch Ablesen einer Skala gemessen.

Eine kleinere Klimastation (KS2) wurde direkt im Untersuchungsgebiet auf einer Höhe von 1494 m AMSL während der Feldperioden im Sommer installiert. Es handelt sich bei dieser Station um eine meteorologische Kompaktstation von Driesen und Kern (WXT5000), sowie einem einfachen Totalisator mit Verdunstungsschutz, einem weiteren Turm mit zwei Psychrometern und Bodenfeuchtesensoren.

Der Wasserstand wurde kontinuierlich mittels einem LT Levellogger Gold (Solinst) gemessen und daraus der Abfluss aus einer P/Q-Beziehung berechnet. Die errechneten Abflusswerte wurden in bestimmten Abständen mittels Flügelmessungen kontrolliert. Um den Wasserstand in einem kleinen Bach, der den Nordhang entwässert, zu messen, wurde eine weitere Drucksonde (LT Levellogger Gold von Solinst) eingesetzt. Zur Messung der Bodenfeuchte wurden am südexponierten Hang, am verbrannten nordexponierten Hang und im von Taiga bewachsenen Nordhang jeweils am Unter- und Mittelhang Messplots eingerichtet. Die Felder waren mit jeweils neun Bodenfeuchtesensoren vom Typ 10HS, der Firma Decagon Devices, bestückt. Diese Sensoren messen über das Prinzip der Capacitance (frequency domain) den volumetrischen Wassergehalt (VWC) im Boden. Gemessen wurde in jeweils dreifacher Wiederholung in den Tiefen 5 cm, 10 cm und 30 cm. Um Informationen über den Niederschlag in größeren Höhen erhalten zu können wurde ein weiterer Totalisator auf der Spitze eines Berges in Höhe von 2048 m AMSL in dem EZG aufgestellt.

3 Stand der Forschung

Die theoretischen Hintergründe zur Abflussbildung und der Fließprozesse wurden bereits in den letzten Jahrzehnten ausführlich untersucht. Da jedoch jedes EZG seine eigenen Strukturen in Hinblick auf Relief, Topografie, Boden und Landnutzung, sowie den klimatischen Bedingungen, wie mittlere Jahrestemperatur und Niederschlagsmengen hat, dominieren in jedem EZG unterschiedliche Abflussbildungsprozesse. In der Regel unterscheiden sich die Prozesse der einzelnen Hanglagen in einem EZG. In einem EZG finden sich Kombinationen der einzelnen Prozesse wieder, die den Niederschlag zum Abfluss bringen. Der Anteil des zum Abfluss kommenden Niederschlages wird als „effektiver Niederschlag“ bezeichnet. Dieser wird durch verschiedene Prozesse zum Gerinneabfluss transformiert.

Eine besondere hydrologische Gegebenheit des untersuchten EZG ist das Vorkommen von Permafrost. Permafrost kann nach Woo M.-k. (1986) als Boden, der über mehrere Jahre hintereinander gefroren bleibt, jedoch signifikante Änderungen des Wasserflusses aufweist, definiert werden. Das Vorhandensein von Permafrost beeinflusst die Hydrologie eines EZG im hohen Maße. Bereits in den 70-er Jahren wurde beschrieben, dass der Permafrost als Aquiclude wirkt, da er eine sehr geringe Permeabilität aufweist (Dingman, 1975) und dass die hydrologisch relevanten Prozesse in dem „active layer“, der Zone, die innerhalb eines Jahres auftaut und wieder gefriert, stattfinden. Die Abflussbildungsprozesse auf einem, von Permafrost unterlagerten Hang, verändern sich im Verlauf eines Jahres. Diese Änderungen ergeben sich durch das Absinken des Permafrostes und der, damit verbundenen, Zunahme der Mächtigkeit des „active layers“. Im Frühling kommt es durch die Schneeschmelze und dem noch hoch liegendem Permafrost zu Oberflächenabfluss (Lewkowicz & French, 1982). In den südlichen Randgebieten mit Permafrostvorkommen kommt es jedoch, auf Grund der stark permeablen organischen Oberböden, kaum zu Oberflächenabfluss (Dingman, 1973; Quinton & Marsh, 1999; Quinton et al., 2000). Präferentielles Fließen bildet sich aus, wenn der active layer eine größere Mächtigkeit erreicht hat und dieser Makroporen, Spalten oder Rillen aufweist (Woo & Steer, 1982; Carey & Woo, 2000). Dieser Zustand stellt sich meistens erst ein, wenn die Schneedecke geschmolzen ist und der Boden der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Das Vorhandensein von Makroporen ermöglicht einen beschleunigten Abfluss, dessen Fließgeschwindigkeiten der von Oberflächenabfluss nahe kommt (Carey & Woo, 2000). Im Spätsommer, wenn der Permafrost unterhalb der Grenze zwischen der organischen Auflage (Torfmoose) und dem mineralischen Boden liegt, verringert sich der Hangabfluss, da die Mächtigkeit des „active layer“ gestiegen und somit ein größerer Speicher vorhanden ist (Carey & Debeer, 2008). Des Weiteren ist die Per-

meabilität des mineralischen Bodens i.d.R. um einige Größenordnungen geringer, wodurch die Fließgeschwindigkeiten stark abnehmen (Carey & Woo, 2000).

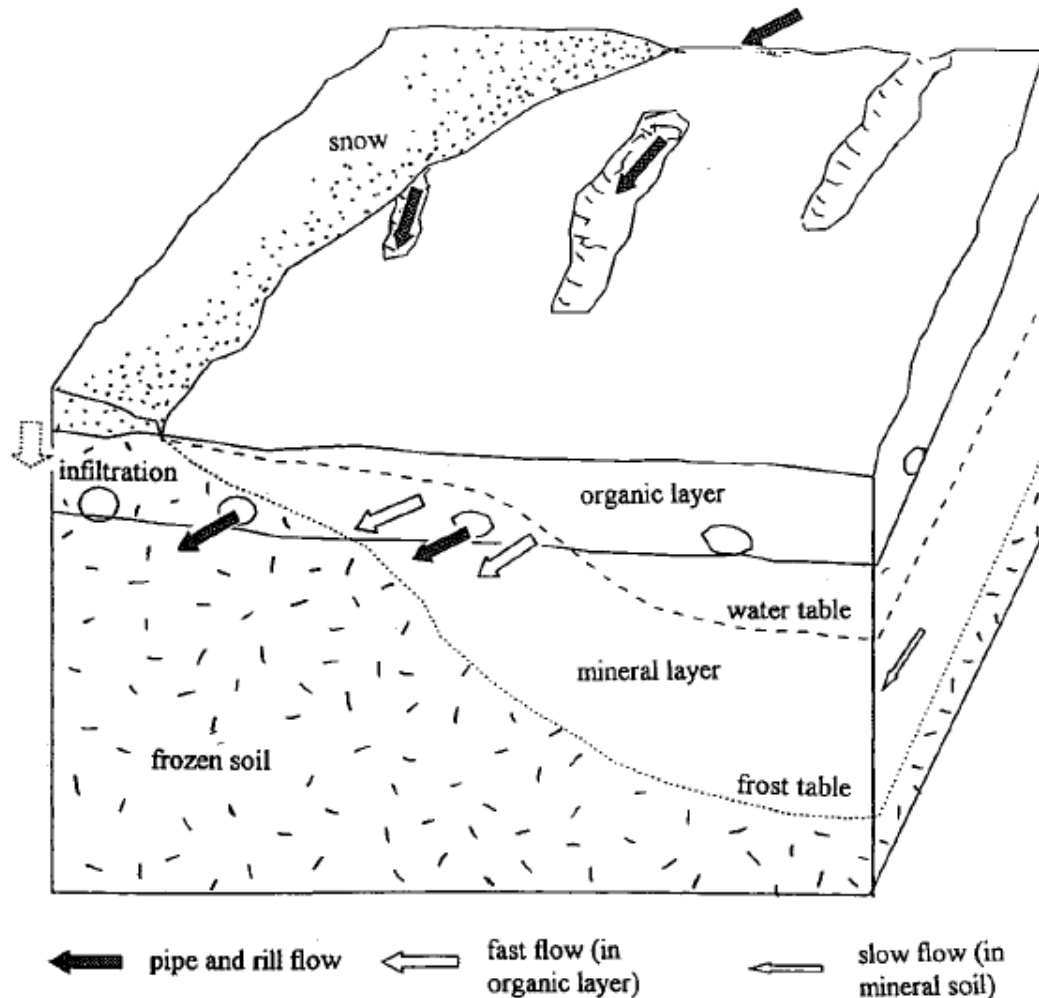


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung des typischen Bodenaufbaus und der Lage des Permafrostes und der gesättigten Zone. Die Abbildung erklärt, unter welchen Bedingungen es zu Makroporenfluss kommt. (Carey & Woo, 2000)

Die Ganglinien eines borealen EZG, mit Permafrostvorkommen, unterscheiden sich von den Ganglinien humider Zonen mit gemäßigten Temperaturen. So ist eine schnelle Systemantwort auf ein Niederschlagsereignis typisch für ein EZG mit Permafrostböden (Church, 1974). Permafrostböden erzeugen, nach McNamara et al. (1998), Ganglinien mit einer schnellen Reaktion und flachen Rezessionskurven. Carey & Quinton (2005) führten für den Abfluss eines 6 km² großen, alpinen EZG mit diskontinuierlichem Permafrost, Gangliniensepartionen durch, um zum einen das Verhältnis zwischen Ereigniswasser und altem Wasser zu bestimmen. Zum anderen wollte sie ermitteln, welche Anteile des Niederschlags, des Wassers aus der organischen Auflage und des Wassers aus dem mineralischen Boden zum gesamten Abfluss beitragen. Als Tracer wurden $\delta^{18}\text{O}$, DOC, SpC verwendet. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass der Niederschlag weni-

ger als 10% des Gesamtabflusses ausmachte und dass altes Wasser aus dem mineralischen Boden den größten Teil des Abflusses aus machte.

Das Vorkommen von hydrophoben Böden ist weltweit bekannt. Gehäuft tritt das Phänomen auf sandigen Böden auf, wenn es in den Gebieten hohe Temperaturen gibt und es nur unregelmäßig zu Niederschlägen kommt. Nach Henle et al. (2007) kommen als eine der Ursachen organische Verbindungen, die von den Wurzeln der Pflanzen ausgeschieden und von Pilzen ausgesondert werden oder bei der Zersetzung von organischem Material entstehen, in Betracht. Diese Verbindungen können zur Ausbildung von biologischen Bodenkrusten führen, welche von Kemmling (2010) auch für das Khentii-Gebirge nachgewiesen wurden. Abu-Awwad & Shatanawi (1997) beschrieben, dass es durch Bodenkrusten zu einer starken Reduktion der Infiltrationsraten und somit zu Oberflächenabfluss kommt. Eine weitere Ursache für die hydrophoben Eigenschaften eines Bodens können Waldbrände sein (Scott & Van Wyk, 1990; Robichaud, 1998; Varela et al., 2005). Durch die Hydrophobie kommt es, je nach Topographie, zu erhöhtem Oberflächenabfluss oder einem fingerbildenden Infiltrationsbild (Henle et al., 2007). Der Nachweis von Oberflächenabfluss kann mittels verschiedener Methoden durchgeführt werden. Eine Methode ist, den Oberflächenabfluss mittels einer Barriere aufzufangen und Anschließend zu quantifizieren. Diese Methode wird u. a. in den Arbeiten von Weiler (1997) und Hümann et al. (2011) verwendet. Eine weitere Methode ist das Ausbringen eines Tracers auf der Bodenoberfläche und Adsorption des Tracers am Unterhang. Diese Methode wurde in der Arbeit von Steinmann (2010) angewendet, um Fließverbindungen nachzuweisen. Auch Lange (1999) verwendete diese Methode, um die Infiltrationstiefe in einem Wadi zu untersuchen, wobei bei dieser Arbeit die Teeblätter in dem Bett des Wadis vergraben wurden.

Durch Waldbrände kommt es zu einer drastischen Reduktion der Vegetationsdecke und somit zu einer erhöhten Erosion, wodurch nicht nur der Oberboden durch den erhöhten Oberflächenabfluss abgetragen wird (Shakesby, et al., 2003; Wondzell & King, 2003), sondern auch präferentielle Fließwege durch Rillenerosion entstehen (Sheridan et al., 2007). Waldbrände in borealen Gebieten haben außerdem einen erheblichen Einfluss auf den Permafrost. Dabei ist die direkte Hitze durch das Feuer nicht der ausschlaggebende Punkt. Große Auswirkungen haben jedoch die verbleibende Dicke der organischen Auflage, die als Isolierung des Bodens dient und die Veränderung der Albedo, die durch einen Waldbrand um bis zu 50% reduziert werden kann (Yoshikawa et al., 2003; Kasischke & Johnstone, 2005).

4 Methodik

4.1 Untersuchung des Oberflächenabfluss am Südhang

Da das Untersuchungsgebiet schlecht zugänglich ist und somit der Transport, von benötigtem Material möglichst gering gehalten werden musste, wurden zum Nachweis des Oberflächenabflusses Tracerversuche durchgeführt.

Es wurden an zwei Südhängen (S1 und S2) mit Aktivkohle gefüllte Teeeier (vgl. Abb. 4.1), in verschiedenen Abständen zum ausgebrachten Tracer, ausgelegt. Dabei wurden zunächst sämtliche Teeeier an beiden Hängen ausgelegt und anschließend der Tracer ausgebracht, um eine vorzeitige Kontamination der Aktivkohle zu vermeiden.



Abbildung 4.1: Mit Aktivkohle gefüllte Teeeier, wie sie im Gelände ausgebracht wurden.



Abbildung 4.2: Mit Tracer gefüllte Teebeutel zur Ausbringung des Tracers, mit verminderter Gefahr eines aerosiven Transportes.

Als Tracer wurde Naphthionat verwendet, das in Teebeutel gefüllt wurde (vgl. Abb. 4.2). Die Teebeutel wurden gut verschlossen und auf einer hangparallelen Strecke von 20 m auf den Boden ausgelegt. Zur Fixierung wurden Zahnstocher verwendet, deren obere Spitzen umgeknickt wurden, so dass ein Abrutschen der Beutel erschwert ist. Auf beiden Hängen wurden so 500 g Naphthionat am Oberhang ausgebracht. Zur Adsorption des Tracers wurden am S1 dreißig und am S2 fünfundzwanzig Teeeier verwendet. Es wurden mehrere hangparallele Profile, mit jeweils fünf Teeeiern, in verschiedenen Abständen zum Tracer auf einer Länge von 10 m ausgelegt (vgl. Abb. 4.3).

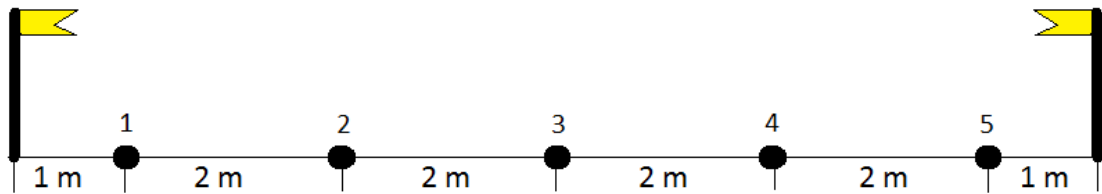


Abbildung 4.3: Anordnungsprinzip der Teeeier innerhalb eines hangparallelen Profils am Hang.

Die Teeeier wurden an drei Terminen gesammelt. Am 20. Juli wurden jeweils zwei der fünf Eier eingesammelt. Die nächste Sammlung wurde am 8. Juli vorgenommen, wo bei wiederum zwei Teeeier gesammelt wurden. Die letzten Eier wurden am 2. September gesammelt.

Details S1:

Der südexponierte Hang S1 hat eine Hanglänge von 226 m und einen Höhenunterschied von 113 m. Damit liegt die Hangneigung bei rund 30° . Manche Hangbereiche weisen eine Hangneigung von ca. 42° auf. Die obere Wasserscheide liegt auf einer Höhe von 1614 m AMSL. Der Hang ist mit Gräsern, Beifußgewächsen, Rhabarber und verschiedenen Blumen bewachsen. Vor allem am Oberhang befinden sich große, flache Steine (bis 1,2 m Durchmesser), die auf der Bodenoberfläche liegen. Durch die Arbeit eines anderen Projektes der Universität Heidelberg sind an diesem Hang zwei Bodenfeuchtemessfelder angelegt worden. Die Versuchsanordnung wurde neben diesen Bereichen angelegt, um nur die Eigenschaften des ungestörten Hanges zu erforschen.

Die 500 g Naphthionat wurden auf 34 Teebeutel verteilt und 91 m unterhalb des höchsten Punktes, auf einer Strecke von 20 m hangparallel aus gelegt. Dabei hatten die Beutel, in den inneren 10 m, einen Abstand von 0,5 m und in den beiden überstehenden 5 m langen Bereichen einen Abstand von etwa 0,7 m.

Die erste Reihe mit fünf Teeeiern wurde 2 m unterhalb der Tracerbeutel auf einer Strecke von 10 m ausgebracht, wobei die Abstände, wie auf der Abbildung 4.3 dargestellt, waren. Die weiteren Reihen waren im Abstand von 5 m, 50 m, 68 m, 107 m und 135 m zum Tracer platziert (vgl. Abb. 4.4). Dabei waren die Teeeier, im Abstand von 68 m und 107 m auf der Höhe der beiden Bodenfeuchte-Plots ausgelegt. Die unterste Reihe wurde am Hangfuss unterhalb eines Hangknicks platziert.

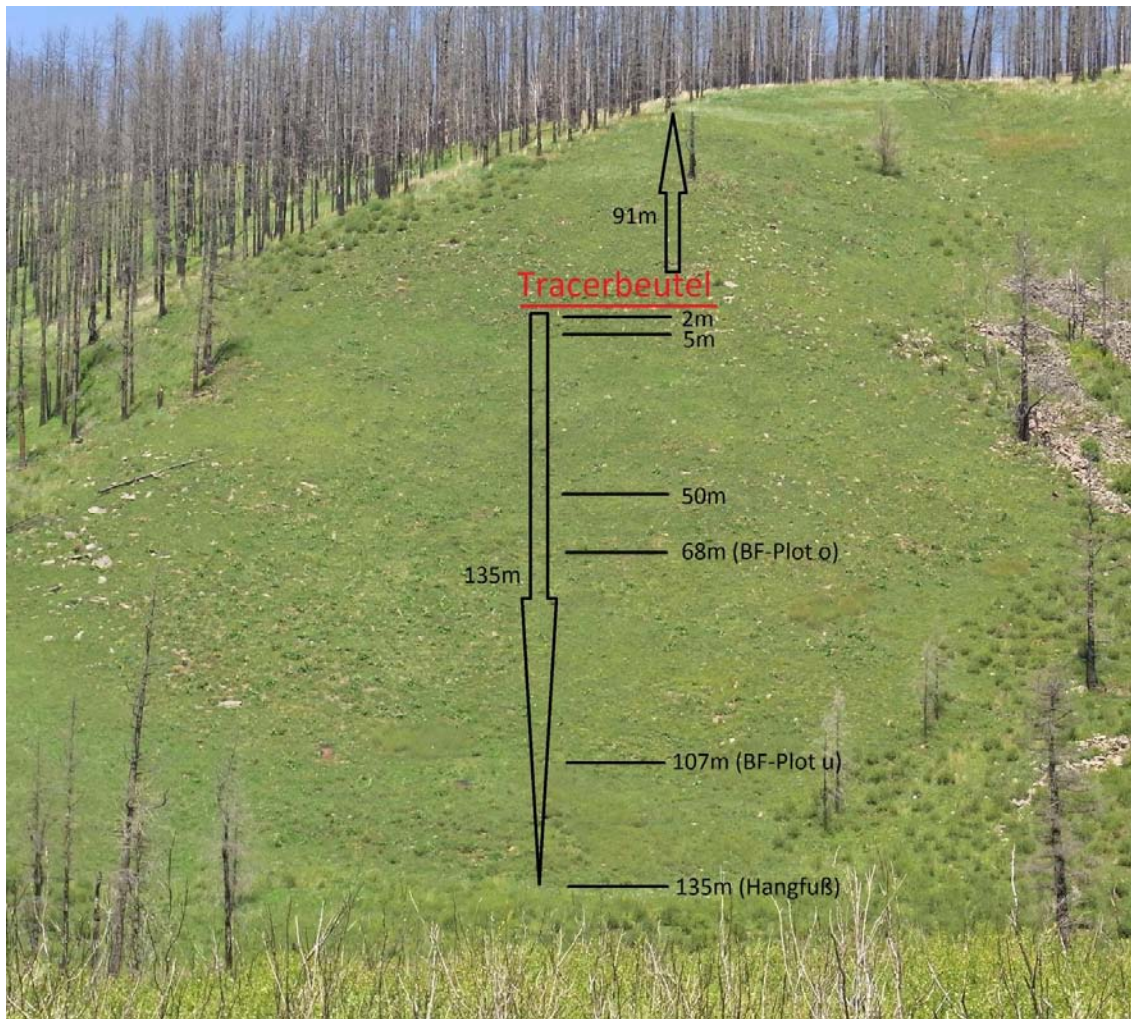


Abbildung 4.4: Übersicht der Tracer- und Teeeierpositionen am Südhang S1.

Details S2:

Der höchste Punkt des S2 Hanges liegt auf einer Höhe von 1694 m AMSL und der Hangfuß auf 1488 m AMSL. Daraus ergibt sich ein Höhenunterschied von 206 m auf eine Hanglänge von 444 m. Die mittlere Hangneigung liegt bei $27,5^\circ$, wobei im Bereich des Tracerexperimentes die Hangneigung mit 26° geringfügig flacher ist. Der Bewuchs des Hanges entspricht dem des S1 und auch die großen Steine sind häufig zu finden.

Der Tracer (500 g Naphthionat) wurde auf 30 Teebeutel verteilt und wie oben beschrieben ausgebracht. Die Abstände zwischen den Beuteln waren direkt über den Teeeier 0,5 m und in den Außenbereichen 1,0 m.

Die Abstände der Teeeireihen vom Tracer waren 2 m, 5 m, 20 m, 50 m und 70 m (vgl. Abb. 4.5). Der untere Hangabschnitt wurde nicht in das Tracerexperiment einbezogen, da sich der Hang dort zu einem schmalen Tal verengt dessen Grund aus grobem Geröll besteht, so dass das Wasser unter diesen fließt und somit schwer zu beproben ist.

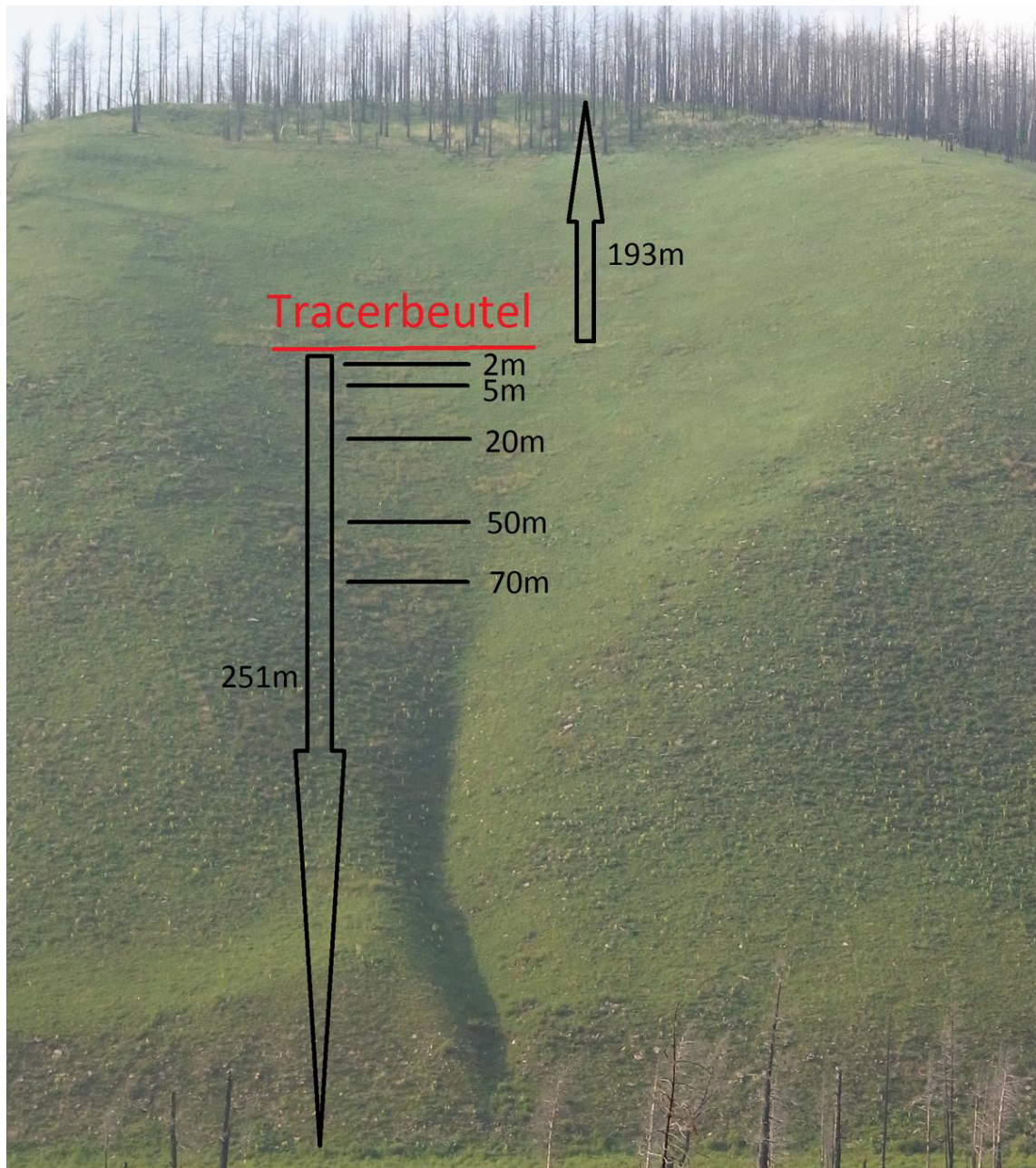


Abbildung 4.5: Positionen der ausgebrachten Tracerbeutel und der Teeeier am Südhang S2.

