



**BFW-DOKUMENTATION 12/2011**

**Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten  
bei konvektiven Starkregen – Evaluation der  
Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für  
Schweizerische Einzugsgebiete**

*Assessment of Surface Runoff Coefficients in  
Torrential Rain – Evaluation of the Code of Practice by  
Markart et al. (2004) for Swiss Catchments*

C. HEMUND  
G. MARKART  
B. KOHL  
J. DOBMANN  
R. WEINGARTNER

FDK 116.2



**Empfohlene Zitierung:**

Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen – Evaluation der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für Schweizerische Einzugsgebiete / C. Hemund, G. Markart, B. Kohl, J. Dobmann und R. Weingartner / Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 2011, BFW-Dokumentation Nr. 12, 103 S.

ISSN 1811-3044

Copyright 2011 by

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

Für den Inhalt verantwortlich:

Leiter: Dr. Peter Mayer

Herstellung und Druck:

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

Seckendorff-Gudent-Weg 8

A-1131 Wien

URL: <http://bfw.ac.at>

Bestellungen und Tauschverkehr:

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

Bibliothek

Seckendorff-Gudent-Weg 8

A-1131 Wien

Tel. + 43-1-878 38 1216

Fax. + 43-1-878 38 1250

E-mail: [bibliothek@bfw.gv.at](mailto:bibliothek@bfw.gv.at)

Online Bestellungen: [http://bfw.ac.at/order\\_online](http://bfw.ac.at/order_online)

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

# Vorwort

In den letzten Jahren wurden in Mitteleuropa große Anstrengungen in der Entwicklung bzw. Optimierung von Niederschlag-/Abflussmodellen (N/A-Modelle) unternommen. Die Qualität universell gültiger N/A-Modelle ist abhängig von

- a) den verwendeten Algorithmen. Dabei stellt sich zwangsläufig die Frage: Wie exakt ist man mit den verwendeten Parametern in der Lage die hydrologischen Gebietscharakteristika nachzuvollziehen?
- b) der Qualität der einfließenden Input-Daten. Gerade in alpinen Einzugsgebieten sind die Niederschlagsangaben mit erheblichen Fehlern behaftet, einheitliche Angaben zu Vegetation, Art und Intensität der Landnutzung oder flächendeckenden Bodenkennwerten und anderen hydrologisch wichtigen Gebietscharakteristika sind für den Ostalpenraum nicht vorhanden.

Am BFW, Institut für Naturgefahren in Innsbruck, wurde daher eine zweigleisige Vorgangsweise für die Entwicklung eines praxistauglichen Ansatzes zur N/A-Berechnung gewählt:

- a) In intensiver Kooperation konnte mit den Kollegen Dr. Thomas Schauer und Univ.-Doz. Dr. Günther Bunza vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) aufbauend auf über 700 Starkregensimulationen mit Großregenanlagen auf einer weit gefassten Bandbreite von Vegetations-/Bodeneinheiten des Ostalpenraumes eine Geländeanleitung zur Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen entwickelt werden. Mit dieser Wegleitung können wichtige Inputgrößen wie Oberflächenabflussbeiwert oder Oberflächenrauigkeit von einem großen Benutzerkreis im Gelände nachvollziehbar geschätzt werden.
- b) Parallel dazu erfolgte die Optimierung des Laufzeitverfahrens von Zeller (1974/1981) zu einem universell einsetzbaren N/A-Berechnungsansatz (ZEMOKOST – **Z**eller **M**odifiziert von **K**ohl und **S**tepanek) für alpine Einzugsgebiete.

Geländeanleitung und ZEMOKOST sind in Österreich Bestandteile des ETALP-Werkzeugkoffers (Projektteam ETALP 2003) und mittlerweile bei einschlägigen Dienststellen (z.B. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung) oder Zivilingenieuren in regem Gebrauch.

Im deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz, Südtirol) werden teils vollkommen unterschiedliche Verfahren zur hydrologischen Bemessung eingesetzt. Es erschien also sinnvoll, die fachliche Kompetenz am GIUB – Gruppe Hydrologie und am Institut für Naturgefahren beim BFW in einer gemeinsamen Arbeit zu bündeln, Geländeanleitung und ZEMOKOST in Schweizerischen Wildbacheinzugsgebieten anzuwenden und mit gängigen Ansätzen in der Schweiz zu vergleichen.

Die Ergebnisse dieser Anstrengungen liegen mit dieser Arbeit vor. Sie stellen den ersten Schritt zu einem dringend notwendigen supranationalen Methodenabgleich dar.

Die vorliegende Arbeit wurde von einer Vielzahl von Personen und Institutionen gefördert. Besonderer Dank gilt dem ehemaligen Leiter des BFW, Herrn Dr. Harald Mauser, der unbürokratisch die Publikation der vorliegenden umfangreichen Arbeit in den Printmedien des BFW ermöglichte.

Weiters danken wir

- Prof. Dr. Peter Germann und Dr. Abdallah Allaoui für die Unterstützung im Bereich der Bodenkunde und Bodenhydrologie.
- Hubert Gerhardinger und Basil Ferrante für die Unterstützung am GIS und technischen Fragen.
- Tom Reist für die organisatorischen Hilfestellungen und Auskünfte, sowie dem Hydroteam am GIUB für Ratschläge, Anmerkungen und die hilfsbereite Unterstützung.
- all jenen, die bei der Feldarbeit Hilfe leisteten und die Arbeit in anderer Form unterstützt haben.



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	9
Abstract .....	10
<b>1. Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>10</b>
1.1 Hochwasserhydrologie in der Schweiz .....	10
1.2 Stand der Forschung.....	12
1.3 Problemstellung .....	13
1.4 Zielsetzung.....	13
1.5 Gliederung der Arbeit.....	14
<b>2. Fachliche Grundlagen .....</b>	<b>14</b>
2.1 Das System Wildbach.....	14
2.2 Vegetation .....	15
2.2.1 Hydrologische Vegetationsformen und ihre Abflusseigenschaften .....	15
2.2.2 Indikatorwirkungen von Pflanzen (Feuchtezahl) .....	16
2.2.3 Vegetationsgesellschaften des Alpenraumes.....	16
2.3 Böden .....	17
2.3.1 Abfluss im Boden .....	17
2.4 Geologie.....	18
2.4.1 Durchlässigkeit und Chemismus des Gesteins.....	19
2.4.2 Gerinnenetzdichte .....	20
2.5 Relief und Neigung.....	20
2.6 Abflussbildung .....	20
2.6.1 Abflussbildung am Hang .....	21
2.6.2 Abflussbildung im Gerinne.....	21
2.6.3 Die Abflussganglinie eines Einzugsgebietes.....	22
<b>3. Methoden .....</b>	<b>23</b>
3.1 Die Geländeanleitung von Markart et al. (2004).....	23
3.1.1 Ziele und Inhalt der Geländeanleitung.....	23
3.1.2 Gültigkeitsbereich der Geländeanleitung.....	23
3.1.3 Aufbau der Geländeanleitung.....	23
3.2 Der Abflussbeiwert nach Rickli und Forster (1997) .....	26
3.2.1 Ziele und Aufbau .....	26
3.2.2 Gültigkeitsbereich.....	27
3.3 ZEMOKOST.....	29
<b>4. Hochwasserabschätzung – Vorgangsweise (erweiterte Methode) .....</b>	<b>30</b>
4.1 Verwendete Grundlagen – Aussagekraft .....	30
4.1.1 Karten und Geländedaten .....	32
4.1.2 Niederschlagsdaten .....	33
4.1.3 Thematische Grundlagen .....	33
4.2 Einzugsgebietsübersicht und Flächengliederung .....	33
4.2.1 Gliederung der Teileinzugsgebiete .....	35
4.2.2 Vegetation .....	35
4.2.3 Substrat/Boden .....	36
4.2.4 Geologie.....	37
4.2.5 Kleingerinnenetz/Vernässung.....	38
4.2.6 Bewirtschaftung/Nutzung .....	38
4.2.7 Systemzustand.....	39
4.3 Feldbegehung .....	39
4.3.1 Gerinnebeurteilung.....	40

4.3.2	Abschätzung I.....	40
4.3.3	Abschätzung II.....	41
4.4	Anwendung des Programms ZEMOKOST.....	42
4.5	HQ-Abschätzung mit der Geländeanleitung und ZEMOKOST am Beispiel Eistlenbach.....	42
4.5.1	Einzugsgebietsübersicht.....	42
4.5.2	Feldbegehung.....	45
4.5.3	Kartenerstellung.....	47
4.5.4	Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST.....	48
<b>5.</b>	<b>Anwendungen.....</b>	<b>49</b>
5.1	Untersuchungsgebiete.....	49
5.2	Ergebnisse der Anwendung der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) und von ZEMOKOST auf die weiteren Testgebiete.....	49
5.2.1	Dürrenwaldbach.....	53
5.2.2	Witenbach.....	55
5.2.3	Spissibach.....	57
5.2.4	Sperbelgraben.....	59
5.2.5	Hostetbach.....	61
Kartenerstellung.....		62
Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST.....		62
5.2.6	Vergleich der Einzugsgebiete.....	63
5.2.7	Feststellungen zum Vergleich der Abschätzung nach Markart et al. (2004) mit jener nach Rickli und Forster (1997).....	63
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse und Analyse.....</b>	<b>66</b>
6.1	Die Abflussbeiwerte.....	66
6.1.1	Vergleich mit gemessenen Abflussbeiwerten.....	66
6.1.2	Die Abflussbeiwerte nach Rickli und Forster (1997).....	67
6.2	Resultate der HQ-Abschätzungen.....	69
6.2.1	Der Einfluss des Niederschlagsinputs.....	69
6.2.2	Der Einfluss der Abflussbeiwert- und Rauigkeitsklassen in ZEMOKOST.....	70
6.2.3	Die HQ <sub>100</sub> -Vergleichswerte aus anderen Abschätzungsverfahren.....	70
6.2.4	Einordnen der HQ <sub>100</sub> -Berechnungsergebnisse in Hochwasserabflüsse der Schweiz.....	72
6.3	Analyse der Abflussspenden.....	72
6.4	Analyse von zwei Teileinzugsgebieten am Beispiel des Spissibaches.....	74
6.5	Diskussion.....	75
<b>7.</b>	<b>Erfahrungen aus den Berechnungen mit ZEMOKOST.....</b>	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b>Synthese.....</b>	<b>76</b>
8.1	Vorschläge für eine Adaptierung und Erweiterung der Geländeanleitung von Markart et al. (2004).....	76
8.2	Vorschläge zur Optimierung von ZEMOKOST im Hinblick auf weitere Anwendungen in der Schweiz...	77
<b>9.</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>77</b>
<b>10.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>78</b>
10.1	Literatur.....	78
10.2	Karten und digitale Daten.....	81
10.3	Internet.....	82
<b>11.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>83</b>
11.1	Beilagen der Feldbegehung.....	87
11.2	ZEMOKOST (HQ <sub>x</sub> -Berechnungen).....	98
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>101</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>103</b>

## Abkürzungen

A	Einzugsgebietsfläche
Akl	Abflussbeiwertklassen
AMA	Agrarmarkt Austria
Astat	Arealstatistik der Schweiz
BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BEK	Bodeneignungskarte (Schweiz)
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Österreich)
BGS	Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz
BFS	Bundesamt für Statistik (Schweiz)
BFW	Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (Österreich)
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft (Schweiz)
BWG	Bundesamt für Wasser und Geologie (Schweiz)
<i>c</i>	Oberflächenrauigkeit
CH	Schweiz
$C, \Psi_{\text{const}}$	Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz
<i>D</i>	Niederschlagsdauer
DHM	Digitales Höhenmodell (Schweiz)
$D_{90}, d_{90}$	Kornrauheit $D_{90}$ nach Rickenmann (1996)
eBOD	Elektronische Bodenkarte (Österreich)
EJPD	Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement (Schweiz)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Schweiz)
EZG	Einzugsgebiet
Fi	Fichte
FAL	Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (Schweiz)
FVA	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau (Deutschland)
<i>g</i>	Erdbeschleunigung
GBA	Geologische Bundesanstalt (Österreich)
GBL	Gebietsbauleitung (Österreich)
GET	Geotechnische Karte (Schweiz)
GHO	Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie des BWG (Schweiz)
GIS	Geographisches Informationssystem
GIUB	Geographisches Institut der Universität Bern (Schweiz)
GPS	Global Positioning System
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
HAKESCH	Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz
HAÖ	Hydrologischer Atlas Österreichs
<i>hN</i>	Niederschlagsmenge
HQ	Hochwasserabfluss
$HQ_{\text{max}}$	Maximaler Hochwasserabfluss
HQ <sub>x</sub>	Hochwasserabfluss mit einer x-jährlichen Wiederkehrperiode

---

$i_T$	Intensität des Gebietsniederschlages
$i_N$	Intensität des Niederschlages
$J_G$	Gerinneneigung
$J_{OB}$	Hangneigung
kf-Wert	gesättigte Wasserleitfähigkeit
k-Wert	Gerinnerauigkeit nach Strickler
KHR	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
$L_{OB}$	projezierter Fließweg an der Oberfläche
LK25	Landeskarte 1:25 000 (Schweiz)
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising (Deutschland)
m	mittlerer Wertebereich der Klassenbreite
N/A	Niederschlag/Abfluss
o	oberer Wertebereich der Klassenbreite
PF	Primärflächenkarte (Schweiz)
q	Abflusspende
Q	Spitzenabfluss
P/R	Precipitation / Runoff
Rkl	OberflächenRauigkeitsklassen
sec	Sekunde
SH	Seehöhe
SGK	Schweizerische Geologische Kommission
SSF	rascher Zwischenabfluss
Swisstopo	Bundesamt für Landestopographie (Schweiz)
SZ	Systemzustand
T	Wiederkehrzeit
TEZG	Teileinzugsgebiet
$t_{OB}$	Oberflächenlaufzeit
u	unterer Wertebereich der Klassenbreite
$u$	Ausgleichsparameter für die Berechnung der Niederschlagsmenge
$v$	Fließgeschwindigkeit des Abflusses
$v_G$	Fließgeschwindigkeit im Gerinne
$v_m$	mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses
w	Ausgleichsparameter für die Berechnung der Niederschlagsmenge
WBEG	Wildbacheinzugsgebiet
WLW	Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (Österreich)
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Schweiz)
ZEMOKOST	N/A-Modell (Laufzeitverfahren von Zeller modifiziert von Kohl und Stepanek)
$\Psi_{due}$	mittlerer Gebietsabflussbeiwert Dürrenwaldbach
$\Psi_{ges}$	Gesamtabflussbeiwert (Verhältnis Gesamtabfluss zum Gesamtniederschlag)
$\Psi_{spi}$	mittlerer Gebietsabflussbeiwert Spissibach

# Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen – Evaluation der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für Schweizerische Einzugsgebiete

C. HEMUND<sup>1</sup>, G. MARKART<sup>2</sup>, B. KOHL<sup>2</sup>, J. DOBMANN<sup>1</sup> UND R. WEINGARTNER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Geographisches Institut der Universität Bern, Gruppe Hydrologie, Bern, Schweiz*

<sup>2</sup>*Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Institut für Naturgefahren, Innsbruck, Österreich*

**Kurzfassung.** Den Ausgangspunkt dieser Arbeit bildet die für den österreichischen und bayerischen Ostalpenraum entwickelte Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen von Markart et al. (2004), im Folgenden auch kurz „Geländeanleitung“ genannt. Ihre spezielle Ausrichtung auf Wildbacheinzugsgebiete im Alpenraum macht sie für die Hochwasserabschätzung in mikroskaligen und kleinen mesoskaligen Einzugsgebieten (<10 km<sup>2</sup>) der Schweiz ohne Direktmessung zu einer besonders interessanten Grundlage. Sie verspricht vertieften Einblick in das System Wildbach, insbesondere bei Oberflächenabflussprozessen und dynamischen Reaktionen bei konvektiven Starkniederschlägen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Übertragbarkeit der Geländeanleitung auf Schweizerische Einzugsgebiete geprüft. Basis dafür bildeten sechs Einzugsgebiete des nördlichen Alpenraumes, aus denen bereits viele Grundlagendaten, sowie Erkenntnisse über andere Abschätzverfahren vorliegen. Die Ergebnisse sollten zudem einen Beitrag zum Projekt „Hochwasserabschätzungen in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz – Interpretations- und Praxishilfe“ (Dobmann 2009) leisten.

