

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone Beobachtung - Messung – Modellierung

Band 213 - Wien 2009

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Band 213

Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone

Beobachtung – Messung – Modellierung

Robert Kirnbauer, Peter Haas, Peter Chiffard
Nils Tilch, Birgit Zillgens, Margret Johst, Renate Steidl

Herausgeber:
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien

TU
WIEN



Ingenieurhydrologie und
Wassermengenwirtschaft

Abteilung für Ingenieurhydrologie und Wassermengenwirtschaft
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien, AUSTRIA
<http://www.hydro.tuwien.ac.at>

Abschlussbericht 1990 - 2008

Druck: Riegelnik
Piaristengasse 19
1080 Wien

ISBN: 978-3-85234-105-7

Vorwort

Zu Beginn gilt es den geistigen Vätern der vielfältigen Untersuchungen rund um das Einzugsgebiet des Löhnersbaches zu danken, in erster Linie sind dies Hofrat Dipl.-Ing. Gustav Üblagger, Prof. Dr. Dieter Gutknecht und Dr. Herbert Pirkl.



Foto 1: Die geistigen Väter der vielfältigen Untersuchungen rund um das Einzugsgebiet des Löhnersbaches (von links nach rechts: Gustav Üblagger, Dieter Gutknecht und Herbert Pirkl).

In der Folge des Katastrophenhochwassers im Jahr 1987 entwickelten sich im Tal des Löhnersbaches konzentrierte Forschungsaktivitäten unter der Ägide der CIPRA (Internationale Alpenschutzkommission, Commission Internationale pour la Protection des Alpes) und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Gustav Üblagger war Exponent der CIPRA, und ihm ist es gelungen, Dieter Gutknecht als Hydrologen für die Forschungsarbeiten im Löhnersbach zu gewinnen. Herbert Pirkl wurde von der ÖAW mit dem Projekt „Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen Hanginstabilitäten und -labilitäten, Hangwasserhaushalt und Massenbewegungen in Teilen des Zentralalpenkristallins“ betraut (das er 1989 bis 1991 bearbeitete), und er begleitete das hydrologische Forschungsprojekt Löhnersbach von Anfang an mit seiner Gebietskenntnis und seinem umfassenden Wissen. Dieter Gutknecht beantragte bei der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) das zunächst auf zwei Jahre veranschlagte Projekt „Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung“, in dem für wichtige Grundlinien der späteren Projektarbeiten die Weichen gestellt wurden:

- Durchführung von Prozessstudien in einem hierarchisch gegliederten Messnetz
- Vertiefung der Prozesskenntnis durch interdisziplinäres Arbeiten
- Verknüpfung von qualitativen Beobachtungen und Messungen mit der mathematischen Modellierung

Die Messeinrichtungen für das hydrometeorologische Messnetz konnten dank der engen Vernetzung mit dem von Gustav Üblagger initiierten CIPRA-Projekt „Integralprojektstudie Löhnersbach“ im Lauf der folgenden Jahre aus Mitteln des Lebensministeriums angeschafft werden.

Ausgehend von dem von Dieter Gutknecht bei der ÖAW initiierten Pilotprojekt (1990 und 1991) als Kristallisationspunkt konnten im Löhnersbachtal Forschungsarbeiten zu weiteren Projekten durchgeführt werden:

Projekte im Rahmen der CIPRA „Integralprojektstudie Löhnersbach“:

- Beregnungsversuche (Universität für Bodenkultur und Forstliche Bundesversuchsanstalt Innsbruck)
- Bodenkundliche Untersuchungen (Forstliche Bundesversuchsanstalt Innsbruck)
- Pflanzensoziologische Untersuchungen (Universität für Bodenkultur und Büro Schiffer & Burgstaller)
- Waldzustandsinventur auf Basis von Falschfarben-Infrarot-Luftbildern und eines Digitalen Höhenmodells (Forstliche Bundesversuchsanstalt Wien)

Projekte der ÖAW im Rahmen des Forschungsprogrammes „Hydrologie Österreichs“:

- Forschungsprojekt „Erfassung der Abflussverhältnisse in kleinen Einzugsgebieten“:
 - Teilprojekt „Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung“ (1992 und 1993); TU Wien, Projektleitung: Dr. Robert Kirnbauer
 - Teilprojekt „Abflusentstehung in alpinen Einzugsgebieten“ (1994 bis 1997); TU Wien, Projektleitung: Dr. Robert Kirnbauer
- Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF):
 - Projekt „Abflussmodell für alpine Einzugsgebiete“ (1994 und 1995); TU Wien, Projektleitung: Dr. Robert Kirnbauer

Projekt im Rahmen der Bund-Bundesländerkooperation (Wissenschaftsministerium sowie Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Salzburg):

- Projekt „Hochwasserentstehung in der Grauwackenzone“ (2000 bis 2005); TU Wien, Projektleitung: Dr. Robert Kirnbauer

Bündelprojekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG):

- Projekt „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“ (2000 bis 2003)
Kooperation der Institutionen:
 - Institut für Hydrologie der Universität Freiburg (Gesamtprojektleitung: Prof. Dr. Christian Leibundgut)
 - Internationales Hochschulinstitut Zittau (Prof. Dr. Gerhard Peschke †; Dr. Christina Seidler)
 - Ruhr-Universität Bochum (Prof. Dr. Harald Zepp, Institut für Angewandte Physische Geographie sowie Prof. Dr. Andreas Schumann, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik)
 - GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) (Prof. Dr. Bruno Merz) und TU Wien (Dr. Robert Kirnbauer)

Projekt des Lebensministeriums:

- „Abflussverhalten von Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe bei Dauerregen“ (2001 bis 2004); Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau IWHW (Prof. Dr. Hans-Peter Nachtnebel)

Das interdisziplinäre Arbeiten mit verschiedenen Kooperationspartnern brachte im Laufe der langen Jahre der Forschungsarbeit viele wichtige Erkenntnisse, hat aber auch den Blick für offene Fragen geschärft. Von besonderem Wert war die Integration des Löhnersbach-Projektes in das DFG Bündelprojekt „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“, die durch Vermittlung von Prof. Dr. Günter Blöschl, TU Wien, zu Stande gekommen war, und die Kooperation mit der Universität für Bodenkultur im Projekt „Abflussverhalten von Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe bei Dauerregen“. Durch Nutzung von Synergien mit diesen Projekten konnten Modellierungsarbeiten und Feldforschungen durchgeführt werden, die aus den vorhandenen Projektmitteln des Löhnersbach-Projektes niemals zu finanzieren gewesen wären. Gleiches gilt für die im CIPRA-Projekt durchgeführten Naturraum-Untersuchungen zu Projektbeginn.

An dieser Stelle sei den vielen Kolleginnen und Kollegen gedankt, die in all den Jahren einen großen Beitrag zum Gelingen der Forschungen im Löhnersbachgebiet geleistet haben. Den Kollegen Dr. Gerhard Markart und Mag. Bernhard Kohl vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen (Abteilung für Gebietswasserhaushalt, Innsbruck), früher Forstliche Bundesversuchsanstalt Außenstelle Innsbruck, gebührt unser Dank für die Durchführung der Beregnungsversuche und für viele fruchtbringende Fachgespräche. Die Zusammenarbeit mit den Kollegen aus den anderen Projekten (DFG und Dauerregen) war durch stillschweigende Übereinstimmung in der Freude an der Naturforschung gekennzeichnet: Mit Frau Dr. Birgit Zillgens (Geoforschungszentrum), Herrn Dr. Nils Tilch und Herrn Dr. Jens Didszun (Institut für Hydrologie, Freiburg), Herrn Prof. Dr. Josef Fürst (Universität für Bodenkultur, IWHW) und Herrn Prof. Dr. Franz Kohlbeck (Institut für Geophysik, Technische Universität Wien) verbinden uns frohe Erinnerungen an das Arbeiten im Gelände und am Computer.

Unser Dank gebührt außerdem einer großen Zahl von Personen und Institutionen draußen „vor Ort“, die uns in selbstloser Weise unterstützt haben. Die Sektion Salzburg und die Gebietsbauleitung Pinzgau der Wildbach- und Lawinenverbauung mit ihrem Bauhof standen uns in technischen Fragen mit Rat und Tat zur Seite, ebenso die Saalbacher Bergbahnen mit ihrer Mannschaft von der Schattbergbahn. Mit Dank soll auch die reibungslose Zusammenarbeit mit den örtlichen Grundbesitzern erwähnt werden, die uns durch die Duldung unserer Messgeräte auf ihrem Grund und Boden die Arbeit sehr erleichtert haben. Nicht zuletzt sei auch für die gewissenhafte Einsatzfreude unserer Werkstudenten gedankt, die unter oft schwerem körperlichen Einsatz die jährlichen Feldmessungen durchgeführt haben. Wir freuen uns, dass diese Arbeiten und auch die jährlichen Messkampagnen mit den Studierenden unterschiedlicher Universitäten (Technische Universität Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Universität Inns-

bruck, Universität Freiburg, Universität Potsdam, Ruhr-Universität Bochum) unfallfrei abgelaufen sind und auch Freude gemacht haben.

Peter Haas

Robert Kirnbauer

Peter Chiffard

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 3 |
| Inhaltsverzeichnis | 7 |
| Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole | 11 |
| 1 Einleitung | 13 |
| 2 Zielsetzung der Forschungen im Löhnersbachgebiet | 14 |
| 3 Projektpublikationen und Kooperationen | 14 |
| 3.1 Publikationen | 14 |
| 3.2 Forschungsberichte | 18 |
| 3.3 Kooperationen | 19 |
| 4 Exkursionen und Geländepraktika | 21 |
| 5 Gebietscharakteristik | 23 |
| 5.1 Naturräumliche Lage | 23 |
| 5.2 Klima | 23 |
| 5.3 Geologie | 25 |
| 5.4 Morphologie | 26 |
| 5.5 Pedologie | 27 |
| 5.6 Landnutzung | 29 |
| 5.7 Hydrogeologie und Hydrologie | 30 |
| 6 Methoden | 33 |
| 6.1 Feldmethoden | 33 |
| 6.1.1 Qualitative Beurteilung der hydrologischen Gegebenheiten | 33 |
| 6.1.2 Messnetz mit Messzeiträumen | 39 |
| 6.1.3 Niederschlags- und Lufttemperaturmessung | 43 |
| 6.1.4 Abflussmessungen | 44 |
| 6.1.4.1 Permanente Pegelstationen | 44 |
| 6.1.4.2 Tägliche Abflussmessungen | 48 |
| 6.1.5 Quellmessungen | 49 |
| 6.1.6 Erfassung bodenkundlicher Parameter | 50 |
| 6.1.7 Tracerhydrologische Untersuchungen | 50 |
| 6.1.7.1 Natürliche Tracer | 51 |
| 6.1.7.2 Künstliche Tracer | 52 |
| 6.1.8 Beregnungsversuche | 52 |
| 6.1.9 Bodenfeuchtemessungen | 56 |
| 6.1.10 Geophysikalische Untersuchungen | 57 |
| 6.1.10.1 Geoelektrik | 57 |
| 6.1.10.2 Refraktionsseismik | 58 |
| 6.1.11 Vermessungen | 60 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 6.2 | Labormethoden | 60 |
| 6.3 | Datenzeitraum | 61 |
| 7 | Ergebnisse | 62 |
| 7.1 | Hydrologisches Informationssystem „Löhnersbach“ | 62 |
| 7.1.1 | Aufbau des hydrologischen Informationssystems „Löhnersbach“ | 62 |
| 7.1.1.1 | Eingesetzte Software..... | 62 |
| 7.1.1.2 | Grundlagen und Aufbau des Informationssystems | 62 |
| 7.1.2 | Daten im hydrologischen Informationssystems „Löhnersbach“ | 64 |
| 7.1.2.1 | Raumdaten..... | 64 |
| 7.1.2.1.1 | Informationsebene Relief..... | 64 |
| 7.1.2.1.2 | Informationsebene Geologie..... | 65 |
| 7.1.2.1.3 | Informationsebene Boden..... | 66 |
| 7.1.2.1.4 | Informationsebene Vegetation..... | 66 |
| 7.1.2.1.5 | Informationsebene Sättigungsflächen..... | 66 |
| 7.1.2.1.6 | Informationsebene Hydrologie | 67 |
| 7.1.2.1.7 | Informationsebene Raumgliederung..... | 70 |
| 7.1.2.1.8 | Informationsebene Thiessen-Polygone..... | 73 |
| 7.1.2.2 | Punktdaten - Standortdaten | 73 |
| 7.1.2.2.1 | Informationsebene Niederschlag | 73 |
| 7.1.2.2.2 | Informationsebene Temperatur..... | 74 |
| 7.1.2.2.3 | Informationsebene Abfluss - permanent..... | 75 |
| 7.1.2.2.4 | Informationsebene Abfluss - episodisch..... | 75 |
| 7.1.2.2.5 | Informationsebene Quellpegel..... | 76 |
| 7.1.2.2.6 | Informationsebene Schnee..... | 76 |
| 7.1.2.2.7 | Informationsebene Bodenprofile | 77 |
| 7.1.2.2.8 | Informationsebene Tracer..... | 77 |
| 7.1.2.3 | Punktdaten - Detaildaten | 78 |
| 7.1.2.3.1 | Informationsebene Niederschlag | 78 |
| 7.1.2.3.2 | Informationsebene Temperatur..... | 78 |
| 7.1.2.3.3 | Informationsebene Schnee..... | 79 |
| 7.1.2.3.4 | Informationsebene Abfluss - permanent..... | 79 |
| 7.1.2.3.5 | Informationsebene Abfluss - episodisch..... | 79 |
| 7.1.2.3.6 | Informationsebene Bodenprofile | 80 |
| 7.1.3 | Aufbereitung der Eingangsdaten – Preprocessing..... | 81 |
| 7.1.3.1 | Punktdaten - Zeitreihen | 81 |
| 7.1.3.1.1 | Niederschlag | 82 |
| 7.1.3.1.2 | Temperatur..... | 83 |
| 7.1.3.1.3 | Abfluss..... | 84 |
| 7.1.3.2 | Raumdaten..... | 85 |
| 7.1.3.2.1 | Digitales Höhenmodell | 85 |
| 7.1.3.2.2 | Klassifizierung der Böden | 85 |
| 7.1.3.2.3 | Landnutzung | 92 |
| 7.1.3.2.4 | Ausweisung von Sättigungsflächen..... | 92 |
| 7.2 | Analyse des Niederschlag-Abfluss-Prozesses | 94 |
| 7.2.1 | Räumliche Variabilität des flüssigen Niederschlags | 94 |
| 7.2.2 | Niederschlagsvariabilität in Abhängigkeit der Seehöhe..... | 96 |
| 7.2.3 | Räumliche Variabilität des festen Niederschlages | 98 |
| 7.2.4 | Analyse von Extremereignissen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ | 100 |
| 7.2.4.1 | Niederschlag-Abfluss-Ereignisse vom 26./27.6.1995 und 10.-17. Juli 1996..... | 101 |
| 7.2.4.2 | Niederschlag-Abfluss-Ereignis vom 10.7.1995 | 106 |
| 7.2.4.3 | Niederschlag-Abfluss-Ereignis vom 27.7.1995 | 108 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 7.2.4.4 | Zusammenfassung | 110 |
| 7.2.5 | Abschätzung des Gebietsabflusses basierend auf dem Ereignisabfluss der Feuchtfächen Limbergalm und Klingleralm | 113 |
| 7.2.5.1 | Ausgangssituation und Zielsetzung | 113 |
| 7.2.5.2 | Methode | 113 |
| 7.2.5.3 | Ergebnisse und Interpretation | 114 |
| 7.2.6 | Abschätzung kontinuierlicher Abflüsse im Klamm bach auf Basis täglicher Abflussmessungen | 115 |
| 7.2.6.1 | Ausgangssituation und Zielsetzung | 115 |
| 7.2.6.2 | Methode | 117 |
| 7.2.6.3 | Ergebnisse und Interpretation | 118 |
| 7.2.6.4 | Zusammenfassung | 121 |
| 7.2.7 | Abflussprozessanalyse an der Feuchtfäche Limbergalm | 121 |
| 7.2.7.1 | Tracerhydrologische Untersuchungen | 121 |
| 7.2.7.2 | Beregnungsversuche in Verbindung mit Tracereexperimenten..... | 128 |
| 7.2.7.3 | Geophysikalische Untersuchungen | 131 |
| 7.2.7.4 | Ableitung aller wichtigen Umsatzräume und dominanter Abflussbildungsprozesse an der Feuchtfäche Limbergalm | 136 |
| 7.2.8 | Abflussprozessanalyse an den Feuchtfächen Herzogalm und Neuhausengraben | 137 |
| 7.2.8.1 | Analyse von einzelnen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen..... | 137 |
| 7.2.8.2 | Ereignisauswertung an der Feuchtfäche Herzogalm..... | 140 |
| 7.2.9 | Unterschiede in der Charakteristik des Abflussverhaltens auf den Feuchtfächen „Limbergalm“ und „Klingleralm“ | 142 |
| 7.2.10 | Skalenübergreifende Analyse von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen (Limbergalm – Löhnersbach – Viehhofen)..... | 144 |
| 7.3 | Hydrologische Einzugsgebietsmodellierungen | 148 |
| 7.3.1 | BROOK..... | 148 |
| 7.3.1.1 | Beschreibung des Wasserhaushaltsmodells BROOK..... | 148 |
| 7.3.1.2 | Anwendung auf das Einzugsgebiet Kühtai | 149 |
| 7.3.1.3 | Eingriffe in die Modellstruktur | 151 |
| 7.3.1.3.1 | Verbesserung der Modellkonzeption..... | 151 |
| 7.3.1.3.2 | Behebung logischer Fehler | 152 |
| 7.3.1.3.3 | Verbesserung des Integrationsalgorithmus..... | 152 |
| 7.3.1.3.4 | Verbesserung des Benutzerkomforts | 153 |
| 7.3.1.4 | Anwendung auf das Untersuchungsgebiet Löhnersbach | 153 |
| 7.3.1.4.1 | Berechnung des Temperaturgradienten | 153 |
| 7.3.1.4.2 | Modellrechnungen für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ | 156 |
| 7.3.1.4.3 | Modellrechnungen für die Feuchtfäche Herzogalm | 170 |
| 7.3.1.5 | Fazit | 173 |
| 7.3.2 | HQSim | 174 |
| 7.3.2.1 | Beschreibung des Wasserhaushaltsmodells HQSim..... | 174 |
| 7.3.2.2 | Speicher und Prozesse im Modell HQSim | 174 |
| 7.3.2.3 | Raumgliederung..... | 175 |
| 7.3.2.4 | Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ | 177 |
| 7.3.2.5 | Fazit | 178 |
| 7.3.3 | TAC^D | 179 |
| 7.3.3.1 | Beschreibung des Abflussmodells TAC ^D | 179 |
| 7.3.3.2 | Raumgliederung..... | 180 |
| 7.3.3.3 | Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ | 181 |
| 7.3.3.4 | Fazit | 183 |
| 7.3.4 | Potsdamer Modell | 184 |
| 7.3.4.1 | Beschreibung des Potsdamer Modells | 184 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.3.4.2 | Aufbereitung der Eingangsdaten..... | 188 |
| 7.3.4.3 | Anwendung des Modells auf das Einzugsgebiet Pegel Limbergalm | 189 |
| 7.3.4.3.1 | Parametrisierung und Modellkalibrierung | 189 |
| 7.3.4.3.2 | Ergebnisse der Modellvalidierung | 193 |
| 7.3.4.3.3 | Fazit der Modellierungen im Einzugsgebiet Pegel Limbergalm | 197 |
| 7.3.4.4 | Raumgliederung für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ | 198 |
| 7.3.4.5 | Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ | 201 |
| 7.3.4.5.1 | Modellentwicklung | 201 |
| 7.3.4.5.2 | Parametrisierung und Kalibrierung..... | 202 |
| 7.3.4.5.3 | Ergebnisse der Validierung..... | 205 |
| 7.3.4.5.4 | Ergebnisse der multi-site Validierung | 208 |
| 7.3.4.6 | Fazit..... | 211 |
| 8 | Schlussfolgerungen..... | 212 |
| 9 | Zusammenfassung | 215 |
| | Literaturverzeichnis..... | 218 |
| | Verzeichnis der Abbildungen..... | 225 |
| | Verzeichnis der Tabellen..... | 231 |
| | Verzeichnis der Fotos | 232 |

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

| | |
|------------------|--|
| Abb. | Abbildung |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| cm | Zentimeter |
| DDF | Day-Degree-Factor (Tag-Grad-Faktor) |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| DHM | Digitales Höhenmodell |
| DVWK | Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau |
| d.h. | das heißt |
| et al. | et alii |
| ed. | Editor |
| FC | Muldenspeicher |
| FK | Feldkapazität |
| GFZ | GeoForschungsZentrum |
| GPV | Gesamtporenvolumen [mm oder %] |
| ² H | Wasserstoff-2, Deuterium [‰] |
| HDÖ | Hydrographischer Dienst Österreich |
| Hrsg. | Herausgeber |
| HRU | Hydrological Response Unit |
| Kap. | Kapitel |
| keint | Bodenparameter im Modell BROOK [cm/s] |
| keslp | Bodenparameter im Modell BROOK [] |
| k_f | gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [cm/s] |
| K'_r | Abflussrückgangskoeffizient [m ³ /84600s ²] |
| k_u | ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit [cm/s] |
| LAI | Leaf-Area-Index (Blattflächenindex) |
| LK | Luftkapazität [mm oder %] |
| LP | Faktor zur Reduzierung der Verdunstung |
| m | Meter |
| mm | Millimeter |
| MQ | Mittlerer Abfluss [m ³ /s] |
| m ü. A. | Höhe über Adria [m] |
| m ü. NN | Höhe über Normalnull [m] |
| Nd oder N | Niederschlag [mm] |
| Nr. | Nummer |
| nFK | nutzbare Feldkapazität [mm oder %] |
| nFKWe | nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes [mm oder %] |
| ¹⁸ O | Sauerstoff-18 [‰] |
| ÖAW | Österreichische Akademie der Wissenschaften |
| pH | pH-Wert |
| PL | Pegel Limbergalm |
| PL-W | Pegel Limbergalm-West |
| PV | Porenvolumen [Vol.-%] |
| Q | Abfluss [m ³ /s] oder [l/s] |
| QW | Quelle am Wallflankenfuß |
| Q_{max} | Scheitelabfluss [m ³ /s] |
| q _{GW1} | Grundwasserabfluss (Komponente 1) |
| q _{GW2} | Grundwasserabfluss (Komponente 2) |

| | |
|--------------------|--|
| q_{Humus} | episodischer Zwischenabfluss aus der Rohhumusauflage |
| q_{out} | Grundwasserabstrom |
| q_{perc} | perkolierender Abfluss |
| q_{SOF} | Sättigungsflächenabfluss |
| q_{sZA} | schneller Zwischenabfluss im Blockschutt |
| $q_{\text{über}}$ | Überlauf |
| r^2 | Bestimmtheitsmaß |
| R_{eff} | Modelleffizienz nach NASH & SUTCLIFFE (1970) |
| S | Grundwasserspeicher |
| SAI | Steam-Area-Index (Stammflächenindex) |
| TAC ^D | Tracer aided catchment model, distributed |
| TDR | Time-Domain-Reflectometry |
| u.a. | unter anderem |
| v.a. | vor allem |
| VE | Volumenfehler |
| volmax | Kalibrierungsparameter: maximale Speicherfüllung |
| vgl. | vergleiche |
| WLV | Wildbach- und Lawinenverbaung |
| WS | Wassersäule |
| ZAMG | Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik |
| z.B. | zum Beispiel |

Griechische Symbole

| | |
|----------------|--|
| α | Signifikanz |
| Ψ | Potential des Bodenwassers (Saugspannung) [hPa; cm WS (1 cm WS \approx 1 hPa); bar (1000 cm WS \approx 1bar)] |
| Θ | Bodenwassergehalt [Vol.-%] |
| $\theta(\psi)$ | Wassergehalt als Funktion des Matrixpotentials [Vol.-%] |
| ψ | Matrixpotential [hPA] |
| θ_0 | Wassergehalt bei einer Saugspannung von 15 bar [Vol.-%] (völlige Austrocknung) |
| θ_r | Restwassergehalt bei Sättigung [Vol.-%] |
| θ_s | Wassergehalt bei Sättigung [Vol.-%] |
| θ_2 | Wassergehalt bei einer Saugspannung von 690 cmWS [Vol.-%] |
| ρ_t | Rohdichte (trocken) [g/ccm] |

1 Einleitung

Der Löhnersbach ist ein an sich unscheinbarer Seitenbach im Oberlauf der Saalach, ein Gewässer wie es Tausende in den Alpen gibt. Anfang Juli 1987 erreichte dieser Bach eine gewisse Prominenz, denn ein extremes Hochwasser in ihm und im stromaufwärts mündenden Schwarzacher Graben führte zu erheblichen Vermurungen im Glemmtal und insbesondere im bekannten Skiort Saalbach. Die Ursache dieses Hochwassers war ein Niederschlagsereignis mit einer Intensität von 130 mm in 90 min während einer Schlechtwetterperiode, das den Abfluss auf das über 100fache ansteigen ließ. Von den etwa sieben Kilometern Forststraße, die entlang des Löhnersbaches ins Tal führen, waren nach dem Hochwasser lediglich ca. 200 Meter vorhanden, der Rest lag als Geschiebeeinstoß im Saalachtal (KIRNBAUER 2001). Im Anschluss an das Ereignis entwickelte sich eine in den Medien recht emotional ausgetragene Diskussion über dessen Ursachen. Die Tatsache, dass die Frage nach den Ursachen dieses extremen Ereignisses von 1987 nicht ausreichend geklärt werden konnten, war der Anlass, im Jahr 1989 hydrogeologische, pflanzensoziologische (PIRKL 1990, SCHIFFER & BURGSTALLER 1990), pedologische Untersuchungen (MARKART & KOHL 1993a,b), Berechnungsversuche (MARKART & KOHL 1995) sowie aerophotogrammetrische Auswertungen durchzuführen. Im Zusammenhang mit diesem Forschungsprojekt, das von der Akademie der Wissenschaften und dem Landwirtschaftsministerium gefördert wurde, wurde ab 1990 ein hydrologisches Untersuchungsprogramm geplant und 1991 in Angriff genommen. Das Ziel war im Wesentlichen die Abflussbildungsprozesse durch fundierte Feldexperimente zu analysieren und dieses Prozesswissen in der hydrologischen Abflussmodellierung zu verwenden.

Die hydrologische Modellierung versucht einen Naturvorgang zu beschreiben, der außerordentlich komplex, zeitlich variabel und räumlich heterogen ist. Moderne flächendetaillierte Modelle liefern jedoch nur dann zuverlässige Ergebnisse, wenn die für die Abfluss- und insbesondere die Hochwasserentstehung maßgebenden Prozesse erkannt, verstanden und im Modell beschrieben werden. Grundlagen für das notwendige Prozessverständnis sind gezielte Beobachtungen und Messungen in der Natur. Anschließend müssen hydrologische Modellvorstellungen und die daraus abgeleiteten Modelle an Hand adäquater Daten verifiziert (oder falsifiziert) werden. Modellierung und Messung müssen daher miteinander im Wechselspiel stehen (BINLEY ET AL. 1991, KIRNBAUER 1994). Für die Aussagekraft solcher Studien ist es entscheidend, dass die Prozesse jeweils auf der adäquaten Maßstabsebene beobachtet werden. Einzelne Teilprozesse des Niederschlag-Abfluss-Prozesses sind nur auf der kleinsten Maßstabsebene, im Bereich weniger Tausend Quadratmeter sichtbar (KIRNBAUER UND HAAS 1991, HAAS UND KIRNBAUER 1994). Insbesondere zur Erforschung der Entstehungsmechanismen von Hochwässern, und zwar speziell in kleinen Einzugsgebieten, existiert eine umfangreiche Literatur, die sich mit grundlegenden Fragen hierzu auseinandersetzt: Gibt es dominante Prozesse, die zur Abflussentstehung führen (z.B. GUTKNECHT 1997) oder gibt es typische Entstehungsflächen unterschiedlicher Abflussmechanismen (PESCHKE ET AL. 1999)?

2 Zielsetzung der Forschungen im Löhnersbachgebiet

Aufbauend auf derartigen Überlegungen war ab 1990 im hydrologischen Untersuchungsgebiet Löhnersbach bei Saalbach (Land Salzburg) im interdisziplinären Dialog ein hydrometeorologisches Beobachtungsnetz eingerichtet worden. Die Naturvorgänge, die in alpinen Einzugsgebieten an der Hochwasserentstehung beteiligt sind, sollen entsprechend der Skalenhierarchie Testfläche, Hangfläche, Kleineinzugsgebiet, Einzugsgebiet analysiert werden. Ein besseres Verständnis dieser Abflussmechanismen bildet die Grundlage einer sinnvollen, phänomenorientierten Modellierung und ist die Voraussetzung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Gebiete. Um Kenntnis über die Abflussmechanismen zu erlangen, ist zum einen das Beobachtungsnetz hierarchisch ineinander verschachtelt und deckt – unter Einbeziehung des Pegels Viehhofen an der Saalach, dem übergeordneten Vorfluter – Flächen von 7 ha bis 150 km² ab, zum anderen werden auf allen Maßstabsebenen die methodischen Ansätze qualitatives Beobachten, messtechnische Erfassung von Parametern, Quantifizierung von Messdaten und mathematisches Simulieren eingesetzt. Die Beobachtungen und Messungen zielen darauf ab, gängige Konzepte der hydrologischen Modellierung zu überprüfen und Grundlagen für die Parameterbestimmung, Verifizierung oder Falsifizierung flächendetaillierter hydrologischer Modelle zu erarbeiten. Als Einflussfaktoren werden das Relief, die Bewuchs- und Bodennutzungsverhältnisse, die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens, dessen Mächtigkeit sowie die Lithologie des Untergrundes betrachtet. Aus der Fülle der Einflussfaktoren und aufgrund der komplexen Wechselwirkungen ergibt sich die Notwendigkeit einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Fachrichtungen (vgl. Kap. 3.3).

3 Projektpublikationen und Kooperationen

Im Folgenden sind sämtliche mit den Forschungen im Löhnersbach zusammenhängende Publikationen, Berichte, wissenschaftliche Arbeiten (Diplomarbeiten) und Vorträge, sowie Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen aufgelistet.

3.1 Publikationen

HAAS, P. & KIRNBAUER, R. (1994): Runoff generation in a small Alpine catchment - observations on different scales. – European Geophysical Society, XIX General Assembly, Grenoble, 25 - 29. April 1994, Annales Geophysicae, Suppl. II, Vol. 12, p. C428.

JOHST, M., (2003): Die Weiterentwicklung und Anwendung des prozessorientierten Einzugsgebietsmodells TAC^D im Löhnersbach-Einzugsgebiet, Kitzbüheler Alpen, Österreich. – Unveröffentl. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, 105 S.

- JOHST, M., UHLENBROOK, S., TILCH, N., DIDSZUN, J., LEIBUNDGUT, C., KIRNBAUER, R. & ZILLGENS, B. (2004): Process-oriented catchment modelling in the alpine Löhnersbach-catchment, Austria. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 00477.
- JOHST, M., UHLENBROOK, S., TILCH, N., ZILLGENS, B., DIDSZUN, J. & KIRNBAUER, R. (2008): An attempt of process-oriented rainfall-runoff modelling using multiple-response data in an alpine catchment, Loehnersbach, Austria. – Hydrology Research 39(1):1-16.
- KIRNBAUER, R., PIRKL, H., HAAS, P. & STEIDL, R. (1996): Abflußmechanismen - Beobachtung und Modellierung. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 48(1/2):15-26.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1998): Observations on runoff generation mechanisms in small Alpine catchments. – In: Kovar, K., Tappeiner, U., Peters, N. E. & Craig, R. G. (eds.): Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters. – Proc. of the HeadWater'98 Conference, Meran, Italy, Apr. 1998, IAHS Publ. no. 248:239-247.
- KIRNBAUER, R., LANG, H. & FORSTER, F. (2000): Hydrologische Forschungsgebiete - Informationsquellen für Wissenschaft und Praxis. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 52(5/6):87-94.
- KIRNBAUER, R., BLÖSCHL, G., HAAS, P., MÜLLER, G. & MERZ, B. (2001): Space-time patterns of runoff generation in the Löhnersbach catchment. – In: Leibundgut, C., Uhlenbrook, S. & McDonnell, J. (eds.): Runoff Generation and Implications for River Basin Modelling, Freiburger Schriften zur Hydrologie 13:37-45.
- KIRNBAUER, R., HAAS, P., TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., LEIBUNDGUT, C., ZILLGENS, B., MERZ, B., & SEIDLER, C. (2003): Process studies in a small Alpine catchment for process oriented modeling. – Abstract für Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Birmensdorf: Workshop on Mountain Hydrology, Einsiedeln, Schweiz 2.-4. April 2003.
- KIRNBAUER, R., TILCH, N., MARKART, G., ZILLGENS, B., KOHLBECK, F., LEROCH, K., SEIDLER, C., HAAS, P., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., LEIBUNDGUT, C., MERZ, B., CHWATAL, W. & FÜRST, J. (2004): Hochwasserentstehung in der Nördlichen Grauwackenzone der Alpen - Feldforschungen und mathematische Modellierung. – In: 10. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 Riva/Trient, Band 1, S. II/45 - II/56.
- KIRNBAUER, R., TILCH, N., ZILLGENS, B., MERZ, B. & UHLENBROOK, S. (2005): Tracing runoff generation processes through different spatial scales - Field studies and experiments. – International Conference on Headwater Control VI, Bergen, Paper-Nr. 136.

- KIRNBAUER, R., BLÖSCHL, G., HAAS, P. MÜLLER, G. & MERZ, B. (2005): Identifying space-time patterns of runoff generation. A case study from the Löhnersbach catchment, Austrian Alps. – In: Huber, U., Bugmann, H. & Reasoner M. (ed.); Global change and mountain regions - a state of knowledge overview, p. 309 - 320.
- KIRNBAUER, R., ZILLGENS, B. & TILCH, N. (2005): Quellschüttung: Ihre Bedeutung für die Hochwasserentstehung - Untersuchungen im Gebiet der Saalach. – In: "10 Jahre Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst", herausgegeben von: ÖWAV und Lebensministerium; Eigenverlag, 7 S., 8 Abb., Wien.
- KIRNBAUER, R., TILCH, N., ZILLGENS, B. & MERZ, B. (2006): Von sieben Hektar bis 150 Quadratkilometer. Skalenübergreifende Untersuchungen in der nördlichen Grauwackenzone der österreichischen Alpen. – Dresdner Schriften zur Hydrologie 5:198-210.
- KLUG-PÜMPEL, B., BURGSTALLER, B. & SCHIFFER, R. (1994): Borstgrasweiden im Schattberggebiet (Land Salzburg): Artengarnitur und Phytomasse. – Die Bodenkultur, J. f. landwirtsch. Forschung, Band 45(2):99-112.
- KLANN, M., ZILLGENS, B., ITZEROTT, S., KIRNBAUER, R., GÜNTNER, A. & MERZ, B. (2003): Identifizierung von Sättigungsflächen in einem alpinen Einzugsgebiet, 7. Workshop zur großskaligen Modellierung in der Hydrologie, München.
- KLANN, M., ZILLGENS, B., ITZEROTT, S., KIRNBAUER, R., GÜNTNER, A. & MERZ, B. (2004): Identification of saturation zones in alpine catchments. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 02583.
- TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., LEIBUNDGUT, C., ZILLGENS, B., KIRNBAUER, R., & MERZ, B. (2003): Entschlüsselung von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer Ansätze in einem alpinen Einzugsgebiet. – Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 55(1/2):9-17.
- TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., ZILLGENS, B., KIRNBAUER, R. & MARKART, G. (2004): Hochwasserrelevante Wasserumsatzräume und hydrologische Prozesse im Löhnersbacheinzugsgebiet (Kitzbüheler Alpen, Österreich). – In: Bronstert, A.; Thieken, A. H.; Merz, B.; Rode, M.; Menzel, L. (Hrsg.): Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 05.04, Band 2:85-89.
- TILCH, N., UHLENBROOK, S., & LEIBUNDGUT, C. (2004): Tracerhydrologische Erkundung und GIS-gestützte Ausweisung hochwasserrelevanter Aquifersysteme montaner Einzugsgebiete. – Abstract im Tagungsband zur Tagung der FH-DGG in Darmstadt, 19. - 23. Mai, Schiedek, T., Kaufmann-Knoke, R. & Ebhardt, G. (Hrsg.): Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme, Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges., 32: S. 199.

- TILCH, N., UHLENBROOK, S., ZILLGENS, B., KIRNBAUER, R. & LEIBUNDGUT, C. (2004): GIS-gestütztes Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung dominanter Abflussbildungsprozesse in mesoskaligen Einzugsgebieten. – In: Bronstert, A.; Thielen, A. H.; Merz, B.; Rode, M.; Menzel, L. (Hrsg.): Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 05.04, Band 2:79-83.
- TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., WENNINGER, J., KIRNBAUER, R., ZILLGENS, B. & LEIBUNDGUT, C. (2006): Hydrologische Prozessforschung zur Hochwasserentstehung im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Kitzbüheler Alpen, Österreich). – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50(2):67-78.
- TILCH, N., ZILLGENS, B., UHLENBROOK, S., KIRNBAUER, R. & MERZ, B. (2006): GIS-gestützte Ausweisung von hydrologischen Umsatzräumen und Prozessen im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Nördliche Grauwackenzone, Salzburger Land). – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 58(9-10):141-151.
- UHLENBROOK, S., TILCH, N., JOHST, M. & KIRNBAUER, R. (2004): Hochwasserrelevante Hangaquifere im Löhnersbachgebiet (Kitzbüheler Alpen) - tracerhydrologische Prozessforschung und N/A-Modellierung. – Tagung der FH-DGG in Darmstadt, 19. - 23. Mai, Schiedek, T., Kaufmann-Knoke, R. & Ebhardt, G. (Hrsg.): Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme, Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges., 32: S. 199.
- WENNINGER, J., TILCH, N., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, CH. & KOHLBECK, F. (2004): Identifikation von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer und geoelektrischer Methoden in einem alpinen Einzugsgebiet. – Tagung der FH-DGG in Darmstadt, 19. – 23. Mai, Schiedek, T., Kaufmann-Knoke, R. & Ebhardt, G. (Hrsg.): Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme. – Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges. 32, S. 200.
- WENNINGER, J., UHLENBROOK, S., TILCH, N., KOCH, K. & LEIBUNDGUT, CH. (2004): Identification of runoff generation processes using hydrometrical and geoelectrical information in mountainous catchments. – Geophysical Research Abstracts EGU04-A-06167, European Geophysical Society.
- ZILLGENS, B., MERZ, B., KIRNBAUER, R., TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J. & LEIBUNDGUT, C. (2002): Process oriented methods to quantify runoff patterns in an alpine catchment. – Geophysical Research Abstracts Volume 4, Abstract EGS02-A-05607, 27th General Assembly EGS, Nice.
- ZILLGENS, B., MERZ, B., KIRNBAUER, R., TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J. & LEIBUNDGUT, C. (2003): Runoff investigations in an alpine catchment: monitoring and modelling. – Geophysical Research Abstracts Volume 5, Abstract EAE03-A-08272, 27th General Assembly EGS, Nice.

- ZILLGENS, B., MERZ, B., TILCH, N., KIRNBAUER, R., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J. & LEIBUNDGUT, C. (2003): Monitoring and modelling runoff in an alpine catchment. – Abstract im Tagungsband zum International Workshop on Mountain Hydrology, International Workshop on Mountain Hydrology, Einsiedeln, Schweiz.
- ZILLGENS, B., MERZ, B., KIRNBAUER, R. & TILCH, N. (2005): Skalenübergreifende Ansätze zur Beschreibung der Abflussbildung in einem alpinen Einzugsgebiet. – In: Nacken, H., Bartussek, S. & Sewilam, H. (Hrsg.): Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft - von der Theorie zum Anwendungsfall. – Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005, 22./23. März 2005 in Aachen, Seite 299-303.
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2005): Tracing runoff generation processes through different spatial scales - data analyses and modelling approach. – International conference on Headwater Control VI, Bergen, Paper-Nr. 135.
- ZILLGENS, B., MERZ, B., KIRNBAUER, R. & TILCH, N. (2005): Runoff response of an alpine catchment: analysis and comparison across different scales. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, EGU05-A-04417, Vienna.
- ZILLGENS, B., MERZ, B., KIRNBAUER, R. & TILCH, N. (2007): Analysis of the runoff response of an alpine catchment at different scales. – Hydrology and Earth System Sciences, 11/4: 1441-1454.
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2007b): Experimentelle und modelltechnische Arbeiten am Löhnersbachgebiet. – In: Leibundgut, C. & Uhlenbrook, S. (2007): Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 24:73-109.

3.2 Forschungsberichte

- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1990): Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung. – Abschlussbericht für den Bearbeitungsabschnitt 1990, Teilprojekt des Forschungsprojektes „Erfassung der Abflussverhältnisse in kleinen Einzugsgebieten“, 37 Seiten.
- KIRNBAUER, R. HAAS, P. & STEIDL, R. (1993): Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung. – Abschlussbericht für 1992, Teilprojekt des Forschungsprojektes „Erfassung der Abflussverhältnisse in kleinen Einzugsgebieten“, 69 Seiten.
- KIRNBAUER, R. HAAS, P. & STEIDL, R. (1994): Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung. – Abschlussbericht für den Zeitraum 1992 bis 1994, Teilprojekt des Forschungsprojektes „Erfassung der Abflussverhältnisse in kleinen Einzugsgebieten“, Teil 1: 10 Seiten, Teil 2: 47 Seiten mit Anhang.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1995): Abflussentstehung in alpinen Einzugsgebieten. – Endbericht für 1994 HÖ 1/94, Forschungsprogramm „Hydrologie Österreichs“, 32 Seiten.

- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1996): Abflussentstehung in alpinen Einzugsgebieten. – Endbericht für 1995 HÖ 1/94, Forschungsprogramm „Hydrologie Österreichs“, 22 Seiten mit Anhang.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1997): Abflussentstehung in alpinen Einzugsgebieten. – Endbericht für 1996, HÖ 1/94, Forschungsprogramm „Hydrologie Österreichs“, 16 Seiten mit Anhang.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1998): Abflussentstehung in alpinen Einzugsgebieten. – Endbericht für 1998, HÖ 1/94, Forschungsprogramm „Hydrologie Österreichs“, 30 Seiten mit Anhang A, B und C.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (2001): Hochwasserentstehung in der Grauwackenzone. – Zwischenbericht für 2000, Proj. Nr. SA 26/99, 11 Seiten mit Anhang A, B und C.
- KIRNBAUER, R., HAAS, P. & TILCH, N., (2001): Hochwasserentstehung in der Grauwackenzone. – Zwischenbericht für die Jahre 2000/2001 für das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur.
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2002): Prozessnahe Methoden zur Quantifizierung der Abflussbildung. – Bericht im DFG-Bündelprojekt „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (2004): Erfassung der Abflussverhältnisse in Gewässern der Grauwackenzone mit besonderer Berücksichtigung der Hochwasserentstehung und des unterirdischen Abflusses. – Zwischenbericht für 2003, Proj. Nr. SA 26/99, 8 Seiten mit Anhang A, B, C und D.

3.3 Kooperationen

Hydrographischer Dienst

Mit dem Hydrographischen Dienst in Österreich besteht seit Jahren eine Kooperation bei der Betreuung des Hauptpegels Rammern am Löhnersbach (16 km²). Diese Kooperation wurde bezüglich des Quellbeobachtungsprogrammes ausgedehnt und betrifft die Quellmessstelle Klammbachquelle, die mit Unterstützung des Hydrographischen Dienstes instrumentiert werden konnte.

Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen (BFW, Innsbruck)

Mit Dr. G. Markart und Bernhard Kohl vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen bestand von Beginn an eine enge fachliche und praktische Zusammenarbeit. Diese Kooperation führte zu der Durchführung von Beregnungsversuchen, die im Jahre 1992 an verschiedenen Flächen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ und im Jahre 2002 an zwei Flächen im Einzugsgebiet der Feuchtbläche Limbergalm stattfanden. Darüber hinaus gab es stets einen regen fachlichen Austausch und intensive Diskussionen z.B. über die Entstehungsgebiete des Oberflächenabflusses im Löhnersbachgebiet.

Wildbach- und Lawinenverbauung (die.wildbach) – Gebietsbauleitung Zell am See

Ebenfalls von Beginn an hat die Wildbach- und Lawinenverbauung in Zell am See (WLV) tatkräftig zum Gelingen der Forschungen im Löhnersbachgebiet beigetragen.

Am Anfang betraf dies vor allem den Aufbau des Messnetzes, für den Material, Werkzeuge und die Werkstätten des örtlichen Bauhofes zur Verfügung gestellt wurden. Für die Exkursionen mit Studierenden der Technischen Universität Wien organisierte die WLW in den nachfolgenden Jahren zahlreiche Besichtigungen und Führungen, die wasserwirtschaftliche Fragestellungen im Gebirgsraum betrafen. Als jüngste Kooperation gilt es die Arbeiten zur Erforschung der Wirkung von dezentralen Hochwasserrückhaltmaßnahmen im Marxtengrund (Löhnersbachgebiet) anzusprechen, für die die WLW eine Pegelstation errichtet, das Vermessungsgerät zur Verfügung gestellt sowie die Datentransformationen vorgenommen hat.

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur

Hochwässer entstehen nicht nur bei Starkregen sondern, speziell in mesoskaligen Einzugsgebieten, durch lang anhaltende Niederschläge geringer Intensität (ca. 5 bis 10 mm/h), also Dauerregen. Regen derartigen Typs können mit konventionellen Beregnungsanlagen, wie sie zur Untersuchung der Abflussverhältnisse bei Starkregen eingesetzt werden, nicht künstlich erzeugt werden, weil die simulierbare minimale Beregnungsintensität bei solchen Anlagen in der Größenordnung von ca. 30 mm/h liegt. Somit sind Beregnungsexperimente zur Schaffung von Datengrundlagen für die mathematische Modellierung von Hochwässern zufolge Dauerregen nicht möglich. Das Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen in Innsbruck hat zur Lösung dieses Problems gemeinsam mit dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur das vom BMLFuW finanzierte Projekt „Abflussverhalten von Testflächen im Einzugsgebiet des Oselitzenbaches (Kärnten) bei Dauerregen“ durchgeführt und in diesem Rahmen unter anderem auch Beregnungen im Einzugsgebiet Löhnersbach betrieben.

Kooperationspartner des DFG Projektes „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Projektes, das von 2000 bis 2004 durchgeführt wurde, bestanden Kooperationen mit folgenden Instituten bzw. Projektpartnern:

- Institut für Hydrologie der Universität Freiburg (Prof. Dr. C. Leibundgut)
- GeoForschungsZentrum Potsdam (Prof. Dr. B. Merz)
- Internationales Hochschulinstitut Zittau (Prof. Dr. G. Peschke †, Dr. C. Seidler)
- Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr Universität Bochum (Prof. Dr. A. Schumann)
- Lehrstuhl für Angewandte Physische Geographie, Ruhr Universität Bochum (Prof. Dr. H. Zepp)
- Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien (Prof. Dr. F. Kohlbeck)

4 Exkursionen und Geländepraktika

Ein Ziel der Untersuchungen im Löhnersbachgebiet war es auch, die Forschungen mit der wasserwirtschaftlichen Lehre an der TU Wien zu verknüpfen. Ein jährlicher Fixpunkt war daher die jeweils im Juni stattfindende Exkursion mit Hörern der Lehrveranstaltungen "Hydrometrie" bzw. "Alpinhydrologie". Bei diesen Aufenthalten im Gelände wurden den Studierenden Fragen der hydrologischen Prozessforschung näher gebracht, sie erlernten hydrometrische Messmethoden in der Praxis anzuwenden und waren an der Wartung und Kontrolle des hydrologischen Messnetzes beteiligt.

Der übliche Ablauf begann stets am Freitag früh morgens mit der Abfahrt von Wien in Richtung Saalbach und endete am folgenden Montag spät abends mit Ausräumen der Leihfahrzeuge. Die dazwischen liegende Zeit war gefüllt mit einem abwechslungsreichen, sehr produktiven und anstrengenden Programm. Ein Bestandteil des Geländepraktikums war, dass die Teilnehmer in mehreren kleinen Gruppen im Gebiet ausschärmten und selbständig Durchflussmessungen mittels Salzmischungsmethode an den Seitenbächen des Löhnersbaches durchführten. Diese Abflussdaten gingen in das hydrologische Informationssystem „Löhnersbach“ ein (vgl. Kap. 7.1) und wurden später als multi-response-data zur Validierung der Modellergebnisse verwendet (vgl. Kap. 7.3). Ein wichtiger Programmpunkt war die Besichtigung von Einrichtungen, die die Wasserwirtschaft im Gebirge betreffen wie z.B. Bauvorhaben der WLV, die Kläranlage in Saalbach oder das Kraftwerk Kaprun. Es war das Ziel, den Studierenden die wasserwirtschaftliche Probleme und Aufgaben näher zu bringen und darzustellen.



Foto 1: Datenauslesen und Kontrolle des Niederschlagsschreibers Herzogalm.



Foto 2: Vorbereitung der Salzlösung für die Durchflussmessung mittels Salzmischungsmethode am Klamm bach.



Foto 3: Durchflussmessung mit einem hydrometrischen Flügel an der Pegelstation Rammern.

5 Gebietscharakteristik

5.1 Naturräumliche Lage

Der Löhnersbach befindet sich in den Kitzbüheler Alpen im Salzburger Land in Österreich (Abbildung 1). Er ist ein rechtsseitiger Zubringer der Saalach und mündet ca. 3,5 km stromabwärts von Saalbach. Bei der Mündung in die Saalach, ($12^{\circ}40'55''$ Ost, $47^{\circ}22'38''$ Nord) auf Seehöhe von 920 m, hat er ein Einzugsgebiet von 20,5 km². Trotz seines nicht gerade extremen Gefälles von durchschnittlich 7 % auf den letzten 2,6 km vor der Mündung hat er den Charakter eines Wildbaches, der insbesondere wegen seines hohen Geschiebepotentials das Saalachtal gefährdet. Das Einzugsgebiet des Löhnersbaches bis zum Hauptpegel Rammern ist ca. 16 km² groß und ist nach BECKER (1992) der unteren Mesoskala zuzuordnen. Im Folgenden wird das Gebiet bis zum Pegel Rammern als Untersuchungsgebiet bezeichnet, das Gebiet bis zur Mündung als Einzugsgebiet.

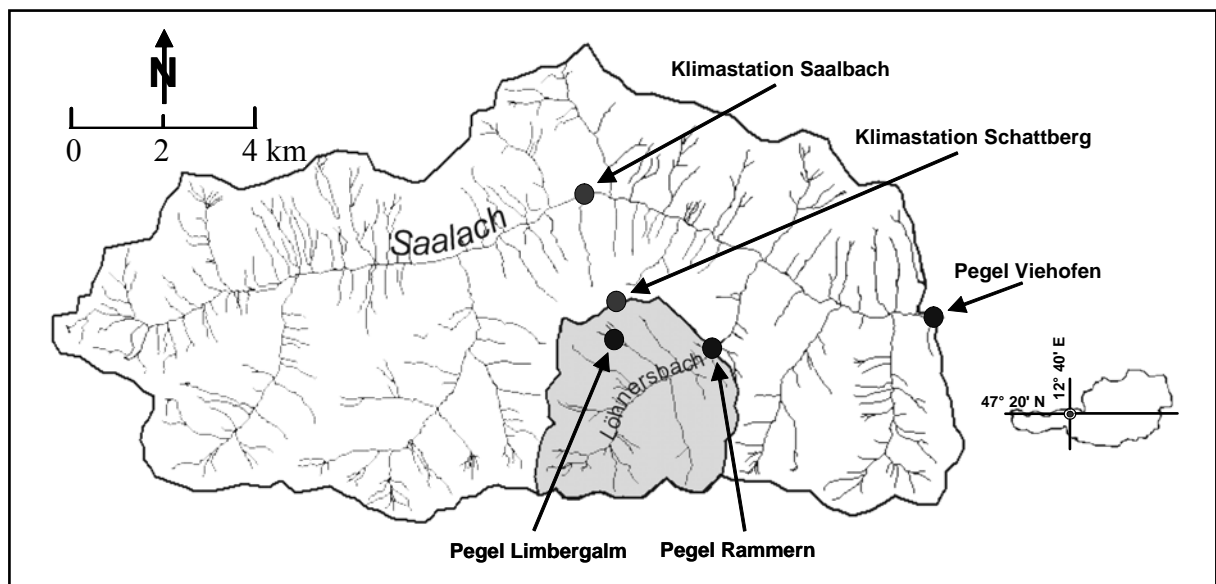


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ (16 km²) innerhalb des Einzugsgebietes Pegel Viehhofen (150 km²).

5.2 Klima

Die Kitzbüheler Alpen befinden sich in der Westwindzone der kühlgemäßigten Breiten. Während am Nordsaum der Alpen infolge hoher Steigungsregen ein eher ozeanisches Klima herrscht, hat das Klima der niedrigeren Kitzbüheler Alpen bereits etwas kontinentalere Züge (VON RINALDINI 1924). Die allseitige Gebirgsumrahmung des Gebietes durch die nördlichen Kalkalpen und die Zentralalpen führt zu abgeschwächten Niederschlägen sowie zu einer geringeren Durchlüftung und damit zu stärkeren Gegensätzen zwischen der kalten und der warmen Jahreszeit. Aufgrund der ausgeprägten Topographie des alpinen Einzugsgebietes „Löhnersbach“ wird eine deutliche Höhen- und Reliefabhängigkeit und große räumliche Variabilität einzelner Klimaelemente hervorgerufen.

Maßgebend für das **Niederschlagsgeschehen** im Untersuchungsgebiet sind zyklonale West- und Nordwest-Strömungslagen. Die mittleren jährlichen Niederschlagssummen der Periode 1901–1980 betragen an der Talstation Saalbach (1010 m ü. A.) 1257 mm, an der Bergstation Schmittenhöhe (1973 m ü. A.) 1472 mm (JOHST 2003, HDÖ 2002). Aus diesen Zahlen lässt sich für den Löhnersbach eine durchschnittliche Jahressumme des Niederschlages von ca. 1350 mm abschätzen. Der niederschlagsreichste Monat ist der Juli, die Monate November bis März sind als niederschlagsarm zu bezeichnen. Der Grund für die hohen Niederschlagssummen der Sommermonate sind die häufig auftretenden Gewitter. Von im Mittel 20 Gewittertagen pro Jahr fallen zehn in die Monate Juni bis August (FLIRI 1975). Gewitter entstehen laut FLIRI (1975) häufig dort, wo Täler vom nördlichen Alpenrand unmittelbar Richtung Süden in den Zentralalpenraum führen, oder es bei sich kreuzenden Tälern zu Konvergenzen der Talwindssysteme kommt. Dementsprechend ist der nördlich der Gewitterstraße des Salzachtals gelegene Talschluss des nordost-südwest verlaufenden Löhnersbachgrabens besonders prädestiniert für das Auftreten sommerlicher Wärmegewitter (MARKART & KOHL 1995). Diese Gewitter sind auch bestimmend für die Entstehung von Hochwässern im Löhnersbach. Advektiv herangeführte Regenfronten sind nur vereinzelt Auslöser von Schadenshochwässern im Löhnersbach, es sei denn, in die Front wären auch noch konvektive Schauerzellen eingelagert.

Aufgrund der Klimaverhältnisse und der mittleren Einzugsgebietshöhe von 1705 m ü. A. ist der **Schneeanteil** am Gesamtniederschlag hoch. Er wird anhand der TAC^D-Modellergebnisse und des mittleren Jahresgangs des Niederschlags auf 50 % geschätzt (JOHST 2003). An der Station Schmittenhöhe liegen an 216 Tagen im Jahr mindestens 10 cm Schnee, die mittlere maximale Schneehöhe beträgt 320 cm (Messperiode 1931-1960, FLIRI 1975).

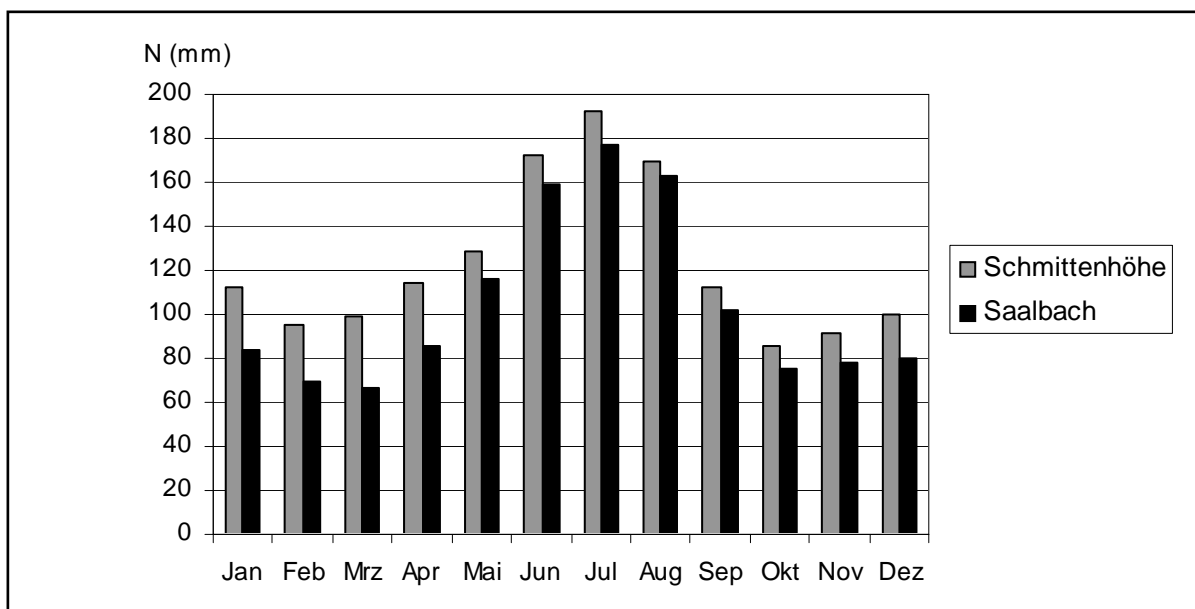


Abbildung 2: Mittlere monatliche Niederschläge der Klimastationen Saalbach und Schmittenhöhe, Messperiode 1931-1960 (HDÖ 2002).

Anhand der 80-jährigen Messreihen der beiden Klimastationen Saalbach und Schmittenhöhe wird eine mittlere Zunahme der Jahresniederschläge von 22,5 mm pro 100 m festgestellt (JOHST 2003) (Abbildung 2).

Entsprechend der ausgeprägten Höhenunterschiede sind im Löhnersbachgebiet räumlich und zeitlich starke Schwankungen der **Lufttemperaturen** zu beobachten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Extremwerte und langjähriges Mittel der Lufttemperatur (HDÖ 2002).

| | Saalbach (1010 m ü. A.) (1981 – 1990) | Schmittenhöhe (1964 m ü. A.) (1971 – 1980) |
|--------------------------------|--|---|
| maximale Lufttemperatur [°C] | 22,7 | 19,7 |
| minimale Lufttemperatur [°C] | -21,4 | - 23,5 |
| Lufttemp. im Jahresmittel [°C] | 5,0 | 1,0 |

Die für eine 57-jährige Periode in Innsbruck gemessene potentielle **Verdunstung** liegt im Jahresmittel bei 478 mm, wobei zwischen März und Juli erstaunlich hohe Monatsmittelwerte gemessen wurden. FLIRI (1975) führt dies auf den im Frühjahr häufig auftretenden Südfohn zurück. Die aus der Wasserbilanz berechnete Verdunstung wird von BAUMGARTNER (1982) mit 350 bis 500 mm beziffert.

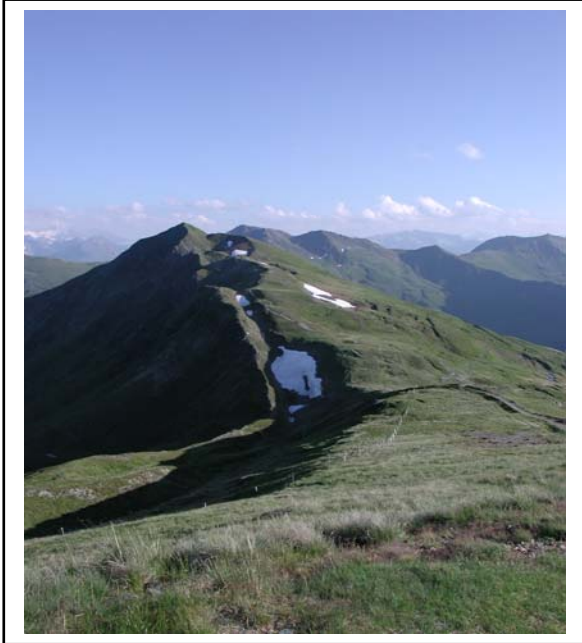
5.3 Geologie

Geologisch liegt das Einzugsgebiet „Löhnersbach“ in der Nördlichen Grauwackenzone der westlichen Ostalpen, einem maximal 25 km breiten Streifen paläozoischer Gesteine, der die kristallinen Zentralalpen von den Nördlichen Kalkalpen trennt (SCHÖNLAUB 1980:265, MÖBUS 1997). Zu den Grauwacken zählen im Allgemeinen paläozoische Sedimentite aus Quarzit-, Kiesel- und Tonschieferfragmenten (MURAWSKI & MEYER 2004). Das Hauptgestein der Nördlichen Grauwackenzone ist der phyllitische "Wildschönauer Schiefer". Die schwach metamorphen Gesteine dieses Naturraums sind sehr verwitterungsanfällig und bilden einen stellenweise mächtigen Schuttmantel, der zu kontinuierlichen Kriechbewegungen und plötzlichen Massenbewegungen neigt (VON RINALDINI 1924). Durch ihre sanfteren, mittelgebirgsähnlichen Formen unterscheidet sich die Nördliche Grauwackenzone deutlich von den schroff ansteigenden Nördlichen Kalkalpen und den südlich gelegenen, durch das Salztal abgegrenzten, hohen Bergkuppen der Hohen Tauern.

Die weitgehend kalkfreien Gesteine im Einzugsgebiet „Löhnersbach“ bilden eine Wechselfolge von feinklastischen, dünnblättrigen Tonschiefern und sandsteinartigen Quarzphylliten. Vor allem im mittleren Klinglerkar sind zudem Einlagerungen basischer Vulkanite und Marmore zu finden (KIRNBAUER ET AL. 1996). Die Festgesteine sind nach PIRKL (1989) nur an Steilhängen und in den Kammregionen aufgeschlossen. In den übrigen Bereichen sind sie von stellenweise mächtigen sandig-schluffigen oder grusig-blockigen Ablagerungen des Quartärs überdeckt.

Das deutlich ausgeprägte Störungsmuster mit steil stehenden Großklüften (Foto 4) und zahlreichen Verwerfungen ist auf eine sehr junge, tektonische Phase mit rezent andauernden Auswirkungen zurückzuführen. Die geologisch bedingte Instabilität des Untergrunds wurde durch glaziale und postglaziale Vorgänge noch verstärkt. Nach Abschmelzen des mächtigen Salzachgletschers kam es infolge der Druckentlastung vor

allen an den glazigen übersteilten Hängen zu zahlreichen Hangrutschungen, Sackungen und Talzuschüben, die im Schusterbauerngebiet noch bis heute aktiv sind. Resultat



der ausgeprägten hangdynamischen und tektonischen Prozesse der Vergangenheit ist eine ungewöhnliche hydrogeologische Situation, ein Nebeneinander von dichten, schnell zum Abfluss beitragenden Flächen und Bereichen mit ausschließlicher Tiefensickerung. Während auf den durch Eisauflast und Gleitbewegungen verdichteten Karböden vielfach Vernässungsflächen entstanden sind, wird in Bereichen mit großflächigen und tiefgründigen Felsauflockerungen der Niederschlag vor allem in die Tiefe abgeführt und tritt an Quellhorizonten mit beständiger Schüttung wieder aus (KIRNBAUER ET AL. 1996).

Foto 4: Bergzerreißung infolge von Sackungsprozessen.

5.4 Morphologie

In der maximalen Höhendifferenz von 1149 m zwischen dem Pegel Rammern (1100 m ü. A.) und dem Hochkogel (2249 m ü. A.) zeigt sich die gemäßigt alpine Topographie des Untersuchungsgebietes „Löhnernbach“. Die Abbildung 3 zeigt die Höhenverteilung im Gebiet auf Basis des Digitalen Höhenmodells.

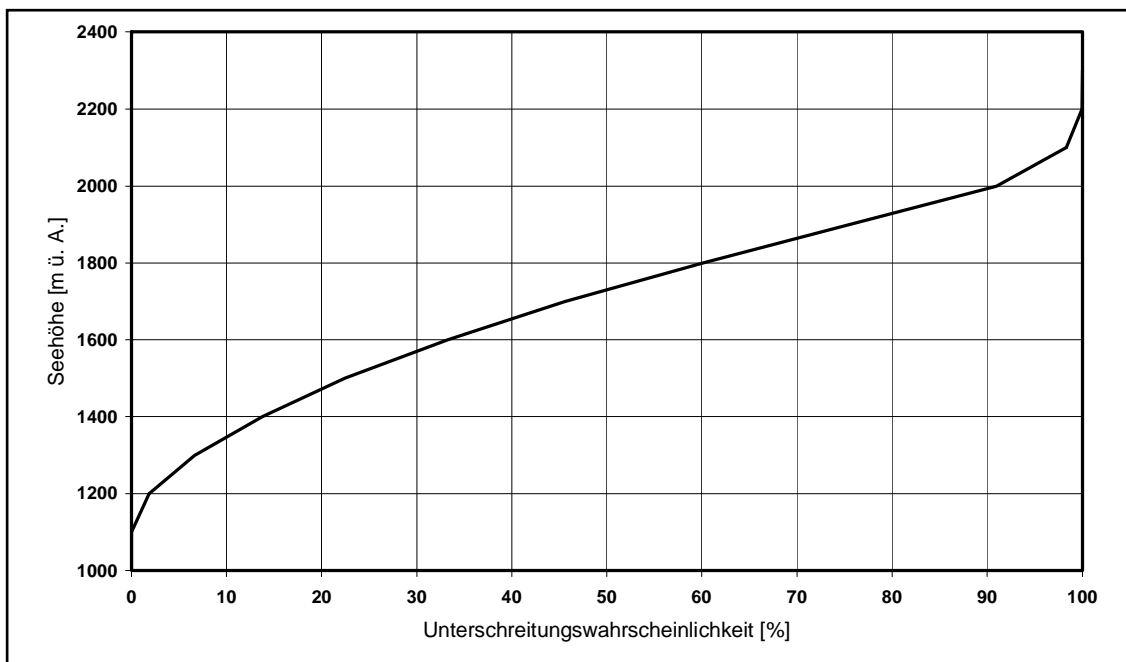


Abbildung 3: Höhenverteilung im Untersuchungsgebiet „Löhnernbach“ auf Basis des DHM mit 10 m Auflösung.

Im Vergleich zu den Zentral- und Kalkalpen wurden die glazialen Formen in der Nördlichen Grauwackenzone nicht so scharf ausgebildet und haben zudem eine stärkere holozäne Überprägung erfahren. Die Kitzbüheler Alpen waren fast vollständig vom Eis bedeckt und die geringe Bewegung des Eises bewirkte keine ausgeprägte Glazialerosion. Zur Zeit der Eishochstände lag die Eisoberfläche auf rund 2000 m ü. A. womit im Löhnersbachgebiet nur die höchsten Gipfel als Nunataker aus dem Eis ragten. Auf dieser Höhe sind mehr oder weniger stark entwickelte Kare zu finden (Foto 5). Aufgrund der nacheiszeitlichen, großflächigen Hangbewegungen (Rutschungen, Sackungen, Kriechprozesse) ist eine sichere Unterscheidung zwischen Moränenmaterial und Hangschutt im Untersuchungsgebiet schwierig (KIRNBAUER ET AL. 1996, TILCH ET AL. 2006b, VON RINALDINI 1924 ff).

Die Hänge des Löhnersbachgebiets sind von steilen Kerbtälern durchzogen, deren Gewässer sich tief in den Schuttmantel eingegraben haben. Im Mündungsbereich der Seitengräben in das relativ flache, durch grobe Blöcke und einen mächtigen Schotterkörper gekennzeichnete Hauptgerinne, sind breite Schwemmfächer zu finden (Foto 6).

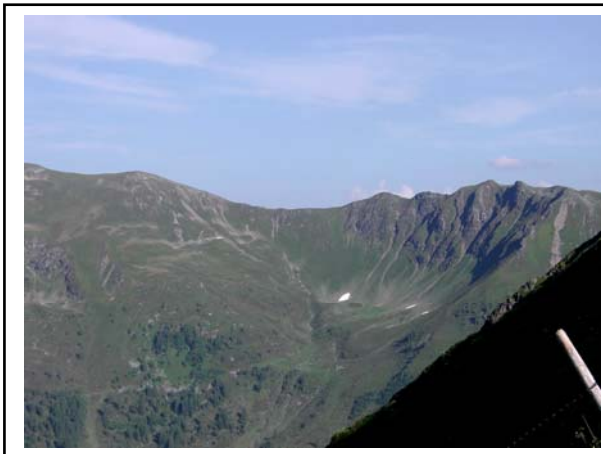


Foto 5 (links): nordost exponiertes Kar mit tief eingeschnittenen Runsen östlich des Hochkogels.
Foto 6 (rechts): Schotterkörper im Unterlauf eines Seitengrabens.

5.5 Pedologie

Auf Grundlage der Kartierung von MARKART & KOHL (1993a) treten im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ im Wesentlichen vier Bodentypen auf: Böden der Braunerde- und der Podsol-Reihe, rankerartige Initialböden und hydromorphe Böden (Abbildung 4). Je nach Höhenlage, Relief, Feuchteverhältnissen, Vegetation, Art und Intensität der Nutzung entwickelten sich vielfältige Übergangsformen.

JOHST (2003) gibt eine ausgezeichnete Zusammenfassung der Arbeiten von MARKART & KOHL (1993a, b): „Auf der orographisch rechten Talseite lässt sich deutlich eine klima- und vegetationsbedingte Höhenzonierung erkennen. Die Braunerden werden ausgehend vom Talgrund hin zur Waldgrenze zunehmend podsoliger und in den oberen Hangbereichen durch mächtige Eisenhumuspodsole unter Zwergsträuchern ersetzt. In den Kammregionen sind unter Borstgrasrasen geringmächtige Ranker und an Steilhängen Rohböden zu finden. Die intensive Bewirtschaftung der linken Talseite führte über die Jahrhunderte zu weniger strukturierten Verhältnissen. Durch den fehlenden Eintrag niedermolekularer Säuren (Schwendung der Zwergsträucher) und die erhöhte

Nährstoffzufuhr (Düngung und Beweidung) entwickelten sich beispielsweise podsolige Böden zu Braunerden. Seit dem Ende der intensiven Mahd- und Weidenutzung konnten die Zwergstrauchheiden ihren Flächenanteil wieder stark erhöhen, die Bodenentwicklung mit der Änderung der Vegetation jedoch nicht Schritt halten. Eine homogene Vegetationsdecke entspricht somit nicht unbedingt einem einheitlichen Bodentyp (MARKART & KOHL 1993b).

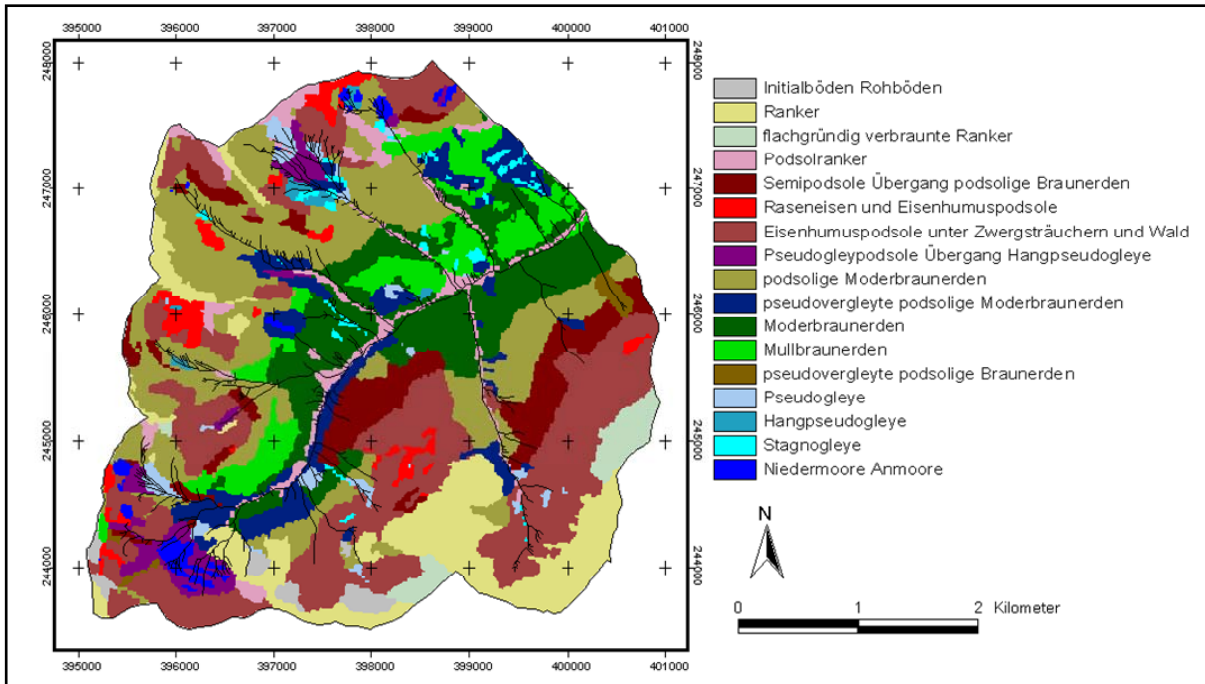


Abbildung 4: Die Böden des Untersuchungsgebietes „Löhrsbach“ (Kartographie: JOHST 2003, Datengrundlage: MARKART & KOHL 1993a), Auflösung: $10 \times 10 \text{ m}^2$, Pastelltöne: Ranker, Rottöne: Podsole, Grüntöne: Braunerden, Blautöne: Gleye.

Hydromorphe Böden sind vorwiegend auf der orographisch linken Talseite zu finden. In den Senken der Kare und in Gerinnenähe treten Gleye und Niedermoore auf. Relativ große Flächen nehmen laut MARKART & KOHL (1993a) die stauwasserbeeinflussten Bodentypen Pseudo- und Stagnogleye ein, die durch das Vorhandensein einer stauenden Schicht (Eisenortssteinschicht der Eisenhumuspodsole oder begrabene Ah-Horizonte) oder kontinuierliche Quellwasserzufuhr entstanden sind. Als Beispiele seien die ausgedehnten Feuchflächen im Klinglerkar und im oberen Neuhausengraben genannt (Abbildung 8).

Detaillierte bodenphysikalische Untersuchungen an 62 Bodenprofilen im Untersuchungsgebiet „Löhrsbach“ (MARKART & KOHL 1993b) ergaben eine durchweg sandig lehmige Textur mit hohem Humus- und Skelettanteil. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die mittlere nutzbare Feldkapazität sind mit 10^{-5} m/s bzw. $23 \text{ mm}/10 \text{ cm}$ als hoch einzustufen. Hervorzuheben ist, dass die Variabilität der hydraulischen Bodenkenngrößen bei den Waldstandorten am größten ist. So weisen die Waldböden sowohl die besten als auch die schlechtesten Infiltrationseigenschaften auf (MARKART & KOHL 1993b). Eine Beeinflussung der Infiltrationseigenschaften durch Beweidung oder durch die Anlage von Skipisten konnte im Untersuchungsgebiet nicht nachgewiesen werden. Das durch andauernde Massenbewegungen geprägte Gebiet weist ein kleinräumiges Mosaik an Bodentypen und eine hohe Schwankungsbreite der hydraulischen

schen Eigenschaften auf. Somit ist eine Differenzierung des Abflussverhaltens nach dem Bodentyp nicht sinnvoll (MARKART & KOHL 1993b).“

5.6 Landnutzung

Insgesamt wird das Untersuchungsgebiet „Löhrnersbach“ von subalpinem Fichten-Hochwald sowie verwandten Waldgesellschaften (Flächenanteil: 37 %) und von den Zwergstrauchheiden der Hochlagen (Alpenrosen- und Heidekrautgesellschaften) (35 %) dominiert. Skipisten sind vorhanden, nehmen jedoch nur einen sehr geringen Flächenanteil ein und befinden sich auf der orographisch linken Talseite. Siedlungsflächen beschränken sich nur auf die einzelnen Almen, Ackerflächen sind keine vorhanden (Abbildung 5).

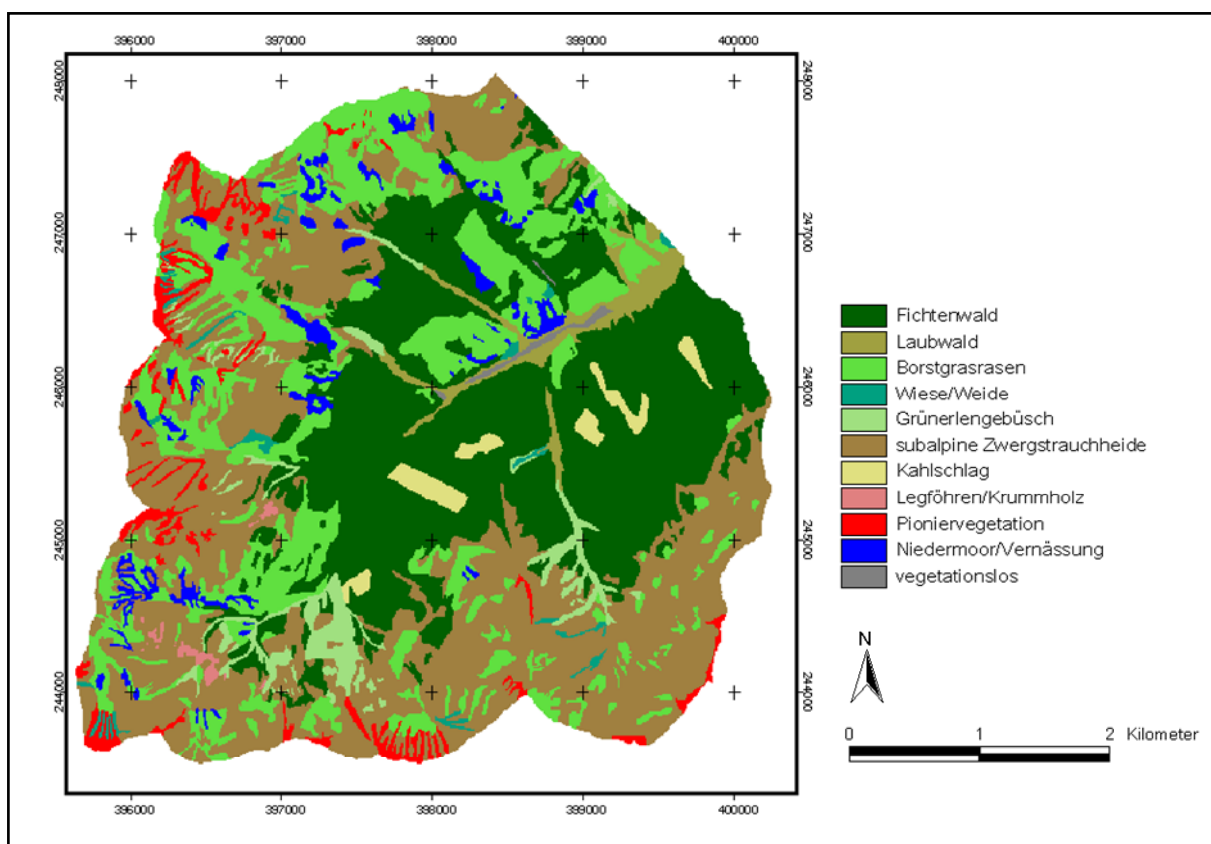


Abbildung 5: Die Vegetation im Untersuchungsgebiet „Löhrnersbach“ (Kartographie: JOHST 2003, Datengrundlage: BURGSTALLER & SCHIFFER 1993, Pflanzengesellschaften nach ZILLGENS 2002 zusammengefasst), Rastergröße: 10*10 m², grün und braun: kein Oberflächenabfluss, rot: quasi Hortonischer Oberflächenabfluss, blau: Sättigungsflächenabfluss.

Die Vegetation auf der orographisch rechten, nordwest exponierten Talseite ist geprägt durch den bis zur natürlichen Waldgrenze hinauf reichenden Fichtenwald, der als Monokultur bewirtschaftet und in Streifen, der Falllinie folgend, geschlägert und anschließend sofort aufgeforstet wird. Der Wald zeigt trotz der anthropogenen Beeinflussung großflächig Unterwuchs aus Heidelbeer- und Farngesellschaften, die der Entstehung von Oberflächenabfluss entgegenwirken und die tiefgründige Versickerung begünstigen. Auf den Flächen oberhalb der Waldgrenze finden sich praktisch flächendeckend alpine Zwergstrauchheiden, überwiegend aus *Rhododendretum* gebil-

det. Auch unter diesen Pflanzengesellschaften hat sich eine gut einen halben Meter starke Mull- und Moderschicht gebildet, die ihrerseits viel Wasser speichern kann und den Rest nur langsam an den mineralischen Untergrund abgibt, wo er tiefgründig versickert. MARKART & KOHL (1993b) beobachteten bei Beregnungsversuchen auf Zwergstrauch-Flächen im Untersuchungsgebiet weder Oberflächen- noch Zwischenabfluss.

Die orographisch linke Seite des Löhnersbaches ist durch die seit Jahrhunderten geübte Alpnutzung geprägt. Hier, auf der Sonnseite des Tales, bestanden bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts Dauersiedlungen, in deren Umgebung der Wald großflächig gerodet worden war. Die gerodeten Flächen werden heute als Weideland genutzt. Es dominieren die für die subalpine Stufe im Kristallin bei extensiver Beweidung typischen Borstgras-Weiderasen. In Almnähe sind infolge der bis heute noch andauernden intensiven Mahd und Beweidung Goldhafer- und Reitgrasgesellschaften zu finden. Ackerbau und Mähwiesen finden sich heute nicht mehr, doch sind Spuren dieser früheren Nutzung noch erkennbar. Aufgrund der Sonnen-Exposition können die Hänge so stark austrocknen, dass die Kultur von Mähwiesen und Weideland gefährdet ist. Daher wurden der Höhenschichtenlinie folgende Bewässerungsgräben angelegt, die von natürlichen Gerinnen abgezweigt und planmäßig immer wieder abgedämmt wurden, sodass das Wasser breitflächig über die Wiesen abfloss. Durch diese Technik wurde auch das Wieder-Einwandern der an sich standortgerechten, aber eher Trockenheit liebenden Zwergstrauchheide in die Weideflächen verhindert. Heute sind diese alten Bewässerungsgräben mangels Pflege verfallen, führen aber häufig noch Wasser, das an ein und derselben Stelle austritt und dort zu Dauervernässung und häufig auch zu lokalen Rutschungen führt. Die nicht für die Almwirtschaft genutzten Flächen in Talnähe sind mit Fichtenwald bestanden, an den in den höheren Regionen Zwergstrauchheide und noch höher oben alpine Rasengesellschaften anschließen. Vegetationslose Flächen (Blaiken) finden sich regelmäßig an Einhängen der drei Wildbäche Schusterbauerngraben, Marxtengraben und Neuhausengraben sowie in den Felspartien der Gipfelregionen. Die Schutthalden an den Begrenzungen der Kare sind schon weitgehend bewachsen, was darauf schließen lässt, dass die Verwitterung der anstehenden Sandstein-Tonschiefer nur mehr langsam voranschreitet.

5.7 Hydrogeologie und Hydrologie

Die Täler der Kitzbüheler Alpen verlaufen entlang von tektonischen Störungen oder Kontaktzonen unterschiedlicher Gesteine. Das dichte Gerinnenetz ist durch das Vorherrschen gering leitender Phyllite in der Nördlichen Grauwackenzone begründet. Die Flussschwindigkeit für das Löhnersbachgebiet, berechnet aus dem detaillierten Gewässernetz von PIRKL (1989), ist mit $3,4 \text{ km/km}^2$ sehr hoch (Abbildung 6). Sie ist auf der durch Weidenutzung geprägten sonnigen Talseite deutlich höher als auf der stärker bewaldeten Schattenseite. Die Länge des Löhnersbachs vom Pegel Rammern bis in das Klinglerkar beträgt rund 5 km. Das auf Basis des digitalen Höhenmodells bestimmte mittlere Gefälle der Gewässer liegt bei 38 %. Insgesamt hat der Löhnersbach aufgrund des zeitlich sehr variablen Abflusses, des großen Gefälles seiner Seitengräben und des hohen Geschiebepotentials den Charakter eines Wildbaches (DIN 19663:3).

Der ziemlich gestreckte Talverlauf des Löhnersbaches folgt ungefähr der Linie von SSW nach NNE. Die orographisch linke und rechte Seite des Tales unterscheiden sich recht markant, sowohl hinsichtlich der Morphologie als auch der Vegetation. Bis zum Pegel Rammern münden linksufrig drei Wildbäche mit je ca. 1 km² Einzugsgebietsfläche, die in markanten Karmulden entspringen. Die Höhenrücken zwischen diesen Karren zeigen Doppelgrate, die auf die erwähnten postglazialen hangtektonischen Bewegungen schließen lassen (Foto 4). Generell ist die linke Talseite des Löhnersbaches gekennzeichnet durch viele kleinere Massenbewegungen, eine große Anzahl von Quellen und entsprechende Dichte des Gerinnenetzes. Die Quellhorizonte finden sich häufig an den talseitigen Begrenzungen der Massenbewegungen. Dort sind sie verbunden mit Vernässungszonen, die je nach Schüttung der Quellen großflächig überströmt oder von kleinen Rinnsalen durchzogen sind. Nur wenige der Quellen schütten permanent, die anderen versiegen bei länger anhaltender Trockenheit, springen aber wenige Tage nach ausgiebigen Niederschlägen wieder an. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Einzugsgebiete solcher Quellen seicht und klein sind.

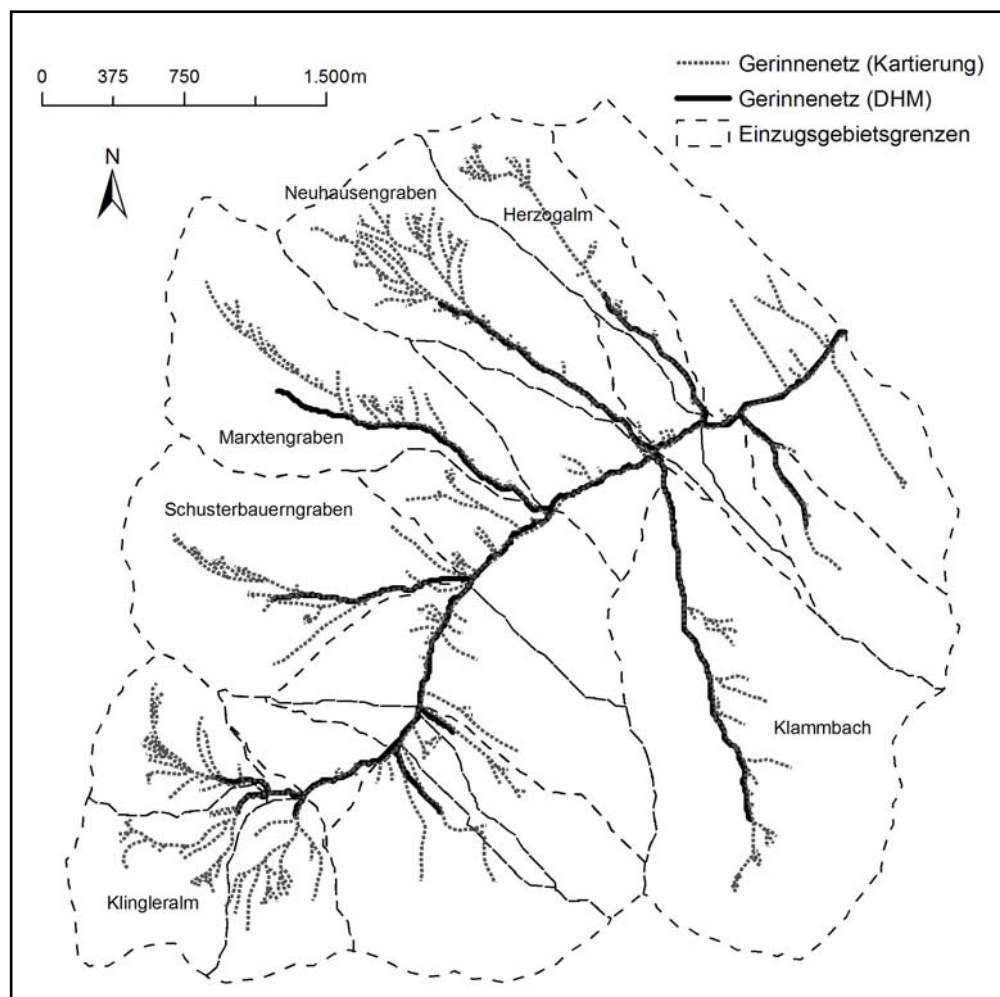


Abbildung 6: Grenzen des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ mit Teileinzugsgebieten und Gerinnenetz, das zum einen aus dem Digitalen Höhenmodell generiert (durchgezogene Linien) und zum anderen im Gelände kartiert wurde (gepunktete Linien).

Langjährige Mittelwerte für die Abflüsse des Löhnersbaches anzugeben ist angesichts der Beobachtungsdauer (seit 1991) nicht möglich (und war auch nie Zweck der Untersuchungen in diesem Einzugsgebiet). Zur Charakterisierung des durchschnittlichen

hydrologischen Regimes werden hier die im Hydrographischen Jahrbuch 2008 veröffentlichten Daten für den Vorfluter Saalach (am Pegel Viehhofen, Reihe 1961 – 2007) wiedergegeben (Tabelle 2).

Tabelle 2: Gewässerkundliche Hauptwerte der Saalach, Pegel Viehhofen, HDÖ (2008).

| Gewässerkundlicher Hauptwert | Saalach 150,8 km ² * |
|---|------------------------------------|
| HHQ [m ³ s ⁻¹] | 137 (12.08.2002) |
| MHQ [m ³ s ⁻¹] | 43,0 |
| MQ [m ³ s ⁻¹] | 5,27 |
| MNQ [m ³ s ⁻¹] | 0,94 |
| NNQ [m ³ s ⁻¹] | 0,013 (01.01.1983) |
| MHq [l s ⁻¹ km ⁻²] | 285,15 |
| Mq [l s ⁻¹ km ⁻²] | 34,9 |
| MNq [l s ⁻¹ km ⁻²] | 6,23 |

* bis 1979 137 km²

Bei den dort angegebenen Werten erscheint das größte beobachtete Hochwasser mit HHQ = 137 m³/s und einer zugehörigen Spende von HHq = 0,908 m³/(s*km²) eher klein. Eine regionale Untersuchung zum Abflussgeschehen im oberen Einzugsbereich der Saalach und ihrer Zubringer, durchgeführt für die Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW) zeigt jedoch, dass dieser Wert in der Größenordnung eines hundertfünfzig-jährlichen Ereignisses einzuordnen ist (Tabelle 3).

Tabelle 3: Regionale Untersuchung der Hochwässer im Bereich Saalach Oberlauf (KIRNBAUER 1996).

| EDV-Nr | Pegel | Gewässer | AE km ² | W seit Jahr | Q seit Jahr | HQ150 m ³ /s | Hq150 m ³ /(s*km ²) |
|--------|------------|-------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------------------|---|
| 203174 | Dienten | Dientenbach | 53,4 | 1907 | 1971 | 57,7 | 1,081 |
| 203463 | Viehhofen | Saalach | 150,8 | 1907 | 1961 | 116,0 | 0,769 |
| 203471 | Saalfelden | Urslau | 119,5 | 1912 | 1951 | 112,0 | 0,937 |
| 203489 | Uttenhofen | Leogangbach | 112,3 | 1950 | 1961 | 71,9 | 0,640 |
| 203497 | Weissbach | Saalach | 567,5 | 1923 | 1959 | 428,0 | 0,754 |
| 203505 | Lofer | Loferbach | 107,4 | 1959 | 1961 | 108,0 | 1,006 |

Die während der Beobachtungsdauer am Hauptpegel Rammern festgestellten Abflüsse passen in das durch die Hauptzahlen an der Saalach gezeichnete Bild. Das in der Jahresreihe am Pegel Rammern registrierte größte Hochwasser, am 27.07.1995 mit ca. 18 m³/s (entsprechend einer Abflussspende von q = 1,125 m³/(s*km²)) war allerdings in Wirklichkeit wesentlich größer, denn der Pegel liegt knapp unterhalb einer von der WLW errichteten Dosiersperre, in deren Abflusssektion durch einen Rechen die Abtrift von Wildholz verhindert wird. Beim genannten Hochwasser war dieser Effekt voll wirksam, wodurch es zum Rückhalt des Hochwassers im Speicher und somit zu einer wesentlichen Reduktion des Hochwasserscheitels im Unterwasser der Sperre kam. Der Zufluss zur Sperre kann mit ca. 40 m³/s (q = 2,5 m³/(s*km²)) abgeschätzt werden.

Die Abflussregime der Saalach und des Löhnersbachs können dem nivalen Regime-typs zugeordnet werden und weisen ausgeprägte Maxima im Mai auf, die durch inten-

sive Schneeschmelze begründet sind (Abbildung 7). Mit steigender Verdunstung und abnehmender Schneebedeckung nehmen die Abflussmengen im Sommer trotz steigender Niederschläge ab. Resultat der winterlichen Schneeakkumulation ist ein relativ konstanter Niedrigwasserabfluss im Winterhalbjahr und ein Abflussminimum im Januar bzw. Februar.

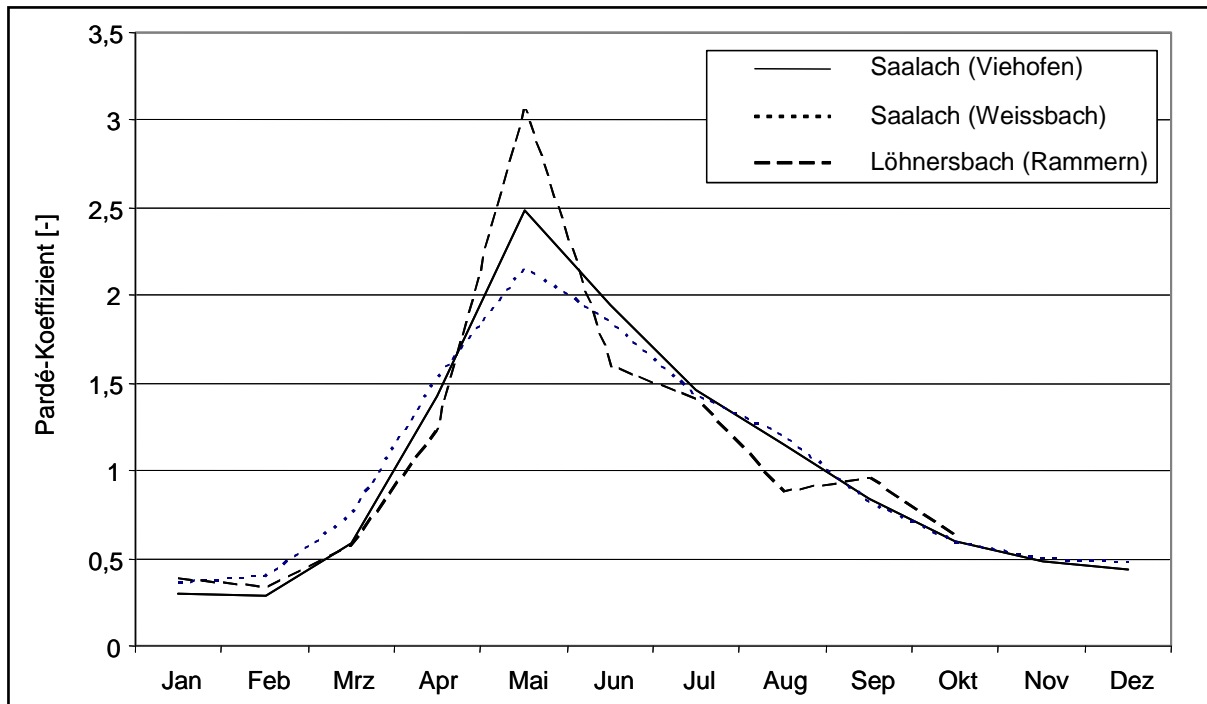


Abbildung 7: Abflussregime der Saalach (1961–1999; HDÖ, 2002) und des Löhnersbachs (1995–2000) nach Pardé (MQmon/MQjahr).

6 Methoden

6.1 Feldmethoden

6.1.1 Qualitative Beurteilung der hydrologischen Gegebenheiten

Um ein erstes Verständnis über die Abflussmechanismen im Einzugsgebiet Löhnersbach zu erlangen und um geeignete Standorte für die verschiedenen Messeinrichtungen auszuwählen, wurde im Sommer 1990 eine eingehende Gebietsbegehung mit Dokumentation durchgeführt, die im Folgenden basierend auf Kirnbauer & Haas (1990) dargestellt wird.

Hydrologisch relevante Gebietseigenschaften dokumentieren sich in charakteristischen Landformen, Kleininformationen und kleinsten Kennzeichen. Zum Beispiel zeigen Teile des Einzugsgebietes „Löhnersbach“ auf allen Maßstabsebenen Kennzeichen von Hanginstabilitäten: Während ein deutlich sichtbarer Anriss an einem Rasenhang (Foto 8) oder ein in Bewegung befindlicher Hang unter Wald (Foto 9, mit einer wegen der Hanginstabilität entwurzelten Fichte) als lokales Phänomen gedeutet werden kann, zeigt sich die großflächige Zerrüttung des Untergrundes an der völlig zerrissenen Grasnarbe eines konvex gekrümmten Wiesenhanges (Foto 9, Bereich Schusterbauerngraben) oder einer stark flächenhaften Zerstörung des Waldbestandes (Foto 9, Bereich Schusterbauerngraben).



Foto 7: Anriss einer Rasenfläche.

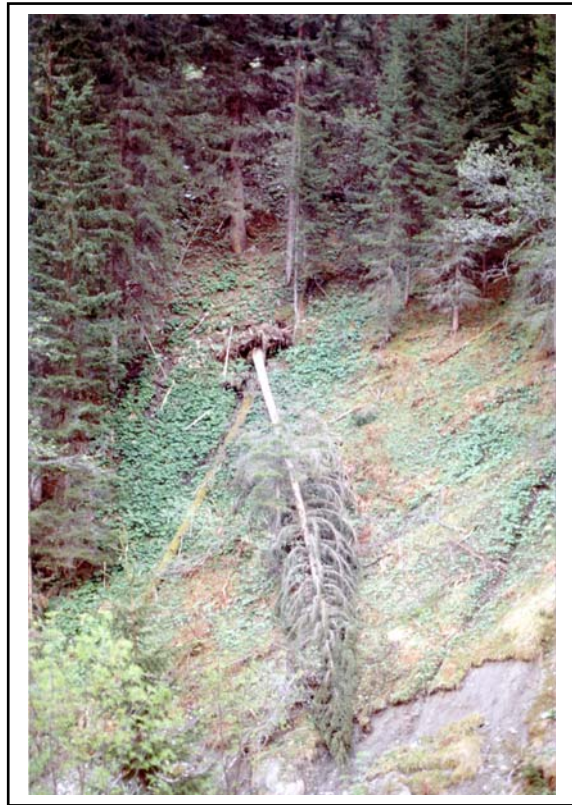


Foto 8: In Bewegung befindlicher bewaldeter Hang.

Derartige Auflockerungen haben ihre Auswirkungen auf das hydrologische Geschehen in Form von relativ hohen Versickerungsraten in Verbindung mit nach Niederschlägen rasch anspringenden, starken Quellen. Bewegungsbedingte Schäden an Vegetationsdecke und Oberboden können zu vermehrtem Oberflächenabfluss und zu Erosion führen. Erosion und Sedimentation prägen das Landschaftsbild des Löhnersbaches und insbesondere seiner linksseitigen Seitengräben.



Foto 9: Die Zerrüttung des Untergrundes zeigt sich an der Geländeoberfläche unter Grünland (linkes Foto) und unter Wald (rechtes Foto).

Noch nach drei Jahren sind im Talgrund die umfangreichen Geschiebeablagerungen erkennbar (Foto 10), die dem Löhnersbach während des Hochwassers 1987 von seinen Seitenbächen als Mureinstöße zugeführt wurden, und die in einer Aufweitung des Ta-

les liegen geblieben sind. Zum Teil hat der Löhnersbach die jungen Alluvionen wieder durchschnitten und abtransportiert. Das transportierte Größtkorn erlaubt gewisse Abschätzungen der Schleppkraft und somit des Durchflusses.



Foto 10: Ausschotterung des Löhnersbaches an einer Talerweiterung (Spuren des Hochwassers von 1987).

Im Marxtengraben ist durch das Hochwasser 1987 der Hangfuß der Lockersedimente erodiert worden (Foto 11).



Foto 11: Erosion im Marxtengraben: Am Hangfuß Unterspülung der Lockersedimente mit Nachrutschungen.

Dadurch wurde eine schon zum Stillstand gekommene Hangrutschung wieder aktiviert und ist seither wieder in Bewegung. In den Marxtengraben entwässernde Quellen (Foto 18) haben zusätzliche, seitliche Erosionsrinnen geschaffen. Ein Stück weiter oberhalb zeigt der Marxtenbach einen charakteristischen Anriss am Prallhang einer Bach-

laufkrümmung (Foto 13). Im selben Bereich hat während des Hochwassers 1987 ein Seitenbach des Marxtengrabens rückschreitend zu erodieren begonnen, hat aber an einigen größeren Steinen eine temporäre Erosionsbasis gefunden (Foto 14, Pfeil "A") als der Abfluss weniger wurde.

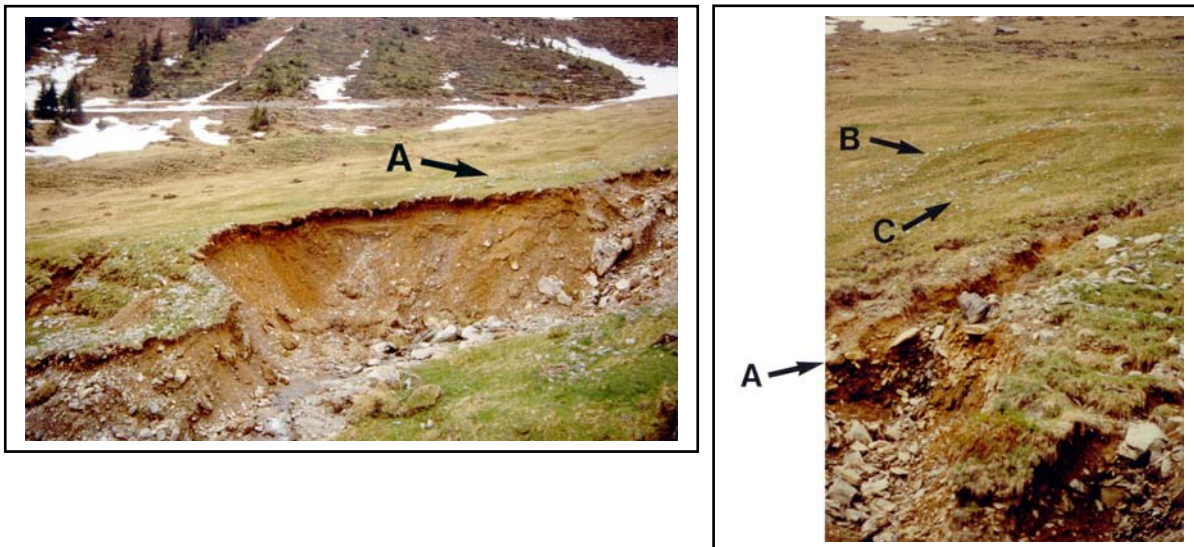


Foto 12 (links): Erosion am Prallhang im Oberlauf des Marxtengrabens. Vom Oberflächenabfluss transportiertes Gestein ist auf der Grasnarbe liegengeblieben.

Foto 13 (rechts): Rückschreitende Erosion durch einen Seitengraben des Marxtengrabens (temporäre Erosionsbasis). Zu sehen sind Spuren der Umströmung einer Geländekuppe.

Spuren der Wasserbewegung im Gelände lassen Rückschlüsse auf die aufgetretenen Abflussmechanismen zu. Deutliche Spuren von Oberflächenabfluss sind im Bereich des Marxtengrabens zu erkennen (Foto 13 und 14). Während in Foto 13 die vom Oberflächenabfluss transportierten und auf der Grasnarbe bei Hochwasserrückgang liegengebliebenen Steine (Pfeil "A") schwer erkennbar sind, zeigt das im Hintergrund von Foto 14 liegende Geschiebe (Pfeile "B und "C") die Umströmung einer im Gelände kaum erkennbaren Kuppe ganz klar an. Nahezu flächendeckend war das Wasser, grobe Steine mit sich führend, über den Hang heruntergeströmt (Foto 15, Bereich A - B) und hatte beim Abklingen des Ereignisses das Gestein liegengelassen. Aus dem Entstehungsgebiet dieses Oberflächenabflusses, einem vegetationslosen Felsenkar, zieht ein Anriss herunter, der zur Zeit der Aufnahme (18.5.1990) noch mit Schnee verfüllt war (Foto 16).

Im unteren Teil ist das Wasser aus dem Graben ausgeföhrt und hat Gestein mitgerissen, das bei Hochwasserrückgang liegengeblieben ist (siehe Detailskizze neben Foto 16). Derartige Spuren von Oberflächenabfluss sind äußerst selten. Sie entstehen nur bei außerordentlich großen Ereignissen. In besonderen Fällen wird auch unterirdische Wasserbewegung an der Oberfläche sichtbar (Foto 15): Oberflächennaher unterirdischer Abfluss ("Interflow") ist an der Oberfläche ausgetreten und hat durch Auswaschen der feinen Bodenteilchen zu einem hydraulischen Grundbruch geführt, grobes Gestein und Grasnarbe sind nachgebrochen. Die in diesem Bereich (zwischen Neuhausen- und Marxtengraben) herrschende großflächige Hanginstabilität (Foto 7 bis Foto 9) begünstigt einen solchen Vorgang.

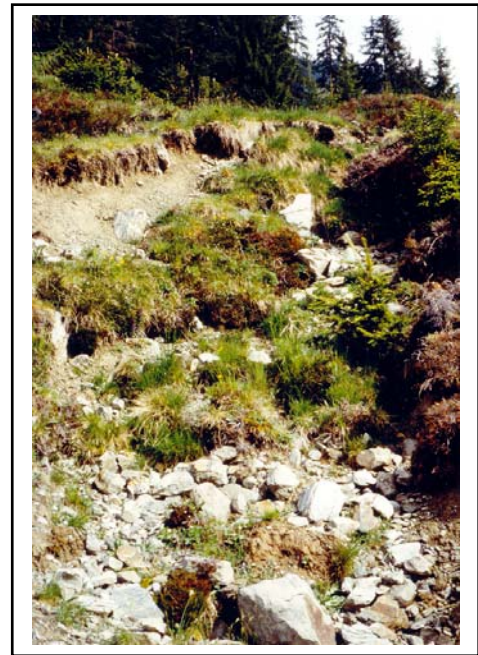


Foto 14 (oben): Hinweise auf massiven Oberflächenabfluss aufgrund beachtlicher Mengen an Gerölle an der Geländeoberfläche. Bemerkenswert: Die Grasnarbe wurde nicht aufgerissen.

Foto 15 (rechts): Oberflächennaher unterirdischer Abfluss (Interflow) ist an der Oberfläche ausgetreten und hat durch das Auswaschen des Feinbodens zu einem hydraulischen Grundbruch geführt. Grobes Gestein und die Grasnarbe sind nachgebrochen.

In Grobporen des Untergrundes können Strömungen entlang bevorzugter Wasserwege auftreten (preferential flow), die dann sichtbar werden, wenn die Wasser führende Schicht durch Erosion (oder durch Wegebau) angeschnitten wird. Eine derartige Erscheinung (Foto 18 bis Foto 19) wird im Erosionsbereich des Marxtenbaches (Foto 11) bei der Marxten-Grundalm sichtbar. Kräftige Quellen treten in der Höhe einer grobkörnigen Schicht aus (Foto 18 und Foto 18), die auch dort erkennbar ist, wo die Quellen nicht aktiv sind (Foto 19). Foto 19 vermittelt einen Eindruck vom untersten Teil des Nährgebietes dieser Quellen, deren Zufluss bis zum Quellaustritt mehrere hundert Meter im Untergrund hangabwärts strömt. Dieser Vorgang steht in Widerspruch zu einer bei Abflussmodellen häufig gebrauchten Modellvorstellung, die von einem Speisen des Vorfluters aus einem geschlossenen Grundwasserkörper ausgeht.

Als erste Grundlage für den Aufbau eines hydrometeorologischen Messnetzes wurden in Zusammenarbeit mit dem Projekt „Massenbewegung“ der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Projektleitung Dr. Pirkl) hydrologische und hydrochemische Messungen im Einzugsgebiet an insgesamt 85 Standorten in der Zeit von 10.6.1990 bis 20.09.1990 durchgeführt. Auf Grundlage der Messung wasserchemischer Parameter (elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur) und des Abflusses an den Ausläufen der verschiedenen Teileinzugsgebiete Klambach, Marxtenbach, Schusterbauerngraben und Neuhausengraben sowie an Quellaustritten und Kleinstgerinnen zeigen sich Unterschiede in der Abflussspende. Diese spiegeln ein differenziertes Abflussverhalten der Gebiete wider, was auf unterschiedliche Abflussbildungsprozesse schließen lässt. Ausgerichtet auf die Analyse dieser spezifischen Abflussmechanismen wurde

beginnend im Jahre 1992 sukzessive ein hydrologisches und meteorologisches Messnetz aufgebaut, das im Kapitel 6.1.2 dargestellt wird.

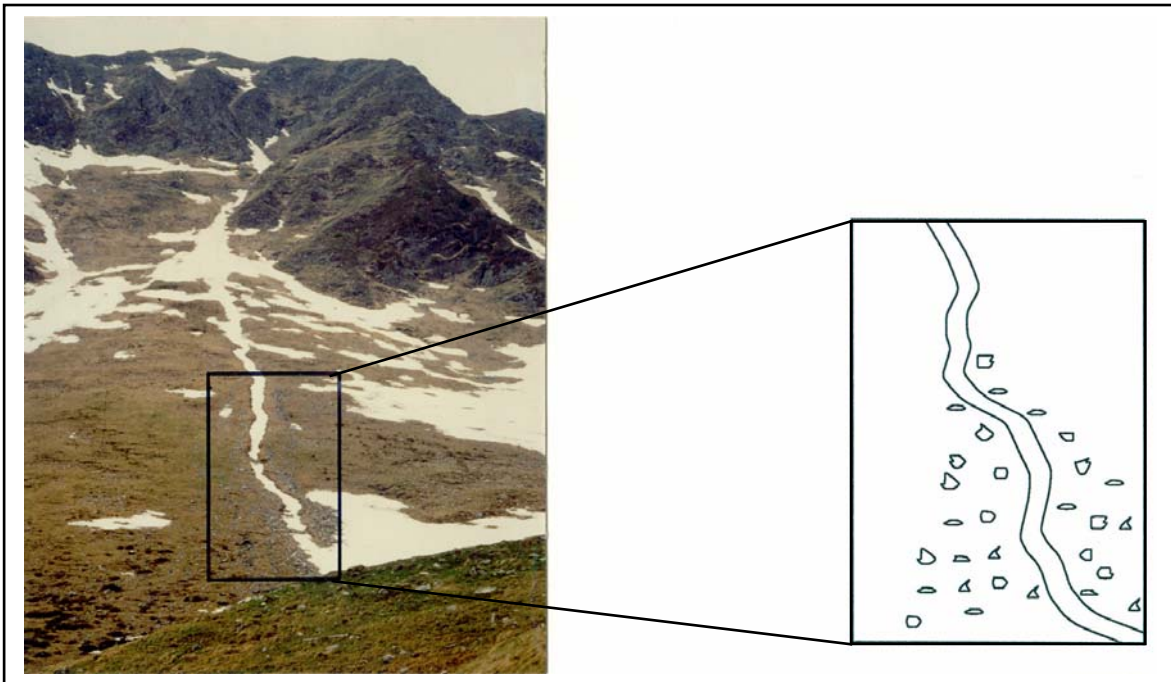


Foto 16: Der in einer Erosionsrinne abgelagerte Schnee modelliert diese Rinne in der momentanen Ausaperungsphase deutlich heraus. Bemerkenswert: Im unteren Bereich sind Wasser und Geschiebe aus der Erosionsrinne ausgeferrt und das Geschiebe ist liegeengeblieben.