4.1.1 Mesungen im Labor

Die Proben wurden im Labor nach einer angepassten Methode nach Wernli (2011) eluiert und anschließend mittels eines Fluoreszenzfotometers (PerkinElmer) gemessen.

Um den Gehalt der Proben bestimmen zu können, wurde eine Kalibrierung durchgeführt. Dazu wurde jeweils 2,7 g ungebrauchter Aktivkohle abgewogen und mit einer bekannten Menge Naphthionat versetzt, in dem ein entsprechendes Aliquot einer Tracerlösung zugegeben wurde. Anschließend wurde deionisiertes Wasser zugegeben,

so dass die gesamte Lösemittelmenge bei allen Proben gleich war. Nach der Zugabe wurde die Aktivkohle durch Rühren mit der Tracerlösung vermischt und die Proben über Nacht in einem Trockenschrank bei 60°C getrocknet.

Die gesammelten Teeblätter wurden, im Feld, luft- und lichtdicht verpackt und die Verpackung erst im Labor wieder geöffnet. Der Inhalt der Teeblätter wurde in Bechergläser überführt. Aufgrund der unterschiedlichen Wassergehalte wurden die Proben über Nacht bei 60°C getrocknet, bevor ein Aliquot von 2,7 g abgewogen wurde. Daraufhin wurden sowohl die Kalibrierstandards, als auch die abgewogenen Aktivkohleproben zur Elution angesetzt. Dazu wurde jede Probe mit 15 ml einer Elutionslösung nach Wernli (2011) versetzt. Die Lösung besteht aus 60-vol% Ethanol und 40-vol% Ammoniaklösung (25%). Nach der Zugabe des Lösungsmittels wurden die Bechergläser mit Teflonfolie verschlossen und für 67 h unter Lichtabschluss zur Elution angesetzt. Nach dieser Zeit wurde mit einer 10 ml Einwegspritze die Lösung aufgezogen und durch einen Glasfaser-Spritzfilter (Fa. Rotilabo) in eine Messküvette gegeben. Anschließend wurde die Küvette in das Fotometergestellt und direkt gemessen. Nach der Messung wurde die Küvette geleert und die restliche Lösung in der Spritze in die Küvette überführt um eine zweite Messung zu machen. So wurden von jeder Probe zwei Spektren erstellt (Spektren s. Anhang) und der Mittelwert der Signale als Ergebnis verwendet.

Zur Kalibrierung wurden die Spektren der Standards den bekannten Konzentrationen zugeordnet und eine Kalibriergerade (s. Anhang) erstellt, mit deren Hilfe die Konzentrationen der Proben bestimmt werden können.

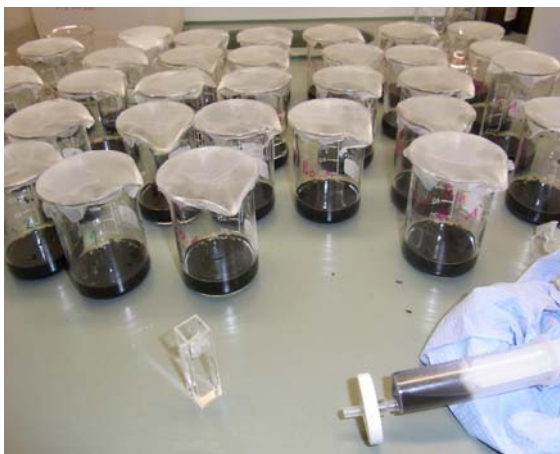


Abbildung 4.6: Filtrieren und Abfüllen der Probelösung nach der Elution.



Abbildung 4.7: Verwendetes Fluoreszenzfotometer von PerkinElmer.

4.2 Tracerexperimente am Nordhang im verbrannten Wald

Zur Ermittlung der Fließwege und der Fließdynamik, im verbrannten Wald am Nordhang, wurde eine Stelle ausgesucht, an der oberflächlich fließendes Wasser in einem Schluckloch verschwand. In einer Entfernung von 54,5 m unterhalb des Schluckloches trat Wasser unter einem Baumstumpf aus. Nach der Einspeisung von 300 g Uranin und einen Tag später 500 g Naphthionat in das Schluckloch wurden Wasserproben an der Austrittsstelle, sowie an einem Bach am Hangfuß, genommen.

Der untersuchte, nordexponierten Hang ist mit Wald bedeckt. In dieser Höhe (1500 bis 1800 m AMSL) dominieren Kiefern (*Pinus sylvestris*) den Baumbestand. Lediglich Lärchen (*Larix sibirica*), einzelne Birken (*Betula platyphylla*) und sibirische Tannen (*Abies sibirica*) mischen sich unter die Kiefern. Ein großer Teil des Baumbestandes an diesem Hang ist verbrannt und die Bäume abgestorben. Nur die Birken treiben teilweise neu aus. Der Bodenbewuchs ist ebenfalls zu großen Teilen verbrannt, so dass dort kaum noch Vegetation vorhanden ist. Einige Wildrosen (*Rosa acicularis*), Weidenröschen (*Epilobium angustifolium*) und Preiselbeerpflanzen (*Vaccinium vitis-idaea*) konnten sich neu etablieren. An feuchteren Stellen konnten sich Moose, Gräser und Sumpfporst (*Ledum palustre*) halten. Außerdem wachsen dort kleine Spiersträucher (*Spiraea aquilegifolia*) und eine kleine Weidenart (*Salix sp.*).

Der untersuchte Hang ist von Permafrost unterlagert. Der Permafrost lag zur Zeit der Untersuchungen (20. Juni bis 1. Juli 2012) in einer Tiefe von 15 cm bis 65 cm. Dabei war die Lage des Permafrostes an feuchten Stellen mit vitaler Bodenvegetation bei 15 cm bis 20 cm, direkt unter der organischen Auflage, während die Lage des Permafrostes, an den Stellen ohne Vegetation wesentlich tiefer war.

Für das Tracerexperiment zur Ermittlung des Fließverhalten und –dynamik, an dem von Permafrost unterlagerten Hang, wurde eine Stelle ausgewählt, an der oberflächlich fließendes Wasser in einem Schluckloch unter einem abgestorbenen Baum verschwand. 54,5 m unterhalb trat unter einem Baumstumpf Wasser aus. Da es im näheren Umfeld keine weitere Austrittsstelle gab, wurde diese Austrittsstelle zu den Probenahmen verwendet. Der Hang hatte in diesem Bereich eine mittlere Hangneigung von 14,5°. Die Strecke zwischen dem Schluckloch und der Austrittsstelle enthielt sowohl feuchte, als auch trockene und vegetationsarme Bereiche (vgl. Abb. 4.8). An manchen Stellen ohne Vegetation war ein gluckerndes Geräusch zu hören. Kurz nach einem größeren Niederschlagsereignis war an zwei Stellen oberflächiges Fließen erkennbar. Diese Strecken waren jedoch nur sehr kurz (< 1 m) und führten eine verhältnismäßig kleine Wassermenge.



Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Bodenbedeckung über der Fließstrecke, im verbrannten Wald, am Nordhang.

Unterhalb der Austrittsstelle floss das Wasser 19,8 m lang in einem kleinen Gerinne an der Oberfläche, bevor es wieder im Boden verschwand. 36,7 m unterhalb der Probenahmestelle trat das Wasser wieder aus, um dann 20,4 m tiefer erneut zu verschwinden. Etwa 75 m unterhalb der Probenahmestelle trat das Wasser erneut aus und floss diffuse hangabwärts. Der Restliche Hangbereich, bis zu einem kleinen Bach in der Aue, der nur wenige Tage nach einem größeren Niederschlagsereignis Wasser führte, war zu dieser Zeit sehr feucht. Besonders die letzten 28 m, unterhalb eines Hangknicks, waren von kleinen Tümpeln durchzogen. Die Strecke zwischen dem Schluckloch und dem Hangwasserbach hat eine Länge von 328 m. 328 m bachabwärts wurde eine zweite Probenahmestelle definiert, an der ebenfalls auf die Tracer beprobt wurde (vgl. Abb. 4.9).

Am 20. Juni um 17:40 Uhr wurden 300 g Uranin in das Schluckloch eingespeist. Die Einspeisung erfolgte durch Lösen des Farbstoffes in einem Eimer ($V = 10 \text{ L}$) und anschließendem Ausgießen in das Schluckloch. Der Eimer wurde mehrmals mit Wasserausgespült und das Spülwasser ebenfalls in das Schluckloch gegeben. Etwa zwei Stunden nach der Einspeisung, um 19:30 Uhr war eine deutliche Gelbfärbung an der Austrittsstelle erkennbar. Proben (50 ml) wurden ab 19:00 Uhr viertelstündlich an der Austrittsstelle und ab 17:30 halbstündlich am Hangwasserbach genommen. Ab 19:00 Uhr wurde am Hangwasserbach zu einem zweistündigen Probenahmeintervall übergegangen. In der Zeit zwischen 21:00 Uhr und

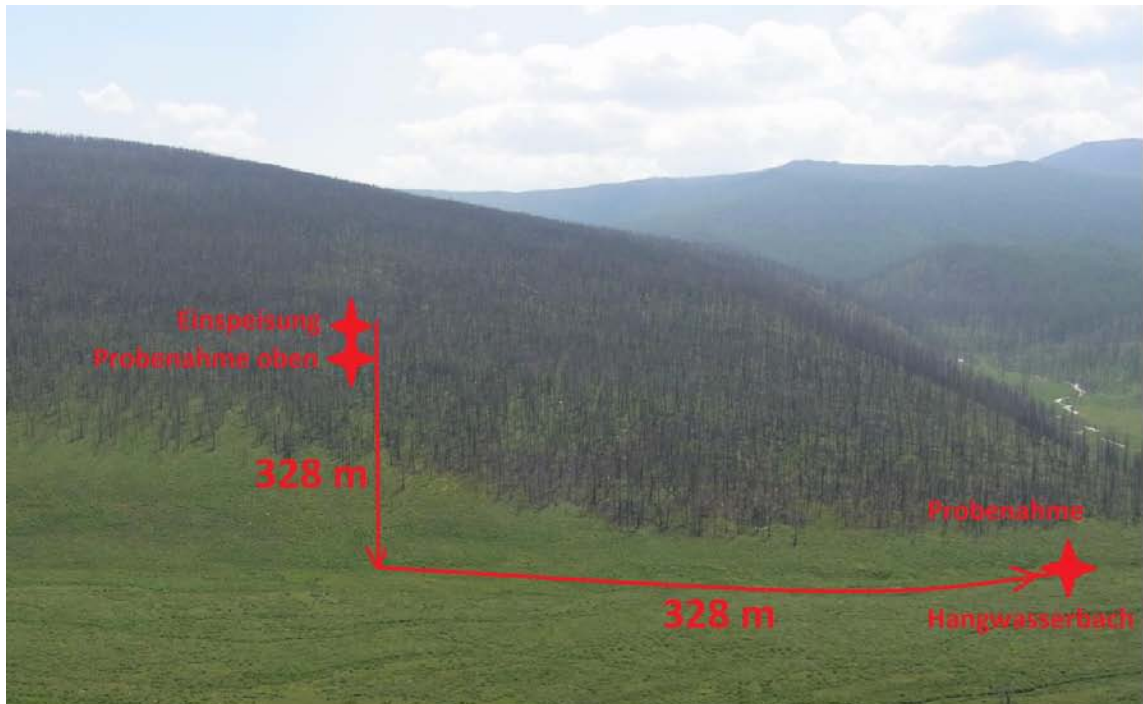


Abbildung 4.9: Überblick des Tracerversuchs am Nordhang mit den Positionen der Einspeise- und Probenahmestellen.

dem 21. Juni um 9:50 Uhr wurden keine Proben an der Austrittsstelle genommen. Die Beprobungspause am Hangwasserbach dauerte von 23:00 Uhr bis zum 21. Juni 6:00 Uhr. Am 21. Juni wurden weitere acht Proben am Hangwasserbach, sowie 22 an der Austrittsstelle genommen.

Am 21. Juni um 11:40 Uhr (18 h nach der Einspeisung von Uranin) wurden 500 g Naphthionat in das Schluckloch eingespeist. Die Einspeisung erfolgte wie bei der Einspeisung von Uranin beschrieben. Die erste Probe, nach der Einspeisung wurde um 11:45 Uhr genommen. Ab 12:00 Uhr wurde die Austrittsstelle bis 21:00 Uhr halbstündlich beprobt. Nach der Einspeisung von Naphthionat wurde das Probenvolumen auf 100 ml erhöht. Am 22. Juni wurde die erste Probe um 5:00 Uhr genommen und anschließend stündlich bis 8:00 Uhr. Den Rest des Tages wurde lediglich alle vier Stunden eine Probe gezogen, wobei die letzte um 20:00 Uhr genommen wurde. Weitere Proben wurden am 23. Juni um 7:00 Uhr, am 27. Juni um 12:30, am 30. Juni um 17:00 Uhr und am 1. Juli um 10:30 Uhr genommen. Der Hangwasserbach wurde in ähnlichen Abständen beprobt, wobei der Bach ab dem 23. Juni kein Wasser mehr führte. Am 26. Juni wurde um 20:00 Uhr die erste Probe, nach erneutem Anspringen des Baches genommen. Am 30. Juni war der Bach jedoch erneut versiegt, so dass keine weiteren Proben genommen werden konnten.



Abbildung 4.10: Uranineinspeisung am 20. Juni um 17:40 Uhr.



Abbildung 4.11: Naphthionateinspeisung am 21. Juni um 11:40 Uhr (18 Stunden nach der Uranineinspeisung).

4.2.1 Messungen im Labor

Die Wasserproben waren seit der Entnahme möglichst kühl und lichtdicht verpackt worden und nach der Ankunft im Labor im Kühlschrank gelagert worden. Die Proben wurden mit einem Fluoreszenzfotometer (PerkinElmer) gemessen.

Vor Beginn der Messungen wurde eine Kalibrierung für Uranin und Naphthionat durchgeführt, um die Gehalte der Proben bestimmen zu können. Dazu wurden Stammlösungen der Tracer hergestellt, in dem 100 µg der Tracer, der gleichen Charge wie die bei den Versuchen verwendeten Tracer, in 1000 ml Messkolben eingewogen und diese mit deionisiertem Wasser aufgefüllt wurden. Aus diesen Stammlösungen wurden nun verschiedenen Standardlösungen hergestellt, mit denen die Kalibriergeraden der einzelnen Tracer erstellt wurden (Kalibrierung s. Anhang).

Vor der Messung wurde der pH-Wert einiger stichprobenartig gewählten Proben bestimmt, da die Fluoreszenz des Uranins stark vom pH-Wert abhängt. So nimmt die Fluoreszenz bei pH-Werten < 9 sehr stark ab. Da die pH-Werte der meisten Proben unter 9 lagen wurden die pH-Werte aller Proben mittels einer 0,01 molaren Natronlauge auf > 9 eingestellt, so dass bei allen Proben die Fluoreszenz des Uranins gleich ist.

Die Proben wurden in Messküvetten gefüllt und jeweils zwei Mal gemessen. Zum größten Teil mussten die Proben um den Faktor 100 verdünnt werden, damit das Signal innerhalb des Messbereichs lag.

4.3 Experimente mit Brilliant Blue

Um die Infiltrationseigenschaften der südexponierten Hänge zu untersuchen, wurden Plots mit einer Brilliant Blue-Lösung beregnet und später aufgegraben. Weiterhin wurden zwei Plots am Nordhang mit Brillantblue beregnet, um die Infiltration charakterisieren und Fließwege erkennen zu können. Dazu wurden jeweils 50 g Brilliant Blue in 15 L Wasser gelöst und damit ein 1,5 m² (B: 1 m x L: 1,5 m) großer Plot beregnet. Daraus ergibt sich eine Beregnungswassermenge pro Quadratmeter von 10 mm. Die Intensitäten lagen dabei zwischen 30 mm/h und 36 mm/h und somit im oberen Bereich der gemessenen Niederschläge in dem Untersuchungsgebiet (Minderlein & Kopp, 2012).

Es wurden zwei Plots auf dem südexponierten Hang S1 und ein Plot auf dem südexponierten Hang S2 beregnet. Die beiden Plots auf dem S1 wurden in unmittelbarer Nähe zu dem unteren Bodenfeuchteplot angelegt, um die gemessenen Bodenfeuchten zur Interpretation verwenden zu können.

Die beiden Plots am Nordhang wurden an verschiedenen, typischen Standorten angelegt. Der Plot Nr. 4 wurde an einer Stelle, mit sehr geringer Vegetation und abgestorbenen Wurzeln angelegt. Der Plot Nr. 5 wurde hingegen an einer feuchteren Stelle, auf der dicke Moospolster und Gräser wuchsen, abgesteckt.

4.3.1 Brilliant Blue-Plot Nr. 1

Der erste Plot liegt 5 m unterhalb (südlich) des unteren Bodenfeuchtemessplots (vgl. Abb. 4.12), auf einem Hangknick mit einer Hangneigung von 18°. Der Hang ist in diesem Bereich stark mit Gräsern und verschiedenen Beifußarten bewachsen (vgl. Abb. 4.13). Die Bewuchshöhe lag zwischen 15 cm und 43 cm und es lagen einige Steine auf der Bodenoberfläche. Vor der Beregnung wurde die Vegetation bis auf eine Länge von ca. 5 cm gekürzt, um den Wasserverlust durch Interzeption gering zu halten. Anschließend wurden innerhalb von 17 Minuten die 15 L Brilliant Blue-Lösung, mittels Backpack-Sprayer, gleichmäßig auf den Plot auftragen. Dies entspricht einer Intensität von 35,3 mm/h. Während der Beregnung konnte kein Oberflächenabfluss beobachtet werden. Eine Stunde nach Beendigung des Auftragens wurde mit dem Aufgraben begonnen. Das erste Profil wurde 10 cm unterhalb der unteren Begrenzung angelegt um ein hanglaterales Fließen im Boden erfassen zu können. Anschließend wurden in Abständen von 30 cm weitere Profile gegraben.



Abbildung 4.12: Übersicht über die Positionen der berechneten Plots und der Bodenfeuchtemessprofilen.

Abbildung 4.13: Brilliant Blue-Plot Nr. 1 im natürlichen Zustand..

4.3.2 Brilliant Blue-Plot Nr. 2

Der zweite Plot wurde 5 m neben (westlich) dem Bodenfeuchtemessplot, wie auf der Abbildung 4.12 zuerkennen ist, angelegt. An dieser Stelle ist der Hang steiler (35° Hangneigung) und weniger bewachsen. Die Vegetation war nicht flächendeckend und bestand aus Gräsern, Beifuß und Rhabarber (vgl. Abb. 4.14). Die maximale Vegetationshöhe lag bei 37 cm und es waren einige Steine auf der Bodenoberfläche vorhanden, die teilweise in den Boden eingebettet waren. Dieser Plot ist repräsentativ für die steilen Hangbereiche. Auch auf diesem Plot wurde vor der Beregnung die Vegetation zurückgeschnitten um das gesamte Wasser auf den Boden aufbringen zu können (Abb. 4.15). Beregnet wurde innerhalb von 19 Minuten, wodurch sich eine Intensität von 31,6 mm/h ergibt. Es fiel auf, dass das Wasser, an zwei Stellen anfänglich abperlte, später aber auch dort infiltrierte.

Der Beginn des Aufgrabens erfolgte ebenfalls nach einer Stunde, so dass die Infiltrationsphase genauso lang, wie bei dem ersten Plot war. Aufgegraben wurde 10 cm oberhalb der unteren Plotbegrenzung und Anschließend alle 30 cm.



Abbildung 4.14: Brilliant Blue-Plot Nr. 2 vor dem Zurückschneiden der Vegetation.



Abbildung 4.15: Der selbe Plot nach der Entfernung der Vegetation.

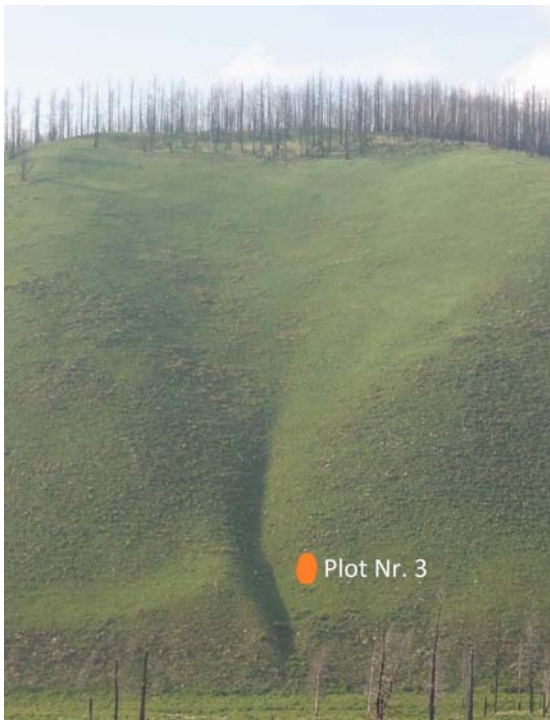


Abbildung 4.16: Position des Brilliant Blue-Plots am Südhang S2.



Abbildung 4.17: Plot mit natürlicher Vegetation, vor der Bearbeitung.

4.3.3 Brilliant Blue-Plot Nr. 3

Der dritte Plot liegt an dem S2 auf der unteren östlichen Flanke (vgl. Abb. 4.16). Der Bewuchs (vgl. Abb. 4.17) und die Hangneigung von $34,5^\circ$, sind mit dem zweiten Plot vergleichbar. Nach dem Zurückschneiden der Vegetation waren einige Steine erkennbar, die auf der Oberfläche lagen. Das Gefälle und der Bewuchs entsprechen dem größten Teil der Hangfläche. Lediglich an flacheren Bereichen gibt es eine höhere Vegetation, die hauptsächlich aus Beifußgewächsen und Rhabarber besteht.

Berechnet wurde der dritte Plot innerhalb von 18 Minuten (Intensität: 33,3 mm/h). Auch hier konnte zu Beginn der Beregnung an einigen Stellen das Abperlen des Wassers beobachtet werden. Schon nach kurzer Zeit infiltrierte jedoch auch an diesen Stellen das Wasser. 30 Minuten, nach der Beregnung wurde mit dem Aufgraben des ersten Profils begonnen. Auch hier wurde das erste Profil 10 cm unterhalb der Plotbegrenzung gegraben und anschließend im Abstand von 30 cm weitere Profile angelegt.

4.3.4 Brilliant Blue-Plot Nr. 4

Der vierte Plot wurde am Nordhang im verbrannten Wald, 6 m westlich der Probenahmestelle, angelegt. Der Boden an dieser Stelle war nur mit wenigen Weidenröschen bewachsen (vgl. Abb. 4.18). Die Hangneigung des Hangabschnitts ist, mit 12° moderat. Der betrachtete Bereich ist repräsentativ für weite Teile des verbrannten Waldes. Die Beregnungszeit lag bei dem vierten Plot bei 18 Minuten und nach weiteren 40 Minuten wurde mit dem Aufgraben begonnen. Der erste Anstich wurde 10 cm oberhalb des unteren Plotendes vorgenommen.

Aufgrund der Bodenzusammensetzung (hauptsächlich große Steine) wurde auf weitere Profile verzichtet und stattdessen die organische Auflage auf einer Fläche von 1,0 x 0,7 m abgeschält um die Infiltrationswege in den mineralischen Boden besser erkennen zu können.