Für jedes der sechs Testgebiete erfolgten mehrere Feldbegehungen mit direkter Anwendung der Geländeanleitung im Gelände. Bereits während der Vorbereitungen galt es, die charakteristischen Eigenschaften eines Einzugsgebietes im GIS zu erfassen, abflussrelevante Bereiche herauszuarbeiten und vorauszuscheiden. Im Zuge der Geländebegehung erfolgte die definitive Bewertung und Ausscheidung einzelner Teilflächen unter Zuordnung von Abflussbeiwerten und Rauigkeitsbeiwerten. Das Vorgehen basiert auf der schrittweisen Abschätzung folgender Indikatoren:

- Vegetation (hydrologische Vegetationsform und Zeigerwerte einzelner Pflanzen)
- Bodeneigenschaften und
- Art und Intensität der Landnutzung.

Die im Feld ausgeschiedenen beitragenden Flächen und die an gebietsrepräsentativen hydrologischen Vegetationsformen nach dem Aufnahmeformular von MARKART et al. (2004) erfassten Standortinformationen dienten schließlich als Grundlage der Erstellung digitaler Abflussbeiwert- und Rauigkeitskarten und der Berechnung von Bemessungsabflüssen mit dem N/A-Modell ZEMOKOST (optimiertes Laufzeitverfahren nach ZELLER = Zeller modifiziert von Kohl und Stepanek).

Als Ergebnis stehen für die Test-Einzugsgebiete Angaben zur Hochwasserdisposition und konkrete Abflussganglinien (Abflussspitze und -fracht) zur Verfügung.

Die Analyse und Auswertung der Ergebnisse zeigte deutlich, dass sich sowohl die Geländeanleitung als auch ZEMOKOST durchaus für die Umsetzung in Wildbacheinzugsgebieten des Schweizerischen Alpennordrandes eignen. Die mit der Grundlage nach Markart et al. (2004) und der Vorgangsweise von Stepanek et al. (2004) erzielten Ergebnisse wurden mit nach anderen Ansätzen erzielten Berechnungsergebnissen verglichen. Dabei wurden gut reproduzierbare Ergebnisse erzielt. Die Verwendung der Methoden kann daher empfohlen werden.

In der Geländeanleitung nicht enthaltene hydrologische Vegetations- bzw. Nutzungsformen wurden im Rahmen der gegenständlichen Erhebungen erfasst und aufgrund von Literaturangaben bzw. Analogieschlüssen bewertet. Zudem wurden Vorschläge zur Optimierung der Anleitung bzw. der Vorgehensweise und Übertragung auf die Verhältnisse der Schweiz formuliert. Diese Vorschläge werden in die für 2012 geplante Ausgabe der Version 2.0 der Geländeanleitung eingearbeitet und Vorschläge für die Optimierung der Benutzerfreundlichkeit des N/A-Modells ZEMOKOST bei der bevorstehenden Operationalisierung berücksichtigt.

**Schlüsselworte:** Abflussbeiwert, Landnutzung, N/A-Modellierung, Starkregen

**Abstract.** [Assessment of Surface Runoff Coefficients in Torrential Rain – Evaluation of the Code of Practice by Markart et al. (2004) for Swiss Catchments.] The presented work is based on the code of practice for assessment of surface runoff coefficients of alpine vegetation/soil units in torrential rain developed by Markart et al. (2004) for the Eastern Alps in Bavaria, South Tyrol and Austria. The code of practice has been designed for alpine torrent catchments and therefore forms an interesting approach for flood water assessment at the microscale and at the mesoscale (<10 km<sup>2</sup>) in Switzerland. The approach offers a deeper insight into torrential systems especially for runoff processes dominated by surface runoff and dynamic reactions in torrential rain.

The paper focuses on the check of the transferability of the code of practice to swiss catchments. The investigations were done in six catchments in the northern Swiss Alps. From these testbeds a lot of basic data and knowledge from the use of other runoff estimation procedures are available. The new results in addition form an important contribution to the project „Flood water assessment in small catchment areas of Switzerland – interpretation manual and practical aid“ (Dobmann 2009).

Characteristic features of the catchments have been analysed by use of a GIS-system, a work which also comprised the delineation of runoff relevant areas. This work was followed by surveys with direct application of the code of practice in the field. Field work in addition comprised classification of areas contributing to runoff and assignment of surface runoff coefficients and surface roughness coefficients by use of following indicators:

- Vegetation (hydrologic vegetation unit and plant indicator values)
- Soil (physical) characteristics
- Way and intensity of land use

The runoff contributing areas delineated in the field and the site information were compiled in digital surface runoff coefficient maps and surface roughness maps. These maps formed the basis for calculation of recurrent design events by use of the precipitation/runoff model (P/R-model) ZEMOKOST (optimized runtime method after ZELLER = Zeller MODfied by KOHL and STEpanek). The results are concrete information about runoff disposition in each catchment and hydrographs showing peak runoff and runoff freight.

Analysis of the results showed that code of practice as well as ZEMOKOST are suitable for application in catchments at the northern edge of the Swiss Alps. In addition comparison with swiss standard methods indicates good reproducibility of the Austrian approach, it can be recommended for practical use in good conscience.

Vegetation units and types of land use not yet contained in the code of practice by Markart et al. (2004) have been listed and evaluated by use of information from literature or conclusions by analogy, helpful suggestions for adaptation of the manual and the modus operandi for the realities in Switzerland have been formulated. The proposals will be considered in a revised version of the code of practice planned for 2011 and in future versions of the P/R-model ZEMOKOST.

*Keywords:* runoff coefficient, landuse, P/R-modeling, torrential rain

## 1. Einleitung und Zielsetzung

Kenntnisse von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit ermöglichen den Schutz und die Nutzung unserer Wasserressourcen sowie den Schutz des Menschen vor schädigenden Wirkungen des Wassers (Spreafico et al. 2003). So sind heute beispielsweise bei der Abschätzung von Hochwasserganglinien und -frachten, bei der Bestimmung seltener Hochwässer und bei der Beurteilung der Abflussprozesse in kleinen und mittelgroßen Einzugsgebieten unzählige Probleme noch nicht zufriedenstellend gelöst. Weitere Untersuchungen, Messungen und Auswertungen sind auch in Zukunft absolut nötig.

Diese Defizite sind vor allem auf die knappe Datenlage und die nur schwer abschätzbare Komplexität ablaufender Prozesse zurückzuführen.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag beim Füllen der großen Lücken bei der Hochwasserabschätzung in mikroskaligen und kleinen mesoskaligen Einzugsgebieten (< 10 km<sup>2</sup>) leisten. Sie stellt somit einen Beitrag zur Objektivierung der Hochwasserabschätzung dar. Im Zentrum stehen die Beurteilung der Abflussbereitschaft hydrologisch relevanter Teilflächen eines Einzugsgebietes und der Einsatz eines für den Praktiker leicht handhabbaren und mit wenigen, einfach im Feld zu erhebenden Parametern operierenden Niederschlag-Abfluss-Modells.

### 1.1 Hochwasserhydrologie in der Schweiz

Es ist schwierig, die Dynamik der Abflussbildung in genauen Ablaufprozessen und Modellen mit befriedigender Genauigkeit zu erfassen. Trotzdem

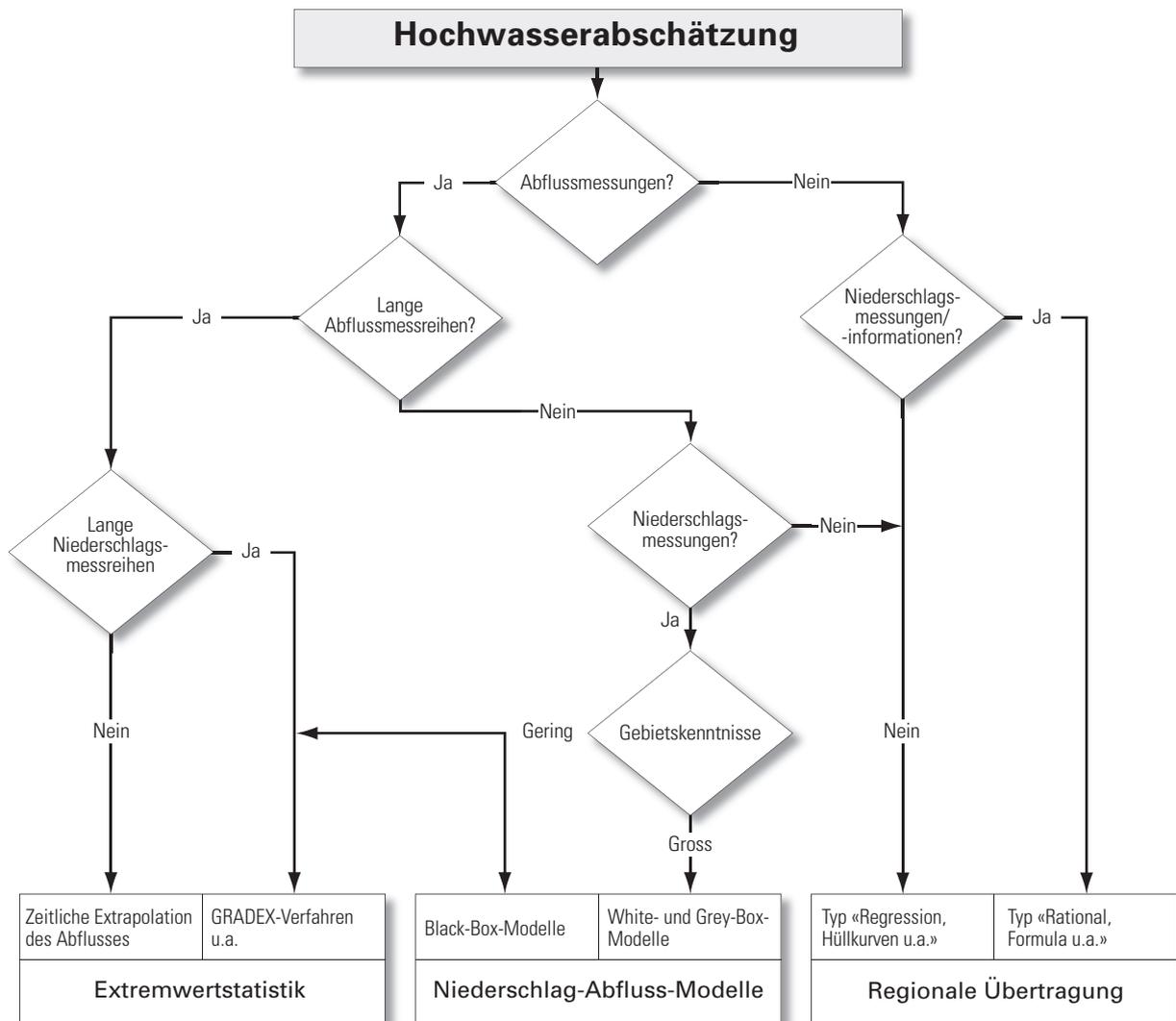


Abbildung 1-1: Einordnung der Hochwasserabschätzverfahren (Spreafico et al. 2003).

haben sich im Verlaufe der Jahre in der Schweizerischen Praxis der Hochwasserermittlung verschiedenste Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen etabliert. Einen ausführlichen Überblick über die in der Schweiz häufig zur Anwendung gelangenden Verfahren und Modelle geben Spreafico et al. (2003).

Grundsätzlich lassen sich die verschiedenen Methoden der Hochwasserabschätzung anhand der zur Verfügung stehenden Abflussdaten und den Gebietskenntnissen gliedern (Abbildung 1-1). Sobald ein Gewässer genügend lange gemessene Abflussreihen aufweist, werden **Extremwertstatistiken** eingesetzt. Die Abflussspitzen lassen sich durch zeitliche Extrapolation generieren.

Gilt es, zusätzlich die Ganglinie eines Extremereignisses abzuschätzen, dann kommen **Niederschlag-Abfluss-Modelle** zum Einsatz. Der Nieder-

schlag wird rechnerisch in einen Abfluss transformiert. Sein kausaler Zusammenhang ist somit ebenfalls beschrieben. Für die Kalibrierung sind jedoch **zeitlich hoch aufgelöste Messwerte der Input- und Output-Parameter** unerlässlich.

Liegen für das Einzugsgebiet keine Abflussmessungen vor, lassen sich Verfahren der **regionalen Übertragung** einsetzen (Godina und Blöschl 2006). Zentrale Aspekte solcher regionalhydrologischer Analysen sind Simulation, Analyse sowie Inter- und Extrapolation raumvarianter Strukturen (Weingartner 1999). Nach der in Österreich für die Bewertung von Abflussprozessen in Wildbacheinzugsgebieten gültigen Vorgangsweise (ETALP – Gesamtheitliche Erfassung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten, Projektteam ETALP 2003) handelt es sich bei der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) um ein

Instrument für die mittlere bzw. die detaillierte Maßstabebene ( $\leq 1 : 10\,000$ ). Auf der regionalen Ebene ( $\geq 1 : 25\,000$ ) sollte die Geländeanleitung allenfalls zur punktuellen terrestrischen Falsifizierung von GIS-basierten Abflussbeiwert- und Rauigkeitskarten zum Einsatz kommen.

## 1.2 Stand der Forschung

Die Forschung und Weiterentwicklung in der Hochwasserabschätzung zeigt sich in der Schweiz in fortschrittlichen Produkten wie der Software HQx\_meso\_CH (Barben 2001). Diese integriert verschiedene Abschätzverfahren der regionalen Übertragung und eignet sich daher insbesondere für mittelgroße Einzugsgebiete (50 - 500 km<sup>2</sup>). Durch die Arbeit von Viviroli (2007) gelang ein weiterer Vorstoß im Bereich der N/A-Modelle.