Foto 17: Schichtquelle an dem durch Erosion des Marxtenbaches (siehe Foto 11) freigelegten Ausbiss der grobporigen Schicht.



Foto 18: Vermehrt vorkommende Quellaustritte entlang der in Foto 18 erwähnten Schicht.



Foto 19: Die grobporige Schicht erstreckt sich über mehrere hundert Meter.

6.1.2 Messnetz mit Messzeiträumen

Das Messnetz im Einzugsgebiet des Löhnersbaches entstand zum einen basierend auf den qualitativen Beobachtungen der Geländebegehungen (vgl. Kap. 6.1.1) und zum anderen aus der Zielsetzung des Forschungsprojektes „Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung“ der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, nämlich Abflussvorgänge auf unterschiedlichsten Maßstabsebenen, von wenigen Hektar bis zu ca. zwanzig Quadratkilometern zu beobachten, zu messen und zu verstehen, um sie auf diese Weise einer phänomenorientierten mathematischen Modellierung zugänglich zu machen.

Im Zentrum des Interesses stehen die bei der Abflussentstehung wirksam werdenden Teilprozesse, ihre Dynamik, ihre Wechselwirkungen und ihre Bedeutung für den Prozess der Hochwasserentstehung und des Wasserhaushaltes im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse über mehrere Skalen. Diesem Ziel folgend ergab sich die Wahl der Beobachtungspunkte als hierarchisch ineinandergeschachteltes System von Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe. Auf der kleinsten Maßstabsebene konzentrierte sich das Interesse auf die Feuchtflächen in der Größenordnung einiger Hektar, die seit langer Zeit als Entstehungsgebiete von Hochwasserabflüssen bekannt sind (HEWLETT & HIBBERT 1967) und als ein möglicher dominanter Faktor der Abflussentstehung angesehen werden können (GUTKNECHT 1997). Die nächstgrößere Maßstabsebene ist jene der Zubringer zum Löhnersbach, also der Wildbäche von ca. 1 bis 2,5 km² Einzugsgebietsgröße. Wegen des großen Geschiebepotentials, des großen Gefälles und der häufig auftretenden geschiebeführenden Hochwässer war es ausgeschlossen, an diesem Gewässertyp mit den vorhandenen Mitteln dauerhaft Abflussbeobachtungen (Wasserstandsmessungen und Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen) durchzuführen. Daher wurden an ihnen nur während des Sommers täglich Durchflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode nach dem Integrationsprinzip durchgeführt. An einem der Wildbäche wurde ein Provisorium zur Wasserstandsmessung mit Hilfe einer Drucksonde errichtet.

Die Abbildung 8 und Abbildung 9 geben einen Überblick zu den Messeinrichtungen, die für das Forschungsprojekt im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ installiert wurden bzw. deren Daten zur Verfügung standen.

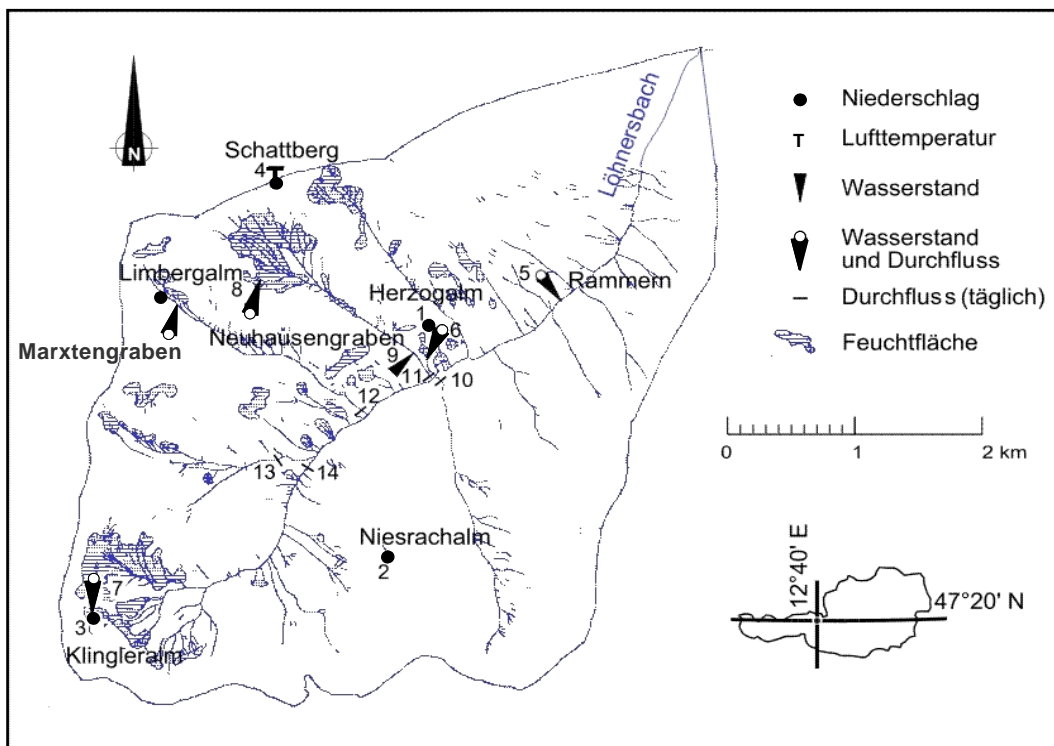


Abbildung 8: Lage der Messstationen im Einzugsgebiet „Löhnersbach“.

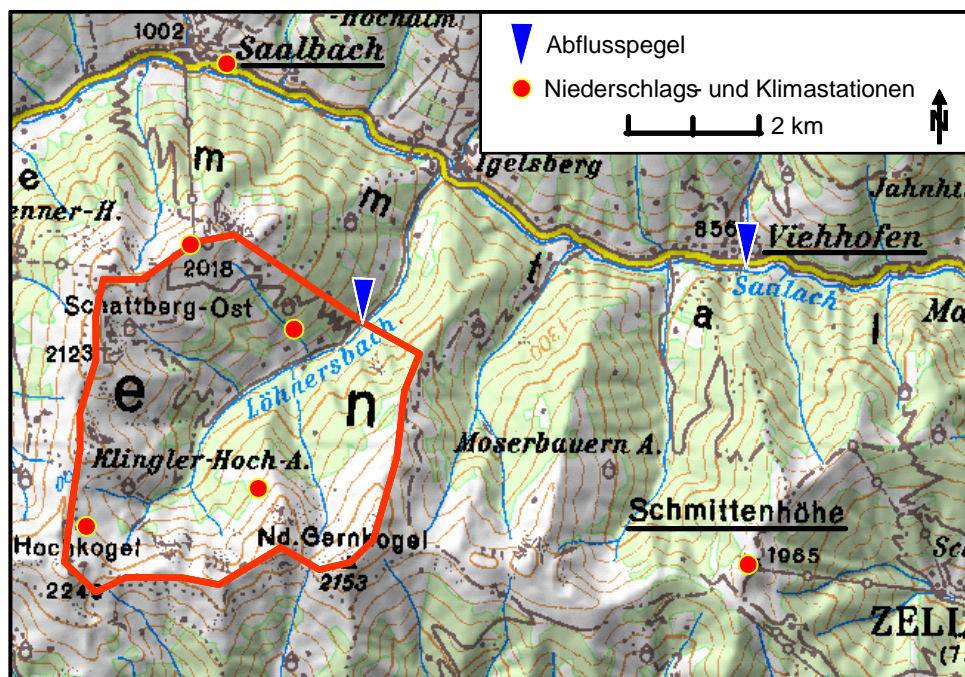


Abbildung 9: Lage der Messstationen im Umfeld des Löhnersbach-Einzugsgebietes (JOHST 2003; verändert).

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die gesamten Messeinrichtungen, die Messgrößen und den jeweiligen Messzeitraum. Die Messstationen Saalbach, Schmittenhöhe und Zell am See befinden sich außerhalb des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“, die übrigen Standorte innerhalb des Gebietes. Zur besseren Unterscheidung werden Erstere im Folgenden Klimastationen genannt, Letztere Gebietsstationen.

Die Gebietstationen unterlagen aufgrund der Entfernung des Untersuchungsgebietes zur TU Wien einer unregelmäßigen Wartung mit Kontrolle des Dataloggers und der Messeinrichtung. Die aufgezeichneten Messdaten wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Bei der Auswertung der Messdaten hat sich gezeigt, dass das Messintervall von anfänglich 15 min bei der extrem schnellen Reaktion des Abflusses auf den Niederschlag zu groß ist, um den Verlauf der Wellen ausreichend detailliert wiederzugeben. Daher erfolgte im Jahr 1995 an fast allen Messstellen die Umstellung auf ein Messintervall von 5 Minuten.

Tabelle 4: Übersicht zu den Messdaten im Einzugsgebiet „Löhnersbach“ (nach KIRNBAUER ET AL. 1996, JOHST 2003).

| Messgröße | Standort | Höhe [m ü. A.] | Einzugsge- bietsfläche [ha] | Messintervall [min] | Messbeginn | Anmerkung |
|---|----------------------|-------------------|--------------------------------|---|---|--|
| Lufttemperatur | Schattberg | 2005 | --- | 15; 5 (ab 1995) | 1992 - 2005 | April bis Oktober in Betrieb |
| Niederschlag | Schattberg | 2005 | --- | 15; 5 (ab 1995) | 1992 - 2005 | |
| | Herzogalm | 1280 | --- | 15; 5 (ab 1995) | 1992 - 2005 | Juni bis Oktober in Betrieb |
| | Niesrachalm | 1773 | --- | 15; 5 (ab 1995) | 1995 - 2005 | |
| | Klingleralm | 1910 | --- | 5 | 2002 - laufend | |
| | Marxtenalm | 1804 | --- | | | |
| Wasserstand, Abfluss | Rammern | 1100 | 1600 | konst. Schrieb | 1991 - laufend | Pneumatikpegel |
| | | | | 15; 5 (ab 1995) | 1994 - laufend | Drucksonde mit Logger |
| | Limbergalm | 1200 | 7 | 5 | 1994 - 2005 | Durchgehend in Betrieb, Okt. bis Mai 15 min Werte |
| | Klingleralm | 1910 | 0,45 (Feuchtfläche) | 5 | | |
| | Herzogalm | 1234 | 0,29 (Feuchtfläche) | 15 | 1992 - 1993 | Feuchtfläche im September 1993 trockengelegt |
| | Marxtenalm I | 1804 | 24 | 5 | 2002 - laufend | Auslass Rückhaltebecken |
| Marxtenalm II | 1800 | 24 | 5 | 2007 - laufend | Pegel unterhalb des Rück- haltebeckens | |
| Wasserstand | Neuhausengraben | 1190 | 100 | 15 min | 1992 – 1995 | durch Murereignis zerstört |
| Abfluss | Klambach | 1190 | 2,5 | täglich | 1993 – 1997 und 2000 - 2001 | Messungen im Zeitraum Juli bis September |
| | Neuhausengraben | 1190 | 1,3 | | | |
| | Marxtengraben | 1250 | 1,5 | | | |
| | Schusterbauergraben | 1390 | 1,4 | | | |
| | Löhnersbach Oberlauf | 1330 | 4,3 | | | |
| Abfluss, elektr. Lf. Wassertemp., Trü- bung | Klambachquelle | 1558 | --- | 1 h (Trübung im 30 min-Intervall) | 1999 - laufend | Quellmessung |
| Niederschlag, Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte, Wind, Schneehöhe | Saalbach | 1010 | --- | minütlich bis täglich | Daten ab 1996 für Unterschun- gen verfügbar | ganzjährig in Betrieb |
| | Schmittenhöhe | 1973 | --- | | | |
| | Zell am See | 750 | --- | | | |

6.1.3 Niederschlags- und Lufttemperaturmessung

Der **Freilandniederschlag** wurde im Einzugsgebiet an den Stationen Schattberg, Klingleralm, Herzogalm, Limbergalm und Niesrachalm mit Ombrographen (Fa. Paar), die nach dem Wippenprinzip arbeiten, in hoher zeitlicher Auflösung (5 bzw. 15 min-Intervall) erfasst. Die Niederschlagsmesser besitzen eine horizontale, kreisförmige Auffangfläche mit einer Größe von 500 cm² und sind in 2 m Höhe über der Geländeoberfläche installiert. Die Datenerfassung erfolgte mit einem elektronischen Speichermodul (Mini-Datenlogger der Fa. Logotronic), der die von der Niederschlagswippe abgegebenen Impulse (jeder Impuls entspricht 1/10 mm Niederschlag) jeweils über einen Zeitraum von 5 Minuten aufsummiert und speichert. Der Messzeitraum umfasst nur die frostfreien Perioden. Vor Wintereinbruch wurden die Stationen abgebaut, um einer Beschädigung durch Lawinen oder Skifahrer entgegenzutreten (KIRNBAUER ET AL. 1996). Der am Schattberg aufgestellte Ombrograph ist elektrisch beheizt und kann daher bereits sehr früh z.B. im April in Betrieb genommen werden. Von den Stationen Schmittenhöhe und Saalbach stehen für das gesamte Jahr durchgehende Tagessummen zur Verfügung.

Die **Lufttemperatur** wurde an der Station Schattberg in zeitlich hoher Auflösung registriert (5 bzw. 15 min-Intervall), wiederum nur während der Sommermonate. Von den Stationen Schmittenhöhe und Saalbach stehen Tagesmittelwerte zur Verfügung.

Die als **Schneedecke** gespeicherte Wassermenge bildet im Löhnersbachgebiet einen wesentlichen Bestandteil des Wasserhaushaltes. Daher wurde als Basis einer Überprüfung des Modellbausteines im Wasserhaushaltsmodell BROOK, der die Schneeakkumulation beschreibt, sowie zur Überprüfung von Modellansätzen zur Berechnung des Gradienten der Lufttemperatur in der Zeit vom 5. bis 10. April 1994 im Einzugsgebiet des Löhnersbaches Schneehöhen- und Schneewasseräquivalentmessungen durchgeführt. Diese Messungen erfolgten entlang von Schneekursen auf der linken und der rechten Talseite des Löhnersbaches bis in die Gipfelregion. Einer dieser Kurse folgte der Route Schattberg - Limberg Hochalm - Taxingalm - Jausernlift Bergstation - Jausern, der andere führte von der Niesrachalm in den Talgrund des Löhnersbaches. Wegen der herrschenden Lawinengefahr waren die Kare der linksseitigen Zubringer und der Bereich Klingleralm bis Klinglertörl nicht zugänglich. Während der Schneemessungen wurden jeweils Einzelfotos und Panorama-Bildserien aufgenommen, auf Grund derer apere Stellen des Einzugsgebietes identifizierbar sind.

Entlang der Schneekurse wurden ca. alle 100 Höhenmeter die Schneehöhen mit der Lawinensonde an neun kreuzförmig angeordneten Punkten gemessen, einzeln notiert und der Mittelwert errechnet. Bei jeder zweiten Sondierungsstelle wurde auch das Schneewasseräquivalent bestimmt. Hierzu wurde die Schürfgrube an jener Stelle gegraben, wo die Schneehöhe dem Mittelwert der neun Sondierungen am nächsten lag. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Kapitel 7.2.3 dargestellt.

An den Stationen Schmittenhöhe und Saalbach wird die Schneehöhe je Verfügbarkeit täglich gemessen.

6.1.4 Abflussmessungen

6.1.4.1 Permanente Pegelstationen

Eine permanente Erfassung des Abflusses erfolgte an den Pegelstationen Viehhofen, Rammern (Einzugsgebietsauslass), Herzogalm, Limbergalm und Klingleralm (jeweils Feuchtplächen) (Einzugsgebietsgrößen siehe Tab. 4).

Beim *Pegel Rammern* handelt es sich um einen pneumatischen Pegel, der in seiner Bauart der standardmäßigen Ausrüstung von Messstellen des Hydrographischen Dienstes (HD) entspricht. Die Messstelle „Pegel Rammern“ ist seit November 1991 in das Messnetz des Hydrographischen Dienstes (HD) Salzburg integriert. Die Registrierung der Messwerte erfolgt auf einem Schreibstreifen mit batteriebetriebenenem Uhrwerk. Das Foto 20 zeigt die Lage der Messstelle und das Pegelhaus.



Foto 20: Hauptpegel Rammern.

Aufgrund zum Teil unklarer Messdaten und um Messausfälle des pneumatischen Pegels zu ersetzen wird seit April 1996 zusätzlich der Wasserstand mit einer Drucksonde im 5 min-Intervall aufgezeichnet. Über die detailliert vorliegende Geometrie des Bachquerschnittes am Pegel Rammern, kann der Abfluss über den Wasserstand berechnet werden (Abbildung 10). Die Ergebnisse der Durchflussmessungen in den Sommermonaten 1992 und 1993 bildeten gemeinsam mit den Flügelmessungen des HD Salzburg eine recht gute Ausgangsbasis für die Erstellung eines Pegelschlüssels für den Pegel Rammern am Löhnersbach (Abbildung 11).

Dieser Pegelschlüssel entspricht der vom Hydrographischen Dienst verwendeten Formel:

$$Q = A \cdot (W - C) B$$

Wobei Q den Durchfluss (in l/s) und W den Wasserstand (in cm) darstellt und die Parameter A , B und C iterativ aus drei vorgegebenen $W - Q$ - Wertepaaren ermittelt werden:

$$\ln A = - 6.08 \quad B = 3.37 \quad C = - 13.35$$

Mit Hilfe dieses Pegelschlüssels wurden die digitalisierten Wasserstände in Durchflüsse umgerechnet und zur Kontrolle der Modellrechnungen verwendet (vgl. Kapitel 7.3). Ein Problem ergibt sich bei höheren Wasserständen, da durch die Geometrie der Messstelle ab 50 cm die Wasserstands-Durchflussbeziehung nicht mehr eindeutig extrapoliert werden kann (Abbildung 10). Bei den bisherigen Messungen wurde dieser Wasserstand nur sehr selten, während der Schneeschmelze 1993 in einem vernachlässigbaren Bereich, überschritten.

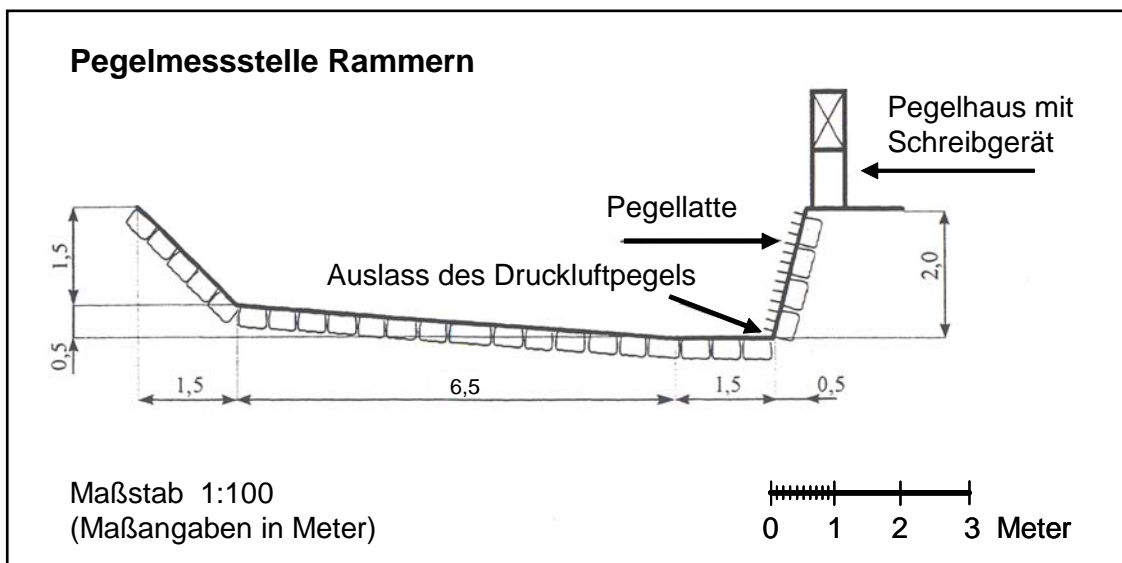


Abbildung 10: Geometrie der Pegelstelle Rammern.

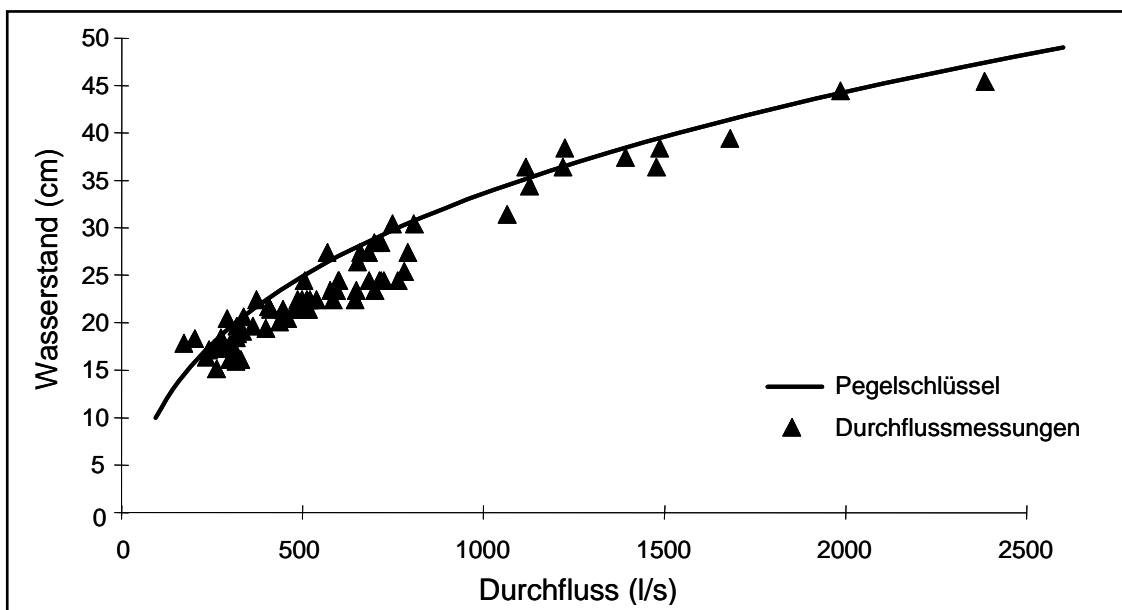


Abbildung 11: Pegelschlüssel für den Pegel Rammern (Löhnersbach).

Um diesem Problem entgegenzutreten und weil bei den Ereignissen am 10. Juli, 27. Juli und 3. August 1995 dieser Wasserstand deutlich überschritten wurde, war es notwendig die oben abgeleitete Schlüsselkurve zu extrapolieren.

Dazu waren grundsätzlich drei Möglichkeiten denkbar:

- a) Direkte Extrapolation der Schlüsselkurve,
- b) Extrapolation des Zusammenhanges zwischen Wasserstand und mittlerer Fließgeschwindigkeit auf statistischem Wege oder
- c) hydraulische Extrapolation des Zusammenhanges zwischen Wasserstand und mittlerer Geschwindigkeit.

Die direkte Extrapolation des Zusammenhanges von Wasserstand h und Durchfluss Q ist aus folgenden Gründen nicht sinnvoll:

Der Zusammenhang $Q = Q(h)$ ist die Produktfunktion der Zusammenhänge $v = v(h)$ (mittlere Fließgeschwindigkeit als Funktion des Wasserstandes) und $A = A(h)$ (Durchflussquerschnitt als Funktion des Wasserstandes). Daraus ergibt sich als Voraussetzung für eine sinnvolle Extrapolation von Q die Notwendigkeit, dass die funktionalen Zusammenhänge $v = v(h)$ bzw. von $A = A(h)$ über den bekannten Bereich (bis $h = 50$ cm) hinausgehend, bis in den Extrapolationsbereich hinein weiter gültig sein müssen. Diese Voraussetzung ist beim vorliegenden Querprofil nicht gegeben, da bei einem Wasserstand von 50 cm ein Knick im Profilrand auftritt. Hier geht der Bereich der geneigten Sohle in den Bereich der rechtsufrigen Begrenzung über. Dies bedingt einerseits eine Änderung in der Funktion $A = A(h)$, andererseits auch eine gewisse Änderung der Funktion $v = v(h)$. Somit ist die Produktfunktion $Q = v \cdot A$ nicht unmittelbar extrapolierbar. (Führt man diese Extrapolation versuchsweise trotzdem durch, so ergibt sich für $h = 150$ cm: $Q = 67$ m³/s)

Aus dem Zusammenhang zwischen Wasserstand h und Durchfluss Q wird mit Hilfe des aus der Profilgeometrie bekannten Zusammenhanges zwischen h und dem Durchflussquerschnitt A die Fließgeschwindigkeit v als Funktion von h punktweise zurückgerechnet. Dieser Zusammenhang $v(h)$ wird extrapoliert, indem er durch ein Polynom approximiert und dieses extrapoliert wird. Hierbei wird in erster Näherung ignoriert, dass sich der Zusammenhang $v(h)$ mit der Profilform ändert. Es erweist sich als sinnvoll, die Polynom - Approximation nur für den oberen bekannten Bereich des Zusammenhanges $v(h)$ durchzuführen. Im vorliegenden Fall wurde ein Polynom erster Ordnung an die Fließgeschwindigkeiten im Wasserstandsbereich 30 bis 50 cm angepasst und extrapoliert. Für den Wasserstand $h = 150$ cm ergibt sich $v = 3,4$ m/s und somit $Q = 37$ m³/s.

Die Fließformel nach Manning-Strickler lautet:

$$v = k_{ST} \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

Hierin bedeuten:

| | | |
|----------|-----------------------|---|
| v | (m/s) | mittlere Fließgeschwindigkeit im Querprofil |
| k_{ST} | (m ^{1/3} /s) | Rauhigkeitsbeiwert |
| R_h | (m) | hydraulischer Radius (= A/U ; U = benetzter Umfang) |
| I | (-) | Energieliniengefälle |

Der Rauigkeitsbeiwert k_{ST} und das Energieliniengefälle I sind zwar für das Pegelprofil nicht bekannt, doch lässt sich das Produkt $k_{ST} \cdot I^{1/2}$ aus der bekannten Schlüsselkurve bzw. dem Zusammenhang $v = v(h)$ punktweise zurückrechnen. Der Zusammenhang zwischen dem Produkt ($k_{ST} \cdot I^{1/2}$) und dem Wasserstand h wird extrapoliert. Die Größen R_h und A werden für den Extrapolationswasserstand aus der Profilgeometrie ermittelt, und mit $Q = v \cdot A$ ergibt sich der Durchfluss. Dieses Verfahren ergibt, angewendet auf das Pegelprofil Rammern, für den Wasserstand $h = 150$ cm einen Durchfluss $Q = 39$ m³/s.

In Abbildung 12 sind die nach den drei Methoden extrapolierten Schlüsselkurven für das Pegelprofil Rammern dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die beiden sinnvollen Extrapolationsmethoden (Extrapolation der Geschwindigkeit bzw. hydraulische Extrapolation) zu annähernd demselben Ergebnis führen. Dies lässt den Schluss zu, dass das Ergebnis einigermaßen vertrauenswürdig ist.

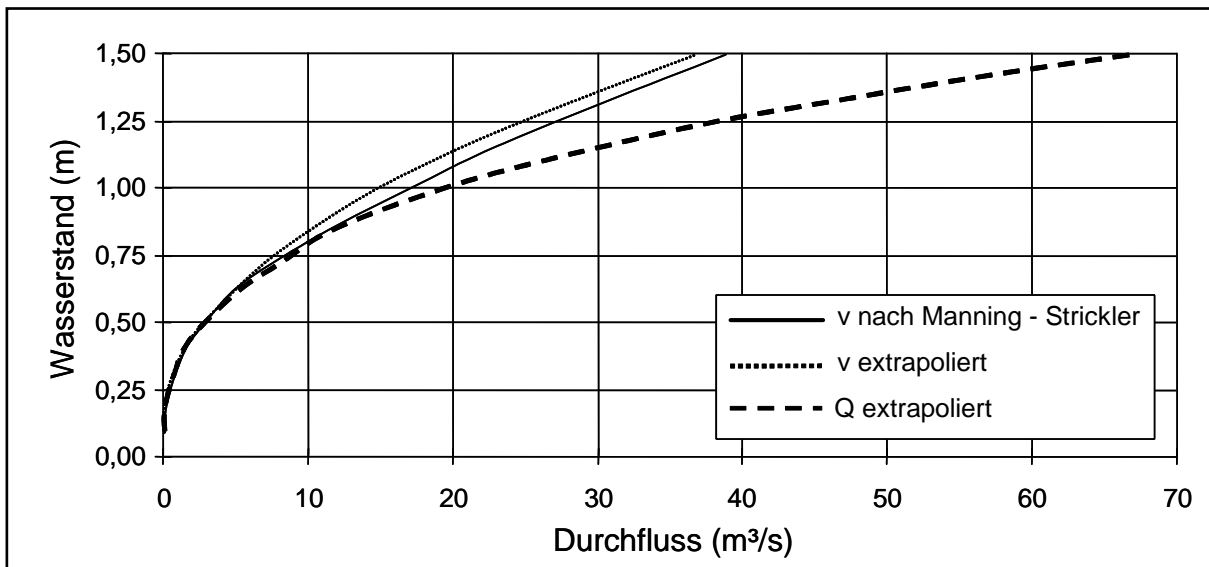


Abbildung 12: Extrapolation der Schlüsselkurve für den Pegel Rammern (Löhnersbach) nach drei verschiedenen Methoden.

An den übrigen Pegelstationen *Herzogalm*, *Limbergalm* und *Klingleralm* erfolgte die Messung des Abflusses über ein Dreieckswehr (HAGER 1990), wobei der Wasserstand mit einer Drucksonde aufgezeichnet wurde. Die Kalibrierung der Wasserstands-Abflussbeziehungen erfolgte anhand von Abflussmessungen mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode (vgl. Kap. 6.1.4.2).

Bedingt durch die im Sommer 1993 vom Grundeigentümer durchgeführte Trockenlegung der Feuchtfläche Herzogalm war es notwendig eine ähnlich reagierende Feuchtfläche, die eine starke Hangneigung, eine flachgründig mooriger Auflage auf Gleyböden und Vegetation vom Typ Braunseggen–Wollgras–Rasenbinsen–Niedermoor im Übergang zum Bürstlingrasen aufweist, zu finden. Es wurde daher die Feuchtfläche Limbergalm ausgewählt und mit einer Pegelstation instrumentiert.

Der Grund für die Abflussmessungen an der Feuchtfläche Klingleralm war der Umstand, dass beim Versuch, den Abfluss der Feuchtflächen auf das gesamte Einzugsgebiet des Löhnersbaches hochzurechnen, indem der Abflussbeiwert der Feuchtfläche Herzogalm auf alle Feuchtflächen des Löhnersbacheinzugsgebietes angesetzt

wird, sich eine systematische Überschätzung des hochgerechneten Gebeitsabflusses ergab. Die plausibelste Erklärung dafür war die Annahme, dass es im Einzugsgebiet Feuchtflächen gibt, die weniger intensiv auf Niederschläge reagieren als jene bei der Herzogalm. Für die Auswahl der Feuchtfläche wurde die Hypothese aufgestellt, dass kontrastierende Abflussreaktionen von Feuchtflächen auf kontrastierende topographische, pedologische und pflanzensoziologische Gegebenheiten auf der Feuchtfläche zurückgeführt werden können.

Die rasche Abflussreaktion auf der Feuchtfläche Herzogalm ist eine Folge des relativ steilen Geländes und der flachgründigen Humus- und Pflanzenaufgabe auf vergleytem Unterboden. Kontrastierend hierzu wurde die Feuchtfläche Klingleralm ausgewählt, die eine flache Neigung mit tiefgründigem Moorboden auf dichtem Untergrund und mit typischer Sumpfvvegetation aufweist. Von einer derartigen Fläche ist eine weniger intensive Abflussreaktion zu erwarten.

Als weitere Informationen stehen die Abflussdaten des übergeordneten Pegels **Viehho-fen** (Messstellennr.: 203463) an der Saalach zur Verfügung. Dieser Pegel wird seit 1961 betrieben und umfasst ein Einzugsgebiet von 150,8 km².

6.1.4.2 Tägliche Abflussmessungen

Um den Abflussbeitrag der einzelnen Teileinzugsgebiete, die über keinen permanenten Abflusspegel verfügen, abschätzen und simulierte Abflussganglinien validieren zu können, wurden an den Gebietsauslässen der Teilgebiete Klammbach, Neuhausengraben, Marxtengraben, Schusterbauergraben und am Oberlauf des Löhnersbaches (Abbildung 8) tägliche manuelle Abflussmessungen mit Hilfe der Salzverdünnungsmethode durchgeführt. Die Tagesmessungen erfolgten in dem Zeitraum von Juli bis September nahezu täglich. Durch die jährlichen Exkursionen mit Studenten konnten die Abflussmessungen mittels Salzverdünnung zeitlich und räumlich verdichtet werden (Längsschnitte in den Zubringern).

Für die Abflussmessungen stand der DTS - Messkoffer der Firma KRISTL & SEIBT zur Verfügung. Dabei wird eine definierte Menge handelsüblichen Kochsalzes in Wasser aufgelöst und diese Lösung „plötzlich“ in das Gewässer eingebracht. In entsprechender Entfernung unterhalb des Eingabepunktes wird die elektrische Leitfähigkeit des Gewässers gemessen, die sich durch die eingebrachte Salzlösung verändert. Zwischen der Leitfähigkeit und der Salzkonzentration besteht eine eindeutige Eichbeziehung, die es erlaubt, aus der Verdünnung der beigegebenen Salzlösung durch das Flusswasser auf den Durchfluss des Baches zu schließen (DINGMAN 1993, HERRMANN 1977).

Da bei den Messungen gewisse Unstimmigkeiten in der Software zum DTS - Messkoffer der Firma KRISTL & SEIBT auftraten, mussten die Daten aus den Durchflussmessungen einer eingehenden Nachbearbeitung unterzogen werden. Im Zuge dieser Nachbearbeitung war es auch notwendig die verwendeten Eichkoeffizienten, die zu Beginn der Untersuchungen bei jeder Messung neu bestimmt wurden, einer Revision zu unterziehen. Da sich allerdings herausstellte, dass die verwendete Pipette nur bei sehr sorgfältiger Behandlung unter Laborbedingungen zuverlässig arbeitet, wurde dazu übergegangen, den Eichkoeffizient nur einmal im Labor mit einer Präzisionspipette zu bestimmen und dann für alle Messungen den selben Wert zu verwenden. Diese Vor-

gangsweise erscheint nicht zuletzt auch deshalb sinnvoll, weil die Basisleitfähigkeiten an den Gewässern im Untersuchungsgebiet sehr ähnlich sind und nur sehr geringe saisonale Schwankungen aufweisen.

6.1.5 Quellmessungen

Für das Verständnis des gesamten Niederschlag-Abflussgeschehens ist auch die Kenntnis des Verhaltens des Wassers im Untergrund von großer Bedeutung. Hierfür wurde im September 2000 eine provisorische Messstelle für eine Quelle des Klamm-baches errichtet und die Schüttung gefasst. Foto 21 zeigt die provisorische Messvorrichtung für die Quellmessung Klamm-bach.



Foto 21: Provisorische Quellmessstelle Klamm-bach.

In den Jahren 2002 und 2003 wurden von der Saalbacher Wassergenossenschaft die vier Hauptquellen am Klamm-bach gefasst. Als eine dieser Quellen war auch die im November 2000 ins Quellmessprogramm des Hydrographischen Dienstes aufgenommene Messstelle betroffen und konnte ab Beginn der Bauarbeiten nicht mehr weiter beobachtet werden. Mit der Wassergenossenschaft wurde vereinbart, dass die Quellen einzeln in eine Quellstube geführt werden, und dadurch die bereits beobachtete Quelle weiter gemessen werden kann. Im Herbst 2003 waren die Arbeiten an der Quellstube soweit abgeschlossen, dass am 30.10.2003 die Messeinrichtung für die Schüttungsmessungen wieder installiert werden konnte.



Das Foto 22 zeigt ein Messwehr im Inneren der Quellstube. Aktuell werden die Schüttung, elektrische Leitfähigkeit, die Temperatur sowie die Trübung im 60 min-Intervall erfasst.

Foto 22: Messblende im Quellschacht der Quelle Klammbach.

6.1.6 Erfassung bodenkundlicher Parameter

Um die räumliche Verbreitung der Böden im Einzugsgebiet sowie deren pedohydrologischen Eigenschaften zu erfassen, wurden von MARKART & KOHL (1993a,b) verschiedene bodenkundliche Untersuchungen durchgeführt. Die folgenden Erläuterungen der bodenkundlichen Methodiken beziehen sich auf diese Untersuchungen von MARKART & KOHL (1993b).

Zur Erfassung der räumlichen Verbreitung der Böden wurde von MARKART & KOHL (1993a) eine konventionelle Bohrstockkartierung durchgeführt und die Böden gemäß der österreichischen Bodenzustandsinventur (BLUM ET AL. 1989) aufgenommen. Die Anzahl der zugrunde liegenden Bohrungen und Schürfgruben beläuft sich im Einzugsgebiet auf 121 Standorte. An jedem Standort wurde der Bodentyp, Vegetationstyp, die Geländemorphologie, Auflagemächtigkeit, Durchwurzelung, der Skelettanteil sowie der Tagwasser- und Weideeinfluss auf den Wasserhaushalt der Böden bestimmt und aufgenommen.

Zur Bestimmung der pedohydrologischen Eigenschaften bestimmter Böden im Einzugsgebiet Löhnersbach entnahmen MARKART & KOHL (1993a) an 62 Standorten gestörte und ungestörte Bodenproben zur Laboranalyse. Die Auswahl der Standorte erfolgte willkürlich, wobei die flächenhafte Verbreitung bestimmter Bodentypen besonders berücksichtigt wurde.

6.1.7 Tracerhydrologische Untersuchungen

Um Informationen über Verweilzeiten und Fließwege des unterirdischen Wassers insbesondere über die Herkunftsräume der nachlaufenden Abflusserhöhungen (vgl. Kap. 7.2.4.1) im Bereich der Feuchthfläche Limbergalm zu erhalten, erfolgten im Juni/Juli 2001 und im Sommer 2002 in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg umfangreiche tracerhydrologische Untersuchungen unter Verwendung von natürlichen und künstlichen Tracern (TILCH ET AL. 2003). Für den Nachweis der Breitenrelevanz der nachlaufenden Abflusserhöhungen wurde

im Vorfeld der Untersuchungen neben dem Pegel Limbergalm (PL) der Pegel Limbergalm-West (PL-W) als Referenzpegel installiert sowie die Schüttung einer Quelle am Wallflankenfuß erfasst (QW) (Abbildung 13).

6.1.7.1 Natürliche Tracer

Für die Untersuchungen mit natürlichen Tracern wurde das stabile Isotop ^2H (Deuterium), Silikat, die Hauptkationen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , und Ca^{2+} sowie die Hauptanionen Cl^- , NO_3^- und SO_4^{2-} verwendet. Während Deuterium einen Hinweis auf die Verweilzeiten des untersuchten Wassers gibt, kann mit dem Tracer Silikat zwischen oberflächennahen und unterirdischen Wasser differenziert werden. Die Analyse der Hauptkationen und -anionen soll dazu beitragen bestimmte Wässer zu charakterisieren und somit die räumliche Variabilität der hydrochemischen Signatur aufzuzeigen.

Die Beprobung der Kationen und Anionen erfolgte über 10 Stichtagsbeprobungen im Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm und Limbergalm-West. Zusätzlich wurden tägliche *in situ* Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Wassertemperatur durchgeführt. Mit Hilfe automatischer Probenehmer konnten am Pegel Limbergalm (PL), am Pegel Limbergalm-West (PT) sowie an einer repräsentativen Quelle (QW) am Wallflankenfuß die natürlichen Tracer in den Gerinneabflüssen über einen Zeitraum von 11 Tagen (19.-30.06.2001) in hoher zeitlicher Auflösung (bis stündlich) beprobt werden.

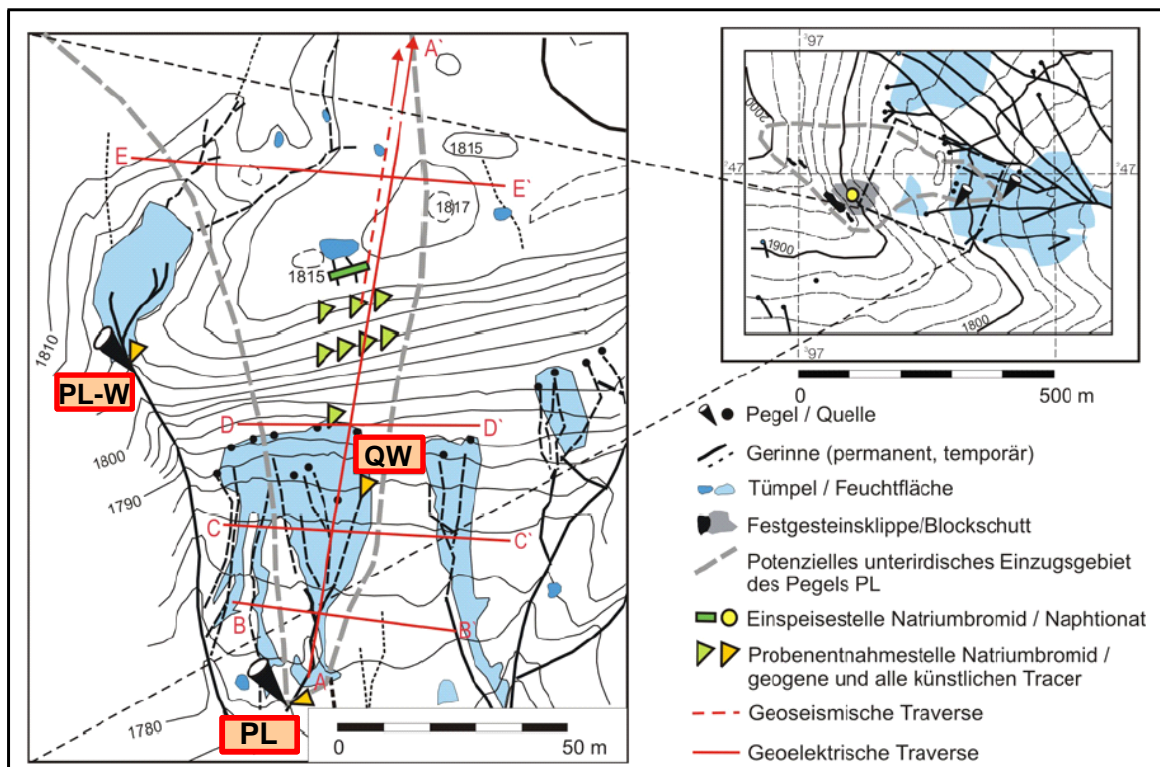


Abbildung 13: Detaillierte Übersicht zu den Messeinrichtungen an der Feuchtpläche Limbergalm (PL=Pegel Limbergalm, PL-W=Pegel Limbergalm-West; QW=Quellpegel am Wallfuß) (An der Einseisestelle für Naphtionat wurden auch Eosin und Uranin eingespeist) (TILCH ET AL. 2003; verändert).

6.1.7.2 Künstliche Tracer

In Ergänzung zu den Untersuchungen mit natürlichen Tracern wurden Markierungsversuche mit den Fluoreszenztracern Eosin und Uranin sowie mit dem Salztracer Natriumbromid durchgeführt.

Die Tracer Eosin und Uranin (0,4 kg und 1 kg) wurden am 22.06.2001 um 13:30 Uhr in den schuttreichen Oberhang injiziert (Abbildung 13). Die Beprobung erfolgte an den drei Pegelmesstellen (PL, PT und QW). Zu Beginn fand die Probenentnahme im Tagesintervall, anschließend manuell im 2-wöchigen Rhythmus statt. Die Analyse der Fluoreszenztracer wurde mit dem Spektralfluorometer LS 50 B der Fa. Perkin Elmer im hydrologischen Labor der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg durchgeführt (Synchronscan-Verfahren).

Auf dem Walltop wurde mit einem Salztracer ein kombinierter Beregnungs-Markierungs-Versuch durchgeführt. Insgesamt wurden 12 kg Natriumbromid über einen wenige Dezimeter tiefen und 5 m langen Graben in den oberflächennahen Boden eingebracht (21.06.2001 um 13:50 Uhr) (Abbildung 13). Anschließend erfolgte eine über den Zeitraum von 4 Stunden eine kontinuierliche Beregnung mit einer Intensität von 8 mm/h auf einer Fläche von etwa 200 m². Die am Pegel Limbergalm (PL) und an der Quelle am Wallflankenfuß (QW) gewonnenen Wasserproben wurden auf diesen Salztracer hin untersucht.

6.1.8 Beregnungsversuche

Um das Abflussverhalten unterschiedlicher Flächen zu untersuchen wurden in den Jahren 1992, 2001 und 2002 Beregnungsversuche in Zusammenarbeit mit dem Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck (MARKART & KOHL 1994) und dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur Wien (IWHW) (NACHTNEBEL AT AL. 2005) durchgeführt. Im Zuge des Beregnungsversuches im Jahre 2002 wurden auch geophysikalische Untersuchungen durchgeführt, auf deren Methodik in Kapitel 6.1.10 genauer hingewiesen wird.

Die Beregnungen im Sommer 1992 hatten zum Ziel, die bodenphysikalische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes zu verifizieren sowie das Abflussverhalten bestimmter Vegetations-Boden-Kombinationen zu analysieren und deren Abflusskoeffizienten zu bestimmen (MARKART & KOHL 1994). Dabei wurden insgesamt an acht Standorten auf einer Fläche von 75 m² (5 m x 12,5 m) mit unterschiedlichen Starkregenintensitäten zwischen 30 und 100 mm/h beregnet. Die Standorte sind in Abbildung 14 dargestellt. Über eine Auffangrinne, die am unteren Ende der Beregnungsfläche über die ganze Breite angebracht ist, werden der Oberflächen- und der oberflächennahe Zwischenabfluss gemessen. Der aufgefangene Abfluss wird in ein 300 l großes Messgefäß geleitet und dort mengenmäßig sowie zeitlich manuell registriert.

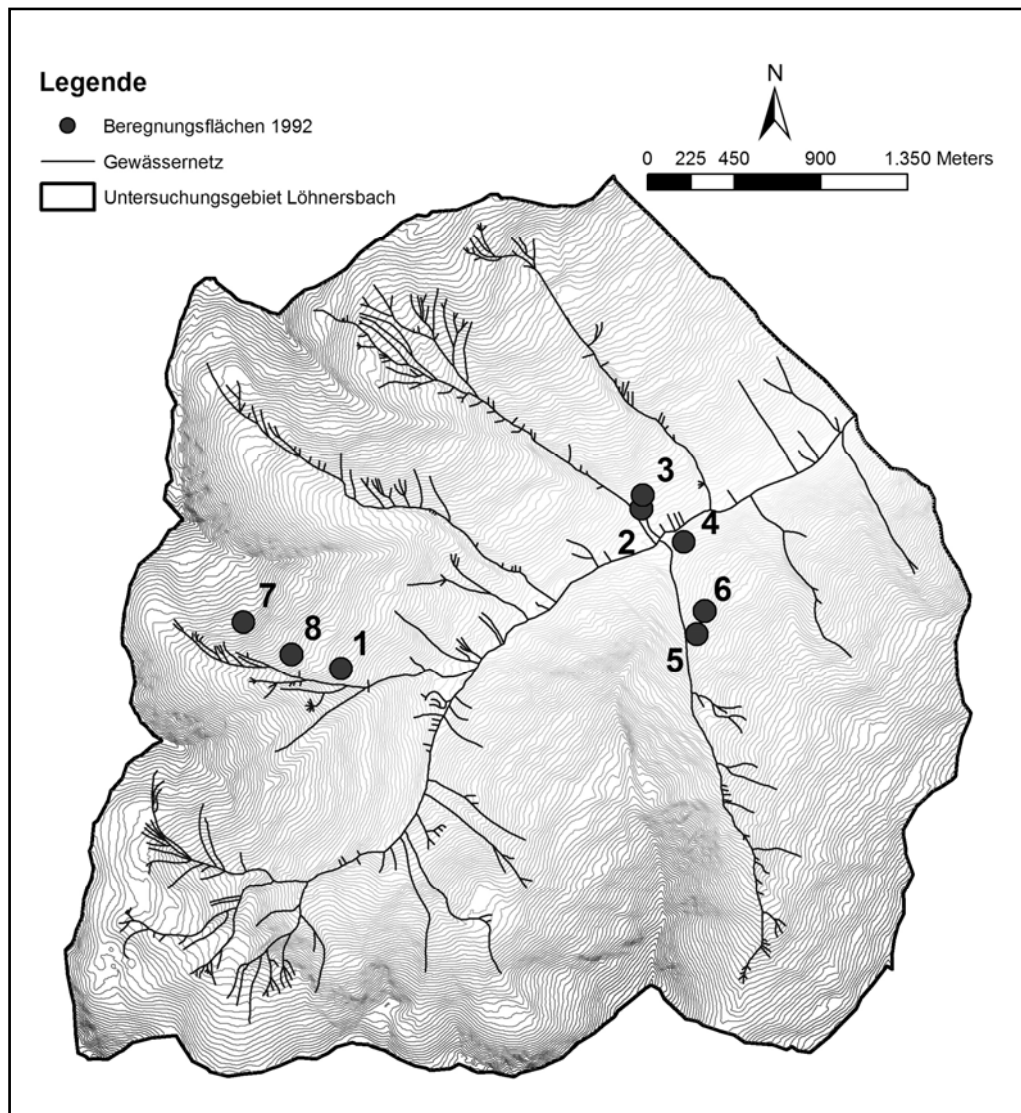


Abbildung 14: Lage der Beregnungsflächen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ bei der Beregnung von 1992 (MARKART & KOHL 1994:3; verändert).

Auf dem Foto 23 ist eine entsprechende Beregnungsanlage dargestellt, die Abbildung 15 zeigt einen schematischen Überblick zur Anordnung der Düsen und der Sprühverteilung. Das für die Beregnung benötigte Wasser wird über eine Pumpanlage aus umliegenden Bachbereichen entnommen und zur Versuchsfläche gepumpt. Bei einer Beregnungsintensität von 100 mm/h und einer Fläche von 100 m² werden z.B. 6 l/s benötigt. Die Düsen können so eingestellt werden, dass bei stark geneigtem Gelände ein zu hoher Durchsatz bei den tieferliegenden Düsen verhindert wird. Die aufgebrachte Wassermenge wird über ein Zählwerk an der Pumpe und über im Feld aufgestellte Niederschlagsammler registriert und kontrolliert. Um den Anteil des lateral abdriftenden Beregnungswassers auf der Bodenoberfläche und im Boden zu verhindern werden die Randbereiche der Versuchsfläche ebenfalls mitberegnet. Für eine genauere Beschreibung der Methodik wird auf MARKART & KOHL (1994) oder KOHL ET AL. (2002) verwiesen.



Foto 23: Beregnungsanlage für Starkregen vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck.

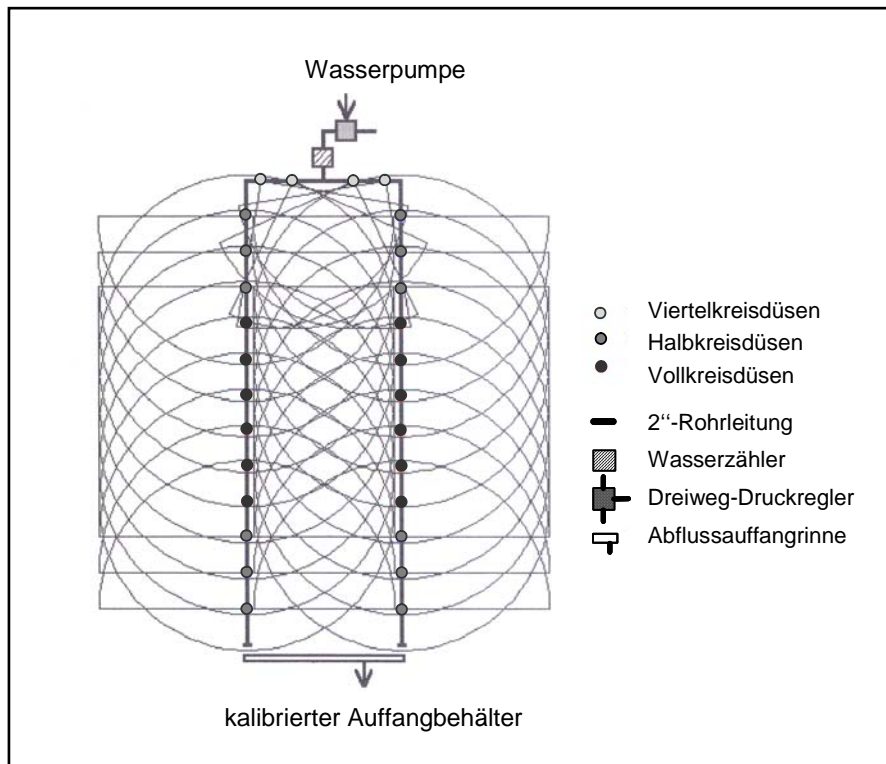


Abbildung 15: Düsenanordnung und Sprühverteilung der Beregnungsanlage vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck (Quelle: MARKART & KOHL 1994).

Die im Sommer 2002 durchgeführten Beregnungsversuche hatten zum Ziel einerseits die in einem Einzugsgebiet stattfindenden Abflussprozesse bei Dauerregen zu untersuchen und andererseits sollte das gewonnene Prozesswissen in die Entwicklung bzw. Adaptierung geeigneter hydrologischer Einzugsgebietsmodelle einfließen (NACHTNEBEL ET AL. 2005).

Die Abbildung 16 zeigt die Lage der Standorte der Beregnungsflächen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“. Dabei erfolgte an dem westlicheren Standort die Beregnung zur besseren Versickerung der Salztracer (NaCl, flächige Aufbringung) und Fluoreszenztracer (Naphthionat, punktförmige Aufbringung). Die Beregnung auf der östlicheren Fläche hatte zum Ziel die Bildung von Oberflächenabfluss zu analysieren.

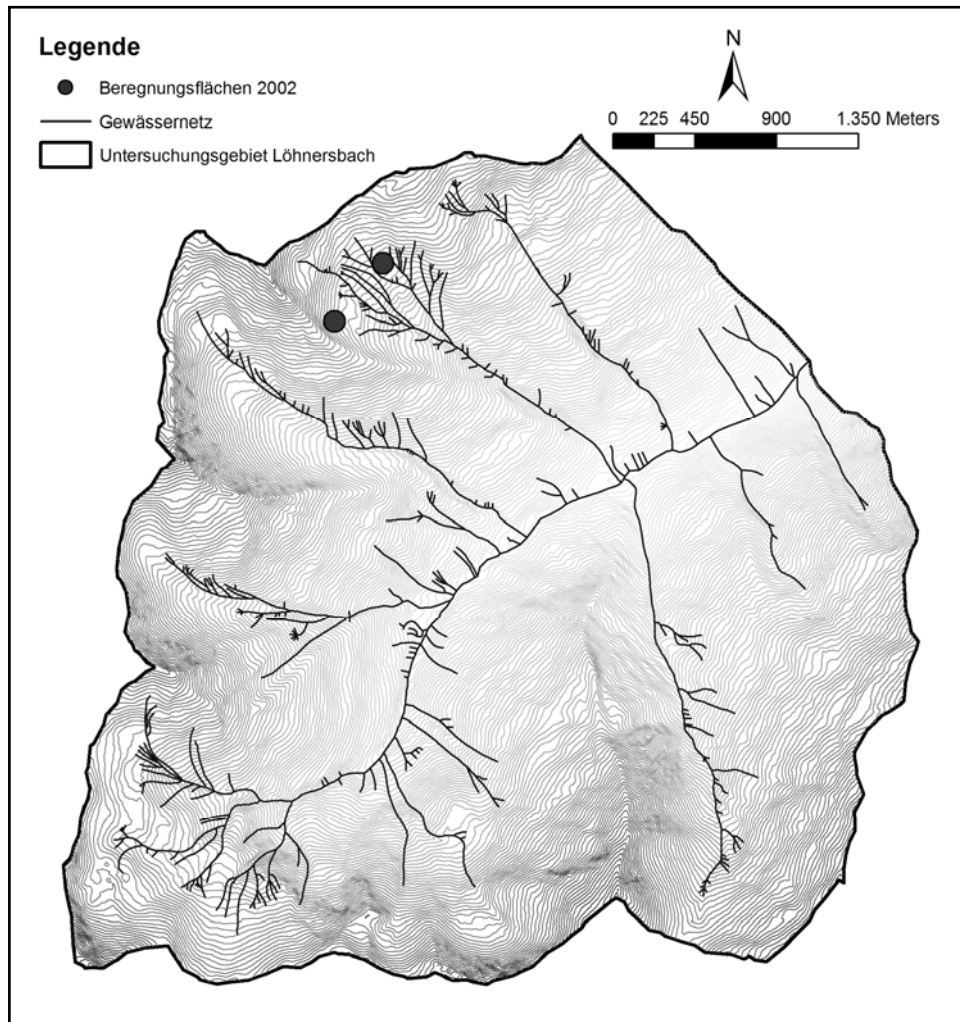


Abbildung 16: Lage der Beregnungsflächen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ bei der Beregnung von 2002. Südliche Fläche: „Löhnersbach 1“ und nördliche Fläche: „Löhnersbach 2“. (NACHTNEBEL ET AL. 2005:90; verändert).

Im Gegensatz zu den Starkregenexperimenten aus dem Jahr 1992 kam bei diesen Beregnungen eine Großregenanlage zum Einsatz, die eine Fläche von 400 m² umfasst (Foto 25). Die Beregnungsintensität betrug 10 mm/h. Die übrigen methodischen Ansätze wie z.B. Mitberegnung der seitlichen Randbereiche wurden beibehalten (NACHTNEBEL ET AL. 2005).



Foto 24: Beregnungsanlage vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck (Quelle: MARKART & KOHL 1994).

6.1.9 Bodenfeuchtemessungen

Im Rahmen der Beregnungsversuche (MARKART & KOHL 1994, NACHTNEBEL ET AL. 2005) (vgl. Kap. 6.1.8) wurde die zeitliche Variabilität des Bodenwassergehaltes mittels Time Domain Reflectometry (TDR; in Vol.-%) gemessen.

Dieses ist wie das tensiometrische Verfahren den indirekten Methoden zuzuordnen und beruht auf der Messung der Dielektrizitätszahl (DEZ) eines Mediums. Die eigentliche Grundvoraussetzung für die Wassergehaltsbestimmung mit dem TDR-Verfahren bildet der Umstand, dass sich Wasser mit einer vielfach höheren DEZ (81) von der Festsubstanz (3-5) und der Luft (1) unterscheidet (HALLIDAY & RESNICK 1994). Bei der Messung der Bodenfeuchte wird zuerst über die Aussendung einer elektromagnetischen Welle und deren Reflektionszeit die DEZ des Bodens berechnet. Anschließend kann der volumetrische Wassergehalt des Bodens unter Einsetzung der DEZ des Bodens über eine Gleichung berechnet werden (BOHL 1996, LEHMANN 1995, TOPP ET AL. 1980). Mit diesen Bodenfeuchtemessungen können die Ausgangsfeuchte (Bodenfeuchte vor der Beregnung), die Aufsättigung des Bodens während des Ereignisses sowie der zeitliche Verlauf der Perkolation des Bodenwassers dokumentiert werden.

Bei den verwendeten TDR-Sonden handelt es sich um dreistäbige Gabelsonden, die an ein entsprechendes Messgerät angeschlossen sind (beide Fa. SOILMOISTURE). Der Messbereich der Sonde liegt als „Zylinder“ um die drei Messstäbe, die eine Länge von 20 cm haben und umfasst ein Messvolumen von etwa 3 dm³.

6.1.10 Geophysikalische Untersuchungen

Im Einzugsgebiet der Feuchtfläche Limbergalm wurden verschiedene geophysikalische Methoden eingesetzt um die unterirdischen Wässer zu lokalisieren und somit ergänzende Informationen über deren räumliche Verteilung zu erlangen. Dabei führten sowohl das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur (Wien) als auch das Institut für Hydrologie der Universität Freiburg geoelektrische Widerstandsmessungen durch (WENNINGER ET AL. 2004, TILCH ET AL 2006a), während die seismischen Untersuchungen vom Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien erbracht wurden. Zur weiteren Untersuchungen des Untergrundes wurde auch Bodenradar eingesetzt. Diese Untersuchungen blieben aber ohne aussagekräftige Ergebnisse, weshalb im Folgenden und im Ergebnisteil auf diese Methode nicht weiter eingegangen wird.

6.1.10.1 Geoelektrik

Allgemein werden geoelektrische Verfahren zur Erkundung oberflächennaher Strukturen, lithologischer Einheiten und anderer Körper im Untergrund eingesetzt (SÜDEKUM 2000). Je nach Aufgabenstellung werden im Gelände verschiedene Methoden der geoelektrischen Widerstandsmessung verwendet, z.B. Gleichstromelektrik, Eigenpotential-, Mise-à-la-masse- oder die induzierte Polarisationsmethode (VOGELSANG 1993).

Das Prinzip geoelektrischer Messmethoden, dargestellt in der Abbildung 17, beruht darauf, dass mittels zweier Elektroden (A und B) der Erde mit einer Spannungsquelle (z. B. Batterie) ein Gleichstrom zugeführt und so ein Potenzialfeld im Untergrund erzeugt wird. Aus der Messung des Potenzialunterschiedes (Spannung) zwischen den zwei weiteren Sonden M und N können Angaben über die Verteilung der spezifischen Widerstände abgeleitet werden (VOGELSANG 1993, KEARY ET AL. 2002).

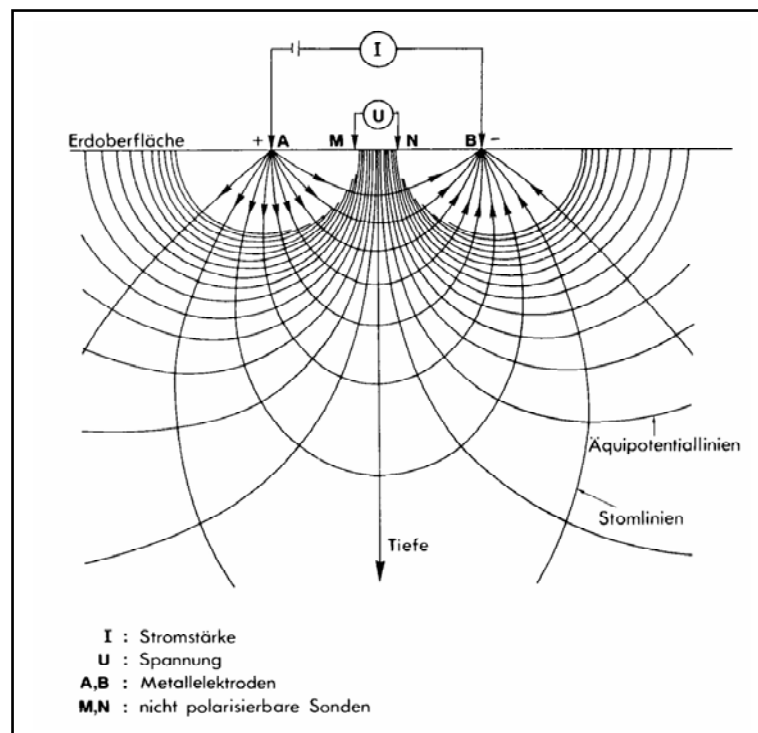


Abbildung 17: Messprinzip der Gleichstromverfahren (verändert; VOGELSANG 1993).

Durch dieses Messprinzip, mit dem Bereiche unterschiedlicher elektrischer Widerstände bzw. Leitfähigkeiten identifiziert werden, können neben verschiedenen geologischen Schichten auch unterschiedliche Wassergehalte im Untergrund erkannt werden. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass durch die Zunahme des Wassergehaltes auch die Leitfähigkeit des Speichermediums erhöht wird und sich somit von anderen Materialien unterscheidet

Zur Charakterisierung des Untergrundes der Beregnungsflächen im Löhnersbachgebiet wurden geoelektrische Messungen vor der Beregnung, während Beregnungspausen und nach der Beregnung durchgeführt. Die Geoelektrikprofile umfassten eine Länge von 75 m, mit Ausnahme des Standortes „Löhnersbach 2“, hier war das Profil aufgrund einer anderen Messanordnung doppelt so lang ausgelegt worden (Abb.16).

Für die geoelektrischen Messungen wurde das Lund Imaging System eingesetzt, das am IWHW vorhanden ist. Mit diesem computergesteuerten System können quasi 2-dimensionale Profile der Leitfähigkeitsänderungen im Untergrund aufgenommen werden. Die entsprechenden Messanordnungen können dem Projektbericht (NACHTNEBEL AT AL. 2005) entnommen werden.

6.1.10.2 Refraktionsseismik

Bei der Erkundung oberflächennaher Schichten sind seismische Messverfahren sehr verbreitet, wobei vor allem die Reflexions- und Refraktionsseismik angewandt werden. Die Messverfahren basieren im Wesentlichen auf der Durchschallung des Untergrundes mit gezielt angeregten elastischen Wellen, die an der Erdoberfläche künstlich durch Hammerschlag, Fallgewicht, Vibratoren oder Sprengung erzeugt werden können (MILITZER & WEBER 1987, VOGELSANG 1993, 1995) In Abbildung 18 ist das vereinfachte Messprinzip der refraktionsseismischen Messmethode von der Datenaufnahme bis zur Ermittlung der Schichttiefen dargestellt.

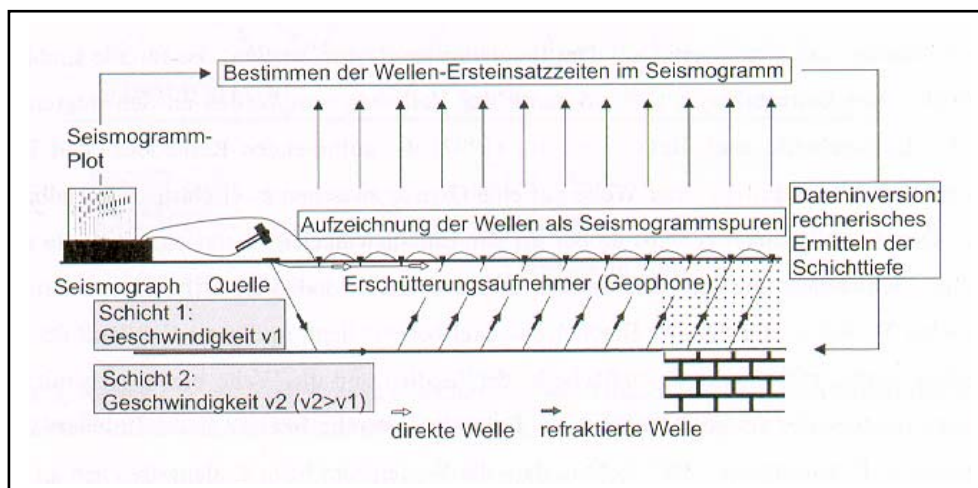


Abbildung 18: Vereinfachtes Messprinzip der Refraktionsseismik für einen Zwei-Schicht-Fall (HECHT 2001; verändert).

Dabei lassen sich zwei Typen von elastischen Raumwellen unterscheiden, die sich aufgrund ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit differenzieren. Während die Kompressionswellen sich mit größerer Geschwindigkeit fortsetzen und deshalb als Primärwellen

(P-Wellen) bezeichnet werden, erreichen die Scherwellen das Ziel bzw. eine gegebene Grenzfläche langsamer und werden daher Sekundärwellen (S-Wellen) genannt. Die schnellen P-Wellen werden meist bevorzugt, um seismische Geschwindigkeiten und die Tiefen der seismisch wirksamen Grenzflächen ableiten zu können. Die S-Wellen können die Strukturen zwar besser auflösen, haben aber den Nachteil sich im Lockergestein oder in Flüssigkeiten nur schwach oder gar nicht auszubilden (VOGELSANG 1993, 1995).

Im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ kam als Methode zur Identifikation potenzieller unterirdischer bevorzugter Fließwege und zur Abschätzung des Speichervolumens des Hanges und der maximalen Wassermenge, welche pro Zeiteinheit im Hang transportiert werden kann, die Refraktionsseismik zur Anwendung. Die Refraktionsseismik nutzt den Umstand der auf direktem oder gebrochenem Weg gelaufenen Wellen aus, die nur eine begrenzte Anzahl von Schichtgrenzen (Refraktoren) im Untergrund erfasst. Die Messungen erfolgten im Rahmen der Beregnungsversuche im Jahre 2002 im Einzugsgebiet der Feuchtfläche Limbergalm und wurden vor den Beregnungen durchgeführt. Angesichts der zu erkundenden geringen Teufen wurden die notwendigen Druckwellen bis auf zwei Punkte, wo Sprengkapseln eingesetzt wurden, durch Hammerschlag erzeugt.

Insgesamt wurden 4 seismische Profile ausgeführt (Abbildung 19). Das Längsprofil L hatte 4 m Geophonabstand und folgte ungefähr dem Fallen des Hanges. Die Profile A, B und C wurden quer zum Längsprofil angesetzt (KIRNBAUER ET AL. 2004).

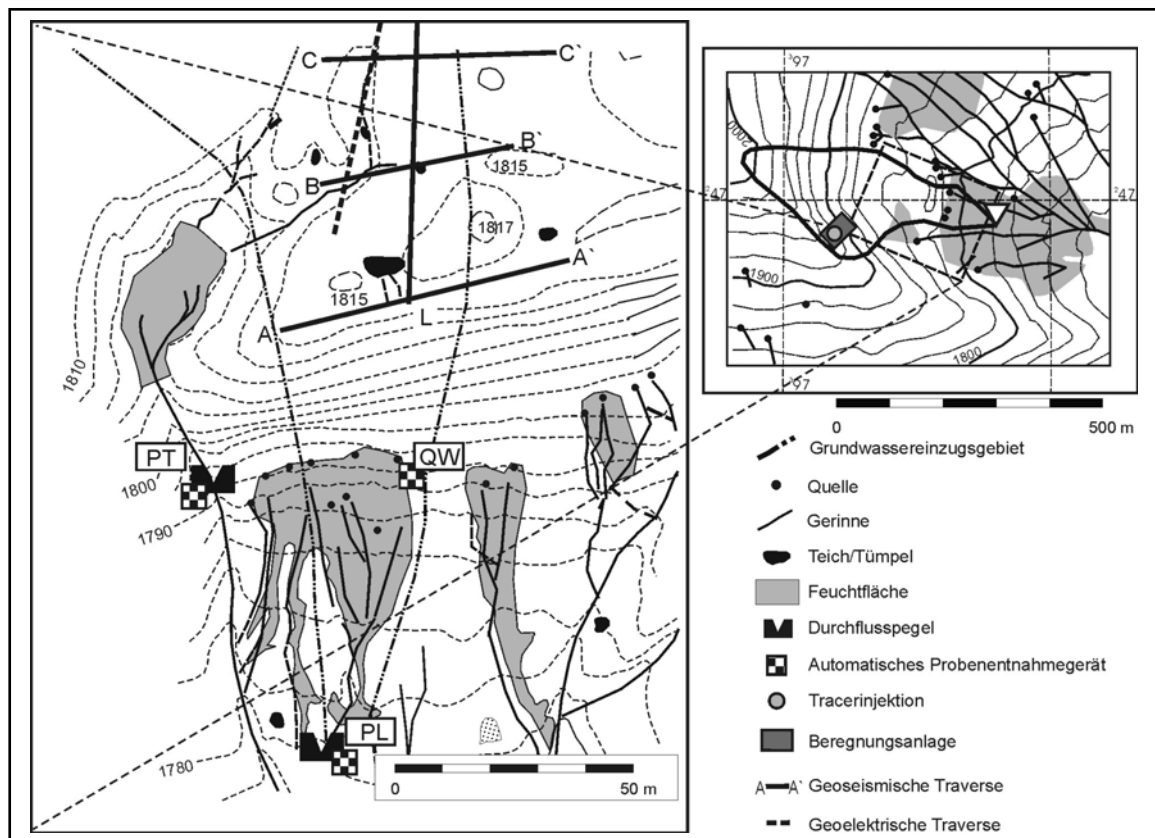


Abbildung 19: Lage der seismischen Profile – Feuchtfläche Limbergalm (TILCH ET AL. 2003, verändert).

6.1.11 Vermessungen

Alle Niederschlags- und Abflussmesstellen wurden zum Zwecke einer genauen Höhenangabe und zur räumlichen Einordnung vermessen. Von den Feuchtflächen wurden die Grenzen vermessen um die genauen Einzugsgebietsflächen berechnen zu können. Die Vermessungen erfolgten sukzessive.

Bei der geodätischen Vermessung kamen ein WILD T16 Theodolit und ein KERN DISTOMAT Infrarot-Entfernungsmesser mit zugehörigen Reflektoren zum Einsatz. Die Geräte wurden vom Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie der TU Wien zur Verfügung gestellt. Das automatische Tachymeter für die Vermessung der Rückhaltebecken in der Marxten Hochalm wurde von der Wildbach- und Lawinerverbauung in Zell am See zur Verfügung gestellt.

Die Messstellen wurden mit so genannten fliegenden Polygonzüge an das Vermessungsnetz der österreichischen Bundesvermessung angeschlossen. Diese Methode sieht vor, an einem koordinatenmäßig bekannten Punkt die Anschlussrichtung zu anderen triangulierten Punkten (Fernziele) zu messen. Beim fliegenden Polygonzug ist der letzte Polygonpunkt koordinativ nicht bekannt, und somit keine unabhängige Lagekontrolle möglich. Um grobe Fehler, etwa durch Fehlmessungen, erkennen und ausgleichen zu können, wurden im Verlauf der Polygonzugmessung erstens so viele Fernziele wie möglich eingemessen, um einen Winkelausgleich durchführen zu können, zweitens wurde jeweils am letzten oder vorletzten Punkt der beiden Polygonzüge ein Rückwärtsschnitt gemessen. Der WILD T16 Theodolit erlaubt als Minuteninstrument beim Rückwärtsschnitt zwar nur Genauigkeiten im Dezimeterbereich, dies erscheint aber für den Zweck der Vermessung und zur Beseitigung grober Fehler ausreichend.

Die Vermessungsdaten wurden mit dem vom Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie zur Verfügung gestellten Programmsystem GEOPHIL ausgewertet. Hierbei ergaben sich dank der idealen Bedingungen bei den Außenarbeiten hohe Genauigkeiten (im Zentimeterbereich). Im Falle einer Fehlmessung konnte der Fehler dank der gemessenen Rückwärtsschritte auf etwa einen Dezimeter reduziert werden. Die weiteren Ausarbeitungen der Vermessungsdaten wurden mit der Software AutoCAD vorgenommen.

6.2 Labormethoden

Für die Bestimmung bodenchemischer und bodenphysikalischer Parameter wurden von MARKART & KOHL (1993b) im Untersuchungsgebiet an 62 Beprobungspunkten ungestörte und gestörte Bodenproben entnommen und für die Laboranalytik entsprechend den Empfehlungen für die Waldbodenuntersuchung in Österreich (BLUM ET AL. 1989) gelagert und aufbereitet. In der Summe waren es 471 Stechzylinderproben (\hat{a} 200 cm³) und 301 Lockermaterialproben.

Von MARKART & KOHL (1993b) wurden die **bodenchemischen Parameter** pH-Wert und organische Substanz gemessen, während die **bodenphysikalischen Parameter** die Messgrößen Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Feststoffdichte und gesättigte Leitfähigkeit umfassen. Aus diesen Bodenparametern erfolgte die Berechnung der Parameter Gesamtporenvolumen, Substanzvolumen, organische Substanz und mineralische Substanz als Anteile am Substanzvolumen, Korngrößen als Anteil an minerali-

scher Substanz, Bodenart, Wasseranteil, max. und min. Wasserkapazität, permanenter Welkepunkt, Gröbstporenanteil, Grobporenanteil, Mittelporenanteil, Feinporenanteil, Feldkapazität, Luftkapazität, minimales Luftvolumen, Minimalretention, pot. Infiltration bei Feldkapazität und die Summe der Infiltrationsfähigkeit über mehrere Tiefenstufen berechnet.

6.3 Datenzeitraum

Der Datenzeitraum für die Berichtlegung umfasst den Zeitraum von November 1991 bis Frühjahr 2008. Bis auf den Pegel Rammern wurden alle Messeinrichtungen im Sommer 2005 abgebaut und es erfolgt keine Datenaufzeichnung mehr. Neu errichtet wurde die Klima- und Abflussmessstelle „Marxten Hochalm“, deren Daten zur Untersuchung der Wirkung eines Rückhaltebeckens verwendet werden. Neben dem Niederschlag werden der Wasserstand im Rückhaltebecken und der Abfluss (Thompson-Dreieckswehr) im Vorfluter gemessen (5 min-Intervall). Die Datenaufzeichnung erfolgt ganzjährig.

7 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden alle Untersuchungsergebnisse, die im Rahmen verschiedenster Forschungsprojekte im Löhnersbach durchgeführt wurden, dargestellt. Zu Beginn wird auf die Verwaltung und Aufbereitung aller punktueller und räumlicher Daten eingegangen, anschließend werden die Ergebnisse der Analyse der im Einzugsgebiet maßgebenden Abflussbildungsprozesse erläutert sowie die der Modellierung des Abflusses mit verschiedensten Modellen. Die Quellen für das Ergebniskapitel stellen im Wesentlichen Forschungsberichte und Publikationen der beteiligten Wissenschaftler dar, wie KIRNBAUER, R., HAAS, P., TILCH, N., ZILLGENS, B. und JOHST, M.

7.1 Hydrologisches Informationssystem „Löhnersbach“

Im Folgenden wird die Struktur und der Inhalt des hydrologischen Informationssystems sowie die Aufbereitung der jeweiligen Daten beschrieben, die im Rahmen der Abflussmodellierung als sogenanntes „pre-processing“ notwendig war. Inhalt dieses Informationssystems sind vor allem hydrologische Zeitreihen und räumliche Geodaten (Boden, Relief, Geologie usw.).

7.1.1 Aufbau des hydrologischen Informationssystems „Löhnersbach“

7.1.1.1 Eingesetzte Software

Zur Umsetzung des hydrologischen Informationssystems „Löhnersbach“ wird das GIS-Softwarepaket ArcGIS 9.2 der Firma ESRI verwendet. Für die Datenverwaltung und Datenableitung außerhalb des GIS wird die Datenbanksoftware Access 2003 und das Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2003 (beides MS Office) eingesetzt.

Die neuartige Struktur von ArcGIS erlaubt es eine Personal Geodatabase anzulegen, in der die Raumdaten direkt als .mdb-Dateien (Access-Format) abgespeichert werden (LIEBIG & MUMMENTHEY 2005, LIEBIG 2006). Dieses Format unterscheidet sich grundsätzlich von den bisherigen Formaten „Coverage“ und „Shape“, in denen die Geometrie und Sachdaten noch in einer bestimmten Anzahl von Dateien gespeichert wurden. Das neue Format basiert hingegen auf einer relationalen Datenbank, in der die raumbezogenen Daten gespeichert werden. Diese können in Access ohne weitere Umformatierung bearbeitet werden. Dort sind durch die Anlage von einzelnen Datentabellen Verknüpfungen möglich.

7.1.1.2 Grundlagen und Aufbau des Informationssystems

Insgesamt sind in dem hydrologischen Informationssystem „Löhnersbach“ alle grundlegenden Raumdaten und Zeitreihen, die im Rahmen der Forschungsprojekte im Löhnersbachgebiet gewonnen wurden, gespeichert. Dazu gehören z.B. Daten aus Kartierungen zur Geologie, zur Verbreitung der Sättigungsflächen, zur Pedologie, sowie Messdaten aus Einzeluntersuchungen, wie tägliche Abflussmessungen oder tra-

cerhydrologische Studien. Eine genaue Auflistung der Dateninhalte ist in Kapitel 6.1.2 und 7.1.2 zu finden. Die einzelnen Daten bestehen aus Vektor-, Raster- oder Attributdateien und stehen gegebenenfalls über gemeinsame Schlüsselitems miteinander in Verbindung oder können je nach Fragestellung miteinander kombiniert werden.

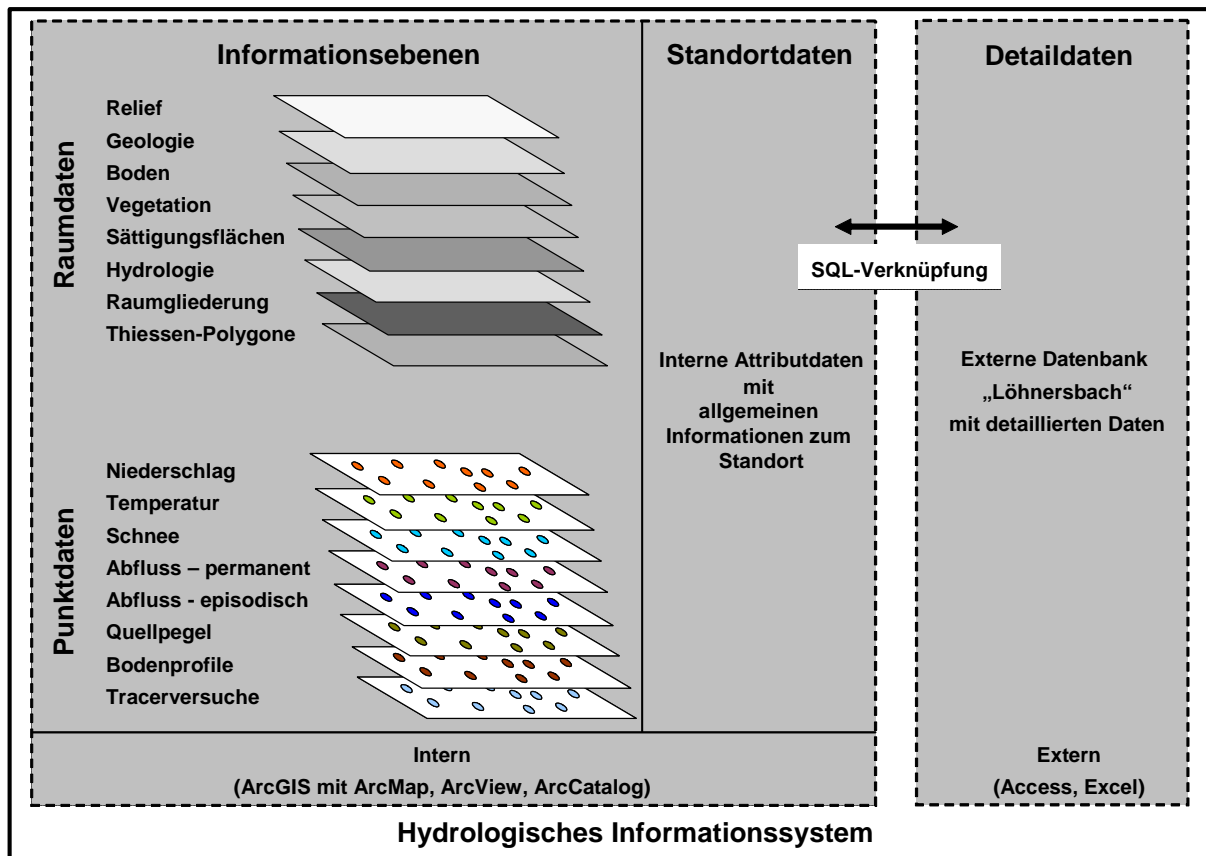


Abbildung 20: Struktur des hydrologischen Informationssystems „Löhrnsbach“.

Prinzipiell werden alle Eingangsdaten als Informationsebenen bezeichnet, wobei zwischen Punkt- und Raumdaten zu unterscheiden ist (Abbildung 20). Unter den ersten Bereich fallen z.B. Zeitreihen zu Abfluss, Niederschlag, Temperatur oder Schneemessungen. Als Raumdaten werden flächenhafte Daten zu Geologie, Boden, Relief, Vegetation oder Gewässer verstanden. Die punktuellen Daten, die die Grundlage für diese Raumdaten bilden, z.B. einzelne Bodenprofile, werden als Punktdaten verstanden. Die Inhalte der einzelnen Informationsebenen werden getrennt in Standort- und Detaildaten gespeichert.

Standortdaten enthalten Parameter, die die Gesamtheit der Standorteinheit kennzeichnen und sind in der Attributtabelle der jeweiligen Informationsebene enthalten. Bei der Bodenkarte wäre das z.B. der jeweilige Bodentyp (vgl. Kap. 7.1.2.1.3). Diese Attributdatei ist folglich auch die Zieldatei bei Tabellenverknüpfungen bzw. –verbindungen mit den Detaildaten. (Diese Standortdaten sind ausschließlich in ArcMap zu bearbeiten, nicht in Access.)

Detaildaten sind zusätzliche Daten zu den einzelnen Informationsebenen, die extern in Access verwaltet werden und dort auch verändert oder ergänzt werden können. Diese Daten können im ArcCatalog zwar visualisiert werden, sollten dort aber nicht bearbeitet werden. Detaildaten wären z.B. die tiefenbezogenen Horizontdaten von Boden-

profilen oder die gemessenen Schneehöhen an dem entsprechenden Standort. Der Import dieser externen Detaildaten erfolgt mittels **SQL-Abfrage** (*Structured Query Language*), wobei die dadurch erstellten Tabellen dauerhaft oder temporärer Art sind. D.h. lediglich die aktuelle Verbindung wird im Projekt-File dauerhaft gespeichert, nicht der neue Datensatz. Die Verknüpfung erfolgt in ArcMap mit dem Befehl **Join and Relates**.

7.1.2 Daten im hydrologischen Informationssystem „Löhnersbach“

Im Folgenden werden gegliedert nach einzelnen Informationsebenen, deren Dateninhalte, -struktur sowie deren Aufbereitung beschrieben.

7.1.2.1 Raumdaten

7.1.2.1.1 Informationsebene Relief

Datei: DHM10_Raster (Digitales Höhenmodell mit 10 m Rasterbreite)

ASCII: DHM10_Löhnersbach.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Datei: DHM10

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

Gridcode (Höhe ü. A.)

Shape Length

Shape Area

Legende: dhm10.lyr

Mit dem Spatial Analyst wurden aus dem DGM10 die folgende Parameter abgeleitet.

Datei: Contourlines10 (Höhenlinien aus 10 m DHM)

Typ: Line

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

CONTOUR

Shape Length

Datei: Neigung

in Grad: Neigung_Grad

in Prozent:Neigung_Proz

ASCII: in Grad: Neigung_Grad.txt

in Prozent:Neigung_Proz.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: in Grad: neigung_grad.lyr

in Prozent:neigung_Proz.lyr

Datei: Exposition10

ASCII: Exposition10.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Exposition10.lyr

7.1.2.1.2 Informationsebene Geologie

Datei: Hydrogeologie_Pirk110

ASCII: hydrogeologie_pirk110.txt

Typ: Raster (10x10m Auflösung)

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Hydrogeologie_Pirk110.lyr

Datei: Geolines_pirk110 (Störungszonen)

ASCII: geolines_pirk110.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: geolines_Pirk110.lyr

7.1.2.1.3 Informationsebene Boden

Datei: Bodenkarte10

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

ID

Gridcode

Bodentyp

Subbodentyp

Shape

Shape Length

Shape Area

Legende: Bodenkarte10_typ.lyr
Bodenkarte10_subtyp.lyr

Datei: Bodenkarte10r

ASCII: bodenkarte10.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Bodenkarte10_raster_typ.lyr

7.1.2.1.4 Informationsebene Vegetation

Datei: Vegetation10

ASCII: vegetation10.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Vegetation10.lyr

7.1.2.1.5 Informationsebene Sättigungsflächen

Datei: feurobert10 (flächige Digitalisierung der Feuchtflächen von Herbert Pirkl
durch Robert Kirnbauer)

ASCII: feurobert10.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Datei: feupirkl10 (Feuchtflächen – Kartierung von Herbert Pirkl)

ASCII: feupirkl10.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

7.1.2.1.6 Informationsebene Hydrologie

Auf Basis der Reliefdaten und anderer Punktdaten wurden verschiedene hydrologische Parameter über die entsprechenden Befehle in ArcGIS berechnet. Hierzu gehören die Grenze des Einzugsgebietes, die der Teileinzugsgebiete, das Gerinnenetz, Fließlängen sowie Konzentrationszeiten.

Datei: Einzugsgebietsgrenze

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

Gridcode

TEZGNummer

Shape Length

Shape Area

Datei: EinzugsgebietsgrenzeR

ASCII: einzugsgebietsgrenze10.txt

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Einzugsgebietsgrenze.lyr

Datei: Teileinzugsgebiete

Typ: Polygon

Attribute:

Shape

ID

Gridcode

TEZGNummer

Shape Length

Shape Area

Datei: Teileinzugsgebiete10
ASCII: teileinzugsgebiete10.txt
Typ: Raster
Attribute:
ObjectID
Value
Count
Legende: Teileinzugsgebiete.lyr

Datei: Loehnersbach (Gerinne aus Raster in Polyline umgewandelt und mit Einzugsgebietsgrenze verschnitten und in einzelne Gerinneabschnitte unterteilt, von 0 bis 20)
Typ: Line
Attribute:
ObjectID
Shape
Channel ID
Shape Length

Datei: Loehnersbach_lang (Gerinne Löhnersbach bis zur Mündung aus DHM generiert)
ASCII: loehnersbach_lang10.txt
Typ: Raster
Attribute:
ObjectID
Value
Count

Datei: Loehnersbach (Gerinne von Robert Kirnbauer kartiert)
Typ: Line
Attribute:
FID
Shape
Entity
Layer
Level
Elevation
Color
MSLINK_DMR
Length
Breite
Laenge
Breite_2
Breitekate

Notiz: Dieses shp-file befindet sich auf dem beiliegenden elektronischen Datenträger (DVD) aus technischen Gründen in der oberen Ordner Ebene.

Datei: Fließrichtung (flowdir_fill1)

ASCII: fließrichtung.asc

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Fließrichtung .lyr

Datei: Fließakkumulation

ASCII: fließakkumulation.asc

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Fließakkumulation .lyr

Datei: Fließlängen

ASCII: fließlängen.asc

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Fließlängen.lyr

Datei: Konzentrationszeiten (berechnet nach MORGALI & LINSLEY 1965)

Konzentrationszeit_10min

Konzentrationszeit_601min (Klassifizierung der Konzentrationszeiten in
60 min-Klassen mit Gerinnebereich 0 bis 1 min)

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

Gridcode

Value

Shape Length

Shape Area

Legende: Konzentrationszeit_5min.lyr

Konzentrationszeit_10min.lyr

Konzentrationszeit_601min.lyr

Datei:

Konzentrationszeiten (berechnet nach MORGALI & LINSLEY 1965)

Konzentrationszeiten_5min_Raster (Klassifizierung in 5 min-Klassen)

Konzentrationszeiten_10min_Raster (Klassifizierung in 10 min-Klassen)

Konzentrationszeiten_60min_Raster (Klassifizierung in 60 min-Klassen)

Konzentrationszeiten_601min_Raster (Klassifizierung in 60 min-Klassen mit Gerin-
nebereich 0 bis 1 min)

ASCII: konzentrationszeiten_5min.asc, konzentrationszeiten_10min.asc,
konzentrationszeiten_60min.asc, konzentrationszeiten_601min.asc

Typ: alle Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Konzentrationszeit_5min_Raster.lyr
Konzentrationszeit_10min_Raster.lyr
Konzentrationszeit_60min_Raster.lyr
Konzentrationszeit_601min_Raster.lyr

7.1.2.1.7 Informationsebene Raumgliederung

Im Rahmen der hydrologischen Einzugsgebietsmodellierung wird, um unter anderem die Unsicherheit von Modellen zu verkleinern, die zu einem gewissen Teil von der richtigen Regionalisierung der Eingangsdaten für das Untersuchungsgebiet abhängig ist, eine prozessorientierte Raumgliederung (Hydrotopausweisung) unter Anwendung von experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Die prozessbezogene Identifikation von Hydrotopen sollte Bestandteil des preprocessing sein, um eine effektive Modellanwendung und begründete Vorhersage zu ermöglichen (ETZENBERG 1998).

Bei der Hydrotopausweisung wird das Einzugsgebiet in Einheiten aufgegliedert, die hinsichtlich ihrer hydrologischen Eigenschaft homogen sind. Das als HSU-, HRU- oder Hydrotop-Konzept (HSU = „Hydrological Similar Units“, HRU = „Hydrological Response Units“) bezeichnete Verfahren basiert auf der Auswahl von relevanten Attributen, die für die Differenzierung ähnlich reagierender Flächen als maßgebend angesehen werden (z.B. Landnutzung, Bodenart, Hangneigung usw.)(BECKER & PFÜTZNER 1987, UHLENBROOK 1999). Für die jeweiligen Hydrotope, deren Abflussreaktion durch einen spezifischen Abflussbildungsprozess dominiert wird, können einfache Modellansätze entwickelt und eingesetzt werden.

Für das Löhnersbachgebiet wurden aufgrund der Tatsache, dass verschiedene Arbeitsgruppen eine Abflussmodellierung durchgeführt haben (vgl. Kap. 7.3), unterschiedliche Raumgliederungen entworfen, wobei die Gliederung stets prozessorientiert erfolgte. Je nach Modellphilosophie werden aber andere Einflussfaktoren für die Abflussbildung als maßgebend angesehen und dementsprechend die hydrologisch homogenen Einheiten ausgegliedert. Im Folgenden werden die einzelnen Raumgliederungen aufgeführt mit Verweis auf das entsprechende Modell bzw. Kapitel in dem die Modellergebnisse beschrieben sind.

Raumgliederung der AG Potsdam (ZILLGENS ET AL. 2005)

Datei: 1) Raumgliederung_Potsdam und 2) Raumgliederung_Potsdam_Clip

Während sich 1) räumlich auf das gesamte Einzugsgebiet des Löhnersbaches bezieht, umfasst 2) ausschließlich das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ ab dem Pegel Rammern.

Typ: Polygon

Attribute:

FID

Shape

ID

Area_Meter

Perimeter

SourceTHM

Class

Bezeichner

Prozesse1

Prozesse2

Prozesse3

ZProzesse1

Legende: Raumgliederung_Potsdam_Clip.lyr

Datei: Raumgliederung_PotsdamR

Aus dem shp-file Raumgliederung_Potsdam_Clip wurde ein Raster mit dem Attribut „Prozesse1“ erstellt.

ASCII: raumgliederung_PotsdamR.asc

Typ: Raster

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Prozesse1

Legende: Raumgliederung_PotsdamR.lyr

Raumgliederung der AG Freiburg (TAC^D) (JOHST 2003)

Datei: Raumgliederung_TACD

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

Gridcode

Neuer_name

Shape Length

Shape Area

Legende: Raumgliederung_TACD.lyr

Datei: RaumgliederungTACD

ASCII: raumgliederung_tacd.asc

Typ: Raster

Attribute:

Value

Count

Neuer_name

Legende: RaumgliederungTACD.lyr

Raumgliederung nach N. Tilch (TILCH ET AL. 2006b)

Datei: Raumgliederung_TilchR

ASCII: raumgliederung_tilch.asc

Typ: Raster (in 50x50m Auflösung)

Attribute:

ObjectID

Value

Count

Legende: Raumgliederung_TilchR.lyr

Datei: Raumgliederung_Tilch

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

Gridcode

Shape_Length

Shape_Area

Legende: Raumgliederung_Tilch.lyr

Raumgliederung der AG Wien (HQSIm)

Datei: Raumgliederung_HQSIm

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

ID

Gridcode

Rgl_01

Shape_Length

Shape_Area

Legende: Raumgliederung_HQSIm.lyr

Raumgliederung der AG Wien (BROOK)

Datei: nur als GRID vorliegend ohne Attributdaten; aus AutoCAD importiert

ASCII: raumgliederung_brook.asc

Typ: ESRI GRID (Raster)

Attribute: ---

Legende: ---

7.1.2.1.8 Informationsebene Thiessen-Polygone

Datei: Thiessenpolygone

Typ: Polygon

Attribute:

ObjectID

Shape

Nummer

Nummer_1

Thiesnummer

Total_Area

THS_KM2

Weight

Ths_Rain

Areal-Rain

Name

Shape_Length

Shape_Area

Legende: Thiessenpolygone.lyr

7.1.2.2 Punktdaten - Standortdaten

Die Inhalte der Punktdaten gliedern sich in Standortdaten (vgl. Kap. 7.1.2.2) und in Detaildaten auf (vgl. Kap. 7.1.2.3). Während Erstere über eine Tabelle in ArcMap oder ArcView aufgerufen werden können, liegen die Detaildaten als externe Dateien in Access oder Excel vor und müssen über einen Schlüssel und eine SQL-Verbindung mit der entsprechenden Standortdatei verknüpft werden. Dieser Schlüssel ist bei den Standortdaten als Option vorhanden. Da die Verknüpfung für die vorliegenden hydro-meteorologischen Datenreihen zu umfangreich wäre, liegen die entsprechenden Datenreihen ohne spezifische Spalte für den Schlüssel als externe Access-Dateien vor. Die Standort- und Detaildaten befinden sich, soweit sie als Access-Datei vorliegen, in der Access-Datenbank „HISLöhnersbach“.

7.1.2.2.1 Informationsebene Niederschlag

Sowohl bei den Niederschlags- als auch bei den Temperaturstationen sind die Klimastationen Saalbach und Schmittenhöhe als fiktive Stationen enthalten. Sie wurden aus modelltechnischen Gründen und um weitere Klimainformationen zu erhalten in das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ transformiert, bei ähnlichen topographischen

Standortvoraussetzungen. Die Station Saalbach wurde entsprechend ihrer eigentlichen Höhenlage und Exposition an den Pegel Rammern, die Station Schmittenhöhe zwischen Seetörl und den Hochkogel „verlegt“ (vgl. Kap. 6.1.2, Abbildung 9).

Tabelle 5: Übersicht – Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature_ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Name | Name des Messortes | Text | |
| Messgegenstand | Niederschlag | Text | |
| Messmethode | z.B. Kippwaage | Text | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Foto | Foto der Niederschlagsstation | Raster | |
| Messintervall | | Text | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.2.2 Informationsebene Temperatur

Tabelle 6: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature_ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Name | Name des Messortes | Text | |
| Messgegenstand | Temperatur | Text | |
| Messmethode | z.B. Thermometer | Text | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Foto | Foto der Temperaturstation | Raster | |
| Messintervall | | Text | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.2.3 Informationsebene Abfluss - permanent

Diese Informationsebene beinhaltet die Pegelstandorte mit zeitlich hoch aufgelösten Abflussmessungen über einen längeren Zeitraum auf Basis von Wasserstandsmessungen mit Drucksonden und Pegelschlüsseln (vgl. Kap.6.1.4.1).

Tabelle 7: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature_ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Name | Name des Messortes | Text | |
| Messgegenstand | Abfluss | Text | |
| Messmethode | z.B. Drucksonde | Text | |
| Messeinheit | Phys. Einheit | Text | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Foto | z.B. Foto der Pegelstation | Raster | |
| Messintervall | Zeitintervall | Short integer | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.2.4 Informationsebene Abfluss - episodisch

Diese Informationsebene beinhaltet die Standorte mit täglichen Abflussmessungen über einen bestimmten Zeitraum auf Basis der Salzverdünnungsmethode (vgl. Kap. 6.1.4.2) oder kontinuierlichen Abflussmessungen über einen spezifischen Zeitraum bei z.B. experimentellen Prozessstudien im Gelände.

Tabelle 8: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature_ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Name | Name des Messortes | Text | |
| Messgegenstand | Abfluss | Text | |
| Messmethode | Salzverdünnung | Text | |
| Messeinheit | Phys. Einheit | Text | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Foto | | Raster | |
| Messintervall | Absoluter Istwert | Text | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.2.5 Informationsebene Quellpegel

In dieser Informationsebene wurde die Lage der Quellmessstation im Teileinzugsgebiet Klamm bach aufgenommen. An diesem Standort werden Quellabfluss, elektrische Leitfähigkeit, Trübung und Temperatur des Quellwassers gemessen. Da die Messdaten nicht in der Datenbank enthalten sind, erfolgt keine gesonderte Differenzierung der verschiedenen Methoden in einzelne Layer, wodurch eine Verknüpfung möglich wäre. Die in der Tabelle des entsprechenden Layers angegebenen Methodik steht als Vertretung für alle anderen Methoden, die nicht explizit aufgeführt sind.

Tabelle 9: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|--|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Name | Name des Messortes | Text | |
| Messgegenstand | Abfluss, elektrische Leitfähigkeit, Trübung und Wassertemperatur | Text | |
| Messmethode | | Text | |
| Messeinheit | Phys. Einheit | Text | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Foto | | Raster | |
| Messintervall | Zeitintervall | Short integer | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.2.6 Informationsebene Schnee

In einer Einzelkampagne wurde an verschiedenen Standorten Schneemessungen durchgeführt, deren Positionen in diesem Layer enthalten sind.

Tabelle 10: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe |
| Feature ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Messgegenstand | Schneehöhe | Text | |
| Messmethode | | Text | |
| Messeinheit | Phys. Einheit | Text | |
| Foto | | Raster | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Messintervall | Zeitintervall | Text | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.2.7 Informationsebene Bodenprofile

Diese Informationsebene beinhaltet Informationen (Lage, Höhe, Vegetation usw.) zur allgemeinen Beschreibung des Bodenprofilstandortes und basiert auf MARKART & KOHL (1993a,b).

Tabelle 11: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-------------------|--|----------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature_ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Kurze Schlüsselnummer des Profilstandortes | Zahl | Schlüssel |
| Profilnummer | Profilnummer von Chiffard vergeben | Text | |
| Alte Profilnummer | Profilnummer von Markart & Kohl | Text | |
| Messgegenstand | | Text oder Zahl | Schlüssel |
| Messmethode | | Text | |
| Messzeitraum | Aufnahmedatum | Text | |
| Foto | Foto des Bodenprofils | Raster | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |
| Bodentyp | | Text | |
| Mächtigkeit | | Zahl | |
| Vegetation | | Text | |
| Exposition | | Zahl | |
| Wölbung | | Zahl | |
| Subbodentyp | | Text | |

7.1.2.2.8 Informationsebene Tracer

Diese Informationsebene beinhaltet ausschließlich die Einspeisungsstellen der künstlichen Tracer und die Standorte der automatischen Wasserprobennehmer.

Tabelle 12: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-------------|--|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature_ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| x | Rechtswert | Double | |
| y | Hochwert | Double | |
| z | Höhe in m ü. NN | Double | |
| Bezeichnung | Nummer desStandortes | Zahl | Schlüssel |
| Inhalt | Gegenstand des Messpunktes z.B. Einspeisung oder Beprobung | Text | |

Fortsetzung von Tabelle 12.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-----------------|----------------------------------|---------------|--|
| Messgegenstand | Einspeise- oder Beprobungsstelle | Text | |
| Messmethode | | Text | |
| Messeinheit | Phys. Einheit | Text | |
| Messzeitraum | | Text | |
| Foto | | Raster | |
| Messintervall | Zeitintervall | Text | |
| Datenbearbeiter | Name | Text | |

7.1.2.3 Punktdaten - Detaildaten

Im Folgenden wird die Struktur der Punktdaten beschrieben, die extern in Access gespeichert sind und dort verwaltet werden.

Die Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten aller Beobachtungsjahre wurden einer eingehenden Plausibilitätskontrolle unterzogen und nach einem bestimmten Schema bewertet (vgl. Kap. 7.1.3). In der Access-Datei gibt es daher für jede Zeitreihe eine entsprechende Spalte, in der die Messdaten bewertet sind.

7.1.2.3.1 Informationsebene Niederschlag

Tabelle 13: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format |
|----------------------|-----------------------------------|---------------|
| ID | Lfd. Nummer von Access vergeben | Long integer |
| Datum/Uhrzeit | | Text |
| N-Herzogalm | Niederschlagsstation Herzogalm | Zahl |
| N-Niesrachalm | Niederschlagsstation Niesrachalm | Zahl |
| N-Schattberg | Niederschlagsstation Schattberg | Zahl |
| N-Klinglergalm | Niederschlagsstation Klinglernalm | Zahl |
| Plau-Q- Herzogalm | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |
| Plau-Q- Niesrachalm | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |
| Plau-Q- Schattberg | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |
| Plau-Q- Klinglergalm | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |

7.1.2.3.2 Informationsebene Temperatur

Tabelle 14: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format |
|-----------------------|---------------------------------|---------------|
| ID | Lfd. Nummer von Access vergeben | Long integer |
| Temp-Schattberg | Absoluter Wert | Zahl |
| Plau-Temp- Schattberg | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |

7.1.2.3.3 Informationsebene Schnee

Tabelle 15: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|-------------------|--|---------------|-----------------|
| ID | Nummer von Access vergeben | Long integer | Primärschlüssel |
| Bezeichnung | Nummer des Messortes | Zahl | Schlüssel |
| Mittelwert | Mittelwert aus den neun Kreuzmesspunkten | Text | |
| Kreuzmesspunkt P1 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P2 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P3 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P4 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P5 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P6 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P7 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P8 | Schneehöhe in cm | Text | |
| Kreuzmesspunkt P9 | Schneehöhe in cm | Text | |

7.1.2.3.4 Informationsebene Abfluss - permanent

Tabelle 16: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format |
|------------------------|---------------------------------|---------------|
| ID | Lfd. Nummer von Access vergeben | Long integer |
| Datum/Uhrzeit | | Text |
| Q-Rammern | Hauptpegel Rammern | Zahl |
| Q-Herzogalm | Nebenpegel Herzogalm | Zahl |
| Q-Neuhausengraben | Nebenpegel Neuhausengraben | Zahl |
| Q-Limbergalm | Nebenpegel Limbergalm | Zahl |
| Plau-Q-Rammern | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |
| Plau-Q-Herzogalm | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |
| Plau-Q-Neuhausengraben | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |
| Plau-Q-Limbergalm | Plausibilitätsschlüssel | Zahl |

7.1.2.3.5 Informationsebene Abfluss - episodisch

Bei der Informationsebene „Abfluss - episodisch“ liegen für jeden Standort einzelne Access-Dateien vor, da der Messpunkt an den einzelnen Standorten nicht identisch ist und somit keine einheitliche Zeitreihe erstellt werden kann. Die nachfolgende Tabellenstruktur gilt für jede der sechs Dateien.

Tabelle 17: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format |
|---------------|---------------------------------|---------------|
| ID | Lfd. Nummer von Access vergeben | Long integer |
| Datum/Uhrzeit | | Text |
| Q (l/s) | Abfluss zum Messzeitpunkt | Zahl |
| Lf (S) | Elektr. Leitfähigkeit | Zahl |
| T (°C) | Wassertemperatur | Zahl |
| Handmessung | Art der Messung | Zahl |

7.1.2.3.6 Informationsebene Bodenprofile

Tabelle 18: Übersicht - Attributdaten.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|--------------------------------|--|---------------|----------------------------|
| OBJECTID | Lfd. Nummer von ArcMap vergeben | Long integer | Schlüssel |
| SHAPE | von ArcMap vergeben | OLE-Objekt | Keine Eingabe erforderlich |
| Feature ID | Standortnummer | Long integer | Schlüssel |
| Bodentyp | | Text | |
| Subbodentyp | | Text | |
| Horizont | | Text | |
| Probentiefe | | Text | |
| Bodenprofilmächtigkeit | | Zahl | |
| minWK (330 bar) | minimale Wasserkapazität bei einem Druck von 330 bar | Zahl | |
| Kf Wert (cm/d) | gesättigte Leitfähigkeit (cm/d) | Zahl | |
| nFK | nutzbare Feldkapazität (Vol.%) | Zahl | |
| FK | Feldkapazität (Vol.%) | Zahl | |
| GÖP | Gröbtporenanteil (Vol.%) | Zahl | |
| GesPV | Gesamtporenvolumen (Vol.%) | Zahl | |
| GP | Grobporenanteil (Vol.%) | Zahl | |
| MP | Mittelporenanteil (Vol.%) | Zahl | |
| FP | Feinporenanteil (Vol.%) | Zahl | |
| SV | Substanzvolumen (=100-GPV) (Vol.%) | Zahl | |
| LK | Luftkapazität (Vol.%) | Zahl | |
| pot Infiltrate (mm/h) | (mm/h) | Zahl | |
| pot Infiltsomme | (mm) | Zahl | |
| max LV | Maximales Luftvolumen (Vol.%) | Zahl | |
| min Retention | Minimalretention (Vol.%) | Zahl | |
| Skelettanteil | | Zahl | |
| mineral Substanz Volumenanteil | (Vol.%) | Zahl | |
| Sand (gesamt) | (Gew.% vom mineralischen Substanzvolumen) | Zahl | |
| Schluff (gesamt) | (Gew.% vom mineralischen Substanzvolumen) | Zahl | |
| Ton (gesamt) | (Gew.% vom mineralischen Substanzvolumen) | Zahl | |
| Grobsand | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |
| Mittelsand | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |
| Feinsand | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |
| Grobschluff | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |

Fortsetzung von Tabelle 18.

| Feld | Beschreibung | Format | |
|----------------------------------|-----------------------|---------------|--|
| Mittelschluff | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |
| Feinschluff | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |
| Ton | wie bei Sand (gesamt) | Zahl | |
| Bodenart | Österr. Texturdreieck | Text | |
| Lagerungsdichte | | Zahl | |
| FSD | Feststoffdichte | Zahl | |
| Durchwurzelung | | Zahl | |
| org Substanz Gewichtsanteil | (Gew.%) | Zahl | |
| org Substanz Volumenanteil | (Vol.%) | Zahl | |
| pot pH Wert (CaCO ₃) | | Zahl | |
| akt pH Wert (H ₂ O) | | Zahl | |
| Tagwassereinfluss | Schlüsselwert | Zahl | |
| Geländeform | Schlüsselwert | Zahl | |
| Weidenutzung | Schlüsselwert | Zahl | |

7.1.3 Aufbereitung der Eingangsdaten – Preprocessing

Für die Verwendung der Messdaten bedarf es einer Aufbereitung der verschiedenen Punkt- und Raumdaten. Dabei handelt es sich zum Beispiel um die Schließung von Datenlücken in den Zeitreihen (z.B. Niederschlag) oder um die Korrektur des Niederschlages hinsichtlich des Windeinflusses. Bei den Raumdaten geht es im Wesentlichen um die Aufbereitung des Digitalen Höhenmodells und um die Ableitung zusätzlicher Daten wie z.B. Vegetationsbedeckungsgrad oder dem Abgleich unterschiedlicher Karten, die von verschiedenen Personen oder nach unterschiedlichen Methoden aufgenommen wurden, z.B. Sättigungsflächenkarte.

Im Folgenden steht vor allem die Aufbereitung der Zeitreihen im Vordergrund, die von ZILLGENS, JOHST und CHIFFLARD durchgeführt wurde. Auf die Bearbeitung der Raumdaten hinsichtlich der hydrologischen Raumgliederung wird in den einzelnen Kapiteln, die sich mit der Abflussmodellierung beschäftigen, näher eingegangen (vgl. Kap. 7.3.1 bis 7.3.4).

7.1.3.1 Punktdaten - Zeitreihen

Das Hauptproblem bei der Aufbereitung meteorologischer und hydrologischer Datenreihen war die Einstellung der Messungen in den Wintermonaten im Untersuchungsgebiet. Es war daher notwendig, die zwei außerhalb des Gebietes liegenden Klimastationen einzubeziehen, für die ganzjährige Messreihen zu zahlreichen meteorologischen Größen als Tageswerte zur Verfügung standen. Aus modelltechnischen Gründen mussten für diese zwei Klimastationen Standorte mit ähnlicher topographischer Position im Löhnersbach-Einzugsgebiet gewählt werden. Die Station Saalbach wurde an den Pegel Rammern, die Station Schmittenhöhe entsprechend ihrer eigentlichen Höhenlage und Exposition zwischen den Seetörl und den Hochkogel „gesetzt“ (Abbildung 9). Eine wesentliche Herausforderung bei der Aufbereitung der Modelleingangsdaten bestand in der Disaggregation der Tageswerte in Stundenwerte und der Zusammenstellung der

Daten für die Wintermonate. Die Aufbereitung der Messdaten umfasst den Zeitraum 1996 bis 2005.

7.1.3.1.1 Niederschlag

Für die Wintermonate, an denen keine Messdaten aus dem Untersuchungsgebiet vorlagen, wurden die Tageswerte der Klimastationen (Saalbach und Schmittenhöhe) als Niederschlagsinput verwendet. Hierfür wurden die Tageswerte gleichmäßig auf den Tag verteilt, da höher aufgelöste Vergleichsmessungen, die zur Plausibilisierung verwendet werden hätten können, nicht vorlagen. Diese Lösung ist sicherlich nicht befriedigend, vor allem nicht für eine Analyse von einzelnen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen, und soll daher in erster Linie für eine Wasserhaushaltsbilanzierung über einen Zeitraum von einem Jahr verwendet werden. Für die Ereignisanalyse werden die zeitlich hoch aufgelösten Messreihen der Sommermonate herangezogen.