4.3.5 Brilliant Blue-Plot Nr. 5

Der fünfte Plot wurde am Nordhang im verbrannten Wald, an einer Stelle mit dichtem Bewuchs, angelegt. Der Bewuchs bestand aus einer dicken Moosschicht, auf der Gräser, Sumpfporst und kleine Weiden (*Salix sp.*) wuchsen (Abb. 4.19). Die Hangneigung an diesem Hangebereich liegt bei 19° . Der Plot ist typisch für die feuchten Stellen im verbrannten Wald. Vor der Beregnung wurde die höhere Vegetation gekürzt. Berechnet wurden über eine Zeit von 20 Minuten. Dabei lag die Intensität der Beregnung bei 30,0 mm/h. Wie bei dem anderen Plot am Nordhang wurde das erste Profil bei 10 cm gegraben.



Abbildung 4.18: Plot Nr. 4 am Nordhang im verbrannten Wald mit abgestorbenen Wurzeln und Moosen.



Abbildung 4.19: Im Vergleich der Plot Nr. 5 am Nordhang, auf einem Bereich mit vitaler Waldbodenvegetation aus Gräsern und Moosen.

4.4 Ganglinienseparation

4.4.1 Probenahme

Wasserproben zur Analyse der Isotopen und Hauptionen wurden von dem Bärenalbach, vom Niederschlag, dem Hangwasser, an verschiedenen Stellen sowie vom Permafrost gesammelt.

Wasserproben des Bärenalbaches wurden während und nach einem starken Konvektiveignisses, am 19 Juni, über fünf Tage lang genommen. Das Probenahmeintervall lag anfangs bei 30 Minuten, wurde jedoch nach drei Stunden auf eine Stunde erhöht. Nach dreizehn Stunden wurde zu einem Zweistundentakt übergegangen. Über die zweite Nacht wurde eine zehnstündige Probenahmepause eingelegt. Am vierten Tag wurden nur noch drei über den Tag verteilte Proben gezogen. Die letzte Probe wurde 83 Stunden nach der ersten Probe genommen. Es wurden 35 Proben mit einem Volumen von 50 ml, den fünf Beprobungstagen gesammelt.



Abbildung 4.20: Beprobungstelle am Bärentalbach.



Abbildung 4.21: Aus einer Erdspalte, unter einem Stein, austretendes Hangwasser.

Die Proben der jeweiligen „end member“ wurden in 100 ml fassenden PE-Fläschchen abgefüllt. Es wurden mehrere Niederschlags- und Hangwasserproben genommen. Dabei wurde das Niederschlagswasser, während des Ereignisses aus einer Pfütze und später aus einem Totalisator mit Verdunstungsschutz beprobt. Die Hangwasser Proben wurden, ca. 15 Stunden nach dem Ereignis sowohl im vitalen Wald, als auch im verbrannten Wald gesammelt. Außerdem wurden 31 Proben an einem Hangwasserbach, unterhalb des verbrannten Wald, über einen Zeitraum vom 20. bis zum 29. Juni gezogen. Es konnte eine Probe des Permafrostes gesammelt werden, in dem mehrere Eislinen ausgegraben und in ein Probefläschchen überführt wurden.

Als weiteres Ereignis, wurde ein Ereignis am 31. August hochaufgelöst beprobt. Dabei wurden möglichst zeitgleich Proben vom Bärentalbach und dem Hangwasser aus dem verbrannten Wald genommen. Das Hangwasser wurde dabei aus einem Piezometerrohr, das am Hangfuss in die gesättigte Zone eingebracht war, entnommen. Eine Niederschlagsprobe des Ereignisses wurde aus dem, vor dem Ereignis entleerten, Totalisator abgefüllt.

4.4.2 Messungen im Labor

Die Wasserproben wurden auf die natürlichen Isotope ^{18}O und Deuterium, so wie die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat analysiert.

Die Proben zur Isotopenanalyse wurden mittels einem Membran-Spritzenfilter (Porendurchmesser: $0,45\ \mu\text{m}$) gefiltert und anschließend in kleine Glasfläschchen gefüllt, die mit einem Luftdichten Deckel mit Tefloninlay verschlossen und bis zur Messung im Kühl-

schränk gelagert wurden. Gemessen wurden die Proben mit dem Isotopenspektrometer L1102-i (CRDS) der Firma Picarro. Dieses Messgerät misst über das Prinzip des „Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy“ (WS-CRDS). Dabei werden die verschiedenen Absorptionseigenschaften der Wassermoleküle mit und ohne Isotope genutzt. Die Probe wird verdampft und in einer verspiegelten Messkammer in einer Stickstoffatmosphäre durch einen Laser, mit einstellbarer Wellenlänge, bestrahlt. Anschließend wird der Laserstrahl abgeschaltet und die Abklingzeit des Lichts gemessen. Diese Zeit ist repräsentativ für den Isotopengehalt in der Probe. Jedes Wassermolekül absorbiert Licht einer bestimmten Wellenlänge, so dass über die verwendete Wellenlänge isotopenspezifische Messungen durchgeführt werden können (Picarro Inc. Sunnyvale, CA). Als Kontrollstandards werden ein schweres Meerwasser (VSMOW) und ein leichtes Gletscherwasser mit bekanntem Isotopengehalt verwendet.

Die Proben zur Anionenanalyse wurden ebenfalls mittels des oben beschriebenen Membranfilter, gefiltert und 5 ml Probe in spezielle Probentubes gefüllt und mittels Ionenaustauschchromatographie gemessen. Der verwendete Ionenchromatograph der Firma DIONEX ist das Modell DX 500.

4.4.3 Zwei-Komponenten-Separation

Die Methode der Zwei-Komponenten-Separation ist ein Mittel, zur Trennung einzelner Abflusskomponenten aus einem Gebietsabfluss. Es wird davon ausgegangen, dass sich die komplexen abflussbildenden Prozesse in zwei Hauptkomponenten einteilen lassen (Didszun, 2000). Zur Definition der einzelnen Komponenten werden die Gehalte von natürlichen Tracer verwendet. Je nach Fragestellung unterscheiden sich die verwendeten Tracer. Für die Trennung von Abflusskomponenten, mit verschiedenen Fließwegen (herkunftsraumspezifische Komponententrennung), werden Ionen als Tracer verwendet, da deren Gehalt z.B. durch eine Bodenpassage verändert wird. Bezieht sich die Fragestellung jedoch auf Verweilzeiten, so sind stabile Umweltisotope die geeigneten Tracer. Mit diesen Tracern lassen sich die Komponenten „event“ (Ereigniswasser) und „pre-event“ (Vorereigniswasser) trennen (Didszun, 2000).

Bei der Zwei-Komponenten-Separation werden in der Regel die Komponenten des Direktabflusses Q_{direkt} und des indirekten Abflusses Q_{indirekt} getrennt. Als Komponenten („end member“) werden meist die Tracerkonzentrationen des Niederschlags C_{direkt} und des Grund- oder Bodenwassers C_{indirekt} verwendet. Mittels der Massenerhaltung (Gl. 1) und der Kontinuitätsgleichung (Gl. 2) können die Anteile der Komponenten am Gesamtabfluss über die Gleichungen 3 bzw. 4 berechnet werden, wenn die Tracerkonzentrationen der „end member“ und des Gesamtabflusses bekannt sind.

$$Q_{gesamt} = Q_{direkt} + Q_{indirekt} \quad (1)$$

$$Q_{gesamt} * c_{gesamt} = Q_{direkt} * c_{direkt} + Q_{indirekt} * c_{indirekt} \quad (2)$$

$$Q_{direkt} = Q_{gesamt} \left(\frac{c_{gesamt} - c_{indirekt}}{c_{direkt} - c_{indirekt}} \right) \quad (3)$$

$$Q_{indirekt} = Q_{gesamt} \left(\frac{c_{gesamt} - c_{direkt}}{c_{indirekt} - c_{direkt}} \right) \quad (4)$$

Sklash & Farvolden (1979) geben in ihrer Arbeit, folgende Vorraussetzungen für eine sinnvolle Anwendung dieser Methode an:

1. Die Tracerkonzentrationen der beiden Abflusskomponenten unterscheiden sich signifikant voneinander.
2. Die Tracerkonzentrationen zeigen keine räumliche oder zeitliche Varianz, es sei denn, diese kann messtechnisch erfasst und damit berücksichtigt werden. Außerdem darf nur ein konservativer Tracer verwendet werden.
3. Boden- und Grundwasser als Teile der Vorereignis-Komponente sind bezüglich ihrer Tracerkonzentration identisch oder der Anteil des Bodenwassers ist von untergeordneter Bedeutung.
4. Der Beitrag des Oberflächenspeichers ist während des Hochwassers vernachlässigbar.

Hooper & Shoemaker (1986) geben an, dass die erste Bedingung eine direkte Vorraussetzung für die Anwendung dieser Methode darstellt. Die Punkte zwei bis vier wirken sich deutlich auf die Genauigkeit des Ergebnisses aus. Es ist jedoch darauf zu achten, dass nicht jedes Ergebnis der Wirklichkeit entspricht.

5 Ergebnisse

5.1 Tracerversuch am Südhang

Die Ausgebrachten Teeeier zur Adsorption des Tracers wurden an drei Terminen gesammelt. So lagen die Teeeier der ersten Sammlung 22 Tage, die der zweiten Sammlung 37 Tage und die letzten Eier 66 Tage im Feld. Es wurden die Teeeier von rechts nach links (Blickrichtung hangaufwärts) gesammelt, so dass die Eier links am längsten im Feld verblieben. In der Abbildung 5.1 und 5.2 sind die gemessenen Naphthionatkonzentrationen der beiden Südhänge über den Terminen, an denen die Teeeier eingesammelt wurden, aufgetragen. Es muss an dieser Stelle daraufhin gewiesen werden, dass die absoluten Konzentrationen nicht belastbar sind, da die Kalibrierung zeigte, dass nicht alles Naphthionat eluiert werden konnte. Trotzdem zeigt sich, dass ein Transport des Tracers stattgefunden hat.

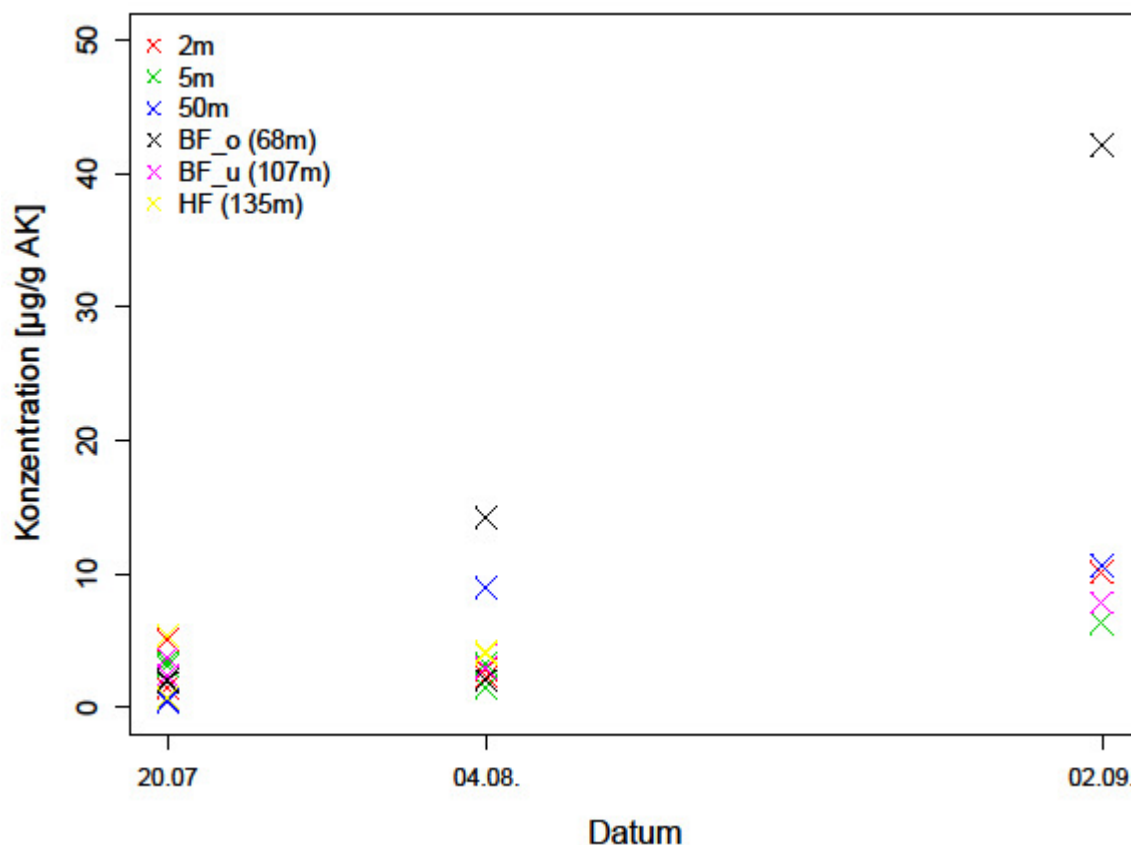


Abbildung 5.1: Graphische Darstellung der Naphthionatkonzentrationen, am Südhang S1, über den drei Sammelterminen.

Am Hang S1 ist zu erkennen, dass die Konzentrationen einzelner Profile, mit der Zeit zunehmen. Auch der Konzentrationsunterschied zwischen den Beprobungsstellen vergrößert sich mit zunehmender Expositionszeit der Teeeier. Auffällig ist die besonders hohe Tracerkonzentration, des Teeeies neben dem oberen Bodenfeuchteplot, nach dem letzten Sammeltermin.

An dem Hang S2 weist ebenfalls ein Teeei eine besonders hohe Tracerkonzentration auf. An diesem Hang hat ein Teeei in einer Entfernung von 70 m unterhalb der ausgelegten Tracerbeutel einen besonders hohen Gehalt. Die Entfernung von dem Tracer ist vergleichbar mit der Entfernung des oberen Bodenfeuchteplots am S1. Auch am S2 ist zu erkennen, dass die Konzentrationen, der einzelnen Positionen mit zunehmender Zeit weiter auseinander liegen. Die Konzentrationen des Teeeis, in 2 m Entfernung von dem ausgebrachten Tracer, weist am 4. August die geringste Konzentration des Transekts auf. Auch das Teeei, im selben Abstand, das bei dem letzten Termin gesammelt wurde, hat die geringste Konzentration.

An keinem der Hänge lässt sich eine kontinuierlich Abnahme der Konzentrationen mit zunehmendem Abstand von dem Ausgebrachten Tracer erkennen. Auch die Zunahme der Konzentrationen, mit zunehmender Expositionszeit zeigt keinen einheitlichen Trend.

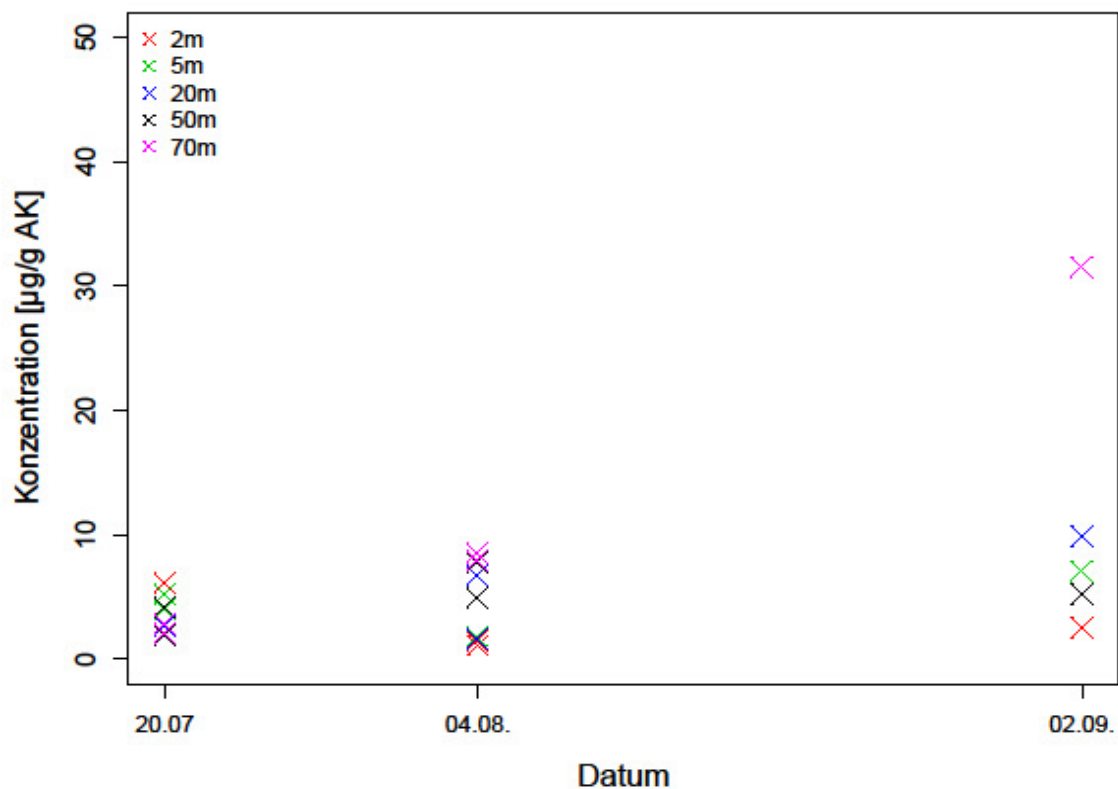


Abbildung 5.2: Graphische Darstellung der gemessenen Naphthionatkonzentrationen in der Aktivkohle aus den Teeeiern am Südhang S2.

Es konnten fast alle Teeeier, die im Feld ausgebracht wurden, wieder gefunden werden. Lediglich das fünfte Teeei am Hangfuss des S1 Hanges konnte auf Grund der hohen Vegetation nicht wieder gefunden werden. Da jedoch bereits in den, am 4. August gesammelten Teeeiern Naphthionat nachgewiesen werden konnte, ist der daraus resultierende Informationsverlust verkraftbar.

5.2 Tracerexperimente am Nordhang im verbrannten Wald

Die Tracerversuche am Nordhang, im verbrannten Wald, ergaben lediglich für die Probenahmestelle 54,6 m unterhalb der Einspeisestelle brauchbare Durchgangskurven. Die Beprobung des Hangwasserbaches am Hangfuß erbrachte keine messbaren Tracerkonzentrationen. So konnte in keiner der, am Hangwasserbach genommenen Proben, einer der beiden Tracer nachgewiesen werden.

Die Tracerdurchgänge des Uranin und Naphthionat sind in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei dem Uranindurchgang die Peakkonzentration nicht aufgenommen wurde, da es einen deutlichen Knick im Anstieg gibt. Es ist zu erkennen, dass der Uranindurchgang sehr breit ist und ein starkes Tailing aufweist. Selbst 17 Tage nach der Einspeisung ist die Tracerkonzentration noch nicht auf null zurückgegangen. Der Durchgang des Naphthionates ist hingegen schmaler. Das Tailing ist nicht so ausgeprägt, wie bei dem Uranindurchgang. Bereits sechs Tage später ist die Naphthionatkonzentration auf 15 $\mu\text{g/l}$ abgesunken. Der Grund für den Unterschied zwischen den beiden Durchgängen ist die Tatsache, dass sich Uranin bei niedrigen pH-Werten sorptiv verhält.

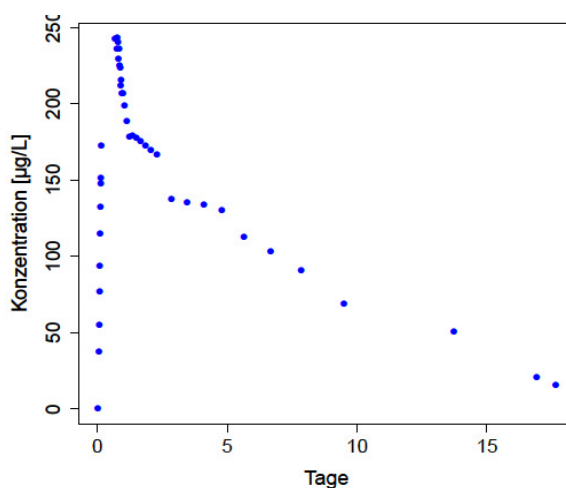


Abbildung 5.3: Gemessene Uranindurchgangskurve des Tracerversuchs am Nordhang.

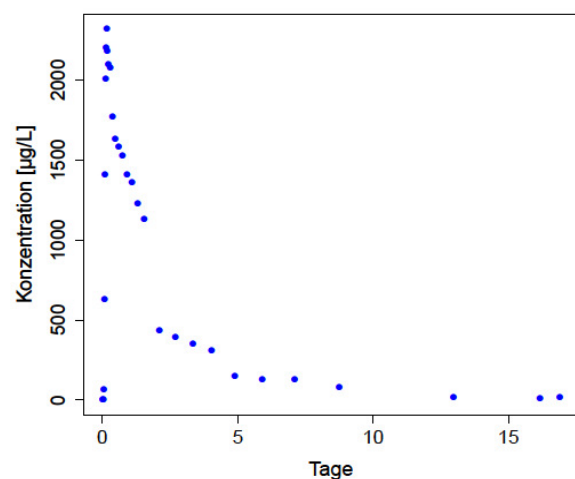


Abbildung 5.4: Naphthionatdurchgangskurve der gemessenen Konzentrationen.

5.3 Brilliant Blue-Methode

Das Aufgraben der berechneten Brilliant Blue-Plots erbrachte sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Plots an den Südhängen zeigten allgemein eine geringe Infiltrationstiefe, während die Plots am Nordhang eine schnelle Infiltration bis auf den Permafrost zeigten.

Das Infiltrationsbild in den Böden der Südhänge zeigte keine präferentiellen Fließwege. Obwohl die Böden z. T. stark durchwurzelt waren, konnten keine Fließpfade entlang der Wurzeln beobachtet werden. Diese Ergebnisse unterscheiden sich von denen anderer Studien, wie z.B. (Weiler & Flühler, 2004; Blum, 2009; Bogner et al., 2010), in denen präferentielle Fließwege, entlang von Wurzeln und Makroporen beschrieben werden. Da diese Arbeiten jedoch in wesentlich humideren Regionen, mit höheren Jahresmitteltemperaturen, durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass die untersuchten Böden einer stärkeren Bioturbation ausgesetzt sind. In den Böden der Südhänge des Untersuchungsgebiet konnten keine Makroporen, wie z.B. Regenwurmgänge gefunden werden.

An dem untersuchten Nordhang kam es zu einer schnellen Infiltration bis auf den Permafrost. Die Infiltrationsformen der beiden Plots zeigte deutliche Unterschiede. So kam es an dem trockeneren Standort zu präferentiellen Infiltrationswegen, während an der feuchteren Stelle eine flächige Infiltration zu beobachten war.

5.3.1 Brilliant Blue-Plot Nr. 1

Der erste Plot am Südhang S1, der unterhalb des unteren Bodenfeuchtemessfeldes angelegt wurde, zeigten eine geringe Infiltrationstiefe von maximal 10 cm. An einigen Stellen ist ein leichtes „fingering“ erkennbar, welches hauptsächlich an Stelle auftaucht, an denen die Bodenoberfläche leichte Depressionen aufweist. Auffällig ist, dass es zu keiner tieferen Infiltration, entlang von Wurzeln kam, so dass das Brilliant Blue ausschließlich in der oberen Schicht zu finden ist. Der Boden, am Südhang S1, weist keinen organischen Horizont auf. Auch stellte sich heraus, dass der Boden an dieser Stelle nur wenig Skelett hat. Die vorhandenen Steine sind eckig und haben einen Durchmesser von 5 bis 15 cm. Der Boden hat eine hohe Lagerungsdichte und ist sehr schluffreich. Bis in einer Tiefe von 40 cm ist kein Horizontwechsel erkennbar. Die Bodenfeuchte war, ab einer Tiefe von ca. 30 cm sehr gering. Die Abbildung A2 zeigt eine Nahaufnahme des in der Abbildung A1 abgebildeten, stark durchwurzelt Hügels. Es ist erkennbar, dass selbst an dieser Stelle keine tiefere Infiltration stattgefunden hat, obwohl der Boden wesentlich lockerer ist. Das Profil 10 cm unterhalb der Plotbegrenzung zeigte kaum eine Färbung. Lediglich die Bodenoberfläche war durch verdriftetes Brilliant Blue leicht blau gefärbt. Es waren jedoch keine Spuren von einem hanglateralen Bodenwasserfluss zu erkennen.