In Österreich wurde im beginnenden 21. Jahrhundert eine Reihe von N/A-Modellen für den Einsatz in der Praxis entwickelt, wie z.B. HYDR<sup>2</sup>AC (Volk und Fuchs 2004), PROMAB<sup>GIS</sup> (Jenewein 2003; Schöberl et al. 2004) oder ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005, Stepanek et al. 2004). Von diesen Ansätzen unterliegt nur das Verfahren ZEMOKOST einer unlimitierten Verbreitung, daher wurde auch dieses Modell für die Vergleiche mit Schweizer Ansätzen verwendet.

In der Schweiz wird bei Hochwasserabschätzungen zwischen mesoskaligen (10-500 km<sup>2</sup>) und mikroskaligen Einzugsgebieten (< 10 km<sup>2</sup>) unterschieden (Spreafico et al. 2003). Abflussbildung und Abflusskonzentration werden in kleinen Einzugsgebieten nicht von denselben Prozessen dominiert wie in großen Gebieten. Zudem sind die kleinräumig wechselnden Verhältnisse meist nicht ausreichend detailliert erfassbar. Die Auflösung der digitalen Datensätze und Kartengrundlagen ist dafür oftmals zu gering. Eine Feldbegehung ist somit unerlässlich (KHR 2001). Außerdem existieren nur für sehr wenige Gebiete ausreichend lange Messreihen, was die Analyse kleiner Einzugsgebiete weiter erschwert.

Nach Schnetzer (2007) liegt die Größe des durchschnittlichen Wildbacheinzugsgebietes in Österreich bei 4,7 km<sup>2</sup>. Auch in der Schweiz sind es gerade die kleineren Einzugsgebiete, welche bei Hochwasserereignissen jährliche Schäden im Umfang von 50-100 Millionen Franken verursachen. Für die Praxis stellen daher Abschätzmethoden bei

Bemessungsaufgaben ein unentbehrliches Hilfsmittel dar (Spreafico et al. 2003).

### HAKESCH

Aus diesem Grund versuchten Forster und Hegg (2002), aus den Erkenntnissen des Projektes „Beurteilung von Hochwasserschätzverfahren“ der Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) einen Verfahrensvorschlag zur Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten zu erarbeiten. Genauere Ausführungen zum Vorgehen, den empfohlenen Methoden und der Bewertung dieses Verfahrens finden sich bei Spreafico et al. (2003).

Forster und Hegg (2002) testeten verschiedene Abschätzmethoden in sieben kleinen Einzugsgebieten. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass das breite Spektrum möglicher Gebietseigenschaften und -eigenheiten von keiner Methode ausreichend abgedeckt wird. Dennoch sind systematische Tendenzen hinsichtlich der Über- oder Unterschätzung von Hochwasserabflüssen erkennbar. Es wird daher eine Kombination aller fünf Methoden zugleich vorgeschlagen. Diese erfolgte in der Realisierung des Softwarepaketes HAKESCH (Hochwasserabschätzung in Kleinen Einzugsgebieten der Schweiz) an der WSL. Nach der Berechnung mit den ausgewählten Verfahren und unter Berücksichtigung der vorgegebenen Gewichtung schlägt HAKESCH eine Hochwasserspitze vor. Die integrierten Abschätzverfahren **Müller, Taubmann, Kölla, modifiziertes Fließzeitverfahren** und **Clark-WSL** (Vogt und Forster 1999) legen einerseits den Streubereich der Hochwasserabflüsse fest und liefern andererseits einen konkreten Spitzenabfluss.

Hinsichtlich der Beurteilung von Wildbacheinzugsgebieten erweist sich laut Forster und Hegg (2002) das Verfahren Clark-WSL als besonders geeignet. Das Modell Taubmann hingegen errechnet für voralpine und alpine Gebiete nur ungenaue Resultate. Im Allgemeinen seien die Ergebnisse des Abschätzvorschlages von HAKESCH zwar zuverlässig, bei sehr abflussfreudigen Gebieten könne hingegen eine Tendenz der Unterschätzung auftreten.

HAKESCH ist ein in der Praxis verbreitet eingesetztes Abschätzverfahren. In der vorliegenden Arbeit wird insbesondere auf die von Sury (2006) mit HAKESCH für 11 Wildbacheinzugsgebiete der Schweiz erzielten Ergebnisse Bezug genommen.

## Die Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) und das N/A-Modell ZEMOKOST

In den letzten Jahren wurde weltweit eine Vielzahl an Niederschlags-Abfluss-Modellen neu entwickelt oder aus bestehenden Ansätzen abgeleitet.

Die Ermittlung des Spitzenabflusses in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen basiert jeweils auf dem effektiven Niederschlag. Dieser wird meistens über einen Beiwert beschrieben, der die Abflussverluste entweder direkt (Abflussbeiwert) oder indirekt, z.B. als Curve-Number des SCS (1985) angibt. Um die Bestimmung der Abflussverluste zu erleichtern, stehen verschiedene Tabellen und Vorgehensweisen zur Verfügung. Sie berücksichtigen die Bodenbedeckung, den Boden selbst oder beide Einflussfaktoren zusammen.

Bei der Anwendung dieser Bestimmungsmethoden in Wildbacheinzugsgebieten der österreichischen Alpen stellen Stepanek et al. (2004) allerdings fest, dass die verwendeten Einheitsganglinien die tatsächlich stattfindenden Abflussprozesse nur ungenügend abbilden. Zudem fehlen in den erwähnten Werken Aussagen zu Abflussbeiwert, Oberflächenrauigkeit und Initialabstraktion alpiner Boden-/Vegetationskomplexe.

Mit der Simulation von Starkniederschlägen bietet sich seit mehr als einem halben Jahrhundert ein Instrument zur Abschätzung von Abflussbeiwerten an. So integrierte bereits Zeller (1974) in seiner Laufzeitmethode ein Abflussmodell (Rationalformel), welches auf Erkenntnissen aus Regensimulationen basierte.

Die Verwendung von Abflussbeiwerten bewährt sich nach Stepanek et al. (2004) bestens für Wildbach- und Lawineneinzugsgebiete. Daher begann man in den 1970er Jahren am Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft und am Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) in Österreich systematisch Starkregensimulationen durchzuführen. Sie sollten das Abflussverhalten alpiner Vegetations-/Bodenkomplexe soweit charakterisieren, dass Abflussbeiwert, Oberflächenrauigkeit und Initialabstraktion auch für den Praktiker bestimmbar werden. Resultierend aus den gewonnenen Erfahrungen konnte 2004 eine Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes publiziert werden (Markart et al. 2004).

Auf die Geländeanleitung und das darauf aufbauende N/A-Modell ZEMOKOST (Zeller modifiziert von Kohl und Stepanek) wird in den Kapiteln 3.1 und 3.3 eingegangen.

## 1.3 Problemstellung

### Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugsgebieten

Noch ist es nicht möglich, die in den Hängen und im Gerinne fließenden Wasserströme auf allgemein gültige Weise zu beschreiben und quantitativ zu bestimmen.

Die große Komplexität der vorhandenen Einflussfaktoren (Niederschlagsgeschehen, Geologie, Hydrogeologie, Relief, Bodenverhältnisse, Vegetation, Form des Einzugsgebietes u.a.) und zeitlich sowie räumlich wechselnder Prozesse macht jedes Wildbacheinzugsgebiet zu einem Individuum. Bei der Hochwasserabschätzung sind die möglichen Abflussspitzen im Gerinne und die Gesamtwasserfracht der einzelnen Hochwasserereignisse von besonderem Interesse. Erstere sind für die Gerinnekapazität maßgebend. Die Gesamtwasserfracht dagegen bestimmt die Hochwassersituation in den jeweiligen Vorflutern (Kienholz et al. 1998).

Sowohl die Abschätzung der Abflussspitze als auch der Gesamtwasserfracht erfordert genaue Kenntnisse über die Abflussvorgänge während eines Hochwasserereignisses im Wildbacheinzugsgebiet. Nach Zeller (1974, 1981) wird der Abfluss von den Einflussgrößen Niederschlag, Speichervermögen von Boden und Vegetation, Wasserwegigkeit an der Oberfläche und im Untergrund, sowie der hydrologischen Vorgeschichte des Einzugsgebietes bestimmt.

## 1.4 Zielsetzung

Primäres Ziel war die Prüfung der Anwendbarkeit der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) – im Folgenden auch immer wieder als „Geländeanleitung“ bezeichnet – in sechs Schweizerischen Wildbacheinzugsgebieten der Alpennordseite. Im Rahmen eines systematischen Vergleiches sollte basierend auf den Erfahrungen aus der Feldarbeit und den Ergebnissen der N/A-Berechnungen eine Aussage zur Tauglichkeit und plausiblen Anwendung des Abschätzverfahrens von Markart et al. (2004) in der Schweiz erfolgen, sowie Pluspunkte und Defizite aufgezeigt werden.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Ist die Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) auf Schweizer Verhältnisse übertragbar?
2. Werden bei Anwendung des N/A-Modells ZEMOKOST (Stepanek et al. 2004) in Schweizerischen Einzugsgebieten in Relation zu

in der Schweiz häufig angewandten Berechnungsansätzen vergleichbare Ergebnisse erzielt?

3. Kann über Abflussbeiwertkarten die Hochwasserdisposition eines Wildbacheinzugsgebietes (WBEG) für den Praktiker ausreichend zum Ausdruck gebracht werden?
4. Welche Ergänzungen in der Geländeanleitung, und im Programm ZEMOKOST sind generell empfehlenswert? Welche Anpassungen an die Verhältnisse auf der Schweizer Alpennordseite sind notwendig?

Mithilfe der gewählten Methoden werden nachstehende Ziele verfolgt:

### Kartenerstellung

- In jedem der sechs Einzugsgebiete werden nach dem Hydrotopkonzept die Flächen unterschiedlicher Abflussdisposition (hydrologische Vegetationseinheiten) ausgeschieden und diesen Einheiten Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerte zugeordnet (Abflussbeiwertkarte, Rauigkeitskarte).
- In der Geländeanleitung nicht enthaltene hydrologische Vegetationsformen werden erfasst und ergänzend beschrieben, um die Anleitung sukzessive auch für weitere Bereiche des Schweizer Alpenraumes zu adaptieren. Das Abflussverhalten von solchen „neuen“ Einheiten soll im Rahmen eines eigenen Projektes über Starkregensimulationen überprüft werden.

### Anwendung der Ergebnisse

- Die generierten Karten geben die jeweilige Hochwasserdisposition eines Wildbacheinzugsgebietes wieder.
- Für jedes Wildbacheinzugsgebiet können mit dem N/A-Modell ZEMOKOST konkrete Hochwasserabschätzungen gemacht werden. Aus den Berechnungen resultieren Spitzenabflusswerte ( $HQ_x$ ) und Ganglinien.

### Verifikation der Feldergebnisse

- Die angeschätzten Abflussbeiwerte werden den gemessenen Abflussbeiwerten aus Beregnungsversuchen (Dobmann 2009) gegenübergestellt.
- Sie werden mit Abflussbeiwerten, erhoben nach der Methode Rickli und Forster (1997), verglichen. Die Ergebnisse von Sury (2006) bieten eine weitere Vergleichsmöglichkeit. Ihre  $HQ_x$ -Abschätzungen basieren ebenfalls auf der Methode nach Rickli und Forster (1997).
- Die Plausibilität der abgeschätzten Spitzenabflüsse ( $HQ_x$ ) mit ZEMOKOST (Kohl und

Stepanek 2005) wird im Vergleich mit Ergebnissen nach Sury (2006) und Schaffner (2007) diskutiert.

### Entwicklung eines standardisierten Vorgehens

- Ein weiteres Ziel stellt die Ermittlung und Ausarbeitung eines standardisierten Vorgehens für die Durchführung einer Hochwasserabschätzung mit der Geländeanleitung und dem N/A-Modell ZEMOKOST dar. Damit soll ein Leitfaden vorliegen, welcher den Arbeitsablauf für weitere Anwendungen bereits im Vorfeld klar stellt und auf diese Weise die Umsetzung in der Praxis erleichtert.

## 1.5 Gliederung der Arbeit

In einem ersten Schritt gibt die Arbeit eine Einführung in die fachlichen Grundlagen (Kapitel 2). Es folgt eine kurze Beschreibung der Bewertungsmethoden nach MARKART et al. (2004), sowie nach Rickli und Forster (1997) und des N/A-Modelles ZEMOKOST (Kapitel 3).

Kapitel 4 enthält Angaben zur Vorgehensweise und Datenerhebung. Ein konkretes Beispiel schildert den genauen Ablauf der verschiedenen Anwendungen und zeigt zugleich erste Resultate auf.

In Kapitel 5 erfolgt eine Charakterisierung der sechs Wildbacheinzugsgebiete. Eine Analyse der Ergebnisse findet sich in Kapitel 6. Kapitel 7 nimmt Bezug auf die Erfahrungen aus den Anwendungen und dem Vorgehen in der Praxis.

Die Synthese in Kapitel 8 zeigt Vorschläge zum gesamten Vorgehen auf. Kapitel 9 schließlich enthält Fazit und Ausblick.

## 2. Fachliche Grundlagen

### 2.1 Das System Wildbach

Gemäß DIN 19663 (1985) ist ein Wildbach als „oberirdisches Gewässer mit zumindest streckenweise großem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung“ definiert. „Art und Umfang der Feststoffherde sind zusammen mit der Abflusscharakteristik entscheidend für ihre wildbachkundliche Beurteilung.“

Hinter dieser knappen Definition verbirgt sich die Tatsache, dass der Charakter von Wildbächen durch eine ausserordentliche Heterogenität kleinräumig verteilter Einzelfaktoren bestimmt wird. Im Wechsel von Zeit und Raum spielen sich hier zahlreiche unterschiedliche Einzelprozesse ab (Kienholz et al. 1998).

In großen Teilen der Schweizerischen Landschaft stellen Wildbäche einen prägenden Bestandteil dar. Gerade im Alpenraum, aber oft auch im Mittelland, bilden ihre Schwemmkegel einen bevorzugten Siedlungsstandort. Würden die Talebenen von den früher unverbauten Flüssen meist jährlich überflutet, waren die Schwemmkegel an den Wildbächen wegen ihrer seltenen Hochwasserführung vergleichsweise sicher. Kommt es jedoch zu einem Hochwasser, dann mit umso heftigeren Auswirkungen.

Zumeist sind es konvektive Starkniederschläge, die den Abfluss in einem Wildbach besonders rasch zu Höchstwerten anschwellen lassen. Wie in der zitierten DIN 19663 (1985) angedeutet, sind nicht nur diese Niederschläge bestimmend für den Hochwassercharakter. Eine wesentliche Rolle spielen auch die Feststoffe, welche das abfließende Wasser in großen Mengen mitzutransportieren vermag (Hegg et al. 2001).