Im Rahmen eines ersten Plausibilitätstestes wurden die Niederschlagsdaten der Gebietsstationen (Schattberg, Herzogalm, Niesrachalm, Limbergalm und Klingleralm) visuell verglichen und fehlerhafte Daten eliminiert. Lagen in niederschlagsfreien Zeiten - alle Stationen weisen keinen Niederschlag auf - einzelne Fehlwerte (bis 30 Minuten) vor, so wurden diese mit Nullwerten ersetzt. Wenn an den übrigen Stationen Niederschlag registriert wurde, so wurden die Fehlwerte nicht ersetzt, da durch die räumliche Variabilität eine Interpolation von Niederschlagsdaten mit zuviel Unsicherheit in der Datenqualität verbunden wäre.

Die Daten wurden nach folgendem Schema bewertet (Tabelle 19). Die Plausibilitätswerte sind in der jeweiligen Access oder Exceltabelle in der Spalte Datenqualität aufgeführt und können somit direkt dem entsprechenden Messwert zugeordnet werden.

Tabelle 19: Beschreibungsschlüssel für die Plausibilitätskontrolle des Niederschlages.

| Plausibilitätswerte | Beschreibung |
|---------------------|--|
| 0 | Kein Messwert vorhanden |
| 1 | Messwert vorhanden und plausibel |
| 2 | Messwert unplausibel bzw. fraglich |
| 3 | Messwert, der in niederschlagsfreien Zeiten eingesetzt wurde (entspricht ausschließlich dem Wert Null) |

Die Niederschlagsdaten (so wie sie in der Datenbank gespeichert sind) sind nicht windkorrigiert, da diese Korrektur zum Teil von den verschiedenen Abflussmodellen automatisch durchgeführt wird. So erfolgt zum Beispiel im Modell TAC^D die Niederschlagskorrektur nach SCHULLA (1997, zit. in ROSER 2001, 31) über einen linearen Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmesswerten und der Windgeschwindigkeit:

$$P_{korr} = P \cdot (a + b \cdot u_w)$$

- mit P : gemessener Niederschlag [mm]
 P_{korr} : korrigierter Niederschlag [mm]
 u_w : Windgeschwindigkeit [$m s^{-1}$]
 a, b : Korrekturfaktoren [-]

7.1.3.1.2 Temperatur

Speziell für die Modellierung des Schneeschmelzprozesses ist es notwendig, möglichst realistische Tagesgänge der Lufttemperatur zu verwenden. Da zeitlich hoch aufgelöste Tagesgänge nur in Sommermonaten vorlagen (Gebietsstationen), galt es die Tageswerte der Klimastationen zeitlich zu disaggregieren. Von JOHST (2003) wurden daher die täglichen mittleren Temperaturwerte der Klimastationen Schmittenhöhe und Saalbach unter Zuhilfenahme des Tagesganges des Sonnenstandes und der täglichen Sonnenscheindauer in Stundenwerte transformiert. Mit Hilfe des im Verdunstungsmodell implementierten Modells POTRAD (VAN DAM 2000) wurde der Azimutwinkel der Sonnenstrahlen unter Berücksichtigung der geographischen Breite des Löhrnersbachgebiets (47°) berechnet und daraus eine Sinuskurve zwischen -1 und 1 erstellt (Abbildung 21). Diese Sinuskurve wurde so auf der Zeitachse verschoben, dass sie im Verlauf dem Tagesgang der Lufttemperatur entsprach. Für den Monat Januar lag damit das Minimum um 5:00 Uhr und das Maximum um 13:00 Uhr, was laut WEISCHET (1995) dem mittleren Tagesgang im April für den Raum Wien entspricht. Diese Januar-Sinuskurve wurde als Standardkurve für die Transformation der Tagesmittel- in die Stundenwerte für das gesamte Jahr genutzt (JOHST 2003).

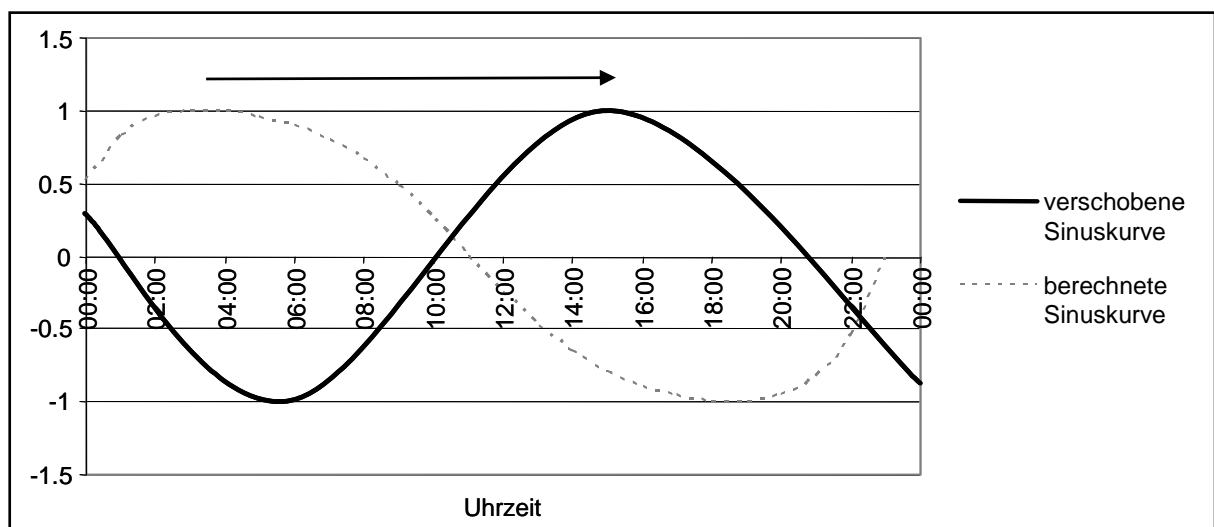


Abbildung 21: Sinuskurve des Azimutwinkels der Sonnenstrahlen als Vorlage für den Tagesgang der Lufttemperatur (JOHST 2003; verändert).

Der Tagesgang der Lufttemperatur wurde nach den Angaben WEISCHETS (1995) den jeweiligen Bewölkungsverhältnissen angepasst. Bei klarem Himmel ist sowohl die terrestrische Ausstrahlung während der Nacht als auch die solare Einstrahlung am Tag größer. Betrug die tägliche Sonnenscheindauer an der Schmittenhöhe mehr als fünf, in Saalbach mehr als vier Stunden, wurden die Werte der Sinuskurve mit vier bzw. drei multipliziert. Die niedrigeren Werte im Tal sind dadurch begründet, dass die Tallagen einerseits stärker beschattet andererseits aber auch besser vor Auskühlung geschützt sind. Die Werte dieser Standard-Sinuskurve wurden nun zu den Tagesmittelwerten der Klimastationen addiert. Um einen fließenden Tagesübergang zu erhalten, erfolgte eine Mittelung der Werte um 23:00 und 00:00 Uhr. Abschließend wurden die berechneten Stundenwerte mit den gemessenen Stundenmittelwerten des Schattbergs visuell verglichen.

Die Temperaturkurve der Schmittenhöhe lag geringfügig über jener des Schattbergs, da die Station Schmittenhöhe 27 m tiefer liegt. Das Ergebnis ist insgesamt als gut zu bewerten, größere Abweichungen sind bei plötzlichen Kälte- oder Wärmeeinbrüchen zu erwarten (siehe eingekreiste Stelle in Abbildung 22).

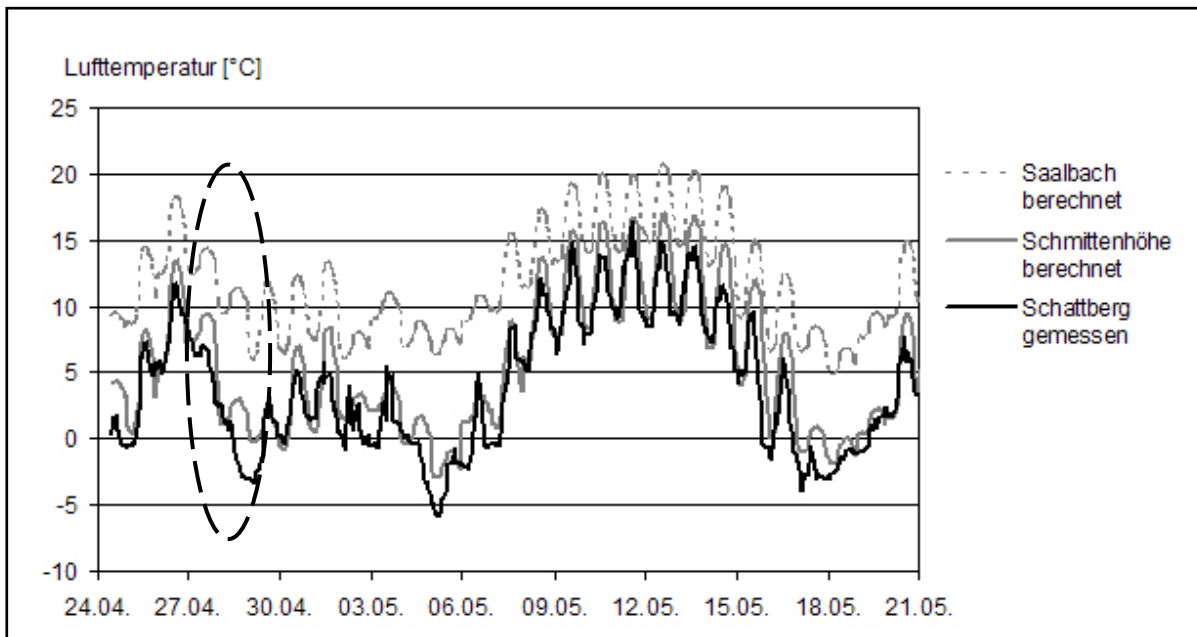


Abbildung 22: Gemessene und disaggregierte Tagesgänge der Lufttemperatur im Frühjahr 1998 (JOHST 2003; verändert).

7.1.3.1.3 Abfluss

Für den Pegel Rammern (Gebietsauslass) und für die Teileinzugsgebiete Herzogalm, Klingleralm und Limbergalm liegen im Zeitraum 01.01.1996 bis Juli 2005 Abflussmessungen in 5- bzw. 15-minütiger Auflösung vor. Die winterlichen Abflüsse und die Schneeschmelze konnten am Pegel Rammern für mehrere Jahre nur lückenhaft aufgezeichnet werden. Zusätzlich wurden im Sommer an den Seitengräben des Löhrsbachs Handmessungen nach dem Salzmischungsverfahren durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls in der Datenbank aufgenommen wurden.

Alle Abflussganglinien wurden einem visuellen Plausibilitätstest unterzogen und fehlerhafte Werte eliminiert. Der Beschreibungsschlüssel für die Plausibilitätskontrolle ist in der Tabelle 20 beschrieben.

Tabelle 20: Beschreibungsschlüssel für die Plausibilitätskontrolle des Abflusses.

| Plausibilitätswerte | Beschreibung |
|---------------------|---|
| 0 | Kein Messwert vorhanden |
| 1 | Messwert vorhanden und plausibel |
| 2 | Messwert unplausibel bzw. fraglich |
| 3 | Messwert, der durch eine lineare Interpolation oder lineare Korrelationsfunktion auf Basis anderer Pegelstationen erstellt wurde. |

Lagen kleinere Datenlücken von maximal 30 Minuten vor, so wurden die Abflussdaten linear interpoliert. Lagen größere Fehlzeiten vor, so wurde Abflussdaten in Abhängig-

keit der Pegelstationen Herzogalm und Limbergalm auf Basis einer linearen Korrelationsfunktion interpoliert. Diese beiden Pegelstationen wurden ausgewählt, da die statistischen Auswertungsergebnisse im Kapitel 7.2.10 gezeigt haben, dass die Abflussdynamik dieser beiden Pegel einen deutlichen Zusammenhang mit der Abflussdynamik am Pegel Rammern zeigt. Sind solche interpolierten Werte in der Zeitreihe vorhanden, sind sie nach dem Bewertungsschema in Tabelle 20 gekennzeichnet.

7.1.3.2 Raumdaten

7.1.3.2.1 Digitales Höhenmodell

Das zur Verfügung stehende digitale Höhenmodell weist eine Rastergröße von 10 m x 10 m Kantenlänge auf. Für die weiteren Berechnungen wurden mit der *Watershed-Funktion* in ArcGIS 9.2 (ESRI) abflusslose Senken identifiziert und ausgeglichen. Anschließend wurde das Einzugsgebiet bezogen auf den Pegel Rammern sowie die Teileinzugsgebiete der seitlichen Zubringer (z.B. Neuhausengraben, Schusterbauerngraben usw.) berechnet und abgegrenzt. Das für die einzelnen Modellierungen verwendete Gerinnenetz wurde ebenfalls über das DHM mit der Funktion *FlowAccumulation* in ArcGIS berechnet. Des Weiteren wurden aus diesem Höhenmodell die Parameter *Neigung*, *Exposition*, *Höhenschichten* und *Konzentrationszeiten* über die entsprechenden tools in ArcGIS 9.2 (ESRI) berechnet.

7.1.3.2.2 Klassifizierung der Böden

Für die verschiedenen Modellierungen z.B. BROOK bedarf es ausreichender Informationen zum oberflächennahen Untergrund, der Pedosphäre. Oft liegen aber nur Bodenkarten vor, die nur den Bodentyp enthalten, aber keine weiteren Daten zu den pedohydrologischen Eigenschaften der Böden.

Das Ziel war daher eine Einteilung von Böden in Gruppen mit gleichem Infiltrations-Desorptions- und Abflussverhalten. Zu jeder dieser Gruppen sollen dann charakteristische Kurven für den Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit K und dem Wassergehalt θ ermittelt werden, ebenso charakteristische Korngrößenverteilungen, charakteristische Porenvolumina, etc.

Der Sinn und Zweck einer solchen Gruppierung ist es, ohne aufwendige Labormessungen und Expertenbefragungen (Bodenkundler) die charakteristischen Größen für den Bodenwasserhaushalt eines Einzugsgebietes bzw. Einzugsgebietsteiles zu erhalten. Jeder neue Boden eines Einzugsgebietes soll mit Hilfe von leicht feststellbaren Eigenschaften einer dieser Gruppen zugeordnet werden können. Ist ein Boden einer dieser Gruppen zuordenbar, so können für ihn unmittelbar alle für den Bodenwasserhaushalt relevanten Größen dieser Gruppe übernommen werden. Diese Größen können in weiterer Folge für ein Simulationsprogramm Verwendung finden. Somit wäre auch der charakteristische Wassergehalts-Leitfähigkeits-Zusammenhang auf sehr einfache Weise zu erhalten.

In der Schweiz wurden im Hinblick auf waldbauliche Nutzungsmöglichkeiten an unterschiedlichen Standorten sorgfältige Bodenuntersuchungen, Feld- und Labormessungen sowie Langzeituntersuchungen durchgeführt (vgl. RICHARD & LÜSCHER 1983). Diese Daten bilden die Grundlage der nun folgenden Arbeiten.

Unter anderem wurden auch die Saugspannungs - Leitfähigkeitskurven $K(\psi)$ und die Saugspannungs - Wassergehaltskurven $\theta(\psi)$ im Labor an der ungestörten Bodenprobe zu jeweils charakteristischen Saugspannungswerten bestimmt. Diese charakteristischen Werte rühren von der **Einteilung in Saugspannungsklassen** her:

| | | |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Saugspannungsklasse 1 (= SK1) : | $\psi = 1-80$ cmWS | Gravitationswasser |
| Saugspannungsklasse 2 (= SK2) : | $\psi = 80-690$ cmWS | leicht pflanzenverfügbares Wasser |
| Saugspannungsklasse 3 (= SK3) : | $\psi = 690-15000$ cmWS | schwer pflanzenverfügbares Wasser |
| Saugspannungsklasse 4 (= SK4) : | $\psi > 15000$ cmWS | nicht pflanzenverfügbares Wasser |

Diese Saugspannungsklassen sind wichtig für eine ökologische Interpretation des Standortes. Sie geben Auskunft über die Verfügbarkeit des im Boden vorhandenen Wassers.

Unmittelbarer Ausgangspunkt für den Versuch der Gruppierung von Böden bezüglich ihres Bodenwasserhaushaltsverhaltens war das Problem, die sogenannten Bodenparameter *keslp* und *keint* für das Simulationsprogramm BROOK zu ermitteln.

Diese BROOK-Parameter werden im Programm folgendermaßen verwendet (vgl. FEDERER & LASH 1978):

$$K = keint * \theta_{keslp}$$

Sie stellen also einen direkten Zusammenhang zwischen dem ungesättigten K-Wert und dem Wassergehalt her. Dieser empirische Exponentialzusammenhang wurde von CAMPBELL (1974) vorgestellt, der folgende Beziehung zwischen den 3 Größen Saugspannung, Wassergehalt und K-Wert vorschlägt. (vgl. CAMPBELL 1974):

$$\psi = a * \theta^b \quad K = keint * \theta_{keslp} \quad \text{mit: } keslp = 3-2b$$

Dieser und ähnliche Ansätze wurden des öfteren in der Literatur erwähnt (vgl. BRAKENSIEK & RAWLS 1988).

Sowohl die Werte eines typischen Tonbodens als auch die eines Sandbodens (Abbildung 23) weichen jedoch deutlich von diesem Exponentialverlauf ab (Abbildung 24). Deshalb ist die physikalische Relevanz dieses Ansatzes in Frage zu stellen.

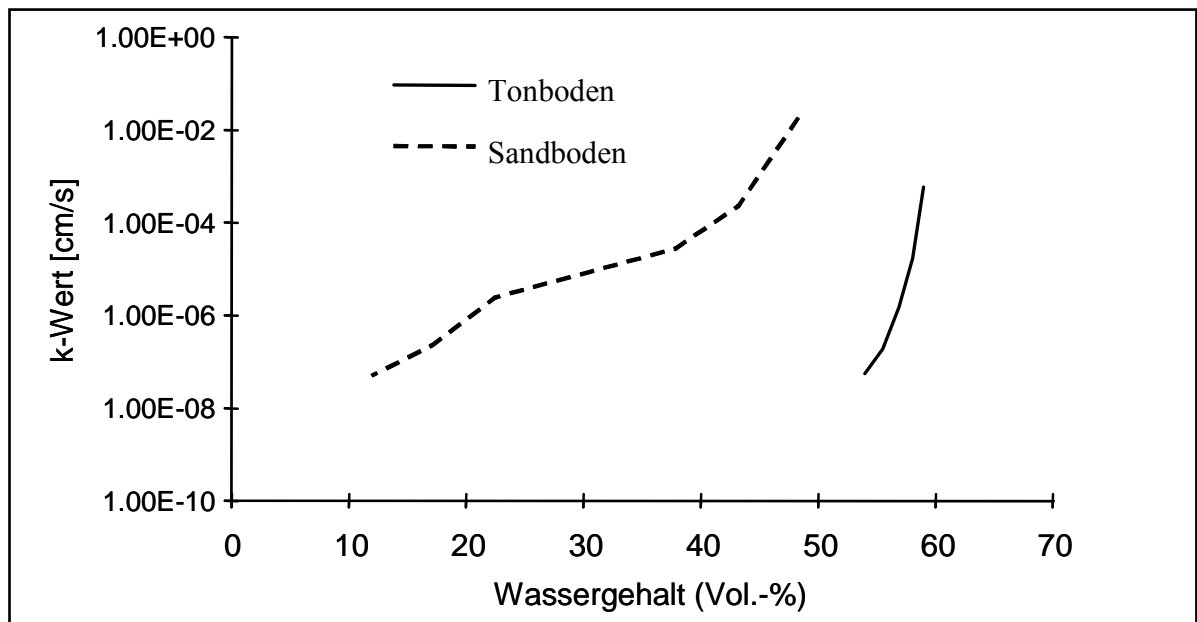


Abbildung 23: Typischer Verlauf des Wassergehalt-K-Wert Zusammenhanges eines Sand bzw. Tonbodens (Man beachte das unterschiedliche Krümmungsverhalten der Kurven).

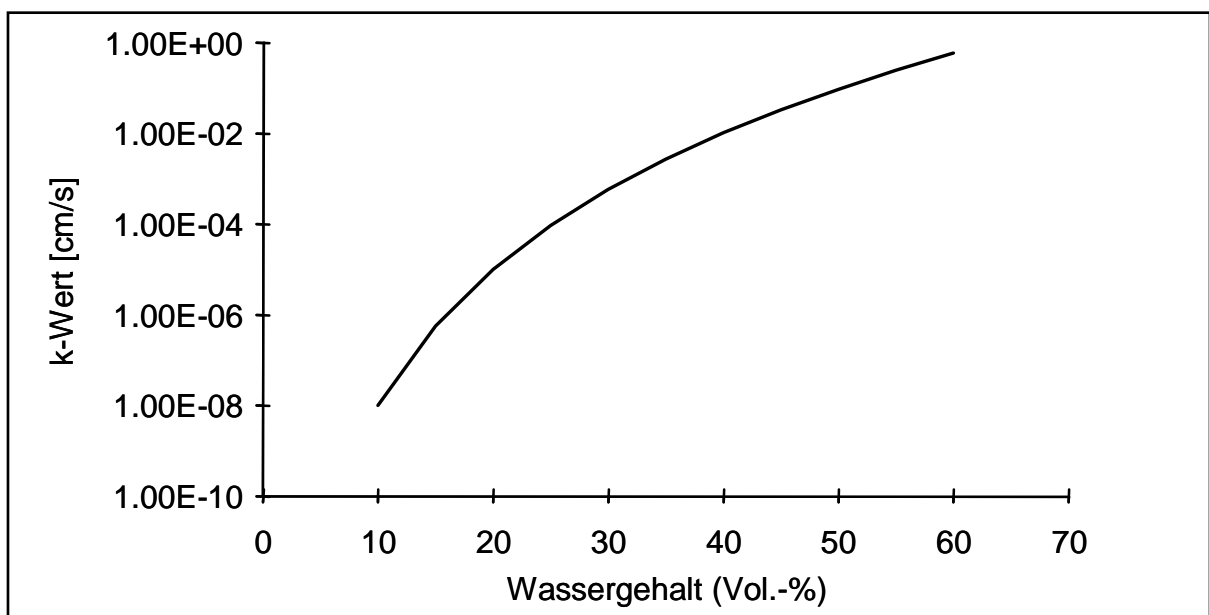


Abbildung 24: Typischer Verlauf des Wassergehalt-K-Wert Zusammenhanges lt. dem Ansatz nach CAMPELL (1974).

Für die Gruppierung von Böden wurden mehrere Versuche unternommen:

Gruppierung nach Saugspannungs-Wassergehalts- bzw. Saugspannungs-Leitfähigkeitskurven

Für jeden untersuchten Boden der Schweiz gibt es zirka 60 Seiten Beschreibung (vgl. RICHARD & LÜSCHER 1983). Dies ist zuviel Information, um direkt verarbeitet und verglichen werden zu können.

Der Exponentialansatz nach CAMPELL (1974) legt den Versuch nahe, die Kurven $K = K(\psi)$ und $\theta = \theta(\psi)$ zu betrachten und in Gruppen zu ordnen. Die Daten zu diesen Kur-

ven waren in Tabellenform gegeben. Daher konnten die Kurven alle im gleichen Maßstab gezeichnet, ausgedruckt und dann verglichen werden. Dadurch sollte herausgefunden werden, ob gleichen Kurven auch gleiche Böden entsprechen.

Die einzigen Kurven, die sich deutlich von allen anderen unterschieden, waren die des Schotters. Die restlichen Böden konnten zwar an Hand des Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Saugspannung gruppiert werden. Doch innerhalb der gefundenen Gruppen war der Zusammenhang zwischen K-Wert und Saugspannung sehr unterschiedlich, so dass keine weitere Gruppierung mehr möglich war. Eine Zuordnung von charakteristischen Eigenschaften konnte somit ebenfalls nicht mehr durchgeführt werden.

Gruppierung nach den BROOK-Parametern

Das Simulationsprogramm BROOK verwendet für den Zusammenhang zwischen dem K-Wert und den Wassergehalt nur die beiden Parameter *keslp* und *keint*, welche durch Mittelung (Regression) berechnet werden (vgl. FORSTER 1991). Daher liegt der Versuch nahe, diese Parameter für alle Böden zu berechnen und die Böden an Hand dieser Parameter zu ordnen. Dem liegt die Idee zugrunde, dass gleichen Parametern auch gleiche Böden entsprechen sollen bzw., dass gleichen Böden keine unterschiedlichen Parameter entsprechen dürfen.

Der Versuch einer Gruppierung nach diesen Parametern scheiterte. Das Ergebnis der Parameterermittlung war sehr stark von der Wahl des Saugspannungsbereiches, der für die Mittelung herangezogen wurde, abhängig (Abbildung 25).

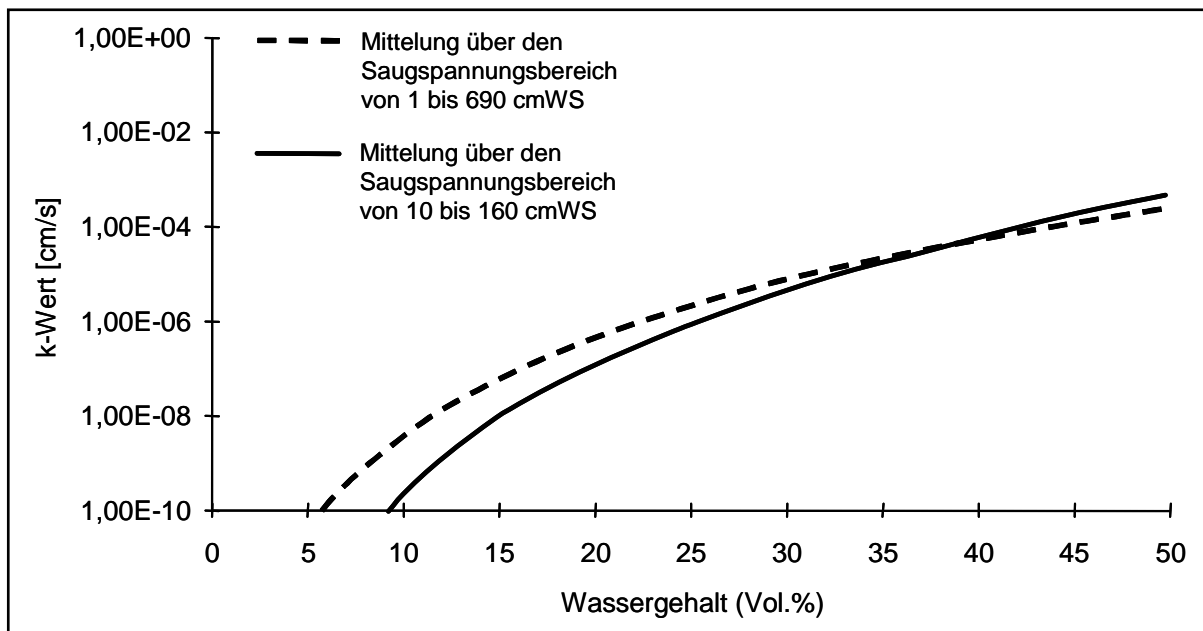


Abbildung 25: Unterschiedliche Wassergehalts-K-Wert Zusammenhänge für denselben Boden entstehen wegen Parameterermittlung aus unterschiedlichen Saugspannungsbereichen.

Selbst bei sehr unterschiedlichen Parameter (*kint* liegt zwischen 10^{14} und 10^{30} ; *keslp*, der als Exponent auftritt, zwischen 48 und 87) können die Wassergehalts-K-Wert-Kurven in dem, für den Wasserhaushalt interessanten Wassergehaltsbereich (dieser

liegt zwischen θ_2 und θ_s und entspricht dem Gravitationswasser und dem leicht pflanzenverfügbaren Wasser, also dem Wasser in den Saugspannungsklassen 1 und 2) sehr ähnlich sein (Abbildung 26).

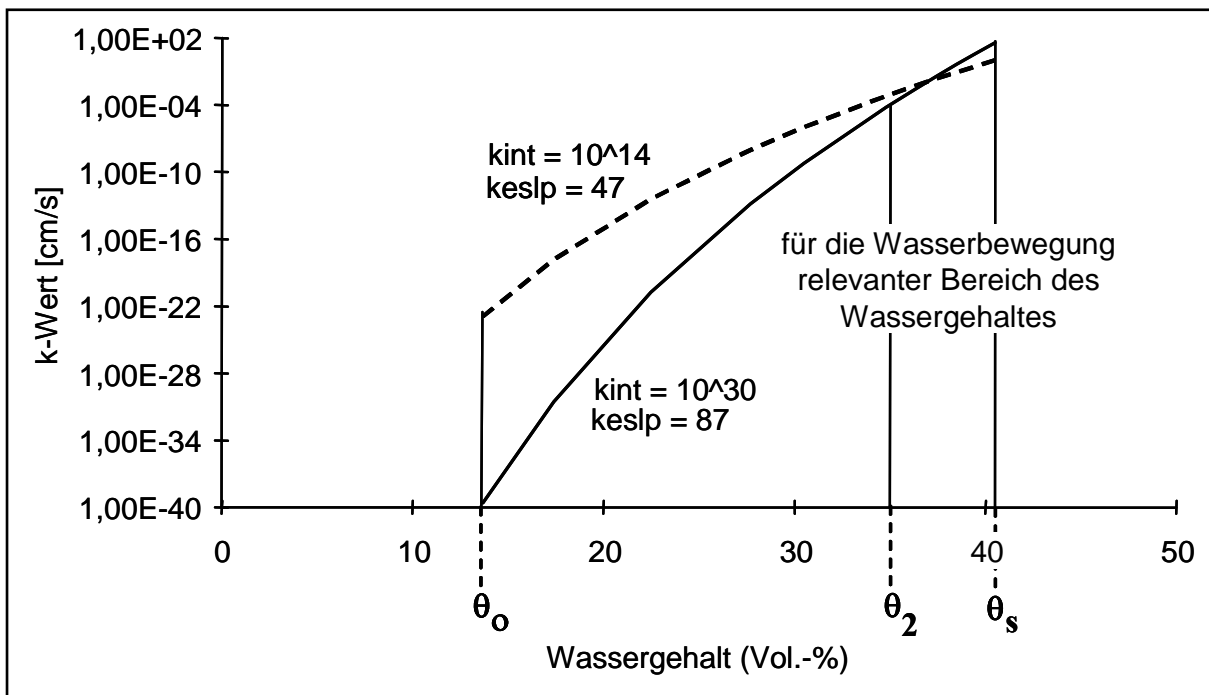


Abbildung 26: Wassergehalts-K-Wert Zusammenhang im Wasserhaushalt interessanten Wassergehaltsbereich.

Gruppierung nach dem Porenvolumen

Auch eine Einteilung an Hand des gesättigten Wassergehaltes, d.h. an Hand des Porenvolumens, brachte keine befriedigenden Ergebnisse. Denn für den Bodenwasserhaushalt ist nicht das gesamte Porenvolumen ausschlaggebend, sondern dessen Aufteilung in Porengrößen, d.h. die Porengrößenverteilung. Diese bestimmt nämlich, wie fest, d.h. mit welcher Saugspannung das Wasser im Boden gebunden ist. Die Porengrößenverteilung und somit auch die Einteilung des Wassers in Saugspannungsklassen bestimmen somit die Wasserverfügbarkeit und das Desorptionsverhalten (Abbildung 27).

Gruppierung nach Bodentypen

Da BROOK für die Rechnung nur den Zusammenhang $K = K(\theta)$ verwendet, wurde im nächsten Versuch die Saugspannung aus den Tabellen eliminiert, wodurch man Tabellen für den direkten Zusammenhang zwischen den beiden Werten erhielt. Die dadurch entstandenen Kurven $K(\theta)$ gruppieren sich recht klar nach den Bodentypen. So zum Beispiel: Gley, Rendzina, Podsol, Braunerde, Schotter. Einige der Böden konnten nur schwer einer Gruppe zugeordnet werden, da für manche zu wenige Datenpunkte vorhanden waren.

Die Humusschicht konnte an Hand der Kurven immer eindeutig erkannt werden, da sie ein sehr hohes Porenvolumen und einen sehr flachen Verlauf aufweist. Dies bedeutet, dass sich bei Änderung des Wassergehaltes der K-Wert nur relativ wenig ändert.

Für einige wenige Böden (Podsol, Rendzina) und Böden auf Schotter konnten bereits charakteristische $K(\theta)$ - Referenzkurven gefunden werden.

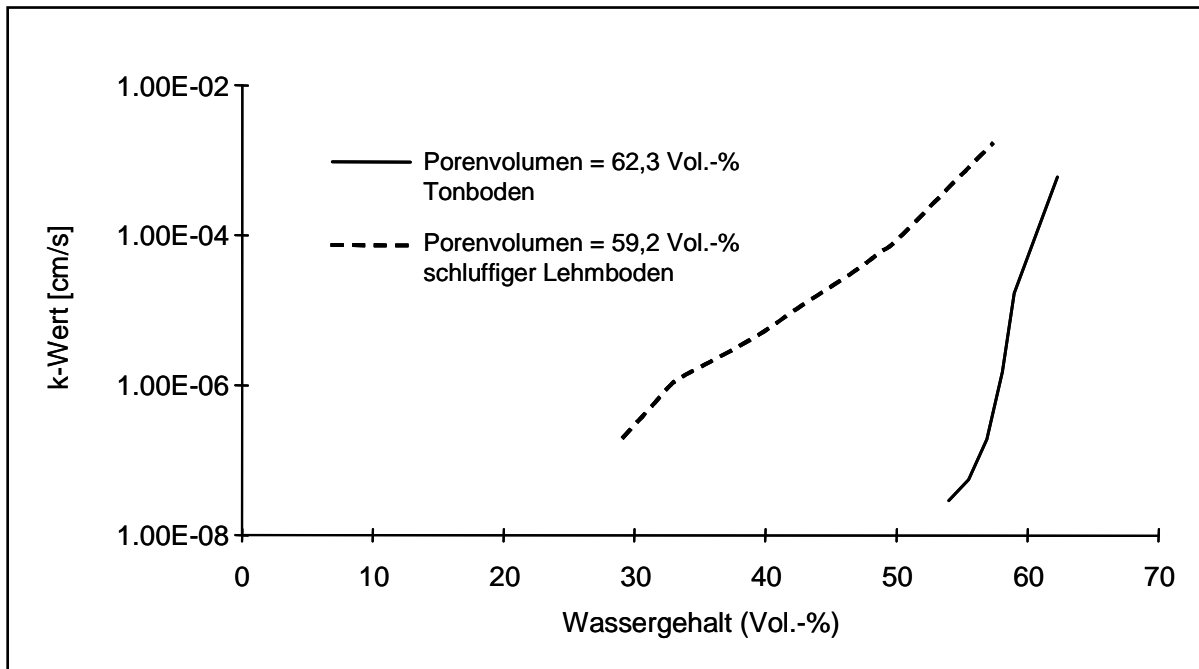


Abbildung 27: Unterschiedliches Desorptionsverhalten zweier Böden mit sehr ähnlichem Gesamt - Porenvolumen.

Gruppierung nach Bodenarten

Ein Gespräch mit Dr. Klaghofer (Petzenkirchen) brachte eine neue Idee für die Gruppierung von Böden, nämlich die Klassifizierung von Böden nach den Bodenarten (Ton, Schluff, Sand und die zugehörigen Übergangsbereiche). Diese Bodenarten können mittels einfachen Prüfverfahren im Gelände festgestellt werden, nämlich mit Hilfe der Fingerprobe, Knetprobe, etc. (vgl. BLUM ET AL. 1989; ÖNORM 4401 von 1985).

Beim Durchsehen der Daten nach diesem neuen Gesichtspunkt konnte sowohl der Einfluss des Abstandes der Bodenschicht von der Geländeoberfläche als auch der des Bodenskeletts (Korngröße > 2 mm) bei Böden gleicher Körnung festgestellt werden. Je tiefer eine Bodenschicht liegt, desto steiler ist ihre zugehörige $K(\theta)$ - Kurve, d.h. umso stärker ändert sich der K-Wert bei der gleichen Wassergehaltsänderung (Abbildung 28).

Dies ist durch das verminderte Porenvolumen in den tieferen Bodenschichten erklärbar, welches durch den Druck des darüber liegenden Materials bedingt ist. Dieser Druck ruft vor allem eine Verminderung der Grobporen hervor, wodurch tiefere Bodenschichten steilere Wassergehalts-K-Wertkurven aufweisen. Einhergehend mit dem niedrigeren Porenvolumen tritt eine erhöhte Lagerungsdichte auf (ehemals mit Luft gefüllte Hohlräume sind nun ja mit festen Bodenpartikeln gefüllt).

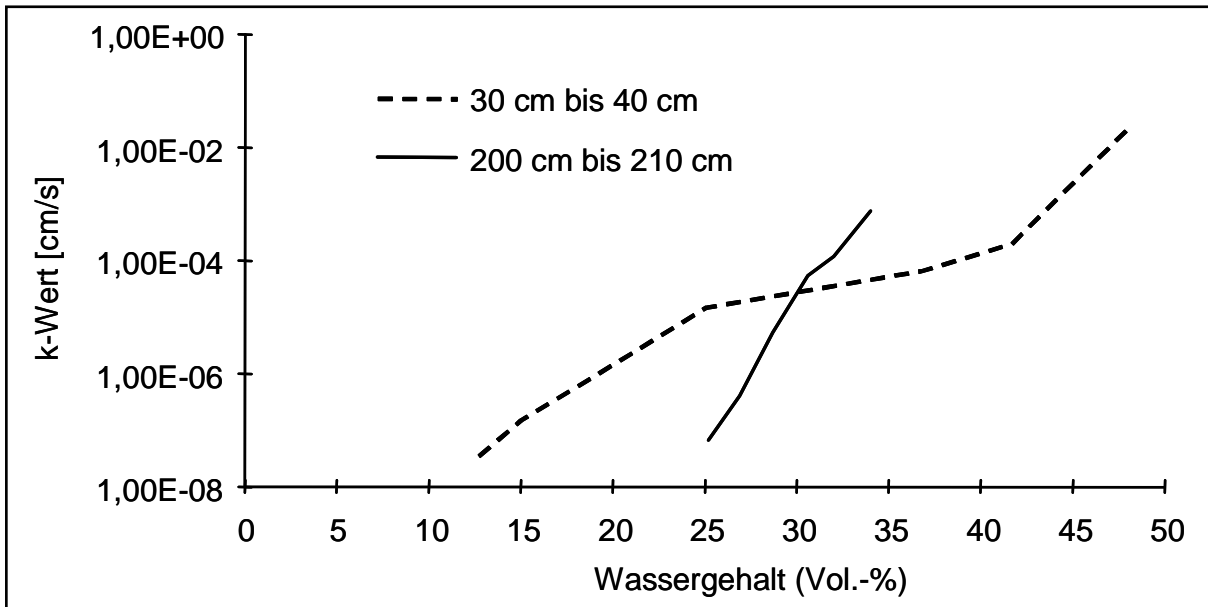


Abbildung 28: Wassergehalts - K-Wert - Kurven für unterschiedliche Bodentiefen.

Ein Beispiel für den Einfluss des Bodenskelettes auf den Zusammenhang zwischen K-Wert und Wassergehalt ist in Abbildung 29 dargestellt. Es handelt sich um zwei Böden gleicher Körnung, einmal mit und einmal ohne Skelett. Im ersten Fall ist das Porenvolumen deutlich geringer. Zusätzlich verursacht das Vorhandensein von Bodenskelett eine höhere Lagerungsdichte, wodurch die zugehörige Kurve steiler verläuft. Beim derzeitigen Stand der Untersuchung lassen sich Schotter- und Sandböden eindeutig erkennen.

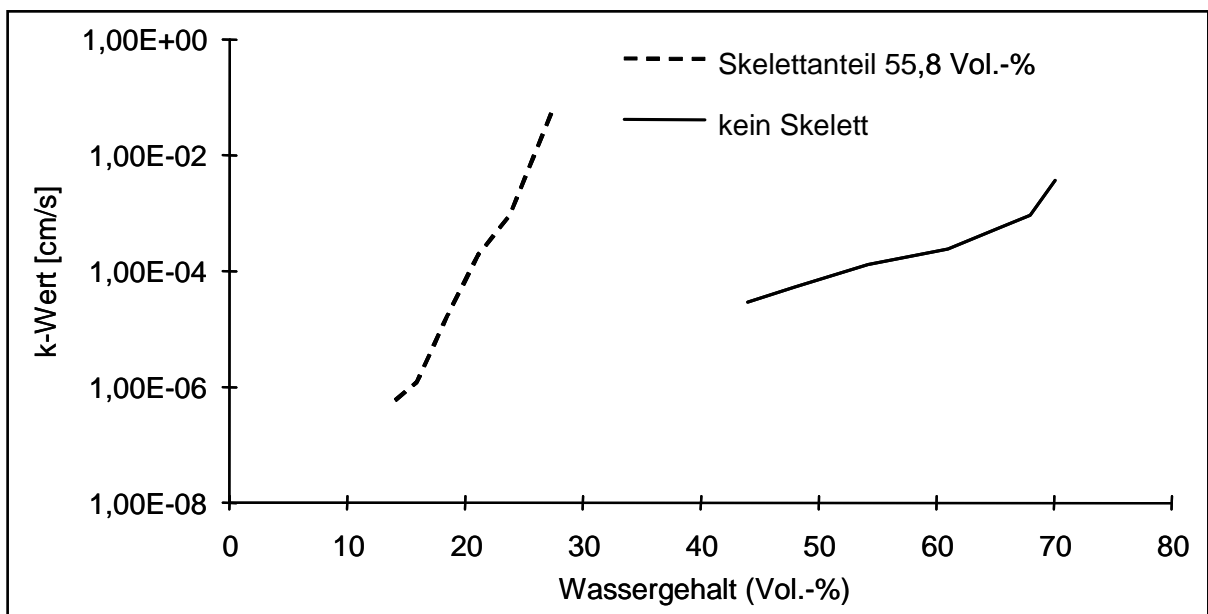


Abbildung 29: Wassergehalts - K-Wert - Zusammenhang bei unterschiedlichen Skelettgehalten.

Eine ähnliche Vorgangsweise wählen BRAKENSIEK & RAWLS (1988). Sie behandeln die Abhängigkeit der Bodenkennwerte Saugspannung, Wassergehalt und K-Wert von der Bodenart (Kornfraktion). Analog zu CAMPPELL (vgl. CAMPPELL 1974) und dem BROOK - Programm (vgl. FEDERER & LASH 1978) verwenden sie einen exponentiell-

len Zusammenhang zwischen dem K-Wert und dem Wassergehalt. Weiters werden auch Gleichungen angegeben, um die notwendigen Parameter dieses Exponentialansatzes zu berechnen. Diese Gleichungen liefern die Parameter in Abhängigkeit vom Porenvolumen, dem Sandanteil und dem Tonanteil. Weiters werden Korrekturfaktoren empfohlen, die z.B. den Skelettanteil, den Anteil an organischen Stoffen, etc. berücksichtigen.

7.1.3.2.3 Landnutzung

Die für die Berechnung der Interzeptionsverdunstung benötigten Werte des Vegetationsbedeckungsgrades und des Blattflächenindex wurden für die einzelnen Vegetationsklassen nach Literaturangaben abgeschätzt (Tabelle 21) (JOHST 2003). Die Niedermoor- und Vernässungsflächen, die nicht als Pirkl-Feuchflächen definiert waren, wurden hierbei wie Bürstlingsrasen bewertet. Die Grundlage bilden die Kartierungen von BURGSTALLER & SCHIFFER (1993).

Tabelle 21: Vegetationsbedeckungsgrad und Blattflächenindex der Vegetationsklassen (verändert aus JOHST 2003; nach SCHULLA 1997, BREMICKER 2000 und LARCHER 2001).

| Vegetationsklasse | COV und LAI für | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Juni | Juli | Aug | Sept | Okt | Nov | Dez |
| vegetationslos (erodiert) * | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| vegetationslos (Fels, Blaiken) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| vegetationslos (Kahlschlag) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Bürstlingsrasen / Weide | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Weide / Wiese | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| Zwergstrauchheiden | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Legföhren / Krummholz | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Grünerlen-Gebüsch | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,75 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Fichtenwald | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Mischwald | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 0,95 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |

* einzelne Zellen auf den Talsedimenten

7.1.3.2.4 Ausweisung von Sättigungsflächen

Gerinnenaher, permanent feuchte Flächen können sehr abflusswirksam sein und einen hohen Anteil des Niederschlages mehr oder weniger direkt ins Gerinne transformieren. Im Rahmen der statistischen Analysen und durch die experimentellen Detailuntersuchungen an den Feuchflächen Limbergalm und Herzogalm wurde die Bedeutung dieser Flächen auch für den Abfluss des gesamten Einzugsgebietes „Löhrnersbach“ deutlich (TILCH ET AL. 2003 und 2006a, JOHST 2003).

Insgesamt liegen vier Kartierungen zur Lage und Ausdehnung von Feuchtflächen im Untersuchungsgebiet vor. Dies ist zum einen die geologisch–lithologisch–geomorphologische Karte PIRKLS (1990), in der moorige Bereiche und Vernässungszonen als eine Klasse dargestellt sind. Ferner existiert eine gesonderte Aufnahme der Vernässungszonen des Löhnertsbaches (KIRNBAUER ET AL. 1996) (Abbildung 30). Als weitere Informationsquellen wurden vegetations- und bodenkundlichen Karten (BURGSTALLER & SCHIFFER 1992, MARKART & KOHL 1993a) hinzugezogen, aus denen sich Niedermoores bzw. hydromorphe Böden ablesen lassen (Abbildung 31). Diese Karten wurden je nach Modellierungsstrategie bei der Raumgliederung in unterschiedlicher Weise weiterverwendet.

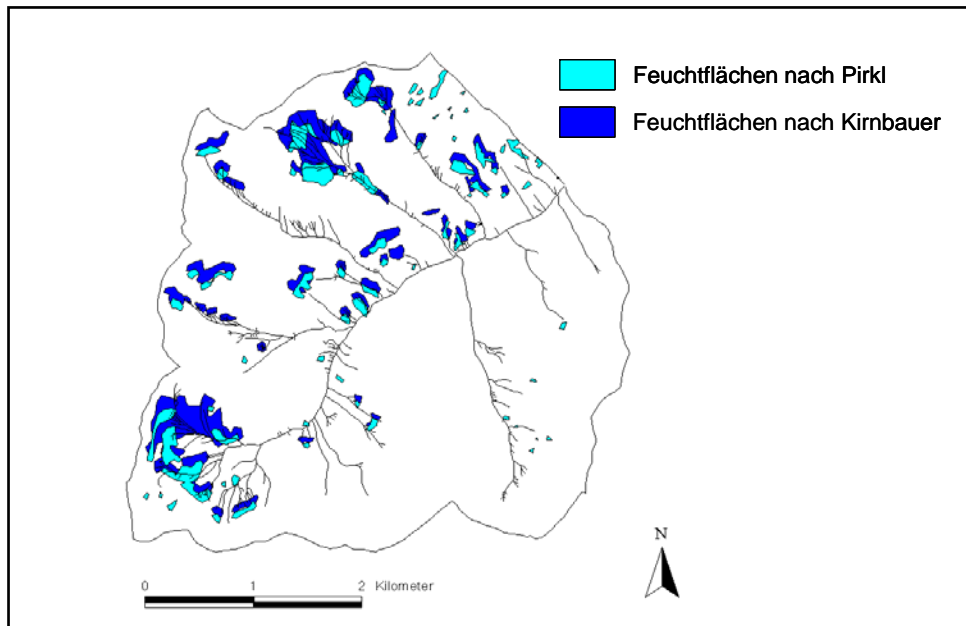


Abbildung 30: Sättigungsflächen im Löhnertsbach-Einzugsgebiet nach zwei verschiedenen Kartierungen (PIRKL 1990, KIRNBAUER ET AL. 1996).

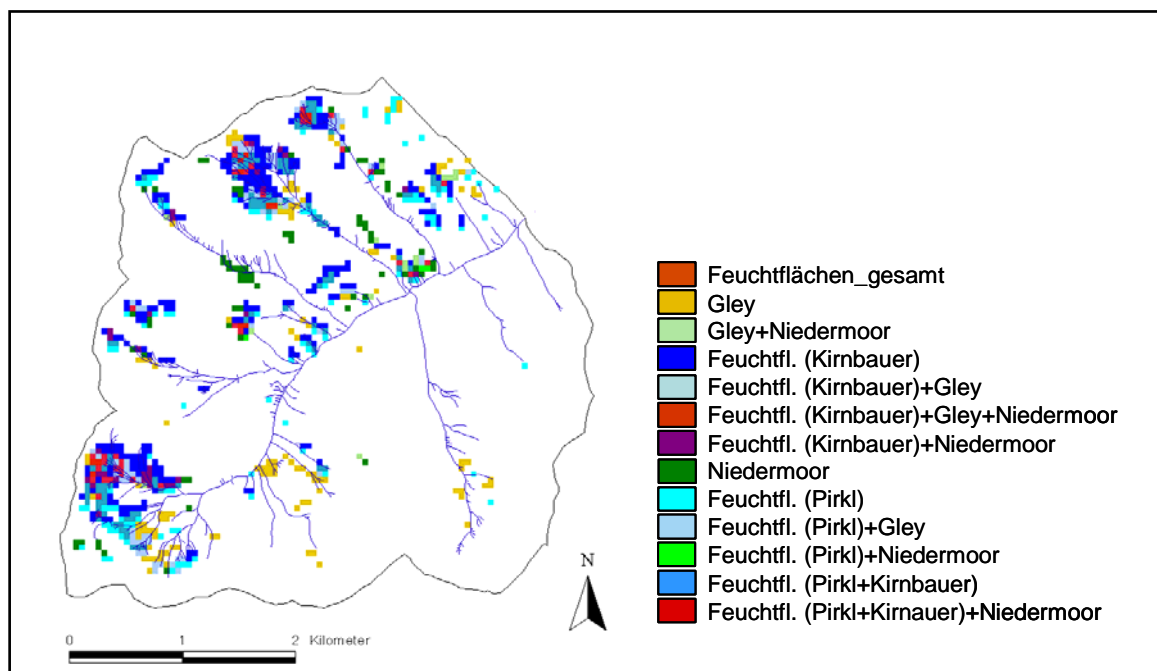


Abbildung 31: Vergleich der unterschiedlichen Karten der Sättigungsflächen (Quellen: KIRNBAUER ET AL. (1996), PIRKL (1989), MARKART & KOHL (1993a), BURGSTALLER & SCHIFFER 1993).

7.2 Analyse des Niederschlag-Abfluss-Prozesses

Dieses Kapitel beinhaltet alle Auswertungen, die sich mit der Analyse des Niederschlag-Abfluss-Prozesses mit unterschiedlichen Methoden und über verschiedene Skalen hinweg beschäftigen. Diese reichen angefangen bei den täglichen Abflussmessungen über die detaillierten tracerhydrologischen, geophysikalischen und geologischen Untersuchungen im Einzugsgebiet Limbergalm bis hin zu den statistischen Auswertungen zahlreicher N-A-Ereignisse.

7.2.1 Räumliche Variabilität des flüssigen Niederschlags

Die Abbildung 32 ermöglicht einen Vergleich der Niederschlagsregistrierungen am Schattberg, auf der Herzogalm sowie auf der Niesrachalm für den Zeitraum vom 1. Juli bis 4. Juli 1992. Die kurzen Schauerniederschläge am ersten und zweiten Juli zeigen die starke räumliche Variabilität des Niederschlagsgeschehens, während der länger dauernde, weniger intensive Regen in den frühen Morgenstunden des dritten Juli ziemlich homogen fällt.

Ein weiteres Beispiel unterstreicht die hohe räumliche Heterogenität und Kleinräumigkeit des Niederschlagsgeschehens (Abbildung 33). Während bei den Ereignissen am 25. und am 27. Juli 1994 an der Messstelle Schattberg Niederschläge von 6,2 bzw. 9,8 mm aufgezeichnet wurden, liegen die entsprechenden Niederschlagssummen an der Messstelle Niesrachalm bei 0,4 bzw. 2,0 mm. Das umgekehrte Bild ergibt sich beim Ereignis am Abend des 28. Juli 1994. Hier wurden an der Messstelle Schattberg lediglich 5,5 mm Niederschlag innerhalb einer Stunde aufgezeichnet, während in derselben Zeit an der Messstelle Niesrachalm 28,8 mm zu verzeichnen waren. Die Entfernung der beiden Niederschlagsstationen zueinander beträgt ca. 3,3 km.

In der Abflussentstehung kommt zu dieser stark unterschiedlichen Überregnung des Gebietes auch noch eine unterschiedliche Reaktion auf vergleichsweise ähnlich große Niederschlagsmengen hinzu. In Abbildung 34 sind die Wasserstandsdaten der Abflussmessstelle Neuhausengraben für den Zeitabschnitt vom 25.7.1994 bis 3.8.1994 dargestellt. Die Niederschlagsdaten (im oberen Teil der Abbildung) wurden in der Station Schattberg (repräsentativ für das Einzugsgebiet der Messstelle Neuhausengraben) aufgezeichnet. Hier ist bei den Niederschlagsereignissen am 25., 27. und 28. Juli mit durchaus vergleichbaren Niederschlägen von 6,2 mm, 9,8 mm und 5,5 mm an der Messstelle Schattberg am Neuhausengraben zwar am 25. Juli 1994 ein deutlicher Wellendurchgang zu beobachten, bei den beiden anderen Ereignissen allerdings kaum eine Abflussreaktion zu verzeichnen.

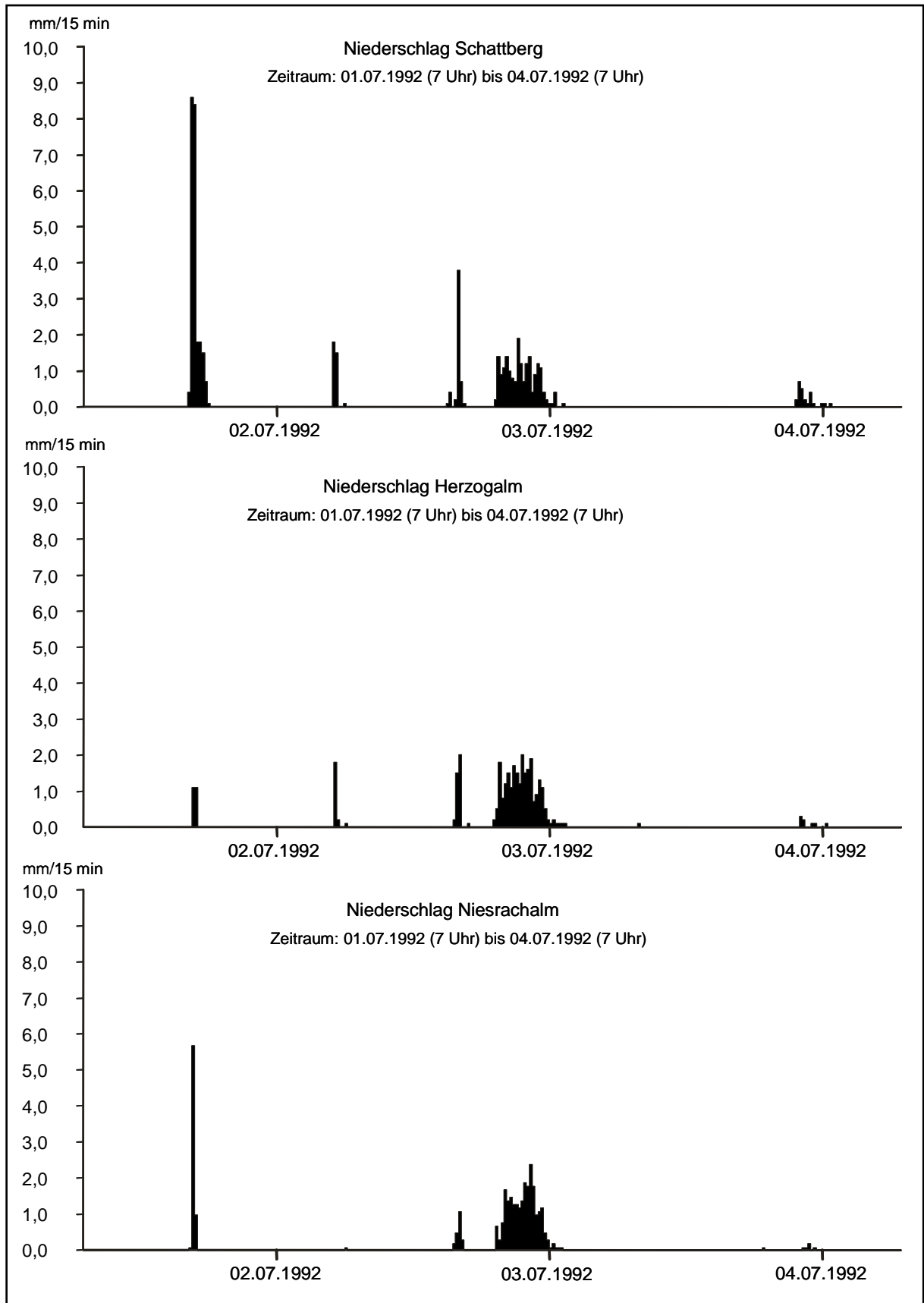


Abbildung 32: Niederschlagsverteilung an den Messstellen Schattberg, Herzogalm und Niesrachalm im Zeitraum 2. Juli bis 4. Juli 1992.

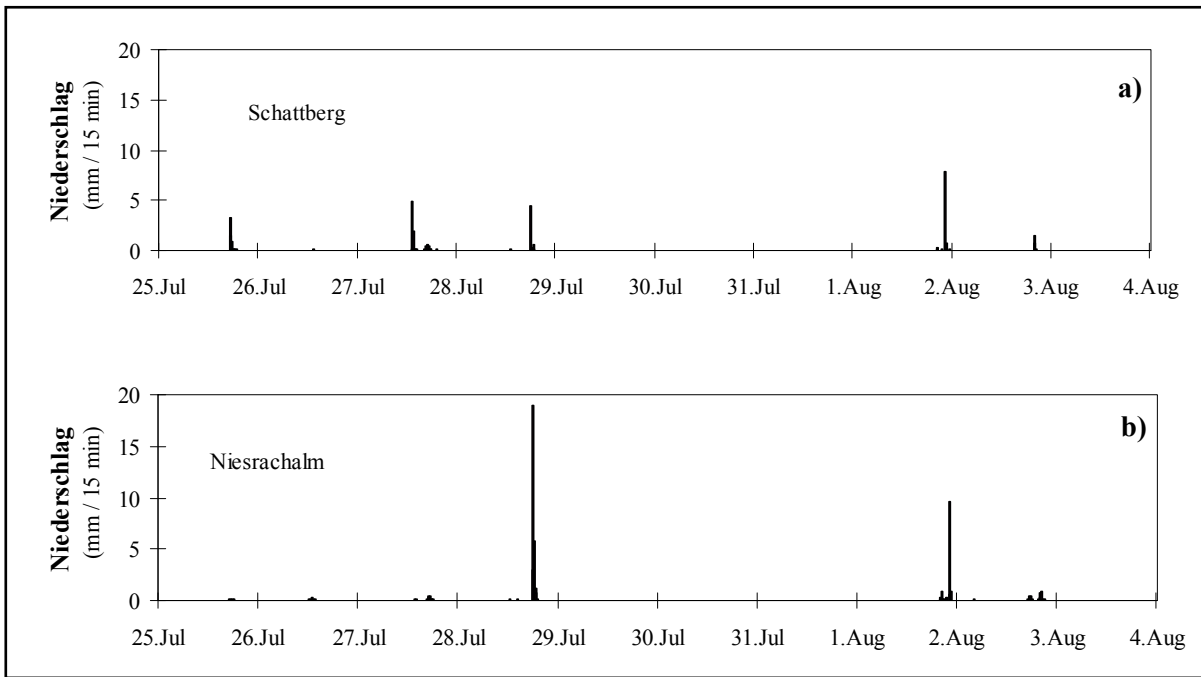


Abbildung 33: Niederschlagsverteilung an den Stationen Schattberg (a) und Niesrachalm (b) im Zeitraum 25. Juli bis 4. August 1994.

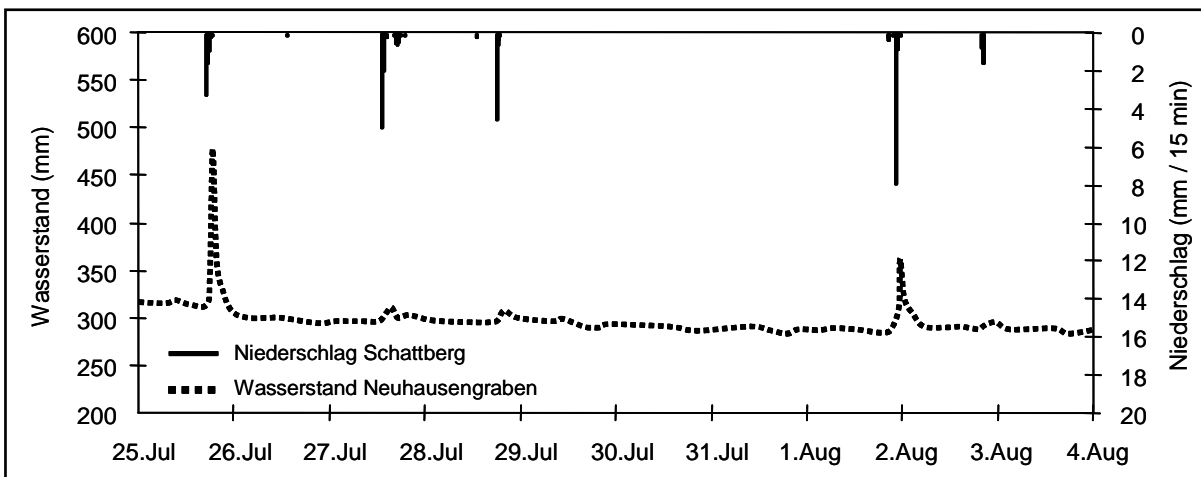


Abbildung 34: Abflussganglinie und Niederschlagsverlauf an den Stationen Niesrachalm bzw. Schattberg im Zeitraum 25. Juli bis 4. August 1994.

Derartige räumlich heterogene Niederschlagsmuster sind während der Beobachtungszeit regelmäßig erkennbar. Ein Vergleich der Niederschlagssummen lässt keine gesicherten Aussagen über eine etwaige Höhenzunahme des Niederschlags zu. Je nach Zeitraum, über den die Niederschläge summiert werden, ergeben sich unterschiedliche Niederschlagsgradienten.

7.2.2 Niederschlagsvariabilität in Abhängigkeit der Seehöhe

Die Niederschlagsmessungen im Löhrnersbachgebiet zeigen bei Einbeziehung von längeren Zeitabschnitten eine merkbliche Zunahme der Niederschlagssummen mit der Seehöhe. Dieses, in der Literatur als „Höheneffekt“ bezeichnete Phänomen, ist umso

ausgeprägter, je länger die für die Summenbildung herangezogenen Perioden sind (Abbildung 35).

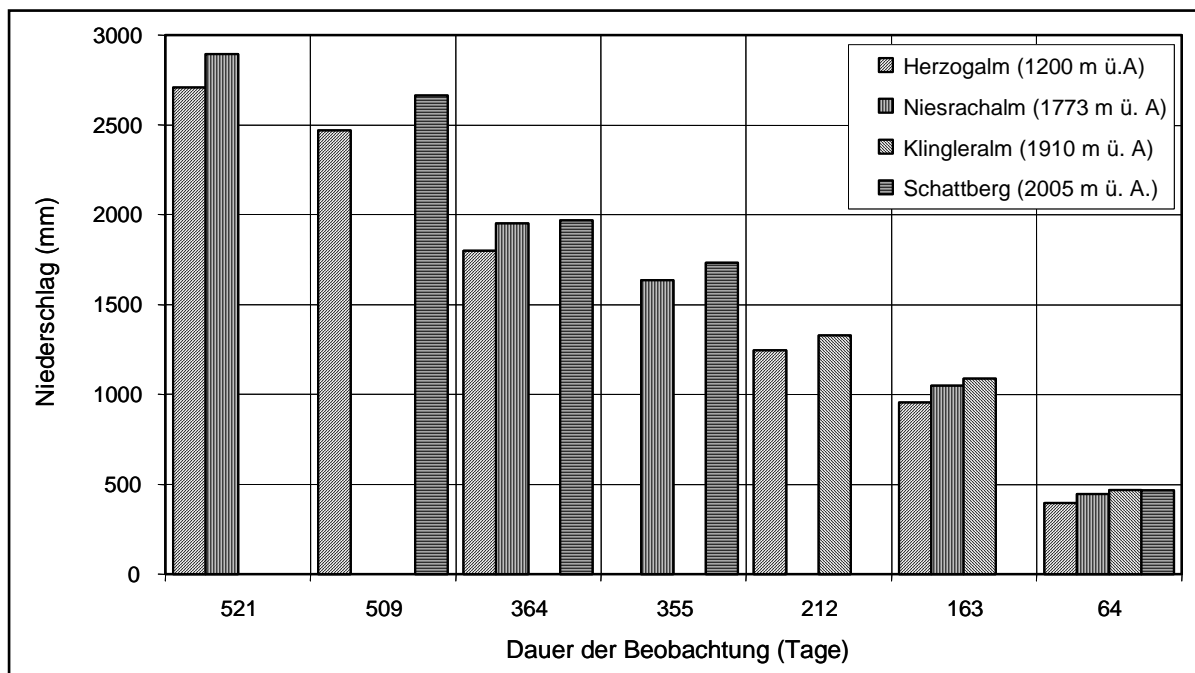


Abbildung 35: Zunahme des Niederschlages mit der Seehöhe an den Niederschlagsmessstellen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ in Abhängigkeit der Beobachtungsdauer.

JOHST (2003) wertet hinsichtlich des Höheneffektes weitere Niederschlagsdaten aus und zieht die Klimastationen Schmittenhöhe und Saalbach mit ein. Da die Messreihen der Gebietsstationen zahlreiche Datenlücken aufwiesen, ließen sich für das Löhnersbachgebiet weder für Jahres- noch für Quartalssummen Höhenabhängigkeiten des Niederschlages bestimmen. Somit wurde untersucht, ob eine Höhenregression der monatlichen Niederschlagssummen besteht. Für diejenigen Monate, in denen fünf Niederschlagsstationen (Klima- und Gebietsstationen) durchgehend gemessen hatten, ergab sich eine mittlere Niederschlagszunahme von 1,2 mm pro 100 m und Monat. Aus Tabelle 22 ist jedoch die geringe Signifikanz dieser Höhenkorrelation ersichtlich, die dadurch zu erklären ist, dass kleinräumige Starkregenereignisse die Monatsbilanzen in einem beträchtlichen Maß beeinflussen.

Die Analyse der windkorrigierten Jahressummen der beiden Klimastationen zeigte für die Jahre 1996-2001 durchweg positive Steigungen der jährlichen Regressionsgeraden. Hier lag die mittlere Niederschlagszunahme zwischen 23 und 38 mm pro 100 m. Anhand der 80-jährigen Messreihen wurde für die Klimastationen eine ähnliche mittlere Zunahme der Jahresniederschläge von 22,5 mm pro 100 m festgestellt (HDÖ 2002).

Zur Berechnung des Höhenfaktors wurde von JOHST (2003) der vom mittleren Gebietsniederschlag abweichende mittlere Jahresniederschlag jeder Zelle in Relation zum mittleren Gebietsniederschlag gesetzt (nach ROSER 2001:33). Die Jahresniederschläge der 80jährigen Messreihen der beiden Klimastationen waren hierzu die Datengrundlage.

$$f_{\text{Höhenkorrektur}}(x_i) = 1 + \frac{N(x_i) - N_{\text{Gebietsmittel}}}{N_{\text{Gebietsmittel}}}$$

mit

- $f_{\text{Höhenkorrektur}}$: Höhenfaktor zur Niederschlagsmodifikation der Zelle x_i [-]
- $N(x_i)$: mittlerer, über Höhenregression berechneter Jahresniederschlag der Zelle x_i [mm]
- $N_{\text{Gebietsmittel}}$: arithmetisches Mittel der Jahresniederschläge aller Stationen [mm]

Der Höhenfaktor lag damit zwischen 0,93 am Pegel Rammern und 1,12 am Hochkogel. Auf diese Weise kann bei der Regionalisierung des Niederschlags neben der Entfernung von der Messstation auch die Höhenlage berücksichtigt werden.

Tabelle 22: Höhenkorrelation der monatlichen Niederschlagssummen aller Messstationen (HZG: Herzogalm, STB: Schattberg, NSR: Niesrachalm, SLB: Saalbach, SMT: Schmittenhöhe), grau hinterlegt: negative Steigung oder Bestimmtheitsmaß > 0,7. (JOHST 2003; verändert).

| Höhe ü. A. [m] | | 1286 | 2000 | 1773 | 1010 | 1973 | | |
|----------------|------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|
| Monat | Tage | Monatssummen des Niederschlages [mm] | | | | | Steigung [mm/m] | Bestimmtheitsmaß |
| | | HZG | STB | NSR | SLB | SMT | | |
| Jul 96 | 30 | 179,8 | 189,9 | 184,9 | 160,4 | 185,4 | 0,014 | 0,96 |
| Jul 97 | 30 | 227,9 | 296,9 | 264,9 | 225,6 | 226,9 | 0,093 | 0,97 |
| Jul 99 | 30 | 199,3 | 188,9 | 234,9 | 203,6 | 280,3 | -0,001 | 0,00 |
| Jul 00 | 30 | 250,4 | 253,3 | 245,7 | 186,5 | 195,8 | 0,002 | 0,03 |
| | | | | | | | | |
| Aug 96 | 30 | 89,7 | 97,1 | 119,4 | 76,0 | 120,3 | 0,018 | 0,19 |
| Aug 99 | 30 | 149,0 | 119,9 | 160,5 | 135,0 | 166,7 | -0,031 | 0,28 |
| Aug 00 | 30 | 150,7 | 186,3 | 156,8 | 128,5 | 191,6 | 0,044 | 0,71 |
| | | | | | | | | |
| Sep 97 | 30 | 60,2 | 64,8 | 61,2 | 34,5 | 48,6 | 0,006 | 0,75 |
| Sep 99 | 30 | 112,4 | 109,4 | 115,1 | 104,9 | 109,9 | -0,003 | 0,12 |
| Sep 99 | 30 | 152,4 | 129,2 | 156,4 | 80,1 | 121,5 | -0,026 | 0,42 |
| Mittelwert | | 157,2 | 163,6 | 170,0 | 137,6 | 167,1 | 0,012 | 0,44 |

7.2.3 Räumliche Variabilität des festen Niederschlages

Die als Schneedecke gespeicherte Wassermenge bildet einen wesentlichen Bestandteil des Wasserhaushaltes. Es wurden daher Schneemessungen durchgeführt, die entlang von Schneekursen auf beiden Talseiten des Löhnnersbaches bis in die Gipfelregion führten, wobei etwa alle 100 Höhenmeter die Schneehöhe im Mittel über neun Messpunkte ermittelt wurde (vgl. Kap. 6.1.3). In Abbildung 36 sind die Ergebnisse der Schneehöhensondierungen gegen die Seehöhe des Sondierungsortes aufgetragen. Daraus ist erkennbar, dass auf der rechten und der linken Talseite des Löhnnersbaches die Schneehöhen annähernd gleich waren. Lediglich im Höhenbereich von ca. 1500 m ü. A. bis 1800 m ü. A. sind deutliche Unterschiede sichtbar.

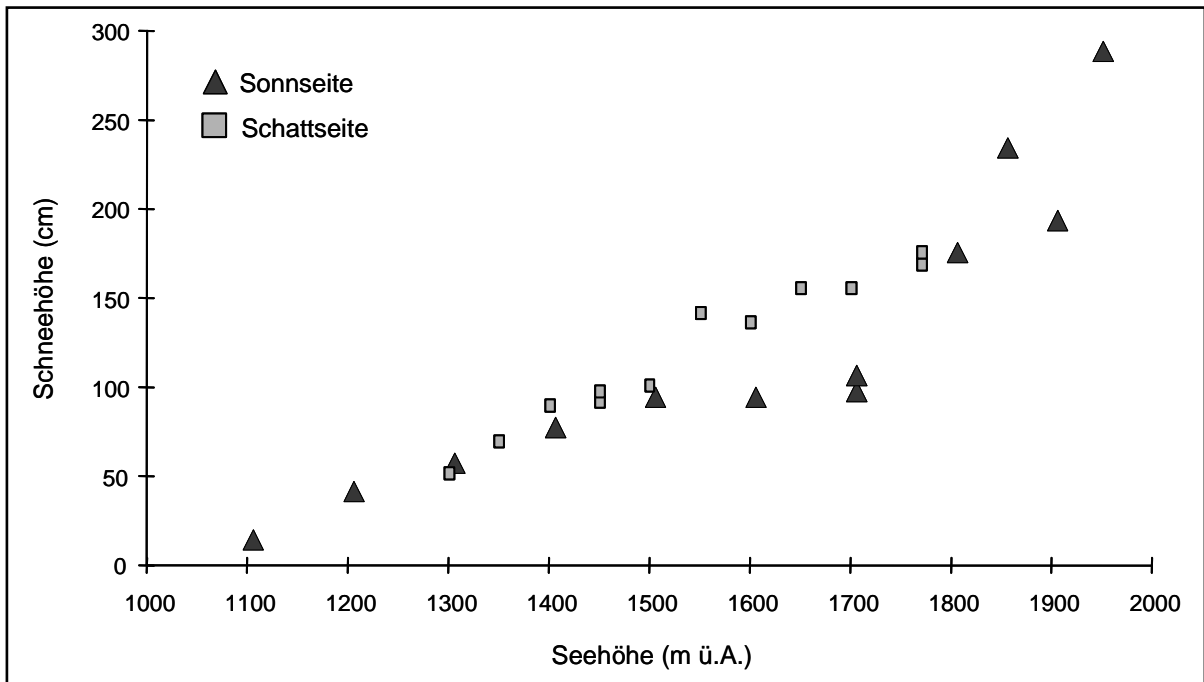


Abbildung 36: Schneehöhe in Abhängigkeit der Seehöhe (in m ü. A.).

Aus den Punktmessungen der Schneehöhe wurde die räumliche Verteilung im Gebiet extrapoliert. Auf Grund der Fotos wurden schneefreie Flächen in die Karte übertragen, für die restlichen Flächen wurde die Schneehöhe auf Basis der Messungen und auf Grund folgender Überlegungen extrapoliert: a) Die Schneehöhe nimmt mit der Seehöhe linear zu, b) zwischen 30 und 60 Grad Hangneigung nimmt die Schneehöhe linear mit der Neigung ab, in steiler als 60 Grad geneigten Hängen liegt kein Schnee, zwischen Null und 30 Grad liegt die der Seehöhe entsprechende Schneemenge, c) auf Kuppen und Rücken liegt weniger Schnee, als es der Seehöhe und Neigung entspräche, in Mulden und Rinnen mehr. Nähere Hinweise auf den Einfluß von Geländeparametern auf die Schneevertelung finden sich in BLÖSCHL ET AL. (1991), KIRNBAUER ET AL. (1991) und KIRNBAUER & BLÖSCHL (1993).

Mit den aus den Wasseräquivalentmessungen errechneten Schneedichten ergibt sich das in Abbildung 37 dargestellte Bild der Verteilung des Wasseräquivalentes im Gebiet. Dort sind auch die Grenzen der Teilgebiete für die Modellierung mit dem Wasserhaushaltsmodell BROOK eingetragen. Die errechneten Mittelwerte des Wasseräquivalentes in diesen Flächen bieten die Möglichkeit, das Schneeakkumulationsmodul des Modells zu überprüfen.

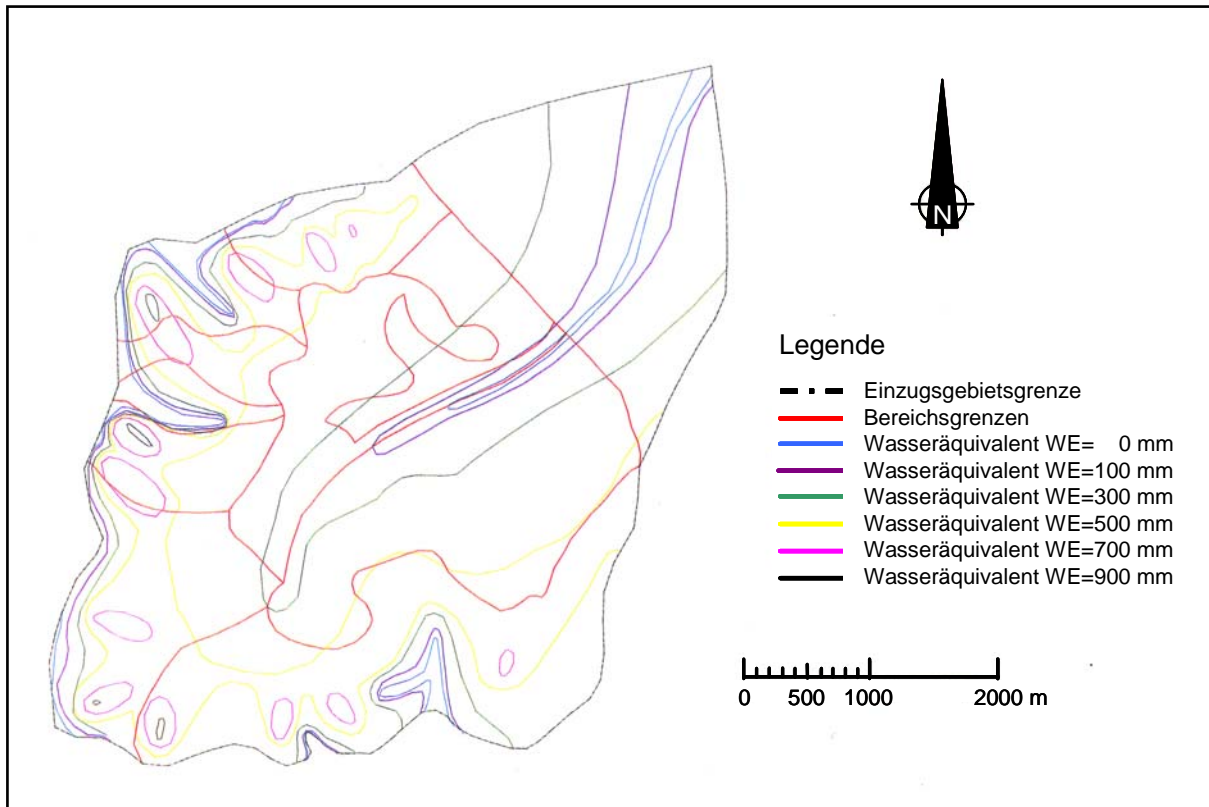


Abbildung 37: Verteilung des Schneewasseräquivalents im Einzugsgebiet des Löhrsbaches am 10. April 1993. Die Bereichsgrenzen gliedern das Gesamtgebiet in die Teilgebiete für die Modellierung mit dem Wasserhaushaltsmodell BROOK.

7.2.4 Analyse von Extremereignissen im Untersuchungsgebiet „Löhrsbach“

Im Sommer 1995 waren im Bereich Zell am See - Saalbach mehrere beachtliche Hochwasserereignisse zu verzeichnen, die örtlich zu verheerenden Schäden geführt haben. Von ihnen war auch das Löhrsbachtal betroffen. Diese Ereignisse waren einerseits als Beispiele von Naturexzessen sehr interessant, andererseits richteten sie an den Messeinrichtungen schwere Schäden an.

In Abbildung 38 sind die Hochwasserereignisse am 26. Juni, am 10. und am 27. Juli 1995 deutlich zu erkennen. Während das erste große Hochwasser des Jahres 1995 durch großräumige und lang dauernde, aber nicht sehr intensive Überregnung (advektiver Ereignistyp) des gesamten Saalach - Einzugsgebietes entstand und hauptsächlich im mittleren Saalachtal, zwischen Saalfelden und Lofer zu Schäden führte, waren die Ereignisse vom 10. und 27. Juli 1995 schwere, lokale Gewitter (konvektiver Ereignistyp). Von ihnen war auch der Löhrsbach betroffen. Es kam zu starker Erosion und in der Folge zu Vermurungen im gesamten Gebiet, vornehmlich aber an den orographisch linksufrigen Zubringern des Löhrsbaches (Schusterbauerngraben, Marxtengraben, Neuhausengraben). Sobald nach den Ereignissen die Zufahrt ins Einzugsgebiet und zu den Messstellen möglich war, wurden Geländearbeiten zur Ereignisdokumentation begonnen. Es wurde versucht sowohl für das Ereignis am 10. Juli im Einzugsgebiet des Marxtengrabens als auch für jenes am 27. Juli im gesamten Löh-

nersbacheinzugsgebiet, die Fließspuren in möglichst frischem Zustand zu dokumentieren.

Die Sortiersperre in Rammern verhinderte bei den Ereignissen im Juli 1995 größere Schäden im Unterlauf und im Mündungsbereich des Löhnersbaches. Durch sie konnte eine große Menge an Treibholz sowie ein großer Teil des Abflusses zurückgehalten werden. Dadurch sind aber auch die Wasserstandsregistrierungen an der Pegelstelle Rammern, die unterhalb der Sperre liegt, insofern beeinträchtigt, als nicht die natürlichen sondern die durch die Retention reduzierten Wasserstände registriert wurden.

Im Folgenden werden die drei extremen Ereignisse beschrieben und die hydrologischen Prozesse analysiert.

7.2.4.1 Niederschlag-Abfluss-Ereignisse vom 26./27.6.1995 und 10.-17. Juli 1996

Am 25. und 26. Juni 1995 war das Saalachgebiet von großräumigen und über 24 Stunden dauernden Niederschlägen betroffen. Durch die spezielle Situation gegen Ende der Schneeschmelze nach einem sehr schneereichen Winter und dem dadurch gefüllten Bodenspeicher im Einzugsgebiet, führten diese Niederschläge zu extremen Hochwassersituationen im Gebiet zwischen Zell am See und Lofer. Ein Indiz für die sehr gleichmäßige Überregnung des Untersuchungsgebietes während dieses Ereignisses sind die an den drei Regenschreibern registrierten Niederschlagssummen. Im Einzelnen waren dies 69,9 mm an der Messstelle Niesrachalm, 74,3 mm am Schattberg und 62,8 mm an der Station Herzogalm.

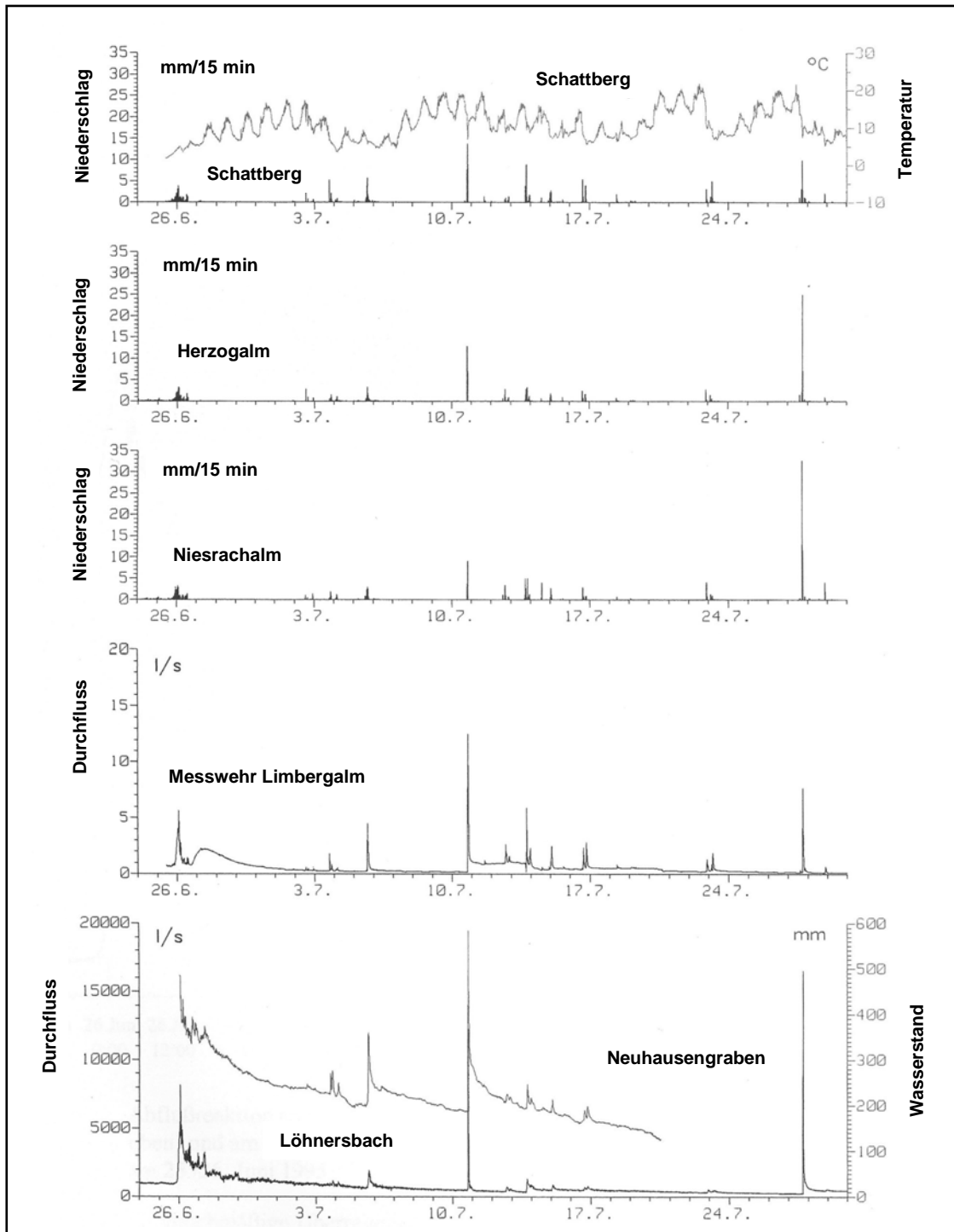


Abbildung 38: Verlauf des Niederschlages an den Stationen Schattberg, Herzogalm und Niesrachalm sowie die Abflussganglinien an den Pegelstationen Rammern und Limbergalm während der drei Extremereignisse im Zeitraum 25. Juni bis 30. Juli 1995.

In den Abbildung 39 und Abbildung 40 wird die Abflussreaktion im Löhnersbachgebiet an Hand von Abflussbeobachtungen an zwei Messstellen mit unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen gezeigt. Während die Abbildung 39 die Abflussreaktion der Feuchtfläche Limbergalm ($A_E = 1240 \text{ m}^2$) auf den Ereignisniederschlag an der Messstelle Schattberg zeigt, gibt die Abbildung 40 die Reaktion des Gesamtgebietes am

Pegel Rammern ($A_E = 16 \text{ km}^2$) auf den Gebietsniederschlag wieder (Mittel aus Schattberg, Niesrachalm und Herzogalm).

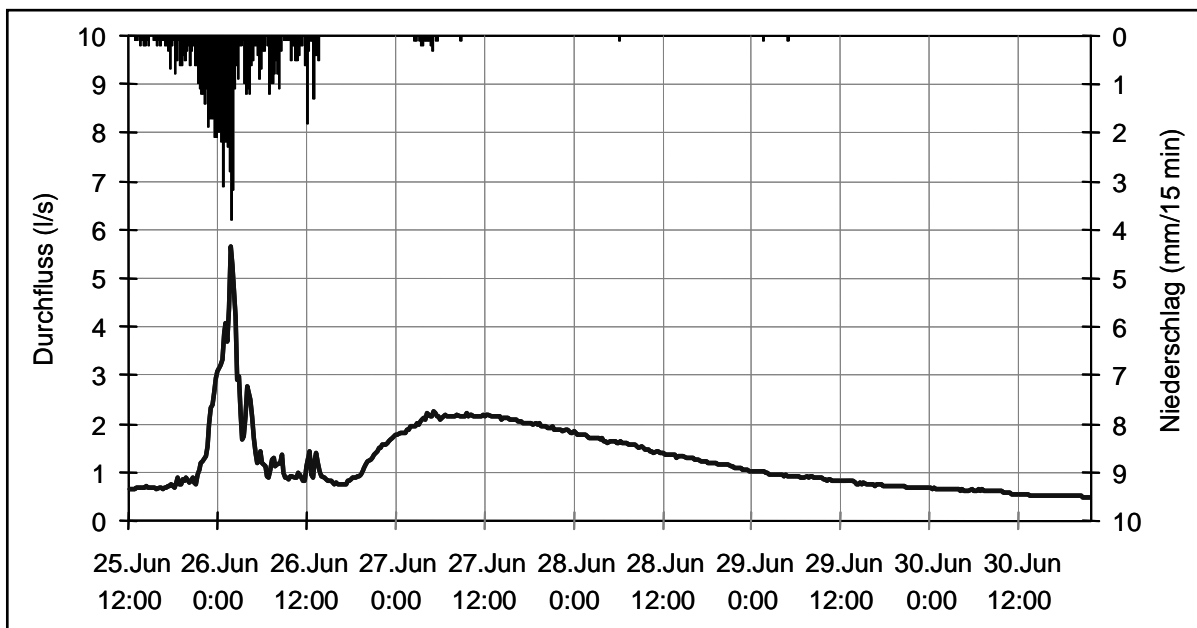


Abbildung 39: Abflussreaktion an der Feuchtfläche Limbergalm ($A_E = 1240 \text{ m}^2$) beim Extremereignis vom 25./26. Juli 1995.

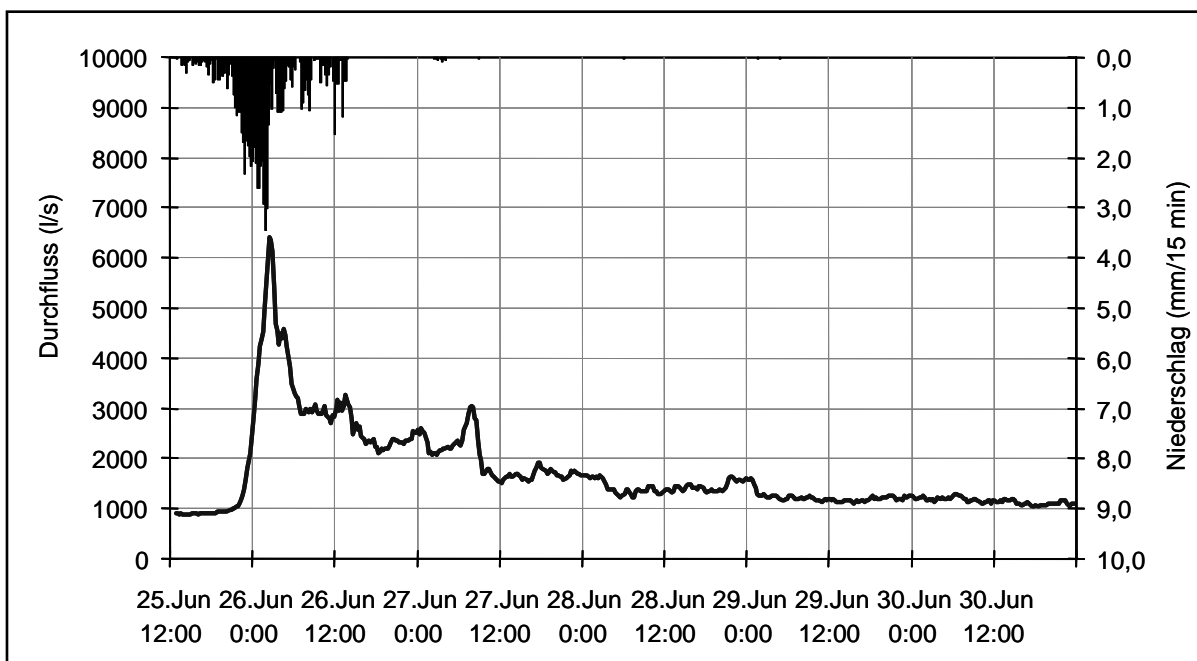


Abbildung 40: Abflussreaktion am Pegel Rammern ($A_E = 16 \text{ km}^2$) beim Extremereignis vom 25./26. Juli 1995.

Die Messungen an der Feuchtfläche Limbergalm erlauben eine klare Differenzierung zwischen Oberflächen- und unterirdischem Abfluss (Abbildung 39). Zwischen dem Abend des 25. Juni und dem frühen Nachmittag des 26. Juni spiegelt sich die unmittelbare Abflussreaktion der Feuchtfläche in der Abflussganglinie wider. Intensitätsänderungen im Niederschlag sind an der Abflussganglinie unmittelbar ablesbar. Erst

nach Ende des Niederschlagsereignisses, etwa 24 Stunden verspätet, tritt ein verzögerter Abflussanstieg auf, der insgesamt ein beträchtliches Abflussvolumen liefert. Diese in der hier vorliegenden Deutlichkeit nur sehr selten erfassbare Reaktion des Bodenspeichers lässt sich auf zwei wesentliche Gründe zurückführen. Einerseits war der Bodenspeicher durch die Schneeschmelze nach einem sehr schneereichen Winter gefüllt. Zusätzlich verlief das Niederschlagsereignis mit geringen Intensitäten über mehr als 24 Stunden, wodurch mit Ausnahme der Feuchtflächen bzw. der undurchlässigen Bereiche, kaum eine Überschreitung der Infiltrationsfähigkeit des Bodens erreicht wurde. Dies führte zu einem weiteren Auffüllen und schließlich zum „Überlaufen“ des Bodenspeichers, der sich in einer verzögerten Abflussreaktion widerspiegelt.

An der Pegelstelle Rammern ist die typische, verzögerte Reaktion des unterirdischen Abflusses vom Pegel Limbergalm nicht eindeutig sichtbar (Abbildung 40). Erst im Vergleich verschiedener Abflussrückgangskonstanten kann ein Einfluss des mikroskaligen Prozesses auf den Abfluss in der Einzugsgebietsskala identifiziert werden (vgl. Kap. 7.2.10). Der in der Mikroskala in der Abflussganglinie noch klar erkennbare Effekt wird am Pegel Rammern bereits durch andere Einflussfaktoren (z.B. unterschiedliche Fließ- oder Verzögerungszeiten) überlagert.

Eine derartige Abflussreaktion wie sie am 25./26. Juni 1995 am Pegel Limbergalm beobachtet werden konnte, trat auch in der Zeit vom 10. bis 15. Juli 1996 in ähnlicher Form wieder auf (Abbildung 41). Dieses Ereignis war ebenfalls durch eine sehr gleichmäßige Überregnung des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ gekennzeichnet, wie die an den vier Regenschreibern aufgezeichneten Niederschlagssummen zeigen. An der Station Herzogalm waren es 44,7 mm, an der Station Niesrachalm 44,2 mm, an der Klingler Hochalm 39,8 mm und am Schattberg 42,9 mm.

Die Abflussreaktion an der Feuchtfläche Limbergalm ist nahezu identisch mit jener im Juni 1995 (Abbildung 41). Wie damals ist in den Aufzeichnungen eine sehr steile, schmale Hochwasserwelle bedingt durch den Direktabfluss von der Feuchtfläche gefolgt von einer ca. 24 Stunden später einsetzenden, länger dauernden und mit höherer Fracht behafteten zweiten Welle aus dem unterirdischen Abfluss zu sehen. Auch hier sind die Intensitätsänderungen im Niederschlag während des Ereignisses nur in der Abflussganglinie des Direktabflusses zu sehen. Es handelt sich somit bei diesem Phänomen an der Feuchtfläche Limbergalm um ein in gewisser Weise reproduzierbares Verhalten des oberirdischen und unterirdischen Abflusses.

Insgesamt zeigen diese beiden Ereignisse, dass bei entsprechenden Vorbedingungen auch der über den Bodenspeicher gehende, verzögerte Abfluss für die Hochwasserentstehung relevant ist, allerdings nur in sehr kleinen Einzugsgebieten wirklich identifiziert werden kann.

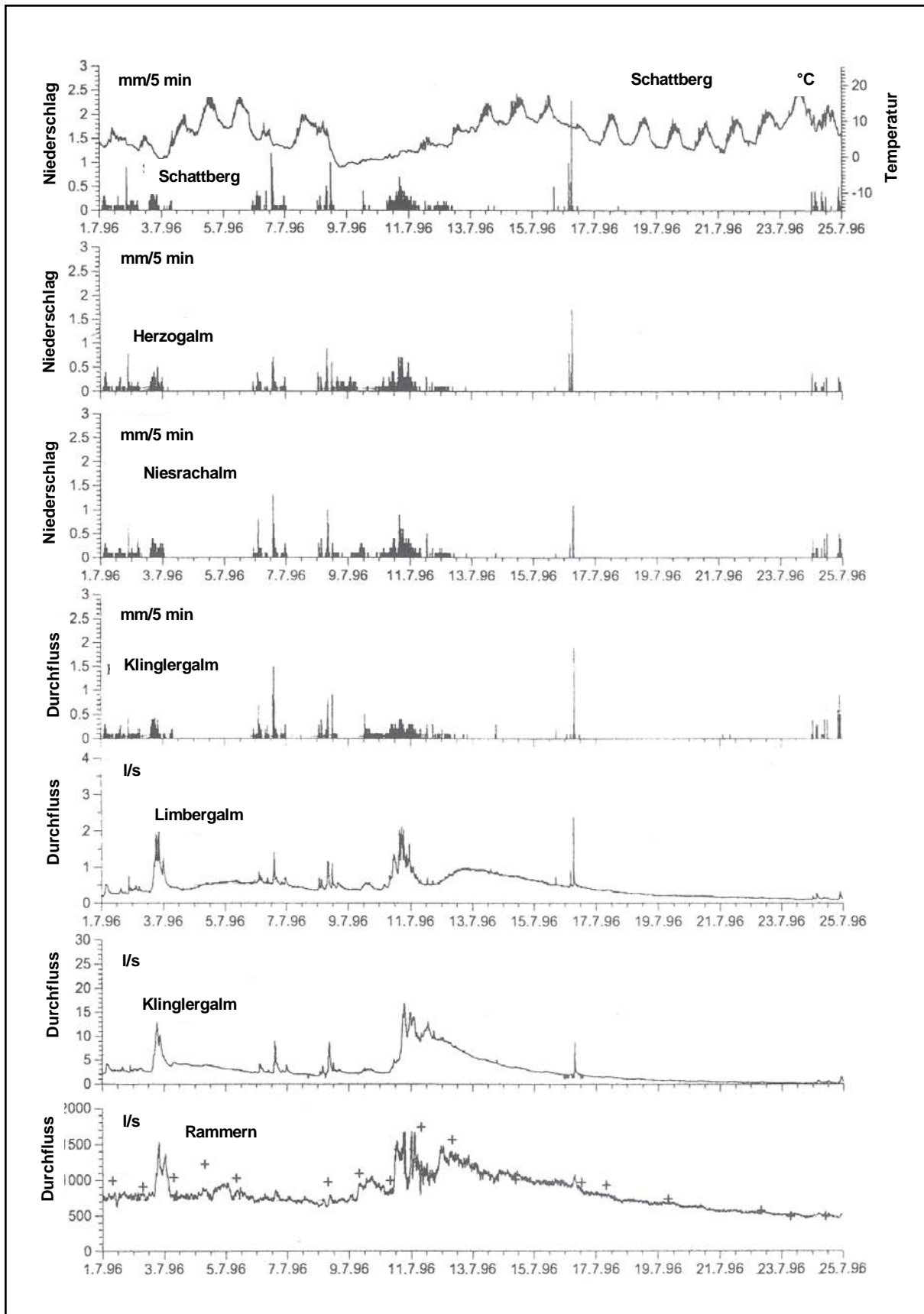


Abbildung 41: Hydrologische Messdaten während des Niederschlag-Abfluss-Ereignisses im Zeitraum 10. bis 15. Juli 1996.

7.2.4.2 Niederschlag-Abfluss-Ereignis vom 10.7.1995

Die Rekonstruktion des Niederschlagsereignisses am 10. Juli 1995 ergab, dass der Verlauf gewisse Ähnlichkeiten mit dem Ereignis im Juli 1987 aufweist. Das Zentrum des Niederschlagsgeschehens war auch diesmal im Bereich des Stemmerkogels und teilte sich zu annähernd gleichen Teilen auf das Einzugsgebiet des Marxtengraben und des Schwarzachengraben auf. Die Niederschlagsverteilung ist in typischer Weise heterogen (Abbildung 42). Während die Niederschlagssumme des Ereignisses am Ombrographen Schattberg 34,6 mm beträgt, sind es auf der Herzogalm 34,8 mm und auf der Niesrachalm 25,7 mm. Die maximalen Viertelstundensummen des Niederschlages betragen an den genannten Messstellen 13,8 mm, 12,9 mm bzw. 7,6 mm. In der Region rund um den Löhnersbach sind bei diesem Ereignis keine größeren Schäden aufgetreten, was den Schluss zulässt, dass die Schauerzelle über dem Stemmerkogel weitgehend abgeregnet und sich dann aufgelöst hat.

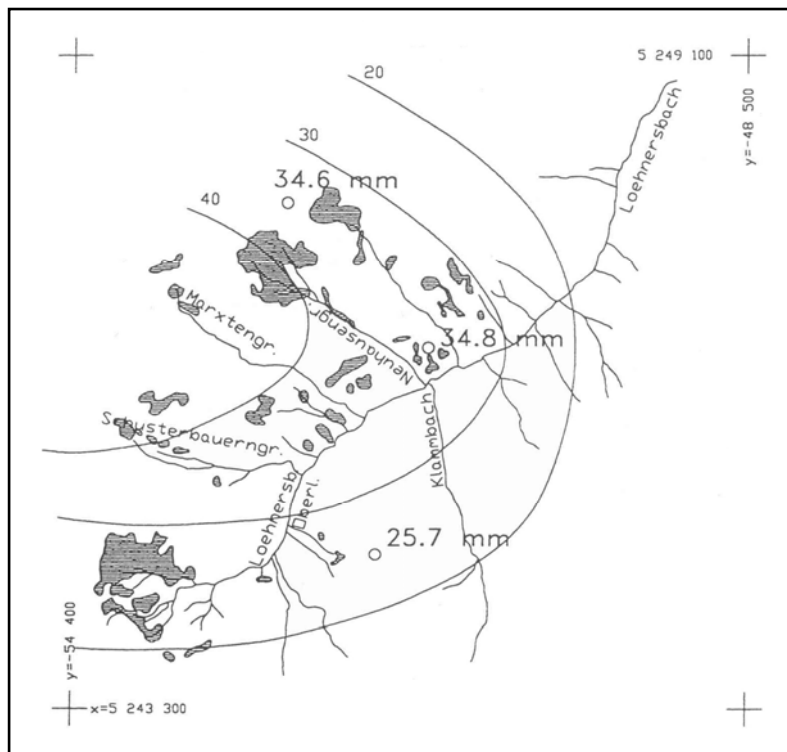


Abbildung 42: Niederschlagsverteilung beim Extremereignis am 10.7.1995.

Die Folgen des Starkregenereignisses, Erosion und Vermurungen, konzentrierten sich im Wesentlichen auf die Gräben der orographisch linken Talseite des Löhnersbaches.

Der Schusterbauerngraben brachte größere Geschiebemengen, die zu einer Einengung des Löhnersbaches und so zu einer verstärkten Erosion im Bereich des rechten Ufers führten.

Im Bereich des Weges auf die Klingleralm war nach erfolgter Räumung des Weges noch deutlich zu sehen, dass sich im Verlauf des Ereignisses am Schusterbauerngraben zwischen den Querwerken das ursprüngliche Gefälle durch Geschiebeablagerungen eingestellt hatte.

Im Bereich des Marxtengrabens kam es wie 1987 auf der Grasnarbe der Almweiden zu Oberflächenabfluss und Geschiebetransport und in weiterer Folge zu starken Erosionen in der seit dem Ereignis von 1987 nicht konsolidierten Grabenstrecke von der Marxten Grundalm abwärts. Auf den letzten 250-300 Metern vor der Mündung in den Löhnersbach hat sich der Marxtengraben während dieses Ereignisses ein völlig neues Bett gegraben. Die Erosion ging hier nicht nur in die Tiefe, sondern führte auch zu sehr starken Anrissen auf der orographisch linken Seite.

Der Neuhausengraben brachte eine Mure, die die provisorische Messrinne nahezu völlig verschüttete (Foto 25 und Foto 26).



Foto 25: Messrinne am Neuhausengraben im Zustand unmittelbar nach Fertigstellung im Juli 1992.



Foto 26: Mit Geschiebe verschüttete Messrinne am Neuhausengraben nach den Ereignissen am 10. Juli 1995 bzw. 27. Juli 1995.

Im Löhnersbachtal wurde durch das Hochwasser eine große Menge von Unholz mobilisiert. Dieses verklebte den Rechen der Sperre bei Rammern und verstärkte dadurch den Hochwasserrückhalt im Sperrenbecken. Das bis zur Verklauung des Rechens transportierte Geschiebe reichte allerdings aus, im Bereich des Pegels Rammern eine Kiesbank abzulagern, die die Wasserstandsmessungen am Pegel, zusätzlich zur Retentionswirkung der Sperre, noch weiter verfälschte (Foto 27).

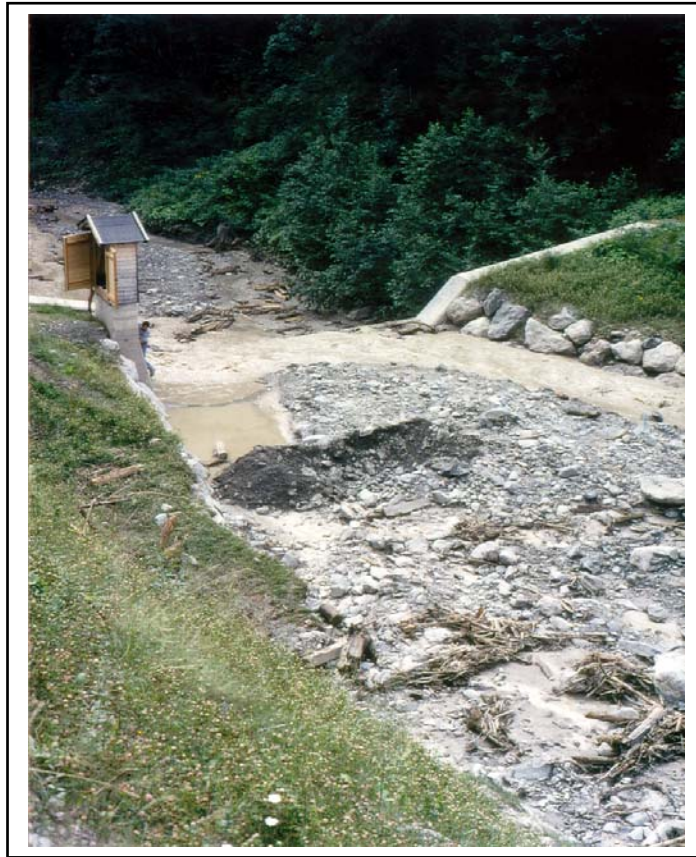


Foto 27: Pegel Rammern: Störung der Anströmung der Wasserstandsmessung durch Geschiebeablagerungen der Ereignisse am 10. Juli 1995 bzw. 27. Juli 1995.

7.2.4.3 Niederschlag-Abfluss-Ereignis vom 27.7.1995

Das Ereignis vom 27.7.1995 weist gewisse Unterschiede gegenüber jenem vom 10.7.1995 auf: Zwar war es wie das letztgenannte ein konvektives, lokal begrenztes Ereignis mit hohen Niederschlagsintensitäten, doch war die Zelle in ein advektives Ereignis eingebettet, das außer der Schauerzelle über dem Löhnersbach noch weitere Zellen enthielt, die in der gesamten Region zu punktuellen Verwüstungen führten. So waren etwa die nördliche und südliche Ortszufahrt nach Zell am See am 27.7.1995 kurzzeitig wegen Vermurungen unpassierbar. Ebenso war die Zufahrt ins Glemmtal bei Viehhofen durch mehrere Muren vom Abend des 27. Juli bis in die Mittagsstunden des 28. Juli unpassierbar.

Im Löhnersbachtal lag das Niederschlagszentrum über der rechten Talseite. Der Ombrograph auf der Niesrachalm registrierte mit 65,3 mm Niederschlagssumme den größten Ereignisniederschlag, gegenüber 44,1 mm auf der Herzogalm und 23,2 mm am Schattberg (Abbildung 43). Ähnliches zeigen die Regenintensitäten: Die höchste

Intensität wurde mit 32,7 mm in 15 min auf der Niesrachalm gemessen, während die entsprechenden Werte an den Stationen Herzogalm 25,0 mm/Viertelstunde bzw. Schattberg 9,9 mm/Viertelstunde betragen. Es ist zu bemerken, dass die maximalen Intensitäten an allen drei Stationen zur selben Zeit aufgetreten sind.

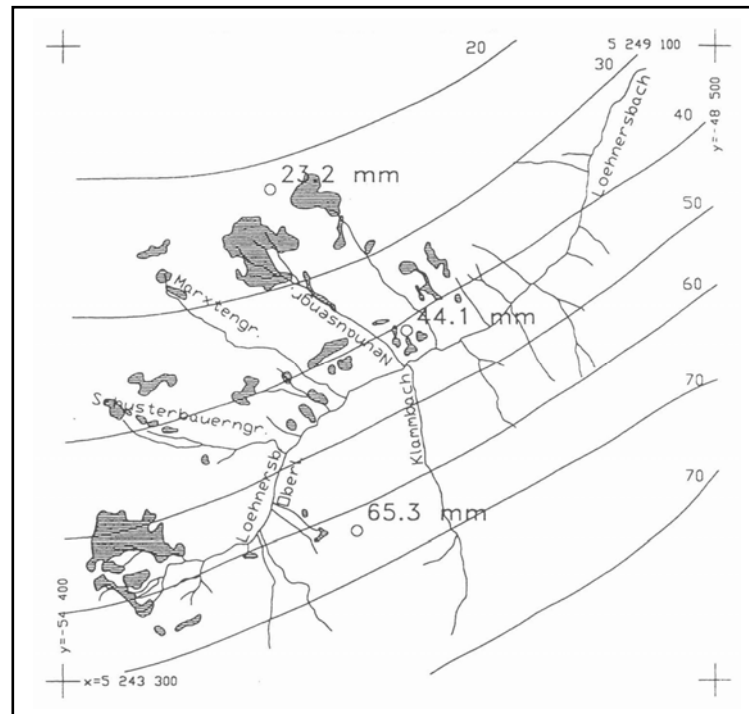


Abbildung 43: Niederschlagsverteilung beim Extremereignis am 10.7.1995.

Obwohl das Niederschlagszentrum über der rechten Talseite lag, traten die stärksten Vermurungen nicht auf dieser Seite auf. Der Klammbach brachte zwar eine größere Menge von Material mit, schüttete aber lediglich eine neue Lage von Geschiebe über den vorhandenen Schwemmkegel, ohne größere Zerstörungen anzurichten. Einige kleinere Bäche, die den Weg auf die Niesrachalm queren, verschütteten diese Querungen, so dass der Weg dort eine gewisse Zeit unpassierbar war. Die Tatsache, dass die rechtsseitigen Bäche überhaupt eine intensivere Abflußreaktion zeigten, unterscheidet das Ereignis 27.7.95 von den bisher beobachteten, einschließlich des Ereignisses von 1987. Dies ist angesichts der aufgetretenen Niederschlagsintensitäten allerdings nicht weiter verwunderlich. Wären aber dieselben Niederschläge über der linken Talseite niedergegangen, hätte dies zu unvergleichlich stärkeren Schäden geführt.

Eine weitere Besonderheit des Ereignisses vom 27.7.95 war die relativ intensive Abflussreaktion der Gewässer im Oberlauf des Löhnersbaches. Im Bereich der Klingleralmen waren deutliche Fließspuren im Gelände erkennbar, die auf Abfluss auch außerhalb von Gerinnen hindeuteten, und die Gerinne selbst wirkten in den steileren Strecken von abgelagertem Geschiebe wie leergefegt.

7.2.4.4 Zusammenfassung

Grundsätzlich sind am Pegel Limbergalm (PL) zwei kontrastierende Typen von Abflussereignissen zu beobachten, wie sie in Abbildung 44 beispielhaft dargestellt sind.