5.3.2 Brilliant Blue-Plot Nr. 2

Der zweite Plot, der westlich des Bodenfeuchtemessfeldes angelegt wurde, wies eine geringere Vegetationsdecke und eine steilere Hangneigung, als der erste Plot, auf. Das Infiltrationsbild war jedoch vergleichbar. Auch an dieser Stelle kam es zu keiner tieferen Infiltration. An Stellen mit kleinen Mulden in der Bodenoberfläche, konnte auch hier ein „fingering“ beobachtet werden. Die Bodentextur war mit der des Plots an der flacheren Stelle sehr ähnlich. Der Skelettanteil war jedoch noch etwas geringer und die vorhandenen Steine hatten einen Durchmesser von maximal 8 cm. Auch an dieser Stelle wies der Boden, bis zu einer Tiefe von rund 50 cm, keine erkennbaren Horizontgrenzen auf. Die Abbildung A3 zeigt eine Rharbarberwurzel, die etwa 15 cm tief in den Boden gewachsen war. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass es keine Infiltration entlang der Wurzel gegeben hat.

5.3.3 Brilliant Blue-Plot Nr. 3

Der Boden des Südhangs S2 besitzt ebenfalls keinen organischen Horizont, weist jedoch einen deutlich höheren Skelettanteil auf. Die vorhandenen Steine sind scharfkantig und haben einen Durchmesser von 4 cm bis 25 cm. Die Textur des Feinanteils ist sehr schluffreich. Auch hier ist der Boden, ab einer Tiefe von etwa 30 cm auffällig trocken.



Abbildung 5.5: Zu Beginn der Beregnung war stellenweise ein Abperlen des Wassers erkennbar (Hydrophobie).

Zu Beginn der Beregnung, mit dem, in Wasser gelöst, Brilliant Blue war erkennbar, dass das Wasser stellenweise abperlte (vgl. Abb. 5.5). Erst nach mehrmaliger Beregnung dieser Stellen konnte der hydrophobe Effekt überwunden werden. Die Abbildung A4 zeigt ein Profil des Plots. Trotz des höheren Skelettanteils im Boden, ähnelt sich das Infiltrationsbild sehr mit dem am S1. In Abbildung A5 ist erkennbar, dass es auch an der Grenzschicht, zwischen den Steinen und dem Boden, zu keiner tieferen Infiltration gekommen ist. Auch an dieser Stelle konnte kein hanglateraler Bodenwasserfluss beobachtet werden.

5.3.4 Brilliant Blue-Plot Nr. 4

Der vierte Plot wurde am Nordhang, an einer Stelle angelegt, die von einer etwa 10 cm dicken Schicht aus abgestorbenen Wurzeln und Moosen bedeckt war. Beim Aufgraben stellte sich heraus, dass der Permafrost an dieser Stelle in einer Tiefe von 43 cm lag. Der Boden ist sehr skelettreich und weist eine geringe Lagerungsdichte auf. Unter der organischen Auflage befinden sich große und mittelgroße Steine ($d = 4 - 30$ cm). Die mineralische Erde ist ein Gemisch aus Schluff, Sand, Kies und Grus. Es sind deutliche Spuren von Kryoturbation, wie Spalten und Risse in dem Boden erkennbar (vgl. Abb. A6).

Nach dem Aufgraben zeigte sich, dass einige Steine durch das Brilliant Blue blau gefärbt waren. Das Brilliant Blue enthaltende Wasser sammelte sich sehr schnell auf dem gefrorenen Boden (vgl. Abb. A9). An manchen Stellen war ein deutliches, hanglaterales Fließen des Wassers auf dem Permafrost zu erkennen. Das Abschälen eines 70 x 100 cm großen Stückes des Wurzelfilzes erbrachte die Erkenntnis, dass das Wasser nicht flächig, sondern stellenweise präferentiell infiltriert ist (vgl. Abb. A7 und A8).

5.3.5 Brilliant Blue-Plot Nr. 5

Dieser Plot wurde ebenfalls am Nordhang, aber an einer feuchten Stelle, mit dicken Moos- und Graspolstern, angelegt. Beim Aufgraben des Plots war zu erkennen, dass der Permafrost bereits in einer Tiefe von weniger als 20 cm anstand. Das Moospolster reichte bis zu dem gefrorenen Boden und war vollkommen gesättigt. Der Boden unter der organischen Auflage hat einen hohen Skelettanteil. Die zwischen den Steinen liegende Erde ist schluffreich, weist jedoch auch die Fraktionen Sand, Kies und Grus auf. In der organischen Auflage waren deutliche Intfiltrationsspuren des Brilliant Blue-Berechnungswassers zu erkennen (vgl. Abb. A11). Bereits während der Grabarbeiten stand das gefärbte Wasser in der Grube (vgl. Abb. A10). Bei genauerer Betrachtung ließ sich eine hanglaterale Fließbewegung erkennen. Der gefrorene Boden wies Wurzeln und organische Bestandteile auf. Es waren viele Eislinsen vorhanden, die sowohl in dem Feinmaterial des Bodens, als auch zwischen den Steinen zu finden waren.

5.4 Messergebnisse der Hauptionen- und Isotopenanalyse

Die im Feld gesammelten Proben wurden im Labor auf den Gehalt an Hauptionen und ihr Isotopenverhältnis analysiert. Als Hauptionen wurden hauptsächlich die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat gemessen. Weiterhin wurde das Verhältnis der natürlichen Isotope des Wassers, ^{18}O und Deuterium, in den Proben bestimmt.

Das Ereignis am 19. Juni 2012 war ein Konvektiveignis mit einer maximalen Intensität von 33 mm/h. Das Ereignis dauerte etwa zwei Stunden und erbrachte eine Niederschlagsmenge von 41 mm. Durch dieses Ereignis erhöhte sich der Abfluss von 1,4 m³/s auf 8,2 m³/s (Spitzenabfluss). Der aus der Ganglinie ermittelte Abflusskoeffizient liegt für dieses Ereignis bei 0,06. Während des Beprobungszeitraums gab es ein weiteres Niederschlagsereignis, welche jedoch nur eine Niederschlagsmenge von 2,8 mm erbrachte.

Die Messergebnisse des beprobten Ereignisses vom 19. Juni sind in der Abbildung 5.6 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ionenkonzentrationen insgesamt sehr gering sind. Die Konzentrationen in dem Flusswasser sind nur geringfügig höher als die Konzentrationen im Niederschlag. Die Konzentrationen in der Permafrostprobe sind hingegen größer als die des Flusswassers, wobei die Chloridkonzentration mit 16,4 mg/l besonders hoch ist. Die Sulfatkonzentration im Permafrost unterscheidet sich hingegen nicht von der im Flusswasser gemessenen. Es lässt sich erkennen, dass zu Beginn der Beprobung die Nitratkonzentration etwas ansteigt, während die Sulfatkonzentration etwas absinkt. Der Verlauf der Chloridkonzentration weist hingegen kaum eine Veränderung auf.

Die Isotopensignatur des Niederschlags stellte sich als relativ schwer heraus, während der Permafrost erwartungsgemäß isotopisch sehr leicht ist. An dem Verlauf der Isotopen-Werte des Barentalbaches ist ein deutlicher Sprung, am Anfang der Probenreihe, feststellbar. Dabei wird die Signatur des Flusses rasant leichter. Dieser Trend ist über die gesamte Beprobungsphase hinweg erkennbar, schwächt sich jedoch zunehmend ab.

Die Graphik mit der Abflussganglinie und der Niederschlagsverteilung zeigt eine schnelle Reaktion auf das Niederschlagsereignis. Der Anstieg der Ganglinie ist sehr steil und die Abflussspitze erscheint bereits fünf Stunden nach dem Beginn des Ereignisses. Das wesentlich kleinere Ereignis am 21. Juni führt zu einem geringen Anstieg in der Ganglinie.

Das Ereignis am 31. August 2012 dauerte 8,5 Stunden und wies mit 5,1 mm/h eine viel geringere Maximalintensität auf. Die gesamte Niederschlagsmenge lag bei 13,7 mm. Der Anstieg des Abflusses, von 2,5 m³/s auf 6,1 m³/s dauerte fast 11 Stunden.

Die Messergebnisse der Anionenkonzentrationen (vgl. Abb. 5.7) zeigen, dass sich die Konzentrationen über den Beprobungszeitraum nur geringfügig änderten. Auffällig ist, dass die Gehalte des Hangwassers höher sind und größeren Schwankungen unterliegen,

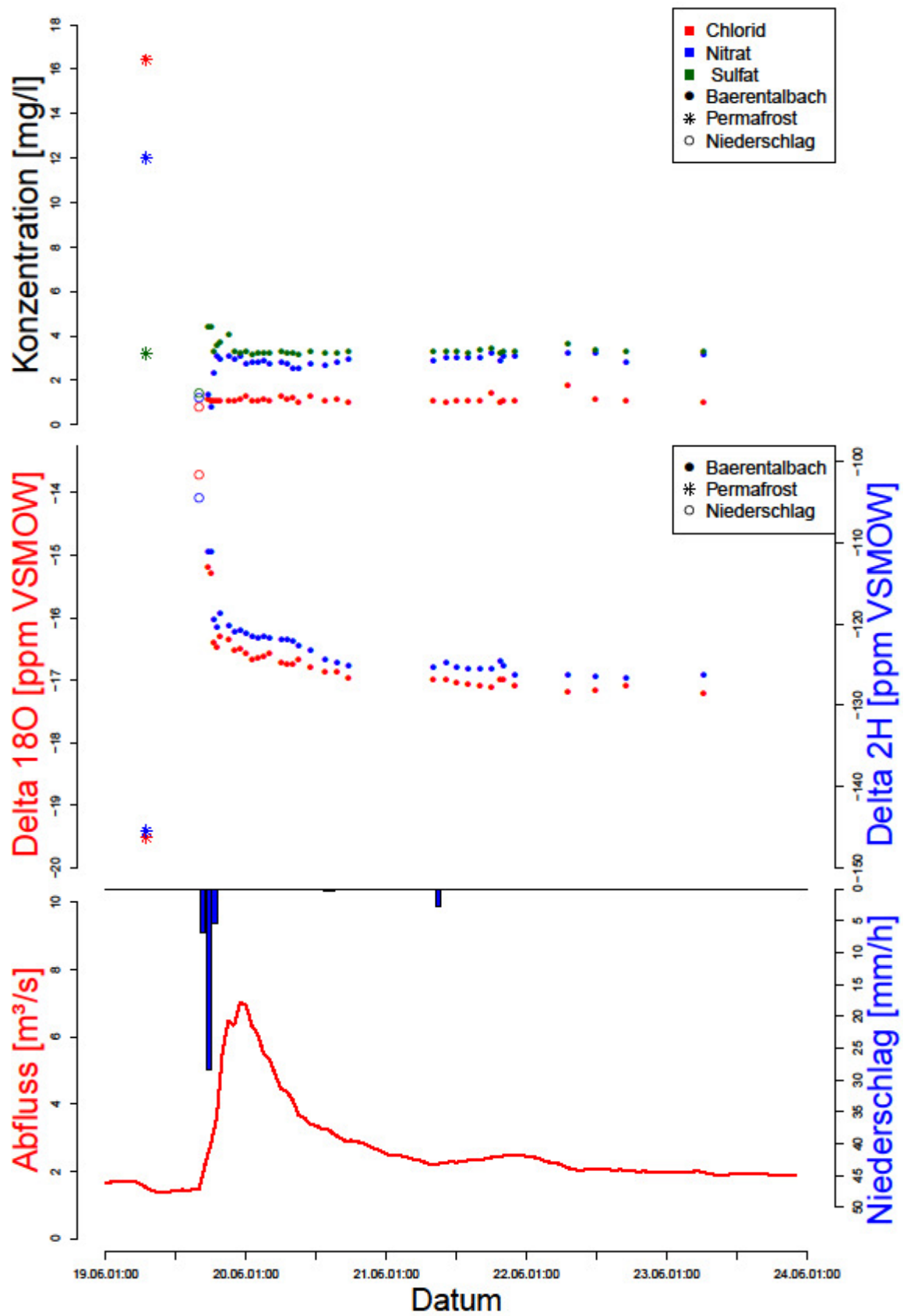


Abbildung 5.6: Ergebnisse der Laboranalysen, von den Proben des Ereignisses am 19. Juni 2012.

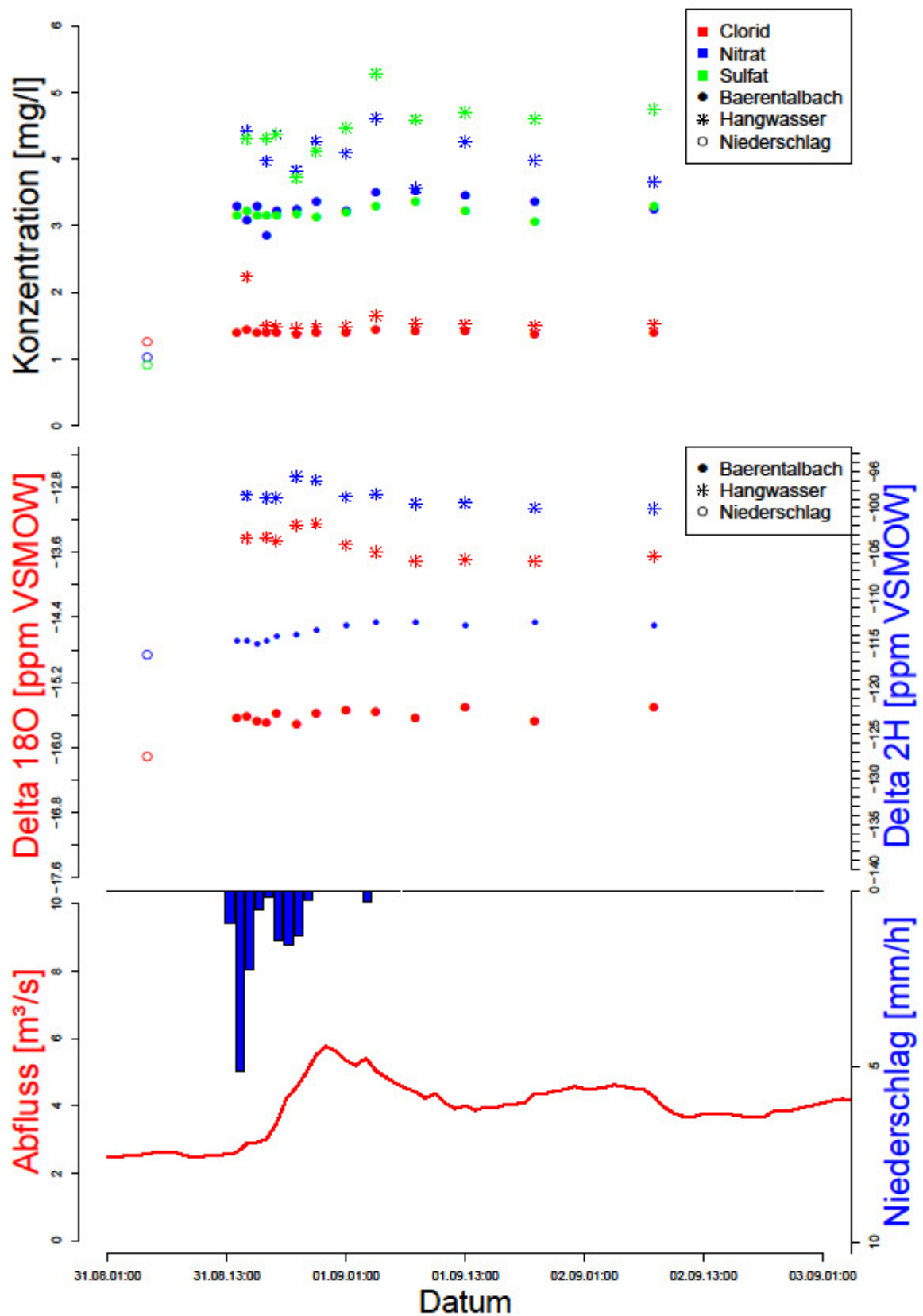


Abbildung 5.7: Ergebnisübersicht der Messergebnisse von dem Ereignisses am 31. August 2012.

als die des Flusses. Es ist ein Sprung in der Chloridkonzentration, zu Beginn der Beprobung, zu erkennen. Im weiteren Verlauf ändert sich die Chloridkonzentration nicht mehr signifikant. Die Konzentrationen des Niederschlags sind wie bei dem Ereignis vom 19. Juni sehr gering.

Das Isotopenverhältnis des Niederschlags ist deutlich leichter als das des Ereignisses im Juni. Die Wasserproben des Hangwassers sind schwerer als die des Flusses und weisen zunächst einen Anstieg und im weiteren Verlauf einen Absinken auf. Der Verlauf der Isotopenwerte der Flusswasserproben ist obigen Trend gegenläufig, so dass das Isotopenverhältnis schwerer wird. Insgesamt unterliegen die Messergebnisse der Hangwasserproben einer größeren Dynamik. Dies liegt vor allem an dem Größenunterschied der entsprechenden EZG.

Das unterste Diagramm der Abbildung 5.7 zeigt die Niederschlagsverteilung und die Abflussreaktion des Bärenalmbaches. Der aufsteigende Ast der Ganglinie ist flacher, als bei der Ganglinie des Ereignisses vom Juni und auch die Rezessionskurve weist ein geringeres Gefälle auf.

Die Proben, die für den Tracerversuch am Nordhang, an einem Hangwasserbach genommen wurden, wurden ebenfalls auf den Gehalt von Chlorid, Nitrat und Sulfat, sowie ihre Isotopensignatur, analysiert. Die Ergebnisse der Messungen sind in der Abbildung 5.8 dargestellt.

Die Ergebnisse der Anionen unterscheiden sich kaum von denen im Bärenalmbach. Lediglich die Sulfatkonzentration ist im Hangwasser etwas höher als im Fluss. Es fällt auf, dass der Sulfatgehalt größer als der des Permafrostes ist. Auch lässt sich erkennen, dass die Abnahme des Nitrats, zu Beginn der Probenahme, geringer ist.

Die Isotopendaten zeigen einen relativ waagerechten Verlauf, der erst gegen Ende der Probenahme etwas ansteigt.

In dem unteren Diagramm ist sowohl das Niederschlagsereignis, als auch der Wasserstand in dem Hangwasserbach dargestellt. Es wurde mit der Messung des Wasserstandes erst am 22. Juni begonnen, so dass nur die Abnahme des Wasserstandes aufgenommen werden konnte.

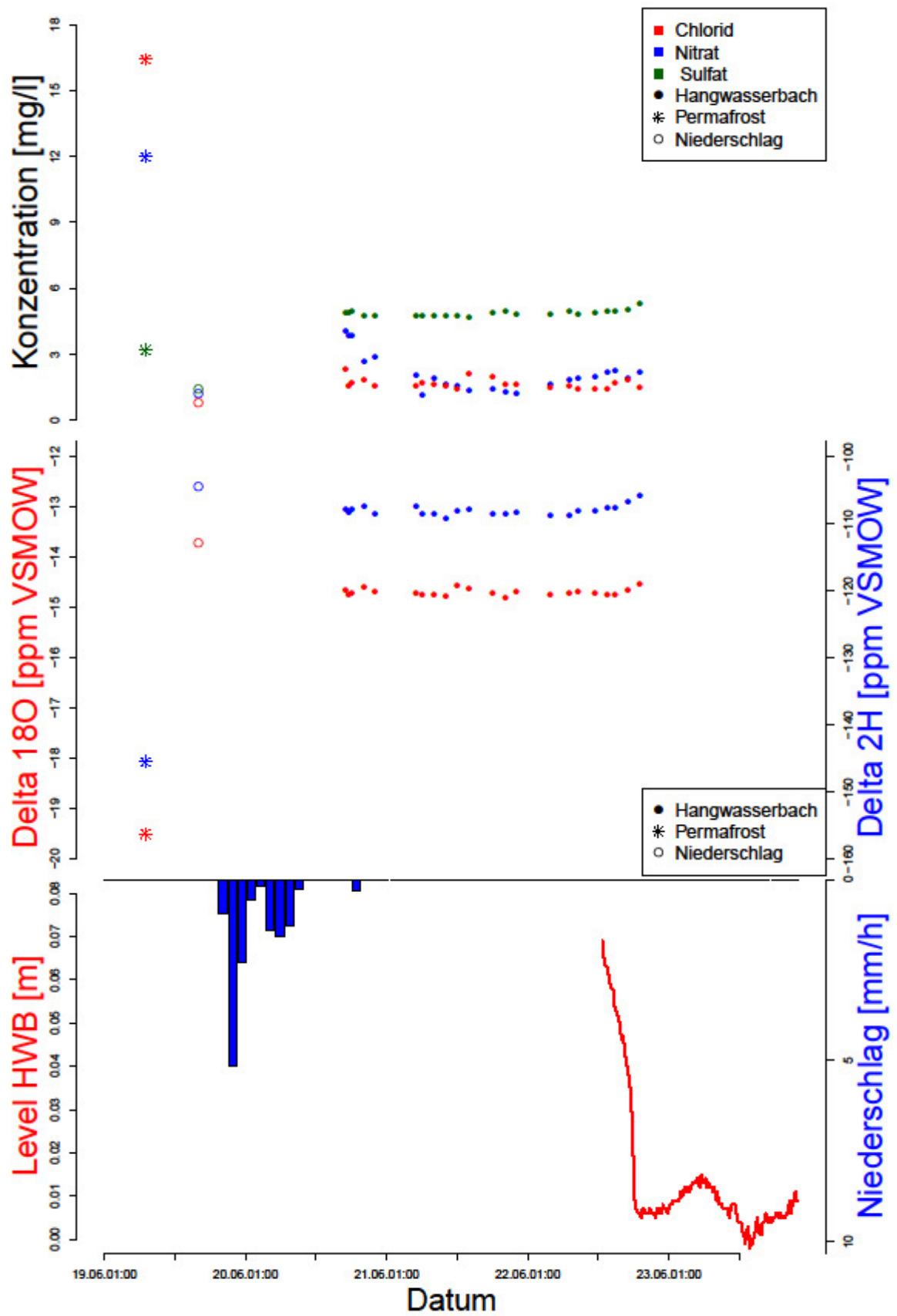


Abbildung 5.8: Messergebnisse der Hangwasserbachproben, des Niederschlags vom 19. Juni und des Permafrosts.

6 Diskussion

6.1 Untersuchung des Oberflächenabflusses am Südhang

Anhand der Messergebnisse zeigte sich ein hangabwärts gerichteter Transport des Naphthionats während der Expositionsphase (vgl. Abb. 5.1 & 5.2). Da die Tracerkonzentrationen nicht mit steigendem Abstand von der Aufgabestelle des Tracers abnehmen liegt vermutlich an der Mikrotopographie des Hanges. So kann sich der Oberflächenabfluss an manchen Stellen konzentrieren und somit eine höhere Tracerfracht mit sich führen. Teeeier, die in einer kleinen Depression des Hanges liegen bekommen so evtl. mehr Tracer ab. Die Gerinnebildung lässt sich jedoch nur schwer rekonstruieren, da keine detaillierten Aufzeichnungen der genauen Teeeilagen gemacht wurden.

Die Tatsache, dass bei den Beregnungsversuchen kein Oberflächenabfluss auftrat zeigt, dass eine Beregnungsmenge von 10 mm/m^2 wohl nicht ausreicht, um Oberflächenabfluss zu generieren. Tanaka, et al. (2005) ermittelten für ein von Granit unterlagertes EZG, ca. 30 km östlich von Ulaanbaatar, einen Schwellenwert von 10 mm für das Auftreten von Oberflächenabfluss. Dennoch unterstützen auch die Ergebnisse der Brilliant Blue-Methode die These, dass es zu Oberflächenabfluss kommen kann. Das Infiltrationsbild der an den Südhängen S1 und S2 gegrabenen Profile zeigt einheitlich, dass es zu keiner tieferen Infiltration kam, so dass angenommen werden kann, dass die maximale Infiltrationsrate des Oberbodens bei Starkniederschlägen schnell überschritten wird.

In den Studien von Doerr & Thomas (2000) und Miyata, et al. (2010) erbrachten die Erkenntnis, dass der hydrophobe Effekt in trockenen Böden größer ist und dadurch die Infiltrationsraten, unter trockenen Bedingungen, geringer sind.

Im Rahmen des Projektes „Regionale Hydrologie“ der Universität Heidelberg wurden im Juli 2011 am Südhang S1 zwei Bodenfeuchtemessfelder eingerichtet. Für die Untersuchung des Oberflächenabflusses sind vor allem die Messwerte im Oberboden, also der in 5 cm Tiefe verbauten Sensoren, von Interesse.

Betrachtet man die Bodenfeuchtemessungen in der genannten Tiefe, so fällt auf, dass sich der Oberboden während der Beregnungsversuche (29. und 30. Juni) in einem eher feuchten Zustand befand (vgl. Abb. 6.1), so dass die Infiltration begünstigt war.

In der Tabelle 1 sind die Probenahmeterminen, sowie die in dieser Zeit gefallen Niederschläge, die den von Tanaka, et al. (2005) ermittelten Schwellenwert von 10 mm übersteigen, aufgeführt.