Der Vergleich verschiedener Einzugsgebiete zeigt deutliche Gemeinsamkeiten im Erscheinungsbild und im Prozessablauf. Dadurch wird eine Unterteilung in funktional und räumlich ähnliche Komponenten zulässig. Im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt erwähnen Kienholz et al. (1998) als wichtigste funktionale Komponenten:

- Niederschlagsinput
- Wasserhaushalt der Vegetation
- Bodenwasserhaushalt
- Oberirdischer Abfluss im Hang
- Oberirdischer Abfluss im Gerinne
- Feststoffablagerung
- Feststoffeintrag in den Vorfluter

In der vorliegenden Arbeit steht der Reinwasserabfluss im Vordergrund. Die Betrachtungen richten sich auf die Elemente Vegetation, Boden, Geologie, Relief und Hangneigung, sowie Abflussbildungsprozesse im Hang und Gerinne.

## 2.2 Vegetation

Die Vegetation kann über ihre große Oberfläche durch Interzeption einen Teil des Niederschlages im Kronendach zurückhalten. Diese Menge liegt bei

alpinen Wäldern, je nach Baumart und Dichte, bei 4-6 mm (Weiskopf 2002, Markart 2000).

Zudem verbessert die Vegetation durch ihre Wurzelaktivitäten die Infiltrationsraten. Vor allem verdunstet sie einen wesentlichen Anteil der Niederschläge, die in den Boden infiltrieren (Transpiration). Dabei ist die Transpirationsleistung für alpine Baumvegetation doppelt bis viermal höher als jene eines kurzwüchsigen alpinen Rasens (Markart et al. 2007).

### 2.2.1 Hydrologische Vegetationsformen und ihre Abflusseigenschaften

Für den mitteleuropäischen Raum liegt eine Vielzahl an Resultaten aus Untersuchungen zum Vegetationseinfluss auf das Abflussverhalten vor. Hermann (1977) empfahl bei der Übertragung dieser Ergebnisse auf andere Standorte mit der nötigen Vorsicht vorzugehen. Standortseigenschaften wie Boden, Klima und Relief sollten stets gründlich geprüft werden. Mit zunehmender Vegetationsdichte steigen die Interzeption und Verdunstung an. Somit wird die Abflussschwächung größer als bei schütterer Bodenbedeckung gleicher Art. Nach Schwarz (1974) vermag Waldvegetation Hochwasserabfluss am stärksten auszugleichen. Mit Abstand folgen Ackerflächen, Wiesen und zuletzt Dauerweiden.

In den letzten Jahren wird allerdings gerade diese Schutzwirkung der Waldvegetation vor Naturgefahren zunehmend hinterfragt. In Abhängigkeit von den Vorbedingungen, z.B. dem Grad der Vorverfüllung der Böden, kann Waldvegetation bei gleichen Niederschlagsverhältnissen eine Schutzwirkung haben oder nicht (Hegg 2006). Cosandey et al. (2005) kommen bei vergleichenden Analysen des Abflussverhaltens von Wäldern in Südfrankreich zum Ergebnis, dass sich Wald und Grasland in ihrer Wirkung auf die Abflussbildung nicht unterscheiden.

Markart et al. (1995, 2000) belegen, dass im Alpenraum großräumig vorkommende gehölzfreie Vegetationseinheiten, wie zum Beispiel Bürstling-Rasen oder auch einzelne Formen von Schwingel-Rasen, die Aufnahmefähigkeit des Mineralbodens stark herabsetzen (Strohdacheffekt). Aus diesen Einheiten sind durchwegs hohe Oberflächenabflussspenden zu erwarten. Zusätzlich Abfluss fördernde anthropogene Eingriffe, z.B. Planien, oder Intensivnutzungsformen wie Weide auf planierten Flächen verschärfen die Abflussdisposition (Markart et al. 2004).

Waldgesellschaften und alpine Zwergsträucher weisen nach Resultaten diverser Starkregensimula-

tionen überwiegend geringe Abflussbereitschaft (Bunza und Schauer 1989, Bunza et al. 1996, Markart et al. 2004) und eine meist raue Oberfläche auf. Über die große Oberfläche und den stockwerkartigen Aufbau wird die Abflussbildung massiv gebremst und damit ein essentieller Beitrag zur Verbesserung der Infiltration und der Verzögerung der Hochwasserspitzen bei konvektiven Starkregen geleistet (Markart et al. 2007).

### 2.2.2 Indikatorwirkungen von Pflanzen (Feuchtezahl)

Die Standortsansprüche einer Pflanzenart können über Zeigerwerte, z.B. nach dem System von Ellenberg (1996), erfasst werden.

Das System gibt einen Überblick der Zeigerwerte einer Vielzahl mitteleuropäischer Pflanzen, in Bezug auf klimatische Faktoren wie Licht, Temperatur und Kontinentalität aber auch verschiedene Bodenfaktoren. Letztere geben Auskunft über Bodenfeuchtigkeit, Bodenreaktion, Stickstoffversorgung, Salzgehalt oder Schwermetallresistenz. Jeder Faktor wird dabei über eine Zahl in einer 9-stufigen Skala für die jeweilige Pflanze genau definiert. Daraus resultiert für jede Art ein 7-stelliger Code, welcher schließlich die Gesamtheit aller Standortsfaktoren charakterisiert. Er vermittelt somit einen Eindruck über die lokal vorherrschenden Bedingungen (Ellenberg 1996).

Im Hinblick auf eine Beurteilung des Abflussbeiwertes mit der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) erweist sich eine Einschätzung der Feuchtigkeitsverhältnisse über die Feuchtezahl einer Pflanze oder Pflanzengesellschaft, als besonders hilfreich. Die Feuchtezahl kennzeichnet die mittlere Feuchtigkeit des Bodens während der Vegetationszeit und entspricht jeweils der ersten Zahl der beiden Kennziffergruppen (z.B. *Pulsatilla montana*, Alpenanemone: 142-435).

### 2.2.3 Vegetationsgesellschaften des Alpenraumes

Einen ersten Überblick über die wichtigsten Vegetationslandschaften Mitteleuropas geben zahlreiche Darstellungen und Erläuterungen in Ellenberg (1996). Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Ausgangsgestein, Bodentyp, räumlicher Zonierung, Sonneneinstrahlung, Klimacharakteristik und Höhenstufung, können für ein ausgewähltes Ein-

zugsgebiet bestimmte Pflanzenarten als Indikatoren ausgeschlossen werden.

Mit einer Höhenausdehnung von 605 bis 2922 m SH erstrecken sich die untersuchten Testeinzugsgebiete von der kollinen Eichen-Buchen-Stufe über die montane Stufe der Buchen-Tannenwälder bis hin zur Fichten-Stufe des subalpinen Bereichs. In hochgelegenen Einzugsgebieten folgt darauf die alpine Stufe mit ausgedehnten Rasendecken. Die Abgrenzung der verschiedenen Stufen fällt, aufgrund der meist unscharfen Übergänge und Verzahnungen, nicht immer leicht. Einzig zwischen subalpiner und alpiner Stufe ist die Linie durch die sichtbare Waldgrenze deutlicher zu erkennen. Unter Berücksichtigung der nördlichen Lage der Einzugsgebiete lässt sich die Baumgrenze zwischen 1.800 und 2.100 m SH festlegen.

Die Zuordnung von einzelnen Höhenstufen zu den Einzugsgebieten gibt bereits konkrete Hinweise auf Pflanzengesellschaften, welche bei einer anschließenden Geländebegehung zu erwarten sind. Eine Übersicht für die Schweiz findet sich in Tabelle 2-1 (Burga et al. 2004).

Insgesamt geben diese groben Einteilungen erste Anhaltspunkte, die Rückschlüsse auf erstaunlich konkrete Artenzusammensetzungen zulassen. Die Arbeit „Lebensräume der Schweiz“ von Delarze et al. (1999) folgt dem Konzept einer Bestimmungshilfe; die Vegetation der Schweiz wird in 9 Lebensraumbereiche und 39 Kategorien gegliedert. Das Klassifizierungswerk ist mit europäischen Systemen (z.B. CORINE, Habitat-Klassifizierungssystem der EU - Commission of the European Communities (1991) kompatibel. Die Autoren vermitteln dem Praktiker Anhaltspunkte darüber, welche Vegetationseinheiten höchstwahrscheinlich in einem Einzugsgebiet anzutreffen sein werden, und wie er sie am einfachsten erkennen kann. Sie stützen sich dabei auf deren Verbreitungseigenschaften und Auftretenswahrscheinlichkeiten.

Eine Reihe weiterer Publikationen geben fundierte Informationen über Standortsansprüche und potentielle Verbreitungsräume von Pflanzen:

- „Der große BLV Pflanzenführer“ (Schauer und Caspari 2001)
- „Flora Helvetica“ (Lauber und Wagner 2007) - spezifisch für die Schweiz
- „Flora alpina“ (Aeschimann et al. 2004)

**Tabelle 2-1:** Übersicht zu den Höhenstufen der Alpen mit Hinweis auf die entsprechenden Vegetationsgesellschaften und deren hydrologischem Zeigerwert (nach Burga et al. 2004 - verändert).

Höhenstufe [m SH]	Wichtige Gesellschaften	Hydrologische Bandbreite - Zeigerwerte
Kollin (600–800)	Steilhangbuchenwälder Ahorn-Eschenwälder Lindenmischwälder	Feucht Feucht Trocken - frisch
Montan (800–1600)	Buchenwälder (oft farn- und hochstaudenreich) Buchen-Tannenwälder Mischbestände Tanne und Fichte	Frisch, gute Infiltration Trocken - feucht Trocken - feucht
Subalpin (1600–2400)	Fichten-Nadelwälder (Waldföhre in kontinentalen Tälern) Arven und Lärchen (Zentralalpen)  Zwergsträucher und Hochstaudenfluren: • Alpen-Erlen-Gebüsche (Lawinhänge) • Legföhrengbüsche (Lawinbahnen, Kalkschutthalden) • Weiden-Gebüsche (in Bachnähe) • Hochstaudenfluren (Kalk, nährstoffreich) • Lägerfluren (überdüngt, Viehlägern) • Zwergstrauchheide  Zwergwacholderbestände Wiesen, Weiden: • Berg-Fettwiesen (Goldhaferwiese, gedüngt, Mahd) • Borstgrasrasen (Mahd, hpts. saure Böden) • Kamm- und Rostseggenrasen (Mahd, basische Böden)	Trocken - feucht Trocken  Bodennass Trocken Feucht - nass Feucht Feucht (verdichtet) Frisch - feucht Trocken - feucht  Trocken  Feucht, locker, gute Infiltration Wurzelfilz (Strohdacheffekt) Feucht, Trittschäden hemmen Infiltration
Alpin (2400–3000)	Rasengesellschaften: • Krummseggen-, Borstgrasrasen (saure Böden) • Blaugras-, Horstseggen-Rasen (kalkreiche Böden)  Schneetälchengesellschaften (> 9 Monate Schneebedeckung): • Krautweide, Zwergsoldanelle (Silikatböden)	Trocken - frisch, Wurzelfilz Trocken - frisch, gute Infiltration  Feucht-nass

## 2.3 Böden

### 2.3.1 Abfluss im Boden

Aus hydrologischer Sicht wird das Abflussgeschehen nicht nur durch die Gründigkeit der Böden, sondern auch durch die Bodenoberfläche und den Oberboden bestimmt (Naef et al. 1998). Dabei spielen die Infiltration und die Leitfähigkeit der oberen Bodenhorizonte eine wichtige Rolle. Je weniger Wasser in einen Boden infiltrieren kann, desto größer ist der Anteil des Oberflächenabflusses und desto rascher reagieren die Abflüsse in den Fließgerinnen auf den Niederschlag. Anschließend an die Infiltration folgt das Wasser im gesättigten Boden der Schwerkraft und der Porosität (Perkolationwasser). Dabei wird die Durchlässigkeit eines Bodens als normal bezeichnet, wenn er  $k_f$ -Werte zwischen  $10^{-2}$  und  $10^{-4}$   $\text{cm s}^{-1}$  erreicht (DIN 18130, 1998). Hohe Tagesniederschläge (100 mm  $\text{d}^{-1}$ ) können in einem solchen Bodenprofil in 3-4 Stunden perkolieren, ein solcher Standort trägt

somit bei konvektiven Starkregen i.d.R. nicht zu einem Hochwasser bei.

Die zum Teil über viele Tage anhaltenden Sickerprozesse im Boden stehen in enger Verbindung mit der vorhandenen Körnung und Durchlässigkeit. Bei zunehmendem Tongehalt des Bodens ist mit verlangsamten Sickerungsgeschwindigkeiten zu rechnen. Liegt zudem eine undurchlässige Schicht vor, führt dies zum Stau des Sickerwassers und der Boden vernässt. Dies wiederum hat erhöhte Abflüsse an der Oberfläche zur Folge.

Für die Bodenentwicklung ist die Bedeutung einzelner, teilweise begrenzend wirkender Geländeelemente wie Oberflächengewässer, Vegetation und Nutzungsart, von besonderer Bedeutung. Die Art und der Verlauf von Gewässern lassen Rückschlüsse auf den Boden zu. So weisen viele fein verästelte, nur schwach eingetiefte Rinnen meist auf undurchlässige Böden wie Gley, Pseudogley oder Moore hin. Bei undurchlässigem Gesteinsuntergrund dominiert hangparalleler Abfluss, das Sicker-

**Tabelle 2-2:** Gruppierung der Bodentypen in Bodenklassen im Hinblick auf deren Einfluss auf Hochwasser-Abflussvorgänge (nach Kölla 1986, S. 75, verändert).

Landschaftscharakteristik	Alpine kristalline Berglandschaften	Alpine Kalk-Berglandschaften	Flysch-/Bündnerschieferlandschaften		Voralpine Nagelfluhlandschaft	Molasselandschaften des Mittellandes	Jura-Kalklandschaften
Bodenkarte (CH)	V, W	U	S, T		M, N, O, P, X, (G)	G, H, K, L	A, B, C, D, E
$k_f$ Wert schlechtesten Horizont	$10^{-4} \text{ m s}^{-1}$	$10^{-5}$ bis $10^{-6} \text{ m s}^{-1}$	$10^{-7} \text{ m s}^{-1}$		$10^{-6} \text{ m s}^{-1}$	$10^{-6} \text{ m s}^{-1}$	Uneinheitlich
Gründigkeit	flach	flach	flach		mittel	tief	flach - tief
Skelettanteil	50 %	bis 50 %	bis 50 %		bis 20 %	bis 20 %	0-50 %
Vernässung	— (nur Mulden)	— (nur Mulden)	grundnass		grundfeucht	Ebenen grundnass	—
Bodentypen	Ranker, Podsol	Regosol, Rendzina, Ranker	Regosol, Gley		Regosol, Braunerden	Braun-, Parabraunerden, Gley	Rendzinen, Braunerden
Untergrund	Granit, Gneis	Kalk	Flysch	Büsch	Konglomerate	eher Lockermaterial	Kalk
Spezifischer 20-jährlicher Abfluss	tief mittel hoch	tief mittel hoch	eher hoch	tief	hoch	tief	tief
Spezifischer 20-jährlicher Abfluss: Hoch: $q_{20} > 2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^2$ ; Mittel: $1,0 < q_{20} < 2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^2$ ; Tief: $q_{20} < 1,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^2$							

wasser sättigt die oberen Bodenhorizonte. Es kommt zu Hangwasseraustritten und Hangvernässungen, dadurch können in der Folge Anrisse, Rutschungen und örtliche Vermoorungen verursacht werden (Frei und Peyer 1991).