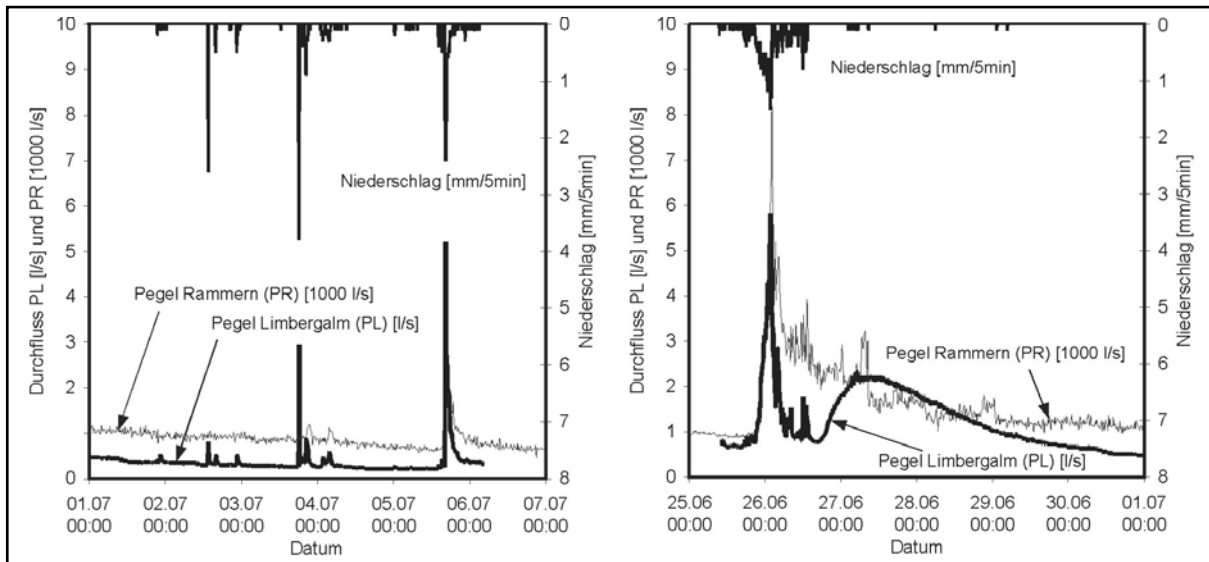


Abbildung 44: Zwei charakteristische Ereignistypen, beobachtet an den Pegeln Limbergalm und Rammern.

Unimodale Ereignisse

Kurze, intensive Niederschläge rufen bei eher trockenem Gebietszustand eine rasche, nahezu synchrone sogenannte *unimodale* Abflussreaktion sowohl am Pegel Limbergalm als auch am Hauptpegel Rammern hervor (links in Abbildung 44 und drei Beispiele in Abbildung 45).

Bimodale Ereignisse

Kommt es bei hoher Vorbefeuchtung (und entsprechend großem Basisabfluss zu Ereignisbeginn) zu einem lang anhaltenden Niederschlag mäßiger Intensität, so entstehen sogenannte *bimodale* Abflussreaktionen. Der Abfluss am Pegel Limbergalm reagiert sofort auf den Niederschlag, doch es folgt dieser ersten, raschen Reaktion eine zweite, stark verzögerte Reaktion, deren Verlauf auch stark gedämpft ist (rechts in Abbildung 44 und drei Beispiele in Abbildung 46). Zu dieser zweiten Abflussreaktion kommt es ohne zusätzlichen Niederschlag. Es liegt nahe, diese zweite, „nachlaufende“ Welle als aus dem Grundwasser stammend anzusehen. Der Ereignistyp mit nachlaufender Welle tritt in idealtypischer Form nicht sehr häufig auf, aber im langjährigen Durchschnitt immerhin ca. einmal jährlich.

Die nachlaufende Welle ist am Hauptpegel Rammern niemals sichtbar, denn Grundwasserabflüsse unterschiedlicher Lauf- bzw. Aufenthaltszeit überlagern sich so, dass nur ein stark verlangsamer Rückgang des abfallenden Astes der Hochwasserwelle beobachtbar wird. Diese unterschiedlichen Rückgangskonstanten werden von ZILLGENS ET AL. (2007) detailliert untersucht und zur skalenübergreifenden Analyse der Abflussbildung verwendet.

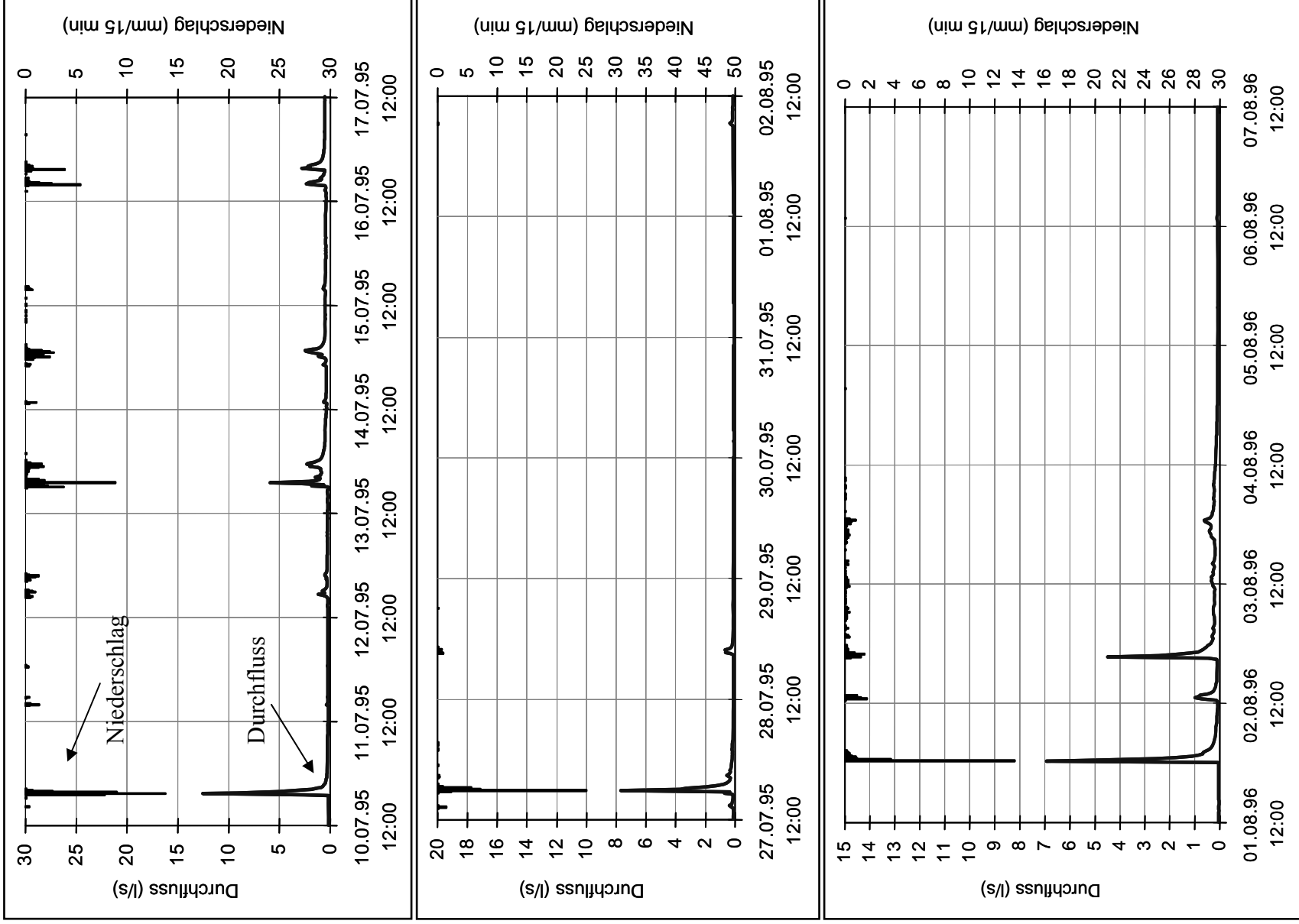


Abbildung 45: Typische Niederschlagsereignisse an der Feuchthfläche Limbergalm mit sehr kurzer Niederschlagsdauer und hoher Intensität sowie der entsprechenden deutlichen Reaktion des Direktabflusses (= **unimodale Ereignisse**) (Signatur gilt für die Abbildung 45 und 46).

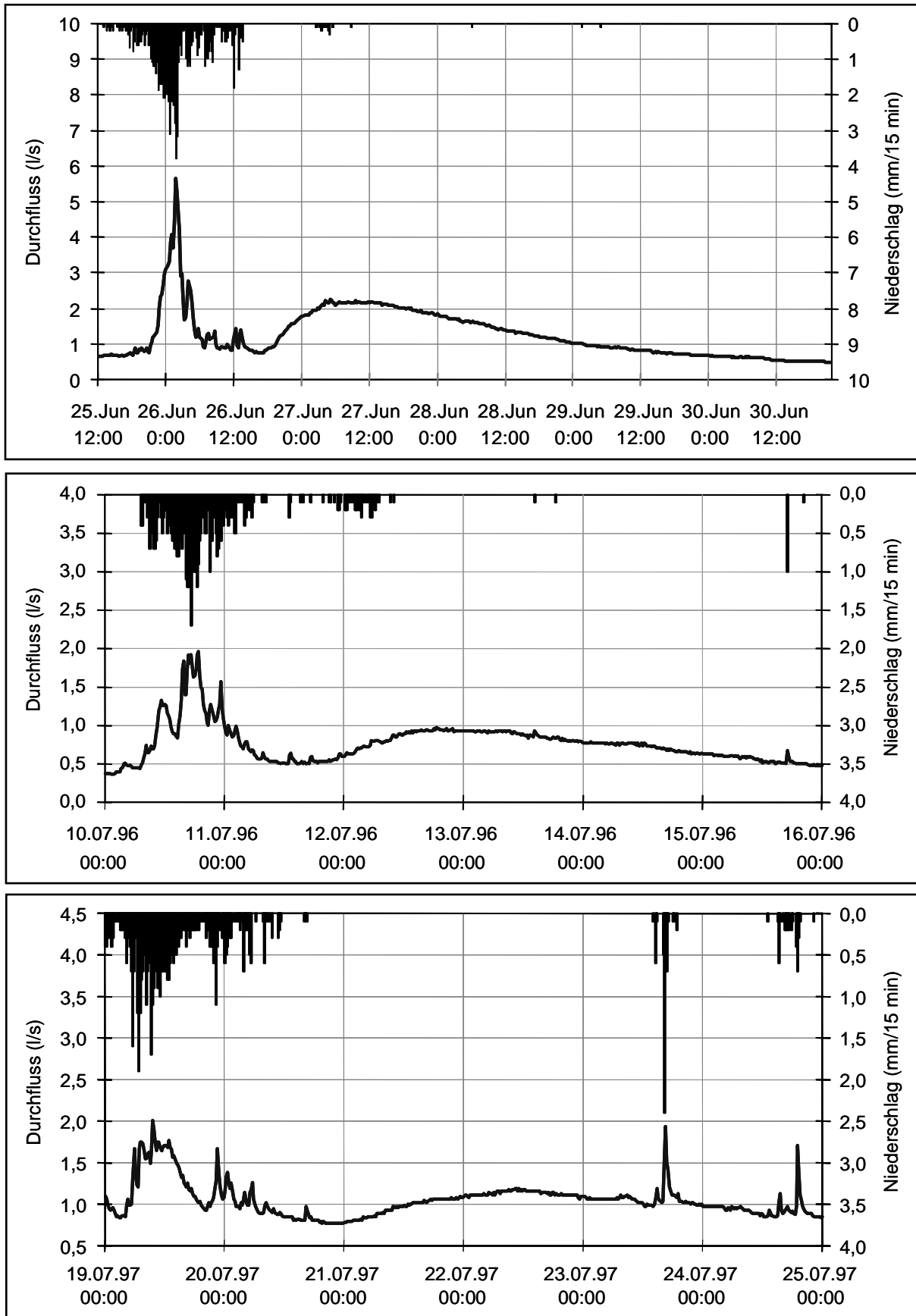


Abbildung 46: Typische Niederschlagsereignisse an der Feuchtfläche Limbergalm mit langer Niederschlagsdauer und geringer Intensität. Zusätzlich zum Direktabfluss tritt eine verzögerte Abflussreaktion auf, die aus unterirdischem Abfluss generiert wird (= **bimodale Ereignis**).

Es ist sehr selten möglich, ohne großen instrumentellen und experimentellen Aufwand den unterirdischen Abfluss so klar zu beobachten. Dies war der Anlass dafür, genau hier, im Bereich Limbergalm, mit verfeinerten Methoden die Gesetzmäßigkeiten des unterirdischen Abflusses zu untersuchen. Die Ergebnisse sind im Kapitel 7.2.7 ausführlich dargestellt.

7.2.5 Abschätzung des Gebietsabflusses basierend auf dem Ereignisabfluss der Feuchtflächen Limbergalm und Klingleralm

7.2.5.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Eine weit verbreitete Hypothese in hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modellen besagt, dass a) der Direktabfluss in einem Einzugsgebiet auf den „Sättigungsflächen“ im Gebiet entsteht, dass b) Niederschlag, der auf diese Sättigungsflächen fällt, zur Gänze, ohne Verlust, zum Abfluss kommt (Abflussbeiwert $a=1$), und dass sich c) die Sättigungsflächen bei Niederschlagsereignissen ausdehnen und bei Trockenheit schrumpfen.

In einer früheren Arbeit von KIRNBAUER ET AL. (1994) war diese Hypothese untersucht und nur bezüglich der Teilhypothese a) bestätigt gefunden worden. An einer Feuchtfläche (Herzogalm) waren aus Niederschlags- und Abflussbeobachtungen Ereignisabflussbeiwerte für unterschiedlichste Ereignistypen ermittelt worden. Weiters wurde angenommen, dass diese Abflussbeiwerte für alle Feuchtflächen des Löhnersbachgebietes gültig sind, während alle anderen Gebietsteile keinen Abfluss liefern. Mit diesen Annahmen wurde versucht, den Abfluss aus dem Gesamtgebiet (Pegel Rammern, 16 km²) auf Basis der Beobachtungen auf der Herzogalm (3000 m²) hochzurechnen. Diese Hochrechnung brachte überraschend gute Ergebnisse: Bei allen Ereignissen lagen die hochgerechneten und die am Pegel Rammern beobachteten Abflusshöhen in derselben Größenordnung, und der Zusammenhang zwischen hochgerechneten und beobachteten Abflusshöhen war straff.

Mit den seither an zwei weiteren Feuchtflächen (Limbergalm, 1240 m², als Ersatz für die außer Betrieb genommene Herzogalm, und Klingleralm, 4500 m², als topographisch, von ihrem Boden und ihrer Vegetation kontrastierende Feuchtfläche) beobachteten Niederschlag- und Abflussereignissen wurde untersucht, ob diese Hochrechnung auch mit jeder der neuen Feuchtflächen sinnvolle Ergebnisse liefert. Das Ziel dieser Untersuchung lag darin, die Hypothese der Dominanz des Feuchtflächenabflusses für den Abfluss aus dem Gebiet an weiteren, unabhängigen Daten zu testen.

7.2.5.2 Methode

Wegen der unterschiedlichen Abflussreaktion der Feuchtflächen Limbergalm und Klingleralm auf unterschiedliche Ereignistypen (vgl. Kap. 7.2.4.4; am Pegel Klingleralm trat keine dem Pegel Limberalm entsprechende nachlaufende Welle auf) wurden Abflussfrachten am Pegel Rammern aus den Abflussfrachten an den Pegeln der Feuchtflächen hochgerechnet. Der Integrationszeitraum erstreckte sich hierbei jeweils über den gesamten Zeitraum, während dessen eine Abflussreaktion auf das Ereignis an mindestens einem der Pegel sichtbar war. Dieser Integrationszeitraum endete bei kur-

zen Starkregen wenige Stunden nach Niederschlagsende, bei länger andauernden Regen geringerer Intensität erst dann, wenn am Pegel Limbergalm auch die zweite, aus dem Quellabfluss kommende, Welle abgeklungen war. Die Abflussfracht in Rammern wurde mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\text{Fracht (Rammern)} = \frac{\text{Fracht (Feuchtfläche}_i)}{\text{Fläche (Feuchtfläche}_i)} \cdot \text{Fläche (aller Feuchtflächen)}$$

i ... Limbergalm, Herzogalm oder Klingleralm

7.2.5.3 Ergebnisse und Interpretation

In Abbildung 47 ist das Ergebnis dieser Hochrechnung der Abflussfracht am Gebietspegel Rammern aus den untereinander ähnlichen Feuchtflächen Herzogalm bzw. Limbergalm in Abhängigkeit vom Ereignisniederschlag dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass a) die Abflussfracht in Rammern auf Basis der Abflussfracht an jeder der beiden Feuchtflächen recht genau abgeschätzt werden kann und b) ähnlich große Ereignisniederschläge bei hoher Vorbefeuchtung – als Indexgröße dient der Basisabfluss zu Ereignisbeginn – wesentlich größere Abflussfrachten als bei geringer Vorbefeuchtung ergeben, wobei die Genauigkeit der Abschätzung des Abflusses in Rammern aus jenem der jeweiligen Feuchtfläche nahezu dieselbe ist. Dies bedeutet, dass die Hypothese, der Gebietsabfluss werde durch den Feuchtflächenabfluss dominiert, durch die vorliegende Untersuchung weiter gestützt wird. Dies gilt sowohl für nasse als auch für trockene Vorbedingungen und für Ereignisse sehr unterschiedlicher Größe.

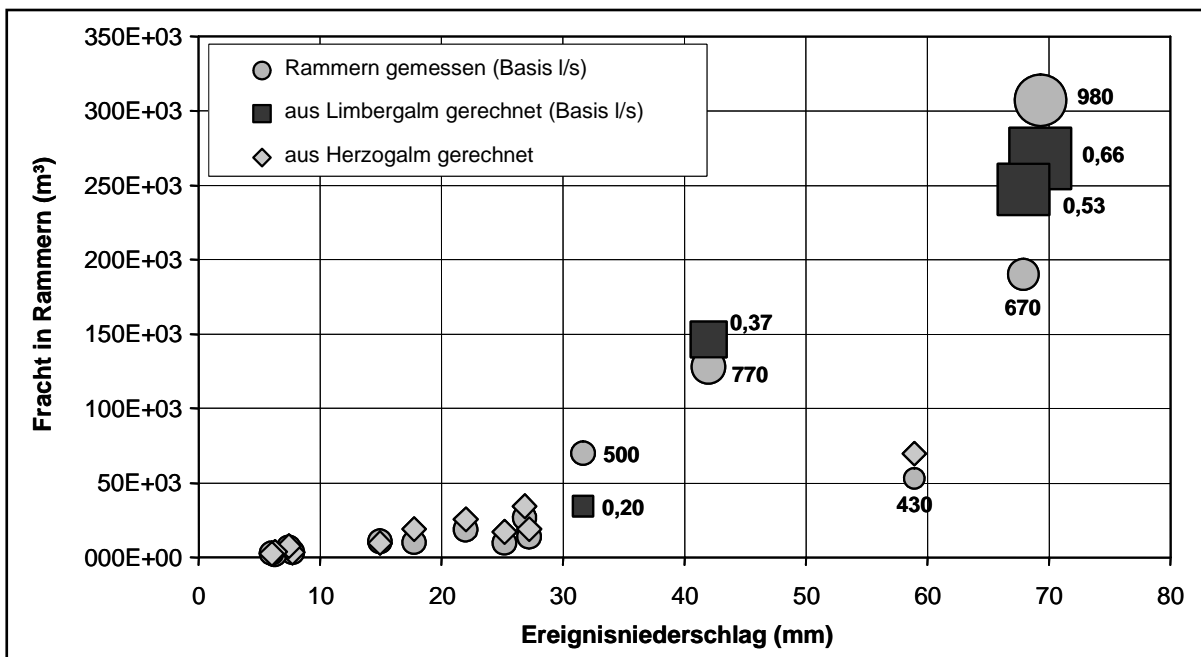


Abbildung 47: Vergleich von beobachteter (Kreis) und hochgerechneter Abflussfracht für den Gebietspegel Rammern in Abhängigkeit vom Ereignisniederschlag. Hochrechnung aus Herzogalm (3000 m², Signatur Raute) bzw. aus Limbergalm (1240 m², Signatur Quadrat). Zahl neben der Signatur: Basisabfluss zu Ereignisbeginn.

Abbildung 48 zeigt das Ergebnis der oben beschriebenen Hochrechnung durch Gegenüberstellung von beobachteter und hochgerechneter Abflussfracht in doppelt logarithmischer Skala. Hierbei wurden Ereignisse an allen mit Pegeln versehenen Feuchtflächen des Gebietes zum Hochrechnen verwendet. Die Abbildung lässt erkennen: a) Die Abflussfracht in Rammern kann auf Basis der Abflussfracht an den beiden untereinander ähnlichen Feuchtflächen Herzogalm und Limbergalm recht genau abgeschätzt werden. b) Schätzt man die Abflussfracht in Rammern auf Basis der zu den anderen beiden Feuchtflächen kontrastierenden Fläche Klingleralm, so liegt die geschätzte Fracht zwar in derselben Größenordnung wie die beobachtete, aber die Schätzung ist deutlich schlechter, und die Schätzungen streuen stärker.

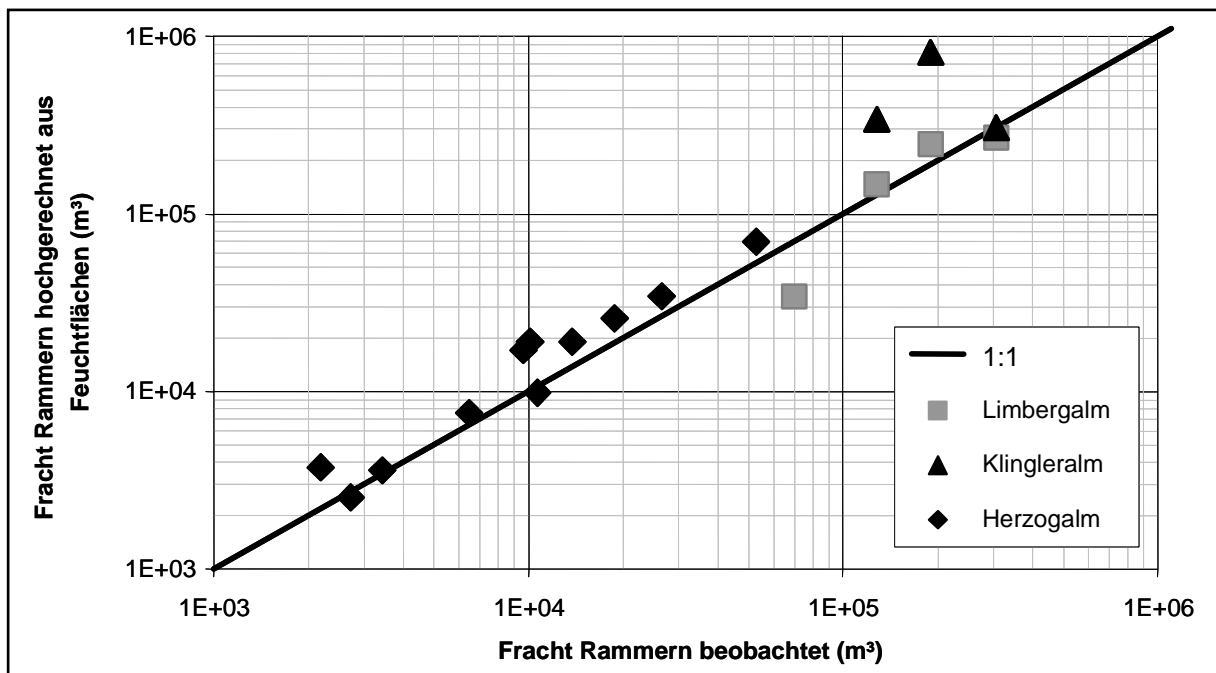


Abbildung 48: Vergleich von beobachteter und hochgerechneter Abflussfracht für den Gebietspegel Rammern (16 km²) im doppelt logarithmischen Maßstab. Hochrechnung aus den Feuchtflächen Herzogalm (3000 m², Signatur Raute), Limbergalm (1240 m², Signatur Quadrat) und Klingleralm (4500 m², Signatur Dreieck).

7.2.6 Abschätzung kontinuierlicher Abflüsse im Klamm Bach auf Basis täglicher Abflussmessungen

7.2.6.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Aufgrund diskontinuierlicher Messung des Abflusses auf Tagesbasis während mehrerer Jahre zeigt sich, dass das Abflussverhalten der links- bzw. rechtsseitigen Zubringer des Löhnersbaches unterschiedlich ist. In Abbildung 49 sind die Abflüsse (tägliche Messungen im Mündungsbereich) der einzelnen Einzugsgebiete Klamm Bach, Marxengraben, Schusterbauerngraben und Neuhausengraben über einen Zeitraum von 4 Jahren dargestellt. Die gemessenen Abflüsse beziehen sich auf den Gesamtabfluss des Gebietes Löhnersbach (Pegel Rammern) und sind als prozentualer Anteil dargestellt.

Die orographisch links bzw. rechts liegenden Zubringer des Löhnersbaches zeigen ein stark unterschiedliches Verhalten. Während Trockenperioden bringt der rechtsufrige Klammbach einen recht großen Beitrag zum Abfluss des Löhnersbaches (ca. 20 bis 25 %) bei ca. 15 % der Einzugsgebietsgröße (Abbildung 49). Bei Niederschlagsereignissen ist allerdings die Zunahme des Abflusses im Klammbach nur sehr gering, und der Beitrag am Abfluss des Löhnersbaches sinkt auf ca. 15 %. Das umgekehrte Bild bietet sich bei den linksufrigen Zubringern. Der Neuhausengraben trägt bei ca. 8 % Flächenanteil mit ca. 5 % Abflussanteil vergleichsweise wenig zum Trockenwetterabfluss bei. Im Zuge von Ereignissen steigt dieser Anteil am Abfluss des Löhnersbaches auf ungefähr 13 % sehr schnell an. Abbildung 50 zeigt, dass der Spitzenabfluss im Neuhausengraben während eines Ereignisses sogar den Scheitelabfluss des Klammbachs übersteigt, hingegen nach dem Ereignis deutlich unter den Vorereignisabfluss abfällt. Ein ähnliches Verhalten wie der Neuhausengraben zeigen auch der Marxtengraben und der Schusterbauerngraben, allerdings in etwas gedämpfter Form. Der Zusammenhang zwischen dem Abfluss im Klammbach und jenem im Löhnersbach kann durch einen nichtlinearen Regressionsansatz (vgl. Kap. 7.2.6.2) formuliert werden.

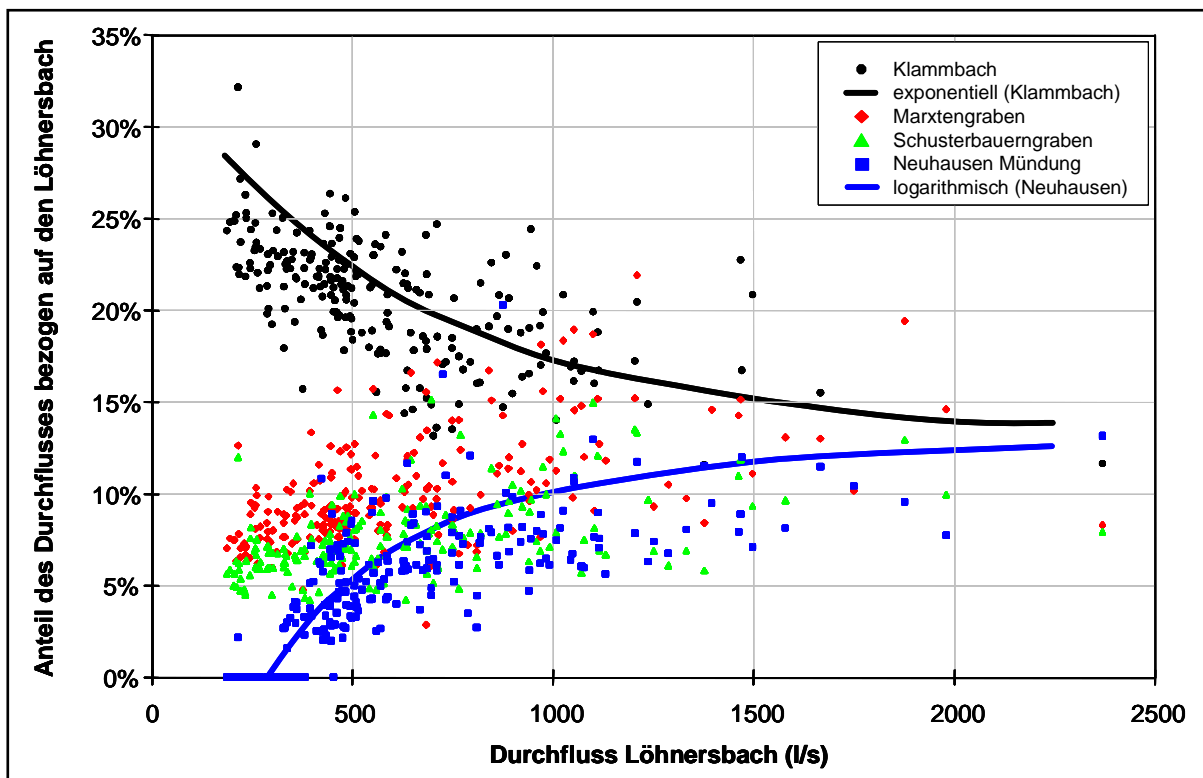


Abbildung 49: Anteil des Durchflusses der Zubringer des Löhnersbaches bezogen auf den Löhnersbach (Messwerte der Jahre 1993–1997).

Diese Unterschiedlichkeit auch modellmäßig zu beschreiben, ist ein lohnendes Ziel einer hydrologischen Modellierungsaufgabe. Zur Überprüfung eines solchen Modells sind Beobachtungsdaten von beiden Talflanken notwendig. Für die linke Talflanke des Löhnersbaches ist durch die Wasserstandsregistrierung am Neuhausengraben eine zumindest qualitative Einschätzung des Abflussverhaltens möglich. Im Gegensatz dazu existieren für die rechte Talseite, und hier speziell für den Klammbach, lediglich tägliche Durchflussmessungen mittels Salzverdünnungsmethode während der Sommermo-

nate. Als einigermaßen zuverlässige kontinuierliche Abflussdaten stehen jene des Löhnersbaches am Pegel Rammern zur Verfügung. Aufbauend auf den Einzelmessungen am Klammbach sowie den simultanen Abflüssen am Löhnersbach soll eine kontinuierliche Ganglinie des Abflusses am Klammbach abgeschätzt werden.

Mit den seit 1993 erhobenen Daten soll nun versucht werden, eine Regressionsgleichung zu ermitteln, mit der eine kontinuierliche Abflussreihe für den Klammbach aus der Abflussreihe des Löhnersbaches (Pegel Rammern) rückgerechnet werden kann, sozusagen ein downscaling von Abflussdaten durchgeführt werden kann.

7.2.6.2 Methode

Die erwähnten Einzelmessungen an den Zubringern des Löhnersbaches lassen erkennen, dass der relative Anteil des Abflusses am Klammbach bei größeren Abflussereignissen tendenziell kleiner ist als bei Trockenwetter. Dank der Tatsache, dass die Messungen am Klammbach einen breiten Bereich von Abflüssen überspannen, ist es möglich, eine zwar etwas unscharfe aber immerhin brauchbare Abhängigkeit zwischen den Abflüssen am Klammbach und am Löhnersbach zu ermitteln. Ein nichtlinearer Regressionsansatz wurde an die Daten angepasst und ergab:

$$y(t) = 0,24 * x(t+30') * \exp(-0,0003 * x(t+30'))$$

Hierin ist $y(t)$ der gemessene Abfluss im Klammbach zum Zeitpunkt t , $x(t+30')$ ist der Abfluss im Löhnersbach eine halbe Stunde später.

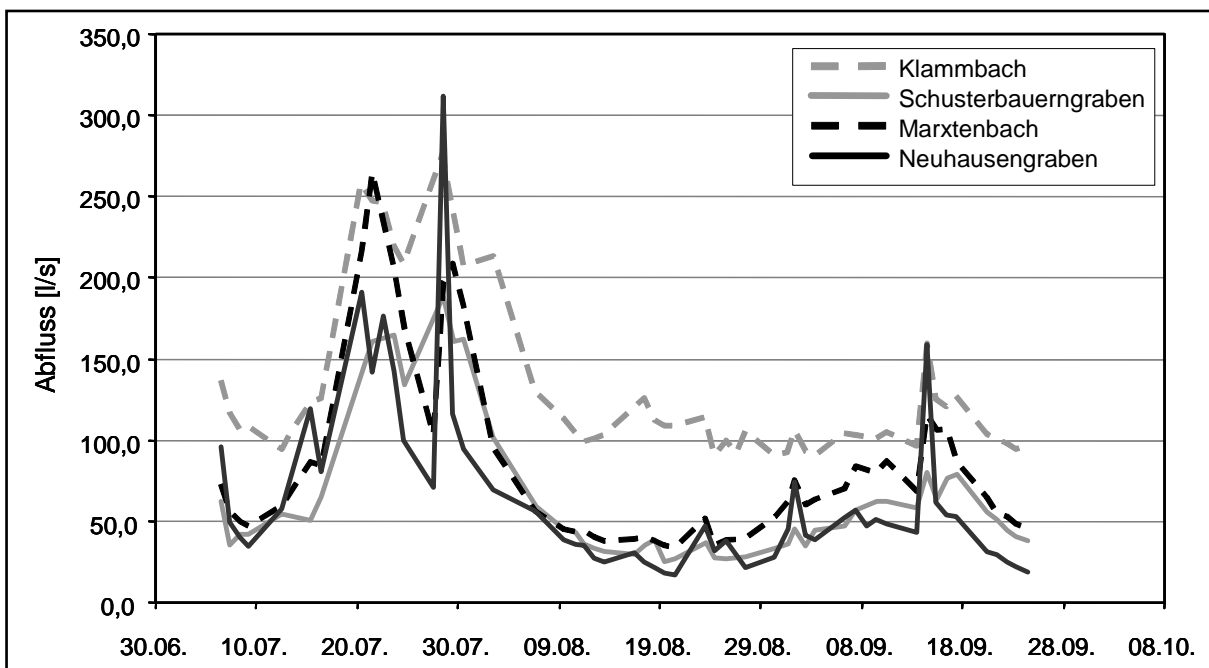


Abbildung 50: Gemessene Durchflüsse der Zubringer des Löhnersbaches im Zeitraum 30.06.1993 bis 08.10.1993.

Als Kalibrierungszeitraum für die Regression waren die Sommermonate der Jahre 1993 und 1994 gewählt worden (während der Wintermonate werden keine Messungen durchgeführt). Zur Validierung standen die Daten des Sommers 1992, 1996 bis 1997 zur Verfügung. Das Jahr 1995 wurde nicht für die Validierung verwendet, da einerseits die Messungen am Pegel durch die Katastrophenhochwässer stark beeinträchtigt wurden und andererseits die Spitzenabflüsse während der Ereignisse außerhalb des Gültigkeitsbereiches des angewendeten funktionalen Zusammenhanges liegen. Die Jahre 1996 und 1997 waren zwar ebenfalls durch überdurchschnittliche Wasserführung während der Sommermonate gekennzeichnet, allerdings ohne das Auftreten von Extremereignissen.

7.2.6.3 Ergebnisse und Interpretation

Die Abbildung 51 bis Abbildung 55 zeigen die Ergebnisse der Abflussschätzungen für den Klamm bach im Kalibrierungs- bzw. Validierungszeitraum. Während des Sommers 1993 (Abbildung 51) ist die Übereinstimmung zwischen den Messungen und der mit dem Regressionsmodell geschätzten Ganglinie (durchgezogene Linie) des Klamm baches etwas schlechter als im Jahr 1994 (Abbildung 52). Dies könnte auf die etwas geringere Sorgfalt bei der Durchführung der Messungen im Jahr 1993 zurückzuführen sein.

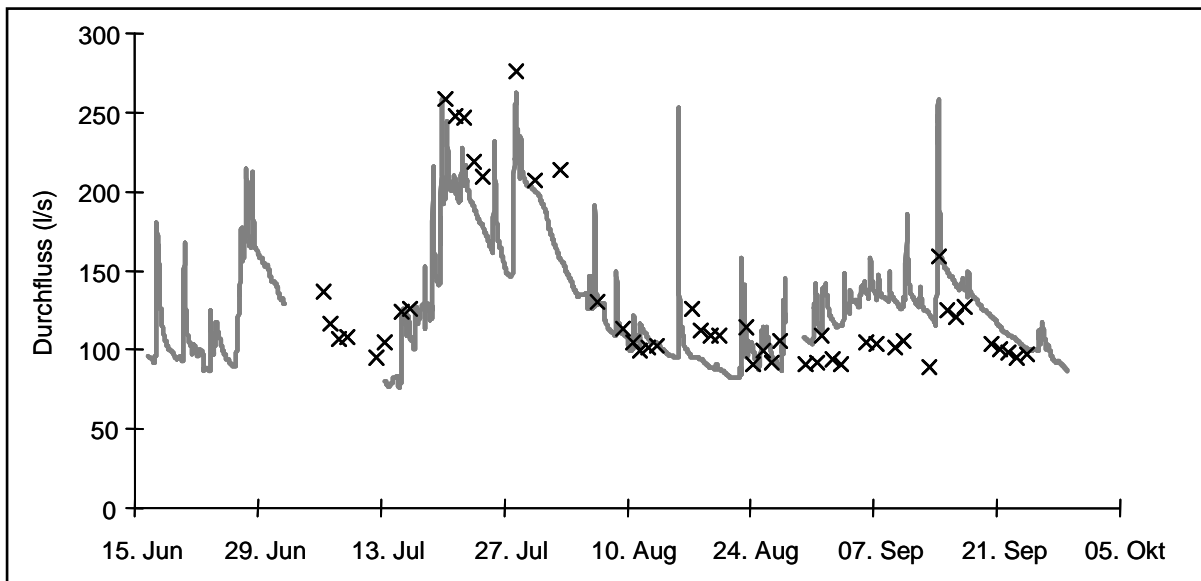


Abbildung 51: Klamm bach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (**graue Linie**), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches (Kalibrierungszeitraum 1993).

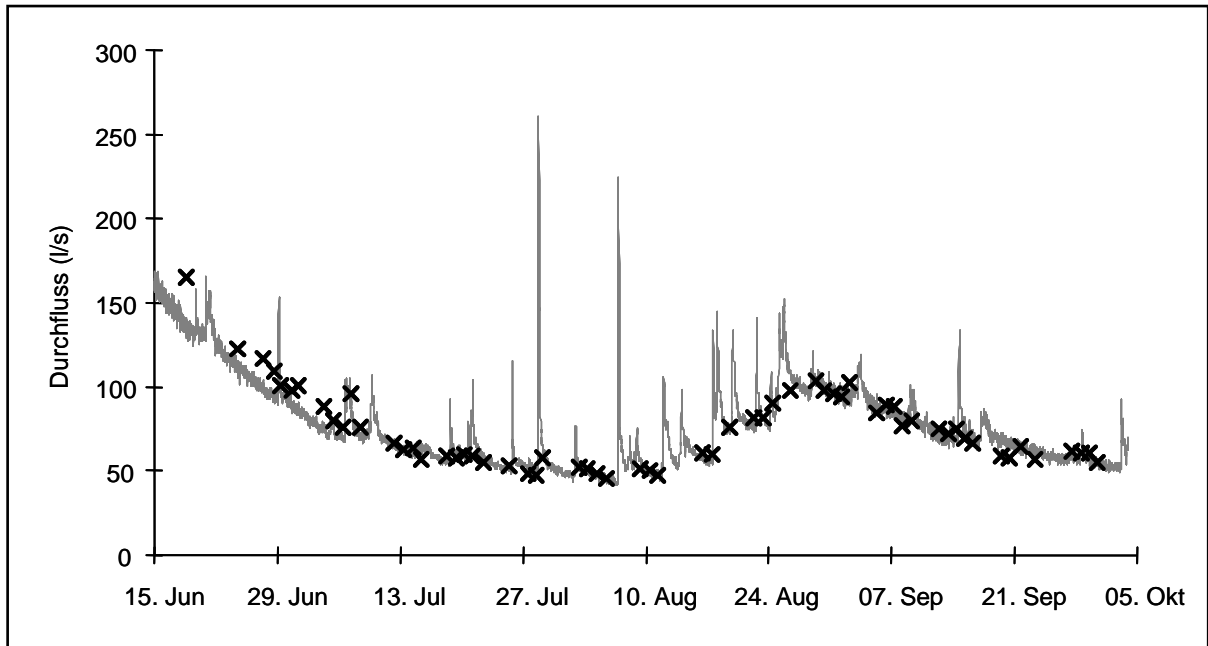


Abbildung 52: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (schwarze Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches (Kalibrierungszeitraum 1994).

In der Abbildung 53 ist die Gegenüberstellung von Einzelmessungen des Durchflusses am Klammbach und der aus den Wasserstandsmessungen am Pegel Rammern geschätzten Ganglinie für den Zeitraum von 15.Juni 1992 bis 19.Oktober 1992. Dabei zeigt sich während eines kurzen Abschnittes im August eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Abflusswerten.

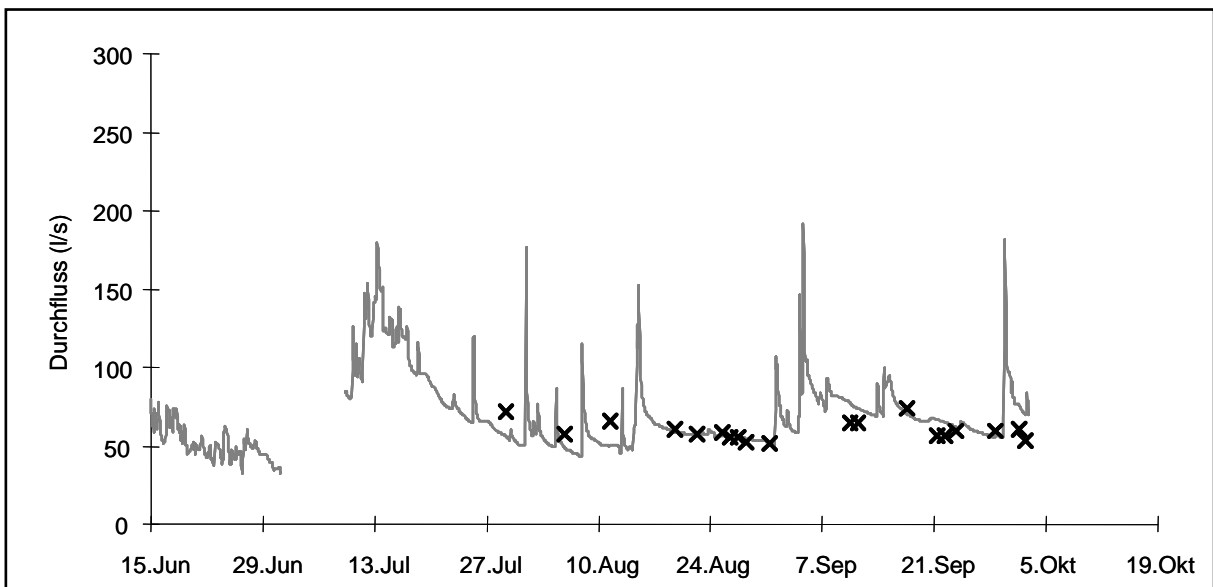


Abbildung 53: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (schwarze Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches für den Validierungszeitabschnitt 1992).

Die Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die Gegenüberstellung von Einzelmessungen des Durchflusses am Klammbach und der aus den Wasserstandsmessungen am Pegel Rammern geschätzten Ganglinie (Abbildung 54: 1996; Abbildung 55: 1997).

Diese Ganglinien wurden mit der oben angegebenen Funktion ohne jegliche weitere Kalibrierung berechnet. Die Übereinstimmung zwischen der berechneten Abflussganglinie und den gemessenen Tagesabflüssen in diesen drei Jahren ist recht gut. Es gilt darauf hinzuweisen, dass die Abflussspitzen selten mit manuellen Abflussmessungen erfasst wurden. Dies hat im Wesentlichen zwei Ursachen: a) Während höherer Abflüsse im Löhnernbach war die orographisch rechte Talseite und somit der Klamm Bach aufgrund der Überflutung der Zufahrt meist nicht erreichbar. b) Die mit den Abflussmessungen beauftragte Person konnte die Messungen nicht jederzeit durchführen und somit nicht stets genau zu einer Hochwasserspitze messen.

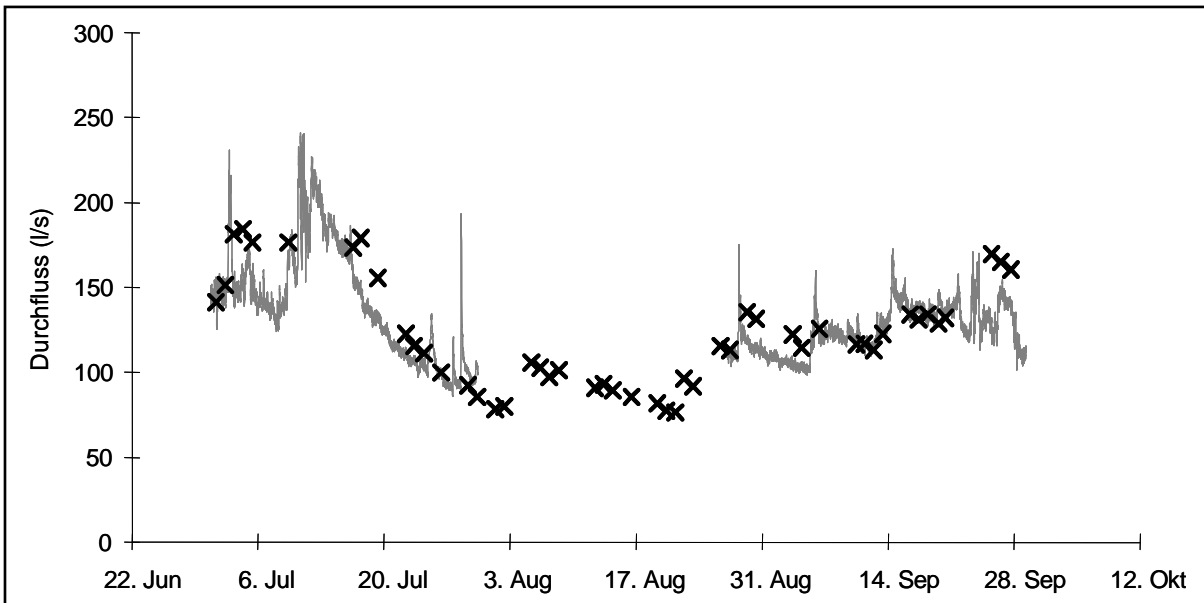


Abbildung 54: Klamm Bach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (schwarze Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnernbaches für den Validierungszeitabschnitt 1996.

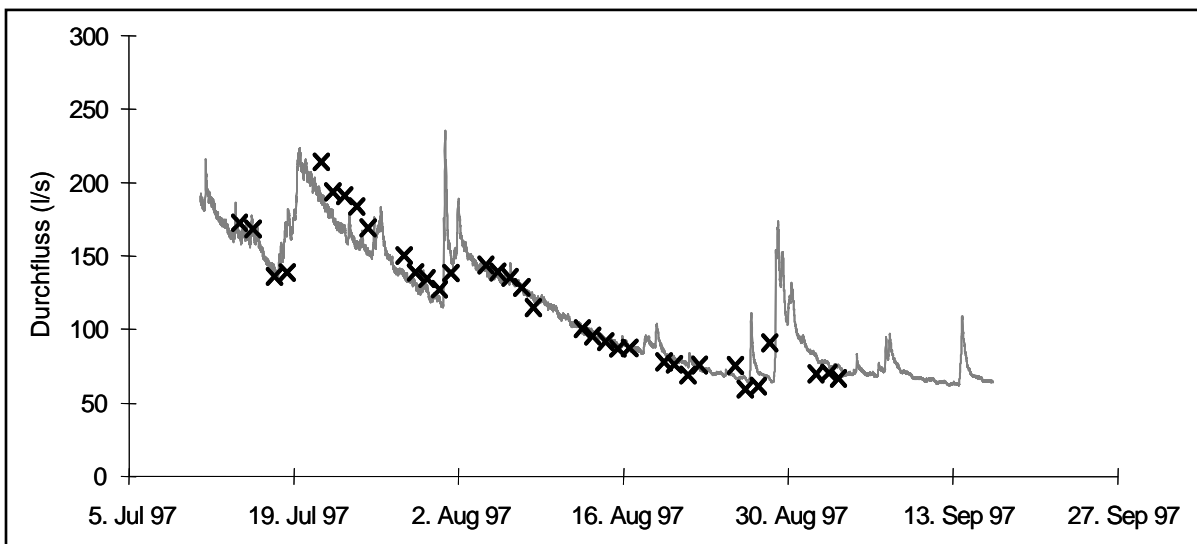


Abbildung 55: Klamm Bach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (graue Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnernbaches für den Validierungszeitabschnitt 1997.

7.2.6.4 Zusammenfassung

Das mittlere Abflussverhalten des Klammaches lässt sich aus diskontinuierlichen Abflussmessungen im Klammach in Verbindung mit kontinuierlichen Messungen an seinem Vorfluter Löhnersbach insoweit rekonstruieren, als es für die Validierung eines Wasserhaushaltsmodelles erforderlich ist. Die Hochwasserspitzen am Löhnersbach sind auf den Klammach nur bedingt übertragbar: Im Fall unterschiedlicher Überregung der Teileinzugsgebiete des Löhnersbaches lassen sich die Hochwasserspitzen der Zubringer nur mit großer Unschärfe aus der Ganglinie des Löhnersbaches ableiten. Für Hochwasseruntersuchungen am Klammach müssten daher kontinuierliche Wasserstands- bzw. Durchflussmessungen am Klammach durchgeführt werden.

7.2.7 Abflussprozessanalyse an der Feuchtfläche Limbergalm

An der Feuchtfläche Limbergalm fanden zur Analyse der Abflussbildungsprozesse, insbesondere zur Entstehung der nachlaufenden Wellen (vgl. Kap. 7.2.4.4), umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit tracerhydrologischen, geoelektrischen und geoseismischen Methoden sowie Beregnungsversuche statt.

7.2.7.1 Tracerhydrologische Untersuchungen

In Zusammenarbeit mit der AG Freiburg (Prof. Leibundgut, Prof. Uhlenbrook, Dr. Tilch, Dr. Didszun) wurden in den Jahren 2001 bis 2002 tracerhydrologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Feuchtfläche Limbergalm durchgeführt. Die Ergebnisse sind bei TILCH ET AL. (2003 und 2006a) publiziert und werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Die Abbildung 56 gibt eine Übersicht zu den temporären Messeinrichtungen an der Feuchtfläche Limbergalm.

Die im Rahmen einer Intensivmesskampagne durchgeführten Untersuchungen umfassten im Juni/Juli 2001 einen mehrwöchigen Zeitraum mit hoher Gebietsvorfeuchte (TILCH ET AL. 2003). Die Abbildung 57 zeigt die Abflussganglinien der Pegel Limbergalm und Limbergalm-West sowie die Beprobungszeitpunkte während der Intensivmesskampagne.

An beiden Pegelstationen ist eine verzögerte Abflusserhöhung erkennbar. Daher kann eindeutig nachgewiesen werden, dass die nachlaufende Welle kein pegel- bzw. standortspezifisches Phänomen ist. Am Ende des Untersuchungszeitraumes treten noch zwei kurze Niederschlagsereignisse mit durchschnittlichen Niederschlagsintensitäten von 0,65 mm/h (6 mm in 9,25 Stunden) bzw. 1,6 mm/h (24 mm in 15 Stunden) auf.

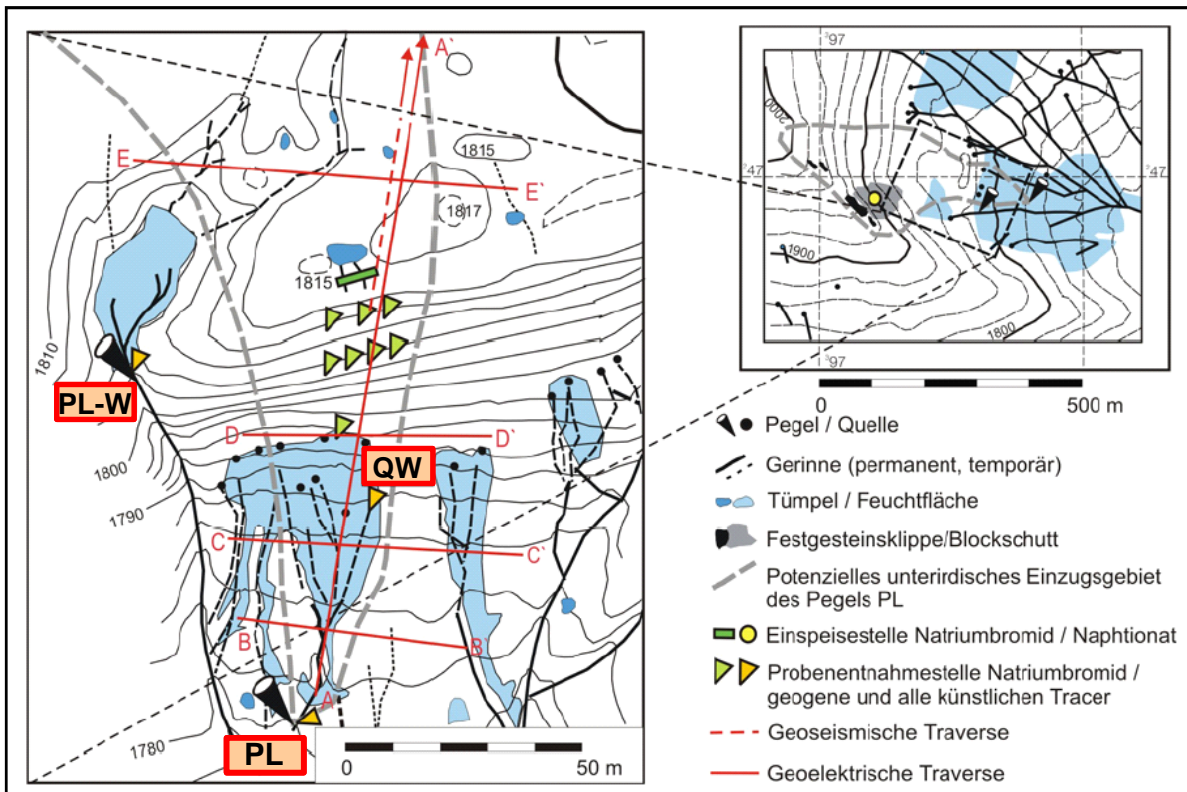


Abbildung 56: Detaillierte Übersicht zu den Messeinrichtungen an der Feuchtfläche Limbergalm sowie zu den Versuchsanordnungen der (tracer-)hydrologischen und geophysikalischen Untersuchungen (PL = Pegel Limbergalm, PL-W = Pegel Limbergalm-West; QW = Quellpegel am Wallfuß) (Quelle und Kartographie: TILCH ET AL. 2003; verändert).

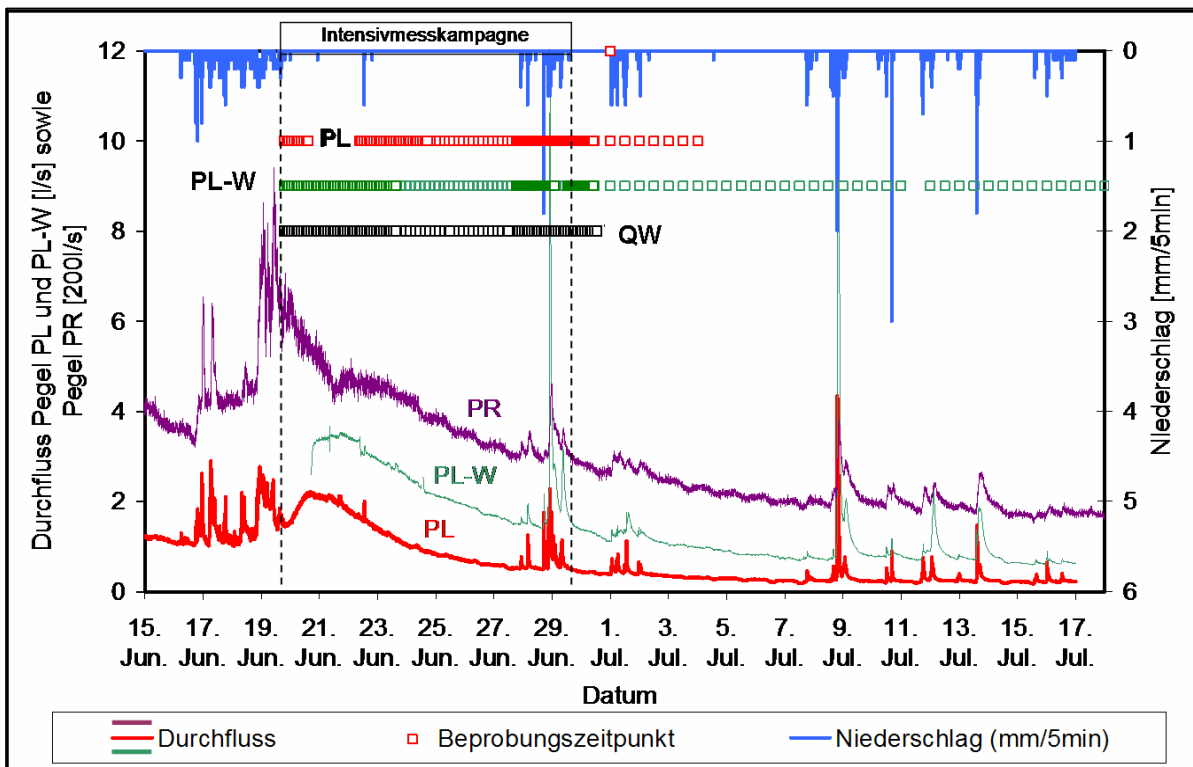


Abbildung 57: Durchflussganglinien der Pegel Rammern (PR), Limbergalm (PL) und Limbergalm-West (PL-W) und Niederschlagsverteilung sowie Beprobungszeiträume mit Beprobungsintervallen von 1 bis 4 Stunden der Intensivmesskampagne im Juni 2001 und von 12 Stunden im Juli (TILCH ET AL. 2003; verändert).

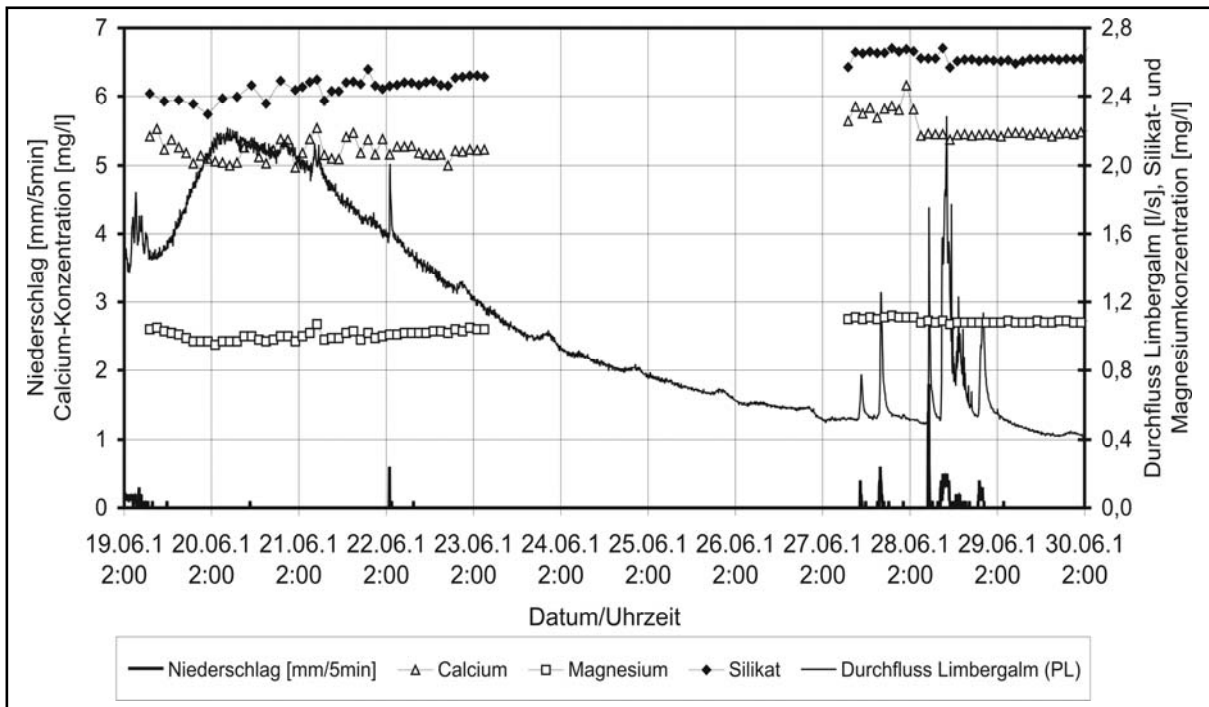


Abbildung 58: Niederschlagsverteilung sowie Ganglinien der Silikat- und Ionenkonzentrationen einer Quelle am Wallflankenfuß (QW) vom 19.06. bis 30.06.2001 mit der Durchflussganglinie am Pegel Limbergalm als Referenz (TILCH ET AL. 2003; verändert).

Mit Hilfe der Stichtagsbeprobung konnte nachgewiesen werden, dass Kluftgrundwässer des kristallinen Grundgebirges nicht mehr zu identifizieren sind, wenn deren hydrochemische Signatur (geringe Silikat- und Ionenkonzentration) durch kurze Fließpassagen innerhalb der quartären Deckschichten maskiert ist (Abbildung 58 und Abbildung 63). Dies wird dadurch dokumentiert, dass die Quellwässer entlang des Wallflankenfußes in nördlicher Richtung infolge der zunehmend längeren Fließstrecken in der wasserdurchlässigen Rutschwallbasis zunehmend höhere Ionen- und Silikatkonzentration aufweisen. Das Quellwasser der Quelle an der Wallflanke (QW) unterlag keiner hydrochemischen Variation sowohl zur Zeit der nachlaufenden Hochwasserwellen als auch während der Niederschlagsereignisse. Daher handelt es sich um reines Grundwasser, welches der Quelle aus den oberen Hangbereichen langfristig zuströmt.

Abflusskomponenten zur Zeit der nachlaufenden Welle

Zu Beginn der verzögerten Abflusserhöhung sind zunächst geringe, im weiteren Verlauf zunehmende Ionen- und Silikatkonzentrationen festzustellen (Abbildung 59 und Abbildung 60).

Dieser Effekt geht auf das vorangegangene Niederschlagsereignis und den auf der Feuchtfläche generierten Oberflächenabfluss zurück, der im Zuge der Abflusskonzentration innerhalb der Feuchtfläche noch mehrere Stunden nach dem Niederschlagsereignis generiert wird. Während der untersuchten Rezessionsäste sind die Chemographen mit denen bei Trockenwetterabflüssen vergleichbar (Abbildung 59 und Abbildung 60). Dies lässt darauf schließen, dass es sich um ereignisunabhängige Grundwasserabflusskomponenten (Basisabfluss) handelt.

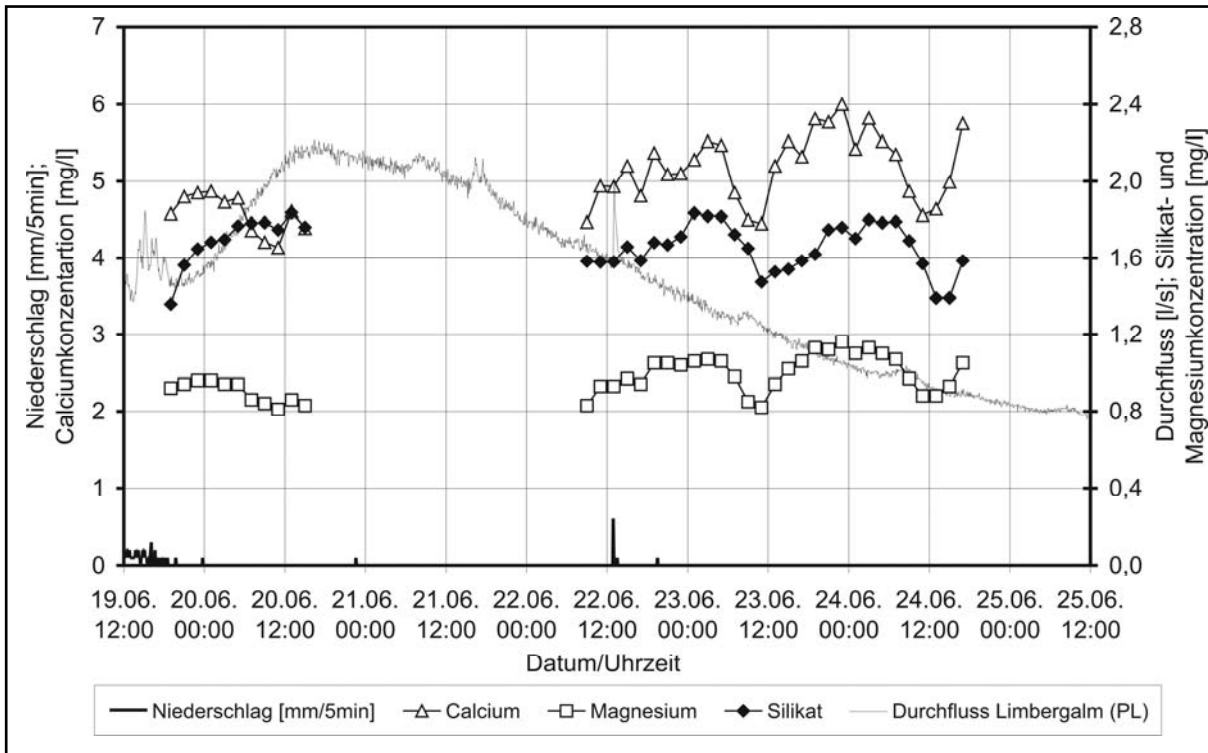


Abbildung 59: Niederschlagsverteilung, Durchflussganglinie und Ganglinie der Kationen Calcium und Magnesium sowie gelöster Kieselsäure zur Zeit der während der Intensivmesskampagne beprobten nachlaufenden Hochwasserwellen am Pegel Limbergalm (PL) (TILCH ET AL. 2003; verändert).

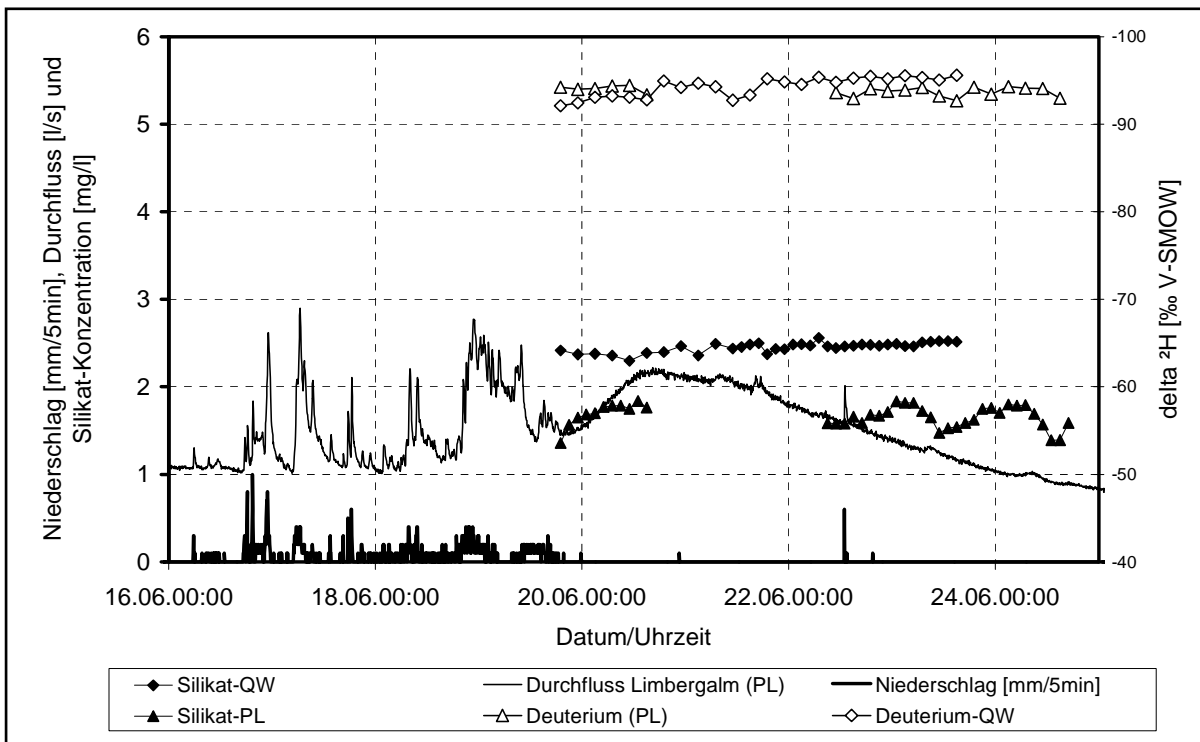


Abbildung 60: Niederschlagsverteilung, Durchflussganglinie am Pegel Limbergalm (PL) und und Ganglinien von gelöster Kieselsäure und Deuterium zur Zeit der während der Intensivmesskampagne 2001 beprobten nachlaufenden Hochwasserwellen am Pegel Limbergalm (PL) und an der Quelle QW (TILCH ET AL. 2006a; verändert).

Im Gegensatz zu der hydrochemischen Signatur des Abflusses aus der Quelle am Wallflankenfuß (Abbildung 58) sind an den Pegeln Limbergalm und Limbergalm-West zwei verschiedene Grundwasserkomponenten mit unterschiedlicher Signatur und periodischen Tagesschwankungen identifizierbar. In Abbildung 59 wird dies am Beispiel der ermittelten Ganglinien für Calcium und Magnesium sowie für Silikat verdeutlicht. Aufgrund eines technischen Defektes der Messeinrichtungen liegen für den Zeitraum 20.06.2001 (15 Uhr) bis 22.06.2001 (9 Uhr) keine Daten vor. Die täglichen Konzentrationsminima der Kationen gehen zwar mit kleineren Abflussimpulsen einher, aber diese reichen aufgrund ihres geringen Volumens nicht aus, die Konzentrationschwankungen zu erklären (Abbildung 59). Daher müssen zwei Grundwasserkomponenten existieren, deren Abflussganglinien Tagesschwankungen mit einer Phasenverschiebung von etwa 12 Stunden aufweisen. Die Amplituden verändern sich während des Untersuchungszeitraumes nicht, weshalb der relative Beitrag dieser Komponenten innerhalb dieses Zeitraumes als unabhängig vom Gesamtabfluss bzw. von der Speicherfüllung angesehen werden kann. Die Auswertung langjähriger Abflussreihen des Pegels Limbergalm zeigen jedoch, dass derartige tägliche Abflussimpulse nicht bei geringer Gebietsvorfeuchte oder Trockenwetterabfluss auftreten, bezogen auf das hydrologische Sommerhalbjahr. Als Unterschreitungsschwellenwert konnte ein Abfluss von 0,1 l/s bis 0,2 l/s identifiziert werden.

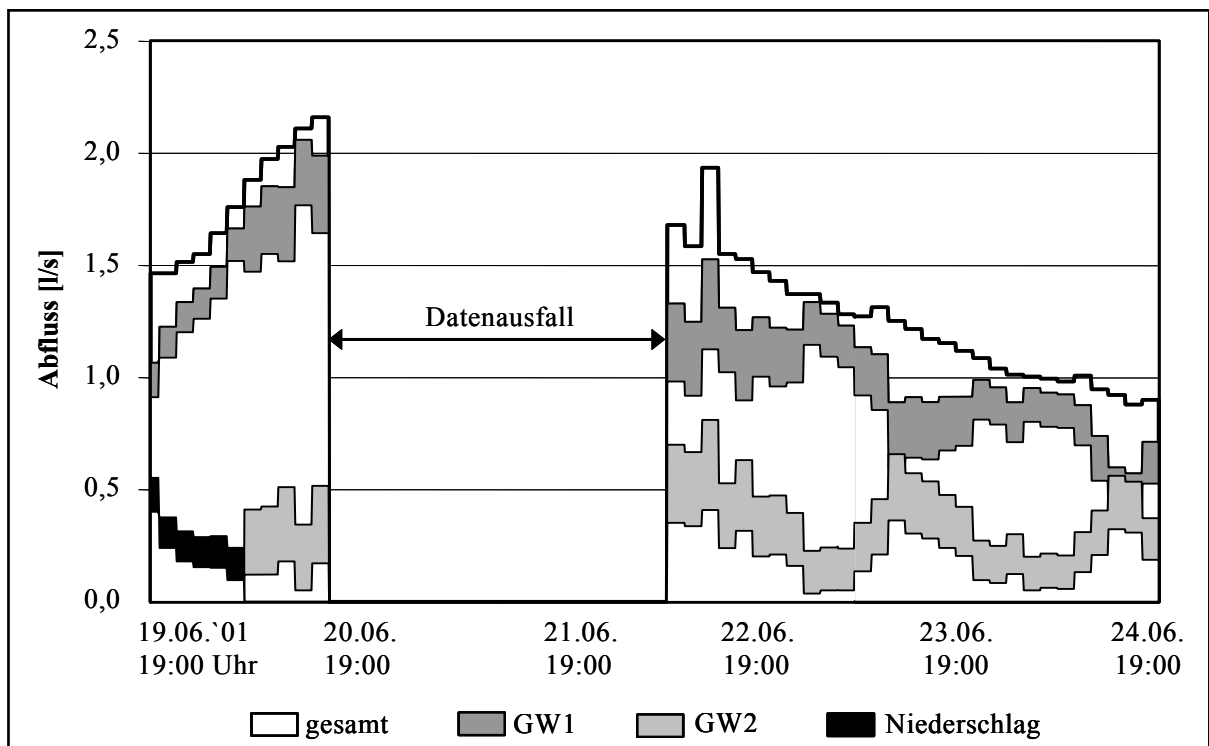


Abbildung 61: Durchflussganglinie des Pegels Limbergalm vom 19.06.2001 (19 Uhr) bis 24.6.2001 (19 Uhr) sowie die per Ganglinienseparation mit Hilfe des Tracers Silikat bestimmten Ganglinien der Abflusskomponenten Niederschlagsereigniswasser (N) sowie der Grundwasserkomponenten GW1 und GW2 (TILCH ET AL. 2003; verändert).

Letztendlich wird dieses Phänomen der täglichen Abflussimpulse als das Resultat zweier Basisabflussgenerierender Grundwasserspeicher interpretiert, deren hydrochemische Signatur unterschiedlich ist, deren Abflussanteile sich aber periodisch und phasenverschoben ergänzen (TILCH ET AL. 2006a). So führt beispielsweise eine Ganglinienseparation mit den Tracern Silikat und Deuterium zu dem Ergebnis, dass der

generierte Abflussanteil einer höher mineralisierten Grundwasserkomponente (GW1) im Mittel 80 % und jener einer geringer mineralisierten Komponente (GW2) etwa 20 % beträgt. In Abbildung 61 ist das Ergebnis der Separation auf Basis des Tracers Silikat exemplarisch dargestellt. Dabei weist die zweite Grundwasserkomponente eine stärkere Tagesschwankung auf als die erste Komponente was letztendlich zu den positiven Impulsen in der Abflussganglinie führt.

Abflusskomponenten zur Zeit der Niederschlagsereignisse

Während der untersuchten Niederschlagsereignisse werden die Tracerdurchgangskurven (Chemographen) der Pegel Limbergalm und Limbergalm-West deutlich vom Abfluss der Feuchtfächen beeinflusst (Abbildung 62) (TILCH ET AL. 2003, 2006a). Dies wird aus den Deuteriumwerten des Niederschlages (Ereigniswasser) ersichtlich, die zwischen -20 ‰ und -50 ‰ variieren und sich somit deutlich von jenen des Abflusses unterscheiden. Zu Beginn des Niederschlages wird „altes“ vermutlich in Mulden der Feuchtfäche gespeichertes Wasser (Vorerigniswasser) mobilisiert.

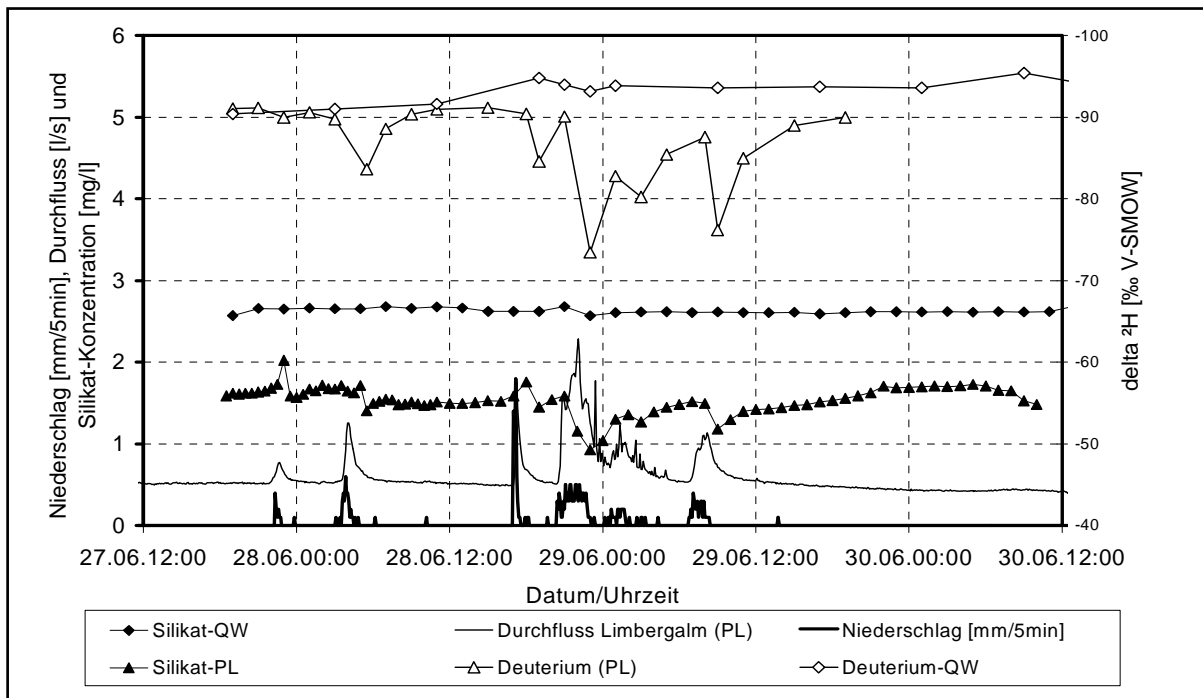


Abbildung 62: Niederschlagsverteilung Durchflussganglinie am Pegel Limbergalm (PL) und Ganglinien von gelöster Kieselsäure und Deuterium zur Zeit der beiden Niederschlagsereignisse während der Intensivmesskampagne 2001 bei PL und an der Quelle QW (TILCH ET AL. 2006a; verändert).

Dies zeigt sich auch in den zunächst hohen, den beiden Grundwasserkomponenten ähnlichen Ionen- und Silikat-Konzentrationen sowie den noch unbeeinflussten Deuteriumwerten (Abbildung 63). Im weiteren Verlauf des jeweiligen Ereignisses sind dann mit geringer zeitlicher Verzögerung zum Niederschlagsinput synchrone Konzentrationsabnahmen festzustellen. Deren Minima werden nach der Abflussspitze erreicht. Allerdings wirken sich auch bei derartigen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen die tagesschwankend schwankenden Abflussanteile der Grundwasserkomponenten auf die Ganglinien der Tracerdurchgangskurven aus, was insbesondere während der Rezessi-

onsäste erkennbar ist. Die Ganglinienseparationen auf Basis der Tracer Silikat und Deuterium bestätigen diesen Sachverhalt (Abbildung 64).

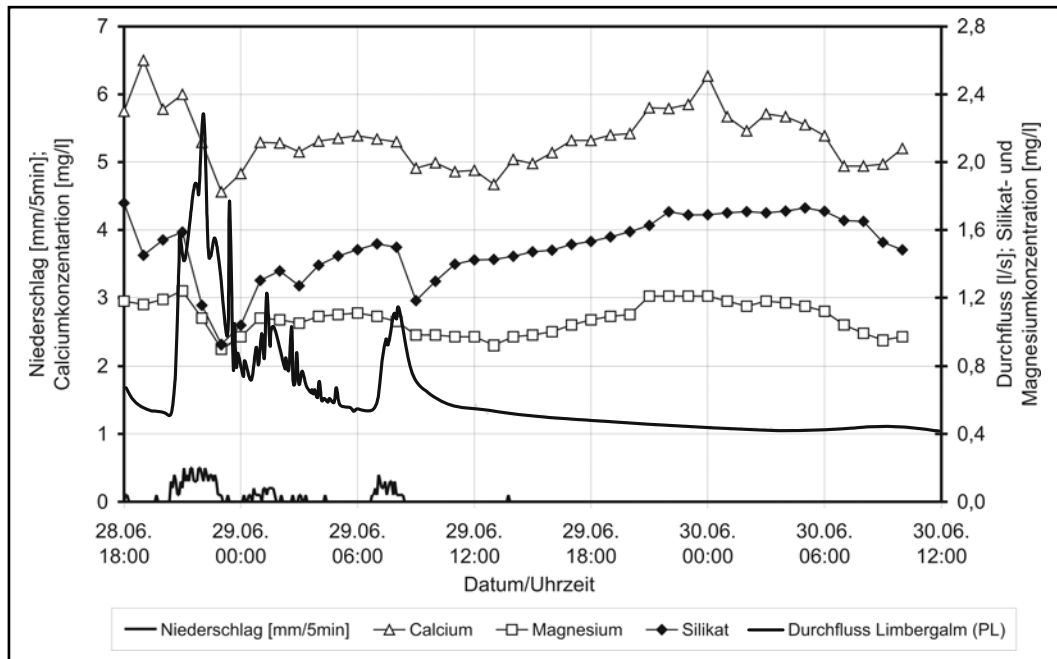


Abbildung 63: Niederschlagsverteilung, Durchflussganglinie und Ganglinie der Kationen Calcium und Magnesium sowie gelöster Kieselsäure zur Zeit des Niederschlagsereignisses (Niederschlagsintensität: 24 mm in 15 Stunden) am Pegel Limbergalm (TILCH ET AL. 2003; verändert).

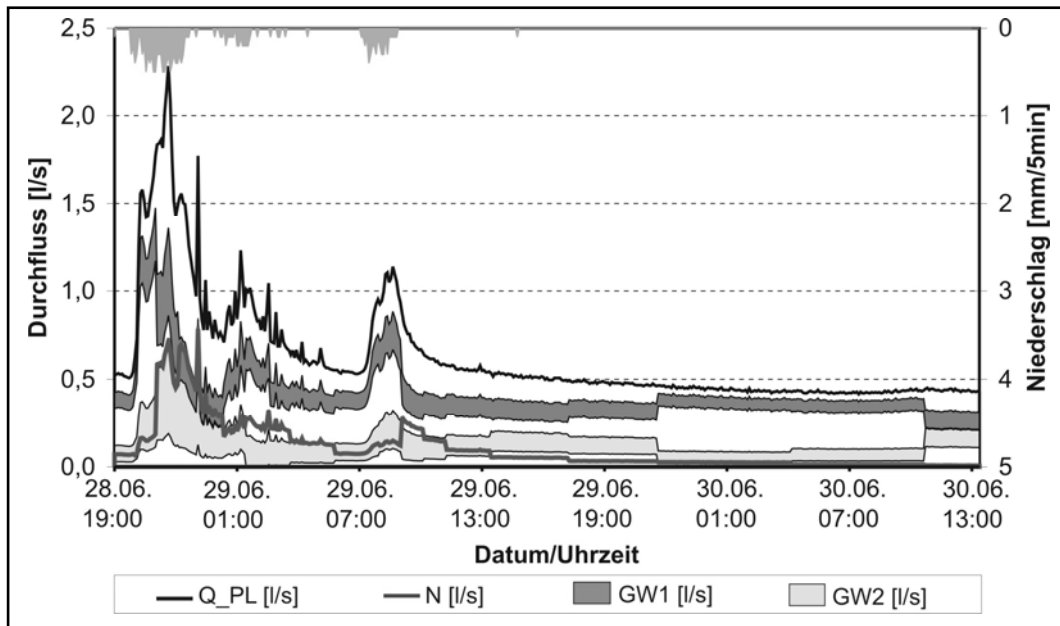


Abbildung 64: Durchflussganglinie des Pegels Limbergalm während des Ereignisses vom 28.06.2001 bis 30.06.2001 sowie die mit Ganglinienseparation auf Basis von Silikat und Deuterium bestimmten Ganglinien der Abflusskomponenten Niederschlagsereigniswasser (N) sowie der Grundwasserkomponenten GW1 und GW2 (TILCH ET AL. 2006a; verändert).

So beträgt der durch das Niederschlagsereignis vom 28.-29.06.2001 generierte Anteil des Ereigniswassers nur 16-17 %. Der größte Teil des Niederschlages bleibt in der Feuchtfläche gespeichert, durchmischt sich mit älteren Abflusskomponenten und fließt

verzögert ab. Die beiden Grundwasserkomponenten GW1 und GW2 (Erläuterung siehe S.104) umfassen während dieses Ereignisses 56-75 % bzw. 8-28 % des Gesamtabflusses. Genau wie bei den für die nachlaufende Welle durchgeführten 2-Komponententrennungen wurden auch für die hier notwendigen drei Komponenten plausible Wertebereiche für die Silikat- und Deuteriumkonzentration verwendet. Dadurch ergeben sich die in Abbildung 64 dargestellten Bereiche der verschiedenen Abflusskomponenten. Die mittleren Anteile der beiden Grundwasserkomponenten am gesamten Grundwasserabfluss (79 % bzw. 21 %) liegen in der Größenordnung wie sie bereits für den Zeitraum der nachlaufenden Welle ermittelt wurden. Dadurch wird bestätigt, dass die Abflussanteile der beiden Grundwasserkomponenten während des Untersuchungszeitraumes unabhängig vom Gesamtgrundwasserabfluss sind.

7.2.7.2 Beregnungsversuche in Verbindung mit Tracerexperimenten

Insgesamt wurden zwei kombinierte Beregnungs-Markierungsversuche durchgeführt. Der erste Versuch fand im Juni 2001 mit dem Salztracer Natriumbromid statt und hatte das Ziel, die These zu testen, dass aus der bis 0,5 Meter mächtigen Rohhumusauflage, die an der Wallflanke vorliegt, bei hoher Gebietsfeuchte eine zusätzliche Abflusskomponente generiert wird und diese episodisch zu höheren Abflussbeiwerten bei einzelnen Ereignissen führt. Der zweite Versuch fand im Sommer 2002 mit dem Fluoreszenztracer Naphthionat bei geringer Gebietsfeuchte statt und hatte zum Ziel, Informationen zur Abflussdynamik und somit zur Hochwasserrelevanz des makroporigen Hangschuttes als potenziellen Herkunftsraum schneller Abflusskomponenten zu erhalten (TILCH ET AL. 2006a).

Kombinierter Beregnungs-Markierungsversuch im Sommer 2001

Durch die kombinierten Beregnungs- und Markierungsversuche auf dem Walltop und an der Wallflanke im Jahr 2001 konnten Informationen zu dem im Löhnersbachgebiet weit verbreiteten flach gründigen Wasserumsatzraum der Rohhumuslagen ermittelt werden. So konnte festgestellt werden, dass im Verlauf der Beregnung, sobald die Speicherkapazität der Humusauflage erschöpft war, sich der wassergesättigte Bereich vom Walltop ausgehend progressiv auf die unteren Bereiche der Wallflanke ausbreitete. In den Probenentnahmestellen an der Wallflanke (vgl. Abbildung 56 im Kap. 7.2.7.1) konnte in der Folge ein stetiger Wasserfluss im Basisbereich der Rohhumusauflage (über dem Silikatboden) beobachtet werden. Dieser führte zu einem Anstieg des Wasserstandes. Der Durchbruch des im Walltop injizierten Salztracers Natriumbromid äußerte sich auch sofort in einer erhöhten elektrischen Leitfähigkeit des von der oberen Wallflanke zuströmenden Wassers (Abbildung 65). Nach Beendigung der Beregnung setzte der Wasserfluss im Liegenden der Rohhumusauflage aus. Dieser Prozess konnte auch bei einem nachfolgenden natürlichen Niederschlagsereignis beobachtet werden.

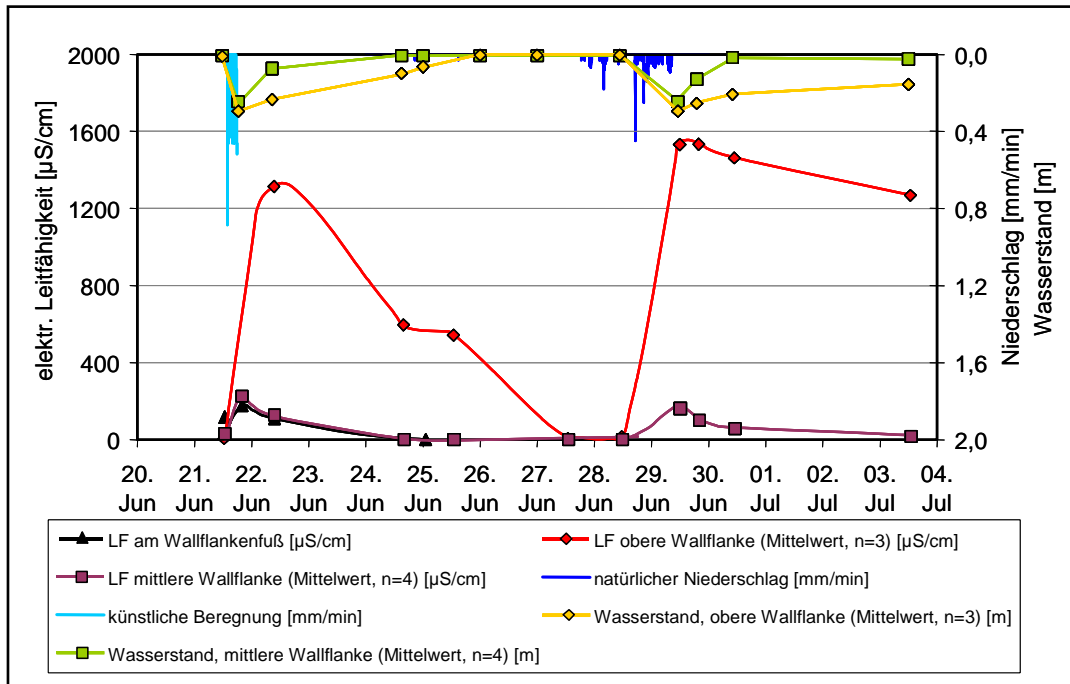


Abbildung 65: Tracerdurchbrüche an verschiedenen Probenentnahmepunkten aufgrund des kombinierten Beregnungs-Markierungsversuches (Einspeisung am 21.06.2001; 13:50 Uhr) mit dem Salztracer Natriumbromid, Wasserstandsganglinien der Beobachtungslöcher der Wallflanke sowie Beregnungs- und Niederschlagsverteilung (TILCH ET AL. 2006a; verändert).

Kombinierter Beregnungs-Markierungsversuch im Sommer 2002

Oberhalb beider Limbergalm-Pegel (PL und PL-W in Abbildung 56) liegt ein Schuttgang, der als Verdachtsfläche für die Entstehung der unterirdischen Abflusswellen anzusehen war. Hier sollte ein Fluoreszenztracer eingebracht werden, um diese Hypothese zu testen. Nachdem die im Frühsommer 2001 eingebrachten Tracer (Eosin und Uranin) mangels ausreichender natürlicher Niederschläge sehr spät, nämlich erst im Laufe der Schneeschmelze 2002, in den Quellen und Bächen des Untersuchungsgebietes identifiziert werden konnten, wurde beschlossen, den Versuch mit einem anderen Fluoreszenztracer (Naphthionat) zu wiederholen und den Bereich der Einspeisung künstlich zu beregnen. Durch die künstliche Beregnung sollte a) womöglich eine künstliche unterirdische Abflusswelle erzeugt werden, b) der Tracer transportiert werden, c) wurde versucht, durch temporäre Beimischung von Kochsalz zum Beregnungswasser die Leitfähigkeit des unterirdischen Abflusses kurzfristig zu erhöhen, sodass in der Geoelektrik eine deutlichere Reaktion beim Vorbeiströmen der Salzwolke sichtbar werden sollte.

Übliche Beregnungsanlagen werden zur Simulation hoher Niederschlagsintensitäten bei geringer Regendauer verwendet, und ihre Konstruktion daraufhin ausgerichtet (SCHAFFHAUSER 1982, 1988). Niederschläge geringer Intensität können mit derartigen Anlagen im Allgemeinen nicht aufgebracht werden, weil bei der hierfür notwendigen Druckreduktion nicht mehr die gesamte Fläche überregnet wäre. Die eingangs erwähnten „nachlaufenden Wellen“ werden aber genau von solchen Regenereignissen geringer Intensität aber langer Dauer hervorgerufen, und genau solche Ereignisse soll-

ten im hier beschriebenen Untersuchungsprogramm simuliert und analysiert werden. Es wurde daher eine spezielle Anlage für die Simulation von Dauerregen konstruiert. Die Anlage ist wie folgt konzipiert: 10 Schwenkdüsen bestreichen eine 400 m² große Versuchsfläche. Um seitliche windbedingte Abdrift auszugleichen, werden die Außenseiten der eigentlichen Beregnungsfläche mit halber Intensität mitberechnet. Spezielle Düsen bringen bei max. 2 bar Druck 4m³/h Wasser auf die Versuchsfläche. Querschnittsbegrenzer in den Düsen halten den Wasserdurchsatz ab einem Druck von 2 bar weitgehend konstant. Ein online registrierender Wasserzähler wird zusätzlich während der Versuchsdurchführung in 10 min-Abständen abgelesen und erlaubt so die genaue Dokumentation des Beregnungsvorganges. Die Wasserversorgung erfolgt aus natürlichen Gewässern, mit Hilfe von Beileitungen, Zwischenbehältern und einer Tragkraftspritze.

Mit Hilfe des kombinierten Beregnungs-Markierungsversuches am Schutthang im Jahr 2002 und der dadurch erzielten Tracerdurchbrüche an den beiden Pegeln Limbergalm und Limbergalm-West sowie der Quelle an der Wallflanke konnte eindeutig belegt werden, dass beide Einzugsgebiete ineinander übergehen und nicht eindeutig abgrenzbar sind Abbildung 66.

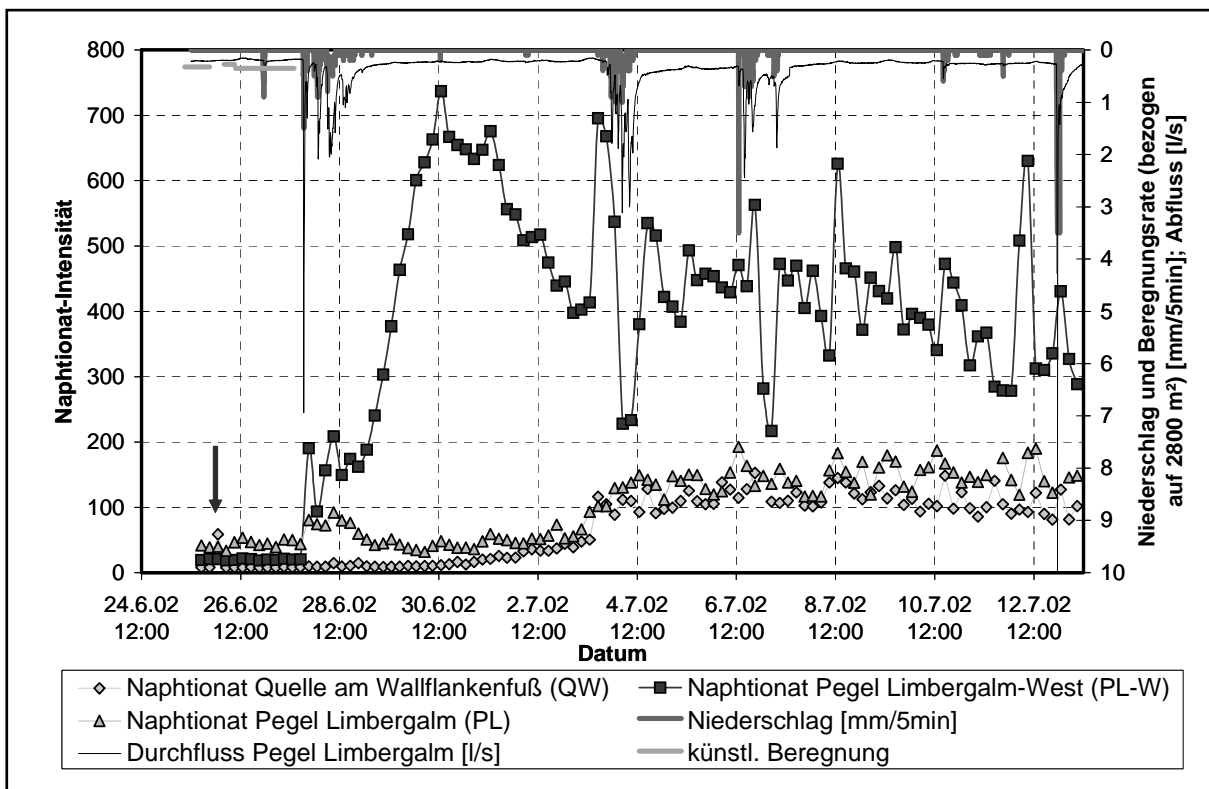


Abbildung 66: Niederschlagsverteilung und künstliche Beregnungsrate, Durchflussganglinie des Pegels Limbergalm während des Markierungsversuches mit dem Fluoreszenztracer Naphtionat am Schutthang sowie die dadurch hervorgerufenen Tracerdurchbrüche an verschiedenen Probenentnahmepunkten (schwarzer Pfeil markiert die Tracereinspeisung).

Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass der makroporige Hangschutt nur innerhalb des Einzugsgebietes des Pegels Limbergalm-West von Bedeutung für die schnelle Abflussdynamik ist. So setzt der Tracerdurchbruch dort bereits als direkte Folge des Niederschlagsereignisses mit hohen Tracerintensitäten ein und weist auf

eine schnelle und dynamische Zwischenabflusskomponente hin. Bereits nach wenigen Tagen werden maximale Konzentrationen des Tracers erreicht. Im Gegensatz dazu erfolgt der Tracerdurchbruch an der Wallflankenquelle (QW) und beim Pegel Limbergalm zeitlich verzögert und mit geringeren Tracerkonzentrationen. Eine ähnlich gedämpfte Reaktion ist auch beim Pegel Limbergalm-West festzustellen, allerdings mit höherer Tracerkonzentration. Dies unterstreicht aber die Hypothese, dass beide Pegel den oberen Hangschuttbereich zwar als gemeinsames Einzugsgebiet haben, aber deren Einfluss sich auf die Abflussdynamik am Pegel Limbergalm nur im Zuge tieferer und verzögerter Zwischenabflusskomponenten bemerkbar macht. Die Ursache ist vermutlich im Rutschwall zu sehen, der als Barriere für oberflächennahe Abflusskomponenten fungiert, so dass nur tiefgründige, verzögerte Hangabflusskomponenten, wofür das oberflächennah aufgelockerte Grundgebirge oder ein tiefer Zwischenabflussspeicher des Hangschuttes in Frage kommt, einen bedeutsamen Anteil am Gesamtdurchfluss des Pegels Limbergalm haben.

Auf Basis der Tracerdurchbrüche kann für den oberen Hangschuttspeicher ein k -Wert von etwa 10^{-3} m/s abgeschätzt werden, für den tieferen, verzögerten Abfluss generierenden Speicher ein k -Wert von etwa 10^{-4} m/s. Die Rohhumusauflage im Bereich der Heidevegetation und locker gelagerter, makroporiger Hangschutt sind somit Umsatzräume, die bedeutsam zur Hochwasserentstehung bereits während eines Niederschlagsereignisses beitragen können. Der Abflussbeiwert der N-A-Ereignisse variiert in Abhängigkeit von der Gebietsfeuchte und Ereignischarakteristik. Dieser Zusammenhang wurde auf Basis mehrjähriger Zeitreihen (Niederschlag und Abfluss) für das Löhnersbachgebiet und verschiedenen großen Teileinzugsgebieten untersucht.

7.2.7.3 Geophysikalische Untersuchungen

Seismische Untersuchungen

Um potenzielle unterirdische Fließwege zu identifizieren und um das Speichervolumen des Hanges sowie die maximale Wassermenge, die pro Zeiteinheit im Hang transportiert werden kann, abschätzen zu können, wurde im Sommer 2002 seitens des Institutes für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien refraktionsseismische Untersuchungen durchgeführt. Angesichts der zu erkundenden geringen Teufen wurden die notwendigen Druckwellen bis auf zwei Punkte, an denen Sprengkapseln eingesetzt wurden, durch Hammerschlag erzeugt. Insgesamt wurden 4 seismische Profile ausgeführt.

Das Längsprofil L (Abbildung 67) hatte 4 m Geophonabstand und folgte ungefähr dem Fallen des Hanges (KIRNBAUER ET AL. 2004).

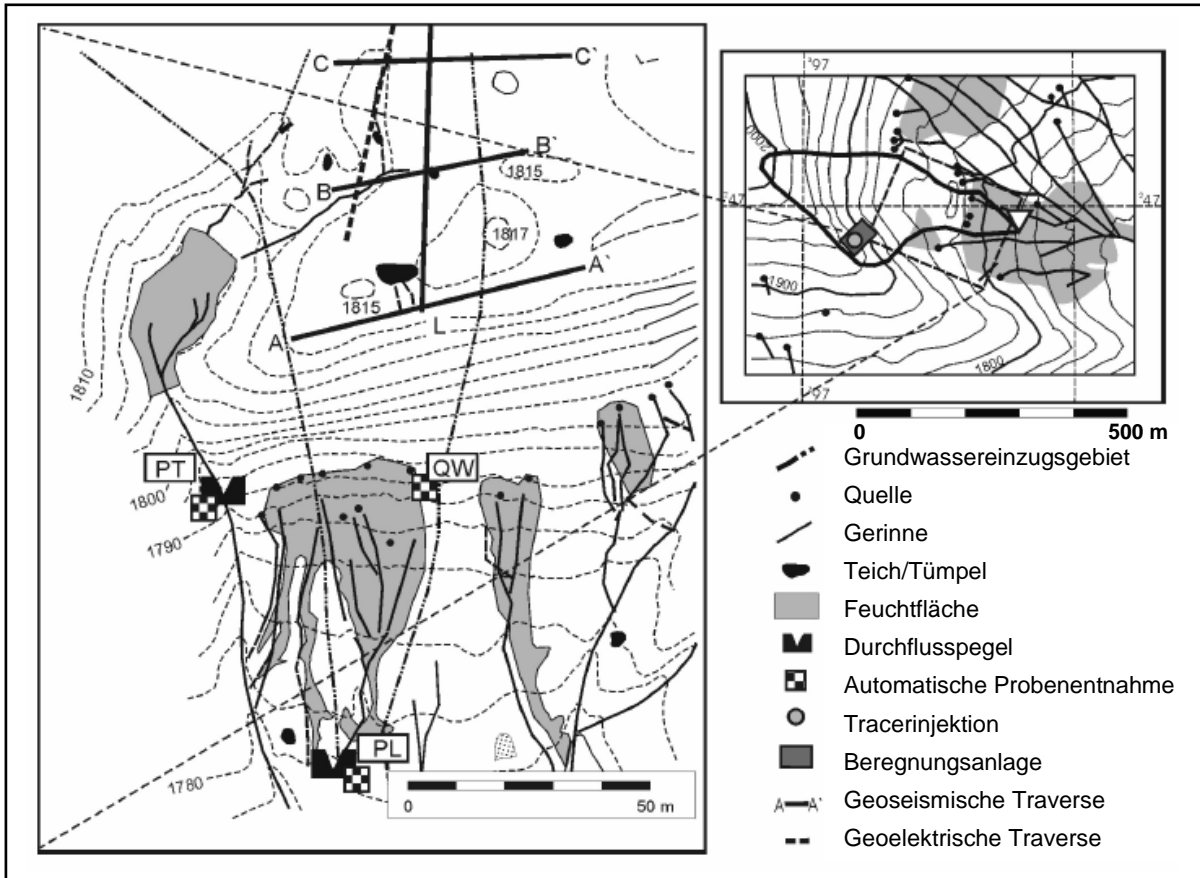


Abbildung 67: Hydrologisches Messnetz an der Feuchtfläche Limbergalm mit Lage der seismischen Traversen (TILCH ET AL. 2003; verändert).

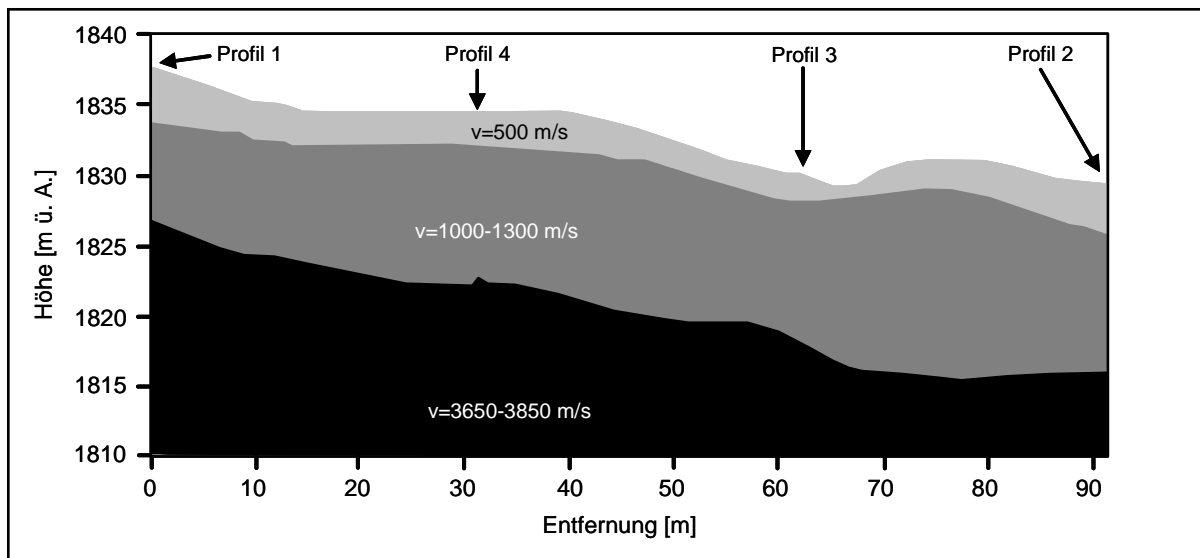


Abbildung 68: Geoseismisch ermitteltes Längsprofil (KIRNBAUER ET AL. 2004; verändert).

Die seismischen Untersuchungen zeigen, dass eine oberste sehr lockere Deckschicht mit einer Mächtigkeit von 1 m bis 3 m und einer seismischen Geschwindigkeit von 500 m/s vorliegt (Abbildung 68 und Abbildung 69). Vermutlich handelt es sich hierbei um schuttreichen, locker gelagerten Hangschutt. Darunter befinden sich Lockergestei-

ne mit einer signifikant höheren seismischen Druckwellengeschwindigkeit von 1000 m/s bis 1300 m/s, was auf schuttärmeren Hangschutt mit höherer Lagerungsdichte schließen lässt. Zusätzlich kann aus den gemessenen Wellengeschwindigkeiten gefolgert werden, dass diese Schicht weitgehend trocken war. Die Tiefenlage der Basis der Lockergesteinsauflage (inkl. aufgelockertes Festgestein) und somit der Festgesteinsoberfläche variiert zwischen 10 m und 15 m. Der Fels weist seismische Geschwindigkeiten von 3600 m/s bis 3900 m/s auf.

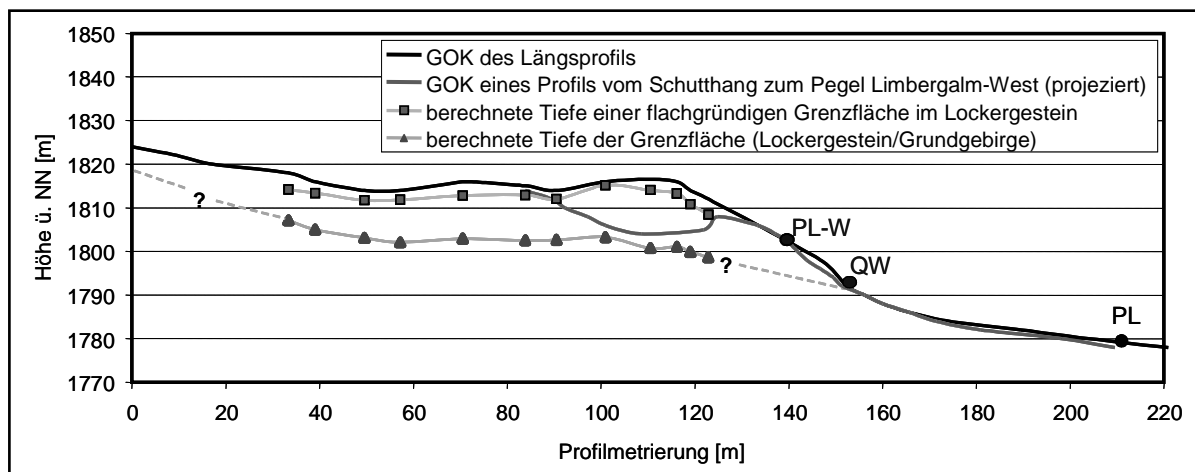


Abbildung 69: Ergebnisse der geoseismischen Untersuchungen im Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm entlang einer Längstraverse im Sommer 2002 und deren Extrapolation auf das Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm-West (TILCH ET AL. 2006a; verändert).

Geoelektrischen Untersuchungen

In Ergänzung zu den seismischen Untersuchungen wurden geoelektrischen Untersuchungen sowohl vom Institut für Hydrologie der Universität Freiburg im September 2003 (WENNINGER ET AL. 2004) als auch vom Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau der Universität für Bodenkultur (Wien) durchgeführt (KIRNBAUER ET AL. 2004, NACHTNEBEL ET AL. 2005).

WENNINGER ET AL. 2004 führten eine Messung entlang des gleichen Längsprofils wie bei der Seismik, wobei dieses Profil talwärts bis zum Pegel Limbergalm verlängert wurde. Zusätzlich wurden mehrere Querprofile entlang des Längsprofils gemessen (vgl. Abbildung 56 im Kap. 7.2.7.1). Die Untersuchungen wurden mit einem Syscal Junio Switch System (IRIS Instruments) mit 24 Elektroden und einem maximalen Elektrodenabstand von 3-5 m durchgeführt. Zur Anwendung kamen Werner- sowie Dipol-Dipol-Anordnungen. Um mit diesen Elektrodenabständen längere Profile messen zu können, wurden mit Hilfe eines „roll along“-Verfahrens die Messungen erweitert. Dieses Verfahren ermöglicht Messungen entlang eines längeren Profils mit mehreren 100 m. Die Invertierung der gemessenen Pseudosektionen der Widerstände wurde mit der Programm Res2Dinv (Geotomo Software) durchgeführt (WENNINGER ET AL. 2004, TILCH ET AL. 2006a).

Die Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen der Universität Freiburg zeigen einen breiten Wertebereich der elektrischen Widerstände auf, wobei sie zwischen einigen Ωm an der Feuchfläche und um einige Tausend Ωm auf dem Walltop des Rutschkörpers variieren (Abbildung 70). Deutlich wird auch die räumliche Heterogenität im Untergrund. Im Bereich des Walltops (Profil A-A') werden hochohmige Bereiche von

niedrigohmigen unterlagert. Die Tiefenlage der oberen Schicht mit Werten größer 8500 Ωm zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der seismischen Messungen. Mit Zunahme der Tiefe erfolgt eine Verringerung der Widerstände bis auf Werte unter 1000 Ωm . Die Interpretation, unter Berücksichtigung der seismischen Informationen, lässt hierbei eher auf eine Veränderung der Substrateigenschaften (Zunahme der Lagerungsdichte bei abnehmenden Schuttgehalten), als auf eine Zunahme der Wassergehalte schließen. Im Profil A-A' und in den Querprofilen B-B', C-C' und D-D' ist deutlich die laterale und vertikale Ausdehnung der Feuchtfläche zu erkennen. Einzelne trockenere Bereiche innerhalb der Feuchtfläche werden mit den geoelektrischen Messungen abgebildet und stimmen mit durchgeführten Kartierungen überein. Die niedrigohmigen Bereiche, die die Feuchtfläche unterlagern, deuten auf einen Grundwasserzustrom zur Feuchtfläche und deren Quellen hin.