Tabelle 1: Überblick über die Teeeierproben mit Sammeldatum, Anzahl der Tage im Feld, Anzahl der Ereignisse > 10mm im Sammelabschnitt, Niederschlagsmenge seit Ausbringung der Teeeier, Niederschlagsmenge im Sammelabschnitt, maximale Niederschlagsintensität im Sammelabschnitt und maximale Anzahl an trockentagen vor einem Niederschlagsereignis > 10 mm.

Nr.	Sammeldatum	Tage i. F.	Anzahl Ereignisse	$\sum P$ [mm]	$\sum P_{\text{Periode}}$ [mm]	P_{max} [mm/h]	T_{trocken}
1-2	20.07.	22	3	128	128	14,0	1
2-3	04.08.	37	1	159,5	31,5	5,8	4
5	02.09.	66	5	310,5	151	10,8	5

Bei der Betrachtung der Niederschlagsverteilung fällt auf, dass es in dem ersten und letzten Abschnitt viel Niederschlag und jeweils ein Ereignis mit einer größeren Intensität gegeben hat. In der Zeit zwischen der Ausbringung und der ersten Sammlung der Teeeier konnte der Boden besonders stark austrocknen (vgl. Abb. 6.2 a), so dass es verstärkt zu hydrophoben Effekten an der Bodenoberfläche und somit wahrscheinlich zu oberflächlichem Fließen gekommen ist. Das auf die Trockenphase folgende Ereignis am 3. Juli, erbrachte eine Niederschlagsmenge von 3,1 mm. Dieses Ereignis führte jedoch zu keiner Erhöhung der Bodenfeuchte, so dass erst das Ereignis am 4. Juli mit einer Gesamtmenge von 14,4 mm einen Anstieg der Bodenfeuchte auslöste. Dieses Ereignis, so wie das Niederschlagsereignis einen Tag später, dass 22 mm erbrachte und eine maximale Intensität von 14 mm/h hatte, könnten Oberflächenabfluss generiert haben. Als weiteres Ereignis, dass Oberflächenabfluss erzeugt haben könnte kommt in dem ersten Abschnitt das Ereignis am 16. Juli in Frage, welches eine Niederschlagsmenge von 12,6 mm erbrachte, wobei der Oberboden, zu diesem Zeitpunkt eher als feucht zu bezeichnen ist.

Im zweiten Abschnitt (vgl. Abb. 6.2 b) gab es nur ein Ereignis, das Oberflächenabfluss generiert haben könnte. Dieses Ereignis fand am 30. Juli statt und erbrachte eine Niederschlagsmenge von 16,7 mm, welche über eine Zeit von 4,5 Stunden fiel. Die Intensitäten dieses Ereignisses sind mit < 5 mm/h vergleichsweise gering. Es hatte jedoch in den vier Tagen zuvor keinen Niederschlag gegeben, wodurch der Boden relativ trocken war. Der vergleichsweise langsame Anstieg der Bodenfeuchte bestärkt die Vermutung, dass durch dieses Ereignis Oberflächenabfluss generiert wurde. Durch die voran gegan-

gene Trockenphase hat sich der hydrophobe Effekt der Böden verstärkt, so dass die Infiltrationsraten klein waren. Da an den steilen Hängen kein Wasser in Form von Pfützen gespeichert werden kann muss das überschüssige Wasser oberflächlich abgefließen sein.

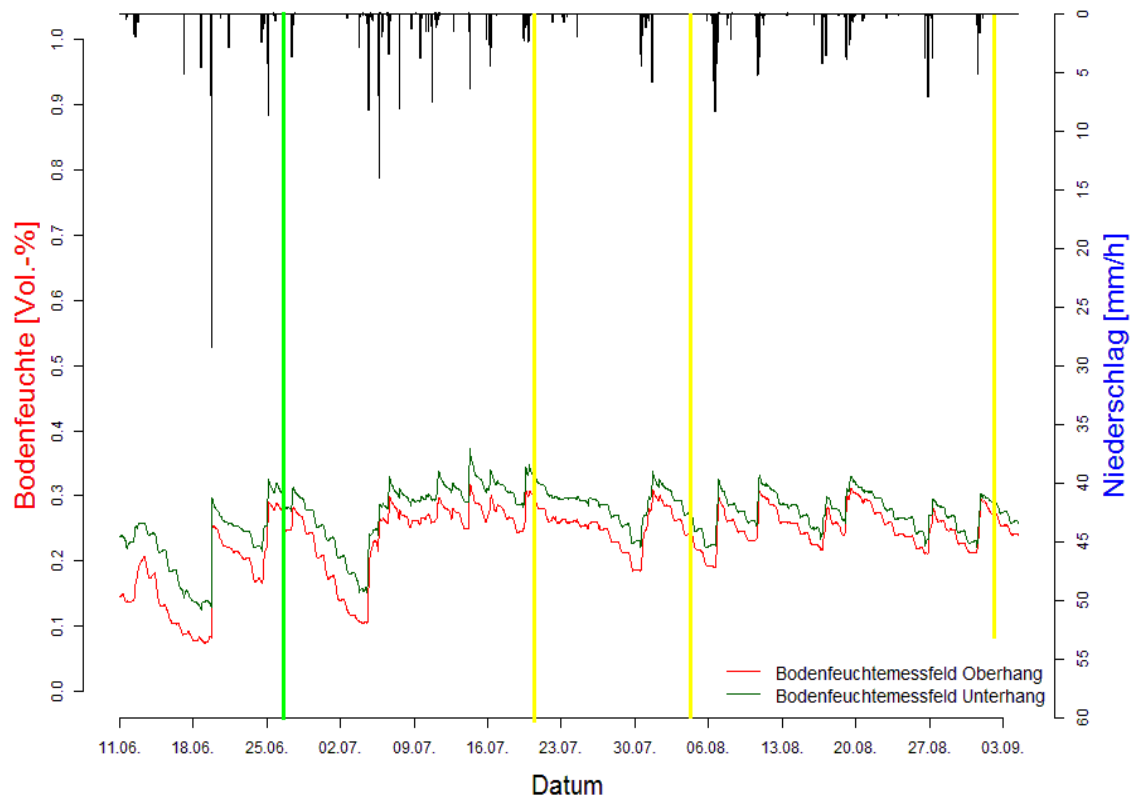


Abbildung 6.1: Überblick über die Bodenfeuchte im Oberboden (5 cm Tiefe) der beiden Messfelder am Südhang S1, der Niederschlagsverteilung und des Termines der Ausbringung des Tracers und der Teeer (grüne Linie), sowie der Sammeltermine (gelbe Linien).

In dem letzten Sammelabschnitt gab es mit 151 mm den meisten Niederschlag (vgl. Abb. 6.2 c). Das erste Ereignis war am 6. August und ergab eine Gesamtniederschlagsmenge von 47,1 mm. Durch die hohe Niederschlagsmenge und der fünftägigen Trockenperiode, durch die der Oberboden austrocknen konnte, hat dieses Ereignis vermutlich Oberflächenabfluss generiert. Die Ereignisse am 10. August (26,6 mm), 19. August (11,8 mm), 26. August (11,0 mm) und 31. August (13,7 mm) überstiegen ebenfalls den Schwellenwert von 10 mm. Da auch vor diesen Ereignissen eine längere Trockenphase lag, ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch diese zu Oberflächenabfluss geführt haben, hoch.

Der Sommer 2012 zeichnete sich durch eine besonders große Niederschlagsmenge aus. So fielen während der 66-tägigen Expositionszeit der Teeer 310 mm Regen, während es im gesamten Jahr 2011 nur 317 mm Niederschlag gab. Vermutlich kommt es in trockeneren Jahren vermehrt zu Oberflächenabfluss, da der Oberboden so noch stärker austrocknet und sich dadurch der hydrophobe Effekt verstärkt.

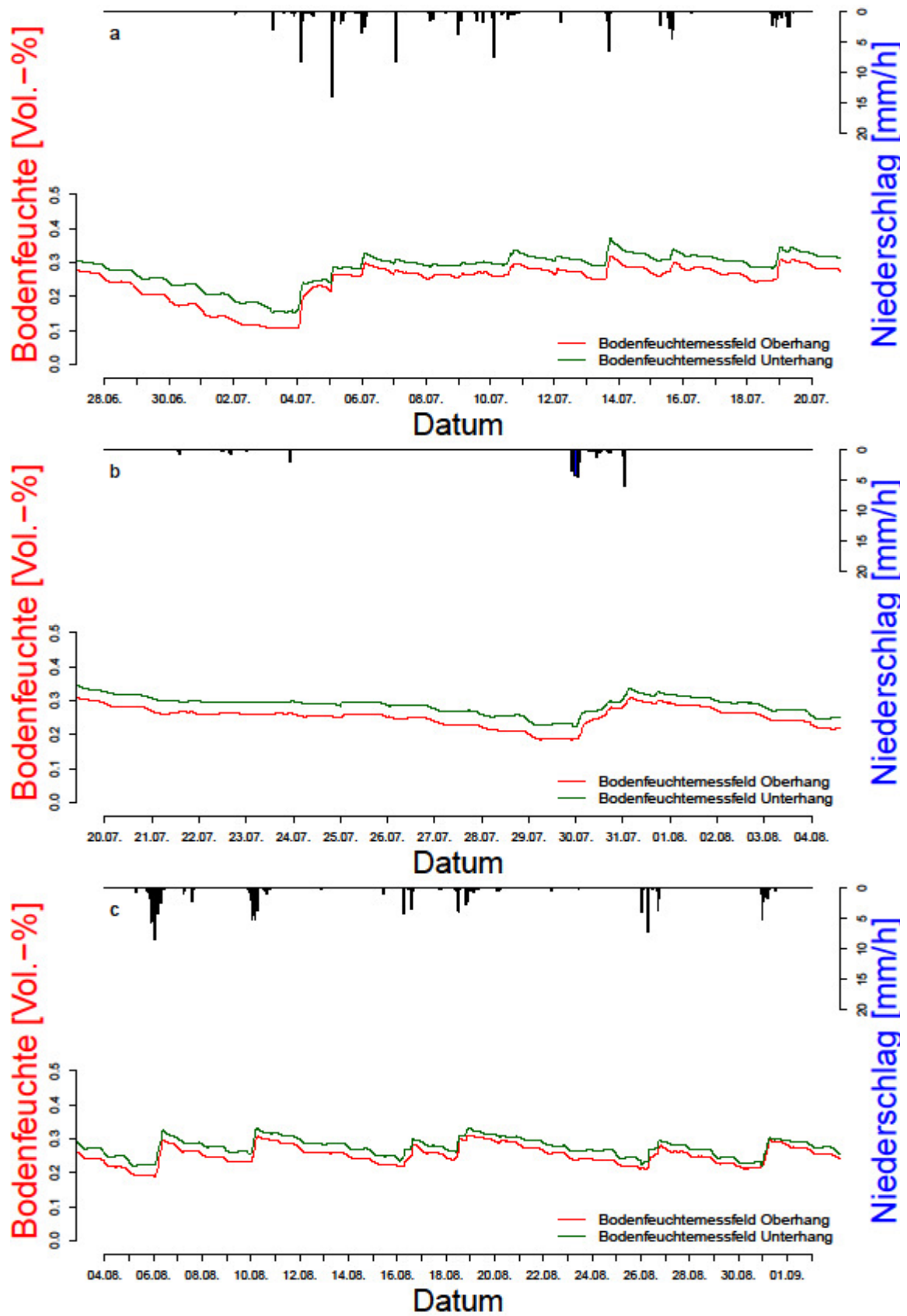


Abbildung 6.2: Bodenfeuchten der beiden Messfelder und Niederschlagsverteilung der einzelnen Zeitabschnitte zwischen den Sammelterminen.

Durch das Tracerexperiment konnte der Nachweis erbracht werden, dass die steilen Südhänge, bei größeren Sommerniederschlägen, Oberflächenabfluss generieren können. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Beobachtungen, die während eines Starkregenereignisses am 19. Juni 2012 gemacht werden konnten. Das Ereignis zeichnete sich durch sehr hohe Niederschlagsintensitäten aus, welche zu Oberflächenabfluss führten. Nach diesem Ereignis waren deutliche Fließspuren, besonders an den Hanganschnitten neben der Straße zu erkennen (vgl. Abb. 6.3 & 6.4).



Abbildung 6.3: Hanganschnitt des Südhanges mit Fließspuren von konzentriertem Oberflächenabfluss.

Abbildung 6.4: Fließspuren von konzentriertem Oberflächenabfluss eines Südhanges.

Der Grund für das Auftreten von Oberflächenabfluss ist vermutlich eine Kombination aus dem steilen Gefälle der Südhänge, den feinkörnigen Böden mit hoher Lagerungsdichte, der Abwesenheit von Makroporen und der beobachteten Hydrophobie. Die Beregnungsversuche haben gezeigt, dass außerdem eine größere Niederschlagsmenge nötig ist, um Oberflächenabfluss zu generieren.

6.2 Fließeigenschaften und –dynamik auf dem Permafrostboden am Nordhang

Tracerversuche mit Naphthionat und Uranin am Nordhang erbrachte zwei Tracerdurchgangskurven, an der Probenahmestelle 54,6 m unterhalb der Einspeisung. In den Proben der zweiten Probenahmestelle, an einem Bach am Hangfuss, konnten keine Tracerkonzentrationen nachgewiesen werden. Grund hierfür ist die zu geringe Tracermenge, da es am Unterhang einen etwa 12 m breiten Streifen mit Sättigungsflächen gibt, in der das Hangwasser gespeichert und stark verdünnt wird.

Da bei dem Uranindurchgang die Peakkonzentration nicht beprobt wurde, wurde diese mit dem eindimensionalen Stofftransportmodell CXTFIT (Toride et al., 1995), das auf

der Basis der allgemeinen Konvektion-Dispersions-Gleichung beruht, modelliert. Es zeigte sich, dass die beste Anpassung an die gemessenen Werte erzielt werden konnte, wenn Sorptionsprozesse in der Modellierung berücksichtigt werden. Dies bestärkt den Verdacht, dass sich Uranin sorptiv verhält und somit keinen idealen Tracer darstellt. Aus diesem Grund wurde, für alle weiteren Berechnungen ausschließlich der Naphthionatdurchgang verwendet.

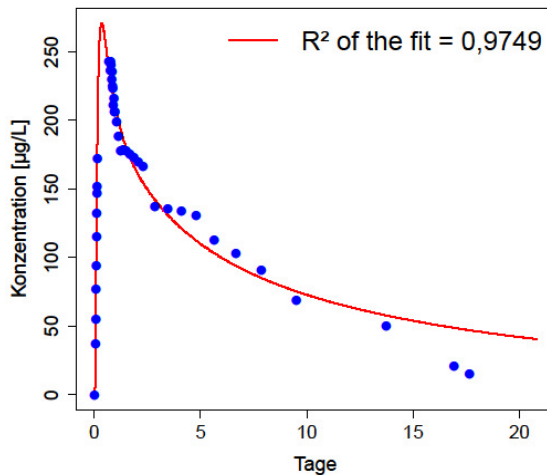


Abbildung 6.5: Gemessene Uranin-Durchgangskurve (blaue Punkte) und der modellierte Durchgang (rote Linie).

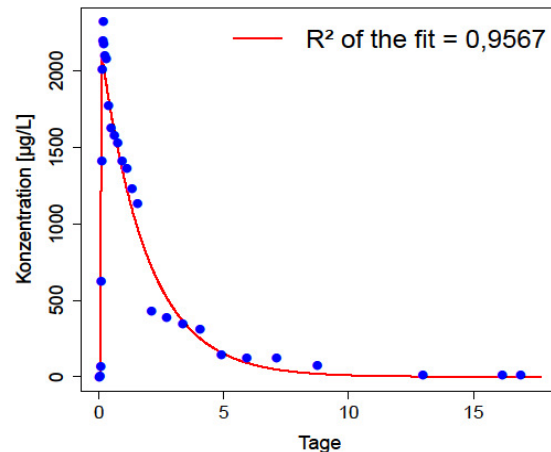


Abbildung 6.6: Gemessene (blue Punkte) und modellierte (rote Linie) Naphthionat-Durchgangskurve.

Der Naphthionatdurchgang wurde ebenfalls mit dem CXTFIT-Model modelliert, wobei die beste Anpassung ohne Sorption erhalten wurde. Die modellierten Tracerdurchgänge sind in den Abbildungen 6.5 und 6.7 dargestellt. Es zeigt sich, dass die modellierte Naphthionatdurchgangskurve zwar nicht ganz die maximale Konzentration am Durchgangsppeak erreichte, der Gesamtverlauf jedoch gut wiedergegeben werden konnte. Die, durch das Fitting erhaltenen Parameter sind im Anhang (S. xii) dargestellt. Die inverse Modellierung, zur Ermittlung der Parameter, anhand der gemessenen Werte, ergab eine mittlere Porenwassergeschwindigkeit von 0,6 cm/s.

Anhand der gemessenen Durchgangskurve, konnten die Parameter, maximale Fließgeschwindigkeit ($v_{\max}$) und die Peakgeschwindigkeit (v_{Peak}) ermittelt werden. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit (v_{mittel}) wurde ergänzend mit der C_{Peak} -Methode von P. Maloszewski beschrieben in Schudel, et al. (2002) bestimmt. Mit dieser Methode kann die mittlere Abstandsgeschwindigkeit aus den gemessenen Daten ermittelt werden. Aus der mittleren Abstandsgeschwindigkeit und dem im Feld gemessenen Gefälle kann, unter der Annahme, dass der Boden eine homogene Porosität hat, über das Darcy-Gesetz (Gl. 5) der kf-Wert berechnet werden.

$$v_f = k_f \times \frac{h}{l} \quad (5)$$

$$k_f = v_f \times \frac{l}{h} \quad (6)$$

Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit v_f [m/s] ist dabei das Produkt aus der hydraulischen Leitfähigkeit k_f [m/s] und dem hydraulischen Gradienten $i = h/l$ [-]. Durch umstellen der Gleichung 5, kann der k_f -Wert berechnet werden (Gl. 6). In der Tabelle 2 sind die berechneten Parameter aufgeführt.

Tabelle 2: Hydraulische Parameter des Tracer Versuches mit Naphthionat.

Parameter	Wert	Einheit
Minimale Fließzeit $t_{\min}$	0,83	h
Maximale Abstandsgeschwindigkeit $v_{\max}$	1,82	cm/s
Peakfließzeit t_{Peak}	3,83	h
Peakgeschwindigkeit v_{Peak}	0,40	cm/s
Mittlere Fließzeit t_{mit}	10,07	h
Mittlere Abstandsgeschwindigkeit v_{mit}	0,15	cm/s
Mittlere Porengeschwindigkeit (CXTFIT)	0,6	cm/s
K_f -Wert	$5,88 * 10^{-3}$	m/s

Vergleicht man die erhaltenen SSF Geschwindigkeiten mit den Ergebnissen anderer Studien, so zeigt sich, dass die ermittelte Geschwindigkeit deutlich geringer, als die für „pipeflow“ beschriebenen Geschwindigkeiten ist. So wurde von Carey & Woo (2000) Fließgeschwindigkeiten in „soil pipes“ zwischen 10 cm/s und 30 cm/s ermittelt. Auch Tanaka (1992) beschreibt eine ähnlich hohe Fließgeschwindigkeit, von 18,3 cm/s, für „soil pipes“. Fließgeschwindigkeiten, in derselben Größenordnung wie die im Untersuchungsgebiet bestimmte, werden in der Literatur für Hangböden mit Makroporen beschrieben. So wurde von Weiler et al. (1998) an einem bewaldeten Hang bei Vogelbach in der Schweiz, mit einer mittleren Hangneigung von 21° , eine Fließgeschwindigkeit im Boden von 0,15 cm/s, durch einen Tracerversuch mit Uranin, ermittelt. Der Boden war ein Gleysol, mit einer Mächtigkeit von im Mittel 1,2 m. Auch eine vorherige Studie im Alptal, Schweiz von Weiler (1997) erbrachte für einen bewaldeten Hang mit derselben Hangneigung eine Fließgeschwindigkeit in Makroporen zwischen 0,13 - 0,18 cm/s. Diese Werte wurden ebenfalls durch Tracerversuche mit Uranin, Bromid und Chlorid bestimmt. In einer Studie von Anderson et al. (2009) konnten Fließgeschwindigkeiten im

Boden von 0,025 bis 0,172 cm/s gemessen wurde. Dabei lagen die SSF auslösenden Niederschlagsmengen mit 41 mm bzw. 45 mm in dem Bereich des untersuchten Ereignisses (41 mm). Der untersuchte Hang hatte eine mittlere Hangneigung von 17° und einen etwa 1 m mächtigen Lehm Boden mit einem hohen Anteil an Organik. Als Tracer, zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten im Boden, wurde Natriumchlorid verwendet. Carey & Woo (2000) ermittelten Fließgeschwindigkeiten, dieser Größenordnung, in der organischen Auflage eines von Permafrost unterlagerten Hangs in Yukon, Kanada. Es stellte sich heraus, dass die Fließgeschwindigkeiten in der Matrix der organischen Auflage, bestehend aus Moos- und Graspölkern, bei 0,01 bis 2,0 cm/s lagen. Der untersuchte Hang hatte eine vergleichbare Hangneigung wie der Nordhang im Bärenental und die Lage des Permafrosts entsprach, mit 0,6 bis 2 m Tiefe, in etwa der des, in dieser Arbeit untersuchten Hangs. In der Tabelle 3 sind weitere in der Literatur beschriebene SSF Geschwindigkeiten, dieser Größenordnung, aufgeführt.

Tabelle 3: Literaturübersicht der Studien mit vergleichbaren SSF-Fließgeschwindigkeiten.

Autor	Ort	Hangneigung	SSF-Geschw.
(Mosley, 1982)	Tawhai, Neuseeland	k. A.	0,3 cm/s
(Mikovari et al., 1995)	Bitburg, Deutschland	12°	0,028 cm/s
(Weiler, 1997)	Alptal, Schweiz	21°	0,13 – 0,18 cm/s
(Weiler et al., 1998)	Vogelbach, Schweiz	21°	0,15 cm/s
(Feyen et al., 1999)	Alptal, Schweiz	20°	0,31 cm/s
(Nyberg et al., 1999)	Gardsjön, Schweden	k. A.	0,01 – 0,1 cm/s
(Carey & Woo, 2000)	Yukon, Kanada	15°	0,01 – 2,0 cm/s
(Anderson et al., 2009)	British Columbia, Kanada	17°	0,025 – 0,172 cm/s
(Wienhöfer et al., 2009)	Vorarlberg, Österreich	30°	0,123 cm/s

Um ein besseres Prozessverständnis zu erhalten wurden an dem untersuchten Hang Stellen, an denen Wasser austrat, aufgegraben. Es zeigte sich, dass das Wasser, an trockeneren Standorten mit tief liegendem Permafrost, auf diesem, in Spalten konzentriert abfloss. Durch die Messung der Wassertemperatur konnte nachgewiesen werden, dass das Wasser auf dem gefrorenen Boden floss. So hatte das oberflächlich fließende Wasser eine Temperatur von 4 °C, bevor es in einem Schluckloch verschwand.



Abbildung 6.7: Stelle mit "returnflow" am Nordhang.



Abbildung 6.8: Die gleiche Stelle wie in Abb. 6.7 nach dem Aufgraben.



Abbildung 6.9: Weitere Austrittsstelle am Nordhang.



Abbildung 6.10: Auch hier zeigt sich durch das Aufgraben, dass große Steine den Austritt auslösen.

An einer Austrittsstelle unterhalb wies das Wasser eine Temperatur von 0,1 bis 0,4 °C auf. Diese Abkühlung kann nur durch längeren Kontakt mit dem Permafrost hervorgerufen werden. Der „returnflow“ trat besonders an Stellen auf, an denen größere Steine, die bis in den Permafrost reichten, oder Wurzeln den hanglateralen Fließweg blockierten (vgl. Abb. 6.7 bis 6.10). Diese natürlichen Barrieren zwingen das Wasser an die Bodenoberfläche, da es nicht wie z.B. in periglazialen Hangschuttdecken nach unten ausweichen kann. Weiterer „returnflow“ konnte an Stellen gefunden werden, an denen der Permafrost höher (< 20 cm Tiefe) lag. Diese Stellen haben eine dicke Vegetationslage, welche stark isolierend wirkt und somit das Auftauen des Permafrostes verzögert (Yoshikawa et al., 2003; Kasischke & Johnstone, 2005). An solchen Stellen war jedoch

kein konzentriertes Fließen, wie an den Stellen ohne eine vitale Vegetationsdecke, zu finden. Diese Stellen waren gesättigte Flächen, mit kleinen Tümpeln, in denen jedoch ein Fließen des Wassers beobachtet werden konnte. 18 Stunden nach der Einspeisung von Uranin, konnte in einer Wasserprobe, aus einem kleinen Tümpel (25 m unterhalb der Einspeisestelle und 8 m östlich der geraden Fließstrecke zwischen der Einspeise- und Probenahmestelle), eine Uraninkonzentration von 189 µg/l gemessen werden. Dieser Wert liegt nur wenig unter der Konzentration, der, zur selben Zeit, an der Probenahmestelle genommen Probe (236 µg/l).