Eine Einteilung der Böden der Schweiz nach hydrologischen Gesichtspunkten gibt Tabelle 2-2. Daraus lassen sich für Landschaftsteile der Schweiz grob vereinfachte Abflusseigenschaften ableiten:

1. Alpine kristalline Berglandschaften: vorwiegend flachgründige Böden, je nach Beschaffenheit kann Horton'scher Oberflächenabfluss auftreten (vgl. Kapitel 2.6.1).
2. Alpine Kalk-Berglandschaften: Gleiche Abflusseffekte wie unter Punkt 1, jedoch grundsätzlich anderes Gesteinsmaterial.
3. Alpine Flysch-/Bündnerschiefer Berglandschaften: Flachgründige Böden über schichtig aufgebauter Unterlage (zum Teil sehr kompakt und undurchlässig), vorwiegend gesättigter Oberflächenabfluss.
4. Voralpine Nagelfluhlandschaft: Mittelgründige Böden auf dichtem, konglomeratischem Untergrund, angewittertes Moränenmaterial in der Grenzschicht zwischen Festgestein und entwickeltem Boden kann sich durch Auswaschungsvorgänge zu einem hochdurchlässigen

Medium entwickeln, folglich kann großflächiger rascher Abfluss (SSF) im Boden entstehen.

5. Molassenhügelland des Mittellandes: Tiefgründige Böden auf lockerem Molassematerial, gegenüber der Nagelfluh fehlt hier das als Stauschicht wirkende Grundmaterial. Grundwasserabflüsse oder eine Übergangsform von Matrixfluss und Schnellabfluss in einer hochporösen Schicht spielen für die Hochwasserbildung eine wichtige Rolle.
6. Jura-Landschaften: Karsterscheinungen vermindern den „hochwasseraktiven“ Flächenanteil, flachgründige (Faltenjura) wie auch tiefgründige (Tafeljura) Böden sind ungefähr gleich verbreitet, wodurch vermutlich ausser dem schnellen Zwischenabfluss alle Möglichkeiten der Abflussbildung bestehen.

## 2.4 Geologie

Die Hauptabflussvorgänge bei konvektiven Starkniederschlägen spielen sich zwar im entwickelten Boden ab. Dennoch nimmt auch der geologische Untergrund Einfluss auf die hochwasserrelevante Abflussbildung, die Wasseraufnahmefähigkeit und die Reaktion eines Einzugsgebietes.

### 2.4.1 Durchlässigkeit und Chemismus des Gesteins

Im Vordergrund steht die Durchlässigkeit (Permeabilität) des Gesteins. Diese kann von stark durchlässigem Kies bis zu sehr gering permeablem Schiefererton reichen. Sie ist von der Porosität abhängig.

Die Permeabilität wird aber auch von der Porengröße, den Verbindungen untereinander und der Krümmung des Wasserweges beeinflusst (Press und Siever 2003).

Die Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes steuert auch maßgeblich die Bodenentwicklung. Dies wiederum hat indirekte Aus-

wirkungen auf die effektive Abflussbildung. Über extrem durchlässigem Schotter können eher trockene Böden entstehen, über Moränen eher feuchtere Böden. Gering durchlässiger Flysch fördert tendenziell die Bildung hydromorpher Stauwasserböden.

Auch zeigt die Bodenbildung eine Abhängigkeit vom Chemismus des Muttergesteins. Alumosilikate fördern die Tonbildung. Quarzreiche Böden neigen zur Podsolierung. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Verwitterbarkeit des Gesteins und Bodenständigkeit, z.B. sind flachgründige und skelettreiche Böden ausschließlich auf schwer verwitterbarem Gestein anzutreffen (Frei und Peyer 1991).

**Tabelle 2-3:** Charakterisierung der geologischen Einheiten, die in Bezug auf die sechs Untersuchungsgebiete von Bedeutung sind (Quellen: Pfiffner (2006), Labhart (2005), EJPD (1980) und Geotechnische Karte (GET) (BFS 2001)).

<b>Geologische Einheit</b>	<b>Merkmale</b>
<b>Bündnerschiefer</b>	Kalkig-tonige Sedimentablagerungen von mehreren tausend Metern Mächtigkeit. Späte alpine Metamorphose führte zu den heutigen Kalk-, Ton-, Glimmer- oder Kalkglimmerschiefern. Besondere Beachtung in Bezug auf Abflussprozesse sollte auf Neigungsrichtung und -grad gelegt werden, weil das Niederschlagswasser in diesen Schiefergesteinen schichtparallel abfließt. Damit erklärt sich einerseits die schlechte Durchlässigkeit auf Böden über schichtparalleler Gesteinsanordnung, andererseits aber auch die im Gelände meist deutlich sichtbaren Fließspuren unterhalb von Felsflächen.
<b>Flysch</b>	Darunter werden mächtige, gebankte Sedimentschichten verstanden, welche sich während der Entstehung eines Gebirges in tiefen Meeresbecken infolge von Turbiditströmen ablagern. Dabei ergibt sich eine rhythmische Wechsellagerung von marinen Sandsteinen oder Konglomeraten (Breccien) und marinen Tonschiefern. Da diese schieferigen Schichten häufig zu Rutschungen und zum Fließen neigen, erhielten sie im Simmental den prozessumschreibenden Namen ‚Flysch‘ (Flösch). Die Böden über Flysch sind meist flachgründig und grundnass; es entwickeln sich häufig staunasse Gleyböden.
<b>Kalkgestein</b>	Noch vor der Alpenfaltung konnten sich, über fast 200 Millionen Jahre, bis zu 1500 m Meeressedimente unter den seichten Bedingungen eines Flachmeeres ablagern. Ihre Vielfalt in Zusammensetzung und Farbe ist beachtlich. In der Landschaft bilden sie meist markante Felsen, da die übrigen weicheren Sedimentgesteine, wie Mergel und Ton, oft unter Vegetationsdecken verborgen bleiben. Dennoch zeichnen sich auch beim härteren Kalkstein, im Vergleich zu anderen Gesteinen, wie Kristallin, starke Verwitterungsprozesse ab, besonders unter Anwesenheit von Kohlensäure. Dementsprechend verkarstet und zerklüftet können Kalkstöcke in Erscheinung treten. In solchen Gesteinseinheiten verschwindet das Niederschlagswasser rasch, ohne zum oberflächlichen Abflussgeschehen beizutragen. Bei massivem Kalkgestein kann wesentlich weniger Wasser in den Untergrund versickern. Im Gelände weisen periodisch wasserführende Rinnen eindrucklich auf diesen Umstand hin.
<b>Kristallin</b>	Magmatische und metamorphe Gesteine, die bei hohen Temperaturen kristallisieren, werden unter dem Begriff Kristallin zusammengefasst. Gneise und Granite gehören ebenso dem kristallinen Grundgebirge an wie hochmetamorphe Schiefer. Sie sind von sehr geringer Wasserdurchlässigkeit geprägt und weisen eine erhöhte Verwitterungsstabilität auf, je mehr Quarzminerale enthalten sind. Bleiben Rissstrukturen und Spalten aus, so ist auf kristallinem Untergrund im Allgemeinen mit entsprechend hohen Abflüssen zu rechnen.
<b>Molasse</b>	Ein doch beachtlicher Anteil in der geologischen Gliederung der Schweiz macht die Molasse aus. Es sind dies mächtige Abfolgen von Sandsteinen und Konglomeraten, welche während der letzten Phase einer Gebirgsbildung in Vorlandsenken abgelagert werden. Es handelt sich dabei um flachmarine Sedimente, wie gebankte Sandsteine, Tone, Mergel und Versteinerungen (Meeresmolasse). Im Gegensatz zu Flysch umfassen sie aber auch den Abtragungsschutt des entstehenden Gebirges, welcher sich in Form von alluvialen Fächern abzeichnet (Süßwassermolasse). Sie enthalten grobklastischere Sandsteine, Mergel und Tone, welche unter dem Begriff Nagelfluh bekannt sind. Erfahrungsgemäß liefern Sandsteine und Konglomerate kaum hohe Abflüsse. Liegen hingegen verfestigte Sandstein- oder Mergellagen vor, so kommt dies in deutlich stärkeren Reaktionen des Abflusses zum Ausdruck. Kölla (1986) weist zudem darauf hin, dass sich dichter, konglomeratischer Untergrund, in Form von angewittertem Moränenmaterial, durch Auswaschungsvorgänge zu einem undurchlässigen Medium entwickeln kann. Dies führt dann unter Umständen zu großflächigem Schnellabfluss im Boden (Subsurface Stormflow).

Wie bereits Kölla (1986) erkannte, liegt die Schwierigkeit darin, dass man weder auf einer geologischen Karte noch im Gelände mit Bestimmtheit voraussagen kann, ob das unter dem Boden liegende Gestein dicht ist oder nicht. So können beispielsweise „blättereartige“ Formationen wie Bündnerschiefer eine Stauschicht bilden, wenn die Schichtung parallel zur Hangoberfläche verläuft. Sie können jedoch ebenso gut als Verlustzone wirken, wenn die Schichtung zum Hang einfällt.

Zudem kann ohne Lokalausweis kaum entschieden werden, ob eine Formation bei Starkregenintensitäten generell als Stauer wirkt oder nicht. Denn die  $k_f$ -Werte ein und desselben Materials können extrem variieren. Für kompakten Granit wurden beispielsweise  $k_f$ -Werte von  $10^{-10}$  bis  $10^{-12}$   $\text{cm sec}^{-1}$ , für zerklüfteten hingegen um  $10^{-7}$   $\text{cm sec}^{-1}$  gemessen (Louis 1967).

Um die unterschiedlichen Reaktionsweisen auf Starkniederschläge besser zu verstehen, werden im Folgenden jene geologischen Einheiten kurz charakterisiert, die in den Testgebieten eine wichtige Rolle spielen (Tabelle 2-3). Als Grundlage wurden die Arbeiten von Pfiffner (2006), Labhart (2005) und EJPD (1980) sowie die vereinfachte Geotechnische Karte (GET) (BFS 2001) verwendet. Im Gegensatz zur Originalkarte ist sie in digitaler Form vorhanden. Sie enthält zudem eine reduzierte Einteilung auf 30 Klassen mit ähnlicher, geomorphologischer Reaktion. Auf diese Weise sind Stellen potentieller Geschiebelieferung auszumachen und die Abhängigkeit hoher Skelettgehalte von weiter oben liegenden, brüchigen Gesteinszonen wird deutlich. Zur Interpretation der GET sollten unbedingt die Kurzanleitung sowie die Beschreibung der Datenmerkmale hinzugezogen werden (BFS 2001).

#### 2.4.2 Gerinnenetzdichte

Die Gerinnenetzdichte ist Ausdruck der geologischen Verhältnisse und damit zugleich Hinweis auf die Abflussfreudigkeit eines Einzugsgebietes. Genauere Angaben zum Einfluss der Geologie auf das Gerinnenetz folgen in Kapitel 4.2.5.

Die Landeskarte (swisstopo 2005a) zeigt vor allem das ständig Wasser führende Gewässernetz (swisstopo 2005d). Neben diesen blau gekennzeichneten Linien markieren schwarz gepunktete Linien die Runsen. Das Runsenetz kann im Einzugsgebiet eine sehr große Ausdehnung erreichen. Diese ephemeren, periodisch Wasser führenden Trocken-

runsen müssen im Hochwasserfall mitberücksichtigt werden. Ihr Beitrag zum Abfluss bei Starkniederschlägen kann ausserordentlich groß sein und darf deshalb keinesfalls vernachlässigt werden (Spreafico et al. 2003).

Der vorliegenden Arbeit stand, zusätzlich zu den erwähnten Gewässerdaten der Landeskarte (Maßstab 1:25 000), ein von Schaffner (2007) ergänztes Gewässernetz zu Verfügung. Dieses integriert sämtliche Trockenrunsen bis in ihren obersten Ursprungspunkt.

Die aktuelle Verteilung der Gerinne wird erst im Gelände ersichtlich. Häufig sind aufgrund des Feldbefundes die Gewässerlinien für Starkregen zu verlängern (z.B. um temporär wasserführende Trockenrunsen).

## 2.5 Relief und Neigung

Bereits Kölla (1986) kam zur Erkenntnis, dass die Hangneigung bei Spitzenabflüssen eine untergeordnete Rolle spielt. Die Wirkung der Neigung wird häufig von anderen Faktoren überlagert (dichte Vegetation, hohe Durchlässigkeit des Bodens, u.a.). Mit abnehmendem Grad der Bodendeckung gewinnt die Neigung an Bedeutung.

Geringen Einfluss hat die Hangneigung auf die Anlaufzeit des oberflächlichen Abflusses. Diese hängt von der Fließzeit an der Hangoberfläche und der Benetzungszeit des Bodens ab. Die größere Bedeutung kommt dabei der Benetzungszeit zu, welche von der Hangneigung unabhängig ist.

Im Fließgerinne bewirkt ein starkes Gefälle, dass der entstandene Abfluss ohne große Verzögerung zum Pegel gelangt. Daraus resultiert die meist große Ähnlichkeit zwischen Niederschlagsganglinie und Abflussganglinie (Hermann 1977).

## 2.6 Abflussbildung

Teile des Niederschlages werden auf der Landoberfläche durch die Vegetation (Interzeption) oder in Mulden zwischengespeichert. Bei konvektiven Starkregen sind Evaporations- und Transpirationsprozesse nicht von Bedeutung. Ist das Wasser einmal auf die Bodenoberfläche gelangt, werden verschiedene Abflussprozesse initiiert (Johannsen und Markart 2007). Diese lassen sich in Hang- und Gerinneprozesse unterteilen. Für die Abflussbildung

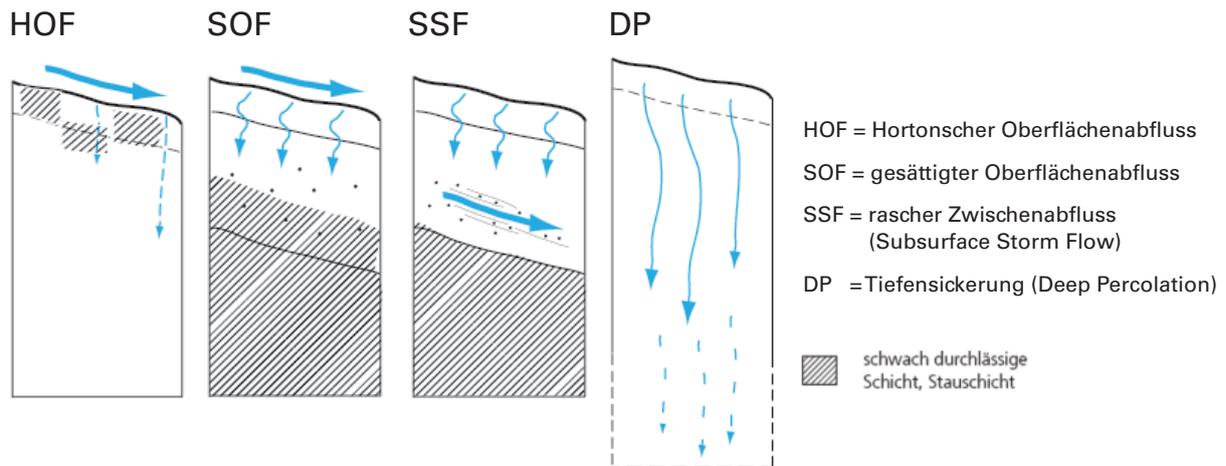


Abbildung 2-1: Abflussprozesse und Reaktionsweisen bei Starkregen nach Spreafico et al. (2003)

in einem Einzugsgebiet entscheidend sind schließlich nur jene Vorgänge, die den Niederschlagsinput effektiv in den Abfluss umsetzen (Hegg et al. 2001).