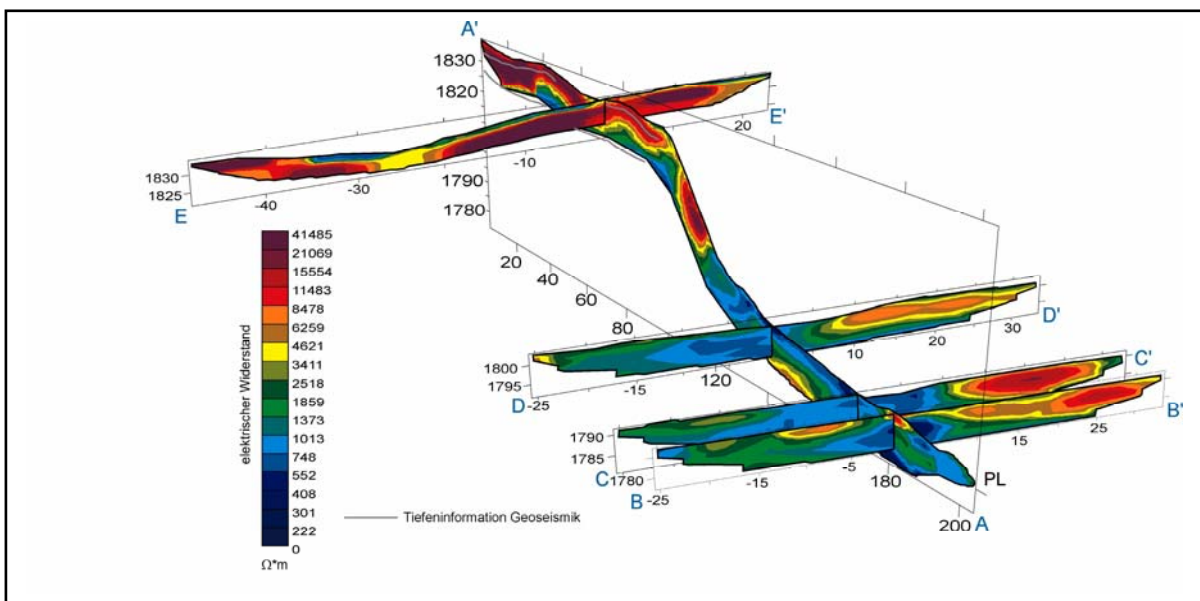


Abbildung 70: Verteilung der geoelektrischen Widerstände entlang der untersuchten Traversen (Wenneranordnung, 3 m-Auslage) sowie die per Geoseismik ermittelte Tiefenlage der Oberfläche des kompakten Kristallins entlang der Längstraverse (WENNINGER ET AL. 2004, TILCH ET AL. 2006a; verändert).

Ein bedeutender, Wasser führender und durchlässiger Bereich innerhalb der Lockergesteine konnte auf Basis der durchgeführten geophysikalischen Messungen nicht nachgewiesen werden. Vielmehr erscheint es plausibel, dass der im Einzugsgebiet generierte permanente Basisabfluss aller Quellen am Wallflankenfuß und somit auch dem Pegel Limbergalm entlang der geoseismischen Grenzfläche Lockergestein/Grundgebirge zugeführt wird. Dies äußert sich auch in den Höhenpositionen der Quellen des Hangflankenfußes, die entsprechend der nachgewiesenen Raumlage der Grenzfläche in ihrer Höhenlage variieren. Gleiches gilt auch für die Quellen im Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm-West. So sind dort die Quellen eines zum Pegel hin entwässernden Teiches in etwa diesem Grenzflächenbereich positioniert (Abbildung 69).

Die geoelektrischen Untersuchungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau der Universität für Bodenkultur (Wien) erfolgten annähernd entlang derselben Profile wie der seismischen Profile (siehe Abbildung 56 im

Kap. 7.2.7.1). Diese wurden einerseits durch die zu Versuchsbeginn herrschende Trockenheit, andererseits durch den sehr skelettreichen Oberboden des Untersuchungsbereiches erschwert: Es gelang nur schwer, ausreichenden Bodenkontakt der Sonden zu gewährleisten.

Den Widerstandsquerschnitten im unberechneten (Abbildung 71a) und im berechneten Zustand (Abbildung 71b) ist zu entnehmen, dass von der Oberfläche weg bis in eine Tiefe von etwas unter 10 m ein sehr hoher Widerstand auftritt, wie er nur bei ganz trockenen Schottern und Sanden oder in kompetenten Gesteinen anzutreffen ist. Aus der Seismik geht hervor, dass der kompakte Fels in etwas mehr als 10 m Tiefe liegt und von Hangschutt überlagert wird. Die Widerstands-Tiefenmodelle gehen leider nicht bis zur Felsoberkante. Im untersten Bereich gibt es niedrigere Widerstände. Wäre der Fels erreicht worden, wäre unterhalb der gelb-blauen Schicht wieder eine rote Schicht mit hohem Widerstand zu sehen.

Als Interpretation ergibt sich daher: Bei der Berechnung dringt das Wasser unmittelbar senkrecht ein (ein sehr kleiner Teil könnte auch an der Oberfläche fließen und dann erst in den Hangschutt eindringen). Das Wasser trifft auf den Stauer = Felsoberkante und fließt dann dort entlang der Felsoberkante der Schwerkraft folgend weiter. Dementsprechend ist in der linken unteren Ecke (blau) der Abbildung 71b ein kleiner Wasserstau zu beobachten. Da die Profile zu wenig tief reichen, kann man nicht das ganze eingebrachte Wasservolumen erkennen, sondern nur den kleineren oberen Teil. Man sieht, dass die Mächtigkeit der Zone mit hohem Widerstand im Laufe der Zeit ein wenig abnimmt.

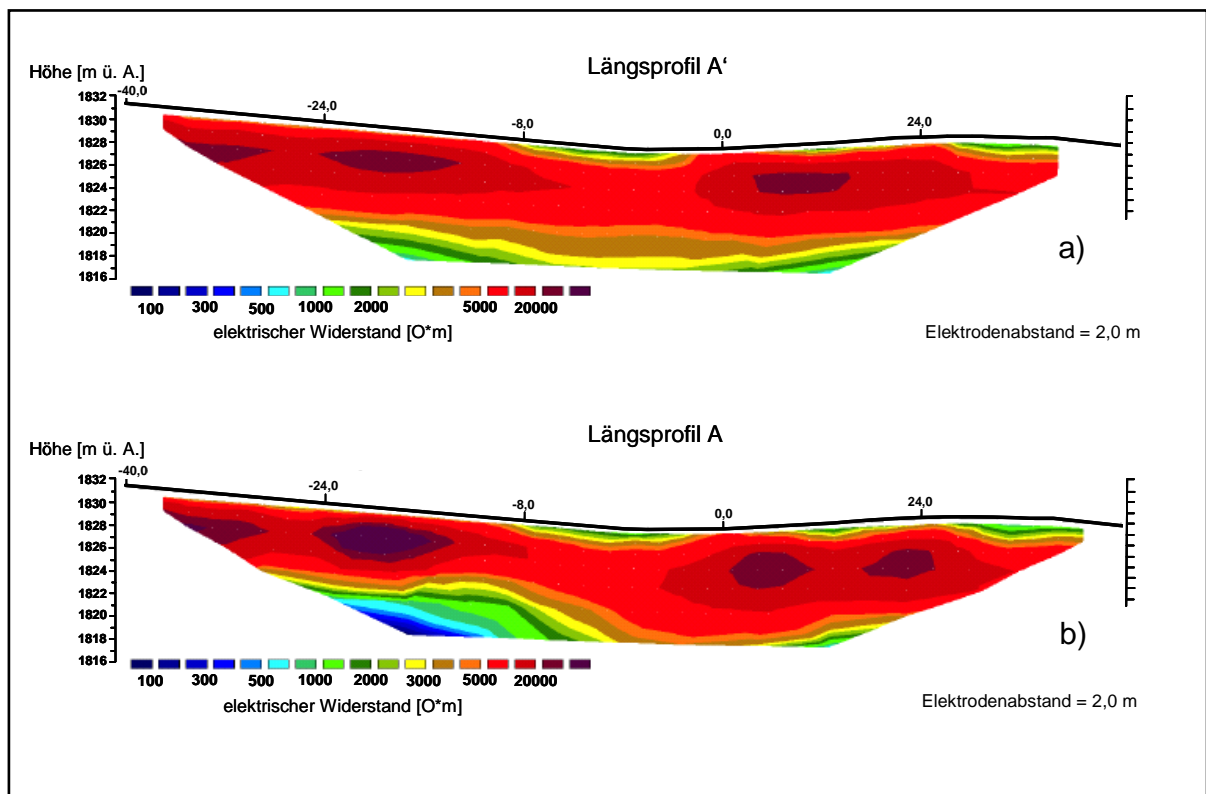


Abbildung 71: Ausgewählte Ergebnisse der Geoelektrik: Widerstandsprofil ungefähr dem Geoseismik-Längsprofil (siehe L in Abbildung 56) folgend. a) 25.6.2002 um 15:30 b) 28.6.2002 um 17:00. Interpretation im Text.

7.2.7.4 Ableitung aller wichtigen Umsatzräume und dominanter Abflussbildungsprozesse an der Feuchthfläche Limbergalm

Die Auswertung aller Ergebnisse der tracerhydrologischen und geophysikalischen Untersuchungen sowie der Berechnungsversuche ermöglicht es, ein Abflussbildungskonzept für das untersuchte mikroskalige Teileinzugsgebiet „Feuchthfläche Limbergalm“ zu entwerfen (Abbildung 72). Dieses Konzept berücksichtigt oberflächliche und unterirdische hochwasserrelevante Umsatzräume und Prozesse, die im Folgenden auf der Grundlage von KIRNBAUER ET AL. (2005), ZILLGENS ET AL. (2005) und TILCH ET AL. (2006a) kurz erläutert werden.

Im Zuge der für das Löhnernbachgebiet typischen schnellen Abflussreaktion der Ereignistypen *unimodal* und *bimodal* (Abflussereignisse ohne bzw. mit nachlaufender Welle) variieren die Anteile des Vorereigniswassers je nach Beschaffenheit (Anordnung und Anteil der verschiedenen Wasserumsatzräume) und Zustand (Gebietsfeuchte) des Einzugsgebietes. Bedeutsame Herkunfts- und Umsatzräume dieser schnellen Abflusskomponenten sind die Feuchthflächen (q_{SOF}) und die Rohhumusauflagen der Standorte mit Heidevegetation (q_{Humus}). Dies ergaben Ganglinienseparationen auf Basis des verweilzeitorientierten natürlichen Tracers Deuterium und des umsatzraumorientierten geogenen Tracers gelöste Kieselsäure für zwei mikroskalige Pegelinzugsgebiete.

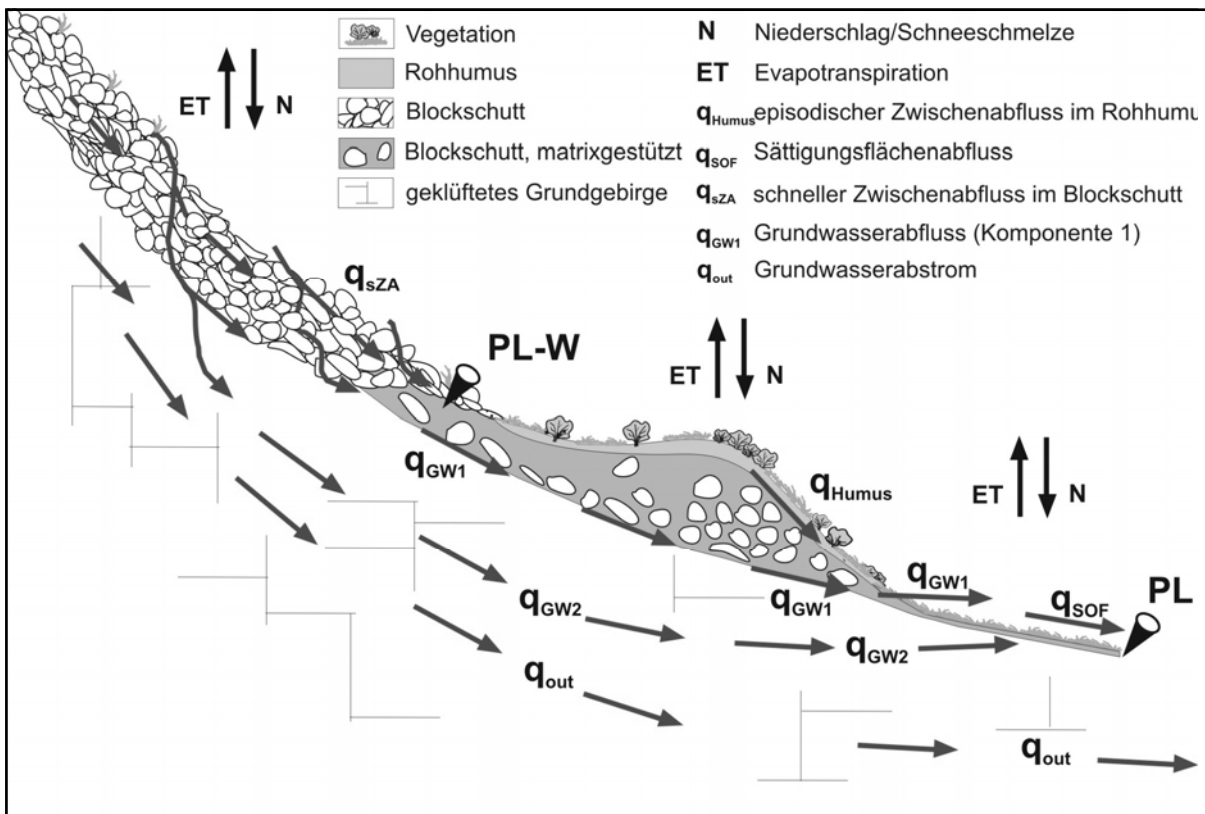


Abbildung 72: Schematisches Hangprofil mit allen wichtigen Umsatzräumen und dominanten Abflussbildungsprozessen (TILCH ET AL. 2006a; verändert).

Mit Hilfe eines Berechnungsversuches in Kombination mit einem Markierungsversuch (Naphtionat) konnte nachgewiesen werden, dass der weit verbreitete aufgelockerte Hangschutt ein schnell abflussgenerierender Umsatzraum ist (q_{sZA}). Dessen Beitrag am

Gesamtabfluss variiert erheblich, je nach Ankopplung des Hangschuttes an das Gerinnenetz und in Abhängigkeit von Gebietszustand und Ereignischarakteristik. Auf Grundlage eines weiteren kombinierten Beregnungs-Markierungsversuches (Natriumbromid) kann gezeigt werden, dass die Rohhumusauflage je nach Gebietszustand (Sättigungsgrad der Rohhumusauflage) und Ereignischarakteristik (Niederschlagskontinuität) bedeutsam zu sehr schnellen Gebietsreaktionen beitragen kann. Dies erklärt auch, warum im Einzugsgebiet des Pegels Limberalm im Fall des Ereignistypes *unimodal* episodisch, während hinreichender Niederschlagsdauer und Niederschlagsintensität, sehr große Abflussvolumina generiert werden können. Nur in jenen Gebieten, in denen Rohhumusauflagen weit verbreitet sind, kann somit dieser flach gründige Umsatzraum bedeutsam episodisch zur Hochwasserentstehung beitragen. So hat dieser Umsatzraum im Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm-West keine Bedeutung, der Einfluss des makroporigen Hangschuttes ist jedoch umso bedeutender.

Für die verzögerte Abflussreaktion des Ereignistyps *bimodal* (Abflussereignisse mit nachlaufender Hochwasserwelle) konnte mit Hilfe der Tracer Deuterium und gelöster Kieselsäure festgestellt werden, dass der generierte Abfluss ausschließlich aus Vorerigniswasser besteht. Deren Herkunfts- und Umsatzraum ist vermutlich das aufgelockerte Grundgebirge und der tiefere quartäre Hangschutt (q_{GW1} und q_{GW2}).

Die unterirdischen Fließsysteme sowie die Ankopplung der Feuchtfläche Limbergalm an das Grundwasser konnte durch die geophysikalischen Untersuchungen sehr gut identifiziert werden. Drei lithologisch unterschiedliche Räume wurden nachgewiesen, die wie folgt angeordnet sind: Im Hangenden a) lockerer Hangschutt (inklusive Boden), darunter b) dicht gelagerter Hangschutt und aufgelockertes Grundgebirge, im Liegenden c) kompaktes Grundgebirge.

7.2.8 Abflussprozessanalyse an den Feuchtflächen Herzogalm und Neuhausengraben

7.2.8.1 Analyse von einzelnen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen

Die Abbildung 73 zeigt die unterschiedlichen Abflussreaktionen des ca. 1 km² großen Neuhausengrabens im Vergleich zu der ca. 2850 m² großen Feuchtfläche im Bereich der Herzogalm. Der Neuhausengraben springt als Folge der Niederschläge in der Nacht zum 15. August 1992 nur zögernd an, der Wasserstand am Messwehr Herzogalm hingegen steigt nahezu schlagartig. Dieses unterschiedliche Verhalten lässt sich dahingehend interpretieren, dass im größeren Einzugsgebiet des Neuhausengrabens der Abfluss auf Flächen entsteht, die zum Vorfluter unterschiedliche Laufzeiten haben. Die Feuchtfläche, die zum Messwehr Herzogalm entwässert, liefert - auf derselben Zeitmaßstabsebene betrachtet - den Abfluss sofort. Die Analyse weiterer Niederschlag-Abfluss-Ereignisse sowie erste Abflussabschätzungen zeigen, dass von der Feuchtfläche ein wesentlich höherer Prozentsatz des Niederschlages binnen kürzester Zeit zum Abfluss kommt, als dies am Neuhausengraben der Fall ist. Daraus lässt sich die Arbeitshypothese ableiten, dass größere Feuchtflächen, die an das Gerinnenetz angeschlossen sind, als potentielle Entstehungsgebiete von Hochwässern angesehen werden können.

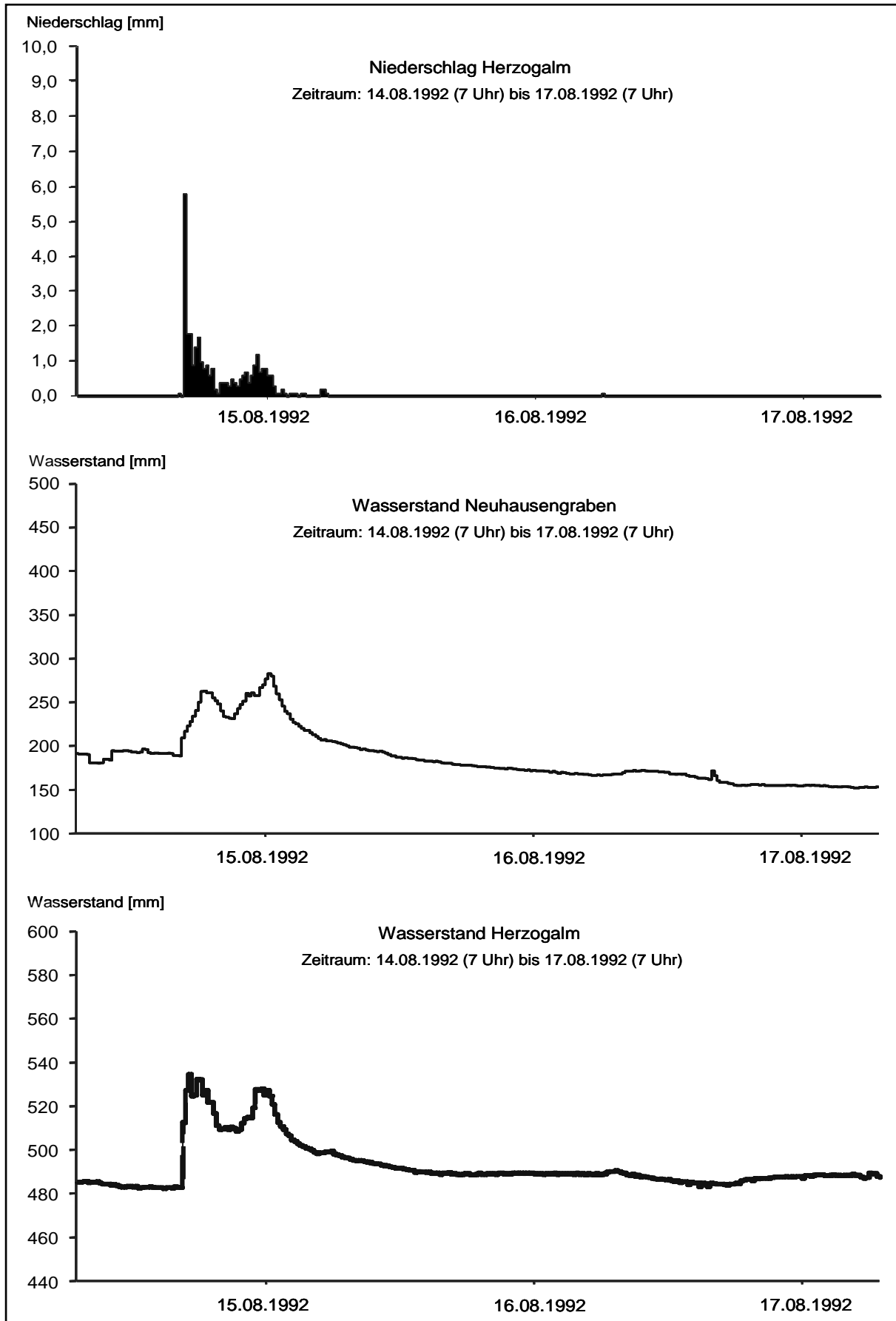


Abbildung 73: Ganglinien zu Niederschlag (Herzogalm), Wasserstand am Messwehr Neuhausengraben und am Messwehr Herzogalm.

Ein detaillierter Einblick in das Abflussgeschehen auf der Feuchtfläche Herzogalm ist an Hand von Ereignisauswertungen von Niederschlag und Abfluss möglich. Abbildung 74 zeigt zwei aufeinander folgende Niederschlag-Abfluss-Ereignisse im Oktober 1992. Beide Ereignisse hatten eine Niederschlagssumme von je rund 10 mm. Die Abflussreaktionen hingegen weichen stark voneinander ab: Der Spitzenabfluss des zweiten Ereignisses ist dreimal so groß wie der des ersten, und der Abflussbeiwert erweist sich als doppelt so groß (Abbildung 75 und Abbildung 76). Das wesentlichste Unterscheidungsmerkmal der beiden Ereignisse ist der zu Beginn des Regens beobachtete Abfluss: Er ist beim zweiten um 50 % höher. Daraus lässt sich schließen, dass auch auf der Feuchtfläche eine höhere Vorbefeuchtung verschärfend für den Abfluss wirkt.

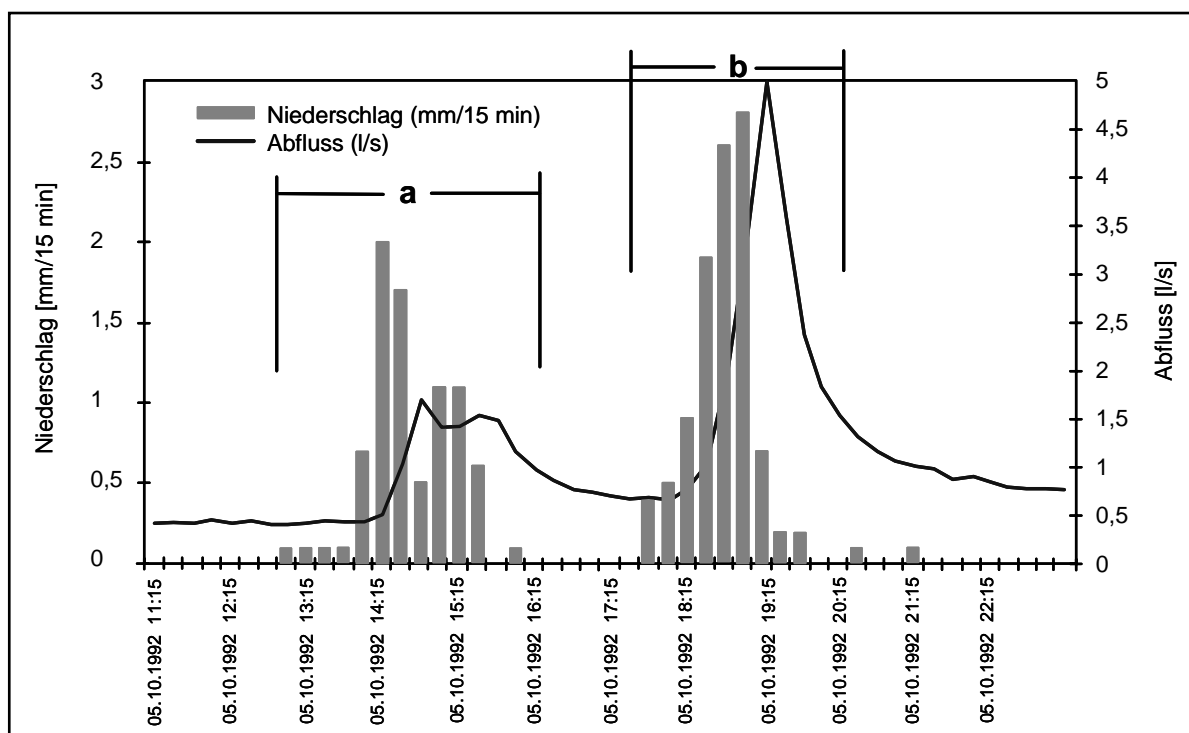


Abbildung 74: Zwei Niederschlag-Abfluss-Ereignisse am Messwehr Herzogalm.

Die Abbildung 75 und Abbildung 76 unterstützen diese Hypothese: Generell liegen die Abflussbeiwerte bzw. Abflusshöhen bei Ereignissen mit größerem Anfangsabfluss (Q -Anfang) deutlich höher als bei jenen mit kleinem. Die Unterschiede bei den Abflusshöhen sind allerdings nicht sehr ausgeprägt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse für das Abflussverhalten unterschiedlicher Böden. Auch die Modellrechnung ergibt für Gleyböden, wie sie an der Feuchtfläche vorliegen, geringere Unterschiede zwischen Ereignis-Abflusshöhen bei hoher bzw. geringer Vorbefeuchtung, als sie bei durchlässigen Böden auftreten (vgl. Kap. 7.3.1.4.3) (KIRNBAUER ET AL. 1994).

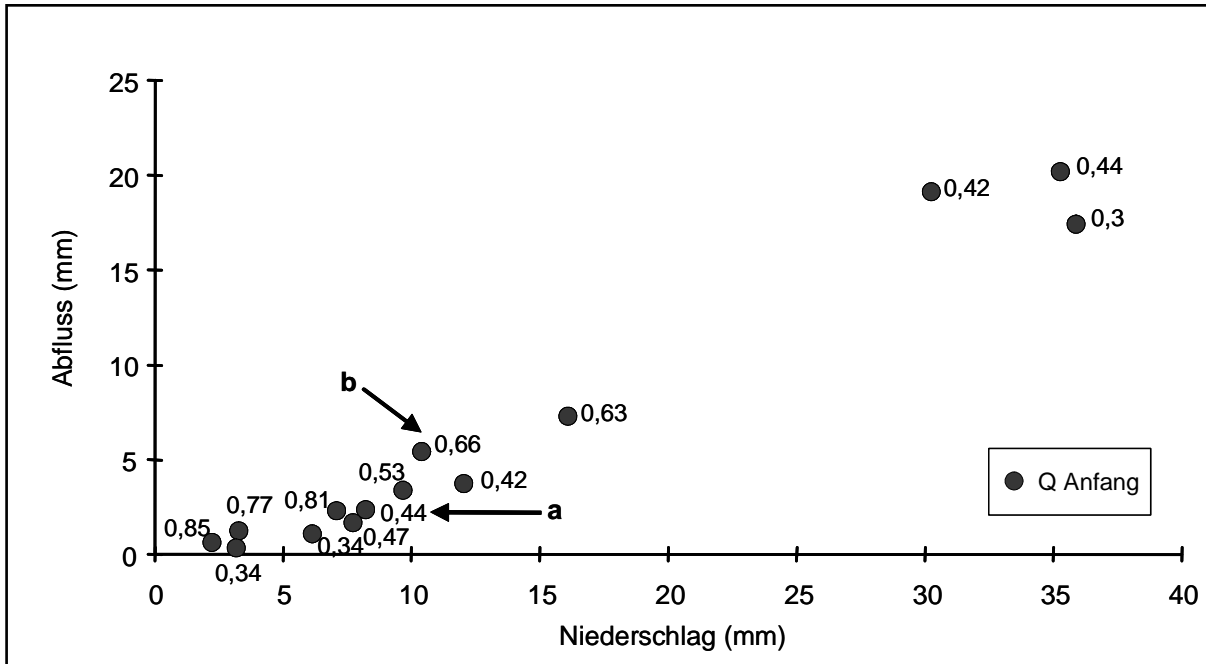


Abbildung 75: Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Abflusshöhen am Messwehr Herzogalm.

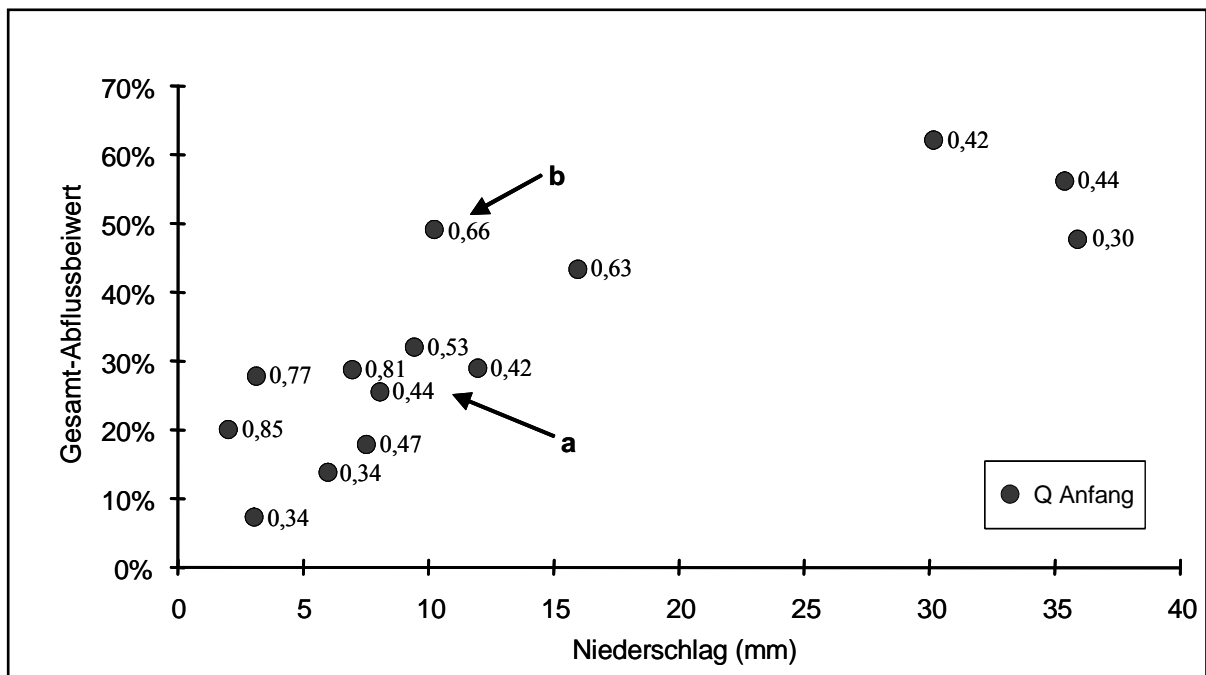


Abbildung 76: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abflussbeiwert am Messwehr Herzogalm.

7.2.8.2 Ereignisauswertung an der Feuchtfläche Herzogalm

Bei der Feuchtfläche Herzogalm überlagern sich offensichtlich zwei unterschiedliche Phänomene. Einerseits reagieren die Abflüsse erwartungsgemäß sehr schnell und direkt auf den Niederschlag. Diese Charakteristik entsteht durch den sehr hohen Anteil an Direktabfluss von dieser nahezu ständig gesättigten Fläche und war 1992 ebenso wie 1993 zu beobachten. Andererseits zeigt der Basisabfluss der Feuchtfläche hingegen ein sehr unterschiedliches Verhalten, das sich folgendermaßen erklären lässt:

Der Abfluss aus oberhalb liegenden Quellen fließt über ein kleines Gerinne in die Feuchtfläche. Ein Teil dieses Wassers unterliegt der witterungsabhängigen Evapotranspiration. Der Rest bildet den am Messwehr der Feuchtfläche beobachtbaren Basisabfluss. Da Quellen aus unterirdischen Speichern gespeist werden, die ihrerseits eher träge auf Niederschlagsereignisse reagieren, zeigt dieser Basisabfluss einen ähnlichen Gang wie der Basisabfluss des Löhnersbaches. Die häufigen und ergiebigen Regenfälle im Juli 1993 führten daher zu einem Auffüllen dieser Speicher und damit zur Erhöhung der Quellschüttungen. Sowohl am Messwehr Herzogalm als auch am Löhnersbach ist deutlich zu erkennen, dass bereits der geschlossene Niederschlagsblock vom 26. - 28. Juni eine gewisse Anhebung des Basisabflusses bewirkt. Derselbe Effekt lässt sich in der Zeit vom 11. bis 22. Juli und dann nochmals am 28. Juli beobachten.

Die Abflüsse des Löhnersbaches entstehen bis zum etwa einjährigen Hochwasser im Wesentlichen auf den Feuchtflächen und im unmittelbaren Nahbereich der Gewässer. Diese Aussage ergibt sich aus folgenden Beobachtungen:

Alle untersuchten Bäche zeigen während Niederschlagsereignissen praktisch dieselbe Dynamik der Abflussentstehung wie der Abfluss von der Feuchtfläche Herzogalm. Der Abfluss von der Feuchtfläche Herzogalm ist ein ausgezeichneter Indexparameter zur quantitativen Abschätzung des Abflusses im Löhnersbach. Rechnet man den Abfluss von der Feuchtfläche Herzogalm mit dem Abflussbeiwert des jeweiligen Ereignisses auf alle Feuchtflächen des Löhnersbachgebietes hoch, so ergeben sich für die ausgewerteten Ereignisse rechnerische Abflussfrachten für den Löhnersbach, die straff mit den dort beobachteten Frachten korreliert sind (bei einem Scaling-Faktor von mehr als 5000). Die rechnerischen Frachten sind aber konsistent um einige Prozent größer als die beobachteten (Abbildung 77).

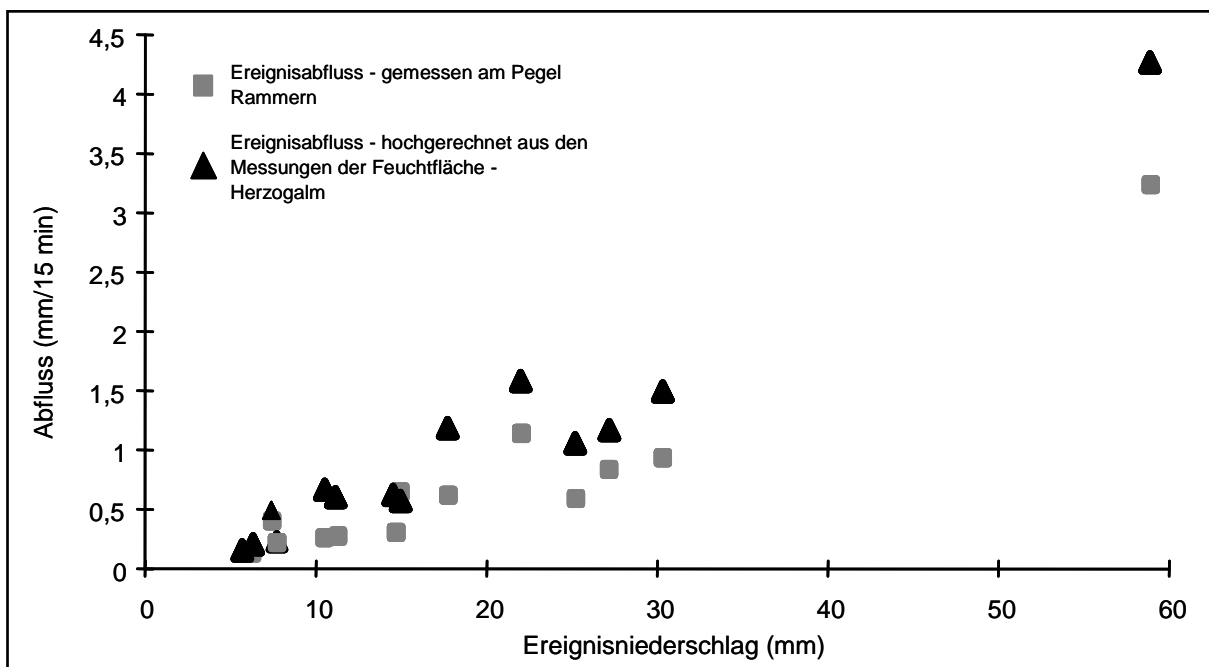


Abbildung 77: Vergleich der für einzelne Ereignisse aus den Feuchtflächen berechneten und am Pegel Rammern gemessenen Gebietsabflüsse.

Die plausibelste Erklärung für diese systematische Überschätzung des Gebietsabflusses ist wohl die Annahme, dass es im Einzugsgebiet Feuchtflächen gibt, die weniger

intensiv auf Niederschläge reagieren, als jene bei der Herzogalm. Die unterschiedlichen Reaktionsweisen von verschiedenen Feuchtflächen auf Niederschlagsereignissen wird in Kapitel 7.2.9 eingehend diskutiert. Eine systematische Überschätzung der Größe der Feuchtflächen ist angesichts der sehr sorgfältig durchgeführten hydrogeologischen Kartierung und der relativ leichten Identifizierbarkeit solcher Flächen im Gelände praktisch auszuschließen. Im Gegensatz dazu würden andere, zufällige Einflüsse, wie z.B. eine unterschiedliche Überregnung des Gebietes, bei der Hochrechnung der Feuchtflächenabflüsse nicht zu systematischen, sondern lediglich zu zufälligen Fehlern führen. Zu den ausgewählten Ereignissen muss noch angemerkt werden, dass die Bandbreite der Ereignisdauer von 30 Minuten bis zu 50 Stunden reicht und die Niederschlagsintensitäten innerhalb der Ereignisse von 0,9 bis 16 mm pro Viertelstunde reichen.

Der Feuchtflächenabfluss zeigt zudem eine deutliche, ereignisabhängige Dynamik. Bei zunehmender Vorbefeuchtung und zunehmender Niederschlagsmenge nimmt der Abflussbeiwert im Bereich zwischen 0,3 und 0,9 deutlich zu (Abbildung 78). Diese Erkenntnis ist geeignet, eine weit verbreitete hydrologische Modellvorstellung zu berichtigen, wonach der auf Feuchtflächen fallende Niederschlag in jedem Fall zur Gänze abfließt (Abflussbeiwert konstant gleich eins).

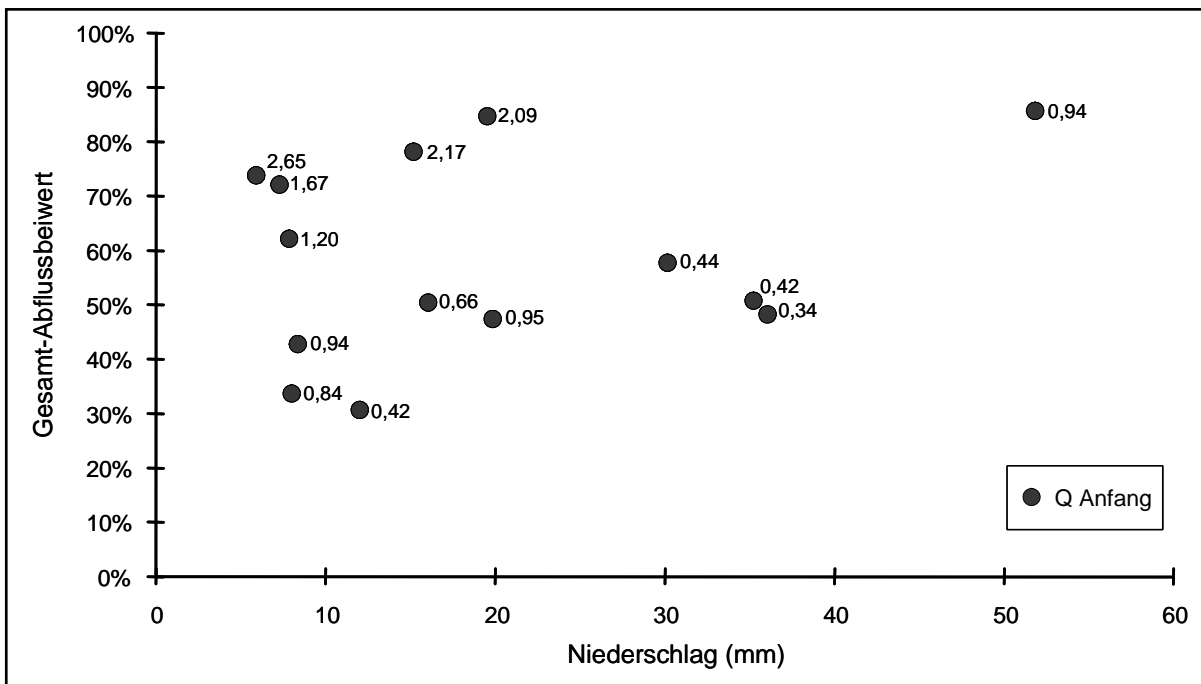


Abbildung 78: Ereignisabhängige Dynamik der Abflussbeiwerte auf der Feuchtfläche Herzogalm.

7.2.9 Unterschiede in der Charakteristik des Abflussverhaltens auf den Feuchtflächen „Limbergalm“ und „Klingleralm“

Die Abbildung 79 zeigt die Niederschlags- und Abflussdaten, die während drei unmittelbar aufeinander folgender Ereignisse am 2. August 1996 an den Messstellen Limbergalm und Klingleralm aufgezeichnet wurden.

An diesen drei Ereignissen zeigt sich sehr deutlich die außerordentliche Heterogenität des Niederschlages im Einzugsbereich des Löhnersbaches. Trotz der geringen Distanz

von ca. 4 km zwischen den beiden Messstellen, wurden in vergleichbaren Zeitabschnitten Niederschlagshöhen aufgezeichnet, die sich um einen Faktor von 2,5 unterscheiden.

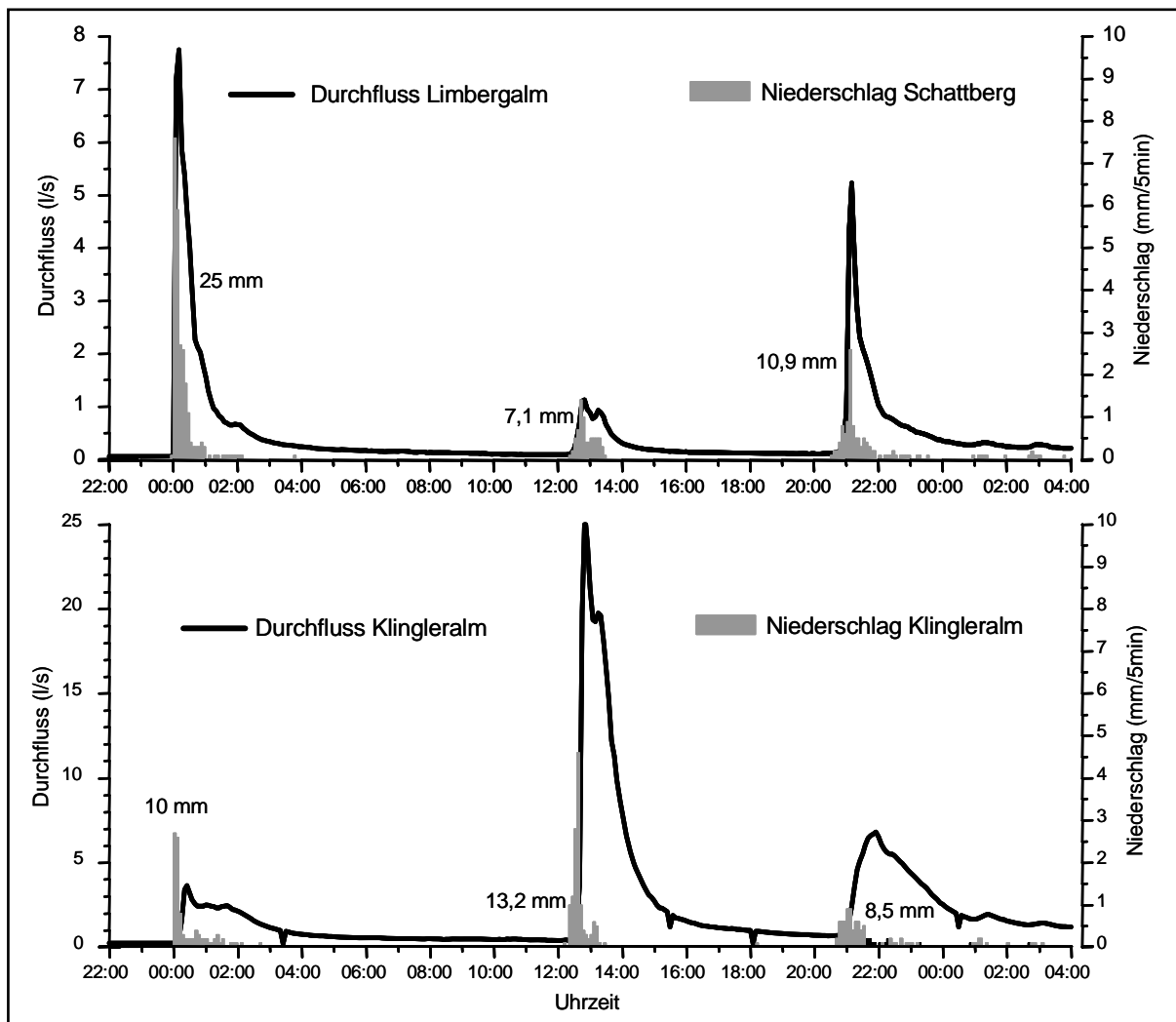


Abbildung 79: Unterschiede in der Charakteristik des Abflussverhaltens bei den Feuchtflächen „Limbergalm“ und „Klingleralm“ während der Niederschlagsereignisse am 02. August 1996.

Die stark unterschiedliche Reaktion des Abflusses auf den Niederschlag ist anhand von zwei Details sehr gut zu sehen:

- a) Die Verzögerungszeit vom Beginn des Niederschlags bis zum Ansteigen des Abflusses ist an der Limbergalm wesentlich kürzer als an der Klingleralm. Beim ersten Ereignis reagiert der Abfluss auf der Feuchtfläche Limbergalm nahezu unverzögert auf den Niederschlag, während bei der Feuchtfläche Klingleralm eine Verzögerung von ca. 30 Minuten zu sehen ist. Beim zweiten und dritten Ereignis erhöht sich diese Verzögerungszeit bei der Messstelle Klingleralm sogar auf ca. eine Stunde.
- b) Der zweite wesentliche Unterschied in der Reaktion des Abflusses wird an der Form der Abflussganglinie deutlich. Besonders beim dritten Ereignis sind mit annähernd gleich großen Niederschlagshöhen an der Messstelle Limbergalm im Vergleich zur Klingleralm ein wesentlich steilerer Anstieg und eine sehr schmale Form der Abflussganglinie zu beobachten.

Dieses unterschiedliche Abflussverhalten kann auf die unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten auf den beiden Feuchtflächen Limbergalm und Klingleralm zurückgeführt werden: Das größere Gefälle und die flachgründigen Böden auf der Limbergalm bewirken die raschere Abflussreaktion des Direktabflusses im Vergleich zur Klingleralm; Dort hat die flache Topographie in Verbindung mit der auf tiefgründigem Moorboden wachsenden Vegetation eine starke verzögernde Wirkung auf den Abfluss.

7.2.10 Skalenübergreifende Analyse von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen (Limbergalm – Löhnersbach – Viehhofen)

Die experimentelle Analyse einzelner Niederschlag-Abflussereignisse hat gezeigt, dass es möglich ist, auf Basis von Abflussinformationen aus Teilflächen (z.B. Limbergalm) Abflüsse für den Löhnersbach vorherzusagen bzw. abschätzen zu können (vgl. Kap. 7.2.5). Es wurde daher von ZILLGENS ET AL. (2007a) untersucht, ob diese Aussagen auch auf die nächst höhere Skala, dem gesamten Einzugsgebiet der Saalach, bezogen auf den Pegel Viehhofen (150 km²) übertragbar sind. Und ob auch in dieser Skala das Abflussgeschehen noch von der Abflussdynamik der Feuchtflächen beeinflusst wird. Das gesamte Gebiet der Saalach gehört im Wesentlichen derselben geologischen Formation an wie der Löhnersbach, und auch die Flächennutzung ist mehr oder weniger praktisch identisch, sieht man von den verschwindend kleinen Anteilen an Siedlungsgebieten (Saalbach und Hinterglemm) im Saalachtal ab. Daher liegt die Hypothese nahe, dass auch das hydrologische Regime von Löhnersbach und Saalach ähnlich sein sollte. Diese Hypothese wurde an Hand von Ereignisanalysen der in Kapitel 7.2.4.4 (Abbildung 44) dargestellten Ereignistypen „Landregen“ (bimodale Ereignisse) und „Sommergewitter“ (unimodale Ereignisse) geprüft. Abbildung 80 zeigt eine Gegenüberstellung der Abflussreaktionen auf den Maßstabsebenen 0,07 km² (Limbergalm), 16 km² (Pegel Rammern) und 150 km² (Pegel Viehhofen/Saalach).

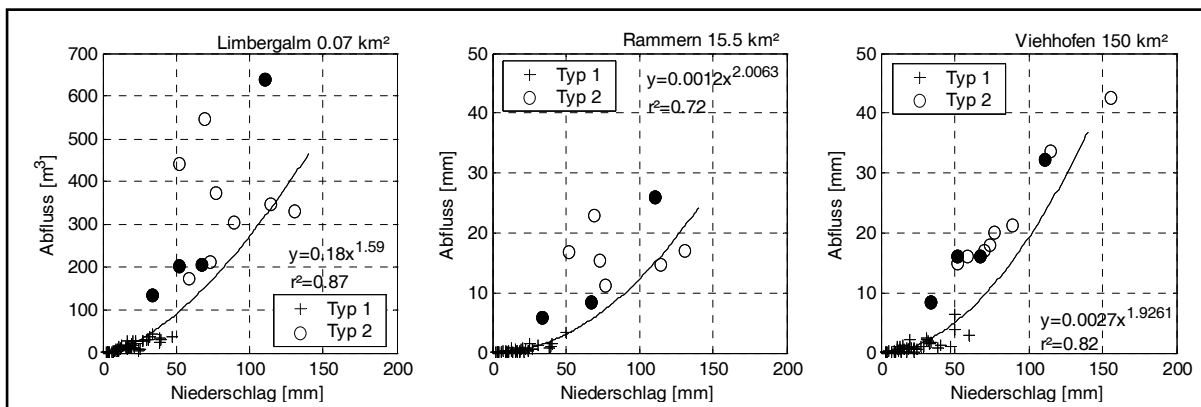


Abbildung 80: Abflussbildung von unterschiedlichen Ereignistypen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen. Ereignisse vom Typ „Sommerregen“ (Signatur: Kreuz) haben kleine Abflussbeiwerte, solche vom Typ „Landregen“, die auf der Limbergalm eine nachlaufende Welle erzeugen (Signatur: Kreis), ergeben deutlich größere Abflussbeiwerte (ZILLGENS ET AL. 2007a; verändert).

Die Abflussfracht wird jeweils gegen die Niederschlagssumme der Ereignisse aufgetragen. Die mit einem Kreuz bezeichneten Ereignisse sind solche vom Typ „Sommergewitter“ (unimodal), jene mit einem Kreis waren Ereignisse vom Typ „Landregen“ (bimodal), bei denen an der Messstelle Limbergalm eine nachlaufende Welle erkenn-

bar war. Die Analyse zeigt: Sommergewitter gehen auf allen Maßstabsebenen einher mit geringeren Ereignisniederschlägen, die auch mit einem kleineren Abflussbeiwert in Abflüsse umgesetzt werden (die Neigung der grauen Linien in Abbildung 80 kann als Abflussbeiwert interpretiert werden). Ereignisse mit nachlaufender Welle auf der Limbergalm haben signifikant größere Abflussbeiwerte auf allen Maßstabsebenen.

Trägt man den Anfangsabfluss sowohl gegen die Regenintensität als auch gegen die Niederschlagssumme bei beiden Ereignistypen auf, so kann wie bereits bei Abbildung 80 gezeigt werden, dass in allen Skalen ein ähnliches Verteilungsmuster vorliegt (Abbildung 81). Ebenfalls wird deutlich, dass die Verteilung mehr oder weniger zweigeteilt ist, die Ursache hierfür liegt an den beiden unterschiedlichen Ereignistypen. Eine Ausnahme stellt das unimodale Ereignis dar, das am Pegel Viehhofen mit mehr als 50 mm Niederschlagshöhe sowie einem Anfangsabfluss von mehr als 12,5 m³/s registriert wurde und sozusagen als Ausreißer interpretiert werden könnte. Bei diesem Ereignis handelt es sich um ein Hochwasser, das sich im August 2002 ereignete (ZILLGENS ET AL. 2007a).

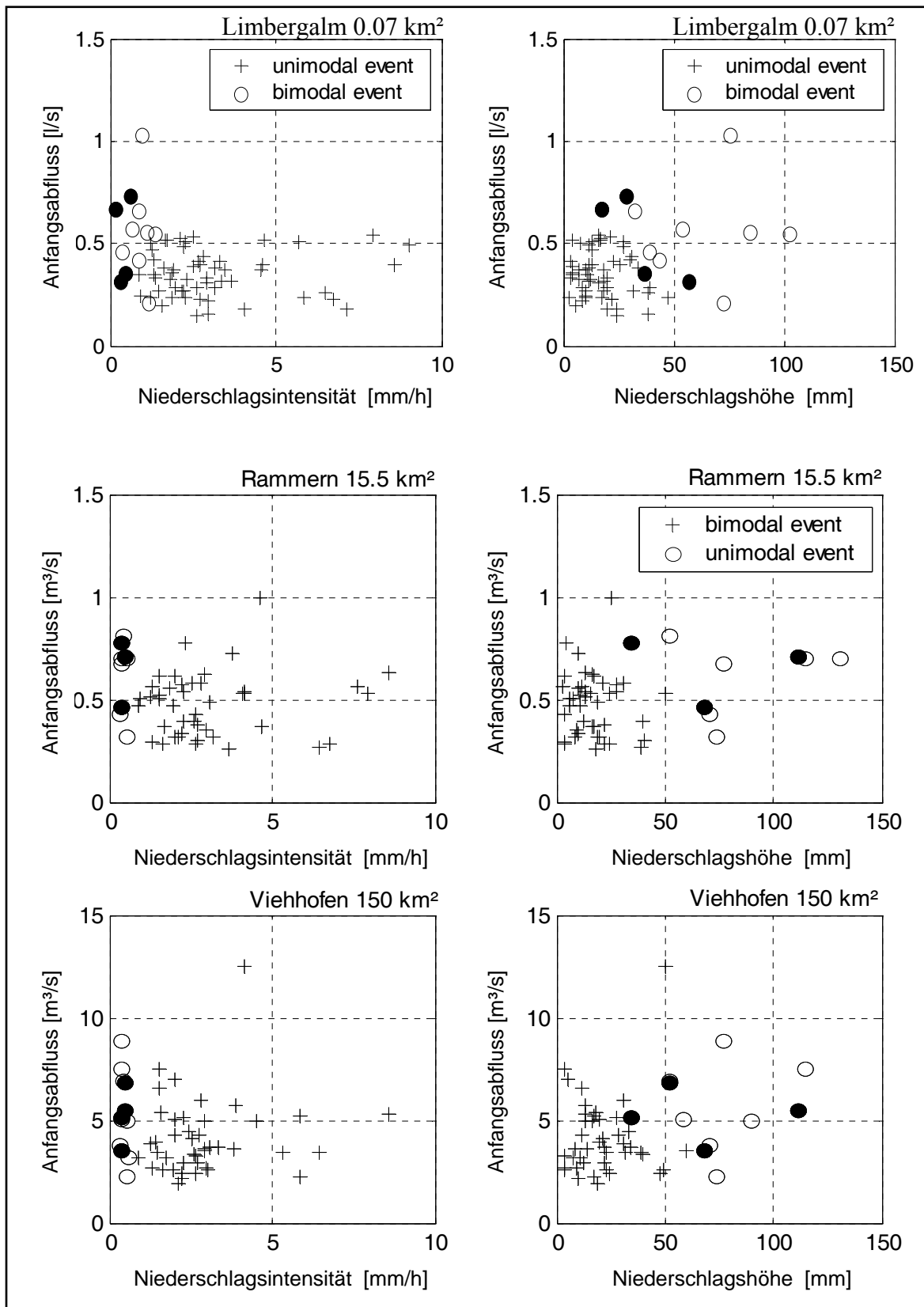


Abbildung 81: Auftreten der Ereignistypen Typ unimodal: „Sommergewitter“ und Typ bimodal: „Landregen mit nachlaufender Welle“ in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität und –höhe bezogen auf den Basisabfluss zu Beginn des Ereignisses (Anfangsabfluss) für die Pegel Limbergalm (oben), Rammern und Viehhofen (unten). Dabei enthält der Gesamtabfluss beim bimodalen Ereignis das Abflussvolumen von beiden Ereignissen (inkl. nachlaufender Welle). Die gefüllten Kreise kennzeichnen bimodale Ereignisse, deren Niederschlagshöhe aufgrund Fehler in den Basisdaten unterschätzt wurden (ZILLGENS ET AL. 2007a; verändert).

Zur Charakterisierung des Abklingverhaltens der Hydrographen am Pegel Rammern und am Pegel Viehhofen ermittelten ZILLGENS ET AL. (2007a) von all jenen Ereignissen, die synchron zu den Ereignissen am Pegel Limbergalm stattgefunden haben, die Rückgangskoeffizienten. Dabei wurden die Abflusswerte der Rezessionsäste ausgehend von der vereinfachten Annahme einer linearen Abflussreaktion gegen die Zeit als eine semilogarithmische Funktion aufgetragen (PILGRIM & CORDERY 1993). Ist das Verhalten der semilogarithmischen Funktion linear, dann entspricht K_r' der inversen Steigung mit Werten zwischen 0 und 1. Die ermittelten Rückgangskoeffizienten zeigen deutlich (Abbildung 82), dass sich die Rezessionsäste der zwei Ereignistypen auf beiden Raumskalen signifikant voneinander unterscheiden. Die Rezessionsäste der Ereignisse zum Zeitpunkt der nachlaufenden Welle (Typ 2) sind gekennzeichnet durch K_r' -Werte größer 0,8, d.h. diese Abflussereignisse laufen langsamer aus, sind aber sehr einheitlich, wie die geringe Varianz zeigt. Ereignisse mit einfacher Abflussreaktion, z.B. Sommergewitter, zeigen K_r' -Werte deutlich kleiner als 0,8 und eine größere Varianz, d.h. Rückgangskurven dieser Abflussereignisse können sehr unterschiedlich steil sein. Dies kann als Folge der bei diesem Ereignistyp üblichen heterogenen Überregnung interpretiert werden. Durch Ortsverlagerungen des Gewitters kommt es zu zeitlich unterschiedlichen Überlagerungen von Zubringerwellen, die somit ein langsames Abklingen der Welle am Vorfluter hervorrufen.

Diese skalenübergreifenden Untersuchungen zeigen, dass die Abflussereignisse an den Pegeln Rammern und Viehhofen die gleiche Ereignisabhängigkeit wie die Abflussereignisse am Pegel Limbergalm und somit die Prozesse auf der kleinsten Skale Indikatorfunktion für die größeren Skalen haben.

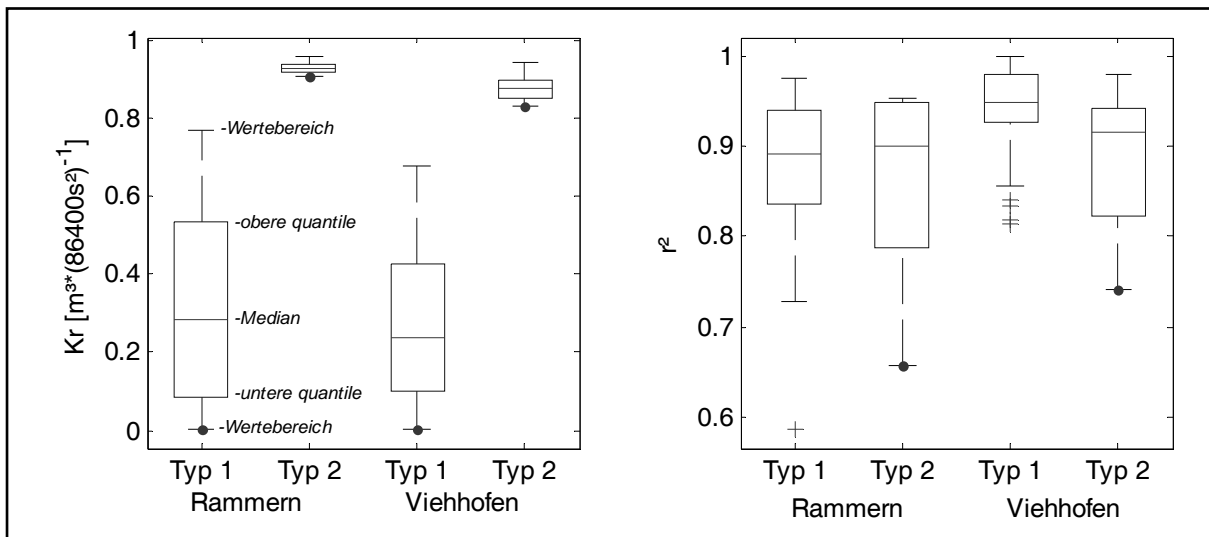


Abbildung 82: Boxplots der Rückgangskoeffizienten (K_r') (links) und Güte der Anpassungen (r^2 , rechts) der Abflussereignisse am Pegel Rammern und am Pegel Viehhofen mit Typ 1: „Sommergewitter“ (unimodal), Typ 2: „Landregen“, die am Pegel Limbergalm eine nachlaufende Welle erzeugen (bimodal). (mit t = Zeit [Tag (86400s)], q_t = Abfluss [m^3/s], q_0 = Abfluss zu Beginn des Ereignisses [m^3/s], K_{rt} = Rückgangskoeffizient [$m^3 \cdot (86400s^2)^{-1}$]). Zur Ermittlung von K_r' werden die $\log(q)$ Werte an eine Gerade angepasst mit den Koeffizienten a [$m^3 \cdot (s \cdot 86400s)^{-1}$] und b [m^3/s], wonach sich K_r' aus der Beziehung $K_r' = \exp(a)$ ergibt (ZILLGENS ET AL. 2005).

Zusammenfassung

Die statistischen Auswertungen von zahlreichen einzelnen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen zeigen, dass ein sehr guter Zusammenhang zwischen den Abflussreaktionen in den einzelnen Skalen, von Limbergalm bis Viehhofen, besteht. Tritt z.B. am Pegel Limbergalm ein bimodales Abflussereignis auf, so macht sich dies am Pegel Rammern zum einen durch ein höheres Abflussvolumen und zum anderen durch einen größeren Rückgangskoeffizienten bei dem entsprechenden Ereignis bemerkbar. Im Gegensatz zu den unimodalen Ereignissen weisen sie aber eine geringere Variabilität auf. Dieser Umstand, dass sich zwei in der Mikroskala identifizierbaren Ereignisstypen (unimodal und bimodal) über drei Skalen hinweg noch in der Abflussdynamik widerspiegeln, zeigt, dass die Feuchtflächen (z.B. Limbergalm) eine Indikatorfunktion für das Abflussgeschehen für größere Einzugsgebiete (z.B. Viehhofen) besitzen.

7.3 Hydrologische Einzugsgebietsmodellierungen

Im Folgenden werden die verschiedenen Modelle, mit denen der Abfluss im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ modelliert wurde, sowie die Resultate daraus vorgestellt. Die Ergebnisse, die mit dem Abflussmodell COSERO erzielt wurden (NACHTNEBEL ET AL. 2005) werden hier nicht vorgestellt, sie sind im entsprechenden Abschlussbericht zu finden.

7.3.1 BROOK

7.3.1.1 Beschreibung des Wasserhaushaltsmodells BROOK

FEDERER und LASH entwickelten 1978 am Water Research Center der Universität von New Hampshire (USA) das Wasserhaushalts-Simulationsmodell "BROOK" um die Wasserbilanz von kleinen Einzugsgebieten zu simulieren (FEDERER & LASH, 1978). Sie testeten es an Hand der Einzugsgebiete Hubbard Brook (New Hampshire) und Coweeta (North Carolina). An der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf (Schweiz) wurde dieses Modell wesentlich modifiziert und ist dort im Einsatz (FORSTER 1991 und 1992).

Das BROOK-Modell ist für die Wiedergabe der Wasserbilanzkomponenten in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten konzipiert. Bei der Entwicklung versuchte man die wichtigsten hydrologischen Prozesse physikalisch nachzuvollziehen und mittels physikalisch ermittelbarer Parameter und Inputdaten zu steuern. Das Modell berechnet Tageswerte für die einzelnen Vorgänge und ist somit für die Simulation von Abflussspitzen nicht konzipiert und daher auch nicht geeignet.

Mögliche **Anwendungsgebiete** des Modells sind:

- Abschätzung der Wasserhaushaltskomponenten eines Einzugsgebietes, falls keine Abflussmessungen vorhanden sind.
- Abschätzung des Verhaltens eines Einzugsgebietes nach forstlichen Eingriffen, z.B. Kahlschlag, Aufforstung, ect.

- Simulation der Bodenfeuchte über einen längeren Zeitraum, um daraus die Anfangbedingungen für eine kurzzeitige Simulation (z.B.: Hochwasservorhersage) zu erhalten
- Abschätzung des abflusswirksamen Niederschlages, d.h. des Niederschlages, der sofort zum Abfluss gelangt, sei es nun durch Oberflächenabfluss oder durch Abfluss in bevorzugten Wasserwegen und Makroporen.
- Abschätzung des Einflusses des Bodens auf das Abflussverhalten eines Gebietes.

7.3.1.2 Anwendung auf das Einzugsgebiet Kühtai

Die ersten Erfahrungen mit dem BROOK-Modell wurden nicht an Hand des Einzugsgebietes des Löhnersbaches, sondern an Hand des Einzugsgebietes des Längentalbaches (Kühtai/Tirol) gemacht, da für dieses Gebiet Abflussdaten über die letzten 6 Jahre vorhanden waren. Die durchgeführten Parameterstudien dienten einerseits dem Kennenlernen des Modells, seiner Bausteine und deren Zusammenwirken, andererseits einer Sensitivitätsanalyse wichtiger Parameter des Modells.

Zusammenfassend lässt sich über die **Parameterstudien** folgendes berichten:

- Die Parameter, die den Baustein für die Berechnung des Bodenwasserhaushaltes steuern, beeinflussen die Simulationsergebnisse am deutlichsten. Von ähnlicher Wichtigkeit ist die richtige Einschätzung der Flächenanteile im Einzugsgebiet, die Oberflächenabfluss liefern. Die genannten Einflussgrößen steuern die kurzfristige Dynamik der Prozess - Simulation.
- Das Langfristverhalten wird durch die Parameter des Grundwassermodellbausteins bestimmt.
- Die Parameter der einzelnen Modellbausteine sind zwar formal voneinander unabhängig wählbar, doch bestehen zwischen den Bausteinen logische Kopplungen, die die freie Parameterwahl implizit einschränken.
- Das Modell verlangt als Anfangswerte Schätzgrößen für die im Einzugsgebiet gespeicherten Wasserreserven (Schneespeicher, Wasserrückhalt im Untergrund). Eine falsche Einschätzung dieser Größen wirkt sich auf die Dauer von ca. einem Jahr auf die Simulationsergebnisse aus. Falls erforderlich, müssen die Anfangswerte iterativ neu geschätzt werden. Nach dem zweiten Iterationsschritt ist die gewünschte Stabilität des Iterationsergebnisses erreicht.

Die **Kalibrierung** des Modells an Hand der beobachteten Abflussdaten der Messstelle Längentalbach war nicht das vorrangige Ziel der Parameterstudie. Es werden jedoch trotzdem in den nun folgenden Abbildung 83 bis Abbildung 85 die Änderungen der berechneten Abflüsse dargestellt und den gemessenen Daten gegenübergestellt.

Vergleicht man die gemessenen und die mit den a priori geschätzten Parametern berechneten Abflüsse, so bestehen doch deutliche Unterschiede in den Monatsmitteln (Abbildung 83). Die durchgeführten Parameteränderungen, welche vor allem eine Änderung der Schätzwerte für die Bodenparameter und eine Neueinschätzung des Flä-

chenanteils der Oberflächenabfluss liefert betraf, führte zu einem wesentlich kleineren Unterschied zwischen den gemessenen und den berechneten Abflüssen (Abbildung 84).

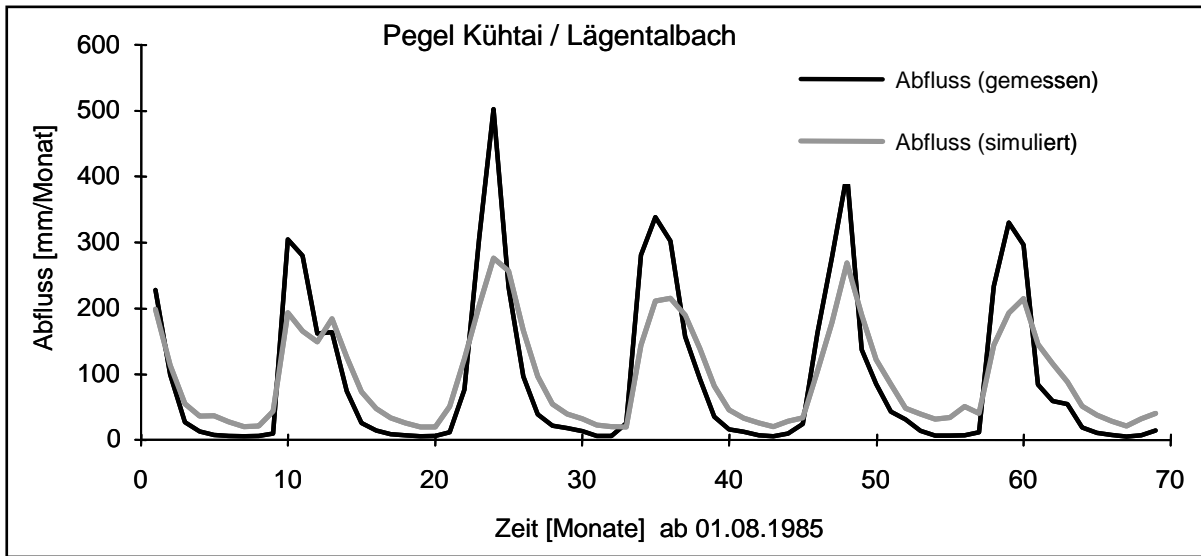


Abbildung 83: Beobachtete und simulierte Monatsmittelwerte des Abflusses der Jahre 1986-1991, gerechnet mit dem a priori geschätzten Parametersatz.

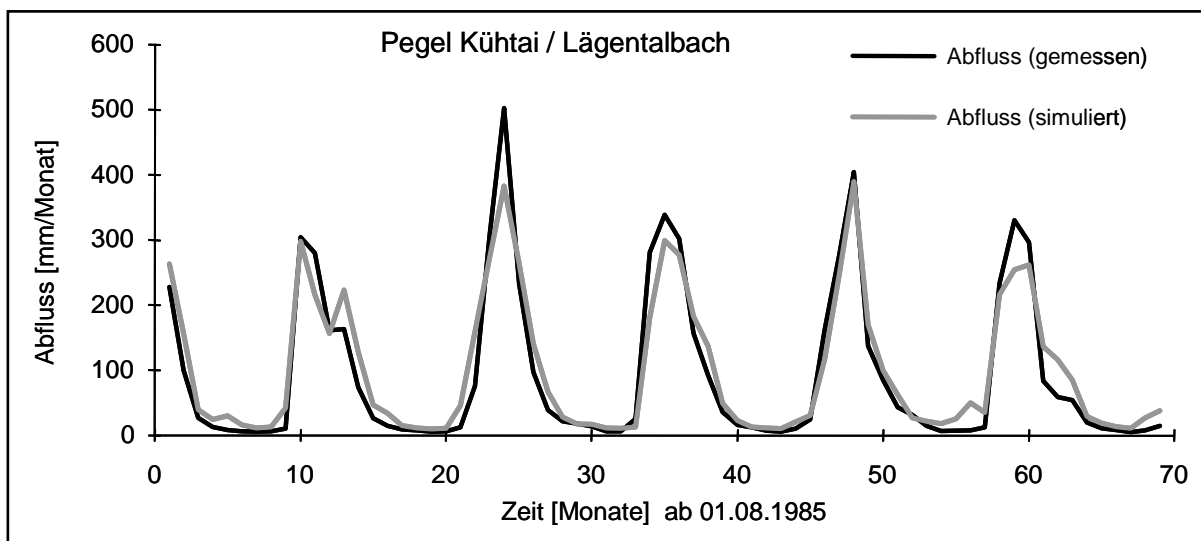


Abbildung 84: Gemessenen und der simulierten Monatsmittelwerte der Abflüsse nach einer Neueinschätzung einiger Parameter.

Obwohl die mittleren monatlichen Abflüsse gut übereinstimmen (Abbildung 84), bestehen bei den Tagesmittelwerten durchaus noch erhebliche Unterschiede (Abbildung 85). Diese Unterschiede können einerseits auf die unvollkommene Wiedergabe der natürlichen Abflussdynamik durch das Modell, andererseits auf nicht erfasste Variabilität von Eingangsgrößen zurückgeführt werden.

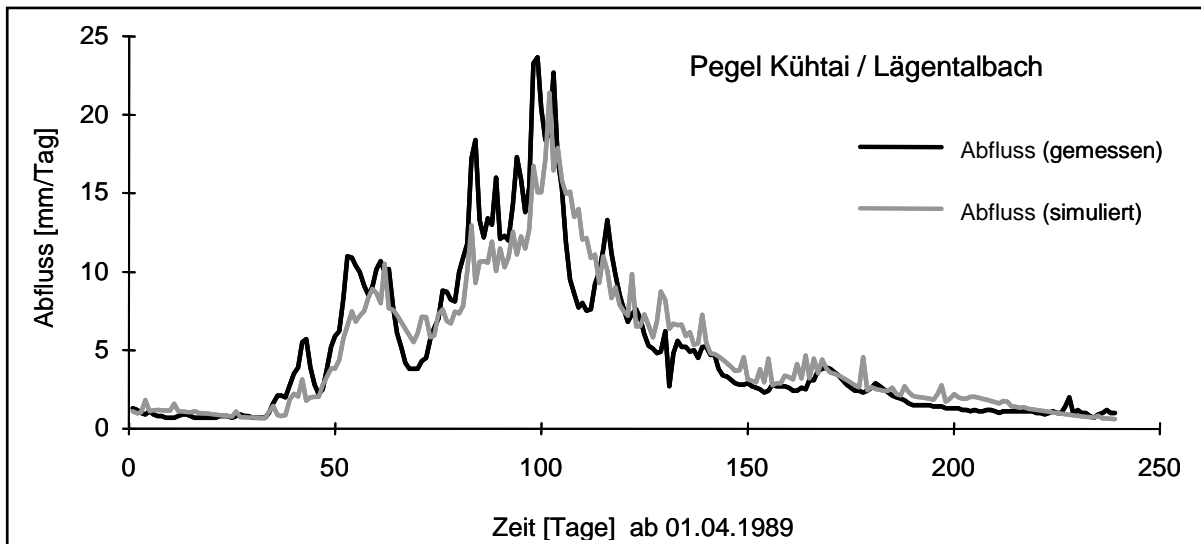


Abbildung 85: Tagesmittelwerte der gemessenen und simulierten Abflüsse des Jahres 1989.

7.3.1.3 Eingriffe in die Modellstruktur

7.3.1.3.1 Verbesserung der Modellkonzeption

In der ursprünglichen Modellversion können Informationen aus etwa vorhandenen bodenphysikalischen Untersuchungen nur unvollständig genutzt werden. Staueffekte einer dichteren Unterschicht in die darüber liegende Oberschicht werden modelltechnisch ebenfalls nicht erfasst. Das ursprüngliche Modell verhindert nicht, dass Parameter bzw. Zustandsgrößen physikalisch unplausible Werte annehmen können. Beispielsweise simuliert der Modellbaustein für den Bodenwasserhaushalt bei großen Niederschlägen bzw. großen Schmelzwassermengen im Boden einen Wassergehalt, der das Porenvolumen übersteigt. Auf der anderen Seite entwässert ein Boden rechnerisch auch dann noch weiter, wenn die Saugspannung bereits eine Größe erreicht hat, die nicht einmal durch die Saugkraft der Pflanzen überwunden werden kann.

Die angeführten Schwächen des Modells beeinträchtigen seine Funktionstüchtigkeit in Normalfällen kaum. In Extremfällen können sie wirksam werden und zu unplausiblen Ergebnissen führen.

Zur **Verbesserung der Modellkonzeption** wurden folgende Modifikationen am Modell durchgeführt:

- Der Zusammenhang zwischen der Wasserleitfähigkeit K und dem Wassergehalt θ wird in der geänderten Modellversion nicht durch den empirischen Exponentialansatz nach CAMPBELL (1974)

$$K = a * \theta^b$$

modelliert, dessen Parameter a und b aus bodenphysikalischen Messwerten durch nichtlineare Regression ermittelt werden (FORSTER 1991), sondern durch die unmittelbare Verwendung der Messwerte, zwischen denen linear interpoliert wird. Ausschlaggebend für diese Änderung war die Tatsache, dass der in der Natur gemessene Zusammenhang zwischen der Wasserleitfähigkeit und dem Wassergehalt bei manchen Böden von dem von Campbell vorgeschlagenen exponentiellen Zusammenhang deutlich abweicht (vgl. Abbildung 23 im Kap. 7.1.3.2.2).

- Das Aufstauen von Wasser aus einer tiefer liegenden, dichteren Bodenschicht in die weniger dichte Oberschicht ist möglich.
- Physikalische Grenzwerte der Durchlässigkeit, der Wassersättigung und der Entwässerbarkeit werden eingehalten.
- Parameter, die zwar formal unabhängig voneinander sind, in Wirklichkeit jedoch durch physikalische Zusammenhänge gekoppelt sind, wurden durch einen einzigen Parameter ersetzt. Alle von diesem Parameter abhängigen Parameter werden per Programm berechnet.

7.3.1.3.2 Behebung logischer Fehler

Logische Fehler in der programmtechnischen Realisierung des Modells bewirken in der ursprünglichen Programmversion Verstöße gegen das Gesetz von der Erhaltung der Masse. Diese logischen Fehler werden nur bei besonderen Datenkonfigurationen wirksam bzw. merkbar. Ein Fehler bei der Integration der Differentialgleichungen des Bodenwasserhaushaltes bewirkt z.B., dass unter besonderen Bedingungen aus dem Boden rechnerisch mehr Wasser abfließt, als durch Niederschlag zugeführt wird. Die berechnete Bodenverdunstung kann in Sonderfällen mehr Wasser verbrauchen, als im Boden enthalten ist. Derartige Fehler wurden eliminiert.

7.3.1.3.3 Verbesserung des Integrationsalgorithmus

Die Grundlage des Modellbausteins für den Bodenwasserhaushalt bildet ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen, welches in der ursprünglichen Programmversion mit Hilfe des Euler'schen Integrationsalgorithmus gelöst wurde. Dieser sehr einfache, jedoch in manchen Fällen auch sehr langsame und ungenaue Lösungsweg wurde durch einen effizienteren Algorithmus, dem Runge-Kutta Algorithmus mit adaptiver Schrittweitensteuerung, ersetzt. Die Ergebnisse der anschließend an diese Modellmodifikationen durchgeführten Simulationsrechnung ist in Abbildung 86 dargestellt.

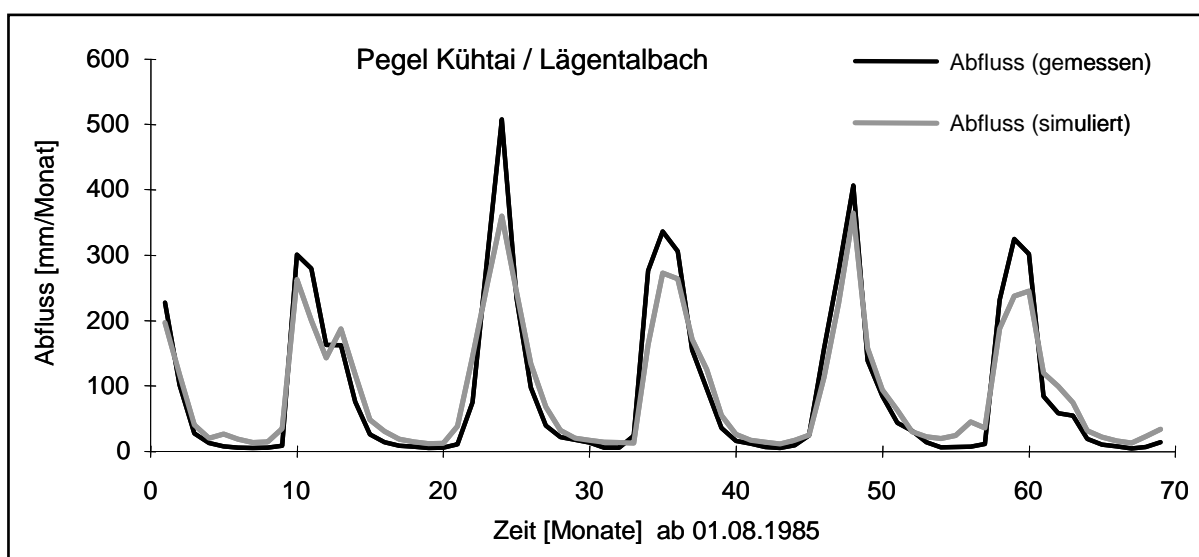


Abbildung 86: Gemessener und simulierter Abfluss nach Änderung des Zusammenhanges zwischen Wasserleitfähigkeit und Wassergehalt.

Bemerkenswert dabei ist, dass der berechnete Abfluss, obwohl keine Kalibrierung stattfand, fast so gut den gemessenen Abfluss wiedergibt, wie im Fall der Modellrechnung nach der Parameteranpassung (vgl. Kap. 7.3.1.2) und deutlich besser als vor den Parameteränderungen. Dies ist auf den geänderten Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt zurückzuführen, der nun direkt durch die Messdaten eingeht und somit nicht mehr an den empirischen Exponentialansatz nach CAMPBELL (1974) gebunden ist.

7.3.1.3.4 Verbesserung des Benutzerkomforts

Der Benutzerkomfort des Modells wurde durch die Schaffung einer Datenschnittstelle sowohl zu einem Grafikpaket als auch zu einer Tabellenkalkulation wesentlich verbessert.

Das Format für die Inputdaten wurde ebenfalls geändert. Bisher sah das vom Modell BROOK verwendete Format für die Eingangsdaten je ein Datenfile für den Niederschlag, Abfluss, die Temperatur sowie den Temperaturgradienten vor. Im neuen Format liegt nur noch ein Datenfile für alle Eingabedaten vor, welche spaltenweise angeordnet sind. Zusätzlich ist das Datum angegeben, um die Lesbarkeit zu erhöhen. Um die Kompatibilität mit der vorhergegangenen Programmversion zu erhalten, können Daten im ursprünglichen Format weiterhin verwendet werden.

7.3.1.4 Anwendung auf das Untersuchungsgebiet Löhnersbach

7.3.1.4.1 Berechnung des Temperaturgradienten

In alpinen Einzugsgebieten sind die Frühjahrshochwässer von besonderem Interesse und so ist es wichtig, die Schneeschmelze adäquat zu erfassen bzw. im Modell ein verstärktes Augenmerk auf die Schneeschmelzroutine zu richten. Im Wasserhaushaltsmodell wird diese wesentlich durch die Temperatur gesteuert, welche sich für die einzelnen, verschieden hoch gelegenen Teilgebiete mit Hilfe eines Temperaturgradienten, der die Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe angibt, berechnen lässt.

Zur Berechnung der Temperaturgradienten können prinzipiell drei Möglichkeiten unterschieden werden, die im Folgenden erläutert werden und deren unterschiedliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt nachfolgend mit dem Modelle BROOK getestet wird.

Temperaturgradient aus Temperaturmessungen

Bei der Berechnung des Temperaturgradienten aus Temperaturmessungen sind Messwerte der Temperatur in verschiedenen Seehöhen erforderlich. Bei der Verwendung von Daten aus Messstationen in Beckenlagen ist zu beachten, dass häufige Inversionswetterlagen das Ergebnis verfälschen können.

Der Temperaturgradient TG [°C/100m] berechnet sich aus den Temperaturmesswerten T₁ und T₂ [°C] in den Höhen H₁ und H₂ [m ü. A.] wie folgt:

$$TG = \frac{T_1 - T_2}{H_1 - H_2} * 100$$

Temperaturgradient der Standardatmosphäre

Die Standardatmosphäre wurde 1952 von der ICAO (International Civil Aeronautical Organization) definiert. Ihr Temperaturgradient ist konstant gleich 0,65 °C/100m (LILJEQUIST & CEHAK 1984). Diese ist die einfachste Methode zur Bestimmung eines Temperaturgradienten, da sie ohne Daten auskommt.

Temperaturgradient auf physikalischer Basis

Der Temperaturgradient auf physikalischer Basis wird aus thermodynamischen Überlegungen unter der Annahme einer adiabatischen Zustandsänderung abgeleitet.

Prinzipiell ist zwischen trockenadiabatischem und feuchtadiabatischem Temperaturgradienten zu unterscheiden. Ersterer gibt die Temperaturabnahme mit der Höhe an, solange der in der Luft vorhandene Wasserdampf nicht kondensiert, zweiterer die Temperaturabnahme bei Kondensation des Wasserdampfes.

Dabei sind grundsätzlich zur Berechnung des Temperaturgradienten auf physikalischer Basis neben einigen anderen Parametern Angaben zur Temperatur, zum Luftdruck und zur Luftfeuchtigkeit erforderlich. Für die letzten beiden besteht jedoch auch die Möglichkeit auf Werte der Standardatmosphäre zurückzugreifen. Zur Berechnung sind somit nur die vielerorts verfügbaren Temperaturdaten notwendig.

trockenadiabatischer Temperaturgradient Γ

Der trockenadiabatische Temperaturgradient tritt auf, solange der in der Luft vorhandene Wasserdampf nicht kondensiert und dadurch keine Kondensationswärme frei wird, welche das Abkühlen der Luft mit zunehmender Höhe vermindern würde. Der trockenadiabatische Temperaturgradient kann als $G = \text{konstant} = 1^\circ/100 \text{ m}$ (LILJEQUIST & CEHAK 1984) angenommen werden.

feuchtadiabatischer Temperaturgradient γ

Der feuchtadiabatische Temperaturgradient gibt die Temperaturabnahme bei zunehmender Höhe an, wobei Kondensationsprozesse miteinbezogen werden. Dabei wird angenommen, dass die Luft ständig mit Wasserdampf gesättigt ist. Mit zunehmender Höhe und somit abnehmender Temperatur (außer Inversionslagen) ist immer weniger Dampf für die Sättigung erforderlich. Die überschüssige Wasserdampfmenge kondensiert und Energie wird frei (BAEHR 2005, WESTPHAL 1970). Diese Energie verringert die Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe, wodurch der feuchtadiabatische Temperaturgradient stets kleiner als der trockenadiabatische ist.

Der feuchtadiabatische Temperaturgradient berechnet sich als (LILJEQUIST & CEHAK 1984):

$$-\gamma = \frac{dT}{dz} = \frac{g + \frac{L \cdot S_s \cdot g}{R \cdot T}}{c_p + \frac{L \cdot S_s}{e_s} \cdot \frac{de_s}{dT}} \quad \text{in } ^\circ\text{C/m}$$

| | | | |
|----------------|--|------------------|---|
| mit | | | |
| t | = T - 273.2 | °C | Temperatur |
| T | = t + 273.2 | K | absolute Temperatur |
| p | | mbar | Luftdruck |
| g | = 9,81 | m/s ² | Erdbeschleunigung |
| L | = (2.498-0.0025t)*10 ⁶ | J/kg | latente Wärme des Wasserdampfes |
| e _s | = c ₁ · e ^{$\frac{c_2 \cdot t}{c_2 + t}$} | mbar | Sättigungsdampfdruck c _i ... Koeffizienten der Magnusformel |
| S _s | = $\frac{\text{DichteWasserdampf}}{\text{Dichte feuchteLuft}}$ = | | |
| | = 0.622*e _s /p | mbar/mbar | spezifische Feuchte der Luft |
| R | = R*/m | J/kg K | Gaskonstante der Luft |
| R* | = 8317 | J/Kmol K | universelle Gaskonstante |
| m | = $\frac{(m_w - m_t) \cdot e_s + m_t \cdot p}{p}$ | kg/kmol | Molekulargewicht des Gases |
| m _t | = 28.97 | kg/kmol | Molekulargewicht der trockenen Luft |
| m _w | = 18.016 | kg/kmol | Molekulargewicht von Wasserdampf |
| c _p | = 1004 | J/kg°C | spezifische Wärme von trockener Luft bei konstantem Druck |

Die mit dem Luftdruck der Standardatmosphäre berechneten feuchtadiabatischen Temperaturgradienten sind in Tabelle 23 zusammengestellt. Aus dieser geht hervor, dass die Werte nahe 1 nur unter sehr extremen Bedingungen erreicht werden.

Tabelle 23: Zusammenstellung der feuchtadiabatischen Temperaturgradienten als Funktion von Temperatur und Seehöhe bzw. Luftdruck für die Standardatmosphäre.

| T [°C] | Höhe [m] | 0 | 500 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 |
|--------|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Druck [mbar] | 1013,2 | 954,6 | 898,7 | 794,9 | 701,1 | 616,4 |
| - 50 | | 0,966 | 0,966 | 0,965 | 0,964 | 0,962 | 0,96 |
| - 40 | | 0,951 | 0,949 | 0,948 | 0,944 | 0,94 | 0,935 |
| - 30 | | 0,918 | 0,915 | 0,911 | 0,903 | 0,895 | 0,885 |
| - 20 | | 0,858 | 0,852 | 0,845 | 0,831 | 0,816 | 0,798 |
| - 10 | | 0,766 | 0,757 | 0,747 | 0,726 | 0,704 | 0,68 |
| 0 | | 0,65 | 0,638 | 0,627 | 0,602 | 0,577 | 0,551 |
| 10 | | 0,534 | 0,522 | 0,51 | 0,487 | 0,463 | 0,44 |
| 20 | | 0,435 | 0,425 | 0,415 | 0,396 | 0,377 | 0,358 |
| 30 | | 0,363 | 0,355 | 0,347 | 0,332 | 0,318 | 0,304 |
| 40 | | 0,314 | 0,308 | 0,302 | 0,291 | 0,28 | 0,27 |
| 50 | | 0,282 | 0,277 | 0,272 | 0,264 | 0,255 | 0,247 |

Die Annahme, dass Kondensation des Wasserdampfes erst bei völliger Sättigung der Luft auftritt, trifft nicht immer zu. Kondensation wird in der Natur auch schon vor dem

Erreichen von Sättigung beobachtet (WARNECKE 1997). In diesem Fall ist die frei werdende Kondensationswärme geringer als die für die Berechnung des feuchtadiabatischen Temperaturgradienten angenommene Menge, wodurch der daraus resultierende Gradient größer als der feuchtadiabatische und kleiner als der trockenadiabatische Gradient ist. Dieser Zwischenbereich kann von keinem der beiden physikalischen Ansätze abgedeckt werden.

Um die erforderliche Datengrundlage für die Berechnung der Gradienten so gering wie möglich zu halten, wurden für den Luftdruck die Werte der Standardatmosphäre und für die Luftfeuchtigkeit nur grobe Schätzwerte verwendet. Sind jedoch diesbezügliche Messdaten vorhanden, so kann unter deren Einbeziehung der berechnete Gradient den tatsächlichen Bedingungen weiter angenähert werden.

7.3.1.4.2 Modellrechnungen für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“

Obwohl für den Löhnersbach (Pegel Rammern) zum Zeitpunkt der Modellierung noch keine ausreichenden Niederschlags- und Abflussbeobachtungen vorlagen, die für die Beurteilung des BROOK-Modells ausreichend gewesen wären, wurden erste Simulationenläufe für den Zeitraum 1.8.1985 bis 31.12.1990 durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ nach den Gesichtspunkten Exposition, Höhenlage und Bewuchs in 6 Teilgebiete unterteilt, deren geographische Lage in Abbildung 87 ersichtlich ist und deren Kenngrößen in Tabelle 24 zusammengestellt sind.

Tabelle 24: Kenngrößen der Teileinzugsgebiete im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ (Pegel Rammern).

| Teilgebietsnummer | mittlere Exposition [Nord=0°, Ost=90°] | mittlere Höhe [m ü.A.] | Fläche [km ²] | Bewuchs |
|-------------------|--|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 330° | 1520 | 3,62 | Fichtenwald |
| 2 | 345° | 1900 | 4,15 | subalpine Zwergstrauchheide |
| 3 | 135° | 1435 | 1,88 | Fichtenwald |
| 4 | 90° | 1875 | 3,23 | subalpine Zwergstrauchheide |
| 5 | 150° | 1810 | 2,33 | Bürstling - Weiderasen |
| 6 | 135° | 1455 | 1,17 | Bürstling - Weiderasen |

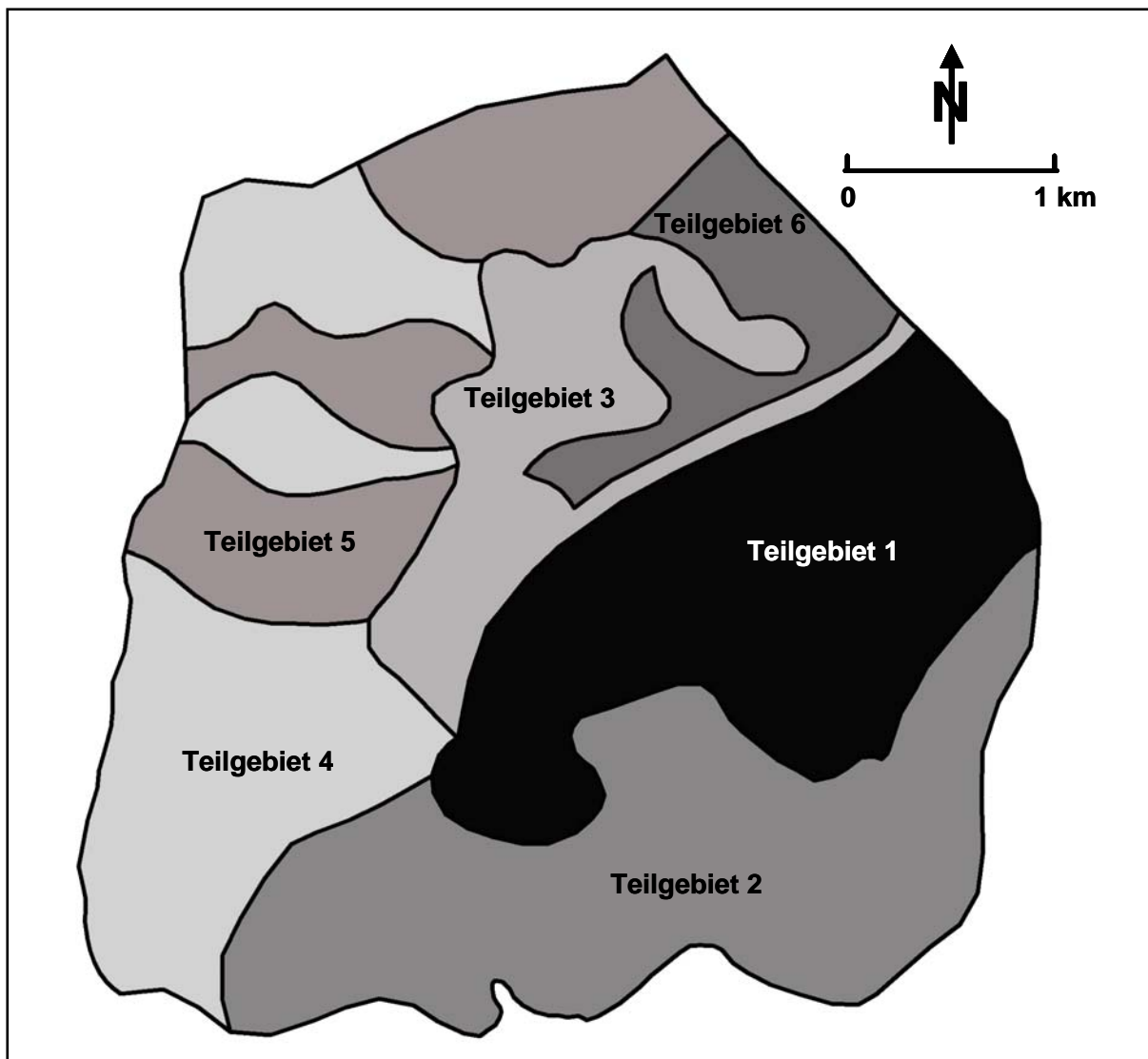


Abbildung 87: Aufteilung des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ in 6 Teilgebiete.

Die Simulationsrechnungen wurden für den Zeitraum mit vorhandenen Löhnersbach-Abflussdaten durchgeführt (Okt. 1991 bis Dez. 1993). Um den Einfluss der Anfangswerte der Simulation (geschätzte Wasser-Retentionsmengen im Einzugsgebiet) auf das Simulationsergebnis zu verhindern, wurde zuzüglich ein Simulationsjahr vorgeschaltet.

Für die Bestimmung des Niederschlags wurden die Daten der im Rahmen des Projekts errichteten Stationen Schattberg, Niesrachalm und Herzogalm herangezogen. Da diese Messstationen im Winter außer Betrieb sind, wurden die dadurch bedingten Datenlücken mit Niederschlagsdaten der Station Saalbach, die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik betrieben wird, aufgefüllt. Von der Messstation Saalbach entstammen auch die Tagesmittelwerte der Temperatur.

Für die Bodenkennwerte wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Böden im Einzugsgebiet sind tiefgründig und haben einen hohen Skelettanteil, die Feinerde ist bindig. Das Infiltrations- bzw. Desorptionsverhalten der Böden wird als zwischen den Lokalformen "Steig", "Schitterwald" und "Österliwald" nach RICHARD & LÜSCHER (1983) liegend eingestuft.

- Mit Hilfe von Bodenaufschlüssen wurde die Mächtigkeit der durchwurzelten Schicht für das gesamte Einzugsgebiet auf 50 cm geschätzt. Der darunter anschließenden ungesättigten Bodenzone wurden Mächtigkeiten in Abhängigkeit von der mittleren Höhe des Teilgebiets zugeordnet (je höher die Lage des Gebietes, desto dünner ist diese Schicht.).
- Die im Einzugsgebiet existierenden Flächen, die bei jedem Niederschlag sofort Oberflächenabfluss liefern, setzen sich aus den Fels- und Feuchtfächen mit Anschluss ans Gerinne und den Gerinneoberflächen zusammen (Abbildung 30).

Die für die Modellierung notwendigen Parameter wurden mit Hilfe der obigen Annahmen bestimmt oder auf Grund der, bei der Modellanwendung auf den Längentalbach - Kühtai, gewonnenen Erfahrungen geschätzt. Auf eine Kalibrierung des Modells wurde absichtlich verzichtet. Die für die Simulation notwendigen Niederschlags- und Temperaturdaten für den Zeitraum 1.8.1984 bis 31.12.1990 stammen von einer Messstelle in Saalbach, die Abflussdaten von der Pegelmessstelle Viehhofen (Saalach). Hierzu ist anzumerken, dass das Einzugsgebiet der Saalach mit 150 km² deutlich größer als jenes des Löhnersbaches mit 16 km² ist, woraus sich Diskrepanzen bezüglich der Fließzeit und der Gestalt der Abflussganglinie ergeben, welche sich jedoch nur bei den Tageswerten bemerkbar machen (Abbildung 88).

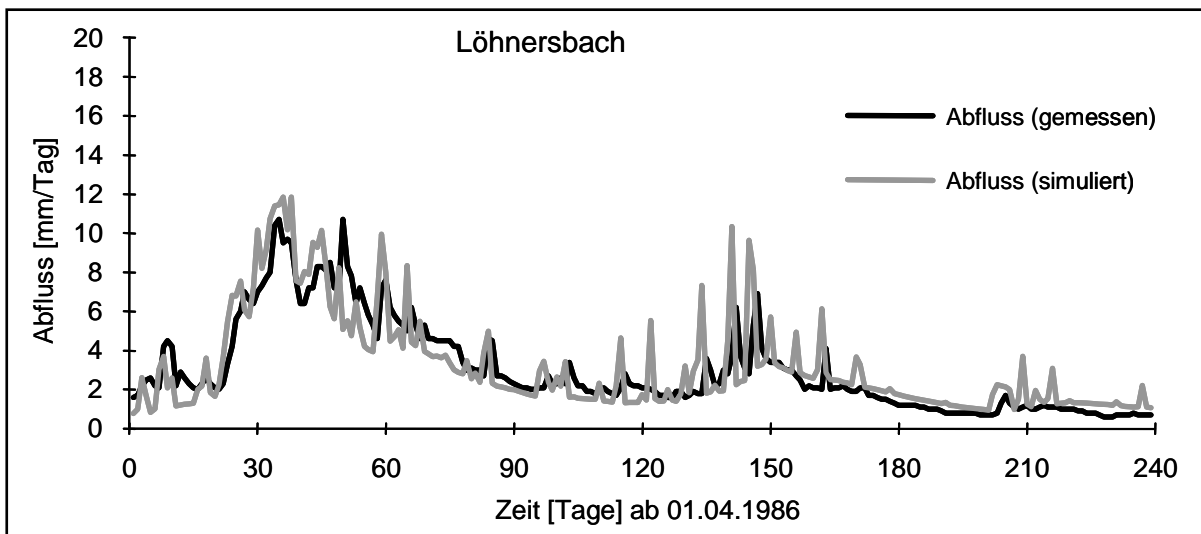


Abbildung 88: Tagesmittelwerte der gemessenen (Viehhofen) und simulierten (Löhnersbach) Abflüsse des Jahres 1986.

Der Spitzenabfluss des größeren Einzugsgebietes gelangt bedingt durch die längere Fließstrecke ca. 1 Tag später zur Messstelle. Damit lässt sich der zeitliche Unterschied der Abflussspitzen der beiden Ganglinien in Abbildung 88 erklären. Zuzüglich zu einer zeitlichen Verschiebung tritt eine Dämpfung des Abflusses in größeren Einzugsgebieten auf, wodurch sich die verschiedenen Höhen der Abflussspitzen erklären lassen. Sowohl die Monatswerte, welche in Abbildung 89 dargestellt sind, als auch die Trockenwetterabflüsse der beiden Gebiete stimmen gut überein.

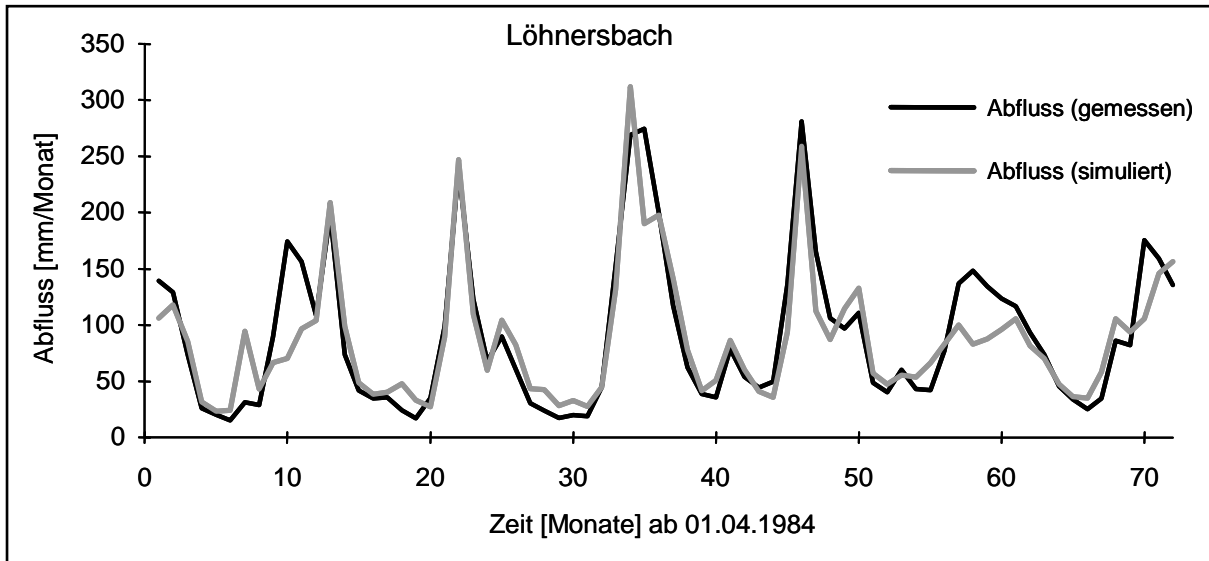


Abbildung 89: Monatswerte der gemessenen (Viehhofen) und simulierten (Löhnersbach) Abflüsse des Zeitraumes 1984 - 1990.

Korrektur der Niederschlagsdaten

Das Ergebnis der mit den oben angegebenen Datengrundlagen durchgeführten Simulationsrechnung ist in Abbildung 90 und Abbildung 91 (oben) dargestellt. Deutlich zu sehen ist der Frachtunterschied zwischen gemessenem und simuliertem Abfluss während der Frühjahrsmonate. Der simulierte Abfluss beträgt nur 60-70 % des gemessenen. Bei näherer Betrachtung (unter Einbeziehung der Lufttemperaturdaten) zeigte sich, dass das Abflussverhalten in diesen Zeitbereichen maßgeblich von der Schneeschmelze beeinflusst wird.

Dieser Umstand legt die Vermutung nahe, dass sich aus den Niederschlagsdaten im Winter nicht genügend Schnee für die simulierte Schneeschmelze ergibt. Die Niederschlagsdaten stammen aus Ombrographenmessungen, welche erfahrungsgemäß bei Schneefall bis zu einem Drittel weniger Niederschlag registrieren, als tatsächlich gefallen ist. Vergleicht man die mit dem Ombrographen Saalbach gemessenen Winterniederschläge mit dem geschätzten Wasseräquivalent der im selben Zeitraum registrierten Neuschneemengen (als Dichte des Neuschnees kann $0,1 \text{ g/cm}^3$ angenommen werden), so wird die Unterschätzung des festen Niederschlags durch die Ombrographenmessung erkennbar (Tabelle 25).

Basierend auf diesen Überlegungen wurden die Niederschlagsdaten für den Winter in der Weise modifiziert, dass für diesen Zeitraum das Tagesmaximum aus den Ombrograph-Niederschlagsdaten und dem Wasseräquivalent der Neuschneehöhen verwendet wurde. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist in Tabelle 25 zusammengestellt.

Bei einer weiteren Modellrechnung mit diesen modifizierten Niederschlagsdaten zeigte sich, dass der Unterschied in der Abflussfracht während der durch Schneeschmelze dominierten Zeitabschnitte wesentlich geringer wurde (Abbildung 90 und Abbildung 91 unten).

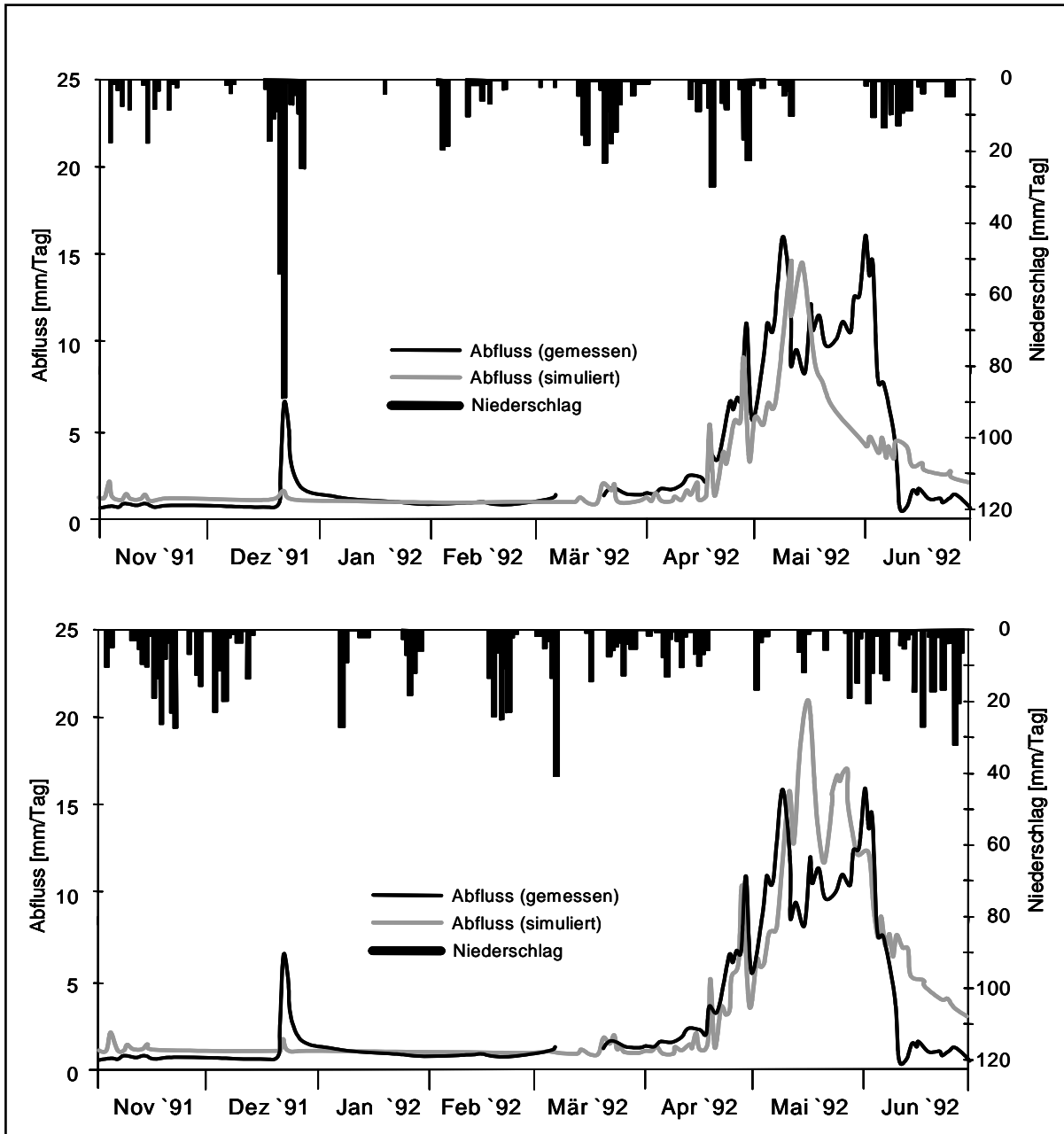


Abbildung 90: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen für den Pegel Rammern vor (obere Graphik) und nach (untere Graphik) der Korrektur der Niederschlagsdaten mit Hilfe der Summen der Neuschneehöhen für den Winter 1991/92.