Die Oberfläche des Permafrostes ist keine ebene Fläche. Sie weist eine, durch verschiedene Bodenbedeckung und somit unterschiedlichem Wärme- und Strahlungseintrag, geformte Mikrotopographie auf (Quinton et al., 2009). Dadurch bilden sich bevorzugte Fließwege auf dem Permafrost aus. Durch den zusätzlichen Wärmeeintrag und die erosive Kraft des Wassers, können so unterirdische Gerinne „soil pipes“ entstehen. So konnte an einigen Stellen, des untersuchten Hanges ein gluckernendes Geräusch vernommen werden, ohne dass ein Bach zu erkennen war. Erreicht so ein konzentrierter Fließpfad eine Fläche mit hochanstehendem Permafrost, so weitet sich dieser auf und das Wasser fließt flächig, als Matrixflow durch die organische Auflage. Der mittels des Tracerversuches untersuchte Hangbereich wies sowohl trockene, als auch mit Vegetation bedeckte, feuchtere Abschnitte auf, so dass die ermittelte Fließgeschwindigkeit von 0,15 cm/s, bzw. 0,6 cm/s vermutlich von beiden, oben beschriebenen Fließsystemen beeinflusst ist. Würde nur die Fließgeschwindigkeit, der Bereiche mit konzentriertem Fließen bestimmt werde, so würde diese vermutlich in der Größenordnung, der in „soil pipes“ gemessenen, Geschwindigkeiten liegen. Dem gegenüber stehen die wesentlich geringeren Fließgeschwindigkeit, in der organischen Auflage, der feuchten Bereiche, welche durch die schwammartige Struktur der dicken Moospolster, sowie der vergleichsweise großen durchflossenen Fläche entstehen. Carey & Woo (2001) geben an, dass die Fließgeschwindigkeiten im Hang, zu Beginn der Auftauphase, höher sind als im Spätsommer, wenn der Permafrost tiefer liegt. Sie beschreiben ein Zwei-Lagen Fließsystem, bestehend aus der organischen Auflage und dem mineralischen Boden. Dabei sind die gemessenen Fließgeschwindigkeiten in der organischen Auflage höher als die in dem mineralischen Boden, da sich die Leitfähigkeiten um Größenordnungen unterscheiden. Dieses System stellt sich vermutlich auch an den feuchteren Stellen des in dieser Arbeit untersuchten Hanges ein, wenn der mineralische Boden auftaut. An den trockeneren Stellen, des untersuchten Hanges, war der Boden jedoch locker und wies viele Spalten und Rillen auf. Diese Bodenstruktur hat sich vermutlich erst nach dem Waldbrand ausgebildet, da der Boden in dem vitalen Wald vergleichbar mit dem an den feuchten Stellen war. Die beobachtete Bodenstruktur bildete sich wahrscheinlich erst durch das Absterben der Wurzeln und dem vergrößerten „active layer“ aus.

Die Beregnungsversuche mit Brilliant Blue, bestätigen das beschriebene Fließverhalten in dem Nordhang. So zeigt der Beregnungsversuch auf dem trockeneren Plot ohne Vegetation, dass das Wasser schnell präferentiell infiltrierte und sich auf dem Permafrost sammelte (vgl. Abb. A6 & A9). Auf diesem floss das Wasser mit hohen Fließgeschwindigkeiten hanglateral ab. Der Plot auf dem Bereich mit vitalen Moos- und Graspölkstern zeigte hingegen eine flächige Infiltration in die gesättigte organische Auflage (vgl. Abb. A10) und ein vergleichsweise langsames Fließen in der Arbeitsgrube.

6.3 Ganglinienanalyse

Die Ergebnisse der Isotopen- und Anionenanalysen von den im Einzugsgebiet gesammelten Wasserproben zeigten eine nur geringe Dynamik. Da die Konzentrationen der Anionen in dem Untersuchungsgebiet sehr niedrig sind und die Isotopensignatur stark durch den Höhengradienten beeinflusst ist müssen die Ergebnisse mit viel Vorsicht interpretiert werden.

Betrachtet man die Messergebnisse des Niederschlagsereignisses vom 19. Juni, so sind deutliche Sprünge in der Isotopensignatur, sowie der Nitratkonzentration, zu Beginn der Probenahme, zu erkennen (vgl. Abb. 6.11 & 6.12).

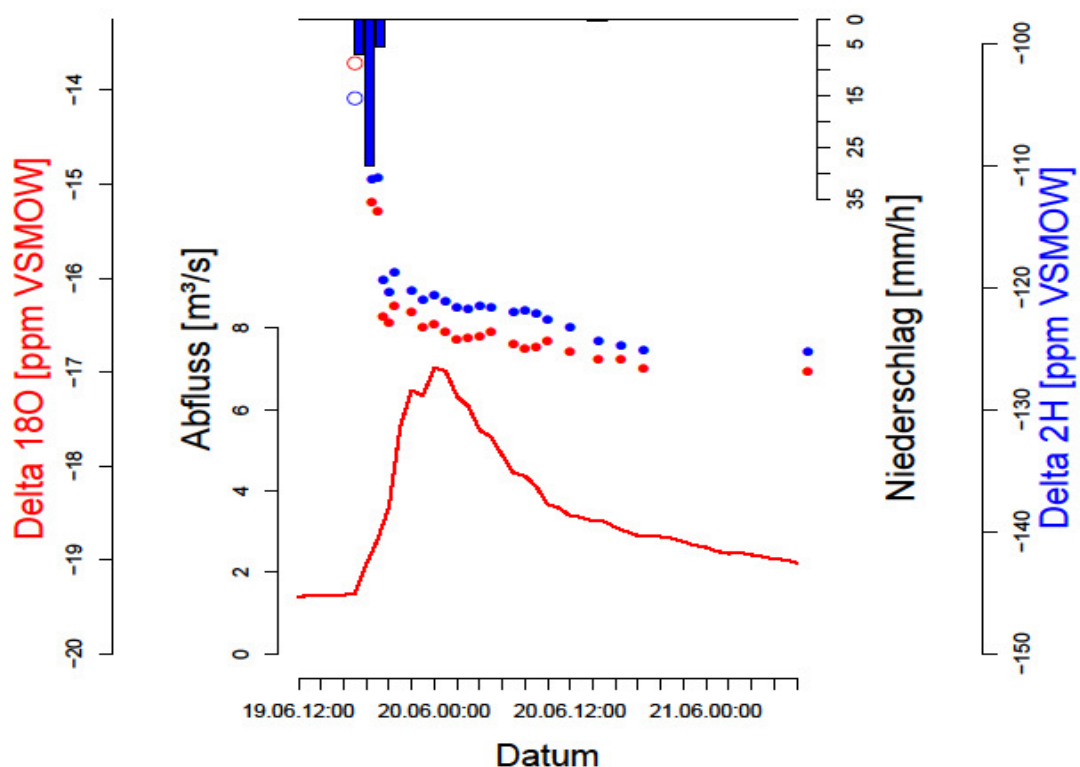


Abbildung 6.11: Abflusspeak des Bärenalmbaches und der Niederschlagsverteilung des Ereignisses vom 19. Juni, sowie die Isotopensignatur des Niederschlags (Kreise) und des Bachwassers (Punkte).

Der Sprung der Isotopensignatur von schwer nach leicht, beinhaltet vermutlich die schnellen Abflusskomponenten. Da der Niederschlag, im Vergleich zu der Signatur des Bachwassers, isotopisch schwer ist und zu der Zeit der Probenahme die Niederschlagsintensität mit fast 30 mm/h sehr hoch war, zeigt dieser Sprung vermutlich den schnellen, oberflächlichen Abfluss der Südhänge, welcher während des Ereignisses beobachtet wurde. Auch die Tatsache, dass der Abfluss einen kleinen Peak vor dem Hauptpeak aufweist, unterstützt diese Vermutung. Betrachtet man den in der Abbildung 6.12 dargestellten Verlauf der Nitratkonzentration, so fällt auf, dass die Konzentrationen ebenfalls einen deutlichen Sprung vollziehen. Dabei werden die Konzentrationen zu Beginn der Probenahme deutlich höher. Dieser Verlauf ist ein weiteres Indiz dafür, dass der Anstieg der Ganglinie stark von Oberflächenabfluss geprägt sein könnte. Da der schnelle Oberflächenabfluss, hauptsächlich von den Südhängen, einen geringen und sehr kurzen Kontakt zum Boden hat und in dieser Region keine Landwirtschaft betrieben wird, weist dieser nur geringe Nitratkonzentrationen auf. Der Abfluss der wesentlich feuchteren und flacheren Nordhänge hingegen zeigte anhand mehrerer Proben einen höheren Nitratgehalt, da das Wasser durch die Böden fließt.

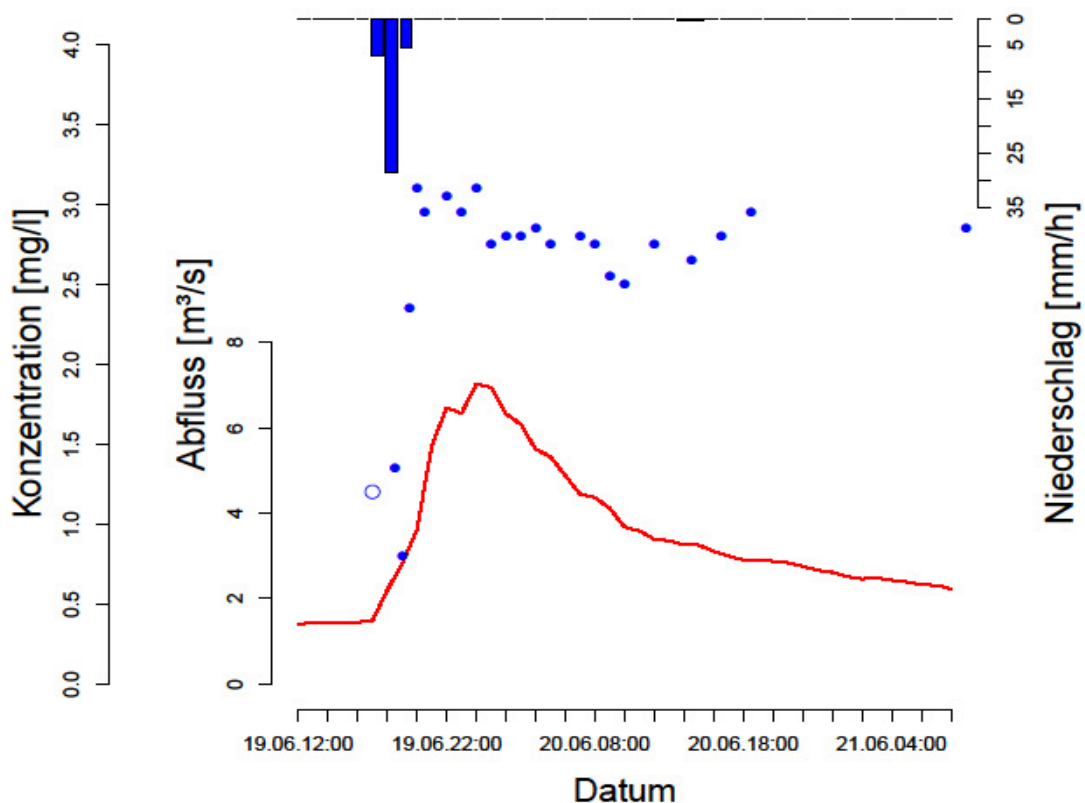


Abbildung 6.12: Darstellung des Abflusspeaks und des Niederschlags vom 19. Juni, sowie der Nitratkonzentrationen im Niederschlag (Kreis) und Bachwasser (Punkte).

Zunehmend kommt der Abflussbeitrag der Nordhänge hinzu, so dass sich die Nitratkonzentrationen erhöhen. Der weitere Verlauf der Ganglinie ist nur noch sehr spekulativ zu interpretieren, da die Proben am Gebietsauslass genommen wurden und das oberhalb liegende EZG eine Größe von 100 km² hat. Vor allem bei dem weiteren Verlauf der Isotopensignatur des Flusswassers ist ein deutlicher Höheneffekt erkennbar, da die Proben linear, isotopisch leichter werden. Der Versuch diesen Effekt durch eine Höhenkorrektur des Niederschlags zu eliminieren, erbrachte jedoch keine Verbesserung für die Verwendbarkeit der Werte. Auch die weitere Dynamik der Nitratkonzentrationen kann, aufgrund der Gebietsgröße nicht weiter interpretiert werden. Eine weitere Unsicherheit stellt die Tatsache dar, dass die ersten vier Proben unterhalb des Pegels genommen wurden. Diese Proben wurden flussaufwärts wandernd auf einer Strecke von ca. 6 km genommen, so dass ein Beitrag kleinerer EZG in dem Probewasser enthalten ist. Da sich die Topographie und Landnutzung in dieser Region kaum unterscheiden, wird der Einfluss, bezüglich der Wasserchemie und der Abflussbildungsprozesse, jedoch nur sehr gering sein.

Da das untersuchte EZG mit einer Fläche von rund 100 km² sehr groß, im Vergleich zu dem Bereich in der die „end member“ gesammelt wurden ist, ist eine Ganglinienseparation kaum möglich. Selbst wenn die „end member“ im gesamten EZG gesammelt worden wären, ist eine Ganglinienseparation bei der Einzugsgebietsgröße nicht aussagekräftig (Hoeg et al., 2000).

Der Versuch die Herkunft des Wassers in dem Hangwasserbach, durch eine Zwei-Komponenten-Separation, zu bestimmen, stellte sich als nicht möglich heraus, obwohl der Hangwasserbach unterhalb des Nordhanges, ein kleines und gut abgegrenztes EZG besitzt. Die Ionenkonzentrationen und die Isotopensignatur der Proben (vgl. Abb. 5.8) ließen sich nicht eindeutig den „end member“ Niederschlag und geschmolzenem Permafrost zuordnen. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass es eine sehr feuchte Zone am Hangfuss gibt, welche einen großen Speicher darstellt, in dem sich der Hangabfluss sammelt und sich das Hangwasser mit dem Ereigniswasser mischt. Der Verlauf der Nitratkonzentrationen, lässt jedoch einen Pistonflow-Effekt vermuten, da die Nitratkonzentrationen zu Beginn der Probenahme absinken. Dies würde bedeuten, dass altes Wasser, bestehend aus Vorereigniswasser und geschmolzenem Permafrost, aus dem feuchten Bereich durch Ereigniswasser verdrängt wurde. Da sich das Nitrat jedoch nicht konservativ verhält und sich der Gehalt durch biologische Prozesse verändern kann, ist eine quantitative Aussage nicht zu treffen. Die zunehmende Isotopensignatur der Proben im letzten Drittel der Probenserie ist auf Verdunstungseffekte, welche durch den sinkenden Abfluss und starke Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden, zurückzuführen.

Trotz der ungünstigen Voraussetzungen wurde der Versuch unternommen, eine Ganglinienseparation des Barentalbaches durch zu führen. Dabei wurden die Ergebnisse der

Proben des Niederschlagsereignisses vom 31. August verwendet, welches eine Gesamtniederschlagsmenge von 14,7 mm erbrachte. Es wurden jeweils Proben des Flusses und des Hangwassers am Nordhang, möglichst zeitnah genommen. Mit den Nitratkonzentrationen der „end member“ und des Flusswassers wurden, die Komponenten schneller Oberflächenabfluss der Südhänge (Niederschlagswasser = „end member“) und langsamer SSF der Nordhänge Hangwasser = „end member“), getrennt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich das oberflächlich fließende Wasser vergleichsweise gering mit Nitrat anreichert, während das Wasser, welches den Boden passiert höhere Nitratkonzentrationen aufweist. Das Problem, dass die Proben in einem sehr kleinen Teil des EZG gesammelt wurden und das durch die Größe des gesamten EZG ein gewisser Zeitversatz und eine starke Vermischung der Abflussprozesse im Flusswasser beinhaltet sind, muss bei der Interpretation berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Ganglinienseparation ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Betrachtet man das Ergebnis, so zeigt sich, dass der Anteil an Oberflächenabfluss zu Beginn des Ereignisses relativ gering ist. Dies könnte daran liegen, dass die Intensitäten des Ereignisses mit maximal 5,2 mm/h Stunde als eher gering zu bewerten sind. Der relativ große Anteil des, durch Oberflächenabfluss eingetragenen, Niederschlagswassers während der Rezession der Ganglinie lässt vermuten, dass diese Komponente überschätzt wird und zeigt die große Unsicherheit der Methode für große EZG. Eventuell kommt der große Anteil an Ereigniswasser dadurch zustande, dass das in der Aue gespeicherte Hangwasser zunehmend von Ereigniswasser verdünnt wird und sich so der Nitratgehalt immer mehr dem des Ereigniswassers angleicht. Das zweite Maximum der Ganglinie kommt durch ein zweites Niederschlagsereignis, am 1. September zustande, welches jedoch nur eine vergleichsweise sehr kleine Niederschlagsmenge von 0,4 mm hatte. Die Tatsache, dass dieses Ereignis einen deutlichen Einfluss auf die Abflussmenge hat, deutet daraufhin, dass die Wasserspeicher in dem EZG stark gefüllt waren und somit die geringe Wassermenge, des neuen Niederschlags zu einer erkennbaren Erhöhung des Abflusses führte. Diese Erkenntnis würde die oben beschriebene These bestärken, nach der im Laufe der Zeit zunehmend Ereigniswasser, auch von den Nordhängen, zum Abfluss gelangt.

Die Nitratkonzentration des Niederschlagsereignisses vom 1. September wurde nicht bestimmt und somit nicht bei der Ganglinienseparation berücksichtigt. Es kann jedoch von einer ähnlich geringen Nitratkonzentration, wie in dem Ereigniswasser vom 31. August, ausgegangen werden, da dies in allen gemessenen Niederschlagsproben der Fall war.

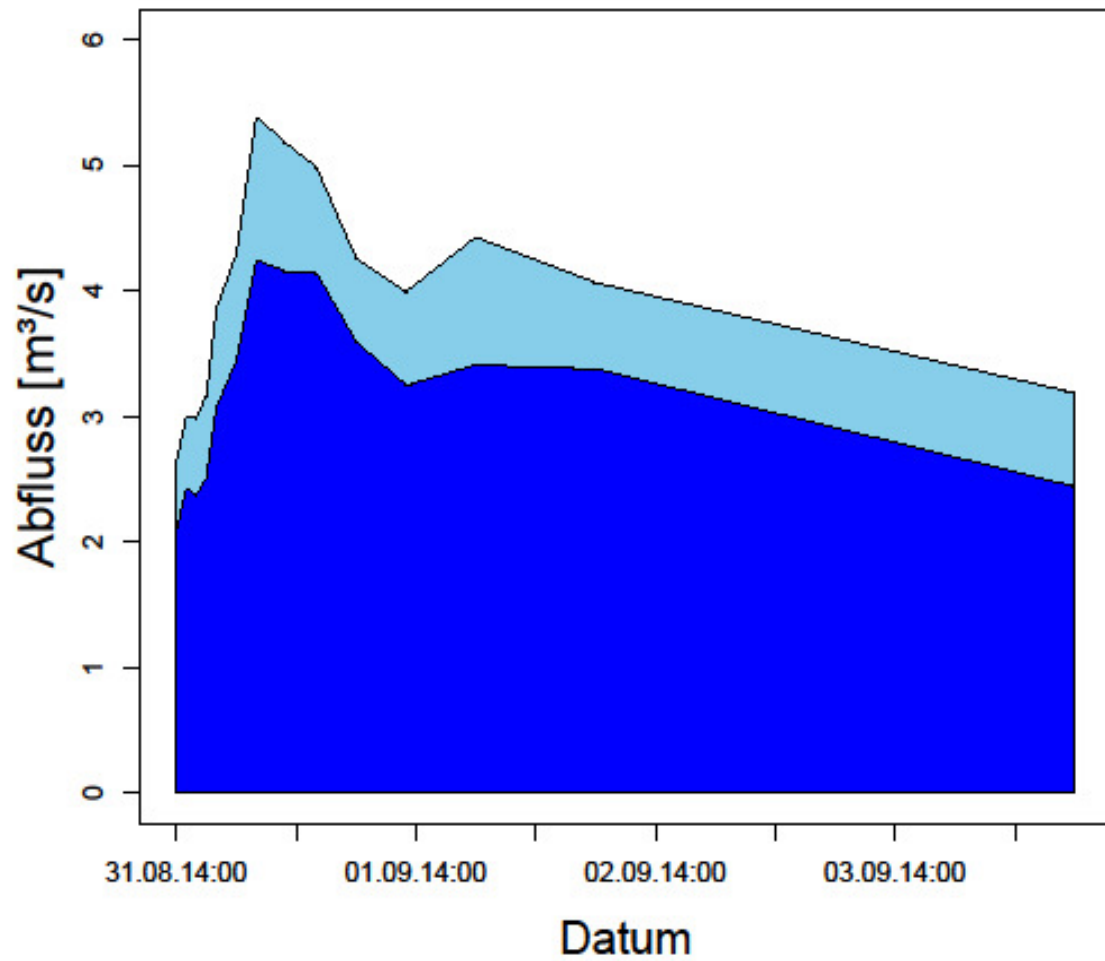


Abbildung 6.13: Ergebnis der Ganglinienseparation des Niederschlagsereignisses vom 31. August, mit dem Nitratgehalten des Niederschlags und Hangwassers als Endmember. Die hellblaue Fläche stellt den Oberflächenabfluss und die dunkelblaue Fläche den SSF dar.

7 Zusammenfassung

Die Ziele der Forschungsarbeit in dem Untersuchungsgebiet waren der Nachweis von Oberflächenabfluss an den steilen und unbewaldeten Südhängen, die Charakterisierung des Interflow auf dem Permafrost der Nordhänge, sowie die Trennung der Abflusskomponenten. Als Methoden wurden Tracerversuche und eine Zwei-Komponenten-Separation, mittels Hapitionen und stabiler Isotope des Wassers, Deuterium und ^{18}O , angewendet. Durch vorangegangene Forschungsarbeiten der Universität Heidelberg war das Untersuchungsgebiet bereits bekannt. Diese dienten als Grundlage für die Definierung der Forschungsziele und Arbeitshypothesen zur Erfassung der relevanten abflussgenerierenden Prozesse im Rahmen der vorgestellten Masterarbeit.

Durch Tracerversuche mit Naphthionat, das auf der Bodenoberfläche von zwei Südhängen ausgebracht und mittels Adsorptionssonden an den Unterhängen wieder aufgefangen wurde, konnte der Oberflächenabfluss nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass während einer Expositionsdauer von bis zu 66 Tagen, das Naphthionat an beiden Hängen bis zu den untersten Adsorptionssonden transportiert worden ist. An den adsorbierten Tracermengen ließ sich erkennen, dass der Oberflächenabfluss nicht flächig abfloss, sondern sich, durch die Mikrotopographie bedingt, in kleineren Gerinnen konzentrierte („rillflow“). Beregnungsversuche mit Brilliant Blue bestätigten das Ergebnis zusätzlich durch eine sehr geringe Infiltrationstiefe und dem Fehlen von präferentiellen Fließwege entlang von Wurzeln, Steinen oder Tiergängen. Es konnte während der Beregnung Hydrophobie des Bodens beobachtet werden.

Die Nordhänge sind typischerweise von Gebirgstaiga bedeckt. Im Untersuchungsgebiet existieren nach einem Waldbrand im Jahr 2010, neben den intakten Wäldern, auch stark verbrannte Bereiche mit zum Teil nachhaltig zerstörter Vegetation. So gab es Bereiche, an denen der Boden von einem Filz aus abgestorbenen Wurzeln bedeckt war und darunter der Permafrost in einer Tiefe von ca. 40 bis 60 cm anstand. Die Bereiche mit vitaler Bodenvegetation hingegen waren von dicken Moospolstern bedeckt. Der Permafrost stand dort zur Zeit der Untersuchungen (Ende Juni 2012) direkt unter der organischen Auflage in einer Tiefe von weniger als 20 cm an. Die Fließprozesse in den beiden Bereichen unterscheiden sich grundlegend. Während das Wasser an den Stellen mit verbrannter Vegetation schnell, bis auf den Permafrost infiltrierte und auf diesem konzentriert hanglateral abfloss, war an den Stellen mit vitaler Vegetation ein gesättigter Matrixfluss in den Moospolstern zu beobachten. An Stellen ohne Vegetation war mancherorts oberflächiges Fließen in kleinen Gerinnen erkennbar.