### 2.6.1 Abflussbildung am Hang

Der Anteil des Oberflächen- und Zwischenabflusses hängt im Wesentlichen vom Rückhaltevermögen der Böden ab. Mögliche Abflussprozesse bei Starkregen sind in Abbildung 2-1 beschrieben.

#### Die Oberflächenabflussprozesse

Besonders schneller Oberflächenabfluss entsteht, wenn der Boden Infiltrationshemmnisse aufweist (z.B. hohe Vorsättigung aufgrund hohen Hangwasserangebotes, verdichteter Oberboden oder benetzungshemmende Effekte bei humusreichen Bodenoberflächen nach Austrocknung). Das Aufnahmevermögen solcher rasch reagierenden Flächen ist i.d.R. gering („Hortonian Overland Flow“ -HOF, Abbildung 2-1).

Gesättigter Oberflächenabfluss („Saturation Overland Flow“, SOF) tritt bei verzögernd reagierenden Flächen, nach weitgehender Sättigung des (Ober)Bodens auf. Solche Prozesse sind besonders auf flachgründigen oder feucht-nassen Böden mit geringem Speichervermögen zu beobachten.

#### Die Fließprozesse im Boden

Beim Abfluss im Boden ist zwischen einer langsamen, primär durch Kapillarkräfte bestimmten Bewegung des Wassers („Matrix Flow“) und einem schnellen, von gravitativen Kräften dominierten Abfluss entlang von Makroporen (z.B. Gänge von

Tieren, Wurzelhohlräume, „Macropore Flow“) zu unterscheiden (Spreafico und Weingartner 2005).

Weist der Boden zusätzlich eine Stauschicht auf, so führt dies oder das Vorhandensein von Makroporen zu raschem lateralem Fließen, vorwiegend in steilen Hanggebieten (SSF vgl. Abbildung 2-1).

Sind sowohl der Boden als auch der geologische Untergrund gut durchlässig, kann über die Tiefensickerung („Deep Percolation“, DP) Wasser infiltrieren. Das Wasser wird gespeichert bzw. dosiert in tiefere Schichten abgegeben und trägt somit (besonders in Gebieten mit wenig geneigten, tiefgründigen Flächen) nicht oder nur mit sehr starker Verzögerung zum Abfluss bei.

Für ein Hochwasser als Folge konvektiver Starkregen maßgebend sind nach Kölla (1986) folgende Arten der Abflussbildung:

- Hortonscher Oberflächenabfluss
- gesättigter Oberflächenabfluss
- Subsurface Flow

Eine weitere Abflusskomponente stellt der rasche Zwischenabfluss („Subsurface Stormflow“, SSF) dar. Dieser Prozess tritt vor allem entlang stark leitfähiger Schichten (z.B. bei grobporenreichem Hangschutt auf Fels oder makroporenreichen Waldböden) auf. SSF ist vor allem bei längeren Starkregenereignissen, z.B. bei Überlagerung von Dauerregen durch mehrstündige Starkregen, wie im August 2005 in Vorarlberg (Markart et al. 2007) von Bedeutung.

### 2.6.2 Abflussbildung im Gerinne

Im Gerinne vereinen sich Flächenabflussprozesse mit zeitlicher Verzögerung zum Gesamtabfluss. Die Fließgeschwindigkeit ist dabei im Wesentlichen von

der Abflussmenge, dem Gefälle und der Rauigkeit des Gerinnes abhängig (Hegg et al. 2001).

### Die Fließgeschwindigkeit im Gerinne

Bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeiten im Gerinne finden i.d.R. Rauigkeitsbeiwerte (z.B. Strickler, Darcy-Weisbach) Verwendung. Diese Beiwerte sind ein Maß für die Charakteristik der Sohlenoberfläche und damit des Rauigkeitswiderstandes von Stoffflüssen. Je mehr Geröll, Grobgeschiebe und Unregelmäßigkeiten in einem Gerinne vorliegen, desto kleiner wird z.B. der Geschwindigkeitsbeiwert nach Strickler. Umso größer werden damit hingegen die Darcy-Weisbach-Reibungsbeiwerte, welche die Schubspannung erfassen.

Nach Rickenmann (1996) zeigt sich hier die Problematik, dass diese für flachere Gerinne entwickelten Rauigkeitsbeiwerte oft auch für die Fließgeschwindigkeitsberechnung in Gebirgsflüssen und Wildbächen angewendet werden. Bei vielen dieser Formeln sind die Abflusstiefe oder der hydraulische Radius eine wichtige Eingangsgröße. Diese Parameter sind aber nicht ohne weiteres bestimmbar, weil Wildbäche eine unregelmäßige Gerinnegeometrie aufweisen. Rickenmann schlägt daher eine empirische Gleichung vor, mit der über die Eingangsgrößen Abfluss, Gerinnegefälle und charakteristischer Korngröße ( $d_{90}$ ) die Fließgeschwindigkeit berechnet wird. Resultate aus Laborexperimenten, Naturmessungen und Vergleichen mit anderen Ansätzen, ließen ihn zu folgendem Schluss kommen:

Die theoretisch für die Geschwindigkeiten von Murenfronten hergeleitete Gleichung beschreibt die Fließgeschwindigkeiten sowohl von Abflüssen in einer steilen Laborrinne mit intensivem Geschiebetransport (Rickenmann 1990) als auch von Reinwasserabflüssen in steilen Naturgerinnen. Dementsprechend ist die vorgeschlagene Formel zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit im Wildbachgerinne eine Umformung der Laborformel für steile Gerinne (siehe Gleichung 2-1).

$$v = \frac{0.49 * g^{0.30} * Q^{0.41} * J^{0.35}}{d_{90}^{0.53}} \quad (\text{Gleichung 2-1})$$

- $v$  = Fließgeschwindigkeit des Abflusses [m s<sup>-1</sup>]
- $g$  = Erdbeschleunigung (9.81 m s<sup>-2</sup>) [m s<sup>-2</sup>]
- $Q$  = Abfluss [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>]
- $J$  = Mittleres Sohlengefälle des Gerinnes [-]
- $d_{90}$  = Korndurchmesser des Sohlenmaterials, der von 90 Gewichts% der Körner unterschritten wird (Zeller 1981), Charakteristische Korngröße (Rickenmann 1996) [m]

Aufgrund der besseren Anpassung an alpine Verhältnisse wird bei den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Formeln der  $d_{90}$  nach Rickenmann (1990) verwendet.

### Die Fließgeschwindigkeit an der Hangoberfläche

Zeller verwendete nicht mehr den Rauigkeitsbeiwert nach Strickler, sondern einen von ihm eingeführten dimensionslosen Wasserabfluss-Koeffizienten ( $c$ ). Auch im N/A-Modell ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005) wird dieser Wasserabflusskoeffizient ( $c$ ) in einer geänderten Einteilung, die sich auf Ergebnisse von Fließgeschwindigkeitsmessungen bei Starkregensimulationen stützt, verwendet.

Zur Berechnung der Oberflächen-Fließgeschwindigkeit setzen Kohl und Stepanek (2005) schließlich den ermittelten Oberflächenrauigkeitsbeiwert ( $c$ ), die Fließlänge an der Oberfläche ( $L_{OB}$ ), die Neigung ( $J$ ) und den Effektivniederschlag (Produkt aus dem Abflussbeiwert  $C$ ) und der Niederschlagsintensität ( $i_T$ ) in die umgeformte Fließformel nach IZZARD (Zeller 1974, 1981) ein (Gleichung 3-1). Daraus resultiert eine Abflussgeschwindigkeit, mit der sich ein durchaus plausibler Spitzenabfluss berechnen lässt (Stepanek et al. 2004).

### 2.6.3 Die Abflussganglinie eines Einzugsgebietes

Die hydrologische Gesamtreaktion eines Wildbacheinzugsgebietes auf den Niederschlag kommt in der spezifischen Abflussganglinie zum Ausdruck. Bei einem Hochwasserereignis weist sie typischerweise einen kurzen, steilen Anstieg unmittelbar nach dem Niederschlagsereignis auf, mit anschließendem allmählichem Abflussrückgang (Zepp 2003).

Das einfachste Gedankenmodell, die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss mittels einer Ganglinie zu beschreiben, ist der Unit Hydrograph. Er geht von einfachsten Voraussetzungen aus: Ein kurzer Effektivniederschlag mit gleichmäßiger Intensität und gleicher Dauer innerhalb des gesamten Einzugsgebiets. Das Gebiet wird durch Isochronen in Linien gleicher Fließzeit aufgeteilt. Daraus resultieren mehrere, unterschiedliche Laufzeitganglinien, welche sich, nach dem Prinzip der Superposition, zur Ganglinie des Gesamtoberflächenabflusses überlagern (Hermann 1977). Da diese jedoch, je nach Form und Wirkung des Einzugsgebietes, nicht mit der gemessenen Ganglinie übereinstimmt, fordert das Modell Anpassungen an

die Naturbeobachtungen. Vielfach behilft man sich hier mit einer Übertragungsfunktion auf der Basis des linearen Speichers. Gerade in alpinen Einzugsgebieten werden vielfach auch Laufzeitverfahren wie jenes nach Zeller (1974, 1981) eingesetzt (Johannsen und Markart 2007).

### 3. Methoden

In diesem Kapitel werden kurz die drei angewandten Bewertungs- und Berechnungsmethoden erläutert:

- Die Geländeanleitung von Markart et al. (2004). Diese Methode ist in der gleichen Schriftenreihe (BFW-Dokumentation, Nr.3) erschienen.
- Die Ermittlung von Abflussbeiwerten nach Rickli und Forster (1997).
- Das N/A-Modell ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005, Stepanek et al 2004).

#### 3.1 Die Geländeanleitung von Markart et al. (2004)

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich ausschließlich auf die Geländeanleitung, wie sie der Arbeit von Anfang an zugrunde lag. Eigene Ergänzungen und Änderungen der Methodik sind im Kapitel 4 integriert.

##### 3.1.1 Ziele und Inhalt der Geländeanleitung

Die „Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/ Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen“ stellt eine Basis für die Erstellung von Abflussbeiwertkarten dar. Diese Abflussbeiwerte werden in der Folge für die Berechnung von Abflussspitze und Abflussfracht bei Bemessungsergebnissen oder Szenarioanalysen in Wildbacheinzugsgebieten verwendet.

Die Anleitung enthält Hinweise für die quantitative und qualitative Abschätzung des

Oberflächenabflussbeiwertes bei Abflusskonstanz, einen Ansatz zur Abschätzung der Oberflächenrauigkeit und der Initialabstraktion (Abbildung 3-2).

Neben Erläuterungen und Anweisungen ist der Dokumentation auch die eigentliche Geländeanleitung beigelegt. Sie umfasst eine Reihe von Tabellen und Beispielen für typische hydrologische Vegetationsformen des Ostalpenraumes. Zusätzliche Hilfe bei der Anwendung der Anleitung bilden eine Vielzahl von Beispielen mit den dazugehörigen Abflussbeiwertklassen und Rauigkeitsklassen. Eine Zusammenstellung wichtiger Pflanzen, welche charakteristisch für die hohe bzw. niedrige Abflussbereitschaft eines Standortes sind, ist ebenfalls enthalten.

##### 3.1.2 Gültigkeitsbereich der Geländeanleitung

Die Anleitung baut auf Resultaten von ca. 700 Starkregensimulationen mit Großregenanlagen (Versuchsflächengrößen zwischen 50 und 100 m<sup>2</sup>) und Intensitäten zwischen 75 und 100 mm h<sup>-1</sup> im Ostalpenraum auf. Die Anleitung kann ohne Anpassungen der Abflussbeiwertklassen für Niederschlagsereignisse von 30 bis 120 mm h<sup>-1</sup> angewendet werden. Sie geht von einem vom Anwender für das jeweilige Arbeitsgebiet zu definierenden realistischen „Bad-Case“-Ereignis aus.

##### 3.1.3 Aufbau der Geländeanleitung

Den zentralen Baustein der Geländeanleitung bilden die hydrologischen Vegetationseinheiten. Pflanzengesellschaften wurden nach der Systematik des Kartenwerks von Hartl et al. (2001) abgegrenzt und auf die typischen Vorkommen im Ostalpenraum zugeschnitten (Tabelle 3-1). Sie dienen in

<b>Tabelle 3-1:</b> Hydrologische Vegetationseinheiten (nach Markart et al. 2004, S. 12)	
<p><b>Pioniervegetation - Rohböden</b></p> <p><b>Rasenvegetation:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rasen (nicht Bürstling)</li> <li>• Bürstling-Rasen</li> <li>• Mähwiese</li> <li>• Feuchtwiesen und Niedermoore</li> </ul> <p><b>Zwergstrauchheiden:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alpenrosen- und Heidelbeerheide</li> <li>• Besenheide/Erika</li> </ul> <p><b>Buschgesellschaften:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grünerlen und Weidengebüsch</li> <li>• Grauerlen und Weidengebüsch</li> <li>• Latschenkrummholz (Bergkiefer/Legföhre)</li> </ul> <p><b>Hochstaudenfluren</b></p>	<p><b>Wälder:</b></p> <p><b>Nadelwälder</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fichtenwald mit mehr als 50% Fichte (keine bzw. wenig Bodenvegetation – Piceetum nudum)</li> <li>• Fichtenwald mit mehr als 50% Fichte (mit Krautschicht)</li> <li>• Lärchenwiesen (Überschirmung &lt; 0.3)</li> <li>• Lärchenreiche Wälder (&gt; 50% Lärche)</li> <li>• Zirbenreiche Wälder (Zirbelkiefer/Arve)</li> <li>• Kiefernwald</li> </ul> <p><b>Laubwälder und Laub-/Nadelmischwälder</b></p> <p><b>Planien</b> (durch technische Eingriffe veränderte Flächen, wie Wegböschungen, Schipisten etc.)</p>

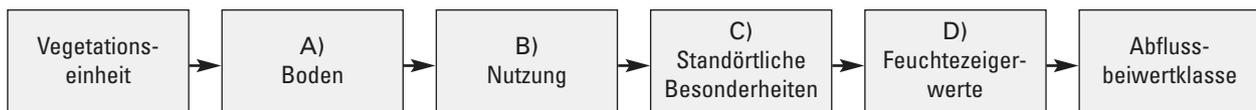


Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf einer Abflussbeiwertsschätzung.

erster Linie der Zusammenfassung von hydrologisch ähnlich reagierenden Flächen.