Tabelle 25: Vergleich der Ombrograph-Niederschlagssummen mit den mittels Wasseräquivalent des Neuschnees modifizierten Niederschlagssummen.

| relevanter Zeitraum (Winter) | ursprünglicher Niederschlag | mit Neuschneehöhen modifizierter Niederschlag |
|------------------------------|-----------------------------|---|
| 1.10. 1991 - 30.4.1992 | 670,3 mm | 944,3 mm |
| 1.10. 1992 - 30.4.1993 | 625,9 mm | 848,7 mm |

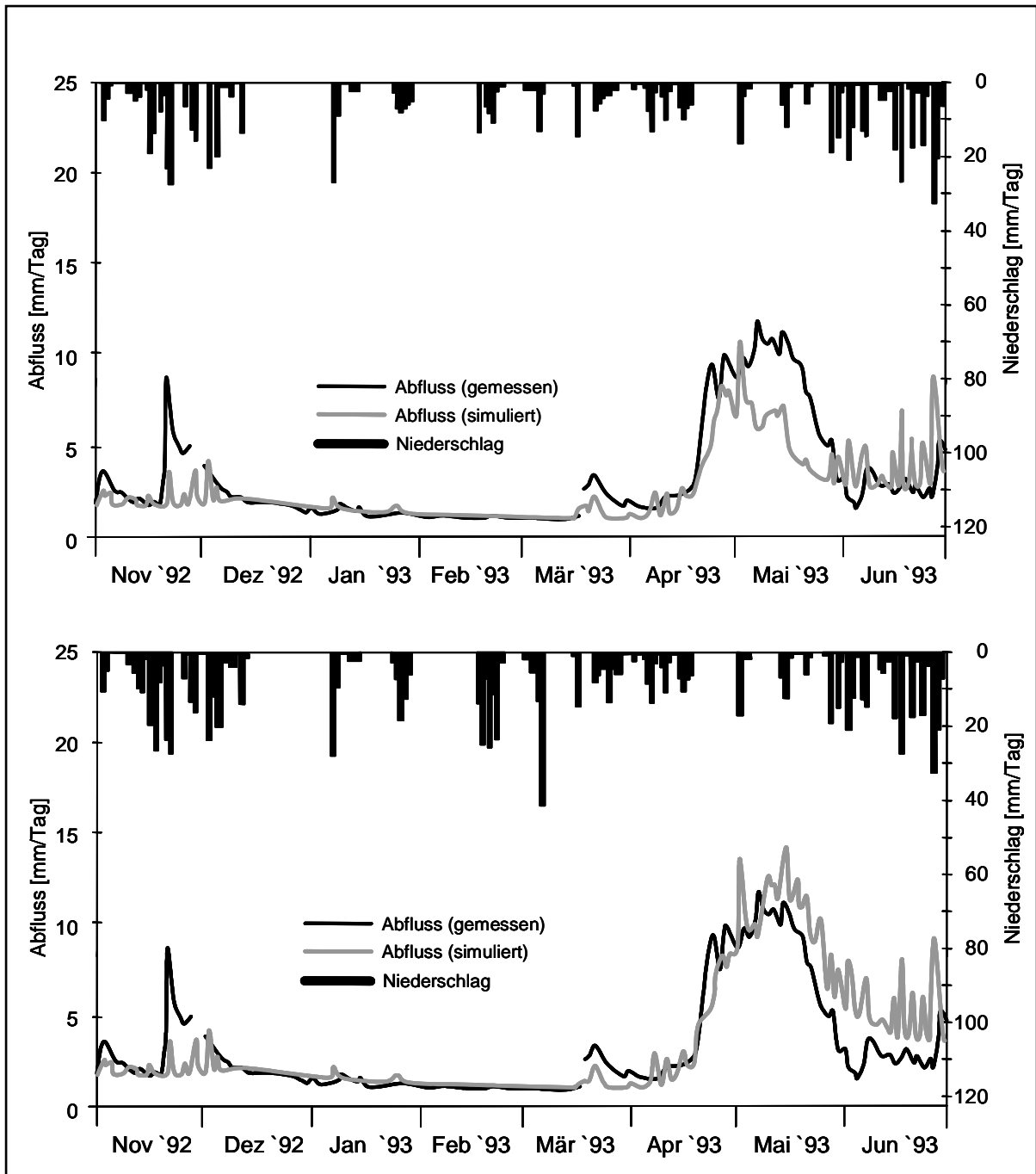


Abbildung 91: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen für den Pegel Rammern vor (oben) und nach (unten) der Korrektur der Niederschlagsdaten mit Hilfe der Summen der Neuschneehöhen für den Winter 1992/93.

Anwendung der verschiedenen Temperaturgradientenmethoden

Bei der Anwendung des Wasserhaushaltsmodells BROOK auf das Löhnersbachgebiet wurde eine Schwäche in der Modellierung der Schneeschmelze festgestellt. Diese äußert sich in einem Unterschied des zeitlichen Auftretens und der zugehörigen Abflusshöhe zwischen gemessenen und simulierten Werten der Frühjahrshochwässer, welcher zum Teil auf eine Über- bzw. Unterschätzung der Temperatur in den verschiedenen Höhen zurückzuführen ist. Um eine Verbesserung der Modellierung dieses Phänomens

zu erzielen, sollte die am besten geeignete der bereits angegebenen Methoden zur Berechnung des Temperaturgradienten ausgewählt werden.

Der Temperaturgradient hat großen Einfluss auf die Schneeakkumulation in einem Gebiet, welche ihrerseits auch die Schneeschmelze beeinflusst. Die Auswirkungen der verschiedenen Berechnungsmethoden für den Temperaturgradienten auf die Ergebnisse des Schneeakkumulationsmodul von BROOK werden an Hand von Schneeedaten überprüft. Jene Temperaturgradientenmethode, die diese Daten am besten reproduziert, wird schließlich für die weiteren Modellrechnungen ausgewählt, da anzunehmen ist, dass diese Methode auch die Schneeschmelze am besten wiedergibt.

Die Auswirkungen der beschriebenen drei Methoden zur Berechnung des Temperaturgradienten auf den simulierten Abfluss werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Varianten A und B: Temperaturgradient aus Temperaturmessungen in unterschiedlichen Höhen

Zur Berechnung des Temperaturgradienten aus Temperaturmessungen in unterschiedlichen Höhen wurden die Temperaturdifferenzen der ZAMG-Stationen Saalbach (1010 m ü. A.) und Schmittenhöhe (1975 m ü. A.) (Variante A), sowie jene zwischen Zell am See (750 m ü. A.) und Schmittenhöhe (Variante B) herangezogen. Die Verwendung der sich dadurch ergebenden Temperaturgradienten hat eine Unterschätzung des im Gebiet vorhandenen Schnees zur Folge (Abbildung 92, Abbildung 93 sowie Tabelle 26). Betrachtet man die Ganglinien für die Schneeschmelzperiode (April bis Juni) näher, so fallen die unrealistisch vielen kleinen Abflussspitzen im Winter auf (Abbildung 94 und Abbildung 95). Diese lassen darauf schließen, dass die Simulation für diesen Zeitraum verglichen mit den tatsächlichen Bedingungen zu viel Schneeschmelze ergibt, bzw. dass häufig Regen anstatt Schneefall simuliert wird. Die Temperatur der höher gelegenen Gebiete wird also überschätzt, der Temperaturgradient ist zu klein.

Die Schnee-Wasser-Äquivalente werden vom Modell wesentlich und in allen Teilgebieten unterschätzt (im flächengewichteten Mittel ca. 60 %, Abbildung 93). Aus den vorliegenden Temperaturdaten aus Tal- und Höhenstation lassen sich somit keine realistischen Temperaturgradienten berechnen. Dies kann durch eine nicht repräsentative Lage der Temperaturmessstationen bedingt sein.

Variante C: Temperaturgradient der Standardatmosphäre

Bei der Verwendung des Temperaturgradienten der Standardatmosphäre wird die Akkumulation des Schnees im Gebiet wesentlich besser nachgebildet (Abbildung 92, Abbildung 93 sowie Tabelle 26). In einzelnen Teilgebieten wird das Schnee-Wasser-Äquivalent über-, in anderen unterschätzt. Im flächengewichteten Mittel ergibt sich eine absolute Abweichung von ca. 30 %.

Variante D: Temperaturgradient auf physikalischer Basis

Für die Verwendung des Temperaturgradienten auf physikalischer Basis wurde mit dem trockenadiabatischen Temperaturgradienten gerechnet, solange kein Niederschlag fällt. Bei Niederschlag wurde auf den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten übergegangen. Die Schnee-Wasser-Äquivalente werden vom Modell ähnlich gut wie bei der Verwendung des Standardgradienten nachgebildet (Abbildung 92, Abbildung 93 sowie Tabelle 26), die flächengewichtete absolute Abwei-

chung der gemessenen Schnee-Wasser-Äquivalente von den berechneten beträgt 25 %.

Sowohl bei der Verwendung des Gradienten der Standardatmosphäre als auch des physikalisch berechneten Gradienten stimmen die berechneten Schneewerte gut mit den Messwerten überein. Mit einer mittleren Abweichung von nur 25 % liegen die Ergebnisse des physikalisch berechneten Gradienten etwas besser als jene des Standardgradienten mit 30 %. Diese geringe Differenz allein, basierend auf Terminwerten der Schnee-Wasser-Äquivalente an einem einzigen Tag, rechtfertigt noch nicht die Auswahl des physikalisch berechneten Gradienten als am besten geeignet. Bedenkt man jedoch, dass mit Hilfe zusätzlicher Daten wie etwa Luftdruck oder Luftfeuchtigkeit, die zur Zeit nur als Schätzwert Eingang in die Rechnung finden, die Berechnungen verbessert werden können, so erscheint die Wahl der physikalischen Berechnungsmethode für den Temperaturgradienten als sinnvoll.

Variante A: Temperaturgradient aus Temperaturdaten der ZAMG-Stationen Saalbach und Schmittenhöhe

Variante B: Temperaturgradient aus Temperaturdaten der ZAMG-Stationen Zell am See und Schmittenhöhe

Variante C: Temperaturgradient der Standardatmosphäre

Variante D: Temperaturgradient auf physikalischer Basis

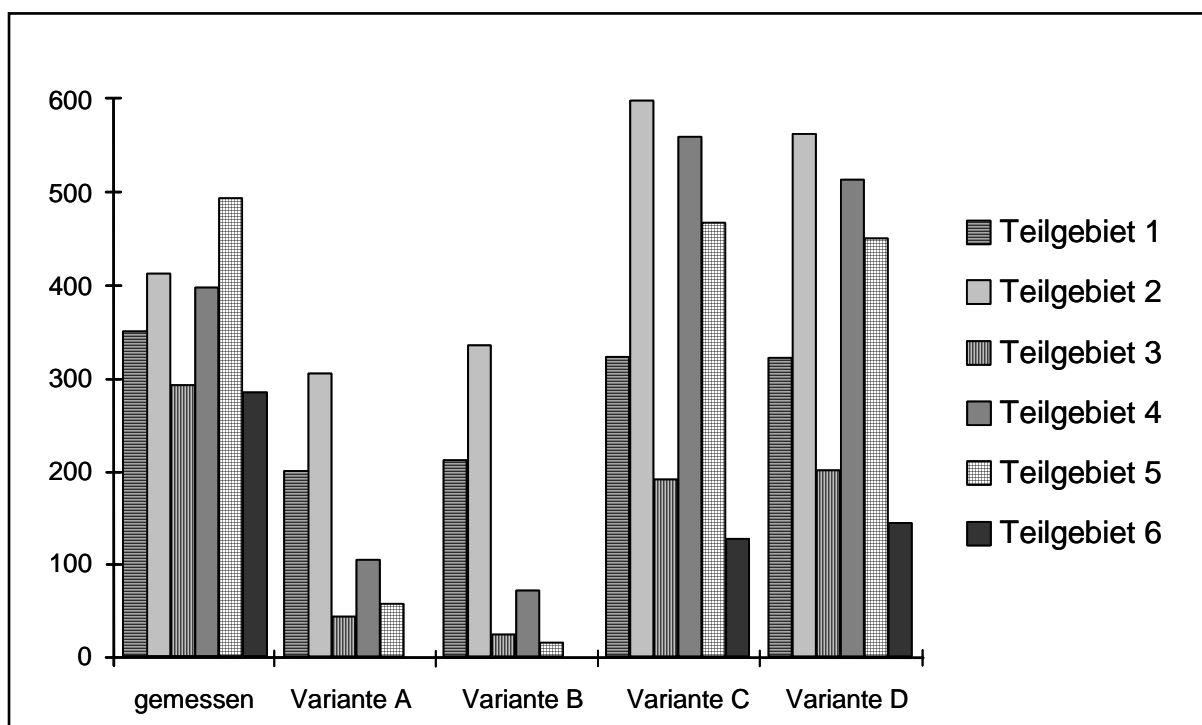


Abbildung 92: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Schnee-Wasser-Äquivalenten für die einzelnen Teilgebiete des Löhnersbaches.

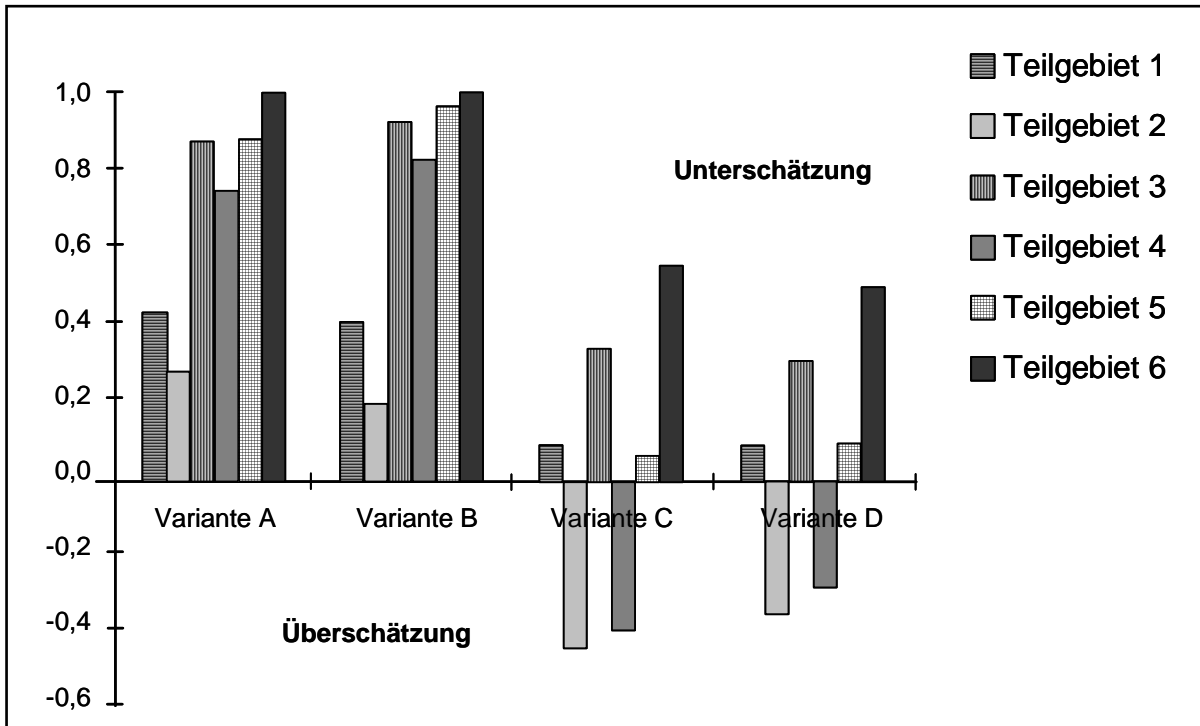


Abbildung 93: Relativer Fehler der berechneten Schnee-Wasser-Äquivalente bezogen auf die dafür gemessenen Werte.

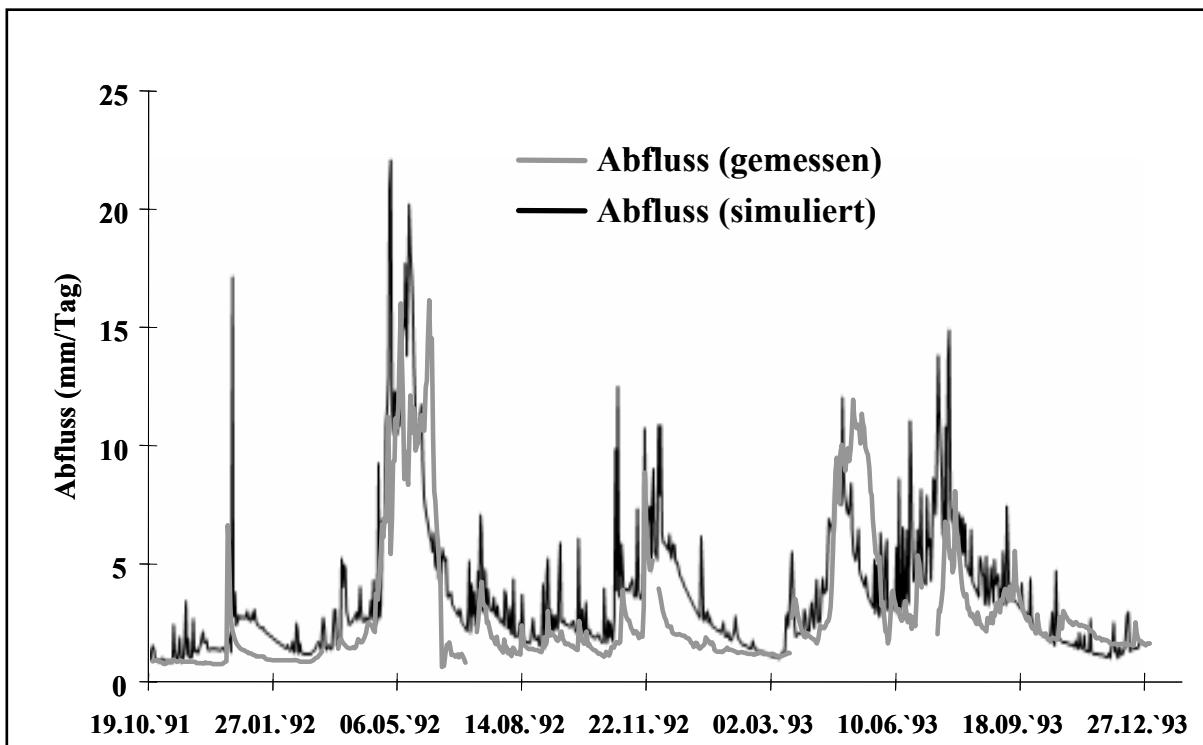


Abbildung 94: Vergleich zwischen gemessenen und mit Temperaturgradienten aus Temperaturmessungen der Stationen Saalbach und Schmittenhöhe berechneten Abflüssen.

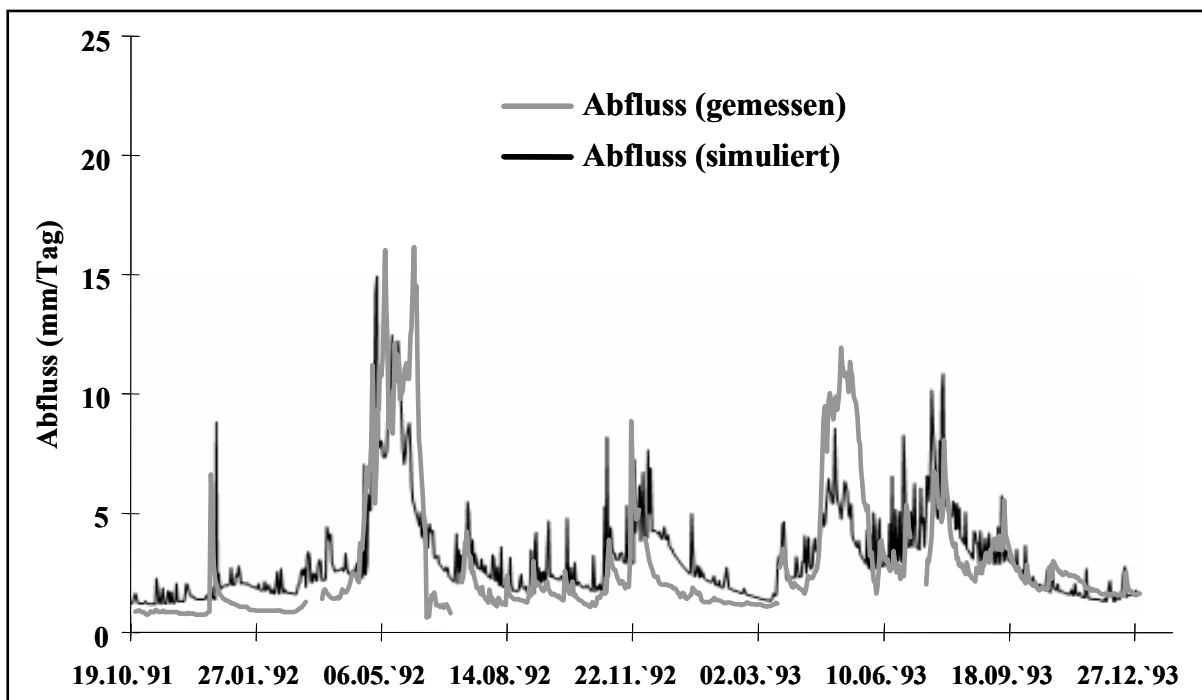


Abbildung 95: Vergleich zwischen gemessenen und mit Temperaturgradienten aus Temperaturmessungen der Stationen Zell am See und Schmittenhöhe berechneten Abflüssen.

Tabelle 26: Vergleich zwischen gemessenem Schnee-Wasser-Äquivalent und mit verschiedenen Temperaturgradientmethoden simuliertem Schnee-Wasser-Äquivalent für den 9.4.1993. (Zur Berechnung des flächengewichteten mittleren Fehlers wurden die Absolutwerte der jeweiligen Fehler herangezogen).

| Teilgebiet | gemessenes Schnee-Wasser-Äquivalent [mm] | mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden für den Temperaturgradienten simulierte Schnee-Wasser-Äquivalente | | | | | | | |
|-------------|--|---|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| | | Simulation Variante A | | Simulation Variante B | | Simulation Variante C | | Simulation Variante D | |
| | | Wert [mm] | relativer Fehler | Wert [mm] | relativer Fehler | Wert [mm] | relativer Fehler | Wert [mm] | relativer Fehler |
| 1 | 349 | 210 | 42.4% | 210 | 39.8% | 322 | 7.7% | 319 | 8.6% |
| 2 | 412 | 303 | 26.5% | 335 | 18.7% | 597 | -44.9% | 560 | -35.9% |
| 3 | 292 | 38 | 87.0% | 22 | 92.5% | 194 | 33.6% | 202 | 30.8% |
| 4 | 397 | 202 | 74.3% | 68 | 82.9% | 558 | -40.6% | 511 | -28.7% |
| 5 | 492 | 58 | 88.2% | 15 | 97.0% | 465 | 5.5% | 447 | 9.1% |
| 6 | 283 | 0 | 100% | 0 | 100% | 126 | 55.5% | 142 | 49.8% |
| gew. Mittel | 384 | 384 | 60.4% | 149 | 61.4% | 430 | 29.7% | 410 | 25,1% |

Modifizierung des Ansatzes für den Oberflächenabfluss

Aus den bisher durchgeführten Modellrechnungen geht hervor, dass die Dynamik der Abflussreaktion noch nicht richtig wiedergegeben wird (Abbildung 90, Abbildung 91, Abbildung 94 bis Abbildung 97). Der errechnete Abfluss ist deutlich „hektischer“ als der gemessene, d.h. der rasch auf Regenereignisse reagierende Abfluss wird überschätzt. Dies ist auf eine etwas unbefriedigende Modellierung des schnell wirksamen Abflussanteiles zurückzuführen, der im Modell als Oberflächenabfluss gedeutet wird. Grundsätzlich können die Parameter für diesen Modellbaustein kalibriert werden. Diese Vorgangsweise lässt sich aber nur auf Gebiete mit vorhandenen Abflussmesswerten anwenden, wodurch zwar für den konkreten Fall eine bessere Übereinstimmung der simulierten Abflüsse mit den gemessenen erreicht wird, jedoch keine Verbesserung des Modellalgorithmus erzielt wird. Die physikalische Bedeutung der aus Bodenkennwerten ermittelten Parameter für den Oberflächenabfluss ginge bei einer Kalibrierung ebenso verloren. Daher wurde auf eine reine Parameteroptimierung verzichtet. Anstatt dessen wurde der Modellansatz für den Oberflächenabfluss neu überdacht und modifiziert.

Diese Modifikationen betreffen

- die Parametrisierung jenes Anteiles an den Teilgebietsflächen, der Sättigungsflächenabfluss liefert, durch die Bodenkennwerte,
- die Abschätzung jener Flächen, die im Modell als undurchlässig oder als vollkommen gesättigt angesehen werden und daher bei jedem Niederschlag Oberflächenabfluss liefern und
- die Modellierung des Abflusses von dauervernässten, sumpfigen Flächen.

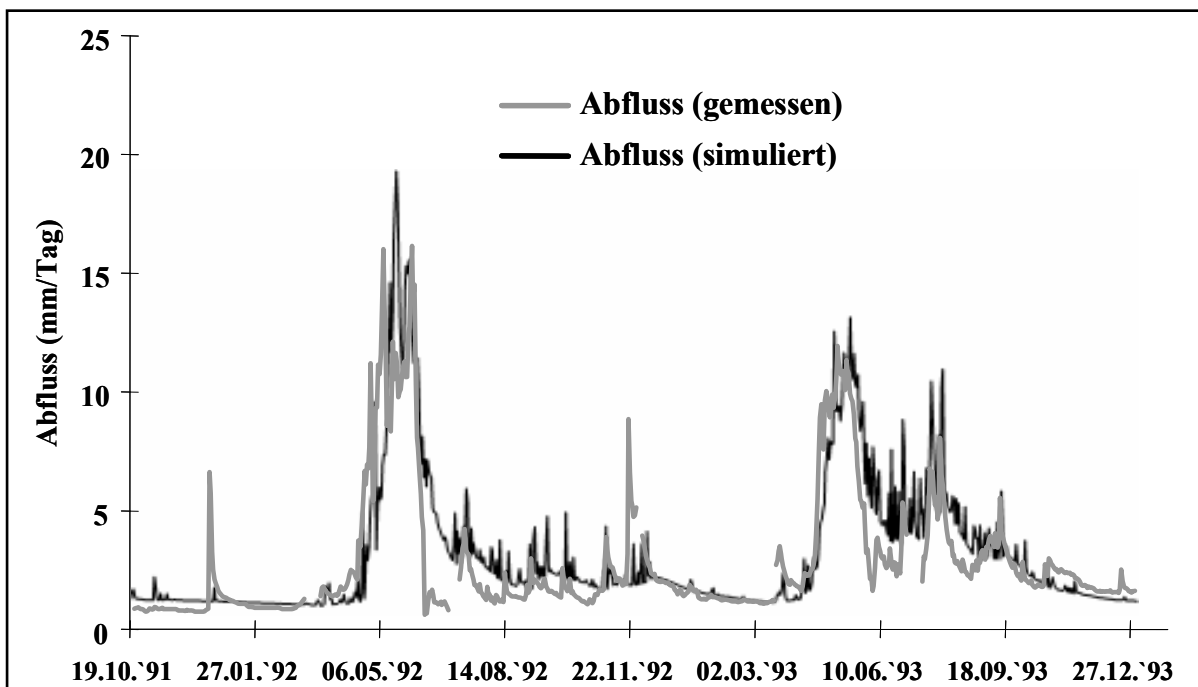


Abbildung 96: Vergleich zwischen gemessenen und mit Standardgradienten.

Im Wasserhaushaltsmodell BROOK wird die Annahme getroffen, dass zumindest in Teilen des Einzugsgebietes der auf diese Flächen fallende Niederschlag zur Gänze (Abflussbeiwert $a = 1$) als Oberflächenabfluss abfließt. Dies ist einerseits auf wasser-

undurchlässigen Flächen der Fall, andererseits auch auf einem gewissen Prozentsatz der sonstigen, mit porösem Boden bedeckten Flächen. Dieser Prozentsatz wird als eine mit zunehmender Wassersättigung des Bodens exponentiell wachsende Funktion abgeschätzt (Abbildung 98). Die entsprechenden Flächen können als Sättigungsflächen gedeutet werden. Bei vollständiger Bodensättigung gilt für das ganze Gebiet der Abflussbeiwert 1.

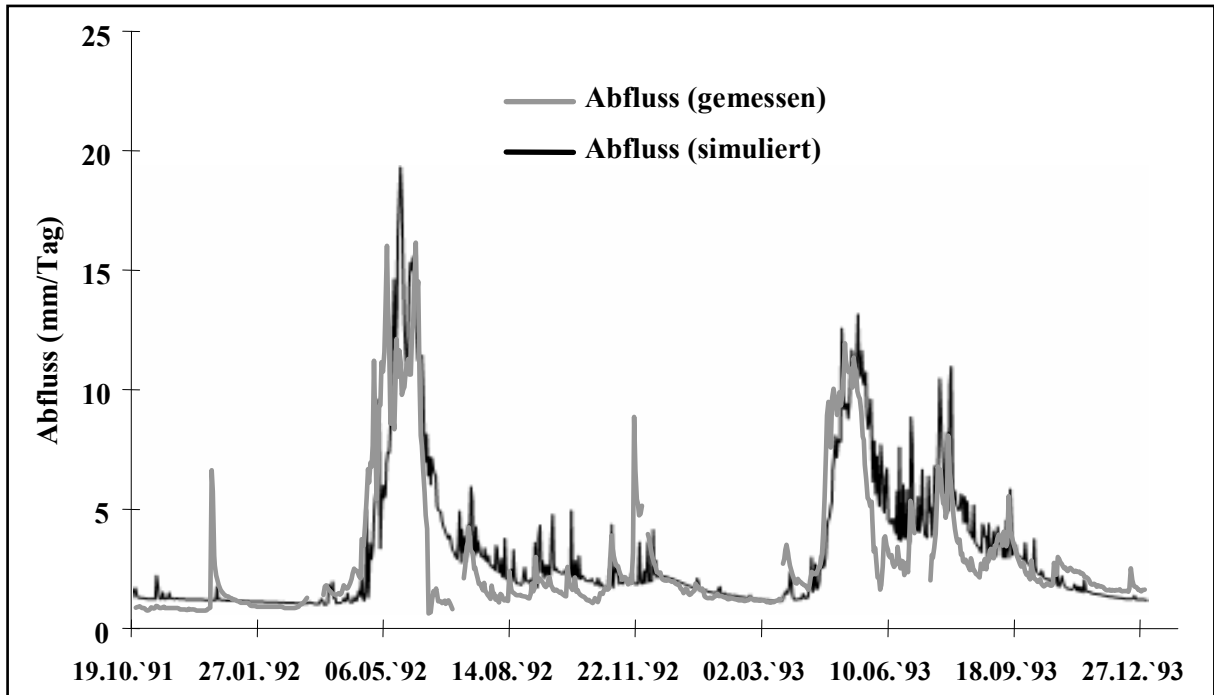


Abbildung 97: Vergleich zwischen gemessenen und mit Temperaturgradienten auf physikalischer Basis berechneten Abflüssen.

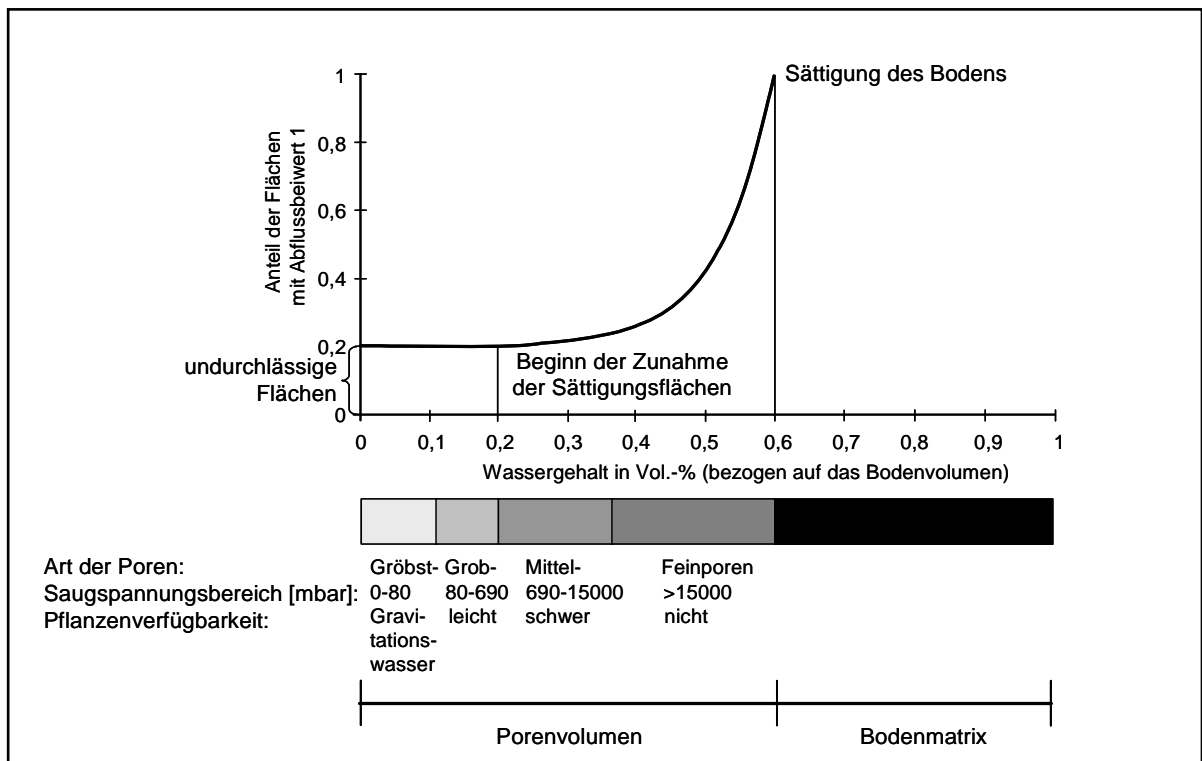


Abbildung 98: In BROOK verwendeter Zusammenhang zwischen der Bodensättigung und dem Anteil der Flächen mit Abflussbeiwert 1.

Für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ können folgende Annahmen getroffen werden:

Als undurchlässig werden angesehen:

(Annahme α): Felsflächen, die an das Gerinnenetz angeschlossen sind

(Annahme β): Felsflächen, Gerinneflächen und dauervernässte Flächen

Die Zunahme des Sättigungsflächenanteiles beginnt, wenn jener Anteil des Porenvolumens wassergefüllt ist, der

(Annahme a): den Gröb- und Grobporen entspricht oder der

(Annahme b): den Gröb-, Grob- und Feinporen entspricht.

(Hierbei wird de facto der Feinporenraum nicht berücksichtigt, weil er mit immobilem Wasser gefüllt ist und daher für die Dynamik der Sättigungsflächenausdehnung keine Bedeutung hat.)

Die Kombination der Annahmen α und a führt zu „hektischen“ Abflussreaktionen und somit zu den am Beginn dieses Kapitels erwähnten unbefriedigenden Simulationsergebnissen. Kombiniert man die Modellannahmen α und b, so zeigt das Simulationsergebnis ein Modellverhalten, das deutlich gedämpfter ist als das beobachtete Abflussverhalten des Löhnersbaches (Abbildung 99). Die Kombination der Annahmen β und b bringt wieder mehr Dynamik in das Simulationsergebnis (Abbildung 100).

Die Annahme β ist jedoch im Lichte der Abflussbeobachtungen an der dauervernässten Feuchtfläche Herzogalm zu starr. Dort waren bei der Ereignisauswertung (vgl. Abbildung 76 im Kap. 7.2.8.1) je nach Vorbefeuchtung Abflussbeiwerte zwischen 0,3 und 0,9 und nicht - wie im Modell angenommen - von konstant 1 beobachtet worden. Es lag daher nahe, die Feuchtflächen nicht als undurchlässig bzw. völlig gesättigt zu modellieren, sondern als ein zusätzliches Teilgebiet mit nahezu undurchlässigem Gleyböden zu definieren. Der damit berechnete Abfluss ist in Abbildung 101 dargestellt.

Verglichen mit den bisherigen Simulationsergebnissen (Abbildung 97) ist der nach den oben beschriebenen Modifikationen simulierte Abfluss nicht mehr so „hektisch“. Die Höhe der gemessenen Abflussspitzen wird nun besser wiedergegeben, obwohl keine Parameterkalibrierung durchgeführt wurde. Lediglich physikalische Überlegungen und Plausibilitätsbetrachtungen sowie die Umsetzung von Messergebnissen in neue Modellansätze führte zu diesem Ergebnis.

Die simulierten Trockenwetterabflüsse liegen aber noch immer meist um 1 - 2 mm über den gemessenen, was möglicherweise auf eine Unterschätzung der Verdunstung zurückzuführen ist. Als weitere Ursache für diese scheinbare Überschätzung des Abflusses kommt auch noch ein eventuell veränderter Pegelschlüssel für den Löhnersbach in Frage. Die Aufzeichnungen des Druckluftpegels am Löhnersbach Anfang Juni 1992 sind vermutlich fehlerhaft (vgl. Abbildung 101), da sie ein Absinken des Trockenwetterabflusses nach einer feuchten Periode unter jenen im Winter zeigen (Abfluss im Winter: 1,5 - 2 mm/d; Abfluss Anfang Juni: 0,5 mm/d).

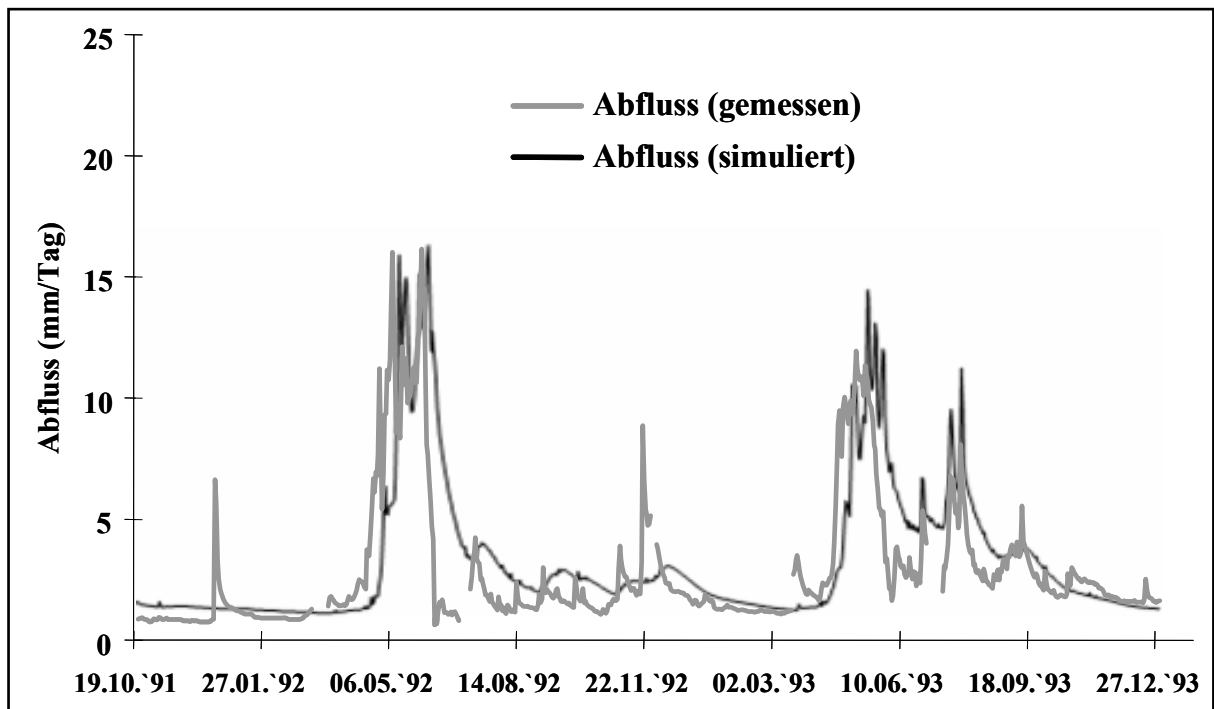


Abbildung 99: Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse unter den Annahmen α (Felsflächen als undurchlässig angenommen) und b (Zunahme des Sättigungsflächenanteils, sobald Gröb-, Grob- und Feinporen wassergefüllt sind).

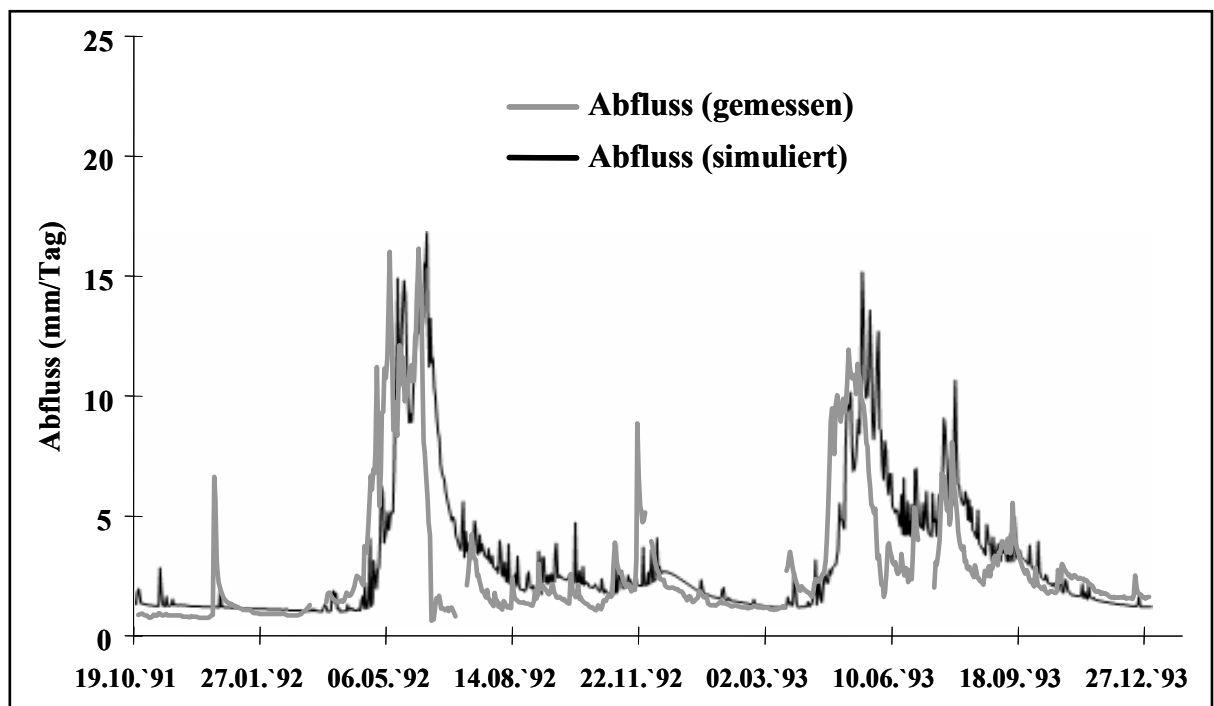


Abbildung 100: Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse unter den Annahmen β (Felsflächen, Gerinneflächen und dauervernässte Flächen als undurchlässig angenommen) und b (Zunahme des Sättigungsflächenanteils, sobald Gröb-, Grob- und Feinporen wassergefüllt sind).

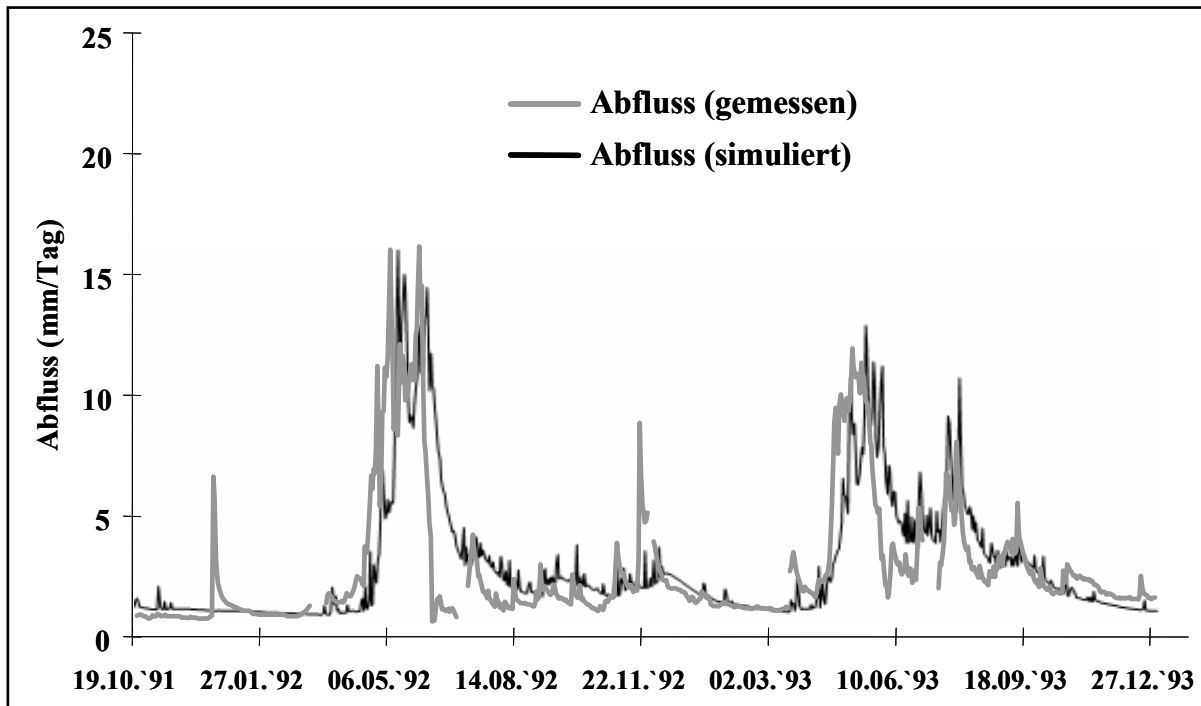


Abbildung 101: Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse, wobei die Feuchtflächen als zusätzliches Teilgebiet mit nahezu undurchlässigem Gley eingeführt wurden.

7.3.1.4.3 Modellrechnungen für die Feuchtfläche Herzogalm

Auf Grund der Abflussmesswerte der Feuchtfläche lassen sich zwei völlig unterschiedliche Abflussanteile erkennen, nämlich Direktabfluss und Basisabfluss, denen verschiedene Einzugsgebiete zuzuordnen sind (vgl. Kap. 7.2.8.2).

Direktabfluss

Der Direktabfluss reagiert sehr rasch auf ein Niederschlagsereignis. Als zugehöriges Einzugsgebiet ist die ständig gesättigte Fläche, also die Feuchtfläche selbst anzusehen, welche eine Größe von ca. 3000 m² besitzt. Auf dieser entsteht nur ein verschwindend kleiner Anteil des Basisabflusses. Der überwiegende Teil des Niederschlages auf die Feuchtfläche gelangt als Direktabfluss sofort zum Abfluss.

Die Modellierung dieses Abflusses wurde für den Zeitraum mit vorhandenen Abflussmessungen durchgeführt (Aug. 1992 bis Aug. 1993, siehe Abbildung 102 und Abbildung 103), wobei analog zur Vorgangsweise bei der Abflussmodellierung des Löhnersbaches zuzüglich ein Jahr für die Einstellung der Anfangswerte des Wassergehalts im Boden vorgeschaltet wurde.

Die Niederschlagsdaten wurden der im Rahmen des Projekts aufgebauten Messstation Herzogalm entnommen. Die wetterbedingt unterbrochene Datenaufzeichnung wurde durch Niederschlagsdaten der Station Saalbach der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ergänzt. Diese Station wurde auch für die Tagesmittelwerte der Temperatur herangezogen.

Die geographischen Parameter wurden aus den Ergebnissen der geodätischen Vermessung vom Sept. 1992 berechnet und sind in Tabelle 27 zusammengefasst. Auf eine

Unterteilung der Feuchtfläche in mehrere Teilgebiete konnte wegen der Homogenität der relativ kleinen Fläche verzichtet werden.

Tabelle 27: Kenngrößen der Feuchtfläche Herzogalm.

| | |
|-------------------------------|------|
| Exposition [Nord=0°, Ost=90°] | 165° |
| mittlere Höhe [m.ü.A.] | 1250 |
| Fläche [m ²] | 2915 |

Der Boden der Feuchtfläche ist tiefgründig und nahezu undurchlässig, das Infiltrations- und Desorptionsverhalten entspricht jenem von Gleyböden und wird daher identisch der Lokalform „Wüstobel“ nach RICHARD & LÜSCHER (1983) gewählt.

Das Gesamtbild des beobachteten Abflusses weicht aber erheblich von jenem des simulierten Abflusses ab, und zwar speziell während der Messperiode 1993 (Abbildung 103). Während dieses niederschlagsreichen Zeitraumes strömte der Feuchtfläche eine große Menge an Grundwasser zu und bestimmte die Dynamik des Basisabflusses. Das Einzugsgebiet dieser unterirdischen Wasserzutritte zur Feuchtfläche ist erheblich größer als die Feuchtfläche selbst (näheres dazu siehe Kapitel „Basisabfluss“). Dieses Phänomen wird im BROOK-Modell nicht modelliert und verursacht weitgehend die Unterschiede zwischen Beobachtung und Simulation.

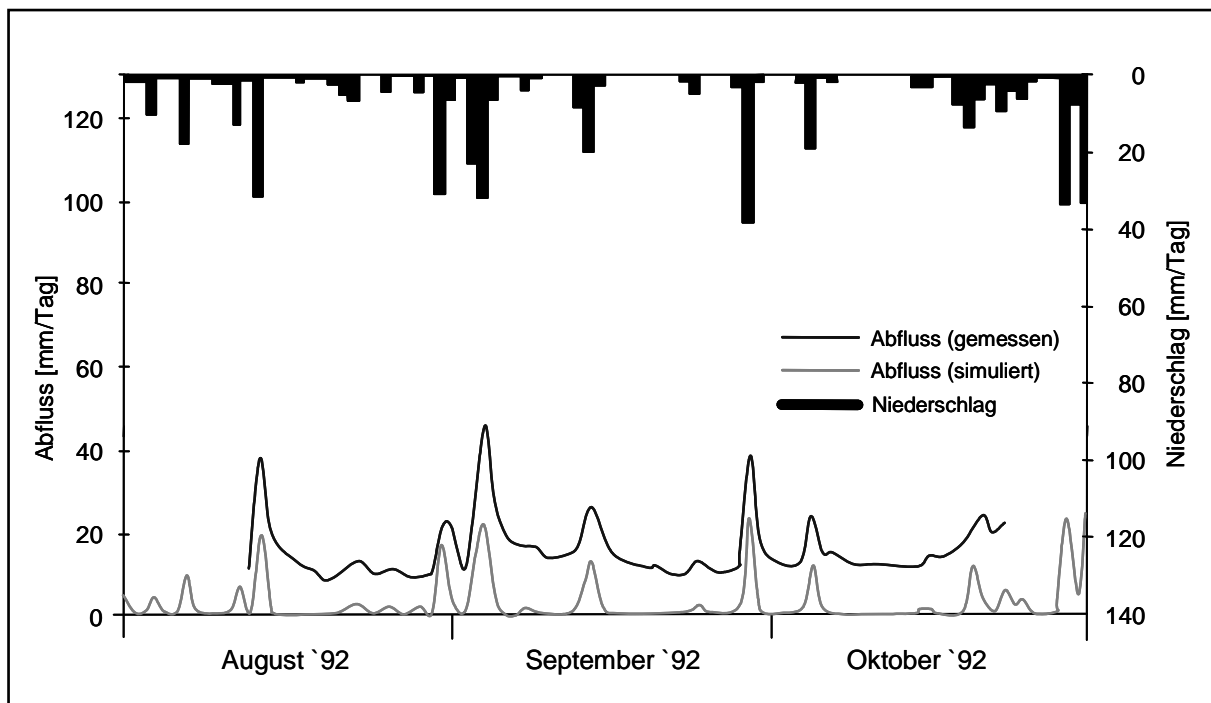


Abbildung 102: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen der Feuchtfläche für die Messperiode 1992.

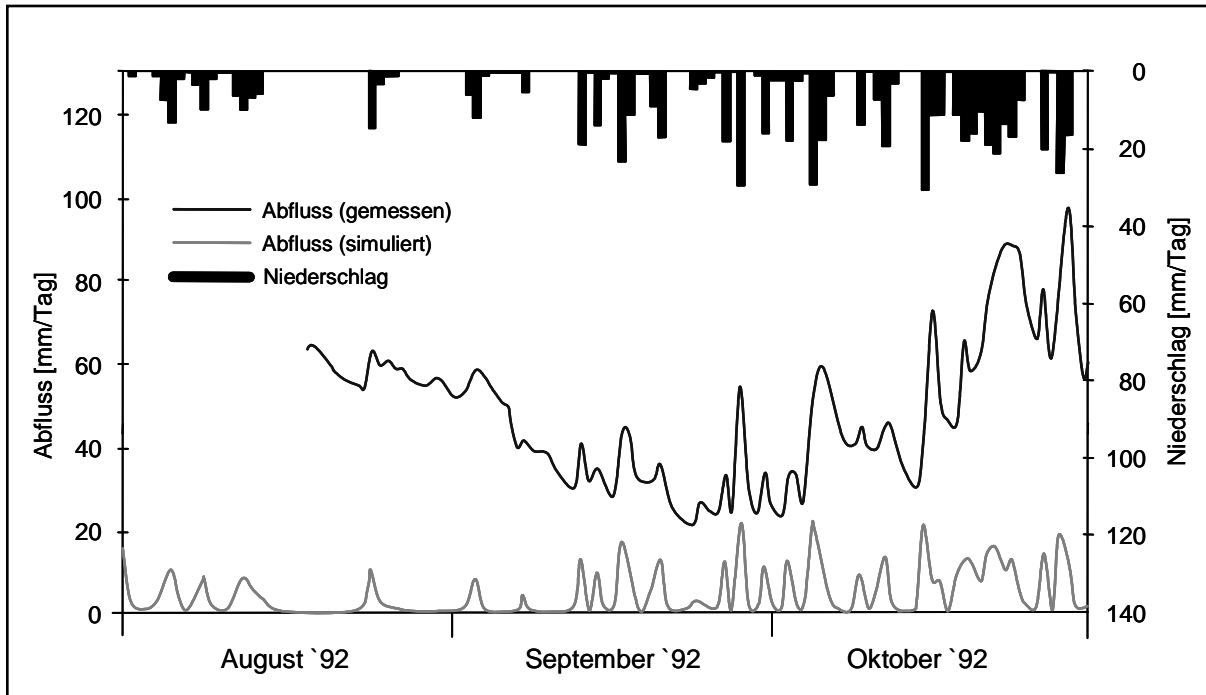


Abbildung 103: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen der Feuchtfläche für die Messperiode 1993.

Basisabfluss

Da die gemessenen Abflüsse deutlich über dem auf die Feuchtfläche fallenden Niederschlag liegen (Tabelle 28), muss ein Teil des Abflusses aus oberhalb liegenden Gebieten stammen. Niederschlag, der auf diese Flächen fällt, versickert fast vollständig und fließt unterirdisch ab. Er tritt in Form von Quellen oberhalb und innerhalb der Feuchtfläche wieder zu Tage und bildet den Basisabfluss.

Tabelle 28: Gemessener Abfluss und Niederschlag für die Feuchtfläche

| | gemessene Abflusshöhe | gemessener Niederschlag |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 13.8.1992 - 14.10.1992 | 957 mm | 252 mm |
| 11.6.1993 - 21. 8. 1993 | 3357 mm | 493 mm |

Mit Hilfe der BROOK-Simulationen kann die Größe des Einzugsgebietes, aus dem der Basisabfluss stammt, abgeschätzt werden. Von der am Messwehr beobachteten Abflussfracht wird die mit BROOK simulierte Fracht des Direktabflusses abgezogen. Die Differenz ist ein guter Schätzwert für die Fracht des Basisabflusses. Dieser wird gespeist aus dem um die Verdunstung reduzierten Niederschlag, der auf das Basisabfluss-Einzugsgebiet fällt. Als guter Schätzwert der Verdunstungshöhe wird das entsprechende Simulationsergebnis von BROOK verwendet. Dividiert man die Fracht des Basisabflusses durch die um die Verdunstungshöhe reduzierte Niederschlagshöhe, so erhält man den gesuchten Schätzwert für die Größe des Basisabfluss-Einzugsgebietes.

Im konkreten Fall der Feuchtfläche - Herzogalm ist dieses Einzugsgebiet ca. 20 ha groß, also um einen Faktor von annähernd 7 größer als die Feuchtfläche selbst. Geolo-

gische Untersuchungen können zur Festlegung der Lage dieses Basisabfluss-Einzugsgebietes herangezogen werden, um anschließend die notwendigen Parameter für die Modellierung des Gesamtabflusses der Feuchtfläche ermitteln zu können.

Die ermittelte Größe des Einzugsgebietes für den Basisabfluss ist als Mindestgröße anzusehen. Bei der Abschätzung wurde implizit davon ausgegangen, dass aller auf diese Fläche fallende Niederschlag abzüglich der Verdunstung zur Feuchtfläche entwässert. Ist dies jedoch nicht der Fall und ein Teil des unterirdischen Abflusses gelangt nicht zur Feuchtfläche, so vergrößert sich das Einzugsgebiet des Basisabflusses.

Eine aussagekräftige Abschätzung einer Maximalgröße dieser Fläche konnte mit den zur Verfügung stehenden Informationen nicht durchgeführt werden. Im Prinzip kommen alle Flächen in Frage deren Entwässerungswege ständig höher als die Feuchtfläche liegen und in diese münden.

7.3.1.5 Fazit

Auf Grund der Anwendung des Wasserhaushalts-Simulationsmodell BROOK sowohl auf das Einzugsgebiet des Längentalbaches-Kühtai, als auch auf jenes des Löhnersbaches, hat sich herausgestellt, dass dieses Modell ein taugliches Werkzeug zur Abschätzung des Bodenwasserhaushaltes in kleinen Einzugsgebieten ist. Modifikationen an der Modellstruktur dienen dem Zweck, dem Modell die Ergebnisse bodenphysikalischer Untersuchungen unmittelbar nutzbar zu machen, die Grenzen physikalischer Plausibilität auch in Extremfällen einzuhalten und die Berechnung effizienter zu machen. Der Benutzerkomfort des Modells wurde wesentlich erhöht.

In seiner nunmehr vorliegenden Form soll das Modell BROOK einerseits dazu benutzt werden, für ein Modell zur Simulation kurzfristiger, auch extremer Ereignisse, die Anfangswerte zu liefern, als auch zur Abschätzung der Wasserhaushaltsgrößen von kleinen Einzugsgebieten, in denen noch keine Abflussdaten erhoben worden sind.

7.3.2 HQSim

7.3.2.1 Beschreibung des Wasserhaushaltsmodells HQSim

Das Wasserhaushaltsmodell HQSim (KLEINDIENST 1996) baut auf das Modell BROOK auf (vgl. Kap. 7.3.1.1, FEDERER & LASH 1978), das ursprünglich für kleine (ca. 1-2 km²), in sich homogene Einzugsgebiete entwickelt worden war. Das Modell wurde an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Birmensdorf zum Hydrotopmodelle umgebaut, so dass die ursprünglichen „homogenen Einzugsgebiete“ nun als Hydrotope innerhalb eines größeren, heterogenen Einzugsgebietes modelliert werden. Die Abflüsse aus den einzelnen Hydrotopen werden sodann zum Abfluss aus dem Gesamtgebiet superponiert. Nach gewissen Modifikationen am Modell (KIRNBAUER ET AL. 1996) wurde das Modell HQSim, das ursprünglich mit einer zeitlichen Diskretisierung von einem Tag rechnete, auf beliebige, auch kürzere Zeitintervalle umgeschrieben (KLEINDIENST 1996). Hiermit war der Einbau eines Ansatzes für das Floodrouting verbunden.

Der Modellcode wurde im Zuge der Diplomarbeit von KLEINDIENST (1996) in Turbo Pascal übertragen, später erfolgte im Rahmen des alpS Projektes A2.1 („Hochwasserprognose für den Inn“) eine Transformation des Codes in Java, um eine plattformunabhängige Anwendung zu ermöglichen. Außerdem wurde der Schneeschmelzmodul überarbeitet (ASZTALOS 2006).

Das Modell HQSim kann über folgende Kerninhalte charakterisiert werden:

- kontinuierliches Wasserhaushaltsmodell
- zeitliche Diskretisierung frei wählbar
- Hydrotopgliederung (vgl. Kap. 7.3.2.3)
- Input: Niederschlag, Lufttemperatur, optional: mehrere Stationen für Niederschlag und/oder Temperatur (mit Angabe der Höhe \Rightarrow Gradient), Temperaturgradient, potentielle Evapotranspiration und relative Luftfeuchtigkeit
- Topographie über Höhe, Neigung und Exposition der Hydrotope
- Schneeschmelze: modifizierter DDF-Ansatz, korrigiert mit dem Verhältnis von (möglicher) Globalstrahlung auf die geneigte zu horizontaler Fläche
- Vegetation: LAI (Blattflächenindex), SAI (Stammflächenindex)
- Oberflächenabfluss nach dem Prinzip der beitragenden Fläche (abhängig von Bodensättigung)
- ungesättigte Zone: nichtlineare Speicher (Leitfähigkeit n. Mualem-van Genuchten)
- Grundwasser: Linearspeicher
- Gerinneabfluss

7.3.2.2 Speicher und Prozesse im Modell HQSim

Zu Beginn des Zeitschrittes wird der Niederschlag auf die Hydrotope (HRUs) aufgeteilt. Dabei wird der Niederschlag für ein Hydrotop (flächen)gewichtet aus den Niederschlagsstationen gerechnet.

In jedem HRU sind folgende interne Speicher vorhanden (Abbildung 104):

- interzipierter Niederschlag
- Schneedecke
- Wasser in der obersten Bodenzone, aus der Verdunstung erfolgen kann
- Wasser in der ungesättigten Zone
- Grundwasser

Abflusskonzentration und Gerinnerouting stellen eigene Prozesse dar, die nach der Berechnung der Abflüsse aller Hydrotope ausgeführt werden (ASZTALOS 2006).

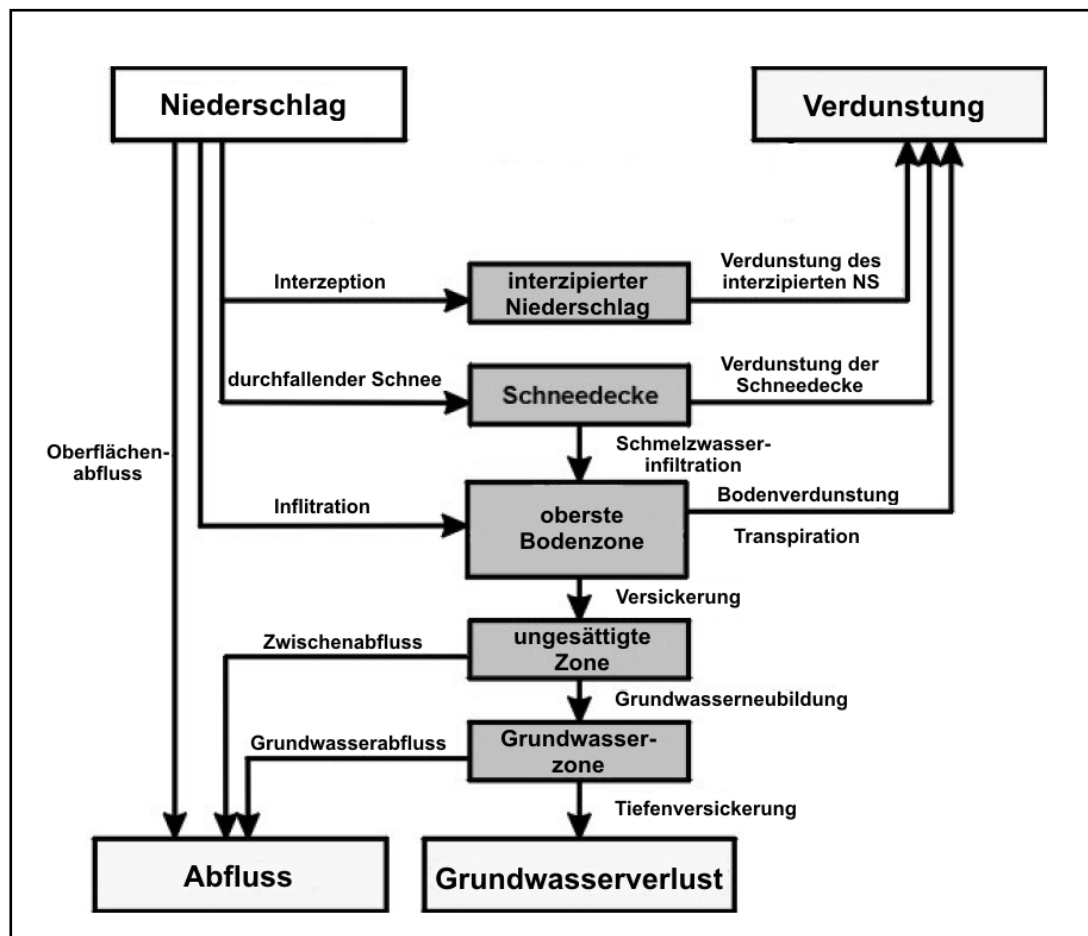


Abbildung 104: Speicher und Prozesse in einem Hydrotop in HQsim (DRABEK 2003; verändert).

7.3.2.3 Raumgliederung

Als Grundlage für die Modellierung des Abflusses mit HQSim ist es notwendig das Einzugsgebiet in hydrotopähnliche Räume gleicher dominanter Abflussbildungsprozesse unter Berücksichtigung physiographischer und hydrogeologischer Gebietsmerkmale zu gliedern, den Hydrological Response Units (HRUs).

Die Datengrundlage für die hydrologische Gliederung des Untersuchungsgebiets „Löhnersbach“ bildet die von TILCH ET AL. (2006b) bereits vorgenommene Raumgliederung, die auf Informationen zum geologischen Untergrund und auf Ergebnisse experimenteller und tracerhydrologischer Untersuchungen basiert (KIRNBAUER ET AL.

1996, TILCH ET AL. 2003, KIRNBAUER ET AL. 2004, KIRNBAUER ET AL. 2005, KIRNBAUER ET AL. 2006, TILCH ET AL. 2006a,). Die sehr großflächige Verteilung der Hydrotupe wurde unter Einbindung von pedologischen Informationen räumlich weiter verfeinert (Abbildung 105). Dies hat den Vorteil, dass bodenphysikalische Parameter flächendetaillierter in die Modellierung mit eingehen können. Die hydrologischen Prozesse in der ungesättigten Bodenzone nehmen innerhalb der Modellstruktur von HQSim einen hohen Stellenwert ein. Eine weitere Differenzierung des Einzugsgebietes wurde nicht durchgeführt. Relief-, Vegetations- oder andere Parameter gehen über die Charakterisierung der einzelnen Hydrotupe mit in die Modellierung ein. Insgesamt wurden 27 Hydrotupe ausgewiesen (Abbildung 105). In der Tabelle 29 sind die Hydrotopbezeichnungen erläutert.

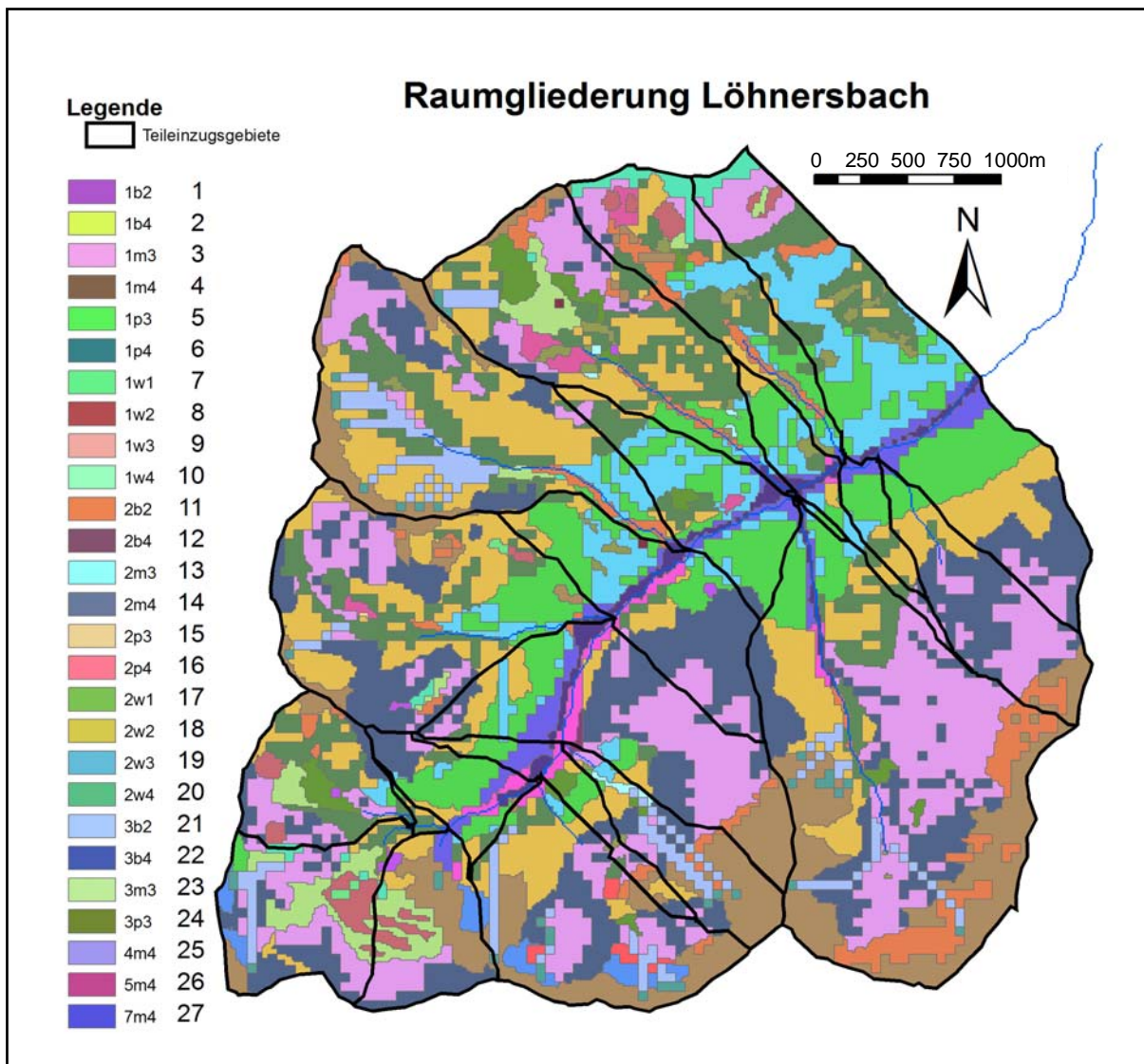


Abbildung 105: Hydrologische Raumgliederung für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“.

Tabelle 29: Liste der einzelnen Hydrotople im Untersuchungsgebiet "Löhrnersbach" als Grundlage für die Abflussmodellierung mit HQSim.

| Nr. | Hydrotobezeichnung | Geologie | Bodentyp |
|-----|--------------------|---|---|
| 1 | 1b2 | aufgelockerter, eher durchlässiger Hangschutt | Braunerde + Moderbraunerde |
| 2 | 1b4 | | podsolige Braunerde + pseudovergleyte Braunerde |
| 3 | 1m3 | | Podsolranker (Übergang Podsol und Ranker) |
| 4 | 1m4 | | Initialboden |
| 5 | 1p3 | | Semipodsol |
| 6 | 1p4 | | Pseudogleypodsol |
| 7 | 1w1 | | Pseudogley |
| 8 | 1w2 | | Hangpseudogley |
| 9 | 1w3 | | Stagnogley |
| 10 | 1w4 | | Niedermoore |
| 11 | 2b2 | verdichteter, eher undurchlässiger Hangschutt | Braunerde + Moderbraunerde |
| 12 | 2b4 | | podsolige Braunerde + pseudovergleyte Braunerde |
| 13 | 2m3 | | Podsolranker (Übergang Podsol und Ranker) |
| 14 | 2m4 | | Initialboden |
| 15 | 2p3 | | Semipodsol |
| 16 | 2p4 | | Pseudogleypodsol |
| 17 | 2w1 | | Pseudogley |
| 18 | 2w2 | | Hangpseudogley |
| 19 | 2w3 | | Stagnogley |
| 20 | 2w4 | | Niedermoore |
| 21 | 3b2 | Talsediment | Braunerde + Moderbraunerde |
| 22 | 3b4 | | podsolige Braunerde + pseudovergleyte Braunerde |
| 23 | 3m3 | | Podsolranker (Übergang Podsol und Ranker) |
| 24 | 3p3 | | Semipodsol |
| 25 | 4m4 | Klippenschutt | ohne Bodenauflage bis Initialboden |
| 26 | 5m4 | Klippen | ohne Bodenauflage |
| 27 | 7m4 | Siedlungsflächen | versiegelter Boden |

7.3.2.4 Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet „Löhrnersbach“

Für die Anwendung von HQSim im Untersuchungsgebiet „Löhrnersbach“ wurden die Parameter der einzelnen Hydrotople auf Grundlage von Messungen und Berechnungen (z.B. Pedotransferfunktionen) bestimmt und erste Simulationen für das hydrologische Jahr 1999 auf Stundenbasis durchgeführt (Abbildung 106).

Die ersten Simulationen zeigen, dass der Oberflächenabfluss überschätzt wird und der Basisabfluss dementsprechend zu gering ist. Die simulierten und gemessenen Rückgangskoeffizienten scheinen aber sehr gut übereinzustimmen, wie die ähnliche Neigung der abfallenden Abflussäste beider Ganmlinien zeigt. Eine Bilanzierung des Wasserhaushaltes zeigt, dass von dem Niederschlagsinput etwa 66 % zum Abfluss gelangen, die errechnete Verdunstung beträgt etwa 450 mm/a. Diese Werte entsprechen den für diesen Naturraum üblichen Werten.

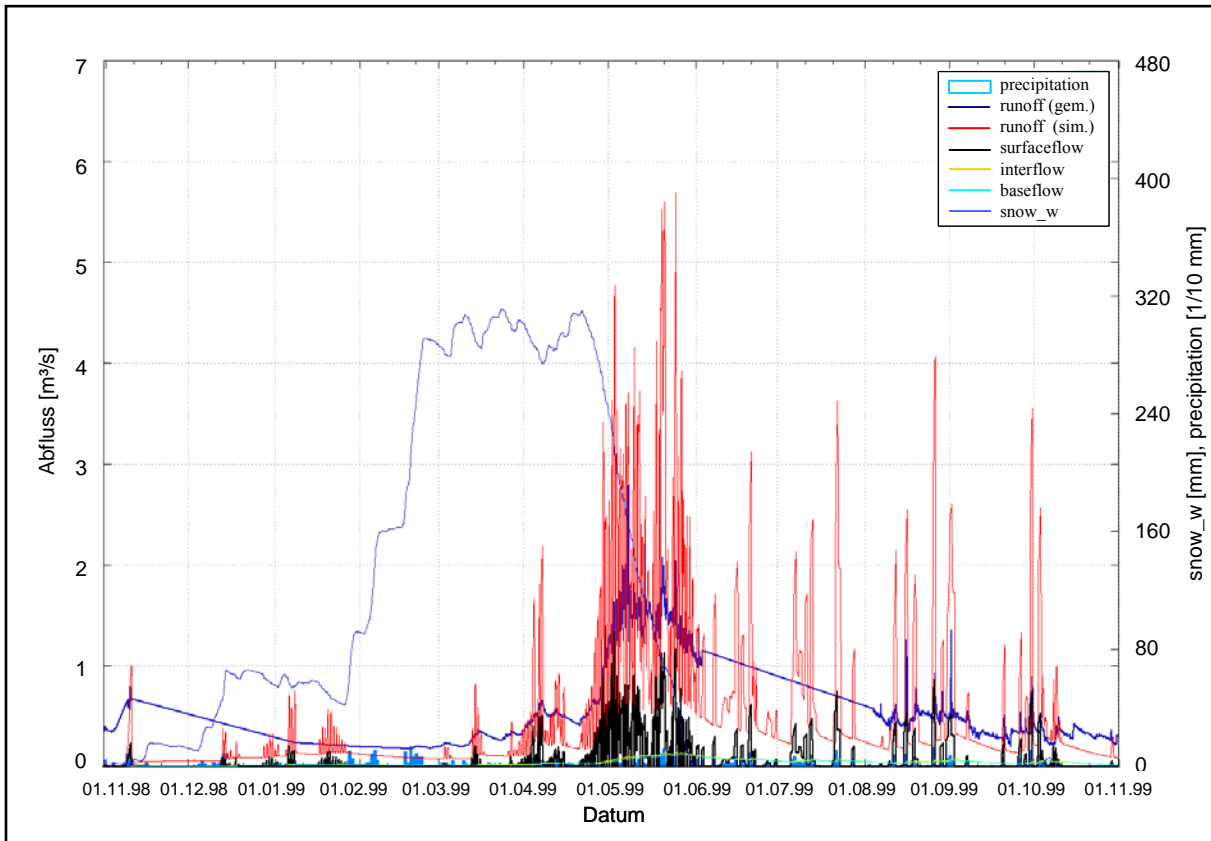


Abbildung 106: Simulierte (unkalibriert) und gemessene Abflussganglinie am Pegel Rammern für das hydrologische Jahr 1997.

7.3.2.5 Fazit

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass keine größeren funktionalen Fehler im Modell enthalten sein dürften, vielmehr die Abflussreaktionen mit den bestehenden Modelleinstellungen noch nicht korrekt wiedergegeben werden. Es gilt daher, bei der weiteren Kalibrierungen die Abflussbeiträge der einzelnen Teileinzugsgebiete detaillierter zu betrachten und die Ergebnisse der Prozessstudien als Kalibrierungskriterium mit einzuarbeiten. So dürfte nämlich aus den orographisch rechtsseitigen Zubringern (z.B. Klamm bach) kaum Oberflächenabfluss zu erwarten sein.

7.3.3 TAC^D

7.3.3.1 Beschreibung des Abflussmodells TAC^D

Das Niederschlag-Abfluss-Modell TAC^D ist ein komplexes Grey-Box-Modell, das im Sinne einer prozessorientierten Einzugsgebietsmodellierung die systeminternen Teilprozesse in einzelnen Modulen nachbildet, wobei im Gegensatz zu anderen Niederschlag-Abfluss-Modellen der Schwerpunkt auf einer möglichst prozessnahen Simulation der Abflussbildung liegt (JOHST 2003). Das ursprünglich semi-distributed, von UHLENBROOK (1999) konzipierte Einzugsgebietsmodell TAC (**t**ra^ce^r **a**id^ed **c**atch^meⁿt **m**odel) wurde von (ROSER 2001) für die flächendetaillierte Anwendung innerhalb des dynamischen GIS PCRaster weiterentwickelt, weshalb sich ein hochgestelltes D, das für „distributed“ steht, anschließt. Die modulare Struktur ermöglicht einerseits den Einbau von Bausteinen anderer konzeptioneller Modelle (z.B. HBV, WASIM-ETH, POTRAD), andererseits die Ausgabe von einzelnen Modulergebnissen.

Das Modell setzt sich aus dem Schneemodul, dem Oberflächen- und Bodenmodul, dem Abflussbildungs- und dem Wellenablaufmodul zusammen (Abbildung 107). Das Abflussbildungsmodul basiert auf einer Gliederung des Einzugsgebiets in hydrotop-ähnliche Räume, zu deren Ausweisung experimentelle, idealerweise tracerhydrologische Untersuchungsergebnisse hinzugezogen werden. Die Simulation der einzelnen Abflussbildungsprozesse erfolgt mithilfe einfacher Speicheranalogien. Neben dem Gesamtabfluss können in TAC^D sämtliche Zwischenergebnisse der Berechnungen für das Gesamtgebiet oder einzelne Rasterzellen ausgegeben werden (JOHST 2003).

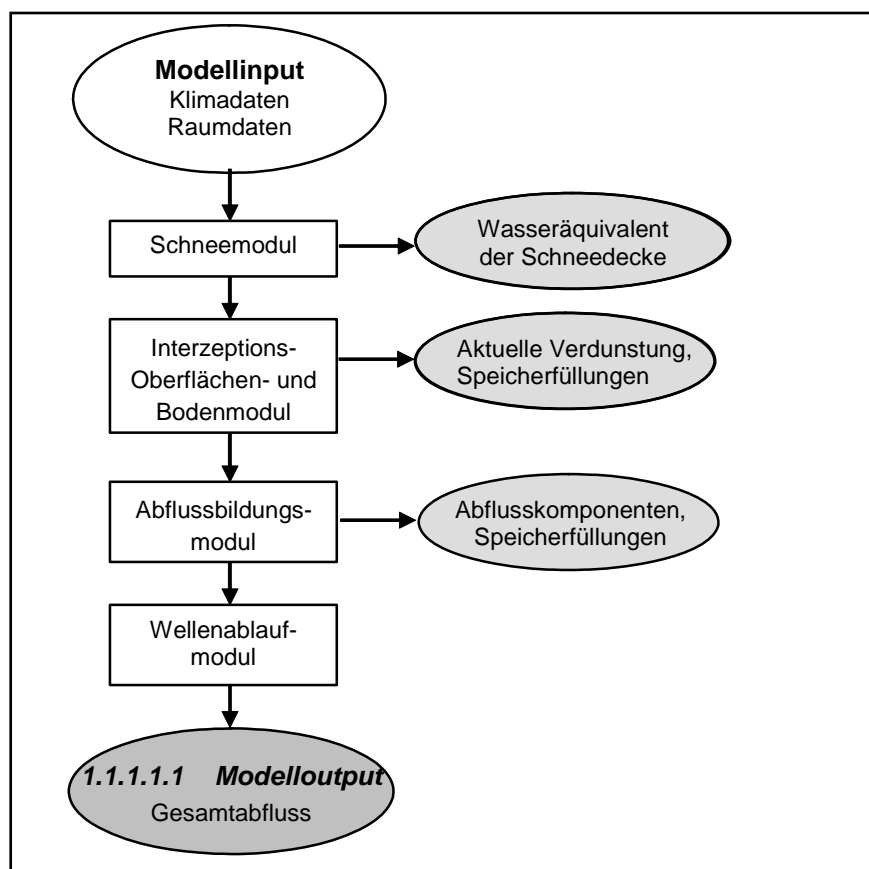


Abbildung 107: Schematischer Modelllaufbau von TAC^D (JOHST 2003; verändert).

7.3.3.2 Raumgliederung

Der konzeptionelle Ansatz der Abflussbildungsroutine in TAC^D beruht auf einer Unterteilung des Einzugsgebiets in hydrotopähnliche Räume gleicher dominanter Abflussbildungsprozesse unter Berücksichtigung der physiographischen und hydrogeologischen Gebietsmerkmale. (UHLENBROOK 1999). Bei der von JOHST (2003) durchgeführten Raumgliederung für das Untersuchungsgebiet „Löhnernsbach“ bildeten die geologisch–lithologisch–geomorphologische Kartierung PIRKLS (1990) und die Vegetationskartierung BURGSTALLERS & SCHIFFERS (1992) die Grundlage. Aus ihnen wurden unter weiterer Berücksichtigung experimenteller und tracerhydrologischer Untersuchungsergebnisse die Informationen zur räumlichen Verteilung der dominanten Abflussbildungsprozesse abgeleitet. Aufgrund der Erläuterungen von MARKART & KOHL (1993b), dass das kleinflächige Mosaik der Bodentypen und deren insgesamt einheitliche hydraulischen Kenngrößen für die Böden keine eindeutige Zuordnung eines Abflussbildungsprozesses ermöglichen, wurde die bodenkundliche Karte bei der Raumgliederung nicht einbezogen.

Die Raumgliederung in Zonen gleicher dominanter Abflussbildungsprozesse ist in Abbildung 108 dargestellt.

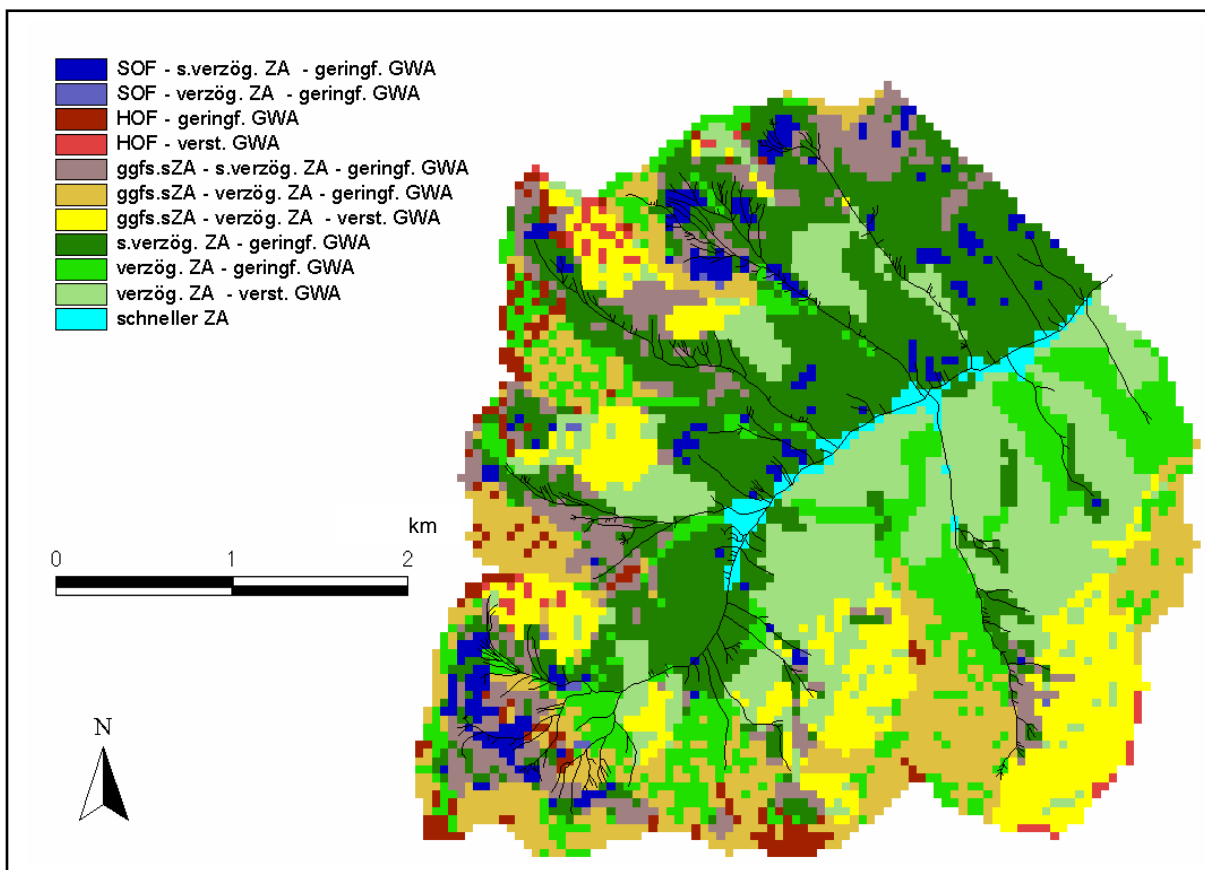


Abbildung 108: Raumgliederung für das Löhnernsbach-Einzugsgebiet (SOF: Sättigungsflächenabfluss; HOF: Horton'scher Oberflächenabfluss; ZA: schneller, gegebenenfalls schneller, verzögerter oder stark verzögerter Zwischenabfluss; GWA: verstärkter oder geringfügiger Grundwasserabfluss (JOHST 2003; verändert).

Das Konzept der Raumgliederung von JOHST (2003) im Löhnernsbachgebiet beinhaltet drei übereinander liegende Ebenen, denen jeweils verschiedene Abflussbildungsprozesse zugewiesen werden. Auf den Sättigungsflächen, den Flächen mit Pioniervegeta-

tion, den Talsedimenten und gegebenenfalls den Flächen mit Zwergstrauchgesellschaften (obere Ebene) werden schnelle Abflusskomponenten generiert, im Untergrund trägt der Hangschuttkörper (mittlere Ebene) mit verzögertem oder stark verzögertem Zwischenabfluss, der Fels (untere Ebene) mit verstärktem oder geringfügigem Grundwasserabfluss zum Gesamtabfluss bei.

7.3.3.3 Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“

Kalibrierung

Im Zuge der Modellkalibrierung wurde der erste geschätzte Parametersatz zur Anpassung der simulierten an die gemessene Abflussganglinie modifiziert JOHST (2003). Entsprechend der Chronologie der Abflussverhältnisse im Löhnersbach wurden zunächst die langsamen Abflusskomponenten (winterliche Niedrigwasserabflüsse), dann die Schneeschmelze und schließlich die schnellen Abflusskomponenten (sommerliche Hochwasser) kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte nach einem *Trial-and-Error-Verfahren*, bei dem die einzelnen Parameter manuell variiert und nach einer visuellen Bewertung der Simulationsergebnisse beibehalten oder verworfen wurden. Hierbei dienten neben der gemessenen Abflussganglinie am Pegel Rammern die Messungen der Schneehöhe an der Klimastation Schmittenhöhe als Anpassungsgröße. Statistische Gütemaße wurden lediglich als sekundäres Kriterium betrachtet, da diese zunächst weit im negativen Bereich lagen und im Einzelfall trotz optisch schlechterer Simulationen eine Verbesserung anzeigten.

Insgesamt konnten 110 Modellläufe durchgeführt werden. Die generelle Dynamik des Abflusses wurde bereits nach wenigen Kalibrierungsläufen gut wiedergegeben (Abbildung 109). Dies betraf die winterlichen Niedrigwasserabflüsse, die Zeitpunkte der Hochwasseranstiege, die Trockenwetterauslaufkurven und die nachlaufenden Wellen. Während der Schneeschmelzperiode und für einzelne Hochwasserereignisse waren die Abweichungen der simulierten von der gemessenen Abflussganglinie jedoch groß.

Die statistischen Gütemaße der ganzjährigen und sommerlichen Abflüsse, dargestellt in Tabelle 30, zeigen gute Modellergebnisse an. Die hier aufgeführte Sommerperiode wurde aufgrund des nachlassenden Einflusses der Schneeschmelze und dem Ende der Abflussmessungen abgegrenzt. Da die Abflüsse während der Schneeschmelze zu etwa gleichen Teilen ober- und unterhalb der Messwerte liegen, fallen die großen Abweichungen dieser Zeitspanne bei der Berechnung der statistischen Gütemaße nicht stark ins Gewicht. Zur besseren Beurteilung der Mittel- und Niedrigwässer wurde die logarithmierte Modelleffizienz $\log R_{eff}$ berechnet. Aufgrund der guten Anpassungen für den winterlichen Niedrigwasserabfluss, erreicht dieses Gütemaß die höchsten Werte. Der Volumenfehler VE gibt für beide Zeitspannen einen simulierten Wasserüberschuss an.

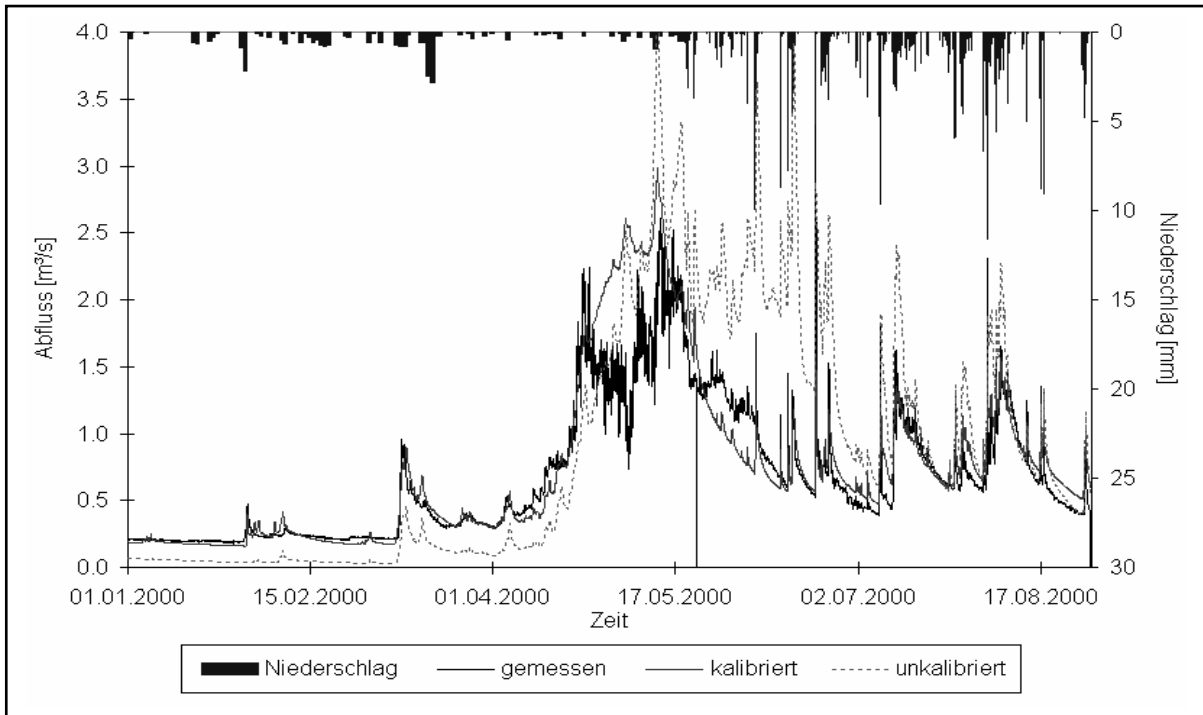


Abbildung 109: Unkalibrierte und kalibrierte Abfluss-Simulationen für das Untersuchungsgebiet „Löhrsbach“, dargestellt für die Zeitspanne 01.01.2000 – 29.08.2000 innerhalb des Kalibrierungsjahres (JOHST 2003; verändert).

Tabelle 30: Gütemaße der Simulationsergebnisse für die Kalibrierungsphase (JOHST 2003; verändert).

| | ganzes Jahr 01.10.99 – 30.09.00 | Sommer 07.06.99 – 28.08.99 |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| $R_{eff} [-]$ | 0,72 | 0,70 |
| $\log R_{eff} [-]$ | 0,91 | 0,92 |
| $R^2 [-]$ | 0,84 | 0,86 |
| $VE [mm/a]$ | -169 | -199 |

Validierung

Als Validierungszeitraum wurde zunächst die Zeitspanne 01.10.1996 bis 30.09.1998 gewählt, da für die Schneeschmelzperiode 1998 durchgehende Abflussmessungen zur Verfügung standen. Die Datenlage der klimatischen Modelleingangsgrößen war jedoch so schlecht (sehr unplausible Messwerte für maximal zwei Niederschlagsstationen), dass diese Simulationsergebnisse nicht weiter verwendet wurden. Da für Mai und Juni 1997 keine Abflussmessungen vorlagen, war eine Validierung der simulierten Schmelzwasserabflüsse in diesem Jahr nicht möglich.

Tabelle 31: Gütemaße der Simulationsergebnisse für die Validierungsphase (JOHST 2003; verändert).

| | ganzes Jahr 01.10.96 – 30.09.97 | Sommer 14.06.96 – 30.09.97 |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| $R_{eff} [-]$ | 0,61 | 0,39 |
| $\log R_{eff} [-]$ | 0,94 | 0,86 |
| $R^2 [-]$ | 0,87 | 0,86 |
| $VE [mm/a]$ | -202 | -329 |

Die Simulationsergebnisse für das hydrologische Jahr 1996/97 sind insgesamt als gut zu bewerten (Tabelle 31). Die niedrige Modelleffizienz und der große Volumenfehler der Sommermonate sind bedingt durch die in diesem Zeitraum durchgehend zu hoch simulierten Abflüsse. Der visuelle Vergleich der simulierten und gemessenen Ganglinien zeigt bezüglich der Dynamik jedoch sehr gute Übereinstimmungen (Abbildung 110).

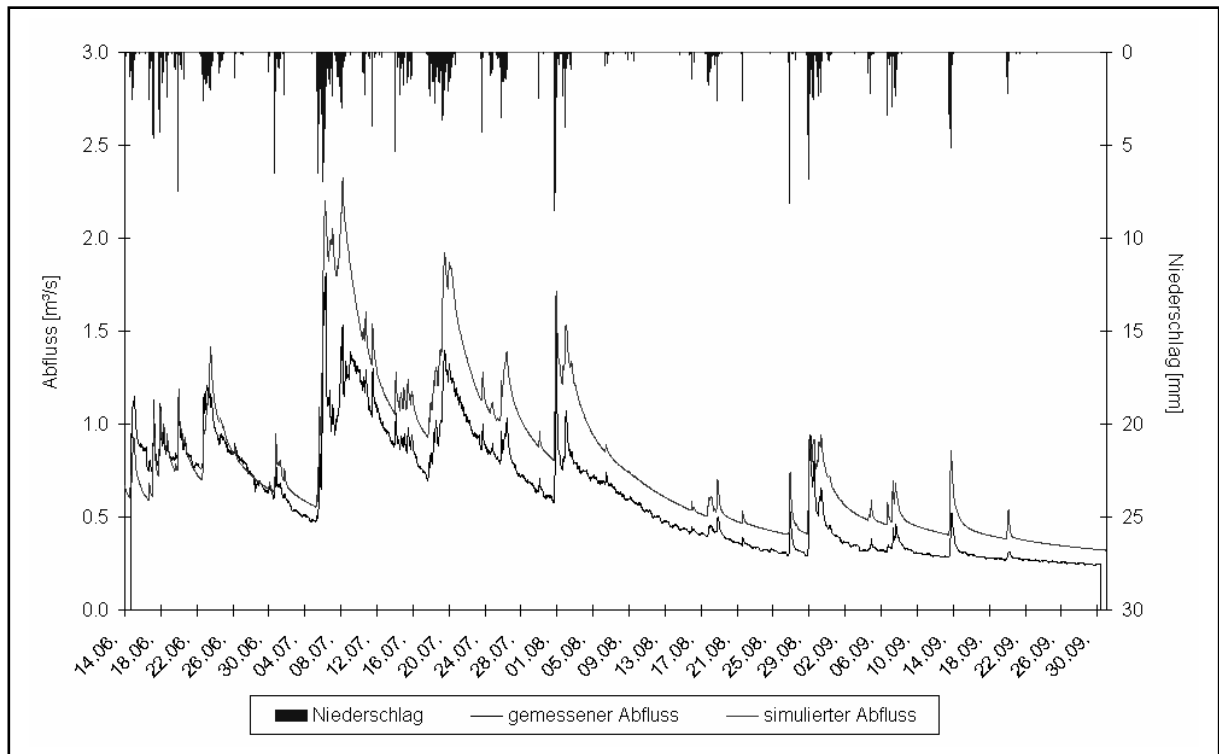


Abbildung 110: Abfluss-Simulation für das Untersuchungsgebiet „Löhrnersbach“ für den Zeitraum 14.06.1996 bis 30.09.1996 der Validierungsphase 1996/1997 (JOHST 2003; verändert).

7.3.3.4 Fazit

JOHST (2003) beurteilt die Simulationsergebnisse, die mit TAC^D für das relativ nasse hydrologische Jahr 1999/2000 erzielt wurden und eine Modelleffizienz von $R_{eff} = 0,72$ aufweisen, als insgesamt zufriedenstellend. Da die Berechnung der allgemein schwer zu modellierende Schneeschmelz-Abflüsse einen starken Einfluss auf die statistischen Gütemaße hatte, erfolgte die Bewertung der Simulationsergebnisse primär über den visuellen Vergleich von gemessenen und berechneten Werten. Besonders gute Anpassungen wurden für die nachlaufenden Wellen, die winterlichen Niedrigwasserabflüsse und die Trockenwetterauslaufkurven erreicht. Die simulierten nachlaufenden Hochwasserwellen entstanden infolge einer Überlagerung von schnellem und verzögerten Zwischenabflusses aus dem allgemeinen und verdichteten Hangschutt.

Eine zufriedenstellende Simulation der Hochwasserspitzen war im Zuge der Kalibrierung nicht möglich (JOHST 2003). Diesbezüglich wurden, basierend auf verschiedenen Hypothesen zur Hochwasserentstehung, Veränderungen im Modellkonzept vorgenommen. Durch eine Modellierung mit 15-minütiger Auflösung konnten schnelle unterirdische Fließprozesse besser simuliert werden und damit eine bessere Anpassung der Hochwasserspitzen und der Abflussschwankungen während der Schneeschmelze

erreicht werden. Die 15-minütige Modellierung bedarf jedoch einer erneuten Kalibrierung. Die Vorstellung, dass die Hochwasser im Löhnersbach neben dem Sättigungsflächenabfluss durch schnelle Zwischenabflüsse generiert werden, stimmt mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen für das Teileinzugsgebiet Limbergalm überein. Der Auf- und Abbau der Schneedecke wurde in TAC^D sehr gut wiedergegeben (JOHST 2003). Die Simulation des Abflusses des mikroskaligen Teileinzugsgebietes Klingleralm war wenig zufriedenstellend. Dies ist könnte einerseits auf die grobe räumliche Auflösung andererseits auf ein mögliches Unterströmen des Pegels Klingleralm zurückgeführt werden. Aus denselben Gründen wurde ein Vergleich zwischen den gemessenen und den simulierten Abflüssen des Pegels Limbergalm nicht für sinnvoll erachtet. Die Validierung für das hydrologische Jahr 1996/1997 kann als erfolgreich angesehen werden. Die sommerlichen Abflüsse wurden infolge eines größeren Abflussereignisses konstant überschätzt, die Abflussdynamik wurde jedoch sehr gut simuliert.

7.3.4 Potsdamer Modell

Ziel dieser modelltechnischen Arbeiten war es, basierend auf den identifizierten Prozessen am Pegel Limbergalm ein Simulationsmodell zu erstellen, das die dominanten Abflussbildungsprozesse abbildet. Die Modellstruktur bzw. die Komplexität des Modells soll dabei die Prozesskenntnis nicht übersteigen. Die Modellentwicklung bezieht sich ausschließlich auf die Abflussbildungsprozesse am Pegel Limbergalm, da dieser im Gegensatz zum Pegel Limbergalm West (eingerrichtet 2001) über mehrjährige Zeitreihen verfügt. Als abflussbildende Raumeinheiten wurden in den experimentellen Arbeiten für den Pegel Limbergalm der Blockschutt aus aufgelockertem Hangschutt, die Rohhumusauflage auf verdichtetem Hangschutt im Wall und die pegelnahe Sättigungsfläche identifiziert. Die dominanten Prozesse dieser Raumeinheiten sind schneller und langsamer Grundwasserabfluss, schneller Zwischenabfluss und Sättigungsflächenabfluss. Für diese Raumeinheiten mit den entsprechenden dominanten Abflussbildungsprozessen wurden Module entwickelt, die das komplexe Abflussbildungssystem am Pegel Limbergalm beschreiben. Diese Module und die Erkenntnisse aus den mikroskaligen Modellierarbeiten werden im Kapitel 7.3.4.5 die Grundlage für die Modellentwicklung und Modellierung der Abflussbildungsprozesse im mesoskaligen Einzugsgebiet des Löhnersbaches bilden. Die nachfolgenden Erläuterungen geben im Wesentlichen die Erläuterungen von ZILLGENS ET AL. (2005 und 2007b) wieder.

7.3.4.1 Beschreibung des Potsdamer Modells

Auf Grundlage der skalenübergreifende, statistischen Analyse von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen (ZILLGENS ET AL. 2005, ZILLGENS ET AL. 2007a) sowie der tracerhydrologischen, hydrochemischen und geophysikalischen Untersuchungsergebnisse im Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm (TILCH ET AL. 2006a), konnte das Wirkungsgeflecht der Abflussbildungsprozesse identifiziert werden und ein schematisches Modellkonzept abgeleitet werden (ZILLGENS ET AL. 2005) (Abbildung 111 und vgl. Abbildung 72 im Kap. 7.2.7.4).

Im entwickelten Modell wird so verfahren, dass die schnellen Prozesse wie *saturation overland flow* (q_{SOF}) und *quick subsurface flow* (q_{duff}) physikalisch basiert sowie in hoher zeitlicher Auflösung simuliert werden, die langsamen Komponenten wie *slow subsurface flow* hingegen mit einem konzeptionellen Speicherroutine modelliert werden. Das Modell ist flächendifferenziert, wobei bei der Raumgliederung aber ausschließlich zwischen den oben genannten Flächen (schnelle und langsame Komponenten) differenziert wird. Die mathematischen Grundlagen für das Simulationsmodell sind in Tabelle 32 aufgeführt.

Da die Abflussbildung sehr schnell nach Eintreten eines Niederschlagsereignisses einsetzt wurde ein sehr kleiner Zeitschritt von 15 Minuten für die Modellierung gewählt. Die Berechnungseinheit in allen Raumeinheiten ist die Rasterzelle von 10×10 m. Die Grundwasserkomponenten und deren Abflusskonzentration werden mittels linearer Speicherkaskaden und die oberflächennahen Prozesse nach dem Prinzip der zweidimensionalen Diffusionsanalogie berechnet, die eine Vereinfachung der St.-Venant-Gleichung darstellt (siehe unten, St.-Venant-Gleichung). Maßgebliche Parameter zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit sind Hangneigung und Rauigkeit. Die Fließrichtung wird in jedem Zeitschritt automatisch aus dem Gefälle der Wasserspiegellagen bestimmt.

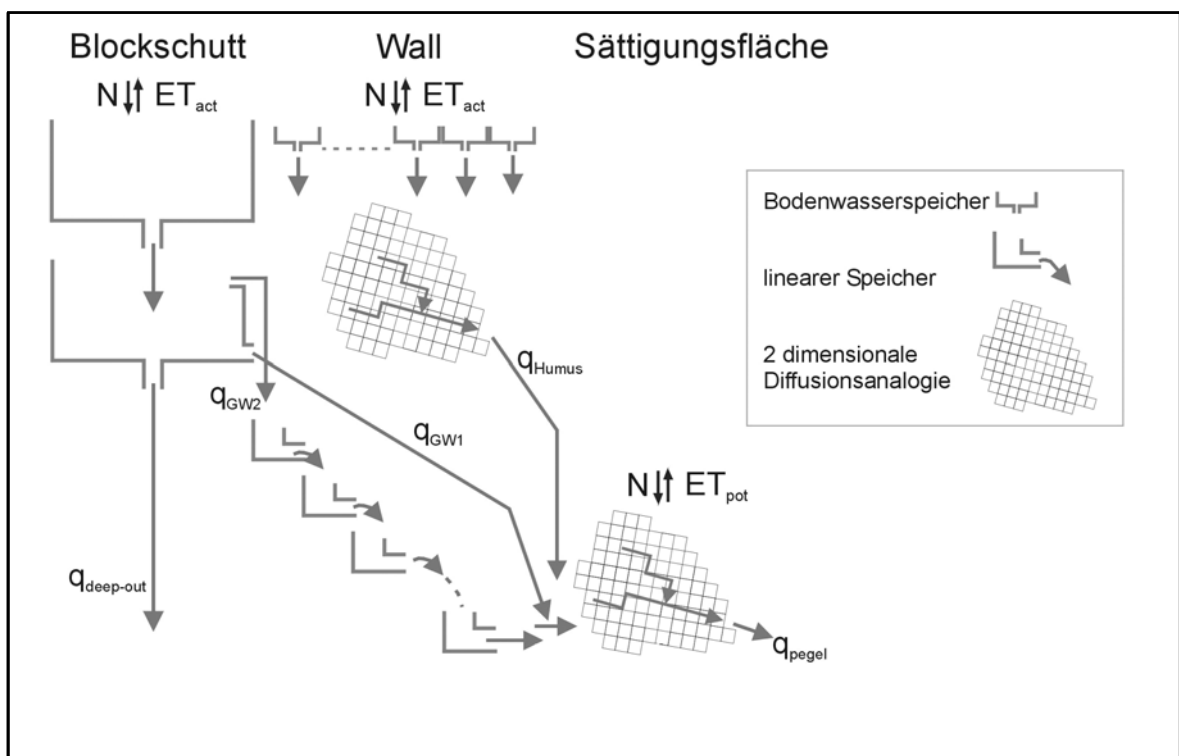


Abbildung 111: Modellkonzept für die Abflussmodellierung des Einzugsgebietes Pegel Limbergalm bezogen auf die identifizierten Fließwege bzw. Abflussbildungsprozesse in Abbildung 72 zur Berechnung von Oberflächenabfluss q_{SOF} , Zwischenabfluss (q_{Humus}) und Basisabfluss (q_{GW1} , q_{GW2} , $q_{deep-out}$) aus verschiedenen Raumeinheiten.

Tabelle 32: Mathematische Grundlagen für die Abflussmodellierung am Pegel Limbergalm (Zeitintervall: 15 min) (ZILLGENS ET AL. 2005; verändert).

| Hydrologischer Prozess | Mathematische Grundlage |
|---|---|
| potenzielle Verdunstung (E_{pot}) | Penman-Wendling (DVWK 1996) |
| Bodenwasser | HBV-Modell (BERGSTRÖM 1992) |
| Grundwasser | Linearspeicher |
| saturation overland flow (q_{sof}) und quick subsurface flow (q_{duff}) | Routing, 2D Diffusionsanalogie (SAKE-Modell, MERZ 1996), (Zeitintervall entsprechend aktueller Kriterien ≤ 15 min) |

St.-Venant-Gleichung:

Q =Abfluss
 A =Fließquerschnitt
 x =Raumkoordinate
 t =Zeit
 g =Erdbeschleunigung
 I_f =Reibungsgefälle
 I_o =Hangneigung
 h =Fließtiefe

$$\underbrace{\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{konvektive Beschleunigung}} + \underbrace{g \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{Druck}} - \underbrace{g(I_o - I_f)}_{\text{Gravitation Reibung}} = 0$$

└─ kinematische Welle
└─ Diffusionsanalogie
└─ dynamische Welle

Zur Berechnung der Abflüsse im Blockschutt, in der Wiese und im Wall werden bis zu drei Ebenen berücksichtigt: 1. Ebene mit Bodenspeicher; 2. Ebene mit oberem Grundwasserspeicher, in der q_{GW1} generiert wird und 3. Ebene mit unterem Grundwasserspeicher, in dem q_{GW2} generiert wird. Die Raumeinheit Wiese gehört nicht zum Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm. In diesem Element werden aber in tieferen Schichten die Flüsse vom aufgelockerten Hangschutt zum Pegel Limbergalm weitergegeben. Im Folgenden wird das Modellsystem in Anlehnung an die oben beschriebenen Ebenen näher erläutert:

Obere Bodenschicht mit Bodenspeicher (SB und SW) bzw. Sättigungsflächenabfluss

Das Bodenspeichermodule wurde aus dem HBV Model (BERGSTRÖM 1992) übernommen. Der Bodenspeicher regelt, wie viel Niederschlag in Abhängigkeit von der Feldkapazität, dem Muldenrückhalt, der aktuellen Verdunstung und der Bodenwasserspeicherung vom Blockschuttfeld versickern kann. Bestimmende Parameter des Bodenmoduls sind die maximale Speicherung des Bodens und die Muldenspeicherung (FC), die aktuelle Bodenfeuchte, das Verhältnis E_{pot}/E_{act} , der Faktor LP zur Reduktion der potentiellen Verdunstung und der Formparameter BETA. Im Blockschuttfeld sickert das Bodenwasser in den oberen Grundwasserspeicher. Der Wall ist im Gegensatz zum Hang mit aufgelockertem Hangschutt durch eine mächtige Humusaufgabe charakterisiert, die typischerweise unter Zwergstrauchheide (Rhododendretum) entsteht. Wird im Wall die Feldkapazität überschritten, entsteht schneller Zwischenabfluss q_{Humus} , dessen Strömung durch die zweidimensionale Diffusionsanalogie beschrieben wird. q_{Humus} wird an die höchste Rasterzelle der Sättigungsfläche, die an das Hydrotop Wall angrenzt, weitergegeben.

Die Sättigungsfläche besitzt anstelle des oben beschriebenen Bodenspeichers einen Muldenspeicher mit der Höhe h . Während eines Niederschlagsereignisses wird die Verdunstung auf der Sättigungsfläche vernachlässigt, und während der niederschlagsfreien Zeit wird die Verdunstung aus der potentiellen Verdunstung nach Penman-Wendling (DVWK, 1996) berechnet. Verdunstung findet so lange statt, wie Wasser im Muldenspeicher enthalten ist. Während eines Niederschlagsereignisses kommt es nach Auffüllung des Muldenspeichers zu Sättigungsflächenabfluss, der über die zweidimensionale Diffusionsanalogie rasterbasiert zum Pegel geroutet wird.

In der niederschlagsfreien Zeit wird für die Verdunstung die potentielle Verdunstung angenommen, die nach Penman-Wendling (DVWK, 1996) berechnet wird. Es wird angenommen, dass während eines Niederschlagsereignisses auf der Sättigungsfläche keine Verdunstung stattfindet. Zu Beginn eines Niederschlagsereignisses wird ein vom Basisabfluss zu Ereignisbeginn abhängiger Muldenspeicher aufgefüllt. Für den verbleibenden Effektivregen wird Abflussbeiwert 1 angenommen. Der Pegelabfluss setzt sich somit aus den Flüssen q_{gw1} , q_{gw2} , q_{Humus} und dem Effektivregen zusammen, welche die Fläche räumlich verteilt durchfließen.