Um die Fließgeschwindigkeiten des Hangwassers auf dem Permafrost zu untersuchen wurden, im verbrannten Wald, die künstlichen Tracer Uranin und Naphthionat in das

Hangwasser eingespeist. 54,6 m tiefer und an einem kleinen Bach am Hangfuss, der nur wenige Tage nach großen Niederschlagsereignissen Wasser führte, wurden Wasserproben genommen. Aufgrund der geringen Einspeisemengen konnte jedoch kein Tracer am Hangwasserbach nachgewiesen werden. Der Uranindurchgang, der an der Probenahmestelle am Hang genommenen Proben, konnte, wegen zu starker Sorption, nicht für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten verwendet werden. Die Fließgeschwindigkeit des Hangwassers konnte mittels des Naphthionatdurchgangs bestimmt werden. Vermutlich setzt sich die bestimmte Fließgeschwindigkeit von 0,15 cm/s bzw. 0,60 cm/s aus Fließprozessen der beiden Bereiche zusammen, da der untersuchte Hangabschnitt sowohl vitale, als auch verbrannte Vegetation aufwies.

Das Ziel, die Komponenten des Abflusses nach Starkniederschlägen, zu trennen, konnte nur teilweise erreicht werden. Es stellte sich heraus, dass das EZG für die Anwendung einer Ganglinienseparation mit 100 km² zu groß ist. Des Weiteren konnten, durch fehlende Infrastruktur und einem engen Zeitrahmen, nur in einem kleinen Teil des EZG Proben der „end member“ gesammelt werden. Als Grundlage für eine Zweikomponenten-Separation wurden Wasserproben des Bärenalbaches, des Hangwassers, des Niederschlags und des Permafrostes gesammelt und später im Labor auf ihren Gehalt an Haptionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) sowie den stabilen Isotopen Deuterium und ¹⁸O analysiert. Durch die großen Höhenunterschiede in dem EZG von rund 1200 m, kommt es zu einem ausgeprägten Höheneffekt, der die Verwendung der stabilen Isotope nahezu unmöglich macht. Die Konzentrationen der Haptionen waren insgesamt sehr gering, lediglich die Gehalte in dem Permafrost waren etwas höher.

Trotz der ungünstigen Bedingungen wurde der Versuch unternommen mittels einer Ganglinienseparation die Komponenten Hangwasser der Nordhänge und Direktabfluss zu trennen. Als „end member“ dieser Separation wurden die Nitratgehalte des Niederschlags und des Hangwassers verwendet. Es zeigte sich jedoch, dass der Anteil an Direktabfluss, vor allem während der Rezession der Ganglinie, überschätzt wurde.

Durch die Interpretation der Ganglinie und der Isotopensignatur des Niederschlags und des Bärenalbaches, während eines starken Niederschlagsereignisses, konnte die Komponente des schnellen Oberflächenabflusses der Südhänge qualitativ erkannt werden.

Die Permafrostkomponente konnte nicht wie erwartet von dem Gesamtabfluss getrennt werden. Selbst der Versuch den Anteil des geschmolzenen Permafrostes in dem Wasser eines kleinen ephemeren Baches, am Hangfuss des Nordhanges, zu bestimmen, erbrachte kein befriedigendes Ergebnis. Aufgrund einer sehr feuchten und zu dieser Zeit stark gesättigten Zone zwischen dem Hangfuss und dem Bach, wurde das Hangwasser stark mit Vorereigniswasser vermischt. Des Weiteren unterliegen die Anionen, durch die lange Verweilzeit in diesem Bereich, mikrobiellen Abbauprozessen, so dass diese keine konservativen Tracer darstellen.

Die Abbildung 7.1 zeigt ein Querschnitt durch den untersuchten Teil des EZG. Auf der linken Seite ist der Südhang mit den trockenen Böden dargestellt, auf dem es bei Starkniederschlägen zu Oberflächenabfluss kommt. Die rechte Seite zeigt den Nordhang mit teils verbrannter und teils vitaler Bodenvegetation. Das Wasser fließt auf dem Permafrost hanglateral ab, wobei es durch hoch anstehenden Permafrost oder andere Hindernisse stellenweise wieder an der Oberfläche austritt. Am Hangfuss befindet sich die gesättigte Zone mit dem Hangwasserbach. In der Aue fließt der, das Gebiet entwässernde, Barentalbach.

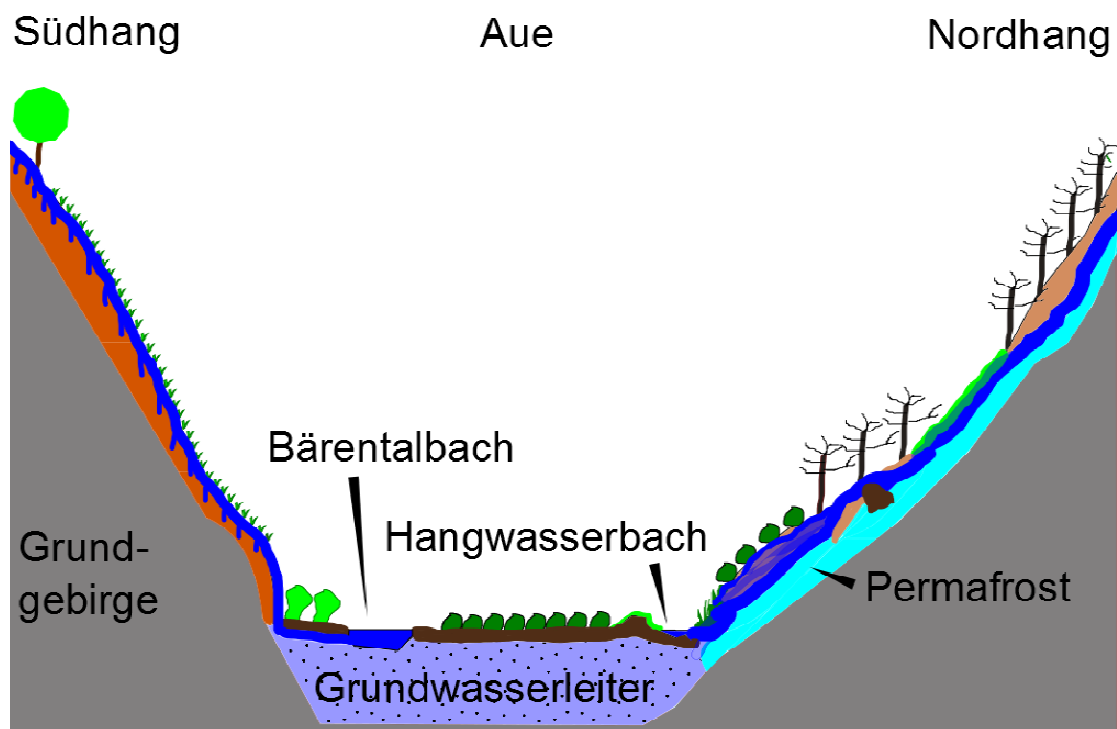


Abbildung 7.1: Schematischer Querschnitt des untersuchten Teils des Barentals, mit den dominierenden Fließwegen nach Starkniederschlägen (Südhang - links, Nordhang mit verbranntem Wald - rechts).

Literaturverzeichnis

Abu-Awwad, A. M. & Shatanawi, M. R., 1997. Water harvesting and infiltration in arid areas affected by surface crust: examples from Jordan. *Journal of Arid Environments*, Issue 37, pp. 443-452.

Anderson, A., Weiler, M., Alila, Y. & Hudson, R., 2009. Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow. *Water Resources Research*, Issue 45, pp. W11407, doi:10.1029/2008WR007121, 2009.

Anon., kein Datum *Momo-Project*. [Online]
Available at: www.iwrm-momo.de/index.php?id=6&L=19
[Zugriff am 8 November 2012].

Blum, S., 2009. *Quantifizierung von Regenwurmkanälen, Regenwurmfauna und Bioturbation in einem Auenboden..* Freiburg: s.n.

Bogner, C. et al., 2010. Investigating flow mechanisms in a forest soil by mixed-effects modelling. *European Journal of Soil Science*, Issue 61, pp. 1079-1090.

Carey, S. & Debeer, C., 2008. *Rainfall - Runoff Hydrograph Characteristics in a Discontinuous Permafrost watershed and their relation to ground thaw*. s.l., s.n., pp. 233-238.

Carey, S. K. & Quinton, W. L., 2005. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpin catchment. *Hydrological Processes*, Issue 19, pp. 95-114.

Carey, S. K. & Woo, M.-K., 2000. The role of soil pipes as a slope runoff mechanism, Subarctic Yukon, Canada. *Juornal of Hydrology*, Issue 233, pp. 206-222.

Carey, S. K. & Woo, M.-k., 2001. Slope runoff processes and flow generation in an subarctic, subalpine catchment. *Journal of Hydrology*, Issue 253, pp. 110 - 129.

Church, M., 1974. *Hydrology and Permafrost with reference to northern North America*. Ottawa: s.n.

Didszun, J., 2000. *Abflussbildung an Hängen. Diplomarbeit*. Freiburg: s.n.

Dingman, S. L., 1973. *Effects of permafrost on stream flow characteristics in the discontinuous permafrost zone of central Alaska*. Washington, DC, National Academy of Sciences, pp. 447-453.

Dingman, S. L., 1975. *Hydrologic effects of frozen ground*. s.l.:s.n.

- Doerr, S. H. & Thomas, A. D., 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soil in Portugal. *Journal of Hydrology*, Issue 231-232, pp. 134-147.
- Feyen, H., Wunderli, H., Wydler, H. & Papritz, A., 1999. A tracer experiment to study flow paths of water in a forest soil. *Journal of Hydrology*, Issue 225, pp. 155-167.
- Henle, W. et al., 2007. Hydrophobe Böden, Local Dry Spots (LDS) und die Bekämpfung mit Wetting Agents. *Rasen-Turf-Gazon*, Issue 4.
- Hoeg, S., Uhlenbrook, S. & Leibundgut, C., 2000. Hydrograph separation in a mountainous catchment - combining hydrochemical and isotopic tracer. *Hydrological Processes*, Issue 14, pp. 1199-1216.
- Hooper, R. P. & Shoemaker, C. A., 1986. A Comparison of Chemical and Isotopic Hydrograph Separation. *Water Resources Research*, 10(22), pp. 1444-1454.
- Hümann, Schüler & Müller, 2011. Identification of runoff processes – The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology*, Issue 409, pp. 637-649.
- Ishikawa, M. et al., 2005. Ground thermal and moisture conditions at the southern boundary of discontinuous permafrost, Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes*, Issue 16, pp. 209-216.
- Kasischke, E. S. & Johnstone, J. F., 2005. Variation in post-fire organic layer thickness in a black spruce forest complex in Interior Alaska and its effects on soil temperature and moisture. *Canadian Journal of Forest Research*, Issue 35, pp. 2164-2177.
- Kemmling, A., 2010. *Analyse des Vorkommens, der Morphologie und der genetischen Diversität von Biologischen Bodenkrusten extrazonaler Gebirgssteppenstandorte der nördlichen Mongolei*. Göttingen: s.n.
- Kopp, B. & Menzel, L., 2012. *Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsgebiet zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei - Teil 2: Abfluss und Bodenfeuchte*. Freiburg: Geographisches Institut/Abteilung Physiogeographie, Universität Heidelberg.
- Kopp, B. & Menzel, L., 2012. *Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsgebiet zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei - Teil 2: Abfluss und Bodenfeuchte*. Freiburg: Geographisches Institut/Abteilung Physiogeographie, Universität Heidelberg.
- Lange, J., 1999. Runoff generation in Mediterranean areas. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 9.

- Lewkowicz, A. G. & French, H. M., 1982. *Downslope water movement and solute concentration within the active layer, Banks Island*. Calgary, Alberta, National Research Council of Canada, s.n., pp. 163 -172.
- McNamara, J. P., Kane, D. L. & Hinzman, L. D., 1998. An analysis of streamflow hydrology in the Kuparuk River basin, Arctic Alaska: A nested watershed approach. *Juornal of Hydrology*, Issue 206, pp. 39-57.
- Menzel, L., Hofmann, J. & Ibisch, R., 2011. Untersuchung von Wasser- und Stoffflüssen als Grundlage für ein Integriertes Wasserressourcen-Management im Kharaa-Einzugsgebiet, Mongolei. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Issue 55. Jahrgang, Heft 2, pp. 88-103.
- Mikovari, A., Peter, C. & Leibundgut, C., 1995. Investigation of preferntial flow using tracer techniques. *IAHS Publications*, Issue 229, pp. 87-97.
- Minderlein & Kopp, 2012. [Interview] (Oktober 2012).
- Minderlein, S. & Menzel, L., 2012. *Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsbereich zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei - Teil 1: Evapotranpiration und Energiebilanz*. Freiburg: Geographisches Institut/Abteilung Physiogeographie, Universität Heidelberg.
- Miyata, S. et al., 2010. Spatial pattern of infiltration rate and its effect on hydrological processes in a small headwater catchment. *Hydrological Processes*, Issue 24, pp. 535-549.
- Mosley, M., 1982. Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology*, Issue 55, pp. 65-92.
- Nyberg, L., Rodhe, A. & Bishop, K., 1999. Water transit times and flow paths from two line injections of ^3H and ^{36}Cl in a microcatchment at Gardsjön, Sweden. *Hydrological Processes*, Issue 13, pp. 1557-1575.
- Picarro Inc. Sunnyvale, CA, kein Datum *Simple, real-time mesurement of stable isotope ratios in H_2O and CO_2* . s.l.:s.n.
- Quinton, W. L., Bemrose, R. K., Zhang, Y. & Carey, S. K., 2009. The influence of spatial variability in snowmelt and active layer thaw on the hillslope drainage for an alpine tundra hillslope. *Hydrological Prozesses*, Issue 23, pp. 2628-2639.
- Quinton, W. L., Gray, D. M. & Marsh, P., 2000. Subsurface drainage from hummock-covered hillslope in Arctic tundra. *Juornal of Hydrology*, Issue 237, pp. 113-125.
- Quinton, W. L. & Marsh, P., 1999. A conceptual framework for runoff generation in a permafrost environment. *Hydrological Processes*, Issue 13, pp. 2563-2581.

- Robichaud, P., 1998. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountains forests, USA. *Journal of Hydrology*, Issue 231, pp. 220-229.
- Schudel, B. et al., 2002. *Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie*, Bern: Arbeitsgruppe der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie SGH.
- Scott, D. & Van Wyk, D., 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of Hydrology*, Issue 121, pp. 239-256.
- Shakesby, R. A. et al., 2003. Fire Severity, Water Repellency Characteristics and Hydrogeomorphological Changes Following the Christmas 2001 Sydney Forest Fires. *Australian Geographer*, 2(34), pp. 147-175.
- Sheridan, G. J., Lane, P. J. & Noske, P. J., 2007. Quantification of hillslope runoff and erosion processes before and after a wildfire in a wet Eucalyptus forest. *Journal of Hydrology*, Issue 343, pp. 12-28.
- Sklash, M. G. & Farvolden, R. N., 1979. The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, Issue 43, pp. 45-65.
- Slaughter, C. W. & Kane, D. L., 1979. *Hydrologic role of shallow organic soils in cold climates*. Canada, Ottawa, National Research Council of Canada, pp. 380-389.
- Steinmann, A., 2010. *Runoff generation in Mediterranean areas. Dissertation for the Degree of Natural Sciences*. Freiburg: s.n.
- Tanaka, T., 1992. Stormflow runoff processes in a small forested drainage basin. *Environmental. Geology and Water Sciences*, Issue 19, pp. 179-191.
- Tanaka, Y., Matsukura, Y., Batnasan, N. & Tuvshinjargal, D., 2005. Distinct runoff processes in granite and sandstone drainage basins near Ulaanbaatar, Mongolia. *Environmental Geology*, Issue 47, pp. 640-646.
- Toride, N., Leij, F. J. & van Genuchten, M. T., 1995. *The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments*, California, USA: U.S. Salinity Laboratory Agriculture Research Service; U.S. Department of Agriculture Riverside.
- Varela, M. E., Benito, E. & de Blas, E., 2005. Impact of wildfire on surface water repellency in soils of northwest Spain. *Hydrological Processes*, Issue 19, p. 3649-3657.
- Weiler, M., 1997. *Untersuchung zur Abflussbildung an Hängen mit Tracerversuchen und numerischer Modellierung der Wasserbewegung. Diplomarbeit*. Freiburg: s.n.
- Weiler, M. & Flühler, H., 2004. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, Issue 120, pp. 137-153.

- Weiler, M., Naef, F. & Leibundgut, C., 1998. Study of runoff generation on hillslopes using tracer experiments and a physically based numerical model. *IAHS Publications*, Band 248, pp. 353-360.
- Wernli, 2011. *Einführung in die Tracerhydrologie*. Bern: s.n.
- Wienhöfer, J. et al., 2009. Applied tracers for the observation of subsurface stormflow at the hillslope scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, Issue 13, pp. 1145-1161.
- Wondzell, S. M. & King, J. G., 2003. Postfire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions. *Forest Ecology and Management*, Issue 178, pp. 75-87.
- Woo, M.-k., 1986. *Permafrost hydrology in North America*. s.l.:s.n.
- Woo, M.-K., Kane, D. L., Carey, S. K. & Yang, D., 2008. Progress in Permafrost Hydrology in the New Millennium. *Permafrost and Periglacial Processes*, Issue 19, pp. 237-254.
- Woo, M.-k. & Steer, P., 1982. Occurrence of surface flow on Artic slopes, southwestern Cornwallis Island. *Canadian Juornal of Earth Sciences*, Issue 19, pp. 2368-2377.
- Wyss, D., 2007. *Waldmanagement in der Mongolei. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat.* Berlin: s.n.
- Yoshikawa, K. et al., 2003. Impacts of wildfire on the permafrost in the boreal forests of Interior Alaska. *Journal of geophysical research*, Issue 108, pp. NO. D1, 8148, doi:10.1029/2001JD000438, 2003.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Freiburg, den 18. Januar 2013

Anhang

7.1 Brilliant Blue-Plot Nr. 1



Abbildung A1: Typisches Infiltrationsmuster am Südhang S1 unterhalb der Bodenfeuchtemesstelle.



Abbildung A2: Nahaufnahme eines Ausschnitts aus dem oben gezeigten Profil. Es ist zu erkennen, dass das Wasser kaum tiefer als 5 cm infiltrierte.

7.2 Brilliant Blue-Plot Nr. 2



Abbildung A3: Nahaufnahme einer Rharbarberwurzel. Es ist auffällig, dass es zu keiner tieferen Infiltration entlang der Wurzel kommt.

7.3 Brilliant Blue-Plot Nr. 3



Abbildung A4: Skelettreiches Bodenprofil mit flachem Infiltrationsmuster am Südhang S2.



Abbildung A5: Ausschnitt eines Bodenprofils, mit einer erkennbar flachen Infiltrationsfront und dem Fehlen von präferentiellen Fließwegen an der Grenzfläche zwischen den großen Steinen und dem Boden.

7.4 Brilliant Blue-Plot Nr. 4



Abbildung A6: Aufgegrabenes Profil des Brilliant Blue Plots Nr. 4 am Nordhang.



Abbildung A7: An der Grenze zwischen der Organischen Auflage und dem skelettreichen Boden sind deutlich die präferentiellen Fließwege zu erkennen.



Abbildung A8: Abgeschählter Wurzelfilztepich nach der Beregnung mit Brilliant Blue.



Abbildung A9: Blick in die Arbeitsmulde vor dem Bodenprofil. Auf dem Permafrost fließt das gelöste Brilliant Blue hanglateral ab.

7.5 Brilliant Blue-Plot Nr. 5



Abbildung A10: Profil des Brilliant Blue-Plots Nr. 5. Das Wasser sammelt sich auf dem sehr hochliegenden Permafrost und fließt unterhalb der organischen Auflage hanglateral ab.

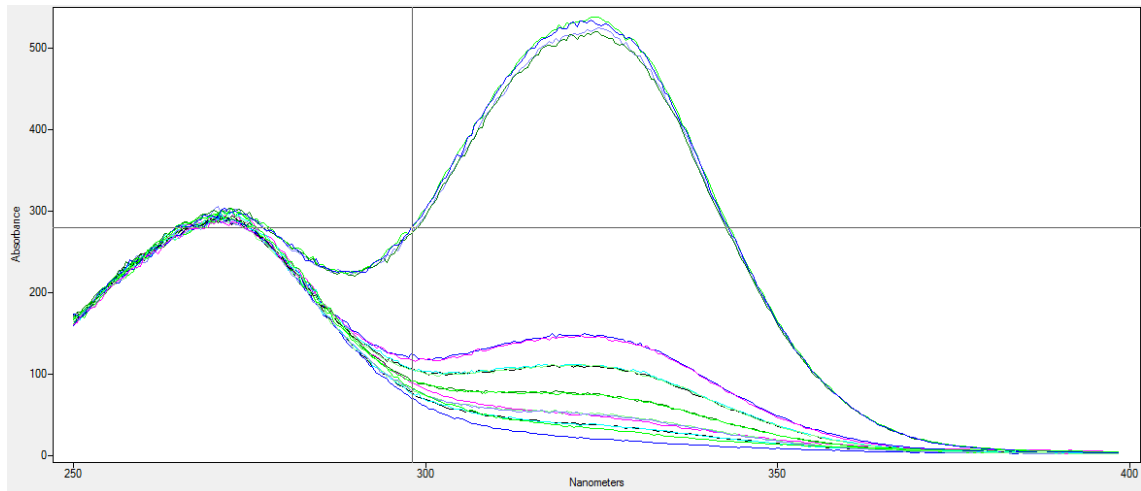


Abbildung A11: Profil mit dem bis auf den Permafrost reichenden, gesättigten Moospolster. Das Brilliant Blue infiltriert flächig und sammelt sich auf dem gefrorenen Boden.

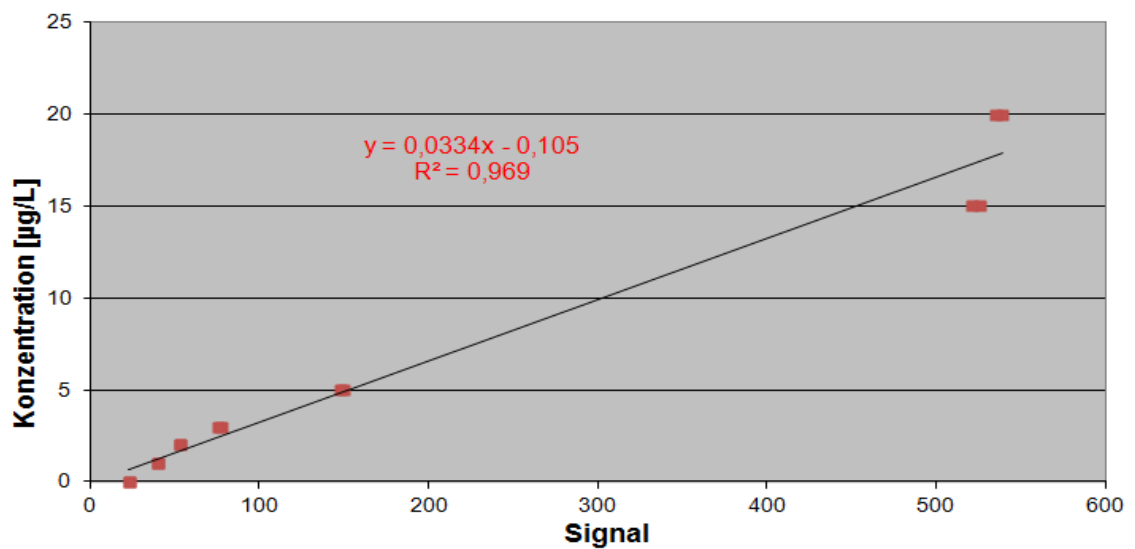


Abbildung A12: Eislinse im gefroren Boden unter dem gesättigtem Moospolstern.