In Abhängigkeit von den Indikatoren Boden, Nutzung, standörtliche Besonderheiten und ökologische Feuchtestufe, wird diesen Vegetationseinheiten schließlich die entsprechende Abflussbeiwertklasse zugeordnet (Abbildung 3-1).

### Der Abflussbeiwert

Markart et al. (2004) entwarfen ein System mit 7 Abflussbeiwertklassen (AKI). Standorte mit hoher Abflussbereitschaft sind schwieriger zu differenzieren, daher ist die Klassenbereite bei höherer Abflussbereitschaft größer, siehe Tabelle 3-2.

Die **Initialabstraktion** (Abbildung 3-2) umfasst genau das Regenvolumen der Abstraktionszeit und damit all jene Wasserverluste, welche bei der Abschätzung extremer Hochwasser mit zu berücksichtigen sind. Sie setzt sich zusammen aus Interzeption, Evaporation, Transpiration, Infiltration und dem Wasserrückhalt in Bodenunebenheiten, z.B. Muldenspeicher.

Stepanek et al. (2004) bedienen sich abweichend von Zeller (1974, 1981) des Sättigungsabflussbeiwertes ( $\Psi_{\text{const}}$ , Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz). Das ist jener Prozentsatz des Niederschlages, der zum Zeitpunkt einer konstanten Infiltration an der Oberfläche abfließt (Abbildung 3-2). Er ist damit, im Gegensatz zum Abflusskoeffizienten (C) nach Zeller (1974, 1981), von den Vorbedingungen weitgehend unabhängig. Sämtliche Angaben in der Geländeanleitung beziehen sich auf diesen Abflussbeiwert  $\Psi_{\text{const}}$ .

Abflussbeiwert- klasse (AKI)	Oberflächenabfluss in % des Niederschlages
<b>0</b>	0
<b>1</b>	> 0 - 10
<b>2</b>	11 - 30
<b>3</b>	31 - 50
<b>4</b>	51 - 75
<b>5</b>	> 75
<b>6</b>	100 Streunutzung (vernässte, versiegelte)

Zuordnungsbeispiele finden sich in Tabelle 3-3.

Die Abstraktionszeit verkürzt sich mit zunehmendem Abflussbeiwert und damit gleichzeitig höherer Abflussbeiwertklasse zusehends (Abbildung 3-3, Tabelle 3-4).

Die Funktion der in Abbildung 3-3 dargestellten Kurve ermöglicht die Berechnung des mittleren Wertes der Initialabstraktion einer bestimmten Abflussbeiwertklasse (Tabelle 3-4).

Für die Abflussbeiwertklasse 0 lässt sich keine Abstraktionszeit ermitteln. In diesem Fall kann das System den gesamten Niederschlag aufnehmen (Abstraktionszeit = Niederschlagsdauer). Selbst stark abflussliefernde Flächen (AKI 6 und AKI 5) zeigen immer noch Verzögerungen von 5 bis 7 Minuten.

AKI	Beispiel
<b>AKI 0</b>	Kein Oberflächenabfluss (z.B. grobblockige Schutthalden)
<b>AKI 1</b>	geringe Abflussbereitschaft (Zwergstrauchheiden (Alpenrose, Heidelbeere), Hochwaldbestände mit dichtem Zwergstrauchunterwuchs auf lockerem Untergrund, ohne Vorbefeuchtung). Da sich das Verhalten solcher Standorte meist gut einschätzen lässt, wurde diese Klasse enger gefasst (0-10% des Niederschlages). Die Eingrenzung wird jedoch mit zunehmender Abflussbereitschaft undeutlicher, weshalb die folgenden Klassen ein breiteres Spektrum aufweisen.
<b>AKI 2</b>	Mähwiesen (nicht bestoßen, gepflegt)
<b>AKI 3</b>	Wiesen mit geringer Zusatzbelastung (Befahren, Beweidung)
<b>AKI 4 - 5</b>	Flächen mit intensiver Nutzung, auf bindigen Böden (Planien, Schipisten, Weiderasen, beweidete Mähwiesen, Weidewälder)
<b>AKI 6</b>	(Fast) gesamter Niederschlag fließt oberflächlich ab (stehende Gewässer, vorverfüllte Flächen (Niedermoore, Quellanmoore), versiegelte, dichte Standorte)

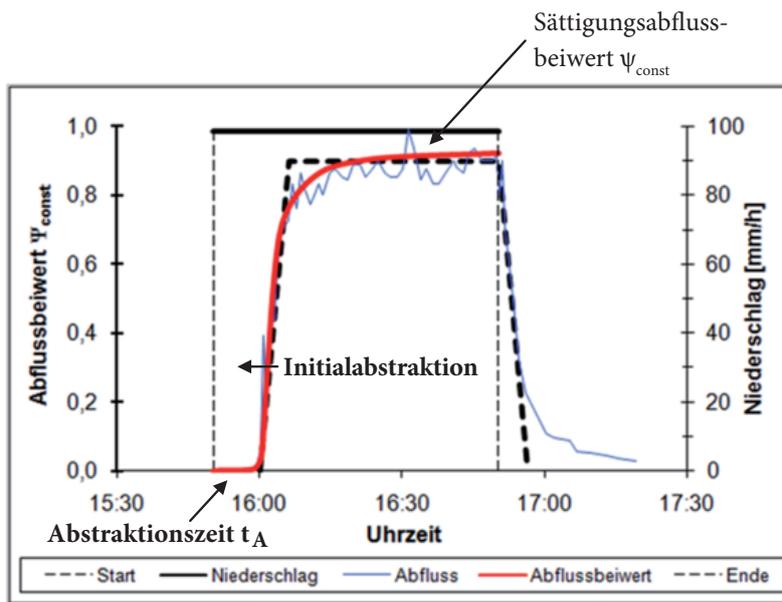


Abbildung 3-2: Initialabstraktion, Abstraktionszeit ( $t_A$ ) und Sättigungsabflussbeiwert  $\Psi$  einer Starkregensimulation; annähernd trapezförmige  $\Psi$  Abflussganglinie (Stepanek et al. 2004).

**Tabelle 3-4:** Mittlerer Wert der Initialabstraktion nach Abbildung 3-3 für die jeweilige Abflussbeiwertklasse (Markart et al. 2004, S. 26).

Initialabstraktion (in min)	Abflussbeiwertklasse (AKI)
$\infty$	<b>0</b>
28	<b>1</b>
20	<b>2</b>
15	<b>3</b>
11	<b>4</b>
7	<b>5</b>
5	<b>6</b>

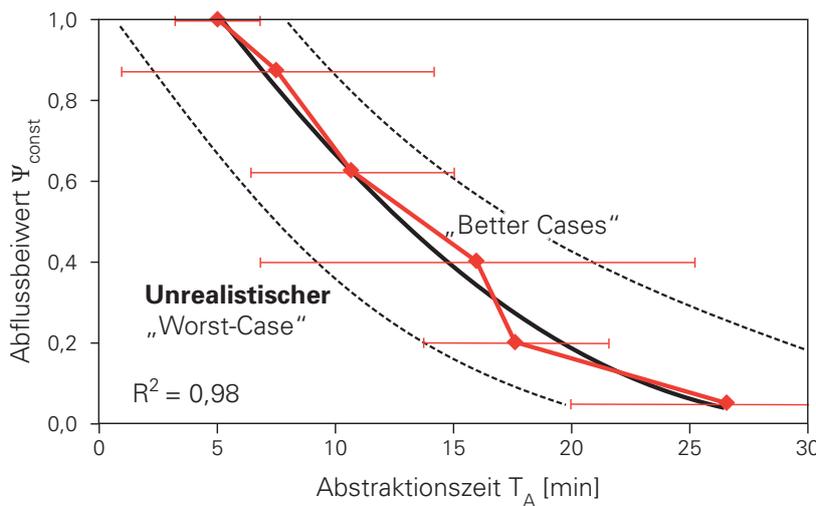


Abbildung 3-3: Zusammenhang zwischen Abstraktionszeit und Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ( $\Psi_{const}$ ) mit einem Vertrauensbereich von +/- 95% (Stepanek et al. 2004).

### Die Abschätzung der Oberflächenrauigkeit

In der Strickler-Gleichung für das Gerinne wird der so genannte  $k$ -Wert (Rauigkeitsbeiwert) eingefügt, welcher mit zunehmender Gerinnerauigkeit abnimmt. Zeller (1974, 1981) dagegen behilft sich mit einem dimensionslosen Wasserabfluss-Koeffizienten  $c$ .

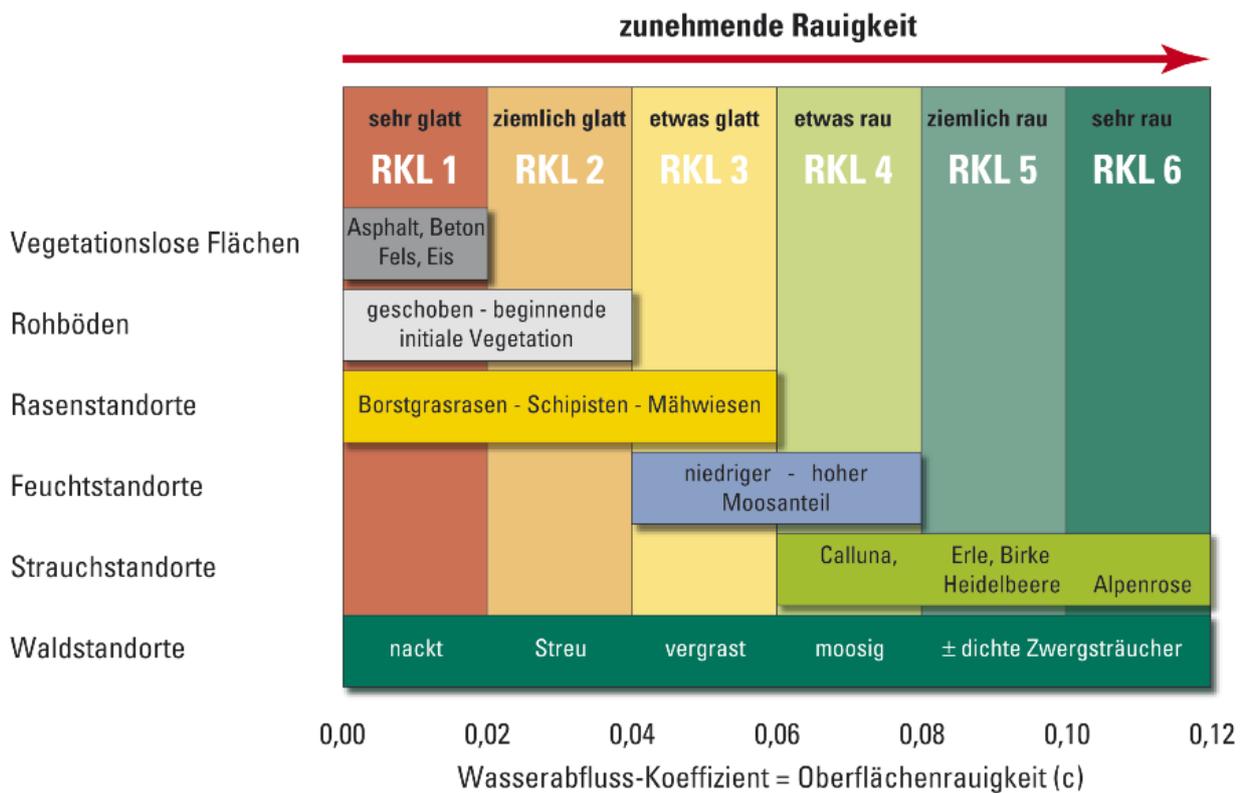
Unter Verwendung dieses ermittelten Parameters in der umgeformten IZZARD-Gleichung aus Zeller (1974, 1981) können plausible Oberflächenabflussgeschwindigkeiten errechnet werden.

Nach dem in Abbildung 3-4 angeführten Schema kann der Rauigkeitsbeiwert  $c$  für verschiedene hydrologische Vegetationsformen bzw. Landnutzungseinheiten geschätzt werden.

Im Anhang der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) findet sich eine Reihe von konkreten Bewertungsbeispielen.

$$v = \frac{L_{OB}}{t_{OB}} = \frac{L_{OB}^{\frac{2}{3}} * J^{\frac{1}{3}} * (C * i_T)^{\frac{2}{3}}}{527 * c} \quad \text{(Gleichung 3-1)}$$

- $v$  = Fließgeschwindigkeit des Abflusses [m s<sup>-1</sup>]
- $L_{OB}$  = Fließlänge an der Oberfläche [m]
- $t_{OB}$  = Fließzeit an der Oberfläche (Anlaufzeit) [s]
- $J$  = Neigung [-]
- $C$  =  $\Psi_{const}$  = Oberflächenabflussbeiwert [-]
- $i_T$  = Niederschlagsintensität [mm h<sup>-1</sup>]
- $(C * i_T)$  = Effektivniederschlag
- $c$  = Wasserabflusskoeffizient, Rauigkeitsbeiwert [-]



**Abbildung 3-4:** Rauigkeitsklassifizierung nach unterschiedlichen Oberflächen- und Vegetationstypen (Markart et al. 2004, S. 29).

### 3.2 Der Abflussbeiwert nach Rickli und Forster (1997)

Das Abflussbeiwertkonzept stellt schon seit Einführung der ‚Rational Formula‘ durch Kuichling (1889) ein wichtiges und praktisches Werkzeug in der Ingenieurhydrologie dar.

Eine sehr ähnliche Herangehensweise wie der Ansatz von Markart et al. (2004) zeigt das Verfahren nach Rickli und Forster (1997), das ebenfalls von einer Geländebegehung und den dabei ermittelten Daten ausgeht.

Die parallele Anwendung beider Verfahren erweist sich daher als besonders geeignet, um Resultate von Feldebewertungen und N/A-Berechnungen plausibilisieren und falsifizieren zu können. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass Rickli und Forster (1997) im Gegensatz zu Markart et al. (2004) von Summenabflusskoeffizienten ausgehen.

#### 3.2.1 Ziele und Aufbau

Die Abflusskoeffizienten sind von den im Gelände herrschenden Infiltrationsbedingungen und der Wasseraufnahmefähigkeit abhängig (Abbildung 3-5). Eine ausführliche Beschreibung der Methode geben Rickli und Forster (1997) bzw. Sury (2006).