Oberer Grundwasserspeicher 1 mit S1Blockschutt, S1Wiese und S1Wall

Im oberen Grundwasserspeicher S1 wird der permanente Grundwasserabfluss q_{GW1} generiert. Alle Speichereinheiten haben einen seitlichen Abfluss q_{GW1} und einen Abfluss q_{perc1} in die darunter liegende Ebene. In den Raumeinheiten mit aufgelockertem Hangschutt und Wiese hat der Grundwasserspeicher weiterhin einen Überlauf $q_{über}$, der aktiv wird, wenn die maximale Speicherfüllung vol_{max1} erreicht wird. q_{perc} und $q_{über}$ werden jeweils an den darunter liegenden Grundwasserspeicher S2 weitergeleitet. Der Überlauf $q_{über}$ steht dabei für einen zusätzlichen Makroporenfluss nach Sättigung im Blockschuttfeld und q_{sZA} für einen zusätzlichen Fluss, der zum Pegel Limbergalm West geleitet wird. Solche Überläufe wurden auch schon von DISSE (1996) verwendet. Trotz geophysikalischer Untersuchungen ist wenig bekannt über Unterschiede in der Speichermächtigkeit innerhalb den Raumeinheiten Blockschutt und Wiese bestehend aus Hangschutt und Hangschutt matrixgestützt (vgl. Abbildung 72 im Kap. 7.2.7.4). Um die Anzahl freier Parameter klein zu halten, werden für die Parameter, die q_{GW1} bestimmen (h , vol_{max1} , k_{qgw1} und k_{perc}), in den verschiedenen Raumeinheiten jeweils gleiche Werte angenommen.

Unterer Grundwasserspeicher 2 mit S2

Der untere Grundwasserspeicher S2 repräsentiert das geklüftete Grundgebirge. Es gibt zwei Abflüsse, q_{out} und q_{GW1} . Wird bei länger anhaltenden Niederschlägen das maximale Speichervolumen S2 erreicht, läuft der Speicher über, und q_{GW2} wird initiiert. Somit tritt q_{GW2} episodisch auf und simuliert die nachlaufende Welle. Der Abfluss q_{gw2} durchfließt die Strecke vom Blockschutt bis zur Feuchtfäche. Die Speicher liegen in allen Raumeinheiten im geklüfteten Grundgebirge und werden jeweils durch lineare Speicherkaskaden beschrieben.

7.3.4.2 Aufbereitung der Eingangsdaten

Als Messdaten gehen in die Modellierung die Niederschlagsdaten und Temperaturdaten der Messstation Schattberg ein (vgl. Kap. 6.1.2). Als Datengrundlage für die Modellierung werden die Jahre 1997-2002 herangezogen (Tabelle 33). Da keine Daten zu Schneehöhen im Gebiet vorhanden sind, und die Niederschlagsstation Schattberg nur flüssigen Niederschlag misst, werden für die Modellierung nur die Zeitabschnitte in der schneefreien Zeit betrachtet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 33 aufgeführten Zeiträume. In den Jahren 1998, 1999 und 2000 gab es immer wieder Ausfälle der Niederschlagsstation Schattberg. Bei solchen Ausfällen wurde auf Niederschlagsmessungen der umliegenden Stationen zurückgegriffen.

Tabelle 33: Zeiträume für die Modellierung (Kalibrierung + Validierung; Zeitschritt 15 min).

| Nutzung | Zeitperiode | Simulationstage | Zeitperioden mit N und temp < 0 |
|--------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------|
| Kalibrierung | 19.06.1997-29.09.1997 | 103 | - |
| Validierung | 23.06.1998-12.10.1998 | 112 | 3 |
| Validierung | 05.07.1999-30.09.1999 | 88 | 2 |
| Validierung | 07.07.2000-05.10.2000 | 91 | 5 |
| Validierung | 13.06.2001-15.10.2001 | 123 | 5 |
| Validierung | 26.06.2002-29.09.2002 | 96 | 0 |

Der Landschaftsraum im Bereich Limbergalm ist höchst komplex, und die hydrometeorologischen Messungen mussten unter erschwerten Bedingungen durchgeführt werden. Daher sind die Niederschlags- und Abflussmessungen mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet. Der Pegel Limbergalm liegt auf einer Höhe von 1780 m ü. NN. Der Abfluss wird in ein Rohr gefasst, in einen Behälter weitergeleitet und tritt über ein Messwehr (Dreiecksüberfall; HAGER 1990) wieder ins Gerinne aus. Der höchste Punkt des Einzugsgebietes liegt bei ca. 2010 m ü. NN. Bei einer Längsausdehnung von ca. 450 m (Luftlinie) ergeben sich somit Höhenunterschiede von 230 m. Bei solchen Höhenunterschieden ist mit einem schnell reagierenden Abflussregime zu rechnen, das besondere Ansprüche an die Abflussfassung und die Messtechnik stellt. Abflussmessungen zu Zeiten der Schneeschmelze und bei großen Abflussspitzen im Sommer können fehlerhaft sein, da bei großen Abflussmengen nicht immer der ganze Abfluss in das Rohr eintritt.

Zu den bekannten Unsicherheiten, die mit punktuellen Niederschlagsdaten verbunden sind, kommt im mikroskaligen Einzugsgebiet erschwerend hinzu, dass die Niederschlagsstation außerhalb und ca. 200 m höher als das betrachtete mikroskalige Einzugsgebiet liegt. Niederschlag, der an der Messstation Schattberg als Schnee/Schneeregen niedergegangen ist und aufgrund fehlender Messtechnik nicht erfasst wird, kann in der Niederschlag-Abflussmodellierung zwei Fehler erzeugen:

- Es besteht die Möglichkeit, dass aufgrund des Höhenunterschiedes von 200 m Niederschlag an tieferer Stelle im Einzugsgebiet als flüssiger Niederschlag niedergegangen ist und eine Abflussreaktion hervorgerufen hat, die dann durch fehlenden Niederschlagsinput im Modell nicht simuliert werden kann.
- Zu solchen Zeiten kann auch Schnee im Einzugsgebiet gefallen sein, dessen Menge und Abtauverhalten nicht bekannt sind und somit auch nicht durch die Simulation wiedergegeben werden kann.

Die Abgrenzung des Einzugsgebietes erfolgte auf der Basis eines digitalen Geländehöhenmodells (DGM) mit 10*10 m Auflösung, Felduntersuchungen und Kartierungen. Die Einzugsgebietsgrenzen sind im Modell statisch, obwohl aus den Feldversuchen bekannt ist, dass die EZG-Grenzen in Abhängigkeit von der Gebietsfeuchte variieren (TILCH ET AL. 2003, 2006a).

7.3.4.3 Anwendung des Modells auf das Einzugsgebiet Pegel Limbergalm

ZILLGENS ET AL. (2005, 2007b) haben den Abfluss für das Einzugsgebiet Pegel Limbergalm mit obigen Modell unter Verwendung der Niederschlagsdaten der Gebietsstation Schattberg und einer aus Gebietskenntnis abgeleiteten hydrologischen Raumgliederung simuliert. Die Kalibrierung des Modells erfolgte anhand der hydrologischen Messdaten im Zeitraum Juni bis September 1997, die Validierung wurde anhand der Daten aus den Sommermonaten der Jahre 1998 bis 2002 durchgeführt. Die ausschließliche Verwendung von sommerlichen Messdaten liegt darin begründet, dass zum einen während der Winterzeit die Messinstrumente abgebaut werden zum anderen die hydrologischen Prozesse insbesondere die räumliche und zeitliche Variabilität der Schneedecke im Einzugsgebiet „Limbergalm“ nicht adäquat erfasst werden kann (vgl. Kap. 6.1.2).

7.3.4.3.1 Parametrisierung und Modellkalibrierung

Die Kalibrierung führten ZILLGENS ET AL. (2007b) auf der Basis von visuellen Plausibilitätstest durch und konzentrierten sich auf eine gute Wiedergabe der beiden Ereignistypen „unimodal“ und „bimodal“, die für schnelle bzw. langsame Fließprozesse stehen. Der Einsatz von Optimierungstools zur Modellkalibrierung ist bei dieser Zielsetzung schwierig, da die Kriterien der Optimierung in der Regel über Gütemaße, abgeleitet aus der Gegenüberstellung von simuliertem und gemessenem Gesamtabfluss, erfolgt. In der Vorphase der Kalibrierung zeichnete sich schon früh ab, dass die konkrete Abbildung der schnellen Peaks (Kalibrierung von K_{str} und K_{zstr} ; vgl. Tabelle 34) oder die zutreffende Beschreibung der „nachlaufenden Welle“ kaum Einfluss auf die statistischen Gütemaße hatte. Somit wurde auf eine automatisierte Optimierung der Kalibrierungsparameter verzichtet und eine manuelle Kalibrierung durchgeführt. Die Bewertung der Modellsimulation erfolgte unter Berücksichtigung der berechneten Gütemaße durch den visuellen Vergleich von simulierter und gemessener Abflussganglinie. Hierbei wurde besonderer Wert auf die Wiedergabe der nachlaufenden Wellen und der Abflussspitzen gelegt. Zuerst wurden die Parameter der langsamen Abflussprozesse, dann die der nachlaufenden Welle, und zum Schluss die Rauigkeitsbeiwerte für Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss angepasst.

Der bei der Modellkalibrierung bestimmte Parametersatz ist in Tabelle 34 und die damit erzielten Simulationsergebnisse in Abbildung 112 und Abbildung 113 aufgeführt. Generell ist festzustellen, dass die Dynamik der Abflussbildung im Kalibrierungsjahr 1997 mit dem Simulationsmodell sehr gut beschrieben werden kann (Abbildung 112). Sowohl der Trockenwetterabfluss (August bis September) als auch die nachlaufenden Wellen werden durch das Simulationsmodell sehr gut wiedergegeben. Im Kalibrie-

rungszeitraum wurden insgesamt drei deutlich ausgeprägte nachlaufende Wellen und eine schwach ausgeprägte nachlaufende Welle gemessen, die durch das Simulationsmodell sehr gut abgebildet werden. Die simulierten Abflussvolumina um den 25.06.97 wurden leicht unterschätzt und die um den 10.07.97 eher überschätzt. Insgesamt deuten die Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Abflüsse an, dass die Abflüsse tendenziell unterschätzt werden (Abbildung 113, rechts), was auch durch einen t-Test der Residuen bestätigt wird (Signifikanzzahl $\alpha = 0.05$).

Tabelle 34: Parameter des Abflussmodells (Kalibrierungsparameter), Zeitschritt 15 min (ZILLGENS ET AL. (2007b); verändert).

| Parameter der Diffusionsanalogie | Beschreibung | Wert | Einheit |
|----------------------------------|--|-------|-------------------|
| K_{str} | Sättigungsflächenabfluss | 1.5 | $[m^{1/3}/s]$ |
| K_{str_z} | Zwischenabfluss in Humusauflage | 0.5 | $[m^{1/3}/s]$ |
| Parameter der Speicher | | | |
| q_{GW1} | permanenter Grundwasserabfluss | | |
| k1 | Speicherkonstante Blockschutt und Blockschutt matrixgestützt | 0.010 | $[\Delta t^{-1}]$ |
| k_perc1 | Speicherkonstante für Sicherung durch Blockschutt | 0.001 | $[\Delta t^{-1}]$ |
| volmax1 | maximale Speicherkapazität | 38.0 | [mm] |
| q_{GW2} | episodischer Grundwasserabfluss | | |
| k2 | Speicherkonstante des geklüfteten Grundgebirges | 0.100 | $[\Delta t^{-1}]$ |
| k_perc2 | Speicherkonstante für Sickerung geklüftetes Grundgebirge | 0.004 | $[\Delta t^{-1}]$ |
| volmax2 | maximale Speicherkapazität geklüftetes Grundgebirge | 210.0 | [mm] |

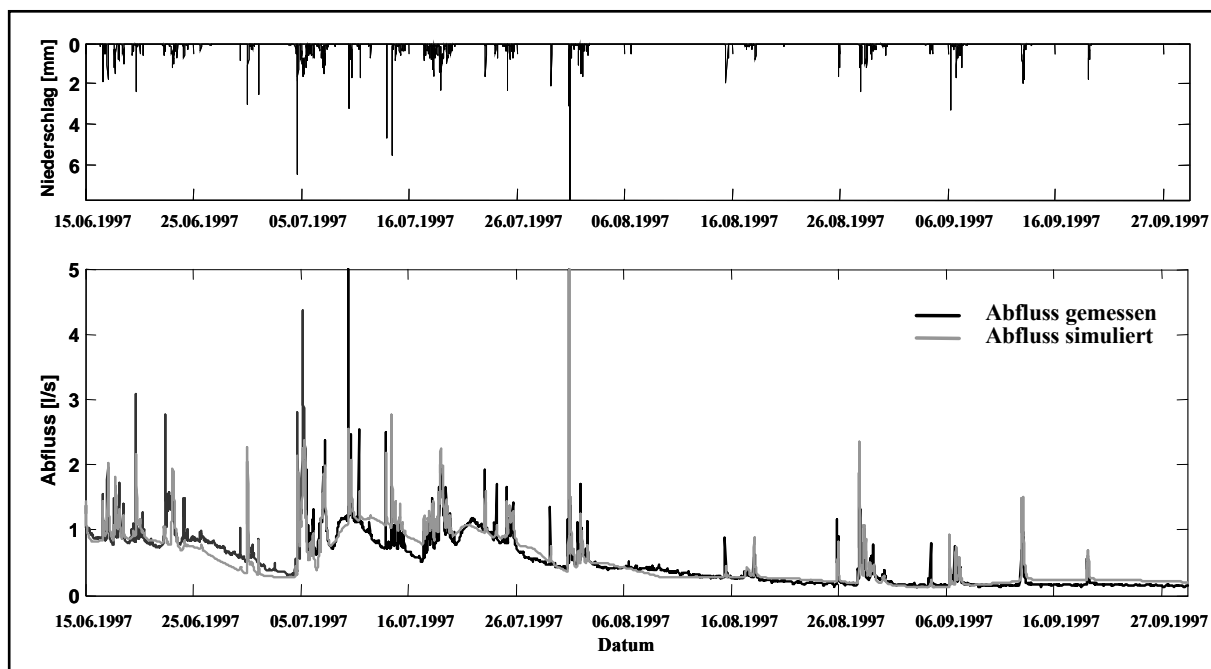


Abbildung 112: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse und Niederschlag im Kalibrierungszeitraum 1997.

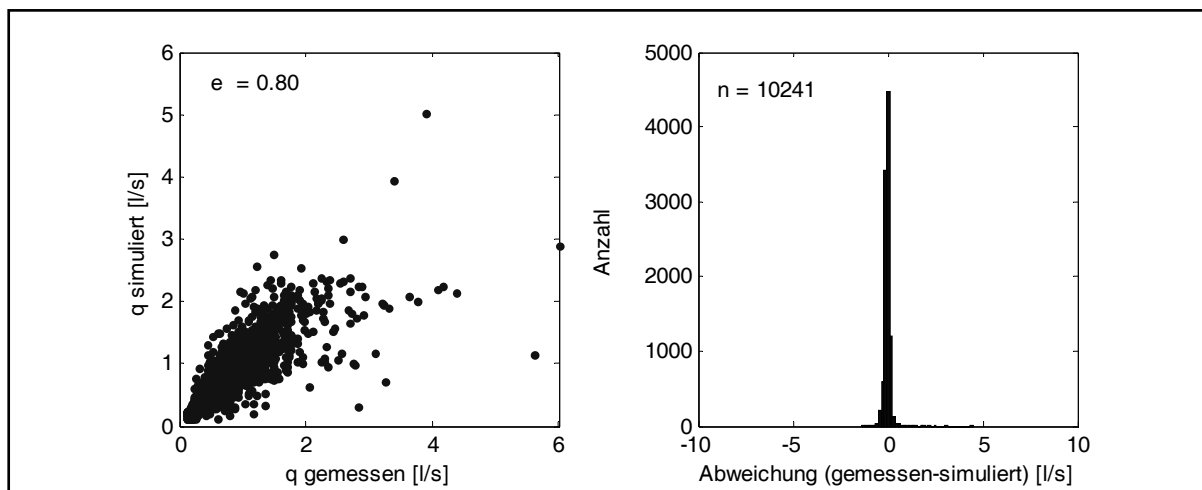


Abbildung 113: Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen (links) und Histogramm der Residuen (rechts) für die Kalibrierungsperiode. Die Abflüsse werden leicht unterschätzt. (e=Effizienzkoeffizient nach NASH & SUTCLIFFE (1970), n=Anzahl Wertepaare).

Abflusskomponenten des Ereignistyps 2 mit nachlaufender Welle (bimodal):

In Abbildung 114 sind die zwei nacheinander aufgetretenen nachlaufenden Wellen (05.07.1997-31.07.1997) mit ihren Abflusskomponenten dargestellt.

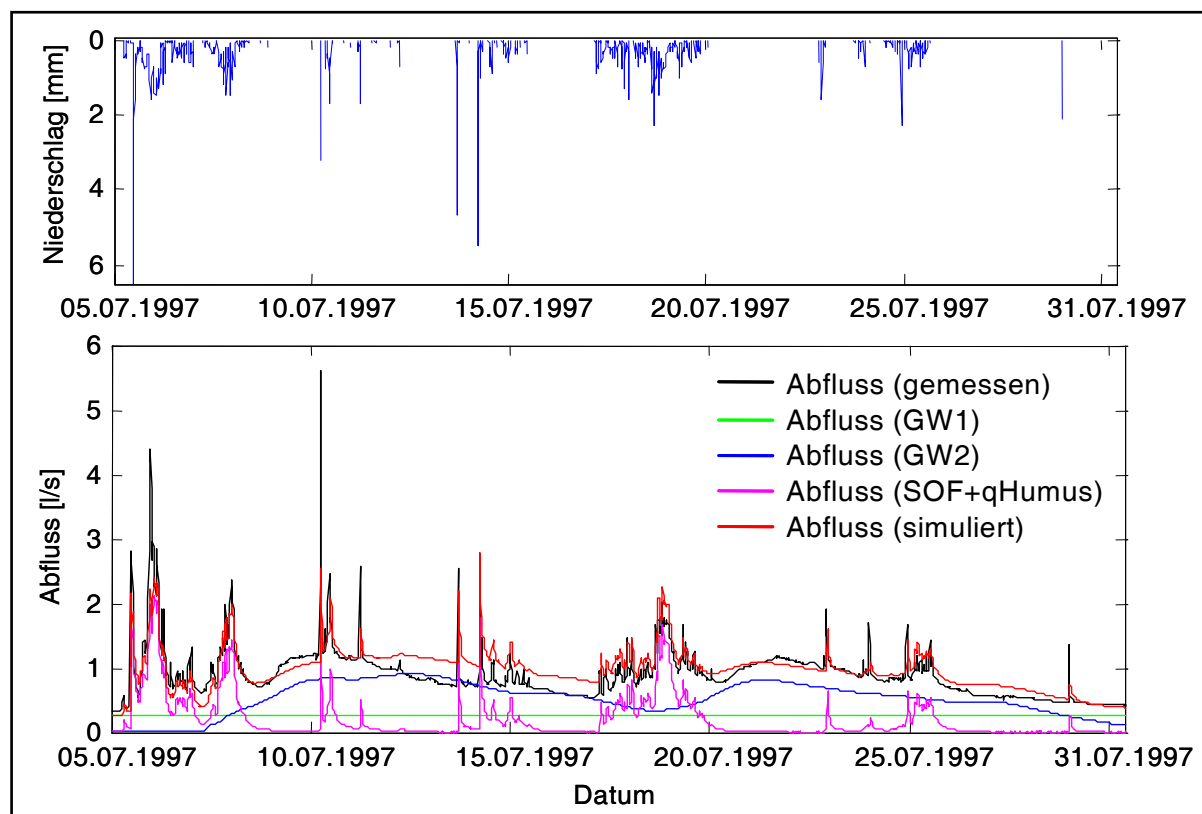


Abbildung 114: Abflusssimulation für den Pegel Limbergalm bei zwei nachlaufenden Wellen im Kalibrierungsjahr 1997. Dargestellt sind der gemessene und simulierte Gesamtabfluss (q gemessen, q simuliert), die Summe der simulierten Abflusskomponenten Sättigungsflächen- und Zwischenabfluss (qSOF+qHumus), der permanente Grundwasserabfluss qGW1, und der episodisch auftretende Grundwasserabfluss (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

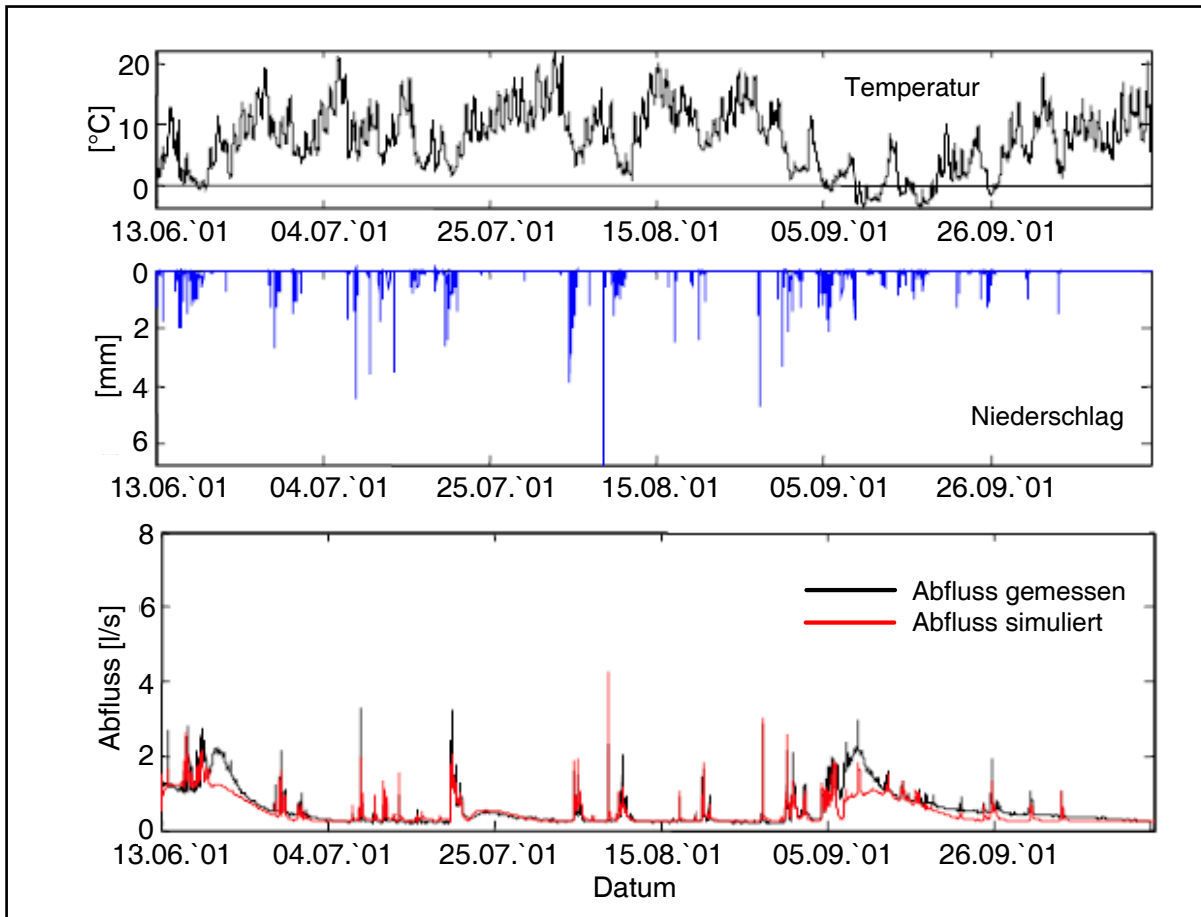


Abbildung 115: Abflusssimulation für den Pegel Limbergalm: detaillierter Ausschnitt aus dem Validierungszeitraum (Sommer 2001). Niederschlag in der Einheit mm/15 min. Temperatur in °C/15 min (ZILLGENS ET AL. 2005; verändert).

Der Speicher qGW2 reagiert mit einer Verzögerung von ca. 2,5 Tagen auf den Niederschlag mit einer nachlaufenden Welle. Der Abfluss der nachlaufenden Welle wird dabei leicht überschätzt. Die Simulation der zweiten nachlaufenden Welle reagiert mit annähernd gleicher Verzögerung, setzt aber auf die erste simulierte nachlaufende Welle auf. Simulierter und gemessener Gesamtabfluss stimmen hier sehr gut überein. Aus der Abbildung ist auch zu entnehmen, dass die simulierten Grundwasserkomponenten nicht direkt auf den Niederschlagsimpuls reagieren. Eine direkte Reaktion kommt nur von den schnellen Komponenten, dem Zwischen- und Sättigungsflächenabfluss.

Insgesamt kann das Abflussgeschehen innerhalb des Kalibrierungszeitraumes mit der gegebenen Modellstruktur sehr gut simuliert werden. Wurde z.B. ein verzögerter Abflussanstieg (bimodales Ereignis) beobachtet, so simulierte das Modell ebenfalls einen Abfluss aus dem verwitterten Ausgangsgestein (qGW2, vgl. Abbildung 72 im Kap. 7.2.7.4).

Trotzdem kam es während des Kalibrierungszeitraumes zu einer Unterschätzung des Abflussvolumens bei größeren verzögerten Abflusserhöhungen (bimodales Ereignis). Als Beispiel seien die Ereignisse im Juni und September 2001 genannt (Abbildung 115).

Während das simulierte Abflussvolumen bei der verzögerten Abflusserhöhung am 15. Juni und am 7. September zu gering ist, stimmt es bei einer trockenerer Gebiets-

feuchte am 25. Juni besser mit dem beobachteten Abflussvolumen überein (ZILLGENS ET AL. 2005). Als Ursache für die Unterschätzung des Abflussvolumens führen TILCH ET AL. (2003, 2006a) einen zusätzlichen Anschluss abflussbeitragender Flächen an das Einzugsgebiet Pegel Limbergalm bei zunehmender Gebietsfeuchte an. Diese feuchteabhängige Vergrößerung des Einzugsgebietes ist im Modell nicht berücksichtigt. Ein Grund für die Unterschätzung des Volumens bei dem Ereignis am 7. September könnte der Einfluss von festem Niederschlag sein. In diesem Zeitraum fiel die Temperatur unter den Gefrierpunkt (Abbildung 115 oben), weshalb im Modell der Niederschlag in den Schneespeicher übergang und somit nicht abflusswirksam wurde. Daher lag der simulierte Abfluss unter dem beobachteten.

7.3.4.3.2 Ergebnisse der Modellvalidierung

Die in der Kalibrierung ermittelten Parameter wurden von auf die in Tabelle 33 genannten Simulationsabschnitte übertragen. Das aktuelle Volumen des Speichers S1 zu Beginn der Simulation musste für jedes Simulationsjahr individuell angepasst werden, da die Abflussbedingungen zu Beginn der Simulationszeiträume von der Schneeschmelze und den hydrologischen Voraussetzungen im Winter entscheidend mitbeeinflusst werden und somit nicht für jedes Jahr gleich sein können. Die Simulationsergebnisse fallen insgesamt mit einem Effizienzkoeffizient für alle Validierungsabschnitte von $e = 0,57$ gut aus. Werden gemessene und simulierte Abflüsse gegenübergestellt (Abbildung 116), ist zu sehen, dass die Abweichungen größer sind als bei der Kalibrierung (Abbildung 116, links) und die gemessenen Abflüsse überschätzt werden (Abbildung 116, rechts).

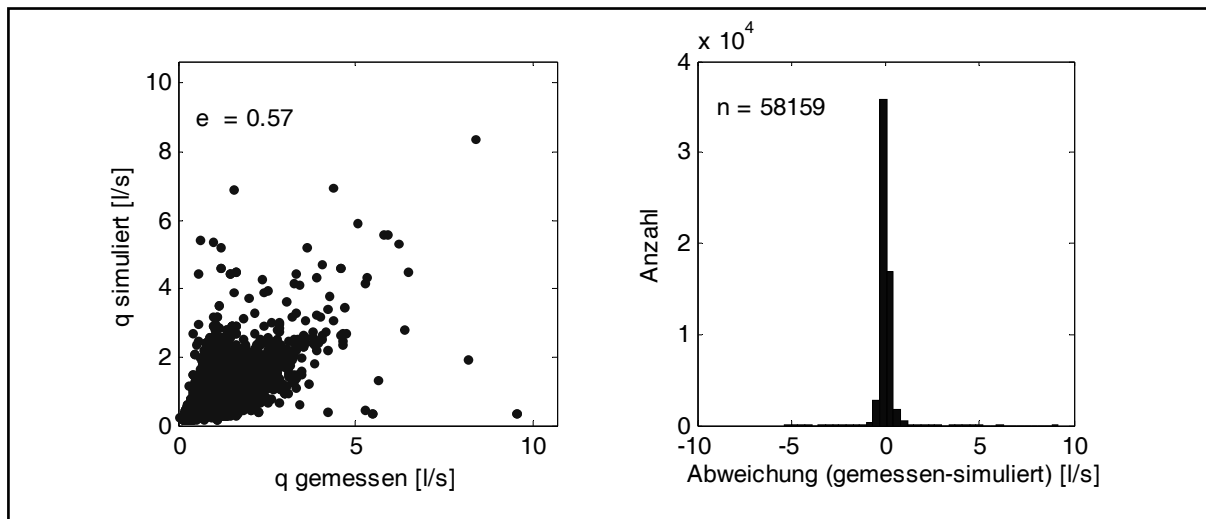


Abbildung 116: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Abflusswerte der Simulationszeitabschnitte der Validierungszeiträume von 1998-2002.

Jahresbetrachtung der Simulationsergebnisse

In Tabelle 35 sind die statistischen Gütemaße und die Anzahl der gemessenen und simulierten nachlaufenden Wellen aufgeführt. Die Gütemaße zeigen, dass die Jahre 2000 und 2001 sehr gut wiedergegeben werden ($e=0,69/0,73$), 1998 und 1999 ($e=0,5/0,48$) gut und 2002 mit $e=0$ schlecht getroffen wird. Gründe für die unter-

schiedlich guten Simulationsergebnisse lassen sich in den Jahren 1998 und 1999 sehr gut mit dem Niederschlagsinput erklären. Zu Zeiten der größten Abweichungen von simulierten und gemessenen Abflüssen, meistens beim Auftreten von nachlaufenden Wellen, wurden am Schattberg Temperaturen < 0 gemessen (siehe dazu Abbildung 117, Abbildung 118 und Abbildung 120), was zu dem anfangs diskutierten fehlerhaften Niederschlagsinput führen kann (vgl. Kap. 7.3.4.2). Eine Abgleichung mit den gemessenen Niederschlägen anderer Niederschlagsstationen im Untersuchungsgebiet konnte die Simulation nicht wesentlich verbessern. Die klimatischen Modelleingangsgrößen sind für diese Jahre insgesamt als schlecht einzustufen (1998 und 1999 fielen die Stationen Niesrachalm und Klingleralm komplett aus, und die Station Herzogalm lieferte für zwei Monate unplausible Werte). Aus diesen Niederschlagsunsicherheiten lassen sich auch die zum Teil recht hohen positiven Volumenfehler in den Jahren 1999 und 2001 erklären.

Tabelle 35: Modellierungszeiträume und Gütemaße der Jahre 1997-2002 (Reff=Effizienzkoeffizient nach NASH & SUTCLIFFE (1970), Vol_error=Volumenfehler des betrachteten Zeitabschnittes).

| Nutzung | Zeitperiode | Gütemaße Reff | r^2 | Vol_error [mm] | Anzahl NW gemessen | Anzahl NW simuliert |
|--------------|-----------------------|---------------|-------|----------------|--------------------|---------------------|
| Kalibrierung | 19.06.1997-29.09.1997 | 0.80 | 0.81 | -5.35 | 4 | 4 |
| Validierung | 23.06.1998-12.10.1998 | 0.50 | 0.55 | 2.96 | 3 | 4 |
| Validierung | 05.07.1999-30.09.1999 | 0.48 | 0.68 | 38.41 | 3 | 3 |
| Validierung | 07.07.2000-05.10.2000 | 0.69 | 0.74 | 26.09 | 3 | 3 |
| Validierung | 13.06.2001-15.10.2001 | 0.73 | 0.78 | 32.54 | 3 | 3 |
| Validierung | 26.06.2002-29.09.2002 | 0.00 | 0.50 | -20.08 | 2 | 3 |

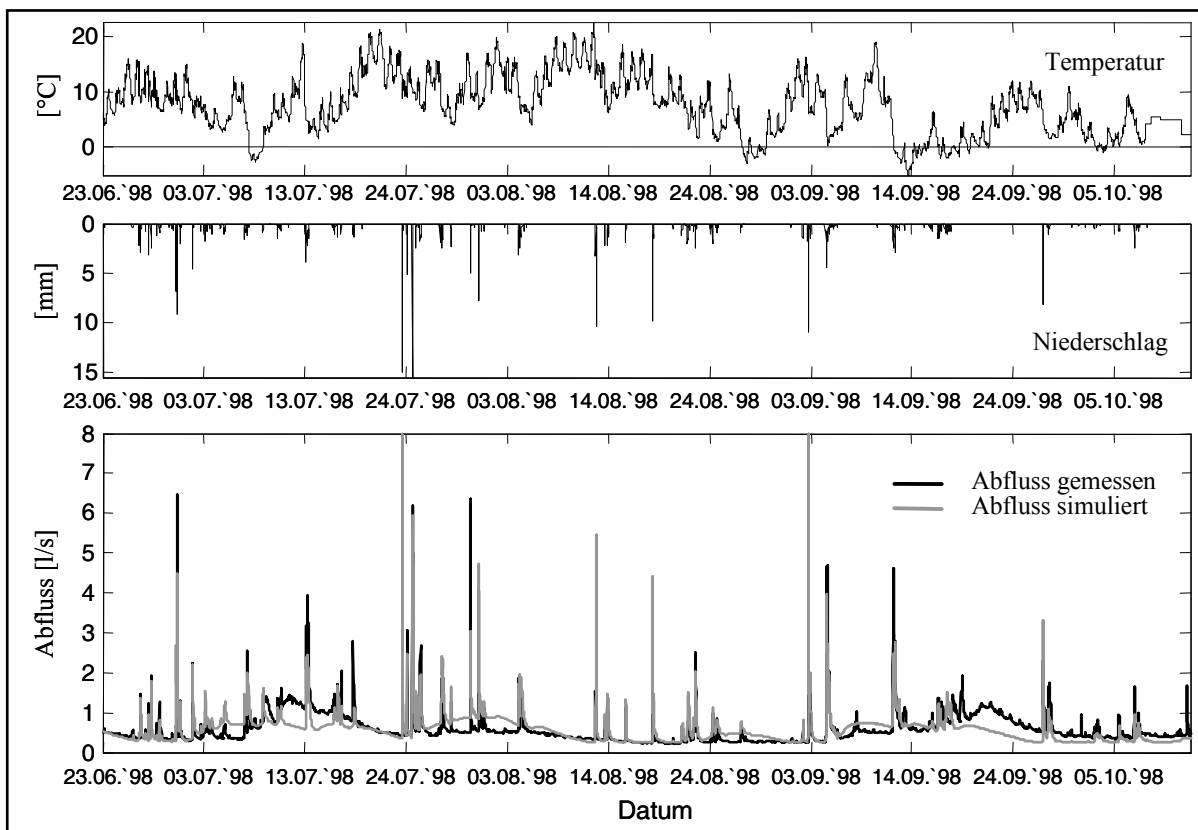


Abbildung 117: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 1998.

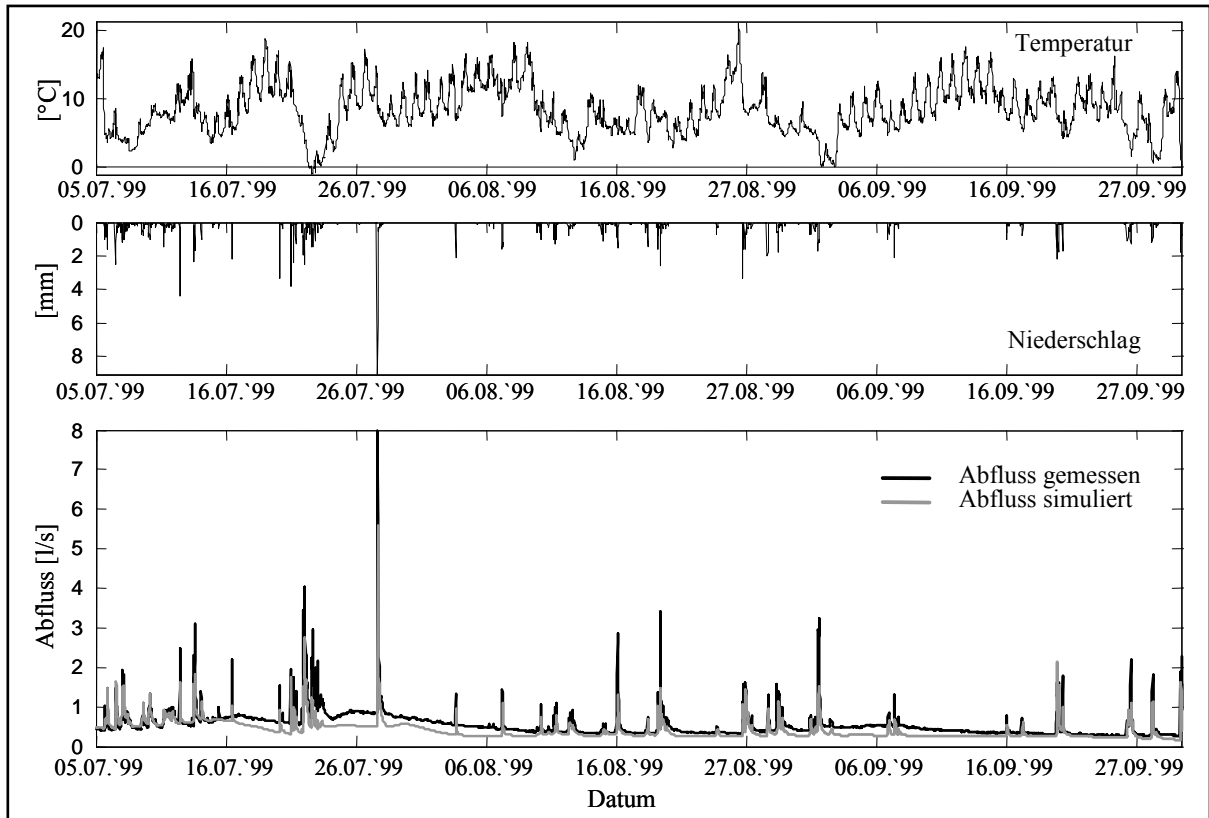


Abbildung 118: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 1999.

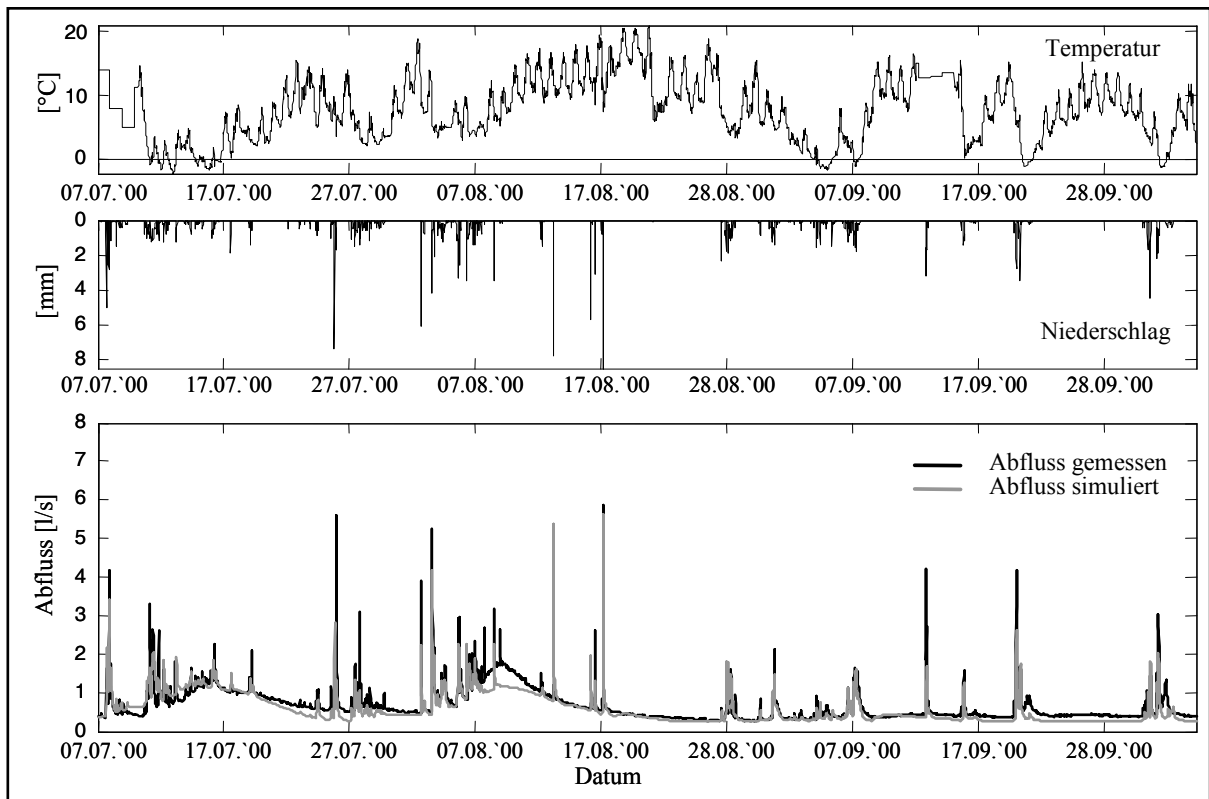


Abbildung 119: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 2000.

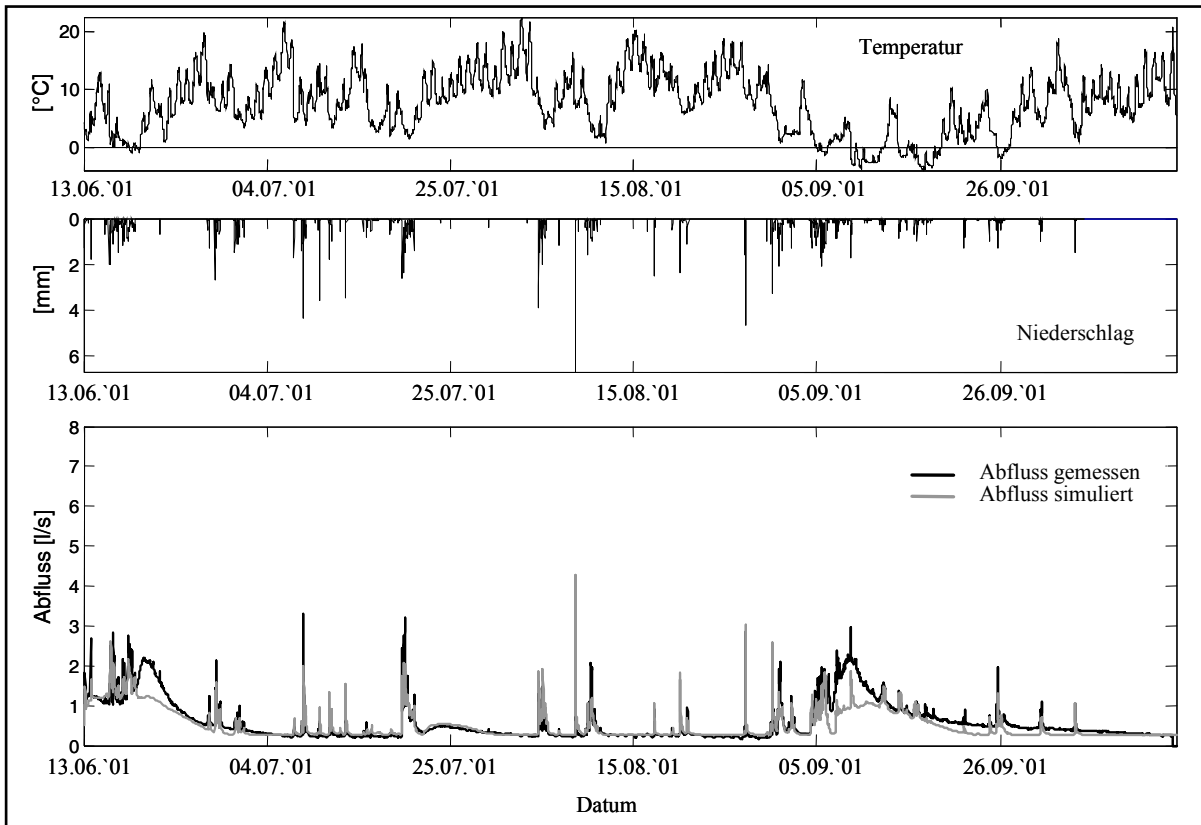


Abbildung 120: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 2001.

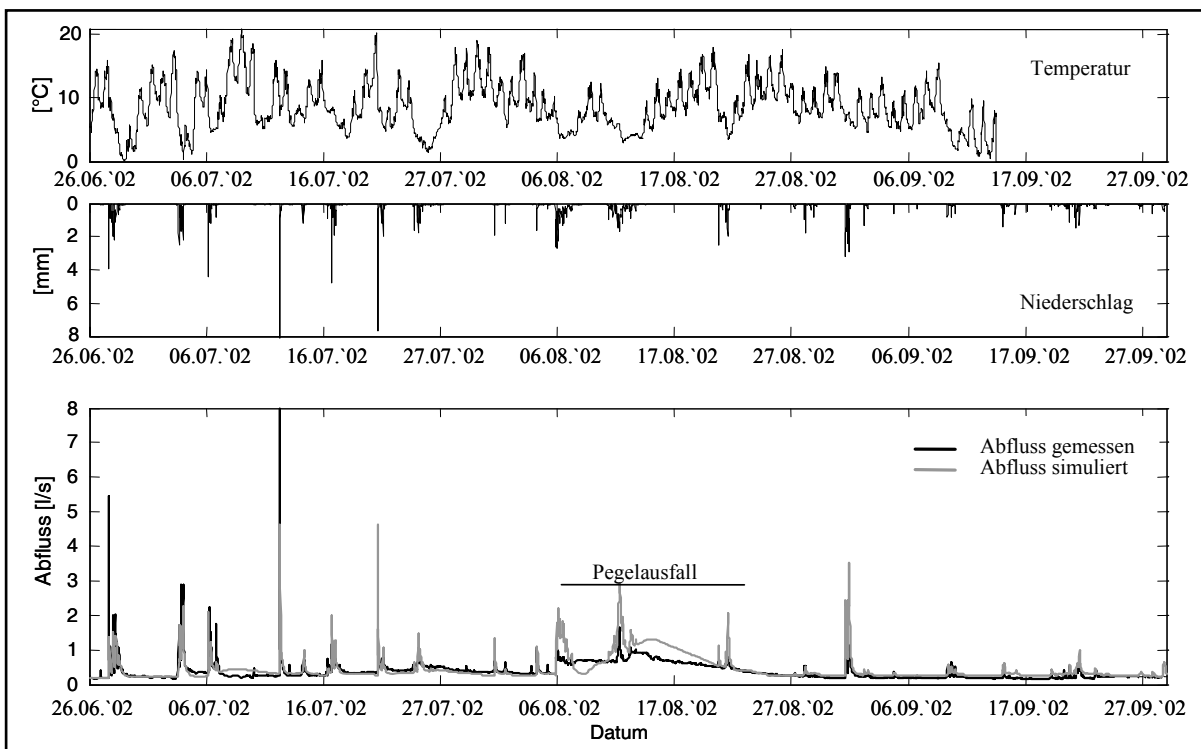


Abbildung 121: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 2002.

Simulation des Ereignistyps 1 (unimodale Ereignisse)

Wie bei dem Vergleich von simulierten und gemessenen Abflussganglinien zu sehen ist, werden die Abflussspitzen teilweise getroffen, aber genauso oft überschätzt wie unterschätzt. Die schnellen Abflussbildungsprozesse werden im Modell auf den Feuchtflächen und innerhalb der Rohhumusauflage gebildet. Aus verschiedenen Felduntersuchungen ist bekannt, dass die Abflussbeiwerte sowohl auf den Feuchtflächen (KIRNBAUER ET AL. 1996) als auch in der Humusauflage der Zwergstrauchvegetation (TILCH ET AL. 2003, 2006a) variabel sind. Diese Variabilität wird dadurch erklärt, dass sich die Flächen, die schnelle Abflüsse generieren können, in Abhängigkeit vom Gebietszustand und Niederschlagsverlauf verändern. Diese Dynamik der Größe der Wasserumsatzräume wird im Modell nicht abgebildet. Weiterhin reagiert das Einzugsgebiet sehr schnell und sensibel auf Niederschlagsinput. Die räumliche Variabilität der Niederschläge, die durch die Messstation Schattberg nicht erfasst wird, ist eine weitere Ursache für die Abweichungen von simulierten und gemessenen Abflüssen.

Simulation der nachlaufenden Welle des Ereignistyps 2 (bimodale Ereignisse)

Die Dynamik der nachlaufenden Wellen (NW) wird gut vom Modell wiedergegeben (Abbildung 117 bis Abbildung 121). Während der Validierungsabschnitte der Jahre 1998-2002 wurden insgesamt zehn sehr deutliche nachlaufende Wellen und vier ansatzweise vorhandene nachlaufende Wellen gemessen. Wenn eine nachlaufende Welle beobachtet wurde, entstand im Modell auch immer Abfluss aus dem geklüfteten Grundgebirge (qGW2). Das Modell reagiert sensibler auf langanhaltende Niederschläge als das Einzugsgebiet. In den Jahren 1998 und 2002 wurden leichte nachlaufende Wellen simuliert, während im beobachteten Hydrographen keine erkennbar waren. Im Gegensatz dazu wird das Gesamtabflussvolumen innerhalb der nachlaufenden Wellen weitgehend unterschätzt (vgl. insbesondere Abbildung 117 und Abbildung 120). TILCH ET AL. (2003, 2006a) stellten für die Abflussgeneration des Ereignistyps 2 fest, dass das generierte Abflussvolumen der nachlaufenden Welle überproportional mit der Niederschlagsdauer und –summe zunimmt, deren Entstehung jedoch nicht vom Gebietszustand (bzw. vom Basisabfluss als Indikator für den Gebietszustand) abhängig ist, was durch die progressive Aufweitung und Ausdehnung der abflussgenerierenden Untergrundspeicher im Verlauf eines Niederschlagsereignisses zurückgeführt wird. Das bedeutet, dass die Größe des unterirdischen Einzugsgebietes im Verlauf eines Niederschlagsereignisses zunimmt. Damit tragen im Einzugsgebiet Limbergalm zum Teil größere Flächen zur Abflussgenerierung bei, was vom Modell nicht simuliert werden kann und zu einer Unterschätzung des simulierten Abflusses führt. Wie bei der Simulation des Ereignistyps 1 kommt als weitere Fehlerquelle die Unsicherheit der Niederschlagsdaten dazu (vgl. Kap. 7.3.4.2).

7.3.4.3.3 Fazit der Modellierungen im Einzugsgebiet Pegel Limbergalm

Während der Modellentwicklung zeigte sich, dass mit zunehmender Prozesskenntnis die Modellierungsergebnisse sukzessive besser wurden. Insgesamt wird die Modellierung der Abflussbildung am Pegel Limbergalm als sehr schwierig eingestuft, da es sich hier um ein komplexes Abflussbildungssystem mit sich dynamisch verändernden unterirdischen und oberirdischen Wasserumsatzräumen handelt. Da weiterhin auch bei

den Messdaten mit großen Unsicherheiten zu rechnen ist, wurde davon abgesehen, die Dynamik der Wasserumsatzräume in das Modell mit einzubeziehen, da insbesondere bei der Simulation der nachlaufenden Wellen (oft Temperatur <0) nicht genau nachzuvollziehen ist, wie und wann welche Fehlerquelle greift.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Aufschlüsselung der Prozesse im Einzugsgebiet Limbergalm durch detaillierte Prozessstudien ermöglicht hat, entsprechende Module für die in diesem Einzugsgebiet vorliegenden Raumeinheiten zu entwickeln und anzupassen. Auf dieser Basis konnten die Abflussbildungsprozesse und deren Ereignisdynamik insgesamt sehr gut beschrieben werden. Die gewonnene Prozesskenntnis und die entwickelten Module werden somit in einer geeigneten Form in die Modellierung des nächst größeren Einzugsgebietes des Löhnersbaches einfließen.

7.3.4.4 Raumgliederung für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“

Zum Übergang von der Mikroskale (EZG Limbergalm 0,07 km²) in die Mesoskale (EZG Löhnersbach, 16 km²) muss geklärt werden, inwieweit die für die Abflussbildung am Pegel Limbergalm relevanten Raumeinheiten auch Relevanz im gesamten Einzugsgebiet des Löhnersbaches haben und wie diese im Löhnersbachgebiet identifiziert werden können. Die Grundlage für die Raumgliederung stellen insbesondere die Erkenntnisse aus hydrologisch-meteorologischen Untersuchungen im Löhnersbachgebiet und den tracerhydrologischen Felduntersuchungen am Pegel Limbergalm dar. Wichtige weitere Datengrundlagen sind die Vegetationskarte nach BURGSTALLER & SCHIFFER (1992) und die hydrogeologische sowie Feuchtflächenkarte von PIRKL (1989).

Die Erstellung des Raumgliederungskonzeptes für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ wurde im Wesentlichen von TILCH ET AL. (2006b) erstellt und automatisiert. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Die Bedeutung der Sättigungsflächen für das Abflussverhalten des Löhnersbaches wurde bereits aufgrund früherer Untersuchungen im Löhnersbachgebiet (z.B. KIRNBAUER ET AL. 1996), GUTKNECHT (1996) und KIRNBAUER & HAAS (1998), KIRNBAUER ET AL. (2005)) erkannt. So sind diese vor allem bei direkter Ankopplung an das Gerinnenetz durch extrem schnelle Abflussreaktionen auf einzelne Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Größe und Intensität gekennzeichnet. Die Feuchtflächen, die im Löhnersbachgebiet einen Anteil von ca. 4 % ausmachen, stellen somit ein wichtiges Element der Raumgliederung dar, die den Abflussbildungsprozess Sättigungsflächenabfluss zugewiesen bekommen (qSOF, Abbildung 123).

Mit Hilfe tracerhydrologischer Untersuchungen in den mikroskaligen Einzugsgebieten der Pegel Limbergalm und Limbergalm-West konnte nachgewiesen werden, dass unterirdische Abflusskomponenten sehr bedeutsam für die mikroskalige Hochwasserentstehung sind. Deren Bedeutung für das Abflussgeschehen im übergeordneten, mesoskaligen Löhnersbachgebiet konnte ferner durch zusätzliche statistische Auswertungen hydrometrischer und meteorologischer Zeitreihen (ZILLGENS ET AL. 2005; TILCH ET AL. 2003) belegt werden. So konnte mit Hilfe der Tracerhydrologie nachgewiesen werden, dass die relevanten unterirdischen Umsatzräume vor allem in den quartären Deckschichten und im Grundgebirge positioniert sind (vgl. Kap.7.2.7.1).

Ferner konnten innerhalb der quartären Deckschichten aufgrund unterschiedlicher hydrochemischer Signatur zwei Abflusskomponenten, für locker und dicht gelagerten Hangschutt, mit unterschiedlicher Abflussdynamik identifiziert werden. Im locker gelagerten Hangschutt kann während oder kurz nach einem Niederschlagsereignis schneller Zwischenabfluss generiert werden, während im dicht gelagerten Hangschutt stark verzögerter, basisabflussbildender Grundwasserabfluss gebildet wird (er trägt zum Niederwasser bei; TILCH ET AL. 2006b). Der Abfluss im Grundgebirge ist dagegen im Wesentlichen eine Basisabfluss bildende Komponente. Der tiefer gelegene klüftige Fels ist zudem am Entstehen der nachlaufenden Welle (Vorereigniswasser) beteiligt (TILCH ET AL. 2003 und 2006b).

Informationen über die Beschaffenheit der quartären Deckschichten und des Grundgebirges wurden aus der lithologisch-geomorphologische Kartierung PIRKL (1989) abgeleitet (Abbildung 122, links). Allerdings sind dieser Karte keine flächendeckenden Informationen zur Verbreitung der quartären Deckschichten- und Grundgebirgs-Einheiten zu entnehmen. So konnte durch Felduntersuchungen beispielsweise festgestellt werden, dass das Grundgebirge allorts von Deckschichten verhüllt (abgesehen von Felsausbissen) ist. So wurden allen Deckschichtenbereichen, für die nicht verdichtet/stauender Hangschutt ausgewiesen wurde, allgemeiner, aufgelockerter Hangschutt zugewiesen. Aus dieser Annahme leitet sich die Karte in Abbildung 122 rechts oben ab. Bei der Karte des Grundgebirges wurde ähnlich vorgegangen: Sind nicht explizit Felsbereiche als tiefgründig aufgelockert ausgewiesen, werden diese der Klasse Fels-dicht zugeordnet (Abbildung 122 unten rechts). Somit ergeben sich aus der lithologisch-geomorphologische Kartierung PIRKL (1989) Informationen über die zwei abflussrelevanten Prozessebenen „Deckschicht“ und „Grundgebirge“.

Eine weitere wichtige Information aus der lithologisch-geomorphologischen Kartierung ist die Verbreitung von Talsedimenten (zusammenfassender Begriff für Bachalluvien, Schutt- und Schwemmfächer), die einen Flächenanteil von 1,7 % am Gesamtgebiet ausmachen. Die Bedeutung der Talsedimente wurde zwar nicht direkt untersucht, es ist aber anzunehmen, dass durch diese, aufgrund der direkten Lage am Gewässernetz und der hohen Makroporosität, der Niederschlag direkt dem Gewässer zugeführt wird. Da sie weiterhin ständigen Umlagerungsprozessen unterliegen und sich dadurch weder ein Boden noch eine Vegetationsdecke bildet, wird diese Raumeinheit in der Raumgliederung gesondert betrachtet und der oberen Prozessebene mit schnellem Zwischenabfluss zugewiesen.

Obwohl sich Bereiche mit Zwergstrauchheide-Vegetation in der Regel durch hohe Infiltrations- und Retentionseigenschaften auszeichnen (MARKART & KOHL 1993a,b), konnte durch tracerhydrologische Untersuchungen belegt werden, dass aus der dort vorhandenen Rohhumusaufgabe bei entsprechender Bodenfeuchte und Niederschlagscharakteristik schneller oberflächennaher Zwischenabfluss generiert wird. Dies gilt insbesondere für jene Humusaufgaben der Heidevegetation, die auf verdichtetem Lockergestein positioniert sind und an das Gerinnenetz angekoppelt sind. Durch Verschneidung der Bereiche „Hangschutt dicht/stauend“ mit jenen der Heidevegetation aus der Vegetationskarte von BURGSTALLER & SCHIFFER (1992) im GIS wurden diese episodisch wirksamen Wasserumsatzräume flächendeckend und -detailliert bestimmt (Abbildung 123).

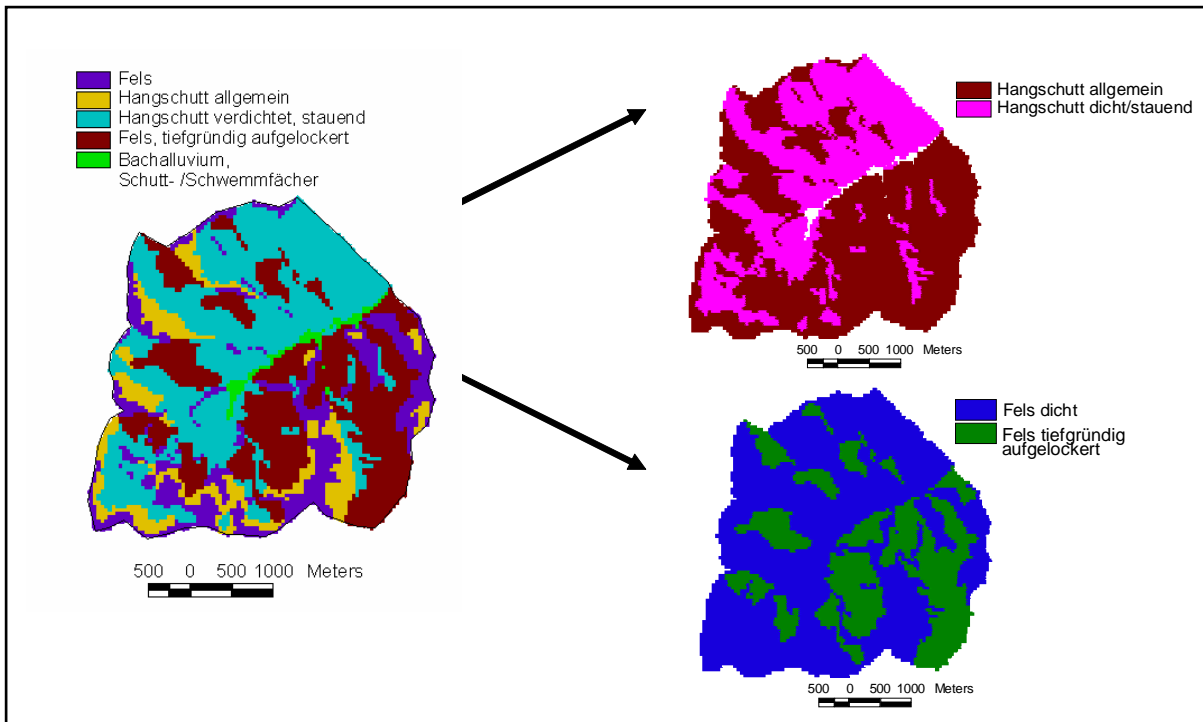


Abbildung 122: Lithologisch-geomorphologische Einheiten (links, PIRKL 1990) des Löhrnersbachgebietes und den daraus abgeleiteten Karten der quartären Deckschichten im Löhrnersbachgebiet (oben rechts, TILCH ET AL. 2006b) und des Grundgebirges (unten rechts).

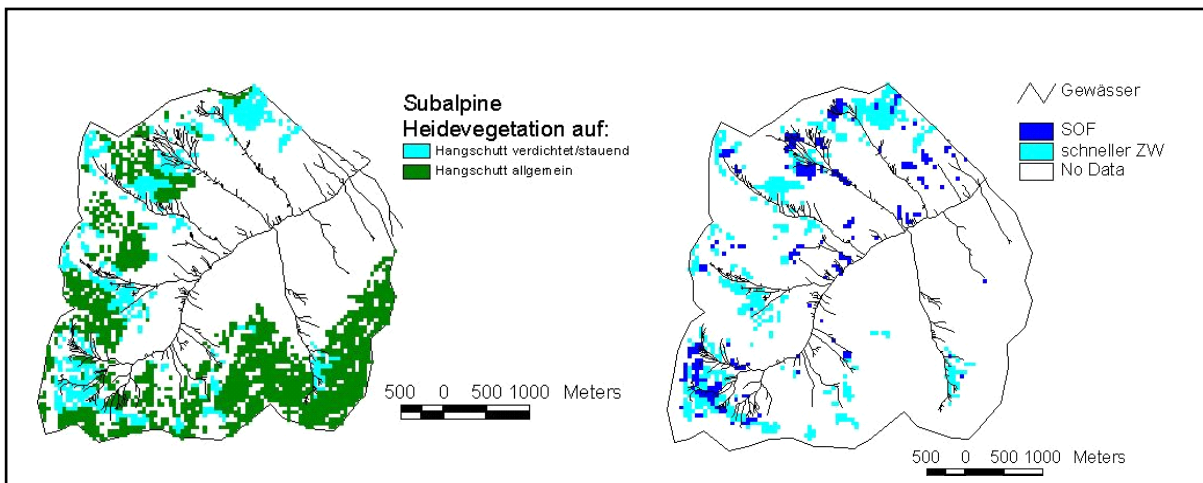


Abbildung 123: Ausweisung von Abflussbildungsprozessen auf Basis der Feuchtfächenkartierung nach PIRKL (1989) und der schnellen oberflächennahen Zwischenabflüsse innerhalb der Rohhumusauflage unter Subalpiner Heidevegetation auf verdichtetem Fels.

Entsprechend eines hierarchischen Entscheidungspfad wurden alle o.a. hydrologisch wichtigen Umsatzräume ebenenspezifisch in Bereiche mit den gleichen dominanten Abflussbildungsprozessen flächendeckend und –detailliert ausgewiesen. Daraus ergaben sich 3 Raumgliederungen für die Ebenen „Oberflächenprozesse, obere Ebene“, „Deckschichtenprozesse, mittlere Ebene“ und „Grundgebirgsprozesse, untere Ebene“ (Abbildung 124). Der oberen Ebene wurden die Sättigungsflächen mit Sättigungsflächenabfluss, die Felsflächen mit Horton-Abfluss, die Talsedimente mit schnellen Zwischenabfluss und die Zwergstrauchgesellschaften mit episodisch schnellem Zwischen-

abfluss, der mittleren Ebene die Prozesse innerhalb des Hangschutts mit schnellen und langsamen Grundwasserabflüssen und der unteren Ebene die Prozesse des Grundgebirges (verzögerter oder stark verzögerter Abfluss) zugeordnet. Die Bodeneigenschaften wurden im Rahmen der Raumgliederung nicht berücksichtigt, da sich aus insgesamt einheitlichen hydraulischen Kenngrößen der Böden und dem kleinflächigen Mosaik der Bodentypen keine eindeutige hydrologische Gebietsreaktion ableiten lässt (MARKART & KOHL 1993b).

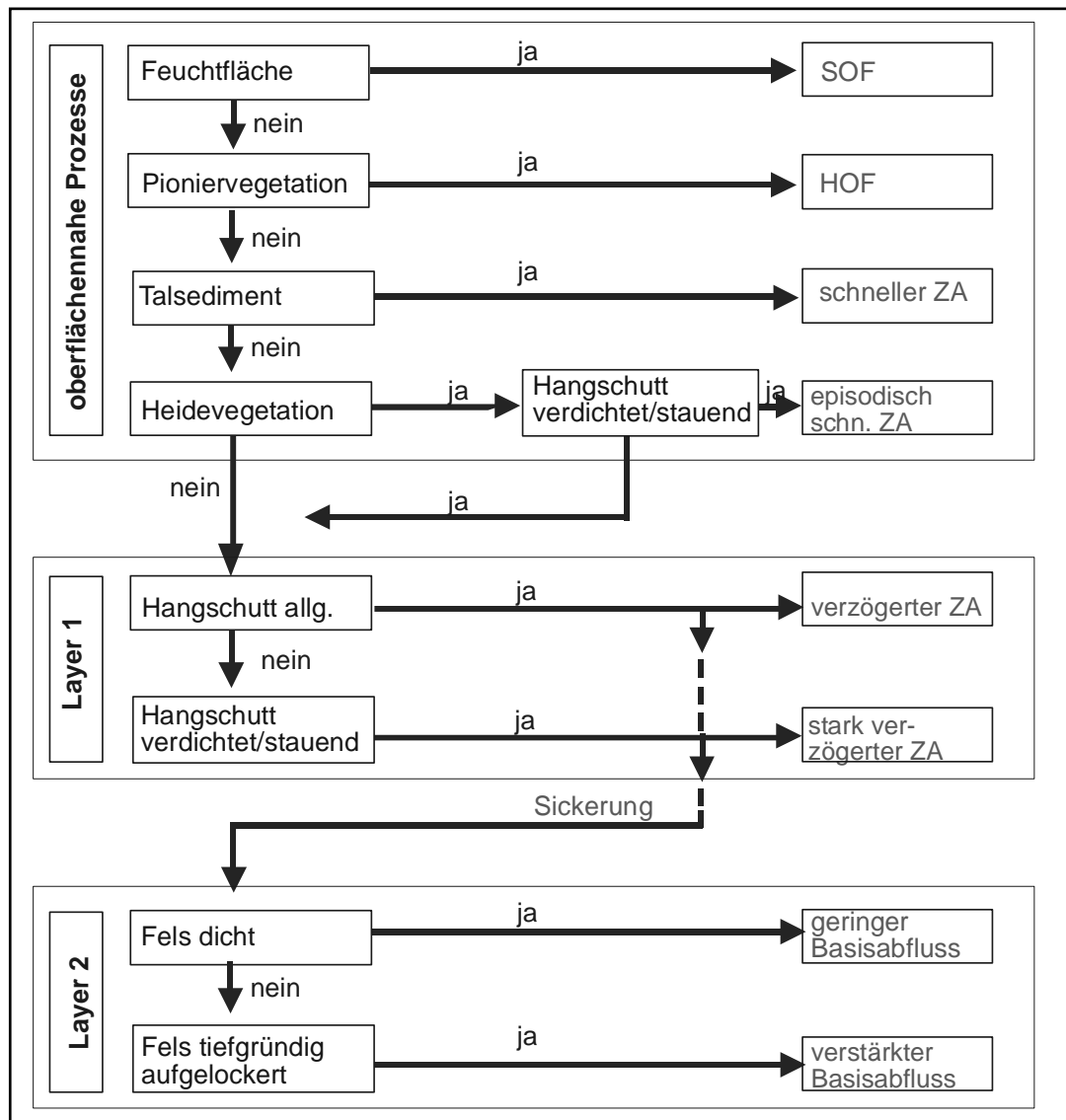


Abbildung 124: Entscheidungspfad zur Ausweisung von Zonen gleicher dominanter Abflussbildungsprozesse (ZILLGENS ET AL. 2007b); verändert).

7.3.4.5 Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“

7.3.4.5.1 Modellentwicklung

Für die Modellierung des Abflusses im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ (Pegel Rammern) wurden die gleichen Modellannahmen wie beim Einzugsgebiet Pegel Limbergalm angenommen. Für das Löhnersbachgebiet wurden die Abflussbildungsprozesse mit Hilfe von linearen und nicht-linearen Speichern simuliert, welche entsprechend

der natürlichen Lagerung der dominanten Wasserumsatzräume in drei Ebenen angeordnet sind (Abbildung 125).

Die schnellen Prozesse wie *saturation overland flow* (q_{SOF}) und *quick subsurface flow* (q_{diff}) werden raster- (50*50 m Zellen) und physikalisch-basiert sowie in hoher zeitlicher Auflösung simuliert, die langsamen Komponenten des Untergrundes wie *slow subsurface flow* werden hingegen mit einem konzeptionellen Speicherroutine für einzelne Teileinzugsgebiete modelliert. Somit besitzt jedes Teileinzugsgebiet 4 voneinander abhängige lineare Untergrundspeicher, die die zwei Ebenen (i) quartäre Deckschichten (Hangschutt allgemein, Hangschutt verdichtet) und (ii) Grundgebirge (Fels locker, Fels dicht) repräsentieren. Nach dem Hydrotopansatz werden für jeden Speichertyp in allen Teileinzugsgebieten gleiche Parametersätze verwendet.

Das Modell benötigt die in Abbildung 125 aufgelisteten Inputdaten in räumlicher Verteilung. Diese Inputdaten wurden aus den für das Einzugsgebiet „Löhnersbach“ vorhandenen Kartenmaterialien entnommen bzw. generiert. Die Abflussbildungsprozesse im Löhnersbacheinzugsgebiet wurden für das gesamte hydrologische Jahr simuliert, was zusätzlich die Modellierung der Schneeakkumulation und Schneeschmelze erfordert. Zur Erfassung dieser Prozesse wurde ein gängiges und einfaches Schneemodul auf der Basis des Gradtagefaktors (HBV-Modul aus MERZ (2002) in das Modell integriert.

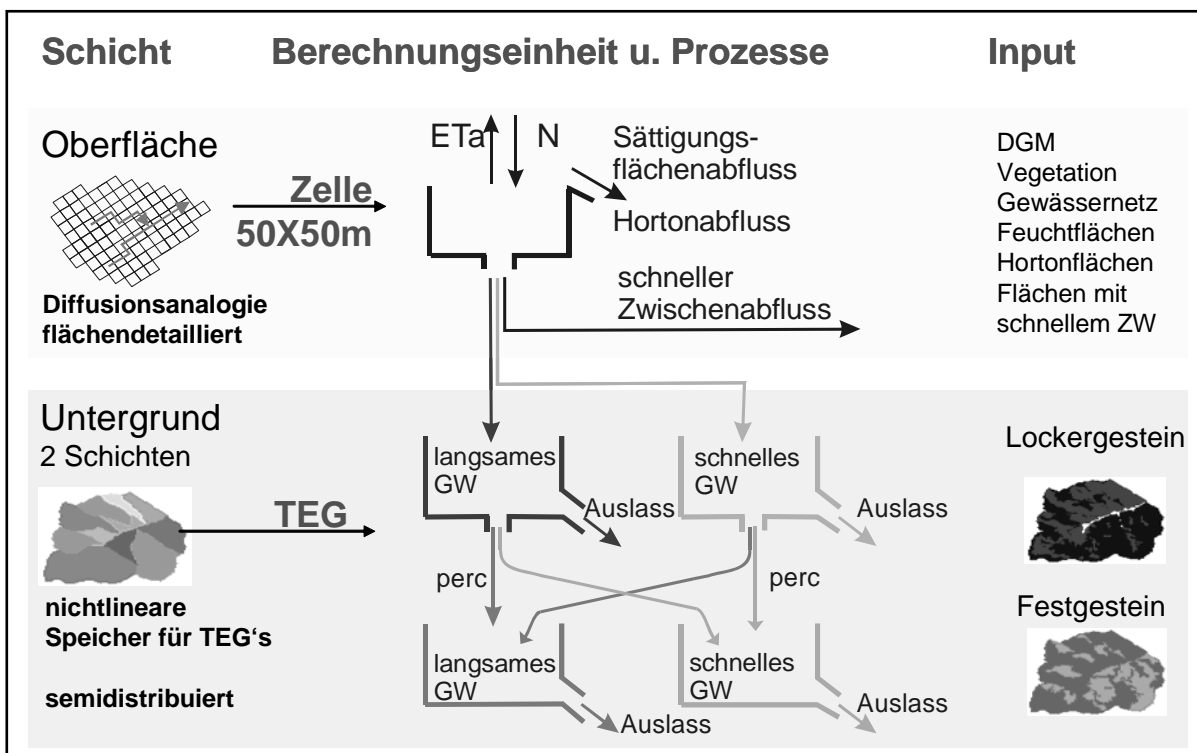


Abbildung 125: Modellstruktur für die Abflussmodellierung des Untersuchungsgebietes "Löhnersbach" (KIRNBAUER ET AL. 2004).

7.3.4.5.2 Parametrisierung und Kalibrierung

Die Kalibrierung erfolgte für den Zeitraum September 1999 bis September 2000 und wie beim Pegel Limbergalm manuell. Es wurde auf eine gute Beschreibung des unter-

irdischen Abflusses (erste Kalibrierungsphase) und des schnellen Abflusses (zweite Kalibrierungsphase) geachtet.

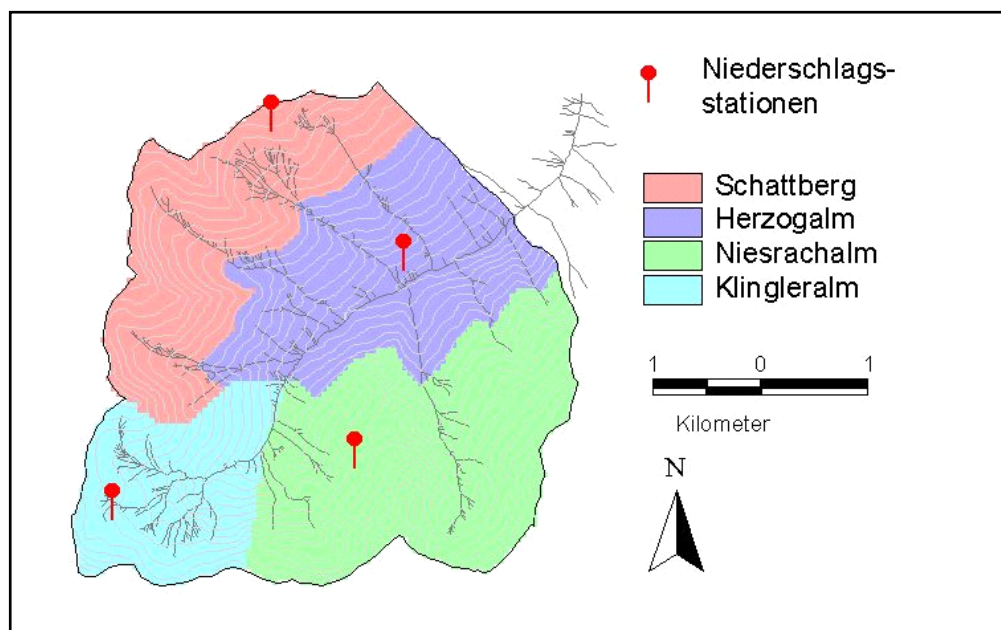


Abbildung 126: Regionalisierung des Niederschlags (ZILLGENS ET AL. (2007b); verändert).

Zur Simulation der Abflussbildungsprozesse im Löhnersbacheinzugsgebiet wurde auf die Niederschlagsdaten der in Abbildung 126 dargestellten 4 Niederschlagsstationen innerhalb des Einzugsgebietes zurückgegriffen (Abbildung 126). Die Regionalisierung des Niederschlags für die schneefreie Zeit erfolgte, indem die Stationswerte den stationsnächsten Teileinzugsgebieten zugewiesen wurden. Lieferte eine Niederschlagsstation keine Daten, so wird auf die Daten der nächsten benachbarten Station zurückgegriffen. Die Niederschlagsstationen im Löhnersbachgebiet liefern aufgrund der Messtechnik nur Niederschlagsdaten für die schneefreie Zeit. Für die Wintermonate wird auf die Niederschlagsdaten der umliegenden Stationen Saalbach und Schmittenhöhe (ZAMG) zurückgegriffen, die in täglicher Auflösung vorliegen. Der Niederschlagsinput erfolgt im Winter als Mittelwert über die beiden Stationen.

Wie bei der Modellierung der Abflussbildungsprozesse am Pegel Limbergalm ist das Ziel der Modellierung im Einzugsgebiet des Löhnersbaches die Abflussdynamik der Sommermonate abzubilden. Die Kalibrierung erfolgte manuell und die Bewertung der Modellsimulation erfolgte unter Berücksichtigung der berechneten Gütemaße durch den visuellen Vergleich von simulierter und gemessener Abflussganglinie (vgl. Kap. 7.3.4.3.1). Der bei der Kalibrierung ermittelte Parametersatz ist in Tabelle 36 und die damit erzielten Simulationsergebnisse in Abbildung 127 und Abbildung 128 aufgeführt. Generell ist festzuhalten, dass gemessene und simulierte Dynamik der Abflussbildung im Kalibrierungsabschnitt gut übereinstimmen. Sowohl der Abfluss während der Schneeschmelzperiode als auch der Abfluss während der Sommermonate wird durch das Modell sehr gut wiedergegeben (Abbildung 127). Die Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Abflüssen deuten an, dass die Abflüsse tendenziell überschätzt werden (Abbildung 128).

Tabelle 36: Kalibrierungsparameter des Abflussmodells Löhnersbach (Zeitschritt: 1 h) (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

| Parameter | Beschreibung | Bestimmung | Wert |
|--|---|----------------------------------|--|
| Niederschlag | | | |
| 2001-2003 | von 4 Meßstationen innerhalb des EG's mit Daten für schneefreie Zeit (Auflösung 1h) und Tageswerte von den Stationen Saalbach und Schmittenhöhe außerhalb des Löhnersbachgebietes | gemessen | |
| Temperatur | | | |
| 2001-2003 | Messstation Schattberg für Schneefreie Zeit und Mittelwert der Tagestemp. von den Meßstationen Schmittenhöhe und Saalbach | gemessen | |
| Schneeroutine | | | |
| meltemp | TT Schmelztemperatur | kal | 0 [°C] |
| csf | Korrekturfaktor für Schnee | kal | 1.15 [-] |
| srt | Grenztemperatur Schnee/Regen | kal | 0 [°C] |
| ddf | Grad-Tag-Faktor | kal | 1.4 [mm ^{d*°C} ⁻¹] |
| Bodenroutine Parameter übernommen von Jost (2003) | | | |
| Abflussbildungsroutine | | | |
| Oberflächenabfluss/schneller Zwischenabfluss | | | |
| str | Manning Strickler Rauigkeitsbeiwert | kal | 4 [m ^{1/3} *s ⁻¹] |
| | Muldenrückhalt | geschätzt | 0.001 [m] |
| zstr | Manning Strickler Rauigkeitsbeiwert Zwischenabfluss | Pegel Limbergalm | 0.5 [m ^{1/3} *s ⁻¹] |
| Grundwasserspeicher | | | |
| k_1l | Speicherkonstante allg. Hangschutt | kal | 0.0029 [Δt ⁻¹] |
| k_1d | Speicherkonstante verd. Hangschutt | kal | 0.0025 [Δt ⁻¹] |
| k_1lp | Perkolation allg. Hangschutt | kal | 0.0050 [Δt ⁻¹] |
| k_1dp | Perkolation verdichteter Hangschutt | kal | 0.0007 [Δt ⁻¹] |
| perk_1lmax | | geschätzt | 280 mm/d |
| perk_1dmax | | geschätzt | 96 [mm*d ⁻¹] |
| k_2l | Speicherkonstante aufgelockerter Fels | kal | 0.0033 [Δt ⁻¹] |
| k_2d | Speicherkonstante dichter Fels | kal | 0.0003 [Δt ⁻¹] |
| Gerinne | | | |
| Translationsansatz | Geschwindigkeit | geschätzt aus Salzmischversuchen | 0.5 [m*s ⁻¹] |

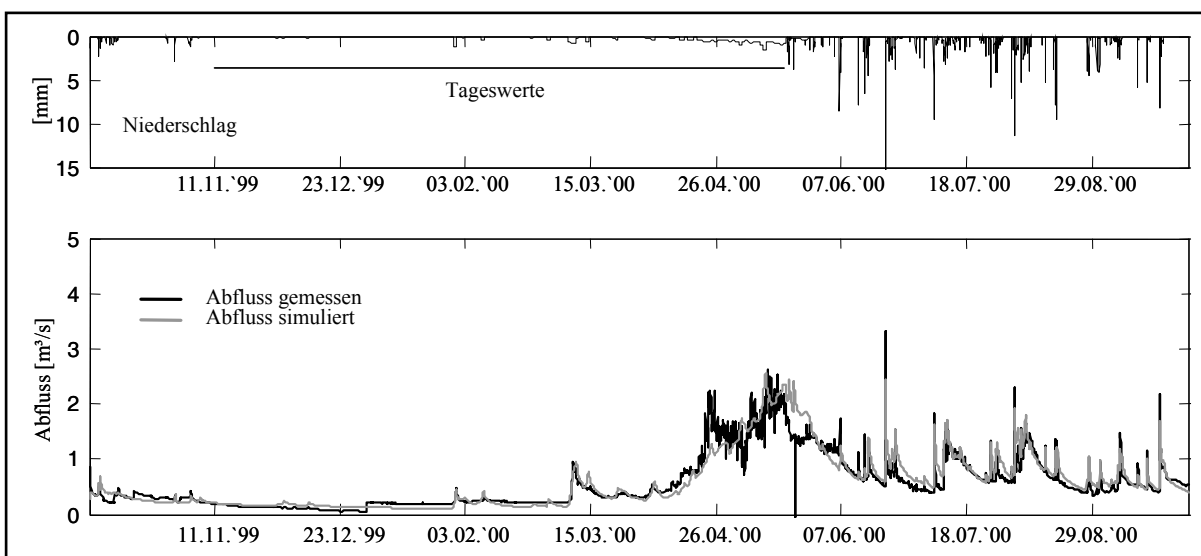


Abbildung 127: Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Hydrographen der Kalibrierungsperiode 10.1999-9.2000 (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

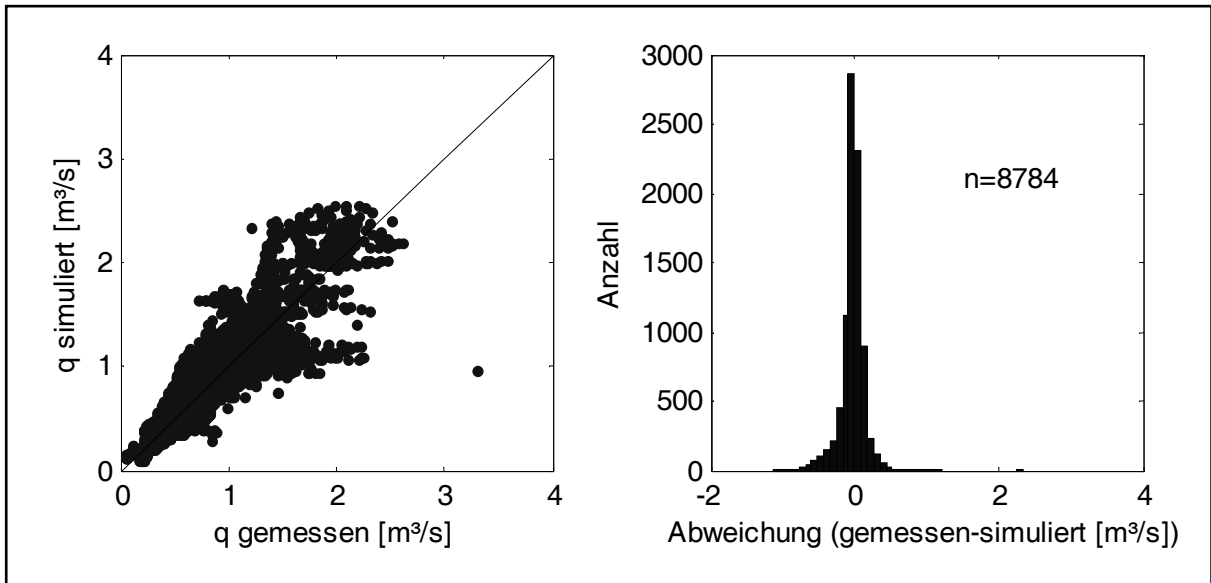


Abbildung 128: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Abflusswerte des Kalibrierungszeitraums 2000 (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Simulation der Abflüsse für die Wintermonate (etwa Mitte April bis Ende Mai) nicht sehr gut war. Die Ursache hierfür kann aber auch an den Eingangsdaten liegen, da diese außerhalb des Untersuchungsgebietes, an den Klimastationen Saalbach und Schmittenhöhe, gemessen wurden. Im Wesentlichen sollen aber sommerliche Hochwasser modelliert werden, weshalb die Modellgüte während der Wintermonate von untergeordnetem Interesse ist.

7.3.4.5.3 Ergebnisse der Validierung

Für die Validierungsphase wurde der Zeitraum 01.10.2000-30.09.2002 gewählt. Die Ergebnisse der Validierung sind in Abbildung 129, Abbildung 130 und Tabelle 37 dargestellt.

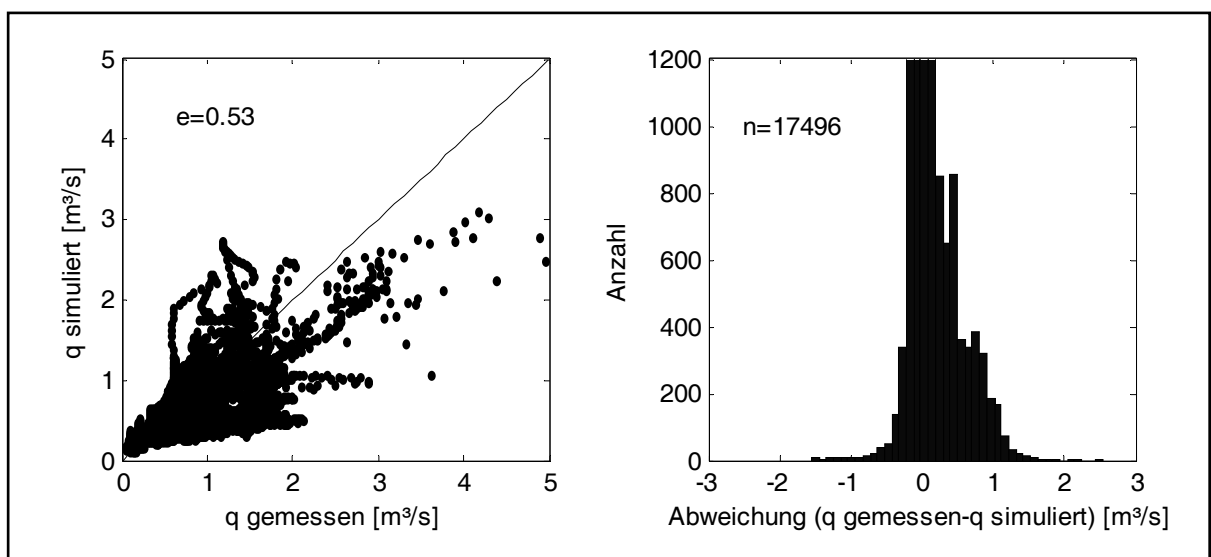


Abbildung 129: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Abflusswerte der Simulationszeitabschnitte der Validierungszeiträume 2001-2002 (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

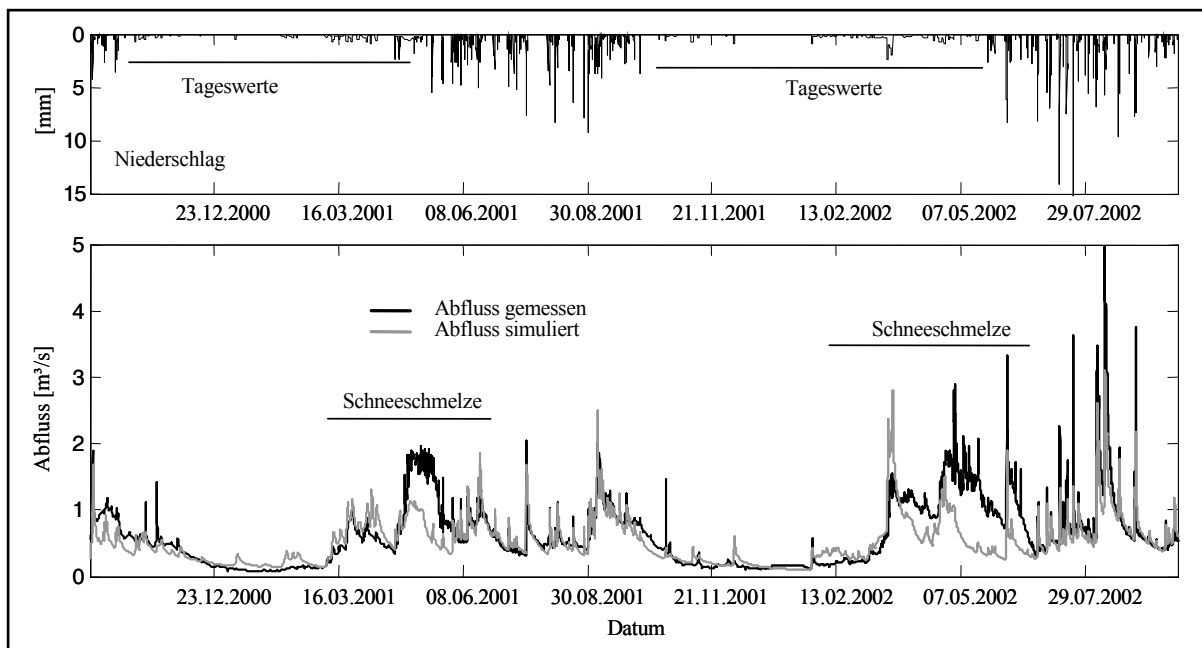


Abbildung 130: Gemessene und simulierte Abflüsse des Validierungszeitabschnittes 30.09.2001-30.09.2002 (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

Tabelle 37: Gütemaße e (Effizienzkoeffizient nach NASH & SUTCLIFFE (1970)), r^2 und Volumenfehler (Vol_error, für den betrachteten Zeitabschnitt) für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode.

| Nutzung | Zeitperiode | Gütemaße | | |
|-----------------------|-----------------------|----------|-------|----------------|
| | | Reff | r^2 | Vol_error [mm] |
| Kalibrierung | 10.09.1999-30.09.2000 | 0.86 | 0.88 | -50.9 |
| Validierung* | 30.09.2000-30.09.2001 | 0.60 | 0.61 | 97.0 |
| Validierung* | 30.09.2001-30.09.2002 | 0.49 | 0.58 | 321.8 |
| schneefreie Zeit 2001 | 02.06.2001-01.08.2001 | 0.70 | 0.83 | -15.9 |
| schneefreie Zeit 2002 | 30.06.2002-29.09.2002 | 0.79 | 0.87 | 37.8 |

Bei der Validierung wurde ein Effizienzkoeffizient von 0,53 erreicht, der unter dem der Kalibrierung liegt. Betrachtet man die Simulation der einzelnen Jahre, so ist zu sehen, dass das Jahr 2001 etwas besser simuliert werden konnte als 2002 (Tabelle 37). Die größten Abweichungen von simulierten und gemessenen Abflüssen treten während der Schneeschmelze auf. Diese kann in beiden Jahren nur sehr schlecht mit dem Modell wiedergegeben werden. Daraus erklärt sich auch, dass die Güte der Simulation 2002 wesentlich schlechter ist als 2001, da dort die Schneeschmelze zwar in ihrer Dynamik aber nicht im Volumen getroffen wird. Die Gründe dafür sind zum einen in dem vereinfachten Ansatz des Schneemoduls zu sehen, zum anderen deutet insbesondere der hohe Volumenfehler darauf hin, dass eine große Unsicherheit in den Inputdaten liegt. In den Wintermonaten liefern zwei Stationen außerhalb des Gebietes den Niederschlagsinput auf Tageswertbasis. Die Ursachen für die schlechte Simulation können im Wesentlichen in 3 Punkten zusammengefasst werden: 1. Schneemessungen im Hochgebirge sind sehr unsicher, zudem liegen die Stationen außerhalb des Gebietes. 2. Die Heterogenität der Schneedecke wird nicht wiedergegeben, die nicht nur vom Niederschlag, aber auch von Schneeverwehungen, Lawinen und Abtauprozesse beein-

flusst wird. 3. Das Schneemodul kann die komplexen Prozesse der Schneeschmelze nicht wiedergeben. Betrachtet man die Simulationsabschnitte in der schneefreien Zeit, können weitaus bessere Gütemaße für die Simulation ermittelt werden ($e_{2001}=0,7$, $e_{2002}=0,79$).

Simulation der Ereignischarakteristik

Der Ereignistyp 1 erscheint am Pegel Rammern und Limbergalm als synchroner Abflussimpuls zum Niederschlag. Der Ereignistyp 2 ist hingegen nicht durch zwei Wellen wie am Pegel Limbergalm sondern durch einen langsam abklingenden Rezessionsast gekennzeichnet (Abbildung 131).

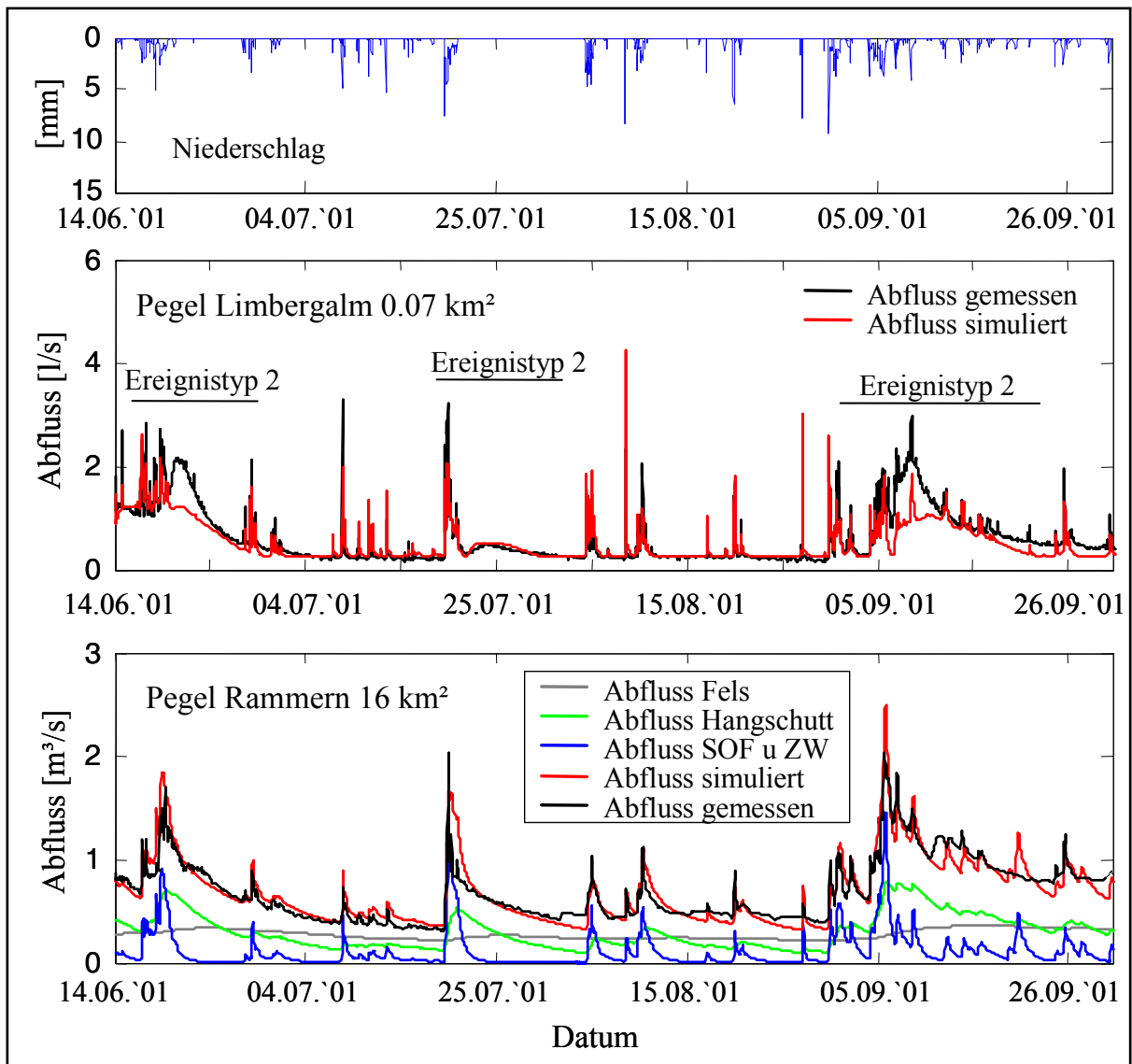


Abbildung 131: Simulierte und gemessene Abflüsse am Pegel Limbergalm (0,07 km²) und am Pegel Rammern (16 km²) (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert).

Zum simulierten Abfluss am Pegel Rammern sind zudem die Abflusskomponenten aus den verschiedenen Ebenen des Untergrundes zusammenfassend dargestellt (vgl. Abbildung 125). In Abbildung 131 sind die Abflüsse beider Pegel für einen Zeitab-

schnitt im Sommer 2001 dargestellt. Der Zeitabschnitt enthält 3 nachlaufende Wellen am Pegel Limbergalm. Am Pegel Rammern ist sehr gut zu sehen, dass zu diesen Zeiten die Rezessionsäste sehr langsam abklingen. Dieses Verhalten wird sehr gut durch das Simulationsmodell wiedergegeben (q simuliert). Zu diesen Zeiten findet verstärkter Abfluss aus dem Hangschutt statt, der somit den zusätzlichen Abfluss des Ereignistyps 2 generiert. Der Hangschuttsspeicher generiert auch Abfluss zu Zeiten, an denen keine nachlaufende Welle am Pegel Limbergalm gemessen wurden. Diese Reaktionen sind aber vergleichsweise kurz und erzeugen keine langanhaltenden Rezessionsäste im Gesamtabfluss. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Ereignischarakteristik durch das Simulationsmodell sehr gut wiedergegeben werden kann.

7.3.4.5.4 Ergebnisse der multi-site Validierung

Für die multi-site Validierung der Modellergebnisse wurden die während der Sommermonate gemessenen Abflüsse an den Auslässen der fünf Teileinzugsgebiete verwendet (1x pro Tag, Salzverdünnungsmethode; vgl. Kap. 6.1.4.2). Diese Abflussmessungen gingen nicht in die Kalibrierung ein und wurden für die Bewertung der Modellgüte herangezogen (multi-site Validierung). Die Simulationsergebnisse sind in den Abbildungen 132 bis 134 zusammen mit den gemessenen Tagesabflüssen dargestellt. Die Ergebnisse, die ohne Kalibrierung erzielt wurden, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Abflüssen an den Teilgebieten. Aufgrund dieser guten Modellgüte kann gefolgert werden, dass das Modell die hydrologischen Prozesse, die im Einzugsgebiet stattfinden, sehr gut wiedergibt.

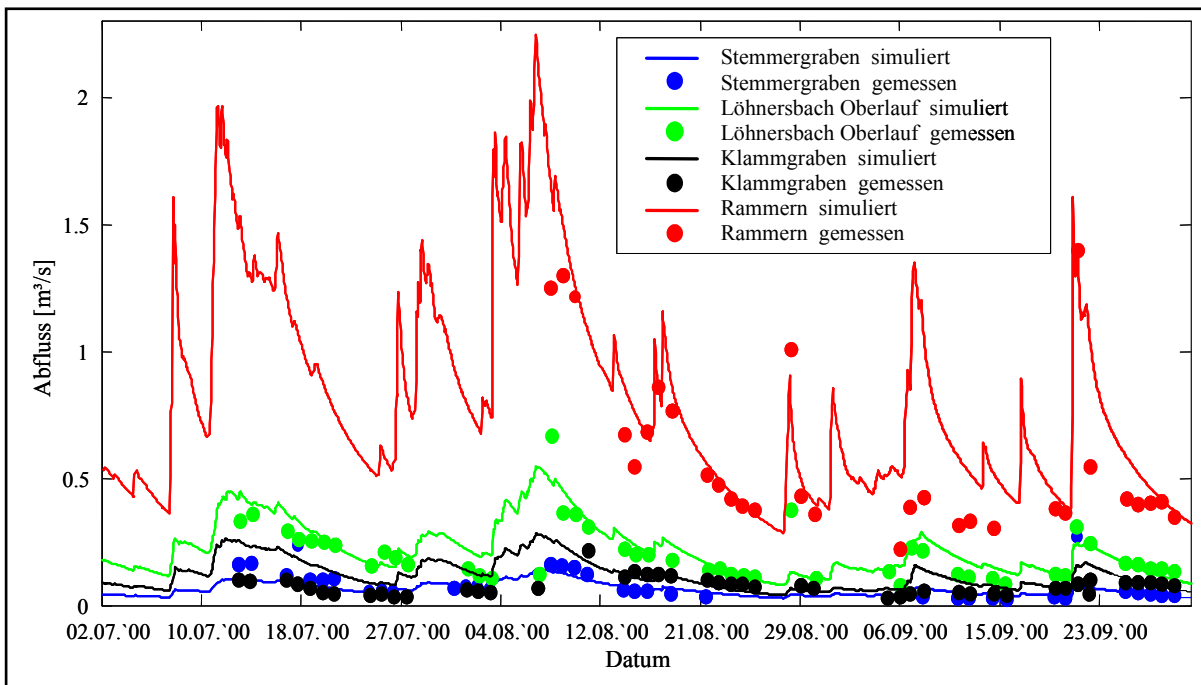


Abbildung 132: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse der multi-site Validierung des Löhnersbachmodells mit Abflussmessungen auf Tagesbasis an den Auslässen der Teileinzugsgebiete. Die Linien zeigen den modellierten Abfluss, die Punkte den manuell gemessenen Abfluss an den Teileinzugsgebietsauslässen (ZILLGENS ET AL. 2005; verändert).

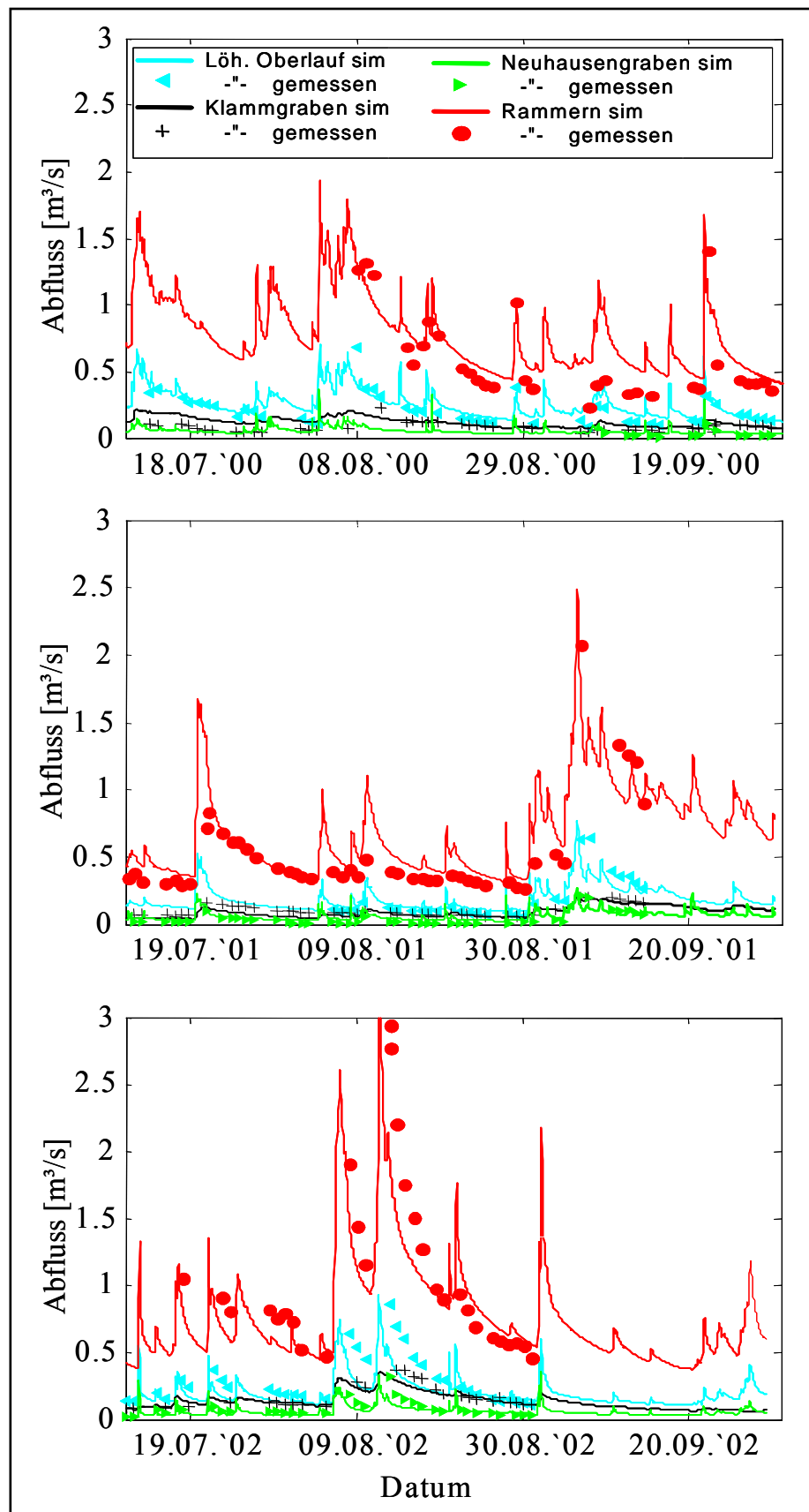


Abbildung 133: Gegenüberstellung von gemessenen Abflüssen (Salzbestimmungsmethode) und simulierten Abflüssen für drei Teileinzugsgebiete. Die Linien zeigen den modellierten Abfluss, die Punkte den manuell gemessenen Abfluss an den Teileinzugsgebietsauslässen. (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert, Legende gilt für alle drei Zeiträume).

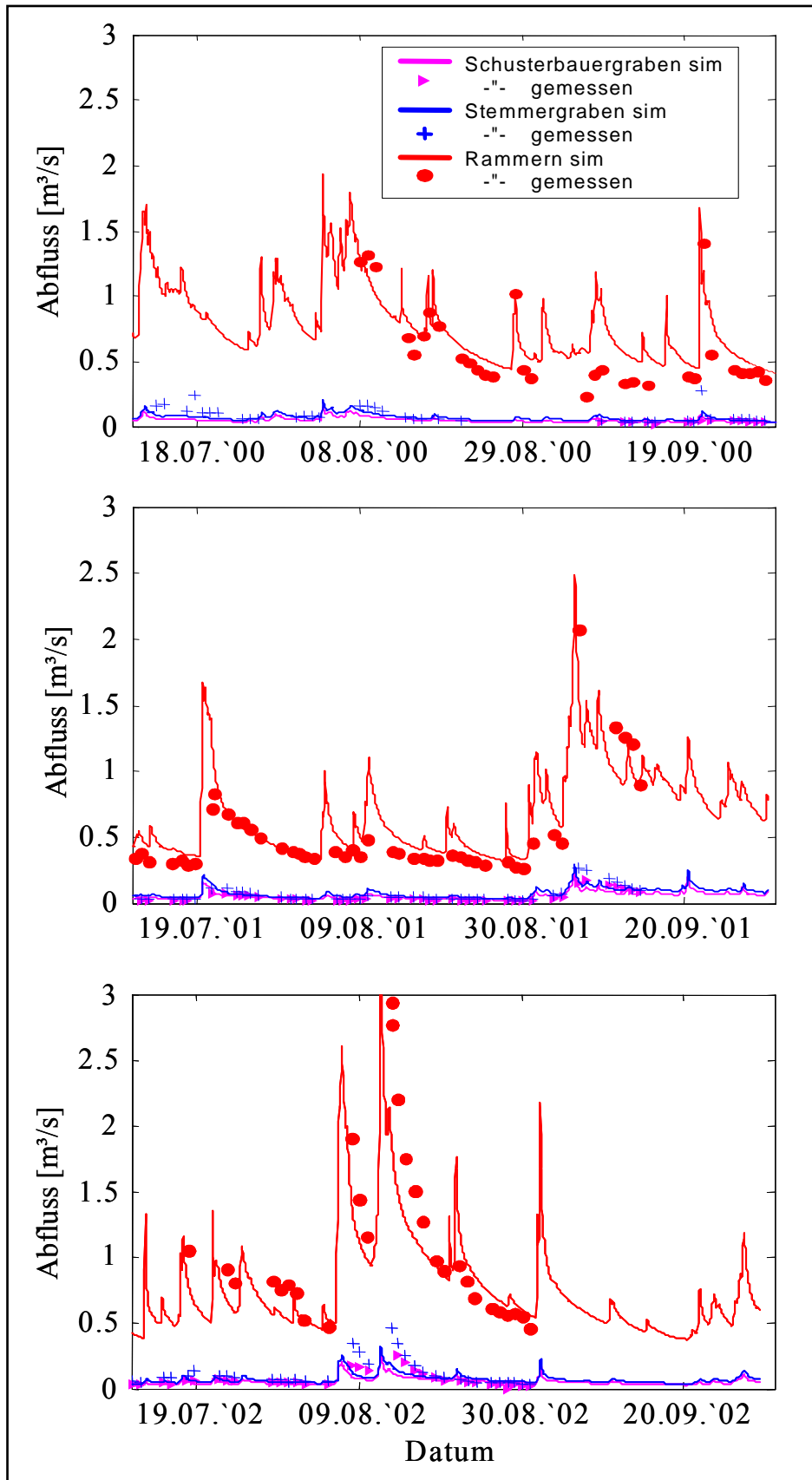


Abbildung 134: Gegenüberstellung von gemessenen Abflüssen (Salzbestimmungsmethode) und simulierten Abflüssen für zwei Teileinzugsgebiete. Die Linien zeigen den modellierten Abfluss, die Punkte den manuell gemessenen Abfluss an den Teileinzugsgebietsauslässen. (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert, Legende gilt für alle drei Zeiträume).

Tabelle 38: Gütemaße der multi-site Validierung (ZILLGENS ET AL. 2007b).

| Gebiet | Messpunkte | Gütemaße | |
|----------------------|------------|----------|----------------|
| | n | Reff | r ² |
| Neuhausengraben | 100 | 0.61 | 0.76 |
| Stemmergraben | 128 | 0.43 | 0.61 |
| Schusterbauergraben | 103 | 0.53 | 0.68 |
| Löhnersbach Oberlauf | 118 | 0.57 | 0.65 |
| Klammgraben | 134 | 0.59 | 0.59 |
| Rammern | 117 | 0.78 | 0.84 |

7.3.4.6 Fazit

Im Einzugsgebiet des Löhnersbaches konnten in der schneefreien Zeit zwei Ereignistypen identifiziert werden, deren Auftreten in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge, Niederschlagsintensität und Gebietsfeuchte zu Beginn des Ereignisses bestimmt werden. Einer dieser Ereignistypen generiert überdurchschnittliche Abflussfrachten, was für die Hochwasserentstehung große Bedeutung haben kann. In einer Datenanalyse konnte gezeigt werden, dass sich diese Ereignisabhängigkeit über drei ineinander geschachtelte Einzugsgebiete (Pegel Limbergalm 0,07 km², Pegel Rammern 16 km² und Pegel Viehhofen 150 km²) nachweisen lässt. Am Pegel Limbergalm wurden detaillierte Feldstudien unternommen, die eine Charakterisierung der Abflusskomponenten, Identifizierung der Herkunftsräume, zeitlich variablen Dynamik und Abflussbeiträge möglich machte. Durch dieses Prozesswissen war es möglich, ein Simulationsmodell zu entwickeln, das die komplexe Ereignischarakteristik simulieren kann.