7.6 Kalibrierung der Naphthionatbestimmung (Oberflächenabfluss)

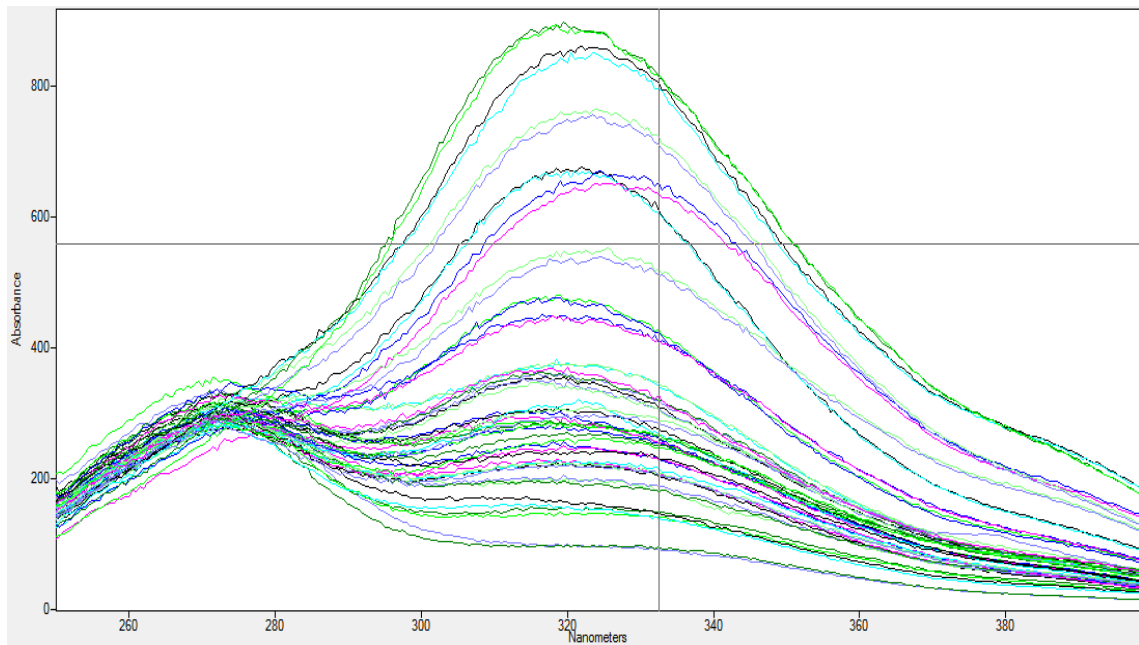


Spektren der Kalibrierstandards für die Naphthionatmessungen zum Nachweis des Oberflächenabflusses. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge [nm] und auf der y-Achse die Fluoreszenz aufgetragen.

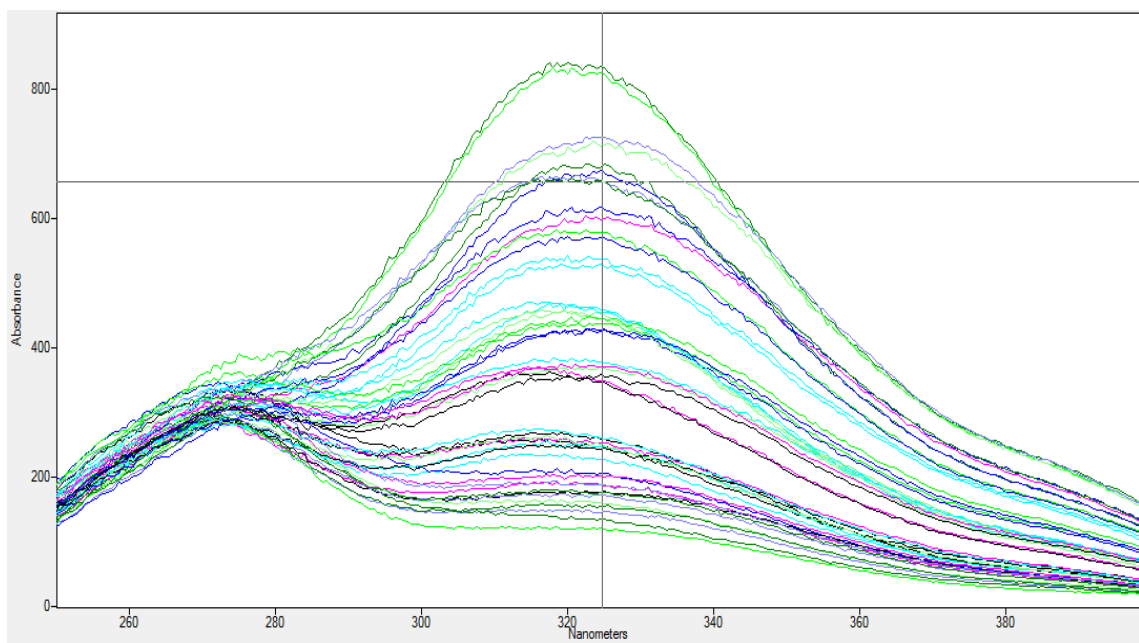


Mittels der Maxima der Spektren und den bekannten Naphthionatkonzentrationen erstellte Kalibriergerade, zur Bestimmung der Gehalte in den Teeeiern.

7.7 Spektren der Naphthionatbestimmung (Oberflächenabfluss)

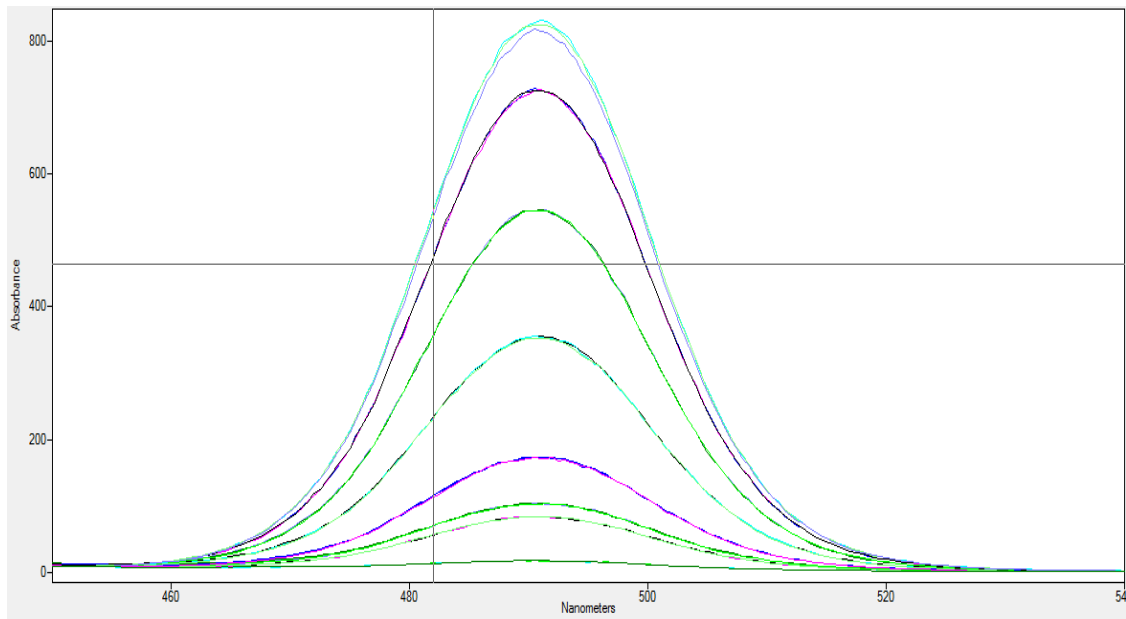


Gemessenen Spektren der Elutionslösungen aus den Teeeiern des Südhangs S1.

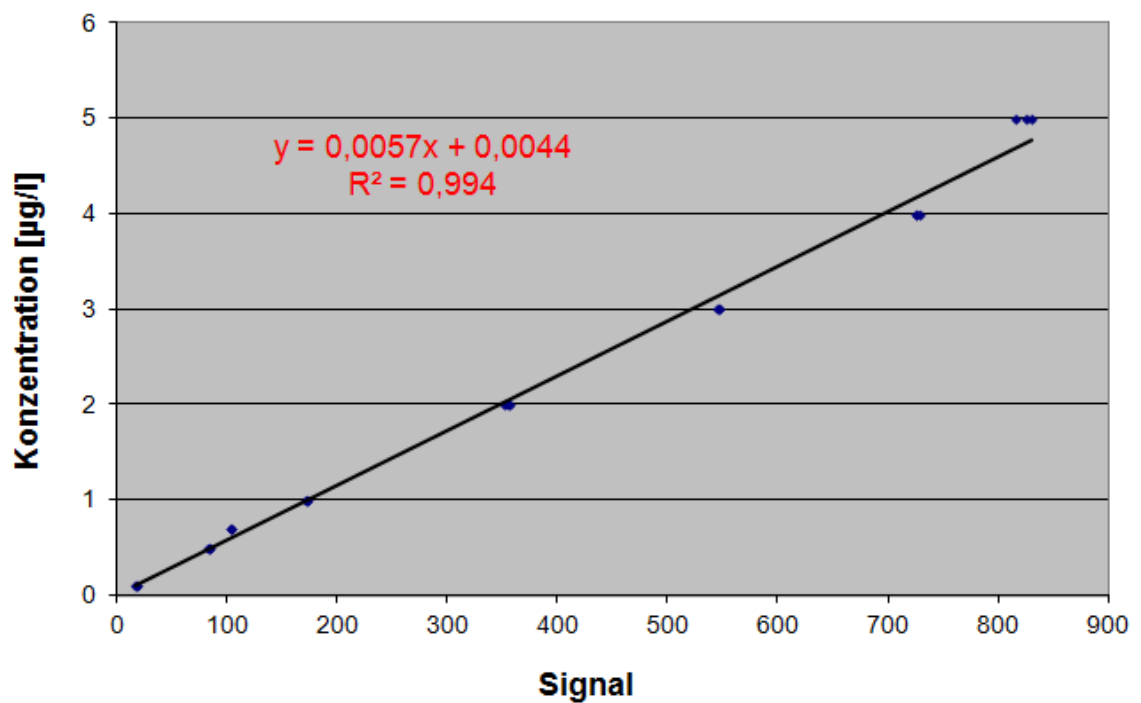


Spektren der Elutionslösungen des Südhangs S2.

7.8 Kalibrierung des Uranins (Hangwasserexperiment)

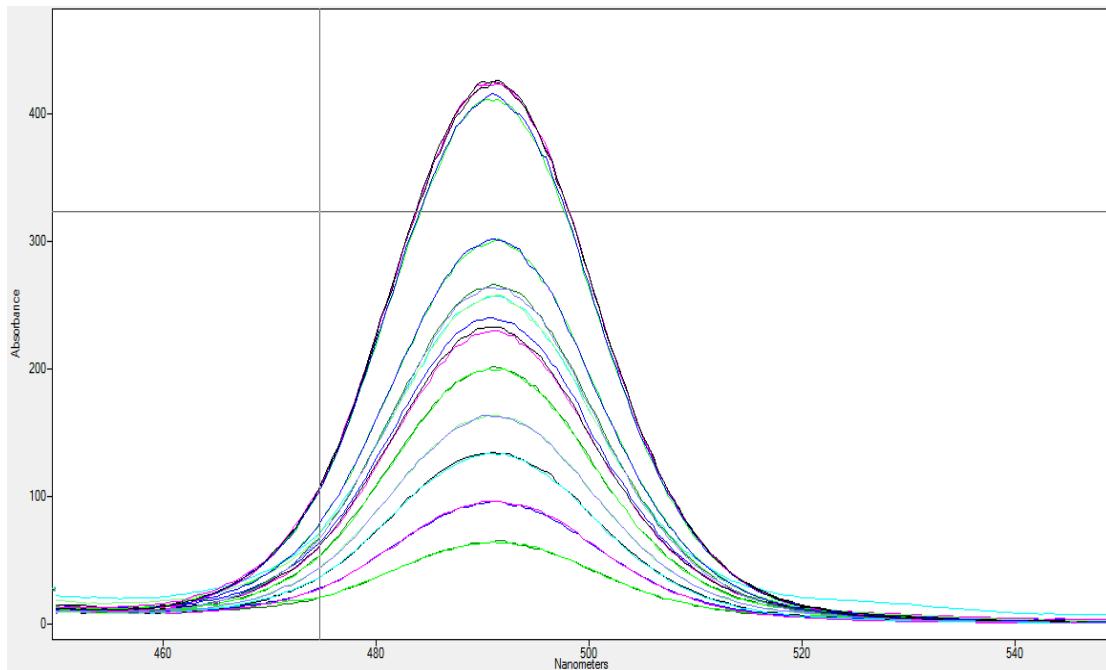


Spektren der Uranin-Standards für die Bestimmung des Uraningehaltes in den Hangwasserproben von dem Nordhang.

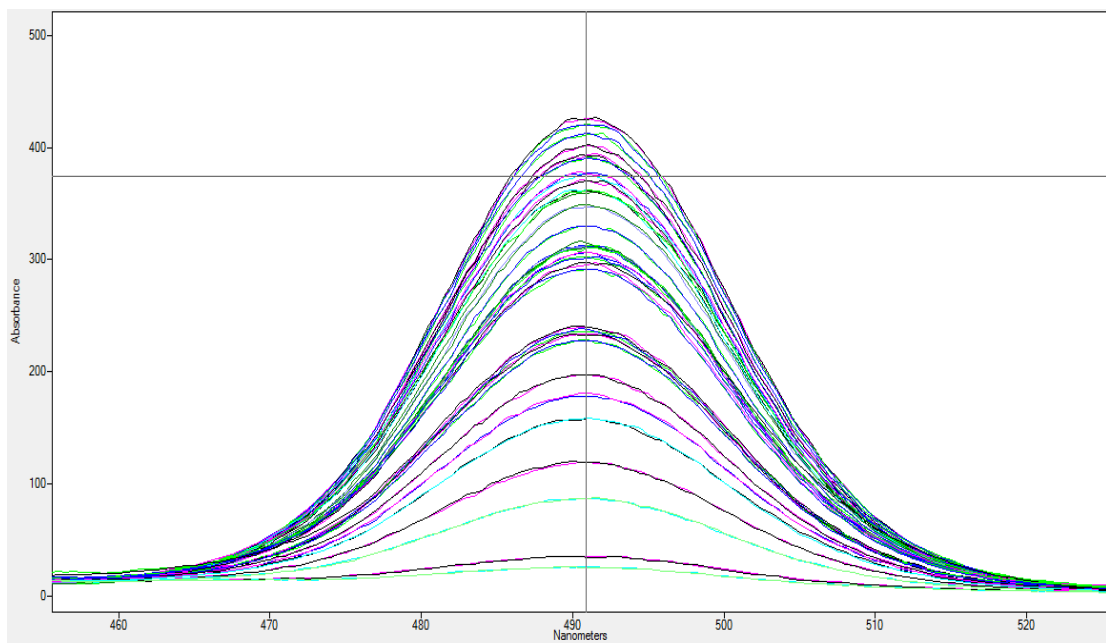


Verwendete Kalibriergerade zur Bestimmung der Uraninkonzentration in den Wasserproben des Nordhanges.

7.9 Spektren des Uranindurchgangs

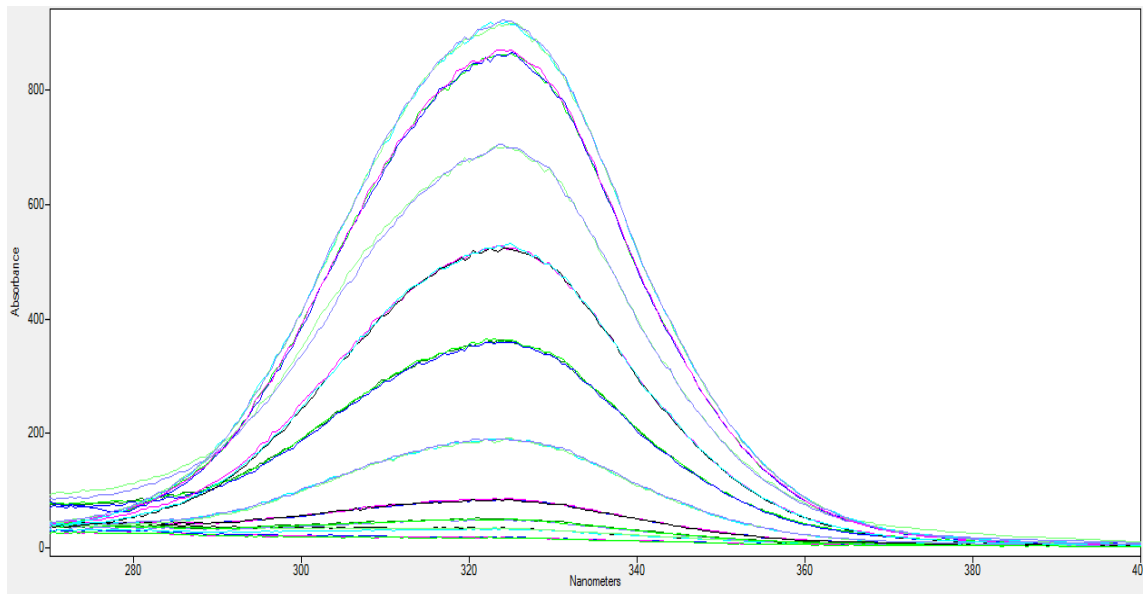


Spektren des aufsteigenden Astes des Uranindurchgangs.

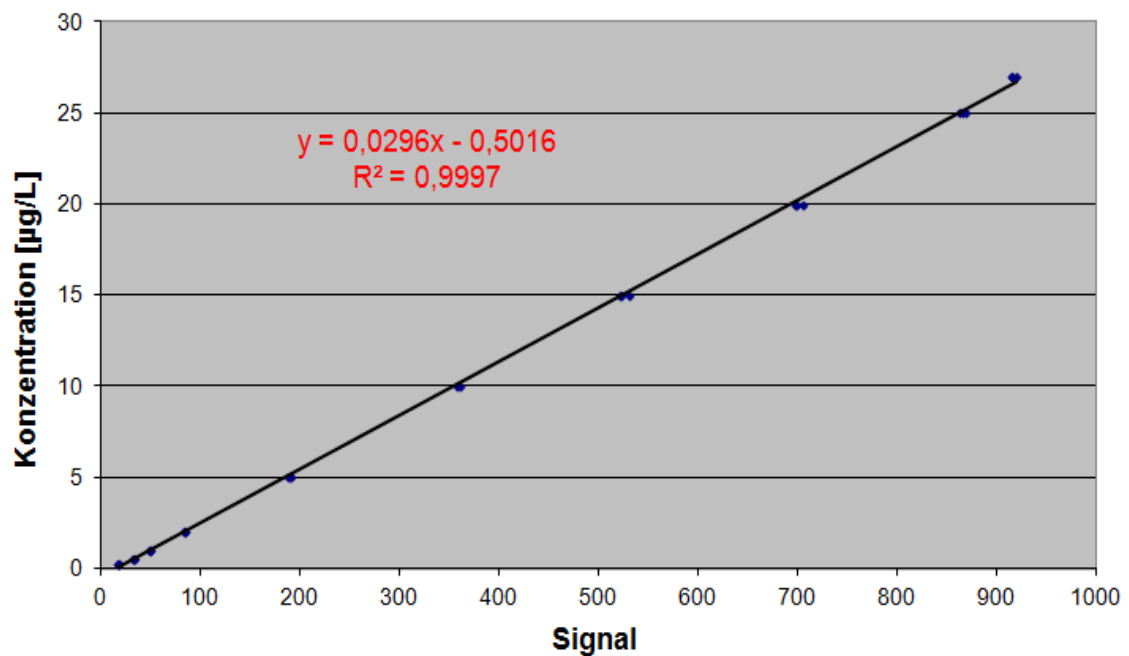


Spektren der Rezession des Uranindurchgangs.

7.10 Kalibrierung des Naphthionats (Hangwassereperiment)

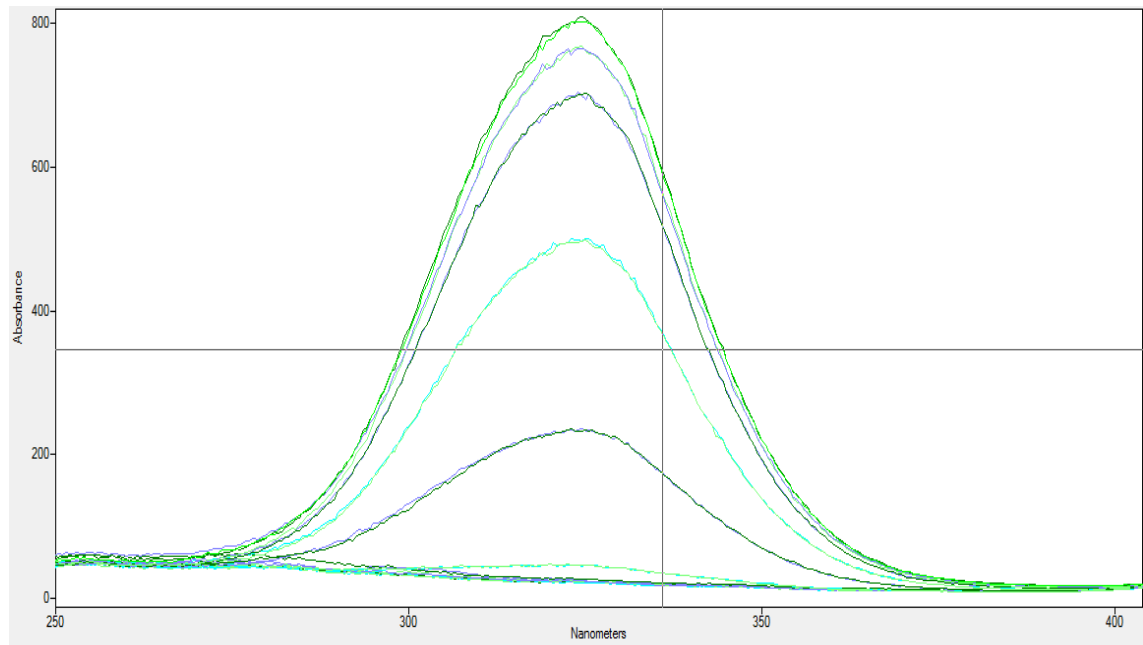


Spektren der Naphthionat-Kalibrierung, zur Bestimmung des Naphthionatgehaltes in dem Wasser des Nordhanges.

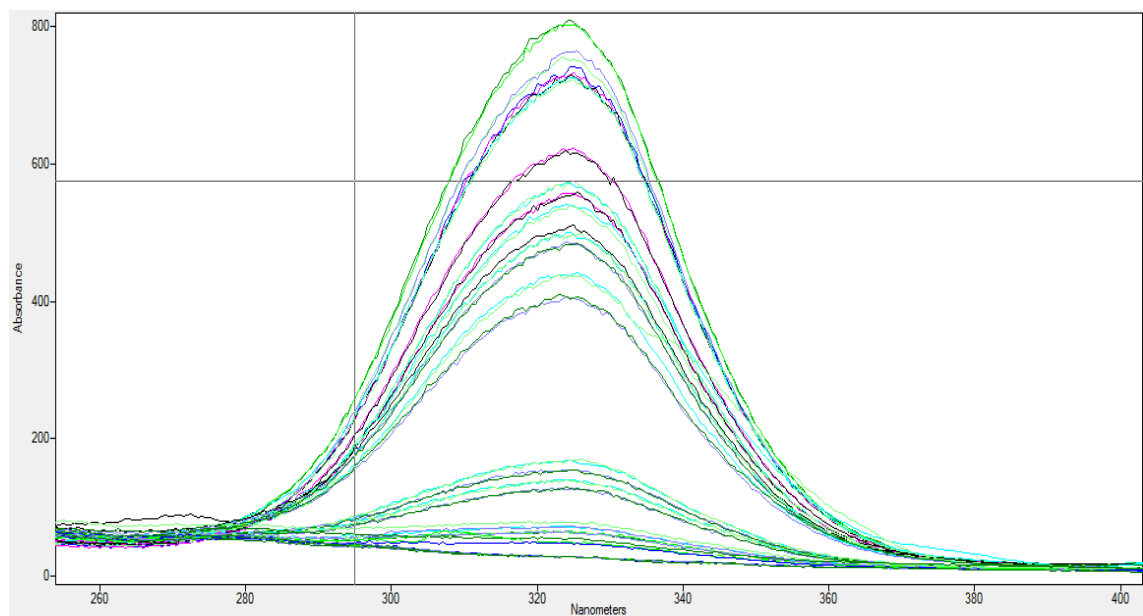


Mittels der Spektren aus Abb. A 9 erstellte Kalibriergerade.

7.11 Spektren des Naphthionatdurchgangs



Spektren der Konzentrationanstiegs des Naphthionatdurchgangs.



Absteigender Ast der Durchgangskurve.

7.12 Finale Parameter, des Durchgangskurvenanpassung mit dem CXTFIT-Modells

RSquare for regression of observed vs predicted = .95446670

(Coefficient of determination)

Mean square for error (MSE) = .3414E+05

Non-linear least squares analysis, final results

=====

95% Confidence limits

Name	Value	S.E.Coeff.	T-Value	Lower	Upper
V....	.3599E+00	.6805E+00	.5288E+00	-.1042E+01	.1762E+01
D....	.3914E-02	.5181E+00	.7554E-02	-.1063E+01	.1071E+01
beta.	.7992E+00	.3425E+00	.2333E+01	.9373E-01	.1505E+01

Parameter und Einheiten:

v: mittlere Porenwassergeschwindigkeit [m/min.]

D: Dispersionskoeffizient [m²/min.]

β: dimensionslose Variabele [-]

ω: dimensionsloser Massenübertragungskoeffizient [-]