Für das Löhnersbachgebiet wurde eine Raumgliederung entwickelt, auf deren Basis ein Einzugsgebietsmodell entwickelt wurde, das die schnellen Prozesse mit physikalisch basierten Ansätzen und rasterbasiert und die vergleichsweise „langsamen“ Prozesse mit linearen Speichern auf Teileinzugsgebietsebene modelliert. Mit diesem speziell auf die Abflussprozesse im Sommer ausgelegten Modell konnten bis auf die Schneeschmelze sehr gute Simulationsergebnisse erzielt werden. Die Validierung des Modells für das Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ (Pegel Rammern) erfolgte in zwei Schritten. Zum einen wurden die simulierten Abflüsse mit denen am Pegel Rammern gemessenen gegenübergestellt (*on-site validation*) zum anderen erfolgte ein Vergleich der simulierten Abflüsse mit den gemessenen Abflüssen aus den Teileinzugsgebieten, die manuell auf Tagesbasis gemessen wurden (*multi-site validation*).

Durch die „multi-site“ Validierung wurde gezeigt, dass auch das Verhalten der Teileinzugsgebiete plausibel durch die Modellierung erfasst werden konnte, obwohl für die Kalibrierung des Modells keine Daten der Teileinzugsgebiete verwendet worden waren. Dies deutet darauf hin, dass das Modell aus den richtigen Gründen richtig funktioniert. Die Modellgüte wurde sowohl auf der Limbergalm- als auch Löhnersbachskale im Wesentlichen von der Güte der Inputdaten bestimmt. Insgesamt bestätigen diese Arbeiten, dass durch Integration von Prozesswissen auch in komplexen Landschaftsräumen plausible Simulationsergebnisse erzielt werden können.

8 Schlussfolgerungen

Die im Einzugsgebiet des Löhnersbaches durchgeführten Prozess- und Modellstudien ermöglichen eine detaillierte Analyse der Abflussbildung und eine eingehende Bewertung der Hochwasserentstehung in einem alpinen Einzugsgebiet.

Ein wichtiger methodischer Aspekt der Forschungsarbeiten war es, die hydrologischen Untersuchungen in verschiedenen Skalen durchzuführen. Die Einzugsgebietsgrößen umfassen 0,07 km² (z.B. Limbergalm, Klingleralm und Herzogalm), 16 km² (Pegel Rammern, Löhnersbach) und 150 km² (Pegel Viehhofen, Saalach). Detaillierte experimentelle Prozessstudien fanden vor allem in dem Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm statt, der im Wesentlichen eine Sättigungsfläche entwässert. Konventionelle hydrometeorologische Beobachtungen hatten in diesem Einzugsgebiet klare Hinweise auf unterirdische Abflussprozesse geliefert, die regelmäßig in Verbindung mit spezifischen Ereignistypen des Niederschlages auftreten. So konnten für den Pegel Limbergalm während der schneefreien Zeit zwei charakteristische Ereignistypen identifiziert werden. Kurze, intensive Niederschläge rufen bei eher trockenem Gebietszustand eine rasche, nahezu synchrone sogenannte *unimodale* Abflussreaktion hervor, die auch am Hauptpegel Rammern erkennbar ist. Lang anhaltende Niederschläge mit mäßiger Intensität und/oder hoher Vorbefeuchtung (und entsprechend großem Basisabfluss zu Ereignisbeginn) führen zu *bimodalen* Abflussreaktionen. Bei diesen Ereignissen folgt auf die erste rasche Abflussreaktion eine zweite, stark verzögerte Reaktion, die ohne zusätzlichen Niederschlag hervorgerufen wird und somit eindeutig auf unterirdische Abflusskomponenten hinweist. Um die Herkunftsräume, die Fließwege sowie die zeitliche Dynamik dieses unterirdischen Abflusses zu bestimmen wurden Beregnungsversuche, geophysikalische (Seismik und Geolektrik), tracerhydrologische und hydrochemische Untersuchungen in dem mikroskaligen Teilgebiet durchgeführt.

Die Gesamtheit der experimentellen Ergebnisse ermöglicht es, ein Abflussbildungskonzept für das Teilgebiet „Limbergalm“ zu entwerfen. Dieses berücksichtigt oberflächliche und unterirdische hochwasserrelevante Umsatzräume und Prozesse. Die hochwasserrelevanten Abflussbildungsprozesse am Pegel Limbergalm setzen sich somit aus den schnell reagierenden Prozessen Sättigungsflächenabfluss und episodischem Zwischenabfluss im Rohhumus der Zwergsträucher zusammen. Basisabfluss und nachlaufende Welle werden dagegen ausschließlich aus Grundwasser, aus dem matrixgestützten Blockschutt und aus dem geklüfteten Grundgebirge generiert. Als weitere schnelle Abflussbildungskomponente tritt in Abhängigkeit des Vorhandenseins von Blockschutt zusätzlich zu den oben genannten Prozessen bzw. Herkunftsräumen schneller Zwischenabfluss aus Blockschutt auf. Dieses Untergund- und Fließweg-Modellkonzept stellt die Basis für die Modellierung der Abflussbildung am Pegel Limbergalm dar.

In dem für das Einzugsgebiet Limbergalm entwickelte Modell wird so verfahren, dass die schnellen Prozesse wie *saturation overland flow* (q_{SOF}) und *quick subsurface flow* (q_{diff}) physikalisch basiert sowie in hoher zeitlicher Auflösung simuliert werden, die langsamen Komponenten wie *slow subsurface flow* hingegen mit einer konzeptionellen Speicheroutine modelliert werden. Das Modell ist flächendifferenziert, wobei bei

der Raumgliederung aber ausschließlich zwischen den oben genannten Flächen (schnell und langsame Komponenten) differenziert wird. Die Aufschlüsselung der Prozesse im Einzugsgebiet Limbergalm durch detaillierte Prozessstudien hat es ermöglicht, entsprechende Module für die in diesem Einzugsgebiet vorliegenden Raumeinheiten zu entwickeln und anzupassen. Auf dieser Basis konnten das im Einzugsgebiet vorherrschende komplexe Abflussbildungssystem mit sich dynamisch verändernden unterirdischen und oberirdischen Wasserumsatzräumen sehr gut beschrieben werden. Durch das gleichzeitige Zusammenspiel von Prozessstudien und Modellentwicklung zeigte sich, dass mit zunehmender Prozesskenntnis die Modellierungsergebnisse sukzessive besser wurden. Wesentliche Unsicherheiten der Modellergebnisse resultieren vor allem aus den Eingangsdaten, speziell dem Niederschlag.

Dass die in der Hangskala identifizierten Prozesse für alle Skalen bedeutsam für die Hochwasserentstehung sind und die Sättigungsflächen eine Indikatorfunktion für alle Skalen haben, zeigt die multivariat-statistische Auswertung zahlreicher Niederschlag-Abfluss-Ereignisse für die Einzugsgebiete Pegel Limbergalm (0,07 km²), Pegel Rammern (16 km²) und Pegel Viehhofen (150 km²). Zwar sind die am Pegel Limbergalm auftretenden nachlaufenden Wellen der bimodalen Ereignisse am Hauptpegel Rammern niemals sichtbar, denn Grundwasserabflüsse unterschiedlicher Lauf- bzw. Aufenthaltszeit überlagern sich, aber es tritt ein stark verlangsamter Rückgang des abfallenden Astes der Hochwasserwelle auf. Im Gegensatz dazu geht der Abfluss bei einem unimodalen Ereignis sehr rasch zurück und die Variabilität der Rückgangskonstante ist deutlich geringer als bei bimodalen Ereignissen. Diese unterschiedlichen Rückgangskonstanten zwischen den beiden Ereignistypen tragen dazu bei, dass die mikroskaligen Abflussbildungsprozesse auch noch in der Einzugsgebietskala identifiziert werden können. Wird z. B. ein bimodales Ereignis am Pegel Limbergalm beobachtet, so dürfte das Abflussgeschehen am Pegel Rammern vor allem von unterirdischem Abflusskomponenten dominiert werden und hohe Abflussbeiwerte auftreten.

Auch andere skalenübergreifende Berechnungsansätze wie z.B. die Hochrechnungen der Abflussfracht am Gebietspegel Rammern aus den untereinander ähnlichen Feuchtflächen Herzogalm und Limbergalm in Abhängigkeit vom Ereignisniederschlag zeigen, dass zum einen die Abflussfracht in Rammern auf Basis der Abflussfracht an jeder der beiden Feuchtflächen recht genau abgeschätzt werden kann und zum anderen ähnlich große Ereignisniederschläge bei hoher Vorbefeuchtung – als Indexgröße dient der Basisabfluss zu Ereignisbeginn – wesentlich größere Abflussfrachten als bei geringer Vorbefeuchtung ergeben, wobei die Genauigkeit der Abschätzung des Abflusses in Rammern aus jenem der jeweiligen Feuchtfläche nahezu dieselbe ist. Dies bedeutet, dass die Hypothese, der Gebietsabfluss werde durch den Feuchtflächenabfluss dominiert, durch die vorliegende Untersuchung weiter gestützt wird. Dies gilt sowohl für nasse als auch für trockene Vorbedingungen und für Ereignisse sehr unterschiedlicher Größe.

Aufgrund der Tatsache, dass die Sättigungsflächen (z.B. Limbergalm) eine Indikatorfunktion für das Abflussgeschehen des gesamten Einzugsgebietes „Löhnersbach“ besitzen, wurde das für den Pegel Limbergalm entwickelte Modell modifiziert und auf das Gesamteinzugsgebiet übertragen. Voraussetzung für eine flächendetaillierte Abflussmodellierung war eine Untergliederung des Einzugsgebietes in hydrologisch ähnliche Einheiten. Für das Einzugsgebiet Löhnersbach wurde hierfür eine prozessorientierte

Raumgliederung entwickelt, die die Prozesskenntnisse aus der Mikroskala (Pegel Limbergalm) – vor allem die Abhängigkeit der Abflussbildungsprozesse von der Geologie (Grundwasser aus dem matrixgestützten Blockschutt und aus dem geklüfteten Grundgebirge) und von der Vegetation (z.B. episodischem Zwischenabfluss im Rohhumus der Zwergsträucher) – berücksichtigt. Mit dem entwickelten Einzugsgebietsmodell werden – wie bereits im Einzugsgebiet Limbergalm – die schnellen Prozesse mit physikalisch basierten Ansätzen und rasterbasiert und die vergleichsweise „langsamen“ Prozesse mit linearen Speichern auf Teileinzugsgebietsebene modelliert. Mit diesem speziell auf die Abflussprozesse im Sommer ausgelegten Modell konnten bis auf die Schneeschmelze sehr gute Simulationsergebnisse erzielt werden. Durch die ‚multi-site‘ Validierung konnte gezeigt werden, dass auch das Verhalten der Teileinzugsgebiete plausibel durch die Modellierung erfasst wird, obwohl für die Kalibrierung des Modells keine Daten der Teileinzugsgebiete verwendet worden waren. Dies deutet darauf hin, dass das Modell aus den richtigen Gründen funktioniert und die zeitliche und räumliche Variabilität der Abflussbildung adäquat erfasst wird.

Insgesamt bestätigen die experimentellen und modelltechnischen Forschungen im Löhnersbachgebiet, dass durch Integration von Prozesswissen auch in komplexen Landschaftsräumen plausible Simulationsergebnisse erzielt werden können. So verhalfen Prozessstudien im Kleinen zu Erkenntnissen, die auch im Großen Gültigkeit besitzen und in dieser Skale die Modellanwendung erleichtern.

9 Zusammenfassung

Das Ziel der verschiedenen Forschungsprojekte im Löhnersbachgebiet war, die Naturvorgänge, die in einem alpinen Einzugsgebiet an der Hochwasserentstehung beteiligt sind, entsprechend der Skalenhierarchie Testfläche, Hangfläche, Kleineinzugsgebiet, Einzugsgebiet zu analysieren. Einhergehend mit der Verbesserung der Kenntnis über die vorherrschenden Abflussmechanismen wird eine mathematische, phänomenorientierte Modellierung durchgeführt und bildet die Voraussetzung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Gebiete. Mehrjährige und kontinuierliche hydrometeorologische Messungen (1990 bis 2005) in dem Einzugsgebiet „Löhnersbach“ (Kitzbüheler Alpen, Österreich) und seinen Teileinzugsgebieten bilden die Grundlage für die detaillierte sowie physikalisch basierte Analyse der Abflussbildungsprozesse. Die experimentellen und modelltechnischen Arbeiten konzentrieren sich auf die Analyse und Beschreibung der Abflussbildung, die in einem alpinen Raum speziell innerhalb der nördlichen Grauwackenzone vorherrschen. Die gewonnenen punktuellen und räumlichen Daten zu festem und flüssigem Niederschlag, Temperatur, Abfluss, Quellabfluss, Geologie, Boden, Vegetation usw. sind im „Hydrologischen Informationssystem Löhnersbach“ verarbeitet und archiviert. Im Rahmen eines Preprocessings wurden die Zeitreihen zu Niederschlag, Temperatur und Abfluss einer Plausibilitätskontrolle unterzogen und für spätere Datenanalysen oder Abflussmodellierungen aufbereitet. Die verschiedenen räumlichen Eingangsdaten wie z.B. digitales Höhenmodell, Boden- oder Sättigungsflächenkartierungen unterlagen ebenfalls einer Qualitätskontrolle und wurden in ein adäquates Datenformat konvertiert.

Auf der Grundlage einer umfangreichen Feldbegehung zu Beginn der Forschungen im Löhnersbachgebiet wurden neben dem Hauptpegel Rammern (16 km²) sukzessive mehrere Feuchtflächen (Herzogalm (0,29 ha), Klingleralm (0,45 ha) und Limbergalm (7 ha)) – sogenannte Kleinsteneinzugsgebiete – mit Abflusspegeln und Niederschlagsstationen instrumentiert. Diese hydrometeorologischen Daten erlauben eine skalenübergreifende Analyse des Abflussgeschehens. So ist es möglich, die Abflussfracht am Pegel Rammern aus den untereinander ähnlichen Feuchtflächen Herzogalm und Limbergalm in Abhängigkeit vom Ereignisniederschlag hochzurechnen. Es ist erkennbar, dass die Abflussfracht in Rammern auf Basis der Abflussfracht der beiden ähnlichen Feuchtflächen Herzogalm und Limbergalm recht genau abgeschätzt werden kann und ähnlich große Ereignisniederschläge bei hoher Gebietsvorbefeuchtung wesentlich größere Abflussfrachten als bei geringer Vorbefeuchtung ergeben, wobei die Genauigkeit der Abschätzung des Abflusses in Rammern aus jenem der jeweiligen Feuchtfläche nahezu dieselbe ist. Eine Hochrechnung der Abflussfracht für den Pegel Rammern aus der Feuchtfläche Klingleralm ist nur bedingt möglich, was in den abflussdämpfenden Eigenschaften der Feuchtfläche hinsichtlich ihrer pflanzlichen und pedologischen Ausstattung begründet ist.

Detaillierte und umfangreiche experimentelle Prozessstudien fanden vor allem in dem Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm (0,07 km²) statt, der im Wesentlichen eine Sättigungsfläche entwässert. Konventionelle hydrometeorologische Beobachtungen hatten in diesem Einzugsgebiet klare Hinweise auf unterirdische Abflussprozesse geliefert.

Grundsätzlich sind am Pegel Limbergalm zwei kontrastierende Typen von Abflussergebnissen zu beobachten, die bei bestimmten Gebietsvorfeuchten und Niederschlagsereignissen auftreten. Kurze, intensive Niederschläge rufen bei eher trockenem Gebietszustand eine rasche, nahezu synchrone sogenannte *unimodale* Abflussreaktion sowohl am Pegel Limbergalm als auch am Hauptpegel Rammern hervor. Kommt es bei hoher Vorbefeuchtung (und entsprechend großem Basisabfluss zu Ereignisbeginn) zu einem lang anhaltenden Niederschlag mäßiger Intensität, so entstehen sogenannte *bimodale* Abflussreaktionen. Der Abfluss am Pegel Limbergalm reagiert sofort auf den Niederschlag, doch es folgt dieser ersten, raschen Reaktion eine zweite, stark verzögerte Reaktion, deren Verlauf auch stark gedämpft ist und die ohne zusätzlichen Niederschlag auftritt. Es liegt nahe, diese zweite, „nachlaufende“ Welle als aus dem Grundwasser stammend anzusehen. Der Ereignistyp mit nachlaufender Welle tritt in idealtypischer Form nicht sehr häufig auf, aber im langjährigen Durchschnitt immerhin ca. einmal jährlich. Um die Herkunftsräume, die Fließwege sowie die zeitliche Dynamik dieses unterirdischen Abflusses zu bestimmen wurden Beregnungsversuche, geophysikalische (Seismik und Geoelektrik), tracerhydrologische und hydrochemische Untersuchungen in dem mikroskaligen Teilgebiet Limbergalm durchgeführt.

Auf Basis dieser experimentell gewonnenen Ergebnisse ist es möglich ein Abflussbildungskonzept für das Teilgebiet „Limbergalm“ zu entwerfen, in dem oberflächliche und unterirdische hochwasserrelevante Umsatzräume und Prozesse berücksichtigt werden. Die hochwasserrelevanten Abflussbildungsprozesse am Pegel Limbergalm setzen sich somit aus den schnell reagierenden Prozessen Sättigungsflächenabfluss und episodischer Zwischenabfluss im Rohhumus der Zwergsträucher zusammen. Basisabfluss und nachlaufende Welle werden dagegen ausschließlich aus Grundwasser, aus dem matrixgestützten Blockschutt und aus dem geklüfteten Grundgebirge generiert. Als weitere schnelle Abflussbildungskomponente tritt in Abhängigkeit des Vorhandenseins von Blockschutt zusätzlich zu den oben genannten Prozessen bzw. Herkunftsräumen schneller Zwischenabfluss aus Blockschutt auf.

Einhergehend mit der gewonnenen Prozesskenntnis wurde ein Konzept für ein Abflussmodell für das Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm entwickelt (*Potsdamer Modell*, ZILLGENS et al. 2005). Die Aufschlüsselung der Prozesse im Einzugsgebiet Limbergalm durch detaillierte Prozessstudien hat es ermöglicht, entsprechende Module für die in diesem Einzugsgebiet vorliegenden Raumeinheiten zu entwickeln und anzupassen. Dieses Modell ist flächendifferenziert, wobei hinsichtlich der Raumgliederung ausschließlich zwischen zwei Flächen bzw. Prozessen, den schnellen und den langsamen Komponenten, unterschieden wird. In dem für das Einzugsgebiet Limbergalm entwickelte Modell wird so verfahren, dass die schnellen Prozesse wie *saturation overland flow* (q_{sof}) und *quick subsurface flow* (q_{duff}) physikalisch basiert sowie in hoher zeitlicher Auflösung simuliert werden, die langsamen Komponenten wie *slow subsurface flow* hingegen mit einer konzeptionellen Speicherroutine modelliert werden. Die mit diesem Modellkonzept erzielten Simulationsergebnisse sind sehr zufriedenstellend. Modellunsicherheiten ergeben sich vor allem aus den Eingangsdaten, weniger aus Fehlern, die im Aufbau bzw. in der Konzeption des Modells begründet sind.

Um das in der Mikroskale (EZG Limbergalm 0,07 km²) entwickelte Abflussmodell in die Mesoskale (EZG Löhnersbach, 16 km²) übertragen zu können wurde ein Raumgliederungskonzept erstellt, das auf den im Einzugsgebiet Limbergalm gewonnenen

Prozesskenntnissen basiert. Entsprechend eines hierarchischen Entscheidungspfades wurden alle identifizierten hydrologisch wichtigen Umsatzräume ebenenspezifisch in Bereiche mit den gleichen dominanten Abflussbildungsprozessen flächendeckend und –detailliert ausgewiesen. Das auf das Einzugsgebiet „Löhnersbach“ modifizierte und angewandte Potsdamer Modell war in der Lage, ohne Kalibrierung die Abflüsse aus den etwa 1 km² großen Teileinzugsgebieten relativ genau zu simulieren, wie die multi-site Validierung mit täglichen Abflussmessungen zeigte.

Neben dem speziell für das Löhnersbachgebiet entwickelte *Potsdamer Modell* kamen sowohl für das Kleinsteinzugsgebiet Pegel Limbergalm als auch für das Einzugsgebiet Pegel Rammern die Modelle BROOK (FEDERER und LASH 1978), HQSim (KLEINDIENST 1996), und TAC^D (UHLENBROOK 1996) zur Anwendung:

Der Einsatz des Wasserhaushalts-Simulationsmodell *BROOK* auf das Einzugsgebiet des Löhnersbaches zeigt, dass die Abflussdynamik vom Modell relativ gut wiedergegeben wird. Tendenziell wird bei kleinen Niederschlagsereignissen etwas zuviel Direktabfluss generiert. Zudem stellt dieses Modell ein taugliches Werkzeug zur Abschätzung des Bodenwasserhaushaltes in kleinen Einzugsgebieten dar. Durch verschiedene Modifikationen an der Modellstruktur können die Ergebnisse bodenphysikalischer Untersuchungen unmittelbar nutzbar gemacht sowie zur Abschätzung der Wasserhaushaltsgrößen von kleinen Einzugsgebieten, in denen noch keine Abflussdaten erhoben worden sind, verwendet werden. Der Benutzerkomfort des Modells wurde wesentlich erhöht.

Für die Anwendung des Wasserhaushaltsmodelles *HQSim* im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ wurden die Parameter der einzelnen Hydrotope auf Grundlage von Messungen und Berechnungen (z.B. Pedotransferfunktionen) bestimmt und erste Simulationen für das hydrologische Jahr 1999 auf Stundenbasis durchgeführt. Die ersten Simulationsergebnisse zeigen, dass der Oberflächenabfluss überschätzt wird und der Basisabfluss dementsprechend zu gering ist.

Die Simulationsergebnisse, die mit TAC^D für das relativ nasse hydrologische Jahr 1999/2000 erzielt wurden (EZG Löhnersbach), weisen eine gute Modelleffizienz auf und können insgesamt als zufriedenstellend bezeichnet werden. Besonders gute Anpassungen wurden für die nachlaufenden Wellen, die winterlichen Niedrigwasserabflüsse und die Trockenwetterauslaufkurven erreicht. Eine zufriedenstellende Simulation der Hochwasserspitzen war im Zuge der Kalibrierung nicht möglich. Diesbezüglich wurden, basierend auf verschiedenen Hypothesen zur Hochwasserentstehung, Veränderungen im Modellkonzept vorgenommen.

Die im Einzugsgebiet „Löhnersbach“ durchgeführten experimentellen und modelltechnischen Arbeiten zeigen, dass durch das Zusammenspiel von Feldforschung und Modellentwicklung die Abflussbildung auch in sehr komplexen Naturräumen adäquat erfasst und simuliert werden kann. Es wird die Notwendigkeit aufgezeigt, bei der Analyse der Abflussprozesse unterschiedliche Methoden zu verknüpfen und insbesondere die Prozessstudien skalenübergreifend durchzuführen. Dadurch kann die Bedeutung punktueller Prozesse für höhere Skalen erfasst werden und auch die Modellübertragung vom Kleinsteinzugsgebiet in größere Einzugsgebiete erleichtert werden.

Literaturverzeichnis

- ASZTALOS, J. (2006): Workshop HQsim und SES – 11. bis 15. Dezember 2006. – unveröffentlichte Seminarunterlagen, 135 S., Wien.
- BAEHR, H.D.T. (2005): Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen . – 651 S.
- BAUMGARTNER, A., REICHEL, E. & WEBER, G. (1982): Der Wasserhaushalt der Alpen – Verdunstungskarte der Ostalpen Maßstab 1:500 000.
- BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. – In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. – Mitt. XI der Senatskommission für Wasserforschung der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), VCH, Weinheim, S. 16-32.
- BECKER, A. & PFÜTZNER, B. (1987): System approach and subroutines for river basin modelling. – Acta Hydrophys., Bd. 31, Vol. 3/4: 125-141.
- BERGSTRÖM, S. (1992): The HBV model - its structure and applications. SMHI Reports RH no. 4, Norrköping.
- BINLEY, A. M., BEVEN, K. J., CALVER, A., WATTS, L. G. (1991): Changing responses in hydrology: Assessing the uncertainty in physically based model predictions. – Water Resources Research 27/ 6:1253 - 1261.
- BLÖSCHL, G., KIRNBAUER, R. & GUTKNECHT, D. (1991): Distributed Snowmelt Simulations in an Alpine Catchment. 1. Model Evaluation on the Basis of Snow Cover Patterns. – Water Resources Research. 27 (12):3171-3179.
- BLUM, W.E., SPIEGEL, H. & WENZEL, W.W. (1989): Bodenzustandsinventur - Konzeption, Durchführung und Bewertung, Empfehlungen zu einer Vorgangsweise in Österreich. – Arbeitskreis Bodenzustandsinventur der ÖBG, S. 1-47.
- BOHL, H. (1996): Eichung von TDR zur Wassergehaltsbestimmung in Böden auf Basis gemischt-dielektrischer Modelle. – Bodenökologie und Bodengenes 22, 140 S.
- BRAKENSIEK, D.J. & RAWLS, W.J. (1988) Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties in: Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling; Theory and Practice. ed. by Morel-Seytoux, H.J. NATO ASI Series; Series C: Mathematical and Physical Sciences; Vol 275: 275 300.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., 119 S.
- BURGSTALLER, B. & R. SCHIFFER (1993): Kartierung der aktuellen Vegetation im Löhnersbachgraben. – Unveröffentlichter Bericht / Thematische Karte, ARGE Pflanzensoziologie – Ökologie, Salzburg.
- CAMPBELL, G.S. (1974): A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data. – Soil Science, Vol. 117/6: 311-314.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMEN (DIN) 19 663 (1985): Wildbachverbauung, Begriffe, Planung und Bau. – Deutscher Normenausschuss, Berlin.
- DINGMAN, S.L. (1993): Physical Hydrology. – 575 S.

- DISSE, M. (1995): Modellierung der Verdunstung und Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten. – Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft 53.
- DRABEK, U. (2003): HQsim – Parameterfiles input/output, Zusammenfassung der Prozesse, Vergleich mit BROOK, Input und Output. – unveröffentl. Mitteilung
- FEDERER, C. A.; LASH, D. (1978): BROOK: A Hydrologic Simulation Model for Eastern Forests. – Water Resource Research Centre, University of New Hampshire; Research Report Number 19
- FLIRI, F. (1975): Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. – Monographien zur Landeskunde Tirols 1, 454 S.
- FORSTER, F. (1991): Anwenderhandbuch für das Wasserhaushalts - Simulationsmodell BROOK. Eidgen. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft; Birmensdorf; CH; Interner Hydrologie - Bericht B 349.1.
- FORSTER, F. (1992): Anwendungen und Erfahrungen mit dem Simulationsmodell BROOK. Eidgen. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft; Birmensdorf; CH; Interner Hydrologie - Bericht B 349.1.
- GUTKNECHT, D. (1997): Vielfältigkeit - Zum Umgang mit einem wichtigen Aspekt hydrologischer Prozesse, In: Friedrich, R. (Hrsg.): Wasserbau - Visionen für das nächste Jahrtausend, Festschrift zum 60.Geburtstag von Prof. Scheuerlein, Seite 183-197.
- GUTKNECHT, D. (1996): Abflusstehung an Hängen - Beobachtungen und Konzeptionen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 48(5-6), 134-144.
- HAAS, P. & KIRNBAUER, R. (1994): Runoff generation in a small Alpine catchment - observations on different scales. – European Geophysical Society, XIX General Assembly, Grenoble, 25 - 29. April 1994. Annales Geophysicae, Suppl. II to Vol. 12, p. C 428.
- HAGER, W.H. (1990): Scharfkantiger Dreiecksüberfall. – „wasser, energie, luft“ 82(1/2):9-14.
- HALLIDAY, D. & RESNICK, R. (1994): Physik Teil 2. – Aus dem Amerikanischen übersetzt von Joachim Streubel und Bernd Schaarschmidt, 1831 S.
- HDÖ - HYDROGRAPHISCHER DIENST IN ÖSTERREICH (2008): Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2005, Band 113. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- HDÖ - HYDROGRAPHISCHER DIENST IN ÖSTERREICH (2002): Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 1999, Band 107. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- HECHT, S. (2001): Anwendung refraktionsseismischer Methoden zur Erkundung des oberflächennahen Untergrunds mit acht Fallbeispielen aus Südwestdeutschland. – Stuttgarter Geographische Studien 131, 165 S.
- HERRMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. – 151 S.
- HEWLETT, J.D. AND A.R. HIBBERT, (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (Ed.): International Symposium on Forest Hydrology. The Pennsylvania State Univ., 29 Aug. - 10 Sept 1965. Pergamon, Oxford, p. 275-290.

- HUISMAN, J.A., SPERL, C., BOUTEN, W. & VERSTRATEN, J.M. (2001) : Soil water content measurement at different scales: accuracy of TDR and ground-penetrating radar. – *Journal of Hydrology*, Vol. 245:48-58
- JOHST, M. (2003): Die Weiterentwicklung und Anwendung des prozessorientierten Einzugsgebietsmodells TAC^D im Löhnersbach-Einzugsgebiet, Kitzbüheler Alpen, Österreich. – unveröffentl. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Albert Ludwigs Universität Freiburg i.Br., 105 S.
- KEARY, P., BROOKS, M. & HILL, I. (2002³): An Introduction to Geophysical Exploration. – 262 S.
- KIRNBAUER, R. (1994): Hydrographische Daten - Hydrologische Erkenntnis. – *ÖIAZ, Österr. Ingenieur Zeitschrift* 139/9:399-407.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1990): Abflussmechanismen – Beobachtung und Modellierung. – Abschlussbericht für den Bearbeitungsabschnitt 1990, Teilprojekt des Forschungsprojektes „Erfassung der Abflussverhältnisse in kleinen Einzugsgebieten“, 37 Seiten, unveröffentlicht.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1991): Abflussmechanismen. Beobachtung und Modellierung. – *Österr. Akademie der Wissenschaften, Forschungsprogramm "Hydrologie Österreichs"* Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU Wien, Unveröff. Enderbericht 1990, 37 Seiten.
- KIRNBAUER, R., BLÖSCHL, G., WALDHÄUSL, P. & HOCHSTÖGER, F. (1991): An analysis of snow cover patterns as derived from oblique aerial photographs. – In: H. Bergmann, H. Lang, W. Frey, D. Issler and B. Salm (eds.): *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas, Proc. Vienna Symp., August 1991, IAHS Publ. no. 205:91-99.*
- KIRNBAUER, R. & BLÖSCHL, G. (1993): Wie ähnlich sind Ausaperungsmuster von Jahr zu Jahr? – *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 37(5/6):113-121.
- KIRNBAUER, R., STEIDL, R. & HAAS, P. (1994): Abflussmechanismen. Beobachtung und Modellierung. – *Österr. Akademie der Wissenschaften, Forschungsprogramm "Hydrologie Österreichs"*. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU Wien. Abschlußbericht 1993, unveröffentlicht.
- KIRNBAUER, R., PIRKL, H., HAAS, P. & STEIDL, R. (1996): Abflussmechanismen - Beobachtung und Modellierung. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48 (1/2):15 – 26.
- KIRNBAUER, R. & HAAS, P. (1998): Abflussentstehung in alpinen Einzugsgebieten. – Enderbericht für 1998, *HÖ* 1/94, Forschungsprogramm „Hydrologie Österreichs“, 30 Seiten mit Anhang A, B und C.
- KIRNBAUER, R., BLÖSCHL, G., HAAS, P., MÜLLER, G. & MERZ, B. (2001): Space-time patterns of runoff generation in the Löhnersbach catchment. – In: *Runoff generation and implications for river basin modelling. Freiburger Schriften zur Hydrologie* 13:37-45.

- KIRNBAUER, R., TILCH, N., MARKART, G., ZILLGENS, B., KOHLBECK, F., LEROCH, K., SEIDLER, CH., HAAS, P., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., LEIBUNDGUT, C., MERZ, B., CHWATAL, W. & FÜRST, J. (2004): Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone der Alpen - Feldforschungen und mathematische Modellierung. – In: 10. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 Riva del Garda; Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Klagenfurt, Austria, 2004, Band II/45 - II/56.
- KIRNBAUER, R., TILCH, N., ZILLGENS, B., MERZ, B. & UHLENBROOK, S. (2005): Tracing runoff generation processes through different spatial scales - Field studies and experiments. – International conference on Headwater Control VI, Bergen; 20.06.2005-23.06.2005; In: "Headwater 2005", Paper-Nr. 136.
- KIRNBAUER, R., TILCH, N., ZILLGENS, B. & MERZ, B. (2006): Von sieben Hektar bis 150 Quadratkilometer. Skalenübergreifende Untersuchungen in der nördlichen Grauwackenzone der österreichischen Alpen. – Dresdner Schriften zur Hydrologie 5:198-210.
- KLEINDIENST, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. – unveröffentl. Diplomarbeit, Ludwig Maximilians Universität München.
- KNÖDEL, K., KRUMMEL, H., LANGE, G. (1997): Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1102 S.
- KOHL B., MARKART G., SCHAUER T. & PORZELT M. (2002): Vergleich zweier Großregenanlagen zur Abschätzung des Abfluss- und Infiltrationsverhalten von unterschiedlichen Boden-/Vegetationskomplexen. – BFW-Berichte 127:31-44.
- LARCHER, W. (2001⁶): Ökophysiologie der Pflanzen - Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. – 408 S.
- LEHMANN, W. (1995): Anwendung geostatistischer Verfahren auf die Bodenfeuchte in ländlichen Einzugsgebieten. – Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft 52, 174 S. u. Anhang
- LIEBIG, W. (2006): ArcGIS-ArcView⁹ – Personal-Geodatabase. Praktische Einführung. – 132 S.
- LIEBIG, W. & MUMMENTHEY, R.-D. (2005): ArcGIS-ArcView⁹ – Band 1: ArcGIS Grundlagen. – 404 S.
- LILJEQUIST, G.H. & CEHAK, K. (1984³): Allgemeine Meteorologie. – 412 S.
- MARKART, G. & KOHL, B. (1993a): Die Böden im Einzugsgebiet des Löhnersbaches/Saalbach. – Unveröffentlichter Projektbericht an das BMLF.
- MARKART, G. & KOHL, B. (1993b): Physikalische Charakteristika der Böden im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach/Saalbach. – Unveröffentlichter Projektbericht im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft für Angewandte Pflanzensoziologie und Ökologie.
- MARKART, G. & KOHL, B. (1994): Zum Abflussverhalten ausgewählter Standorte im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach/Saalbach - Ergebnisse der Beregnungsversuche. – Unveröffentlichter Projektbericht des Institutes für Lawinen- und Wildbachforschung, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Innsbruck, 74 S.

- MARKART, G. & KOHL, B. (1995): Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/ Vegetationseinheiten. Ergebnisse der Beregnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach in Salzburg. – Berichte der Forstlichen Bundesversuchsanstalt 89, 38 S.
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluß-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. – Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 56, 215 S.
- MERZ, R. (2002): Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. – Wiener Mitteilungen, Wasser - Abwasser - Gewässer, Band 181, 198 S.
- MILITZER, H. & WEBER, F. (1987): Angewandte Geophysik. Band 3: Seismik. – 420 S.
- MÖBUS, G. (1997): Geologie der Alpen - eine Einführung in die regional-geologischen Einheiten zwischen Genf und Wien. – 340 S.
- MORGALL, J. & LINSLEY, R. (1965): Computer analysis of overland flow. – Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers 91(3):81-100.
- MURAWSKI, H. & MEYER, W. (2004¹¹): Geologisches Wörterbuch. – 262 S.
- NACHTNEBEL, H.P., LEROCH, K., FÜRST, J., HOLZMANN, H., MARKART, G., KOHL, B., BAUER, W., PIRKL, H., KIRNBAUER, R. & RAMSPACHER, P. (2005): Endbericht zum Projekt Abflussverhalten von Einzugsgebieten verschiedener Größe bei Dauerregen GZ 58110-VC7/2000 im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. – Universität für Bodenkultur Wien, 271 S.
- NASH, J. E. & J. V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. – Journal of Hydrology 10(3):282–290.
- ÖNORM 4401 (1985): Teil 3: Erd- und Grundbau; Erkundung durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben; Protokollierung, 15 Seiten.
- PESCHKE, G., ETZENBERG, C., MÜLLER, G., TÖPFER, J. & ZIMMERMANN, S. (1999): Das wissensbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. – Schriften des Internationalen Hochschulinstitutes Zittau 10, 122 S.
- PILGRIM, D. H. & CORDERY, I. (1993): Flood Runoff. – In: Maidment, D. R. (ed.): Handbook of Hydrology, Chapter 9.1–9.42.
- PIRKL, H. (1989): Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen Hanginstabilitäten und -labilitäten, Hangwasserhaushalt und Massenbewegungen in Teilen des Zentralalpenkristallins. – Österreichische Akademie der Wissenschaften, Geologische Bundesanstalt, Wien, unveröffentlichter Forschungsbericht mit Kartierungen.
- PIRKL, H. (1991): Ansätze zu einer geohydrologischen Charakterisierung von Teileinzugsgebieten im Löhnersbach (Saalbach). – unveröffentl. Forschungsbericht der Österr. Akademie der Wissenschaft, Programm Hydrologie Österreichs, kleine Einzugsgebiete.
- PIRKL, H. (1993): Arbeitsunterlagen für eine interdisziplinäre Fachdiskussion zur Auswertung und Verknüpfung von Kartierungsinhalten – Einzugsgebiet Löhnersbach/Saalbach. – unveröffentl. Forschungsbericht.

- RICHARD, F. & LÜSCHER, P. (1983): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. – Eidgen. Technische Hochschule Zürich, Institut für Wald- und Holzforschung, Fachbereich Bodenphysik, Band 3.
- SCHAFFHAUSER, H. (1982): Untersuchungen über das Abflussverhalten verschieden bewirtschafteter Versuchsflächen. – Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Band 144:85-101.
- SCHAFFHAUSER, H. (1985): Beregnungsversuche im Einzugsgebiet des Dürnbaches. – Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Band 161:147-159
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1998¹⁴): Lehrbuch der Bodenkunde. 494 S.
- SCHÖNLAUB, H. P. (1980): Die Grauwackenzone. In: Der geologische Aufbau Österreichs. Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 265 – 289.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. – Zürcher Geographische Schriften 69, Geographisches Institut ETH, 161 S.
- SÜDEKUM, W. (2000): Mobile Elektrodengruppe zur oberflächennahen geoelektrischen Kartierung. – Geologisches Jahrbuch, Geophysik Reihe E, Heft 52:35–62.
- TILCH, N., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, CH., ZILLGENS, B., KIRNBAUER, R. & MERZ, B. (2003): Entschlüsselung von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer Ansätze in einem alpinen Einzugsgebiet. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 1/2:9-17
- TILCH, N., UHLENBROOK, S., DIDSZUN, J., WENNINGER, J., KIRNBAUER, R., ZILLGENS, B., & LEIBUNDGUT, CH. (2006a): Hydrologische Prozessforschung zur Hochwasserentstehung im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Kitzbüheler Alpen, Österreich). – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (DGM), Heft 2/2006, S. 67-78.
- TILCH, N., ZILLGENS, B., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, CH., KIRNBAUER, R., MERZ, B. (2006b): GIS-gestützte Ausweisung von hydrologischen Umsatzräumen und Prozessen im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Nördliche Grauwackenzone, Salzburger Land). – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 58/9-10:141-151.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.J. & ANNAN, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. – Water Resources Research 16:579-582.
- UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. – Freiburger Hydrologische Schriften, Band 10, 201 S.
- VOGELSANG, D. (1993²): Geophysik an Altlasten. Leitfaden für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Juristen. – 179 S.
- VOGELSANG, D. (1995): Environmental Geophysics - A Practical Guide. – 173 S.
- VON RINALDINI, B. (1924): Die Kitzbühler Alpen. – Reihe: Ostalpine Formenstudien, Abteilung 2, 79 S.
- WARNECKE, G. (1997²): Meteorologie und Umwelt. – 354 S.

- WENNINGER, J., TILCH, N., UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, C. & KOHLBECK, F. (2004): Identifikation von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer und geoelektrischer Methoden in einem alpinen Einzugsgebiet. – In: Schiedek, T., Kaufmann-Knoke, R. & Ebhardt, G. (Hrsg.): Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme. – Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges. 32:200, Tagung der FH-DGG in Darmstadt, 19.-23.Mai
- WESTPHAL, W.H. (1970²⁶): Physik. – 715 S.
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2002): Prozessnahe Methoden zur Quantifizierung der Abflussbildung. – Bericht im DFG-Bündelprojekt „Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung“, unveröffentlicht.
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2005): Tracing runoff generation processes through different spatial scales - data analyses and modelling approach. – International conference on Headwater Control VI, Bergen; 20.06.2005-23.06.2005; In: "Headwater 2005", Paper-Nr. 135
- ZILLGENS, B., MERZ, B., KIRNBAUER, R. & TILCH, N. (2007a): Analysis of the runoff response of an alpine catchment at different scales. – Hydrology and Earth System Sciences, 11/4: 1441-1454.
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2007b): Experimentelle und modelltechnische Arbeiten im Löhrsbachgebiet. – in: Leibundgut, C. & Uhlenbrook, S. (2007): Abflussbildung und Einzugsgebietsmodellierung. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 24:73-109.

Verzeichnis der Abbildungen

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ (16 km ²) innerhalb des Einzugsgebietes Pegel Viehhofen (150 km ²)..... | 23 |
| Abbildung 2: Mittlere monatliche Niederschläge der Klimastationen Saalbach und Schmittenhöhe, Messperiode 1931-1960 (HDÖ 2002). | 24 |
| Abbildung 3: Höhenverteilung im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ auf Basis des DHM mit 10 m Auflösung..... | 26 |
| Abbildung 4: Die Böden des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ (Kartographie: Johst 2003, Datengrundlage: Markart & Kohl 1993a), Auflösung: 10*10 m ² , Pastelltöne: Ranker, Rottöne: Podsole, Grüntöne: Braunerden, Blautöne: Gleye..... | 28 |
| Abbildung 5: Die Vegetation im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ (Kartographie: Johst 2003, Datengrundlage: Burgstaller & Schiffer 1993, Pflanzengesellschaften nach Zillgens 2002 zusammengefasst), Rastergröße: 10*10 m ² , grün und braun: kein Oberflächenabfluss, rot: quasi Horton'scher Oberflächenabfluss, blau: Sättigungsflächenabfluss..... | 29 |
| Abbildung 6: Grenzen des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ mit Teileinzugsgebieten und Gerinnenetz, das zum einen aus dem Digitalen Höhenmodell generiert (durchgezogene Linien) und zum anderen im Gelände kartiert wurde (punktierte Linien). | 31 |
| Abbildung 7: Abflussregime der Saalach (1961–1999; HDÖ, 2002) und des Löhnersbachs (1995–2000) nach Pardé (MQmon/MQjahr)..... | 33 |
| Abbildung 8: Lage der Messstationen im Einzugsgebiet „Löhnersbach“..... | 40 |
| Abbildung 9: Lage der Messstationen im Umfeld des Löhnersbach-Einzugsgebietes (Johst 2003; verändert).... | 41 |
| Abbildung 10: Geometrie der Pegelstelle Rammern. | 45 |
| Abbildung 11: Pegelschlüssel für den Pegel Rammern (Löhnersbach). | 45 |
| Abbildung 12: Extrapolation der Schlüsselkurve für den Pegel Rammern (Löhnersbach) nach drei verschiedenen Methoden..... | 47 |
| Abbildung 13: Detaillierte Übersicht zu den Messeinrichtungen an der Feuchtfläche Limbergalm (PL=Pegel Limbergalm, PL-W=Pegel Limbergalm-West; QW=Quellpegel am Wallfuß) (An der Einspeisestelle für Naphtionat wurden auch Eosin und Uranin eingespeist) (Tilch et al. 2003; verändert)..... | 51 |
| Abbildung 14: Lage der Berechnungsflächen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ bei der Berechnung von 1992 (MARKART & KOHL 1994:3; verändert). | 53 |
| Abbildung 15: Düsenanordnung und Sprühverteilung der Berechnungsanlage vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck (Quelle: Markart & Kohl 1994)..... | 54 |
| Abbildung 16: Lage der Berechnungsflächen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ bei der Berechnung von 2002. Südliche Fläche: „Löhnersbach 1“ und nördliche Fläche: „Löhnersbach 2“. (Nachtnebel et al. 2005:90; verändert)..... | 55 |
| Abbildung 17: Messprinzip der Gleichstromverfahren (verändert; Vogelsang 1993). | 57 |
| Abbildung 18: Vereinfachtes Messprinzip der Refraktionsseismik für einen Zwei-Schicht-Fall (Hecht 2001; verändert). | 58 |
| Abbildung 19: Lage der seismischen Profile – Feuchtfläche Limbergalm (Tilch et al. 2003, verändert)..... | 59 |
| Abbildung 20: Struktur des hydrologischen Informationssystems „Löhnersbach“..... | 63 |
| Abbildung 21: Sinuskurve des Azimutwinkels der Sonnenstrahlen als Vorlage für den Tagesgang der Lufttemperatur (Johst 2003; verändert). | 83 |
| Abbildung 22: Gemessene und disaggregierte Tagesgänge der Lufttemperatur im Frühjahr 1998 (Johst 2003; verändert)..... | 84 |
| Abbildung 23: Typischer Verlauf des Wassergehalt-K-Wert Zusammenhanges eines Sand bzw. Tonbodens (Man beachte das unterschiedliche Krümmungsverhalten der Kurven). | 87 |
| Abbildung 24: Typischer Verlauf des Wassergehalt-K-Wert Zusammenhanges lt. dem Ansatz nach Campell (1974)..... | 87 |
| Abbildung 25: Unterschiedliche Wassergehalts-K-Wert Zusammenhänge für denselben Boden entstehen wegen Parameterermittlung aus unterschiedlichen Saugspannungsbereichen. | 88 |
| Abbildung 26: Wassergehalts-K-Wert Zusammenhang im Wasserhaushalt interessanten Wassergehaltsbereich. | 89 |
| Abbildung 27: Unterschiedliches Desorptionsverhalten zweier Böden mit sehr ähnlichem Gesamt - Porenvolumen..... | 90 |
| Abbildung 28: Wassergehalts - K-Wert - Kurven für unterschiedliche Bodentiefen. | 91 |
| Abbildung 29: Wassergehalts - K-Wert - Zusammenhang bei unterschiedlichen Skelettgehalten. | 91 |
| Abbildung 30: Sättigungsflächen im Löhnersbach-Einzugsgebiet nach zwei verschiedenen Kartierungen (Pirkl 1990, Kirnbauer et al. 1996). | 93 |
| Abbildung 31: Vergleich der unterschiedlichen Karten der Sättigungsflächen (Quellen: Kirnbauer et al. (1996), Pirkl (1989), Markart & Kohl (1993a), Burgstaller & Schiffer 1993)..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| <i>Abbildung 32: Niederschlagsverteilung an den Messstellen Schattberg, Herzogalm und Niesrachalm im Zeitraum 2. Juli bis 4. Juli 1992.</i> | 95 |
| <i>Abbildung 33: Niederschlagsverteilung an den Stationen Schattberg (a) und Niesrachalm (b) im Zeitraum 25. Juli bis 4. August 1994.</i> | 96 |
| <i>Abbildung 34: Abflussganglinie und Niederschlagsverlauf an den Stationen Niesrachalm bzw. Schattberg im Zeitraum 25. Juli bis 4. August 1994.</i> | 96 |
| <i>Abbildung 35: Zunahme des Niederschlages mit der Seehöhe an den Niederschlagsmessstellen im Untersuchungsgebiet „Löhnersbach“ in Abhängigkeit der Beobachtungsdauer.</i> | 97 |
| <i>Abbildung 36: Schneehöhe in Abhängigkeit der Seehöhe (in m ü. A.).</i> | 99 |
| <i>Abbildung 37: Verteilung des Schneewasseräquivalents im Einzugsgebiet des Löhnersbaches am 10. April 1993. Die Bereichsgrenzen gliedern das Gesamtgebiet in die Teilgebiete für die Modellierung mit dem Wasserhaushaltsmodell BROOK.</i> | 100 |
| <i>Abbildung 38: Verlauf des Niederschlages an den Stationen Schattberg, Herzogalm und Niesrachalm sowie die Abflussganglinien an den Pegelstationen Rammern und Limbergalm während der drei Extremereignisse im Zeitraum 25. Juni bis 30. Juli 1995.</i> | 102 |
| <i>Abbildung 39: Abflussreaktion an der Feuchtfläche Limbergalm ($AE = 1240 \text{ m}^2$) beim Extremereignis vom 25./26. Juli 1995.</i> | 103 |
| <i>Abbildung 40: Abflussreaktion am Pegel Rammern ($AE = 16 \text{ km}^2$) beim Extremereignis vom 25./26. Juli 1995.</i> | 103 |
| <i>Abbildung 41: Hydrologische Messdaten während des Niederschlag-Abfluss-Ereignisses im Zeitraum 10. bis 15. Juli 1996.</i> | 105 |
| <i>Abbildung 42: Niederschlagsverteilung beim Extremereignis am 10.7.1995.</i> | 106 |
| <i>Abbildung 43: Niederschlagsverteilung beim Extremereignis am 10.7.1995.</i> | 109 |
| <i>Abbildung 44: Zwei charakteristische Ereignistypen, beobachtet an den Pegeln Limbergalm und Rammern.</i> | 110 |
| <i>Abbildung 45: Typische Niederschlagsereignisse an der Feuchtfläche Limbergalm mit sehr kurzer Niederschlagsdauer und hoher Intensität sowie der entsprechenden deutlichen Reaktion des Direktabflusses (= unimodale Ereignisse) (Signatur gilt für die Abbildung 45 und 46).</i> | 111 |
| <i>Abbildung 46: Typische Niederschlagsereignisse an der Feuchtfläche Limbergalm mit langer Niederschlagsdauer und geringer Intensität. Zusätzlich zum Direktabfluss tritt eine verzögerte Abflussreaktion auf, die aus unterirdischem Abfluss generiert wird (= bimodale Ereignis).</i> | 112 |
| <i>Abbildung 47: Vergleich von beobachteter (Kreis) und hochgerechneter Abflussfracht für den Gebietspegel Rammern in Abhängigkeit vom Ereignisniederschlag. Hochrechnung aus Herzogalm (3000 m^2, Signatur Raute) bzw. aus Limbergalm (1240 m^2, Signatur Quadrat). Zahl neben der Signatur: Basisabfluss zu Ereignisbeginn.</i> | 114 |
| <i>Abbildung 48: Vergleich von beobachteter und hochgerechneter Abflussfracht für den Gebietspegel Rammern (16 km^2) im doppelt logarithmischen Maßstab. Hochrechnung aus den Feuchtflächen Herzogalm (3000 m^2, Signatur Raute), Limbergalm (1240 m^2, Signatur Quadrat) und Klingleralm (4500 m^2, Signatur Dreieck).</i> | 115 |
| <i>Abbildung 49: Anteil des Durchflusses der Zubringer des Löhnersbaches bezogen auf den Löhnersbach (Messwerte der Jahre 1993–1997).</i> | 116 |
| <i>Abbildung 50: Gemessene Durchflüsse der Zubringer des Löhnersbaches im Zeitraum 30.06.1993 bis 08.10.1993.</i> | 117 |
| <i>Abbildung 51: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (graue Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches (Kalibrierungszeitraum 1993).</i> | 118 |
| <i>Abbildung 52: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (schwarze Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches (Kalibrierungszeitraum 1994).</i> | 119 |
| <i>Abbildung 53: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (schwarze Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches für den Validierungszeitabschnitt 1992).</i> | 119 |
| <i>Abbildung 54: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (schwarze Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches für den Validierungszeitabschnitt 1996.</i> | 120 |
| <i>Abbildung 55: Klammbach: Gegenüberstellung von Ergebnissen von Einzelmessungen des Durchflusses (X) und Abflussganglinie (graue Linie), geschätzt aus der Ganglinie des Löhnersbaches für den Validierungszeitabschnitt 1997.</i> | 120 |
| <i>Abbildung 56: Detaillierte Übersicht zu den Messeinrichtungen an der Feuchtfläche Limbergalm sowie zu den Versuchsanordnungen der (tracer-)hydrologischen und geophysikalischen Untersuchungen (PL = Pegel Limbergalm, PL-W = Pegel Limbergalm-West; QW = Quellpegel am Wallfuß) (Quelle und Kartographie: Tilch et al. 2003; verändert).</i> | 122 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 57: Durchflussganglinien der Pegel Rammern (PR), Limbergalm (PL) und Limbergalm-West (PL-W) und Niederschlagsverteilung sowie Beprobungszeiträume mit Beprobungsintervallen von 1 bis 4 Stunden der Intensivmesskampagne im Juni 2001 und von 12 Stunden im Juli (Tilch et al. 2003; verändert). | 122 |
| Abbildung 58: Niederschlagsverteilung sowie Ganglinien der Silikat- und Ionenkonzentrationen einer Quelle am Wallflankenfuß (QW) vom 19.06. bis 30.06.2001 mit der Durchflussganglinie am Pegel Limbergalm als Referenz (Tilch et al. 2003; verändert). | 123 |
| Abbildung 59: Niederschlagsverteilung, Durchflussganglinie und Ganglinie der Kationen Calcium und Magnesium sowie gelöster Kieselsäure zur Zeit der während der Intensivmesskampagne beprobten nachlaufenden Hochwasserwellen am Pegel Limbergalm (PL) (Tilch et al. 2003; verändert). | 124 |
| Abbildung 60: Niederschlagsverteilung, Durchflussganglinie am Pegel Limbergalm (PL) und und Ganglinien von gelöster Kieselsäure und Deuterium zur Zeit der während der Intensivmesskampagne 2001 beprobten nachlaufenden Hochwasserwellen am Pegel Limbergalm (PL) und an der Quelle QW (Tilch et al. 2006a; verändert). | 124 |
| Abbildung 61: Durchflussganglinie des Pegels Limbergalm vom 19.06.2001 (19 Uhr) bis 24.6.2001 (19 Uhr) sowie die per Ganglinienseparation mit Hilfe des Tracers Silikat bestimmten Ganglinien der Abflusskomponenten Niederschlagsereigniswasser (N) sowie der Grundwasserkomponenten GW1 und GW2 (Tilch et al. 2003; verändert). | 125 |
| Abbildung 62: Niederschlagsverteilung Durchflussganglinie am Pegel Limbergalm (PL) und Ganglinien von gelöster Kieselsäure und Deuterium zur Zeit der beiden Niederschlagsereignisse während der Intensivmesskampagne 2001 bei PL und an der Quelle QW (Tilch et al. 2006a; verändert). | 126 |
| Abbildung 63: Niederschlagsverteilung, Durchflussganglinie und Ganglinie der Kationen Calcium und Magnesium sowie gelöster Kieselsäure zur Zeit des Niederschlagsereignisses (Niederschlagsintensität: 24 mm in 15 Stunden) am Pegel Limbergalm (Tilch et al. 2003; verändert). | 127 |
| Abbildung 64: Durchflussganglinie des Pegels Limbergalm während des Ereignisses vom 28.06.2001 bis 30.06.2001 sowie die mit Ganglinienseparation auf Basis von Silikat und Deuterium bestimmten Ganglinien der Abflusskomponenten Niederschlagsereigniswasser (N) sowie der Grundwasserkomponenten GW1 und GW2 (Tilch et al. 2006a; verändert). | 127 |
| Abbildung 65: Tracerdurchbrüche an verschiedenen Probenentnahmepunkten aufgrund des kombinierten Beregnungs-Markierungsversuches (Einspeisung am 21.06.2001; 13:50 Uhr) mit dem Salztracer Natriumbromid, Wasserstandsganglinien der Beobachtungslöcher der Wallflanke sowie Beregnungs- und Niederschlagsverteilung (Tilch et al. 2006a; verändert). | 129 |
| Abbildung 66: Niederschlagsverteilung und künstliche Beregnungsrate, Durchflussganglinie des Pegels Limbergalm während des Markierungsversuches mit dem Fluoreszenztracer Naphtionat am Schutthang sowie die dadurch hervorgerufenen Tracerdurchbrüche an verschiedenen Probenentnahmepunkten (schwarzer Pfeil markiert die Tracereinspeisung). | 130 |
| Abbildung 67: Hydrologisches Messnetz an der Feuchfläche Limbergalm mit Lage der seismischen Traversen (Tilch et al. 2003; verändert). | 132 |
| Abbildung 68: Geoseismisch ermitteltes Längsprofil (Kirnbauer et al. 2004; verändert). | 132 |
| Abbildung 69: Ergebnisse der geoseismischen Untersuchungen im Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm entlang einer Längstraverse im Sommer 2002 und deren Extrapolation auf das Einzugsgebiet des Pegels Limbergalm-West (Tilch et al. 2006a; verändert). | 133 |
| Abbildung 70: Verteilung der geoelektrischen Widerstände entlang der untersuchten Traversen (Wenneranordnung, 3 m-Auslage) sowie die per Geoseismik ermittelte Tiefenlage der Oberfläche des kompakten Kristallins entlang der Längstraverse (Wenninger et al. 2004, Tilch et al. 2006a; verändert)... | 134 |
| Abbildung 71: Ausgewählte Ergebnisse der Geoelektrik: Widerstandsprofil ungefähr dem Geoseismik-Längsprofil (siehe L in Abbildung 56) folgend. a) 25.6.2002 um 15:30 b) 28.6.2002 um 17:00. Interpretation im Text. | 135 |
| Abbildung 72: Schematisches Hangprofil mit allen wichtigen Umsatzräumen und dominanten Abflussbildungsprozessen (Tilch et al. 2006a; verändert). | 136 |
| Abbildung 73: Ganglinien zu Niederschlag (Herzogalm), Wasserstand am Messwehr Neuhausengraben und am Messwehr Herzogalm. | 138 |
| Abbildung 74: Zwei Niederschlag-Abfluss-Ereignisse am Messwehr Herzogalm. | 139 |
| Abbildung 75: Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Abflusshöhen am Messwehr Herzogalm. | 140 |
| Abbildung 76: Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abflussbeiwert am Messwehr Herzogalm. | 140 |
| Abbildung 77: Vergleich der für einzelne Ereignisse aus den Feuchflächen berechneten und am Pegel Rammern gemessenen Gebietsabflüsse. | 141 |
| Abbildung 78: Ereignisabhängige Dynamik der Abflussbeiwerte auf der Feuchfläche Herzogalm. | 142 |
| Abbildung 79: Unterschiede in der Charakteristik des Abflussverhaltens bei den Feuchflächen „Limbergalm“ und „Klingleralm“ während der Niederschlagsereignisse am 02. August 1996. | 143 |
| Abbildung 80: Abflussbildung von unterschiedlichen Ereignistypen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen. Ereignisse vom Typ „Sommerregen“ (Signatur: Kreuz) haben kleine Abflussbeiwerte, solche vom Typ | |

| | |
|--|-----|
| „Landregen“, die auf der Limbergalm eine nachlaufende Welle erzeugen (Signatur: Kreis), ergeben deutlich größere Abflussbeiwerte (Zillgens et al. 2007a; verändert)..... | 144 |
| Abbildung 81: Aufireten der Ereignistypen Typ unimodal: „Sommergewitter“ und Typ bimodal: „Landregen mit nachlaufender Welle“ in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität und –höhe bezogen auf den Basisabfluss zu Beginn des Ereignisses (Anfangsabfluss) für die Pegel Limbergalm (oben), Rammern und Viehhofen (unten). Dabei enthält der Gesamtabfluss beim bimodalen Ereignis das Abflussvolumen von beiden Ereignissen (inkl. nachlaufender Welle). Die gefüllten Kreise kennzeichnen bimodale Ereignisse, deren Niederschlagshöhe aufgrund Fehler in den Basisdaten unterschätzt wurden (Zillgens et al. 2007a; verändert)..... | 146 |
| Abbildung 82: Boxplots der Rückgangskoeffizienten (K_r^t) (links) und Güte der Anpassungen (r^2 , rechts) der Abflussereignisse am Pegel Rammern und am Pegel Viehhofen mit Typ 1: „Sommergewitter“ (unimodal), Typ 2: „Landregen“, die am Pegel Limbergalm eine nachlaufende Welle erzeugen (bimodal). (mit t = Zeit [Tag (86400s)], q_t = Abfluss [m^3/s], q_0 = Abfluss zu Beginn des Ereignisses [m^3/s], K_r^t = Rückgangskoeffizient [$m^3 \cdot (86400s^2) - 1$]). Zur Ermittlung von K_r^t werden die $\log(q)$ Werte an eine Gerade angepasst mit den Koeffizienten a [$m^3 \cdot (s \cdot 86400s) - 1$] und b [m^3/s], wonach sich K_r^t aus der Beziehung $K_r^t = \exp(a)$ ergibt (Zillgens et al. 2005)..... | 147 |
| Abbildung 83: Beobachtete und simulierte Monatsmittelwerte des Abflusses der Jahre 1986-1991, gerechnet mit dem a priori geschätzten Parametersatz..... | 150 |
| Abbildung 84: Gemessenen und der simulierten Monatsmittelwerte der Abflüsse nach einer Neueinschätzung einiger Parameter..... | 150 |
| Abbildung 85: Tagesmittelwerte der gemessenen und simulierten Abflüsse des Jahres 1989..... | 151 |
| Abbildung 86: Gemessener und simulierter Abfluss nach Änderung des Zusammenhanges zwischen Wasserleitfähigkeit und Wassergehalt..... | 152 |
| Abbildung 87: Aufteilung des Untersuchungsgebietes „Löhnersbach“ in 6 Teilgebiete..... | 157 |
| Abbildung 88: Tagesmittelwerte der gemessenen (Viehhofen) und simulierten (Löhnersbach) Abflüsse des Jahres 1986..... | 158 |
| Abbildung 89: Monatswerte der gemessenen (Viehhofen) und simulierten (Löhnersbach) Abflüsse des Zeitraumes 1984 - 1990..... | 159 |
| Abbildung 90: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen für den Pegel Rammern vor (obere Graphik) und nach (untere Graphik) der Korrektur der Niederschlagsdaten mit Hilfe der Summen der Neuschneehöhen für den Winter 1991/92..... | 160 |
| Abbildung 91: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen für den Pegel Rammern vor (oben) und nach (unten) der Korrektur der Niederschlagsdaten mit Hilfe der Summen der Neuschneehöhen für den Winter 1992/93..... | 161 |
| Abbildung 92: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Schnee-Wasser-Äquivalenten für die einzelnen Teilgebiete des Löhnersbaches..... | 163 |
| Abbildung 93: Relativer Fehler der berechneten Schnee-Wasser-Äquivalente bezogen auf die dafür gemessenen Werte..... | 164 |
| Abbildung 94: Vergleich zwischen gemessenen und mit Temperaturgradienten aus Temperaturmessungen der Stationen Saalbach und Schmittenhöhe berechneten Abflüssen..... | 164 |
| Abbildung 95: Vergleich zwischen gemessenen und mit Temperaturgradienten aus Temperaturmessungen der Stationen Zell am See und Schmittenhöhe berechneten Abflüssen..... | 165 |
| Abbildung 96: Vergleich zwischen gemessenen und mit Standardgradienten..... | 166 |
| Abbildung 97: Vergleich zwischen gemessenen und mit Temperaturgradienten auf physikalischer Basis berechneten Abflüssen..... | 167 |
| Abbildung 98: In BROOK verwendeter Zusammenhang zwischen der Bodensättigung und dem Anteil der Flächen mit Abflussbeiwert 1..... | 167 |
| Abbildung 99: Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse unter den Annahmen a (Felsflächen als undurchlässig angenommen) und b (Zunahme des Sättigungsflächenanteils, sobald Gröbst-, Grob- und Feinporen wassergefüllt sind)..... | 169 |
| Abbildung 100: Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse unter den Annahmen β (Felsflächen, Gerinneflächen und dauervernässte Flächen als undurchlässig angenommen) und b (Zunahme des Sättigungsflächenanteils, sobald Gröbst-, Grob- und Feinporen wassergefüllt sind)..... | 169 |
| Abbildung 101: Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse, wobei die Feuchtflächen als zusätzliches Teilgebiet mit nahezu undurchlässigem Gley eingeführt wurden..... | 170 |
| Abbildung 102: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen der Feuchtfläche für die Messperiode 1992..... | 171 |
| Abbildung 103: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abflüssen der Feuchtfläche für die Messperiode 1993..... | 172 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 104: Speicher und Prozesse in einem Hydrotop in HQsim (Drabek 2003; verändert)..... | 175 |
| Abbildung 105: Hydrologische Raumgliederung für das Untersuchungsgebiet „Löchnersbach“..... | 176 |
| Abbildung 106: Simulierte (unkalibriert) und gemessene Abflussganglinie am Pegel Rammern für das hydrologische Jahr 1997..... | 178 |
| Abbildung 107: Schematischer Modelllaufbau von TACD (Johst 2003; verändert)..... | 179 |
| Abbildung 108: Raumgliederung für das Löchnersbach-Einzugsgebiet (SOF: Sättigungsflächenabfluss; HOF: Horton'scher Oberflächenabfluss; ZA: schneller, gegebenenfalls schneller, verzögerter oder stark verzögerter Zwischenabfluss; GWA: verstärkter oder geringfügiger Grundwasserabfluss (Johst 2003; verändert)..... | 180 |
| Abbildung 109: Unkalibrierte und kalibrierte Abfluss-Simulationen für das Untersuchungsgebiet „Löchnersbach“, dargestellt für die Zeitspanne 01.01.2000 – 29.08.2000 innerhalb des Kalibrierungsjahres (Johst 2003; verändert)..... | 182 |
| Abbildung 110: Abfluss-Simulation für das Untersuchungsgebiet „Löchnersbach“ für den Zeitraum 14.06.1996 bis 30.09.1996 der Validierungsphase 1996/1997 (Johst 2003; verändert)..... | 183 |
| Abbildung 111: Modellkonzept für die Abflussmodellierung des Einzugsgebietes Pegel Limbergalm bezogen auf die identifizierten Fließwege bzw. Abflussbildungsprozesse in Abbildung 72 zur Berechnung von Oberflächenabfluss q_{SOF} , Zwischenabfluss (q_{Humus}) und Basisabfluss (q_{GW1} , q_{GW2} , $q_{deep-out}$) aus verschiedenen Raumeinheiten..... | 185 |
| Abbildung 112: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse und Niederschlag im Kalibrierungszeitraum 1997..... | 190 |
| Abbildung 113: Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen (links) und Histogramm der Residuen (rechts) für die Kalibrierungsperiode. Die Abflüsse werden leicht unterschätzt. (e =Effizienzkoeffizient nach NASH & SUTCLIFFE (1970), n =Anzahl Wertepaare)..... | 191 |
| Abbildung 114: Abflusssimulation für den Pegel Limbergalm bei zwei nachlaufenden Wellen im Kalibrierungsjahr 1997. Dargestellt sind der gemessene und simulierte Gesamtabfluss (q gemessen, q simuliert), die Summe der simulierten Abflusskomponenten Sättigungsflächen- und Zwischenabfluss ($q_{SOF}+q_{Humus}$), der permanente Grundwasserabfluss q_{GW1} , und der episodisch auftretende Grundwasserabfluss (Zillgens et al. 2007b; verändert)..... | 191 |
| Abbildung 115: Abflusssimulation für den Pegel Limbergalm: detaillierter Ausschnitt aus dem Validierungszeitraum (Sommer 2001). Niederschlag in der Einheit mm/15 min. Temperatur in °C/15 min (Zillgens et al. 2005; verändert)..... | 192 |
| Abbildung 116: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Abflusswerte der Simulationszeitabschnitte der Validierungszeiträume von 1998-2002..... | 193 |
| Abbildung 117: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 1998..... | 194 |
| Abbildung 118: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 1999..... | 195 |
| Abbildung 119: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 2000..... | 195 |
| Abbildung 120: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 2001..... | 196 |
| Abbildung 121: Simulierter Abfluss (q simuliert) am Pegel Limbergalm mit Angabe der gemessenen Abflüsse, Niederschlag und Temperatur im Validierungszeitraum 2002..... | 196 |
| Abbildung 122: Lithologisch-geomorphologische Einheiten (links, Pirkl 1990) des Löchnersbachgebietes und den daraus abgeleiteten Karten der quartären Deckschichten im Löchnersbachgebiet (oben rechts, Tilch et al. 2006b) und des Grundgebirges (unten rechts)..... | 200 |
| Abbildung 123: Ausweisung von Abflussbildungsprozessen auf Basis der Feuchtflächenkartierung nach Pirkl (1989) und der schnellen oberflächennahen Zwischenabflüsse innerhalb der Rohhumusauflage unter Subalpiner Heidevegetation auf verdichtetem Fels..... | 200 |
| Abbildung 124: Entscheidungspfad zur Ausweisung von Zonen gleicher dominanter Abflussbildungsprozesse (Zillgens et al. 2007b; verändert)..... | 201 |
| Abbildung 125: Modellstruktur für die Abflussmodellierung des Untersuchungsgebietes "Löchnersbach" (Kirnbauer et al. 2004)..... | 202 |
| Abbildung 126: Regionalisierung des Niederschlages (Zillgens et al. (2007b); verändert)..... | 203 |
| Abbildung 127: Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Hydrographen der Kalibrierungsperiode 10.1999-9.2000 (Zillgens et al. 2007b; verändert)..... | 204 |
| Abbildung 128: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Abflusswerte des Kalibrierungszeitraums 2000 (Zillgens et al. 2007b; verändert)..... | 205 |
| Abbildung 129: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Abflusswerte der Simulationszeitabschnitte der Validierungszeiträume 2001-2002 (Zillgens et al. 2007b; verändert)..... | 205 |
| Abbildung 130: Gemessene und simulierte Abflüsse des Validierungszeitabschnittes 30.09.2001-30.09.2002 (Zillgens et al. 2007b; verändert)..... | 206 |

| | |
|--|------------|
| <i>Abbildung 131: Simulierte und gemessene Abflüsse am Pegel Limbergalm (0.07 km²) und am Pegel Rammern (16 km²) (Zillgens et al. 2007b; verändert).....</i> | <i>207</i> |
| <i>Abbildung 132: Detaillierte Darstellung der Ergebnisse der multi-site Validierung des Löhnersbachmodells mit Abflussmessungen auf Tagesbasis an den Auslässen der Teileinzugsgebiete. Die Linien zeigen den modellierten Abfluss, die Punkte den manuell gemessenen Abfluss an den Teileinzugsgebietsauslässen (gilt auch für Abbildung 133) (Zillgens et al. 2005; verändert).....</i> | <i>208</i> |
| <i>Abbildung 133: Gegenüberstellung von gemessenen Abflüssen (Salzbestimmungsmethode) und simulierten Abflüssen für drei Teileinzugsgebiete. Die Linien zeigen den modellierten Abfluss, die Punkte den manuell gemessenen Abfluss an den Teileinzugsgebietsauslässen. (Zillgens et al. 2007b; verändert, Legende gilt für alle drei Zeiträume).....</i> | <i>209</i> |
| <i>Abbildung 134: Gegenüberstellung von gemessenen Abflüssen (Salzbestimmungsmethode) und simulierten Abflüssen für zwei Teileinzugsgebiete. Die Linien zeigen den modellierten Abfluss, die Punkte den manuell gemessenen Abfluss an den Teileinzugsgebietsauslässen. (Zillgens et al. 2007b; verändert, Legende gilt für alle drei Zeiträume).....</i> | <i>210</i> |

Verzeichnis der Tabellen

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Extremwerte und langjähriges Mittel der Lufttemperatur (HDÖ 2002). | 25 |
| Tabelle 2: Gewässerkundliche Hauptwerte der Saalach, Pegel Viehhofen, HDÖ (2008). | 32 |
| Tabelle 3: Regionale Untersuchung der Hochwässer im Bereich Saalach Oberlauf (KIRNBAUER 1996). | 32 |
| Tabelle 5: Übersicht – Attributdaten. | 74 |
| Tabelle 6: Übersicht - Attributdaten. | 74 |
| Tabelle 7: Übersicht - Attributdaten. | 75 |
| Tabelle 8: Übersicht - Attributdaten. | 75 |
| Tabelle 9: Übersicht - Attributdaten. | 76 |
| Tabelle 10: Übersicht - Attributdaten. | 76 |
| Tabelle 11: Übersicht - Attributdaten. | 77 |
| Tabelle 12: Übersicht - Attributdaten. | 77 |
| Tabelle 13: Übersicht - Attributdaten. | 78 |
| Tabelle 14: Übersicht - Attributdaten. | 78 |
| Tabelle 15: Übersicht - Attributdaten. | 79 |
| Tabelle 16: Übersicht - Attributdaten. | 79 |
| Tabelle 17: Übersicht - Attributdaten. | 79 |
| Tabelle 18: Übersicht - Attributdaten. | 80 |
| Tabelle 19: Beschreibungsschlüssel für die Plausibilitätskontrolle des Niederschlages. | 82 |
| Tabelle 20: Beschreibungsschlüssel für die Plausibilitätskontrolle des Abflusses. | 84 |
| Tabelle 21: Vegetationsbedeckungsgrad und Blattflächenindex der Vegetationsklassen (verändert aus JOHST 2003; nach SCHULLA 1997, BREMICKER 2000 und LARCHER 2001). | 92 |
| Tabelle 22: Höhenkorrelation der monatlichen Niederschlagssummen aller Messstationen (HZG: Herzogalm, STB: Schattberg, NSR: Niesrachalm, SLB: Saalbach, SMT: Schmittenhöhe), grau hinterlegt: negative Steigung oder Bestimmtheitsmaß > 0,7. (JOHST 2003; verändert). | 98 |
| Tabelle 23: Zusammenstellung der feuchtadiabatischen Temperaturgradienten als Funktion von Temperatur und Seehöhe bzw. Luftdruck für die Standardatmosphäre. | 155 |
| Tabelle 24: Kenngrößen der Teileinzugsgebiete im Untersuchungsgebiet „Löhrnersbach“ (Pegel Rammern). | 156 |
| Tabelle 25: Vergleich der Ombrograph-Niederschlagssummen mit den mittels Wasseräquivalent des Neuschnees modifizierten Niederschlagssummen. | 160 |
| Tabelle 26: Vergleich zwischen gemessenem Schnee-Wasser-Äquivalent und mit verschiedenen Temperaturgradientenmethoden simuliertem Schnee-Wasser-Äquivalent für den 9.4.1993. (Zur Berechnung des flächengewichteten mittleren Fehlers wurden die Absolutwerte der jeweiligen Fehler herangezogen). | 165 |
| Tabelle 27: Kenngrößen der Feuchtfläche Herzogalm. | 171 |
| Tabelle 28: Gemessener Abfluss und Niederschlag für die Feuchtfläche. | 172 |
| Tabelle 29: Liste der einzelnen Hydrotöpfe im Untersuchungsgebiet "Löhrnersbach" als Grundlage für die Abflussmodellierung mit HQSim. | 177 |
| Tabelle 30: Gütemaße der Simulationsergebnisse für die Kalibrierungsphase (JOHST 2003; verändert). | 182 |
| Tabelle 31: Gütemaße der Simulationsergebnisse für die Validierungsphase (JOHST 2003; verändert). | 182 |
| Tabelle 32: Mathematische Grundlagen für die Abflussmodellierung am Pegel Limbergalm (Zeitintervall: 15 min) (ZILLGENS ET AL. 2005; verändert). | 186 |
| Tabelle 33: Zeiträume für die Modellierung (Kalibrierung + Validierung; Zeitschritt 15 min). | 188 |
| Tabelle 34: Parameter des Abflussmodells (Kalibrierungsparameter), Zeitschritt 15 min (ZILLGENS ET AL. (2007b); verändert). | 190 |
| Tabelle 35: Modellierungszeiträume und Gütemaße der Jahre 1997-2002 (Reff=Effizienzkoeffizient nach NASH & SUTCLIFFE (1970), Vol_error=Volumenfehler des betrachteten Zeitabschnittes). | 194 |
| Tabelle 36: Kalibrierungsparameter des Abflussmodells Löhrnersbach (Zeitschritt: 1 h) (ZILLGENS ET AL. 2007b; verändert). | 204 |
| Tabelle 37: Gütemaße e (Effizienzkoeffizient nach NASH & SUTCLIFFE (1970)), r ² und Volumenfehler (Vol_error, für den betrachteten Zeitabschnitt) für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode. | 206 |
| Tabelle 38: Gütemaße der multi-site Validierung (ZILLGENS ET AL. 2007b). | 211 |

Verzeichnis der Fotos

| | |
|---|------------|
| <i>Foto 1: Datenauslesen und Kontrolle des Niederschlagsschreibers Herzogalm.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Foto 2: Vorbereitung der Salzlösung für die Durchflussmessung mittels Salzmischungsmethode am Klammbach.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Foto 3: Durchflussmessung mit einem hydrometrischen Flügel an der Pegelstation Rammern.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Foto 4: Bergzerreißung infolge von Sackungsprozessen.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Foto 5 (links): nordost exponiertes Kar mit tief eingeschnittenen Runsen östlich des Hochkogels.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Foto 6 (rechts): Schotterkörper im Unterlauf eines Seitengrabens.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Foto 7: Anriss einer Rasenfläche. Foto 8: In Bewegung befindlicher bewaldeter Hang.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Foto 9: Die Zerrüttung des Untergrundes zeigt sich an der Geländeoberfläche unter Grünland (rechtes Foto) und unter Wald (rechtes Foto).....</i> | <i>34</i> |
| <i>Foto 10: Ausschotterung des Löhnersbaches an einer Talerweiterung (Spuren des Hochwassers von 1987).....</i> | <i>35</i> |
| <i>Foto 11: Erosion im Marxtengraben: Am Hangfuß Unterspülung der Lockersedimente mit Nachrutschungen... </i> | <i>35</i> |
| <i>Foto 12 (links): Erosion am Prallhang im Oberlauf des Marxtenbaches. Vom Oberflächenabfluss transportiertes Gestein ist auf der Grasnarbe liegegeblieben.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Foto 13 (rechts): Rückschreitende Erosion durch einen Seitengraben des Marxtenbaches (temporäre Erosionsbasis). Zu sehen sind Spuren der Umströmung einer Geländekuppe.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Foto 14 (oben): Hinweise auf massiven Oberflächenabfluss aufgrund beachtlicher Mengen an Geschiebe an der Geländeoberfläche. Bemerkenswert: Die Grasnarbe wurde nicht aufgerissen.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Foto 15 (rechts): Oberflächennaher unteriridischer Abfluss (Interflow) ist an der Oberfläche ausgetreten und hat durch das Auswaschen des Feinbodens zu einem hydraulischen Grundbruch geführt. Grobes Gestein und die Grasnarbe sind nachgebrochen.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Foto 16: Der in einer Erosionsrinne abgelagerte Schnee modelliert diese Rinne in der momentanen Ausaperungsphase deutlich heraus. Bemerkenswert: Im unteren Bereich sind Wasser und Geschiebe aus der Erosionsrinne ausgeföhrt und das Geschiebe ist liegegeblieben.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Foto 17: Schichtquelle an dem durch Erosion des Marxtenbaches (siehe Foto 11) freigelegten Ausbiss der grobporigen Schicht.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Foto 18: Vermehrt vorkommende Quellaustritte entlang der in Foto 18 erwähnten Schicht.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Foto 19: Die grobporige Schicht erstreckt sich über mehrere hundert Meter.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Foto 20: Hauptpegel Rammern.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Foto 21: Provisorische Quellmessstelle Klammbach.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Foto 22: Messblende im Quellschacht der Quelle Klammbach.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Foto 23: Beregnungsanlage für Starkregen vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck (Foto: CHIFFLARD).....</i> | <i>54</i> |
| <i>Foto 24: Beregnungsanlage vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Innsbruck (Quelle: MARKART & KOHL 1994).....</i> | <i>56</i> |
| <i>Foto 25: Messrinne am Neuhausengraben im Zustand unmittelbar nach Fertigstellung im Juli 1992.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Foto 26: Mit Geschiebe verschüttete Messrinne am Neuhausengraben nach den Ereignissen am 10. Juli 1995 bzw. 27. Juli 1995.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Foto 27: Pegel Rammern: Störung der Anströmung der Wasserstandsmessung durch Geschiebeablagerungen der Ereignisse am 10. Juli 1995 bzw. 27. Juli 1995.....</i> | <i>108</i> |

Anmerkung:

Alle Fotos sind, sofern nicht anders angegeben, von Mitarbeitern des Institutes für Ingenieurhydrologie und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität Wien erstellt und bearbeitet worden.

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Eine von den Wasserbauinstituten an der Technischen Universität Wien, den Instituten für Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur und dem Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband herausgegebene Schriftenreihe

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|------------|
| 1 | Das Wasser (1968) Kresser W. | vergriffen |
| 2 | Die Gesetzmäßigkeiten der stationären Flüssigkeitsströmung durch gleichförmig rotierende zylindrische Rohre (1968) Breiner, H. | vergriffen |
| 3 | Abwasserreinigung - Grundkurs (1969) von der Emde, W. | vergriffen |
| 4 | Abwasserreinigungsanlagen - Entwurf-Bau-Betrieb (1969) 4. ÖWWV-Seminar, Raach 1969 | vergriffen |
| 5 | Zukunftsprobleme der Trinkwasserversorgung (1970) 5. ÖWWV-Seminar, Raach 1970 | vergriffen |
| 6 | Industrieabwässer (1971) 6. ÖWWV-Seminar, Raach 1971 | vergriffen |
| 7 | Wasser- und Abfallwirtschaft (1972) 7. ÖWWV-Seminar, Raach 1972 | vergriffen |
| 8 | Das vollkommene Peilrohr (Zur Methodik der Grundwasserbeobachtung) (1972) Schmidt, F. | vergriffen |
| 9 | Über die Anwendung von radioaktiven Tracern in der Hydrologie (1972) Pruzinsky, W. Über die Auswertung von Abflußmengen auf elektronischen Rechenanlagen Doleisch, M.: | 18 |
| 10 | 1. Hydrologie-Fortbildungskurs (1972) | vergriffen |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|------------|
| 11 | Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von HW-Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten (1972) Gutknecht, D. | vergriffen |
| 12 | Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung (1973) 8. ÖWWV-Seminar, Raach 1973 | vergriffen |
| 13 | Zellstoffabwässer-Anfall und Reinigung (1972) von der Emde W., Fleckseder H., Huber L., Viehl K. | vergriffen |
| 14 | Abfluß - Geschiebe (1973) 2. Hydrologie-Fortbildungskurs 1973 | vergriffen |
| 15 | Neue Entwicklung in der Abwassertechnik (1983) 9. ÖWWV-Seminar, Raach 1974 | vergriffen |
| 16 | Praktikum der Kläranlagentechnik (1974) von der Emde W. | vergriffen |
| 17 | Stabilitätsuntersuchung von Abflußprofilen mittels hydraulischer Methoden und Trendanalyse (1974) Behr, O.: | 18 |
| 18 | Hydrologische Grundlagen zur Speicherbemessung(1975) 3. Hydrologie-Fortbildungskurs 1975 | vergriffen |
| 19 | Vorhersagen in der Wasserwirtschaft (1976) 1. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1976 | 10 |
| 20 | Abfall- und Schlammbehandlung aus wasserwirtschaftlicher Sicht (1976) 11. ÖWWV-Seminar, Raach 1976 | vergriffen |
| 21 | Zur Theorie und Praxis der Speicherwirtschaft (1977) 2. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1977 | 22 |
| 22 | Abwasserreinigung in kleineren Verhältnissen (1977) 12. ÖWWV-Seminar, Raach 1977 | vergriffen |
| 23 | Methoden zur rechnerischen Behandlung von Grundwasserleitern (1977) Baron W., Heindl W., Behr O., Reitingner J. | vergriffen |
| 24 | Ein Beitrag zur Reinigung des Abwassers eines Chemiefaserwerkes, eines chemischen Betriebes und einer Molkerei (1978) Begert A. | vergriffen |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|--|------------|
| 25 | Ein Beitrag zur Reinigung von Zuckerfabrikabwasser (1978) Kroiss H. | vergriffen |
| 26 | Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage (1978) Gutknecht D. | vergriffen |
| 27 | Wasserversorgung-Gewässerschutz (1978) 13. ÖWWV-Seminar, Raach 1978 | vergriffen |
| 28 | Industrieabwasserbehandlung - Neue Entwicklungen (1979) 14. ÖWWV-Seminar, Raach 1979 | vergriffen |
| 29 | Probleme der Uferfiltration und Grundwasseranreicherung mit besonderer Berücksichtigung des Wiener Raumes (1979) Frischherz H. | vergriffen |
| 30 | Beiträge zur Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft (1979) o. Univ.-Prof. DDr. Werner Kresser zum 60. Geburtstag | vergriffen |
| 31 | Grundwasserzuströmungsverhältnisse zu Horizontalfilterrohrbrunnen (1980) Schügerl W. | vergriffen |
| 32 | Grundwasserwirtschaft (1980) 3. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1980 | 25 |
| 33 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1) (1980) | vergriffen |
| 34 | Behandlung und Beseitigung kommunaler und industrieller Schlämme (1980) 15. ÖWWV-Seminar, Raach 1980 | vergriffen |
| 35 | Faktoren, die die Inaktivierung von Viren beim Belebungsverfahren beeinflussen (1980) Usrael G. | vergriffen |
| 36 | Vergleichende Kostenuntersuchungen über das Belebungsverfahren (1980) Flögl W. | vergriffen |
| 37 | Ein Beitrag zur Reinigung und Geruchsfreimachung von Abwasser aus Tierkörperverwertungsanstalten (1980) Ruider E. | vergriffen |
| 38 | Wasserwirtschaftliche Probleme der Elektrizitätserzeugung (1981) Schiller, G.: | vergriffen |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|--|------------|
| 39 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1981) Teil 2 | vergriffen |
| 40 | Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung als zusammengehörige Techniken (1981) 16. ÖWWV-Seminar, Raach 1981 | vergriffen |
| 41 | Filterbrunnen zur Erschließung von Grundwasser (1981) ÖWWV-Fortbildungskurs 1981 | 29 |
| 42 | Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau (1981) Kirnbauer R. | 22 |
| 43 | Wissenschaftliche Arbeiten, Zeitraum 1977 bis 1981 (1981) | 25 |
| 44 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1981) Teil 3 | 25 |
| 45 | Verbundwirtschaft in der Wasserversorgung (1982) ÖWWV-Fortbildungskurs 1982 | 29 |
| 46 | Gewässerschutzplanung, deren Umsetzung und Zielkontrolle im Einzugsgebiet des Neusiedler Sees (1982) Stalzer W. | vergriffen |
| 47 | Wechselwirkung zwischen Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen, Erfahrungen und Probleme (1982) 17. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1982 | vergriffen |
| 48 | Kleinwasserkraftwerke - Notwendigkeit und Bedeutung (1982) Flußstudien: Schwarza, kleine Ybbs, Saalach | vergriffen |
| 49 | Beiträge zur Wasserversorgung, Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (1982) o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. v.d. Emde zum 60. Geburtstag | vergriffen |
| 50 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1982) Teil 4 | vergriffen |
| 51 | Sicherung der Wasserversorgung in der Zukunft (1983) 18. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1983 | vergriffen |
| 52 | Thermische Beeinflussung des Grundwassers (1983) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1983 | vergriffen |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|------------|
| 53 | Planung und Betrieb von Regenentlastungsanlagen (1984) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1984 | vergriffen |
| 54 | Sonderabfall und Gewässerschutz (1984) 19. ÖWWV-Seminar, Gmunden 1984 | vergriffen |
| 55 | Naturnahes Regulierungskonzept "Pram" (1984) | 26 |
| 56 | Blähschlamm beim Belebungsverfahren (1985) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985 | vergriffen |
| 57 | Chemie in der Wassergütewirtschaft (1985) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985 | vergriffen |
| 58 | Klärschlamm - Verwertung und Ablagerung (1985) 20. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1985 | vergriffen |
| 59 | Wasserkraftnutzung an der Thaya (1985) Pelikan B. | 23 |
| 60 | Seminar "Wasser - Umwelt - Raumordnung" (1985) | 16 |
| 61 | Gewässerschutz im Wandel der Zeit Ziele und Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung (1985) Fleckseder, H. | vergriffen |
| 62 | Anaerobe Abwasserreinigung (1985) Kroiss H. | vergriffen |
| 63 | Kleine Belebungsanlagen mit einem Anschlußwert bis 500 Einwohnergleichwerte (1985) Begert A. | vergriffen |
| 64 | Belüftungssysteme beim Belebungsverfahren (1986) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986 | vergriffen |
| 65 | Planung und Betrieb von Behandlungsanlagen für Industrieabwässer (1986) 21. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1986 | vergriffen |
| 66 | Ausspracheseminar Grundwasserschutz in Österreich (1986) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986 | 29 |
| 67 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (5) (1986) | vergriffen |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|------------|
| 68 | Zur mathematischen Modellierung der Abflusstehung an Hängen (1986) Schmid B.H. | 22 |
| 69 | Nitrifikation - Denitrifikation (1987) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1987 | vergriffen |
| 70 | Flußbau und Fischerei (1987) | vergriffen |
| 71 | Wasserversorgung und Abwasserreinigung in kleinen Verhältnissen (1987) 22. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1987 | vergriffen |
| 72 | Wasserwirtschaft und Lebensschutz (1987) Wurzer E. | vergriffen |
| 73 | Anaerobe Abwasserreinigung Grundlagen und großtechnische Erfahrung (1988) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988 | vergriffen |
| 74 | Wasserbau und Wasserwirtschaft im Alpenraum aus historischer Sicht (1988) | 22 |
| 75 | Wechselbeziehungen zwischen Land-, Forst und Wasserwirtschaft (1988) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988 | vergriffen |
| 76 | Gefährdung des Grundwassers durch Altlasten (1988) 23. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1988 | vergriffen |
| 77 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (6) (1987) | vergriffen |
| 78 | Wasserwirtschaftliche Planung bei mehrfacher Zielsetzung (1988) Nachtnebel, H.P. | 25 |
| 79 | Hydraulik offener Gerinne (1989) Symposium, 1989 | vergriffen |
| 80 | Untersuchung der Fischaufstiegshilfe bei der Stauhaltung im Gießgang Greifenstein (1988) Jungwirth M., Schmutz S. | vergriffen |
| 81 | Biologische Abwasserreinigung (1989) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1989, TU-Wien | vergriffen |
| 82 | Klärschlamm Entsorgung (1989) 24. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1989 | vergriffen |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|------------------|
| 83 | Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (1990) 2. Symposium | 18 |
| 84 | Schadstofffragen in der Wasserwirtschaft (1989) ÖWWV-Fortbildungskurs 1989, TU-Wien | 29 |
| 85 | Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall, Projekt Abschnitt I (1989) Frischherz H.; Benes E.; Ernst J.; Haber F.; Stuckart W. | 18 |
| 86 | Umfassende Betrachtung der Erosions- und Sedimentationsproblematik (1989) Summer W. | 25 |
| 87 | Großräumige Lösungen in der Wasserversorgung (1990) 25. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1990 | vergriffen |
| 88 | Revitalisierung von Fließgewässern (1990) Beiträge zum Workshop Scharfling, 1989 | vergriffen |
| 89 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1990) Teil 9 | vergriffen |
| 90 | A Study on Kinematic Cascades (1990) Schmid B.H. | 18 |
| 91 | Snowmelt Simulation in Rugged Terrain - The Gap Between Point and Catchment Scale Approaches (1990) Blöschl G. | 18 |
| 92 | Dateninterpretation und ihre Bedeutung für Grundwasserströmungsmodelle (1990) Blaschke A.P. | nicht erschienen |
| 93 | Decision Support Systeme für die Grundwasserwirtschaft unter Verwendung geografischer Informationssysteme (1990) Fürst J. | 18 |
| 94 | Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall; Projekt-Abschnitt 1990 (1990) Frischherz H., Benes E., Stuckhart W., Ilmer A., Gröschl M., Bolek W. | 18 |
| 95 | Anaerobe Abwasserreinigung - Ein Modell zur Berechnung und Darstellung der maßgebenden chemischen Parameter (1991) Svardal K. | 22 |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|--|------------|
| 96 | EDV-Einsatz auf Abwasserreinigungsanlagen (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien | 29 |
| 97 | Entfernung von Phosphorverbindungen bei der Abwasserreinigung (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien | 25 |
| 98 | Auswirkungen der Wasserrechtsgesetznovelle 1990 auf Behörden, Planer und Betreiber kommunaler Abwasserreinigungsanlagen - aus technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht (1991) 26. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1991 | 36 |
| 99 | Geruchsemissionen aus Abwasserreinigungsanlagen (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, | 22 |
| 100 | Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik (1992) ÖWWV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien | vergriffen |
| 101 | Umweltbezogene Planung wasserbaulicher Maßnahmen an Fließgewässern (1992) Pelikan B. | 18 |
| 102 | Erfassung hydrometeorologischer Elemente in Österreich im Hinblick auf den Wasserhaushalt (1992) Behr O. | i.V. |
| 103 | Wasser- und Abfallwirtschaft in dünn besiedelten Gebieten (1992) 27. ÖWWV-Seminar Ottenstein 1992 | 36 |
| 104 | Virus Contamination of the Environment (1992) Methods and Control | vergriffen |
| 105 | Fließgewässer und ihre Ökologie (1993) ÖWAV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien | 22 |
| 106 | Festlegung einer Dotierwassermenge über Dotationsversuche (1992) Mader H. | 22 |
| 107 | Wasserrechtsgesetznovelle 1990 und neue Emissionsverordnungen (1992) Vorträge anlässlich der UTEC 1992 | 29 |
| 108 | Chemische Analytik für einen zeitgemäßen Gewässerschutz (1992) Vorträge anlässlich der UTEC 1992 | 29 |
| 109 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1994) Teil 10 - Beiträge zum Seminar an der Universität für Bodenkultur im November 1994 | i.V. |

| Band Nr | Preis € |
|---|------------|
| 110 Bemessung u. Betrieb von Kläranlagen zur Stickstoffentfernung (1993) ÖWAV-Seminar 1993, TU-Wien | 36 |
| 111 Wasserreserven in Österreich - Schutz und Nutzung in Gegenwart und Zukunft (1993) 28. ÖWAV-Seminar Ottenstein 1993 | vergriffen |
| 112 Contamination of the Environment by Viruses and Methods of Control (1993) | 18 |
| 113 Wasserkraft () O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Radler anlässlich seiner Emeritierung | vergriffen |
| 114 Klärwärter-Grundkurs (1994) 2. Auflage 1994 | vergriffen |
| 115 Beitrag zur Reduzierung der Abwasseremissionen der Bleicherei beim Sulfatverfahren (1994) Urban W. ISBN 3-85234-001-2 | 22 |
| 116 Eigenüberwachung von Abwasserreinigungsanlagen für den Gewässerschutz (1994) ÖWAV-Seminar 1994, TU-Wien ISBN 3-85234-002-0 | 25 |
| 117 Abwasserreinigungskonzepte - Internationaler Erfahrungsaustausch über neue Entwicklungen (1995) ÖWAV-Seminar 1994, TU Wien ISBN 3-85234-003-9 | 25 |
| 118 3 Jahre WRG-Novelle (1994) 29. ÖWAV-Seminar: Ottenstein 1994 ISBN 3-85234-004-7 | 19 |
| 119 Landeskulturelle Wasserwirtschaft (1994) anlässlich der Emeritierung von o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. H. Supersperg | vergriffen |
| 120 Gewässerbetreuungskonzepte - Stand und Perspektiven (1994) Beiträge zur Tagung an der BOKU 1994 ISBN 3-85234-010-1 | 32 |
| 121 Generelle Entwässerungsplanung im Siedlungsraum (1996) ÖWAV-Seminar 1995, TU Wien ISBN 3-85234-011-X | 29 |

| Band Nr | Preis € |
|--|------------|
| 122 Bedeutung von geowissenschaftlicher Zusatzinformation für die Schätzung der Transmissivitätsverteilung in einem Aquifer (1994) Kupfersberger H. | 18 |
| 123 Modellierung und Regionalisierung der Grundwassermengenbildung und des Bodenwasserhaushaltes (1994) Holzmann, H. | 22 |
| 124 Pflanzenkläranlagen - Stand der Technik, Zukunftsaspekte (1995) ÖWAV-Seminar, BOKU Wien ISBN 3-85234-014-4 | 22 |
| 125 Abwasserreinigung - Probleme bei der praktischen Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes, (1995) ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-015-2 | 32 |
| 126 Konfliktfeld Landwirtschaft - Wasserwirtschaft (1995) 30. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1995 ISBN 3-85234-016-0 | 29 |
| 127 Alte und neue Summenparameter (1995) ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-017-9 | 29 |
| 128 Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (deutsch oder englisch) (1995) 4. Symposium Univ.Prof.Dr. R. Walter ISBN 3-85234-019-5 | 0 |
| 129 Einfluß von Indirekteinleitungen auf Planung und Betrieb von Abwasseranlagen (1996) ÖWAV-Seminar 1996, TU-Wien ISBN 3-85234-020-9 | vergriffen |
| 130 Zentrale und dezentrale Abwasserreinigung (1996) 31. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1996 ISBN 3-85234-021-7 | 36 |
| 131 Methoden der Planung und Berechnung des Kanalisationssystems (1996) ÖWAV-Seminar 1996, BOKU-Wien ISBN 3-85234-022-5 | 29 |

| Band Nr | Preis € |
|---|------------|
| 132 Scale and Scaling in Hydrology (1996) Blöschl G. ISBN 3-85234-023-3 | vergriffen |
| 133 Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1996) Integrale Interpretation eines zeitgemäßen Gewässerschutzes ISBN 3-85234-024-0 | 12 |
| 134 Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit Sauerstoffzufuhrmessungen (1996) Frey W. ISBN 3-85234-025-X | 22 |
| 135 Nitrifikation im Belebungsverfahren bei maßgebendem Industrieabwassereinfluß (1996) Nowak O. ISBN 3-85234-026-8 | 36 |
| 136 1. Wassertechnisches Seminar (1996) Nebenprodukte von Desinfektion und Oxidation bei der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-027-6 | i.V. |
| 137 Modellanwendung bei Planung und Betrieb von Belebungsanlagen (1997) ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-028-4 | 32 |
| 138 Nitrifikationshemmung bei kommunaler Abwasserreinigung (1997) Schweighofer P. ISBN 3-85234-029-2 | 25 |
| 139 Ein Beitrag zu Verständnis und Anwendung aerober Selektoren für die Blähschlammvermeidung (1997) Prendl L. ISBN 3-85234-030-6 | 22 |
| 140 Auswirkungen eines Kläranlagenablaufes auf abflußschwache Vorfluter am Beispiel der Kläranlage Mödling und des Krottenbaches (1997) Franz A. ISBN 3-85234-031-4 | 25 |
| 141 Neue Entwicklungen in der Abwassertechnik (1997) ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-032-2 | 36 |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|--|---------|
| 142 | Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1997) Abfallwirtschaft und Altlastensanierung morgen ISBN 3-85234-033-0 | 18 |
| 143 | Abwasserbeseitigung und Wasserversorgung in Wien (1997) Eine ökonomische Beurteilung der Einnahmen, Ausgaben und Kosten Kosz M. ISBN 3-85234-034-9 | 22 |
| 144 | Raum-Zeitliche Variabilitäten im Geschiebehaushalt und dessen Beeinflussung am Beispiel der Drau (1997) Habersack H. ISBN 3-85234-035-7 | 29 |
| 145 | Fortbildungskurs: Biologische Abwasserreinigung (1998) ÖWAV - Seminar 1998, TU-Wien ISBN 3-85234-036-5 | 40 |
| 146 | 2. Wassertechnisches Seminar (1998) Desinfektion in der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-037-3 | i.V. |
| 147 | Eigenüberwachung und Fremdüberwachung bei Kläranlagen (1998) 32. ÖWAV-Seminar , Linz 1998 ISBN 3-85234-038-1 | 36 |
| 148 | Grundwasserdynamik (1998) ISBN 3-85234-039-C | 36 |
| 149 | Die Tradition in der Kulturtechnik (1998) Kastanek F. Simulationsanwendung bei der Störung durch poröses Medium (1998) Loiskandl W. ISBN 3-85234-040-4 | 22 |
| 150 | Auswirkungen von Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelze auf Karstquellen (1998) Steinkellner M. ISBN 3-85234-041-1 | 36 |
| 151 | Experiences with soil erosion models (1998) ISBN 3-85234-042-X | 29 |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|--|------------|
| 152 | Ein Beitrag zur Optimierung der Stickstoffentfernung in zweistufigen Belebungsanlagen (1998) Dornhofer K. ISBN 3-85234-043-8 | 25 |
| 153 | Hormonell aktive Substanzen in der Umwelt (1998) ÖWAV / UBA Seminar 1998, BOKU Wien ISBN 3-58234-044-6 | vergriffen |
| 154 | Erfassung, Bewertung und Sanierung von Kanalisationen (1998) ÖWAV Seminar 1999, BOKU Wien ISBN 3-8523-045-4 | 29 |
| 155 | Nährstoffbewirtschaftung und Wassergüte im Donaauraum (1999) ÖWAV - Seminar 1999, TU-Wien ISBN 3-85234-046-2 | 32 |
| 156 | Der spektrale Absorptionskoeffizient zur Bestimmung der organischen Abwasserbelastung (1999) UV-Seminar 1998, Duisburg ISBN 3-85234-047-0 | 22 |
| 157 | Bedeutung und Steuerung von Nährstoff- und Schwermetallflüssen des Abwassers (1999) Zessner M. ISBN 3-85234-048-9 | 25 |
| 158 | Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft (1999) Rechberger H. ISBN 3-85234-049-7 | vergriffen |
| 159 | Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Abwasseranlagen und deren Evaluierung (2000) ÖWAV – Seminar 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-050-0 | 22 |
| 160 | Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete (2000) Hebenstreit K. ISBN 3-85234-051-9 | 25 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 161 | Innovative Messtechnik in der Wasserwirtschaft (2000) Präsentation eines Forschungsprojektes ÖWAV – Seminar 2000, BOKU – Wien ISBN 3-85234-052-7 | vergriffen |
| 162 | Sickerwasser und Oberflächenabdichtung auf Reaktordeponien (2000) ÖWAV - Seminar 2000, Wirtschaftskammer Wien ISBN 3-85234-053-5 | 25 |
| 163 | Abfall- und Abwasserentsorgung in kleinen Verhältnissen (2000) ÖWAV - Seminar 2000, Ottenstein ISBN 3-85234-054-3 | 25 |
| 164 | Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose (2000) ÖWAV-Seminar 2000, TU Wien ISBN 3-85234-055-1 | i.V. |
| 165 | Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz (2000) Habersack, H. / Mayr, P. / Girlinger, R. / Schneglberger, St. ISBN 3-85234-056-x | 25 |
| 166 | Anpassung von Kläranlagen – Planung und Betrieb (2001) ÖWAV-Seminar 2001, TU Wien ISBN 3-85234-057-8 | 40 |
| 167 | Bepflanzte Bodenfilter zur weitergehenden Reinigung von Oberflächenwasser und Kläranlagenabläufen (2001) Laber J. ISBN 3-85234-058-6 | 25 |
| 168 | Kanalbetrieb und Niederschlagsbehandlung (2001) ÖWAV-Seminar 2001, BOKU Wien. ISBN 3-85234-059-4 | 29 |
| 169 | Development of a Simulation Tool for Subsurface Flow Constructed Wetlands (Entwicklung eines Simulationsmodells für bepflanzte Bodenfilter) (2001) Langergraber G. ISBN 3-85234-060-8 | 25 |
| 170 | Simulation von Niederschlagszeitreihen mittels stochastischer Prozess-modelle unter Berücksichtigung der Skaleninvarianz (2001) Bogner ISBN 3-85234-061-6 | i.V. |
| 171 | Sewage Sludge Disposal – Sustainable and/or Reliable Solutions (2001) ÖWAV / EWA Workshop 2001, TU-Wien ISBN 3-85234-062-4 | 25 |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|---------|
| 172 | Stickstoffentfernung mit Biofiltern (2002) Nikolavcic B. ISBN 3-85234-063-2 | 30 |
| 173 | Anaerobe Abwasserreinigung: Beeinflussende Faktoren der Versäuerung eines Zitronesäurefabrikabwassers (2002) Moser D. ISBN 3-85234-064-0 | 20 |
| 174 | Gewässerschutz bei Entlastungsbauwerken der Mischkanalisation (2002) Fenz R. ISBN 3-85234-065-9 | 25 |
| 175 | Wechselwirkung von physikalischen, chemischen und biotischen Prozessen in aquatischen Systemen (2002) Kreuzinger N. ISBN 3-85234-066-7 | i.V. |
| 176 | Benchmarking in der Abwasserentsorgung (2002) ÖWAV Workshop Februar 2002, TU-Wien ISBN 3-85234-067-5 | 30 |
| 177 | Klärschlamm (2002) Möglichkeiten und Verfahren zur Verwertung / Entsorgung ab 2004 ÖWAV Seminar April 2002, Wirtschaftskammer Österreich Schlammbehandlung und Entsorgung ÖWAV / TU – Workshop September 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-068-3 | 30 |
| 178 | Arzneimittel in der aquatischen Umwelt (2002) ÖWAV Seminar 2002, BOKU Wien ISBN 3-58234-069-1 | 30 |
| 179 | Untersuchungen zur Entfernung natürlicher radioaktiver Stoffe aus Trinkwasser und Überblick zu deren Verbreitung in Österreich (2002) Staubmann, K. ISBN 3-85234-070-5 | 25 |
| 180 | Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation (2002) Stephan, U. ISBN 3-85234-071-3 | 30 |
| 181 | Understanding and Estimating Floods at the Regional Scale (2002) Merz, R. ISBN 3-85234-072-1 | 30 |

| Band Nr | Preis € |
|--|---------|
| 182 Kanalmanagement - Neues Schlagwort oder alte Herausforderung ? (2003) ÖWAV Seminar 2003, BOKU Wien ISBN 3-85234-073-X | 30 |
| 183 Fortbildungsseminar Abwasserentsorgung (2003) ÖWAV Seminar Februar 2003, TU-Wien ISBN 3-85234-074-8 | 40 |
| 184 Klärschlamm (2003) ÖWAV Seminar November 2003, TU-Wien ISBN 3-85234-075-6 | 30 |
| 185 Nachhaltige Nutzung von Wasser (2003) Endbericht zu Modul MU11 im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Nachhaltige Entwicklung österreichischer Kulturlandschaften“ ISBN 3-85234-076-4 | 30 |
| 186 Inspektion von Kanalisationen (inkl. Umsetzung ÖNORM EN 13508-2) ÖWAV-Informationsveranstaltung 2004, BOKU Wien ISBN 3-85234-077-2 | 30 |
| 187 Datengewinnung, -verwaltung und -nutzung in der Wassergütwirtschaft (2004) ÖWAV Seminar März 2004, TU-Wien ISBN 3-85234-078-0 | 40 |
| 188 CSB-Elimination in höchstbelasteten Belebungsstufen und ihre Auswirkung auf die Stickstoffelimination von zweistufigen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der mathematischen Modellierung (2004) Haider, S. ISBN 3-85234-079-9 | 30 |
| 189 Beitrag zum Benchmarking von Abwasserreinigungsanlagen (2004) Lindtner, S. ISBN 3-85234-080-2 | 25 |
| 190 Öffentlichkeitsarbeit auf Kläranlagen (2004) ÖWAV Seminar Juni 2004, St. Pölten ISBN 3-85234-081-0 | 30 |
| 191 Das Verhalten ausgewählter organischer Spurenstoffe bei der biologischen Abwasserreinigung (2004) Clara, M. ISBN 3-85234-082-9 | 25 |

| Band Nr | | Preis € |
|---------|---|-------------------|
| 192 | Chemie in der Wassergütewirtschaft (2005) ÖWAV Seminar Februar 2005, TU Wien ISBN 3-85234-083-7 | 45 |
| 193 | Three dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhydral finite volumes (2005) Tritthart, M. ISBN 3-85234-084-5 | 30 |
| 194 | Abwasserentsorgung im ländlichen Raum (2005) ÖWAV Seminar November 2005, BOKU Wien ISBN 3-85234-085-3 | Preis auf Anfrage |
| 195 | Betriebserfahrungen moderner Kläranlagen (2006) ÖWAV Seminar Februar 2006, TU-Wien ISBN 3-85234-086-1 | 40 |
| 196 | Kanalmanagement 2006 – Praxisberichte und Projektergebnisse (2006) ÖWAV-Informationsveranstaltung 2006, BOKU ISBN 3-85234-087-X | 30 |
| 197 | Methoden der hydrologischen Regionalisierung (2006) ÖWAV-Seminar 2006, TU Wien ISBN 3-85234-088-8 | 30 |
| 198 | Process based regionalisation of low flows (2006) Laha, G. ISBN-10 3-85234-089-6 ISBN-13 978-3-85234-089-0 | 30 |
| 199 | Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen & Realität (2006) ÖWAV-Seminar 2006, TU Wien ISBN-10 3-85234-090-X ISBN-13 978-3-85234-090-6 | 30 |
| 200 | Scale and stream network structure in geostatistical hydrological analyses (Geostatistische hydrologische Analysen unter Berücksichtigung von Skalenaspekten und Gewässernetzstruktur) (2007) Skøien, J. O. ISBN-10 3-85234-091-8 ISBN-13 978-3-85234-091-3 | i.V. |

| | | |
|------------|--|----|
| 201 | Der kombinierte Ansatz, das Wechselspiel zwischen Emission und Immission - Neue Herausforderungen bei Abwasserentsorgung und Gewässerschutz (2007) ÖWAV Februar Seminar 2007, TU-Wien ISBN-13 978-3-85234-093-7 | 45 |
| 202 | Betrieb von Kläranlagen - Grundkurs (2007) völlige Neubearbeitung - 3. Auflage 2007 ISBN-13 978-3-85234-094-4 | 70 |
| 203 | Kanalmanagement 2007 – Unterirdische Kanalsanierung (2007) ÖWAV Infoveranstaltung 17. April 2007 an der BOKU Wien ISBN-13 978-3-85234-095-1 | 30 |
| 204 | Leitungskataster für Trink - und Abwassernetze (2007) ÖWAV Infoveranstaltung 30. Mai 2007, Wien ISBN-13 978-3-85234-096-8 | 30 |
| 205 | Geruchs- und Korrosionsprobleme in der Kanalisation (2007) ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien ISBN 978-3-85234-097-5 | 35 |
| 206 | Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden (2007) ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien ISBN 978-3-85234-098-2 | 30 |
| 207 | 1. Österreichischer Kleinkläranlagentag (2007) ÖWAV-Seminar 2007, BOKU ISBN 978-3-85234-099-9 | 30 |
| 208 | Biologische Abwasserreinigung - Aktuelle Entwicklungen ÖWAV Februar Seminar 2008, TU-Wien ISBN 978-3-85234-100-2 | 45 |
| 209 | Kanalmanagement 2008 – Betrieb und Mischwasser (2008) ÖWAV Infoveranstaltung 27. März 2008 an der BOKU Wien ISBN 978-3-85234-101-9 | 30 |
| 210 | 2. Österreichischer Kleinkläranlagentag ÖWAV-Seminar 2008, BOKU ISBN 978-3-85234-102-6 | 30 |

-
- | | | |
|------------|---|------|
| 211 | Zur Kenntnis der Schwefelwasserstoffbildung und -vermeidung in Abwasserdruckleitungen Saračević E. ISBN 978-3-85234-103-3 | 30 |
| 212 | Neue Herausforderungen an die Wassergütewirtschaft ÖWAV Februar Seminar 2008, TU-Wien ISBN 978-3-85234-104-0 | 45 |
| 213 | Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone Beobachtung - Messung - Modellierung Endbericht für Forschungsprojekte im Zeitraum 1990 bis 2008 ISBN: 978-3-85234-105-7 | 30 |
| 214 | Linking Land Use to Stream Pollution: Pollutant Dynamics and Management Implications Yillia, Paul T. ISBN 978-3-85234-106-4 | i.V. |

Die Bände sind zu beziehen bei:

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
der Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13/226, A-1040 Wien

Band: 12, 15, 16, 20, 28, 34, 35, 36, 37, 47, 49, 53, 54, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 73, 81, 82, 84, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 105, 107, 108, 110, 114, 116, 117, 121, 125, 127, 129, 130, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 145, 147, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 166, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 183, 184, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 195, 201, 202, 205, 208, 211, 212, 214

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
der Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien

Band: 1, 2, 8, 9, 17, 21, 23, 26, 30, 31, 41, 42, 52, 66, 68, 74, 90, 91, 92, 102, 122, 132, 148, 164, 180, 181, 193, 197, 198, 199, 200, 206, 213

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
der Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 18, 19, 32, 38, 43, 44, 45, 48, 50, 55, 59, 60, 70, 75, 78, 86, 89, 93, 101, 106, 109, 113, 123, 144, 160, 165, 167, 169

Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz
der Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 22, 29, 39, 40, 46, 67, 71, 72, 76, 77, 80, 83, 85, 87, 88, 94, 103, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 128, 131, 133, 136, 142, 146, 150, 154, 163, 167, 168, 169, 178, 179, 182, 185, 186, 194, 196, 203, 204, 207, 209, 210

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft
der Universität für Bodenkultur
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 119, 149, 151, 170