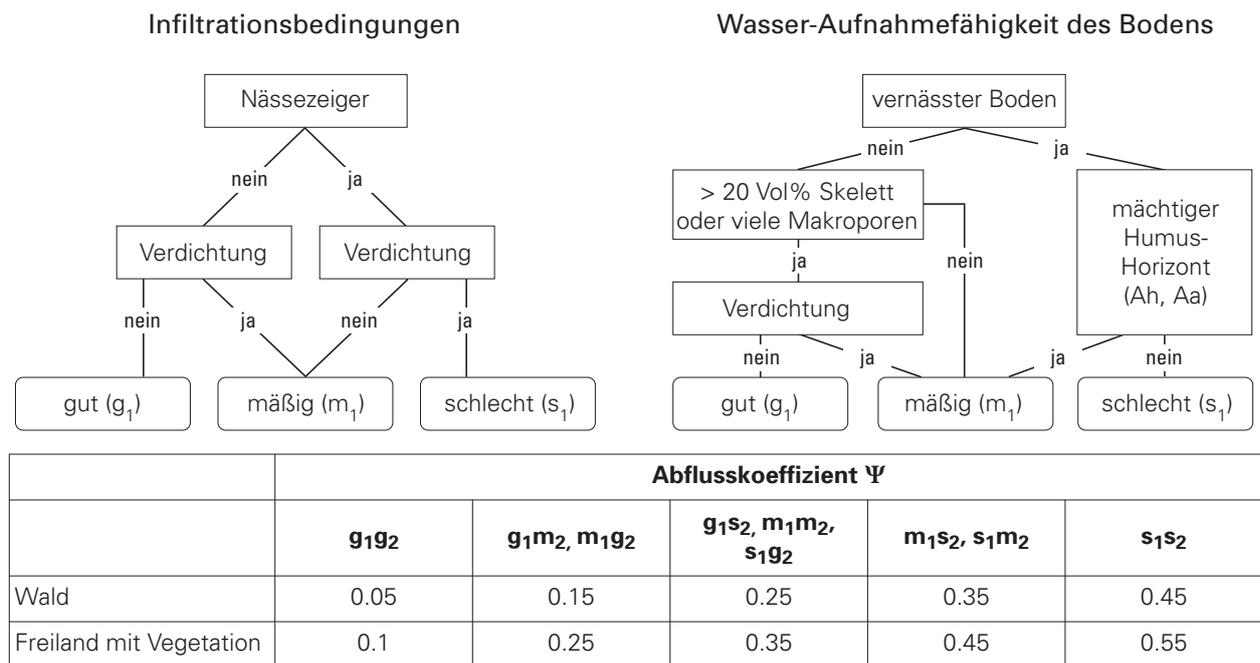
Den zentralen Bestandteil des Verfahrens bildet das Schema in Abbildung 3-5. Infiltrationsbedingungen und Wasseraufnahmefähigkeit werden in der Abfolge Vegetationsdecke – Bodenoberfläche – Boden bewertet. Als Bewertungsindikatoren finden die Faktoren Verdichtung, Deckungsgrad der Vegetation, Bodenvernässung, Bodenmächtigkeit, Skelettanteil und Zeigerwerte der Pflanzen Verwendung.

Die Verfahren nach Markart et al. (2004) und Rickli und Forster (1997) weisen in Bezug auf die Definitionen der Faktoren nur geringfügige Differenzen auf.

#### Der Einfluss der Vegetation

Der Bestimmungsschlüssel von Rickli und Forster (1997) gilt primär für vegetationsbedeckte Standorte. Vegetationsfreie Flächen werden lediglich über generelle Hinweise mit standardisierten Werten versehen. Um eine Vergleichbarkeit der Resultate zu erreichen, richten sich die Abflusskoeffizienten der vier Geologietypen der vorliegenden Arbeit nach den von Sury (2006) vorgeschlagenen geologischen Anhaltspunkten (Tabelle 3-5).

Die besondere Berücksichtigung von einzelnen Pflanzen oder Pflanzengesellschaften kommt durch



**Abbildung 3-5:** Abflusskoeffizienten  $\Psi$  für den Einsatz in Hochwasser-Bemessungsansätzen.  $\Psi$  wird für Wald und Freiland in Abhängigkeit von den Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche und von der Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens festgelegt (Rickli und Forster 1997, verändert) – Detaillierte Beschreibung siehe Anhang, Tabelle 11-3.

**Tabelle 3-5:**  
Standardisierte Abflussbeiwerte für vegetationsfreie Flächen nach Sury (2006, S. 40)

<b>Geologischer Untergrund</b>	<b>Abflusskoeffizient</b> (Rickli und Forster 1997)
Geröll mächtig	0.1
Geröll gering	0.2
Kalk	0.4
Molasse	0.5
Flysch	0.65
Kristallin	0.8

die Integrierung ihrer Durchwurzelungsaktivität und ihrem Indikatorwert im Entscheidungspfad des Bestimmungsschemas deutlich zum Ausdruck. Der Zeigerwert einer Pflanze ergibt sich aus den Angaben von Ellenberg (1996) bzw. Lauber und Wagner (2007) (vgl. Kapitel 4.2.2).

**Die Infiltrationsbedingungen und Wasseraufnahmefähigkeit**

Das Schema in Abbildung 3-5 erlaubt eine Differenzierung der Infiltrationsbedingungen und der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens in „gut“, „mäßig“ bzw. „schlecht“. Unter schlechten Verhältnissen wird auch bei einem an sich gut aufnahmefähigen Boden nur wenig Wasser aufgenommen.

Andererseits werden von Böden mit geringer Wasseraufnahmefähigkeit auch bei idealen Infiltrationsbedingungen nur geringe Wassermengen gespeichert.

Nach der in Abbildung 3-5 dargestellten Bewertungskombinationen erfolgt die Zuordnung eines Abflussbeiwertes, wobei zusätzlich zwischen Wald und Freiland unterschieden wird. Diese Differenzierung berücksichtigt die grundsätzlich besseren Infiltrationsbedingungen von Waldstandorten, z.B. die i.d.R. höhere Aufnahmefähigkeit der Waldböden, die höhere Evapotranspirationsleistung von Wäldern (Markart et al., 2007), deren tiefere Durchwurzelung und der gegenüber alpinen Rasenbeständen meist günstigeren Struktur der obersten Bodenschicht.

Die Grenzwerte der von Rickli und Forster (1997) vorgeschlagenen Wertebereiche der Abflusskoeffizienten stützen sich auf die Grundlagen von Müller (1943) und Zeller (1975).

**3.2.2 Gültigkeitsbereich**

Die beiden Autoren empfehlen die Verwendung ihres Ansatzes in einfachen Hochwasserbemessungsansätzen zur Berechnung von Hochwasserabflüssen mit geringer Eintretenswahrscheinlichkeit. Die Abflusskoeffizienten sollen dabei mit einem Extremniederschlag kombiniert werden.

Tabelle 3-6: Inputparameter von ZEMOKOST.			
Inputparameter	Beschreibung	Genese	Verwendung
<b>Niederschlagsparameter</b>			
Niederschlagsintensität unterschiedlicher Wiederkehrperioden ( $i_T$ ) [ $\text{mm h}^{-1}$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regenmenge, die während einer definierten Zeitdauer und einer definierten Wiederkehrwahrscheinlichkeit (T) im Einzugsgebiet fällt</li> <li>Je mehr Dauerstufen bekannt sind, desto genauer sind die Berechnungen</li> <li>Die Jährlichkeit (T) kann beliebig gewählt werden. Am häufigsten verwendet werden die 100-, 20-, 300- und 30-jährliche Wiederkehrwahrscheinlichkeit in (CH), in A: Wiederkehrwahrscheinlichkeit 150 und 100</li> <li>Die Umrechnung der abgelesenen Intensitätswerte in die gewünschten Dauerstufen erfolgt mittels 1./2. Extremalverteilung (Röthlisberger et al. 1979, Band 7: Grundlagen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CH: Röthlisberger et al. (1979, 1981, 1992)</li> <li>CH: HADES Tafeln 2.4 (Geiger et al. 1992) und 2.4<sup>2</sup> (Jensen et al. 1997)</li> <li>A: HAÖ - Hydrologischer Atlas Österreichs (2007)</li> <li>A: Berechnungen der möglichen Starkniederschläge für das jeweilige Einzugsgebiet – kann bei den Hydrographischen Diensten der Länder angefordert werden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oberflächenlaufzeit (<math>t_{OB}</math>)</li> <li>Abfluss (Q)</li> </ul>
<b>Topologieparameter</b>			
Teileinzugsgebietsgliederung (TEZG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Nummerierung der Teileinzugsgebiete erfolgt systematisch nach der Baumstruktur: 1, 11, 2, 121, 122, 1211 etc.</li> <li>Die TEZG sind in absteigender Hierarchie zu ordnen</li> </ul>	ArcGIS	In allen Berechnungen elementar
<b>Topographieparameter</b>			
Teileinzugsgebietsflächen (A) [ $\text{km}^2$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flächenausdehnung der einzelnen Teileinzugsgebiete</li> <li>ArcGIS</li> <li>Abfluss (Q)</li> <li>Gerinnelose Fließlänge an der Oberfläche (<math>L_{OB}</math>) [m]</li> <li>Mittlerer, maximaler Fließweg an der Oberfläche</li> <li>Es wird jene Distanz betrachtet, welche ein Regentropfen jeweils vom Wasserscheidpunkt bis ins nächste Gerinne zurücklegt. In diesem Fall entspricht das Gerinne dem gesamten Gewässernetz, darin enthalten sind also auch alle Trockenrunsen</li> <li>Die Eingabe erfolgt für jedes Teileinzugsgebiet einzeln</li> </ul>	ArcGIS	Oberflächenlaufzeit ( $t_{OB}$ )
Hangneigung ( $J_{OB}$ ) [-]	Mittlere Neigung der Oberfläche (Absolutgefälle)	ArcGIS	Oberflächenlaufzeit ( $t_{OB}$ )
<b>Gerinneparameter</b> (Eingabe erfolgt für jedes TEZG einzeln)			
Gerinnelänge ( $L_G$ ) [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fließstrecke des Gerinnes vom Ursprung bis zum Pegel</li> <li>Die gewählte Länge sollte dabei repräsentativ sein für alle sich im Teileinzugsgebiet befindenden Gerinneläufe (Mittelwert)</li> </ul>	ArcGIS	Gerinnelaufzeit ( $t_G$ )
Gerinneneigung (J) [-]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mittleres Sohlengefälle des Gerinnes</li> <li>Das Absolutgefälle ergibt sich aus dem Verhältnis der Höhendifferenz entlang dem Gerinne zur Gerinnelänge (<math>L_G</math>)</li> </ul>	ArcGIS	Mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses ( $v_m$ )
Sohlenrauigkeit ( $d_{90}$ ) [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Charakteristische Korngröße des Bachbettmaterials (Rickenmann 1990, 1996)</li> <li>90% der Sohlenkörner sind feiner als der abgeschätzte Korndurchmesser (Fehr 1978)</li> </ul>	Feldarbeit	Mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses ( $v_m$ )
<b>Teilflächenparameter</b> (Eingabe erfolgt für jedes TEZG einzeln)			
Flächenanteile der Abflussbeiwertsklassen (C) [-]	Flächenmäßiger Anteil der einzelnen Abflussbeiwertsklassen an der Gesamtfläche des Teileinzugsgebietes	Feldarbeit und ArcGIS	Oberflächenlaufzeit ( $t_{OB}$ )
Flächenanteile der Rauigkeitsklassen (c) [-]	Flächenmäßiger Anteil der einzelnen Rauigkeitsbeiwertsklassen an der Gesamtfläche des Teileinzugsgebietes	Feldarbeit und ArcGIS	Oberflächenlaufzeit ( $t_{OB}$ )

### 3.3 ZEMOKOST

Das hydrologische Modell ZEMOKOST (Zeller MODifiziert von KOhl und STEpanek) basiert auf der von Zeller (1974, 1981) vorgestellten Laufzeitmethode. Die Grundzüge des Ansatzes wurden bereits in Stepanek et al. (2004) diskutiert. Mit ZEMOKOST lassen sich die Abflussganglinien des Bemessungsereignisses für das Gesamtgebiet und für Teileinzugsgebiete bestimmen. Das Verfahren baut im Wesentlichen auf der Rationalformel auf (Gleichung 4).

Die Niederschlagsmenge  $hN$  wird als Funktion der Dauerstufe  $D$  und der Wiederkehrzeit  $T$  über die Ausgleichsparameter  $u$  und  $w$  angegeben (Lorenz und Skoda, 2000):

$$hN(D, T) = u(D) + w(D) * \ln(T) \quad (1)$$

Die Oberflächenlaufzeit  $t_{OB}$  wird nach Izzard (1946) berechnet, vgl. Gleichung (2),

$$t_{OB} = \frac{527 * c * L_{OB}^{1/3}}{J_{OB}^{1/3} * (C * i_T)^{2/3}} \quad (2)$$

wobei  $c$  der Oberflächenrauigkeit,  $C$  dem Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz,  $L_{OB}$  dem projizierten Fließweg an der Oberfläche,  $J_{OB}$  der Hangneigung und  $i_T$  der Intensität des Gebietsniederschlags (Quotient aus Niederschlagsmenge  $hN$  und Zeit) entspricht.

Die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit  $v_G$  im Gerinne erfolgt abweichend von Zeller (1974, 1981) über den Ansatz nach Rickenmann (1996):

$$v_G = \frac{0,96 * g^{0,36} * Q^{0,29} * J_G^{0,35}}{D90^{0,23}} \quad (3)$$

In Gleichung (3) entspricht  $g$  der Erdbeschleunigung,  $Q$  dem Spitzenabfluss,  $J_G$  der Gerinneneigung und  $D90$  der Kornrauheit  $D90$ . Der Spitzenabfluss  $Q$  resultiert aus dem Produkt von Abflussbeiwert  $C$ , Niederschlagsintensität  $i_T$  und Einzugsgebietsfläche  $A$  (Gleichung 4). Eine detaillierte Beschreibung der wesentlichen Inputgrößen geben Kohl und Markart (2009).

$$Q = C * i_T * A \quad (4)$$

Das hydrologische Modell ZEMOKOST ist in MS-EXCEL programmiert, es bietet auch Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Interflow. Die dafür notwendigen Inputparameter sind im Gelände separat zu erheben. Die vergleichenden Berechnungen der Hochwasserabflüsse in den Schweizer Einzugsgebieten wurden jedoch ohne Berücksichtigung des Zwischenabflusses durchgeführt, denn die Anleitung von Markart et al. (2004) gilt vor allem für kurze (konvektive) Starkregen. Bei derartigen Niederschlagsereignissen ist der Beitrag des Interflow zum Gesamtabfluss von untergeordneter Bedeutung (vgl. Zeller 1974, 1981).

Aus der Tabelle 3-6 wird ersichtlich, welche Inputparameter für das N/A-Modell ZEMOKOST notwendig sind. Weiter gibt sie auch einen Überblick zu deren Definitionen sowie Verwendungszwecke.

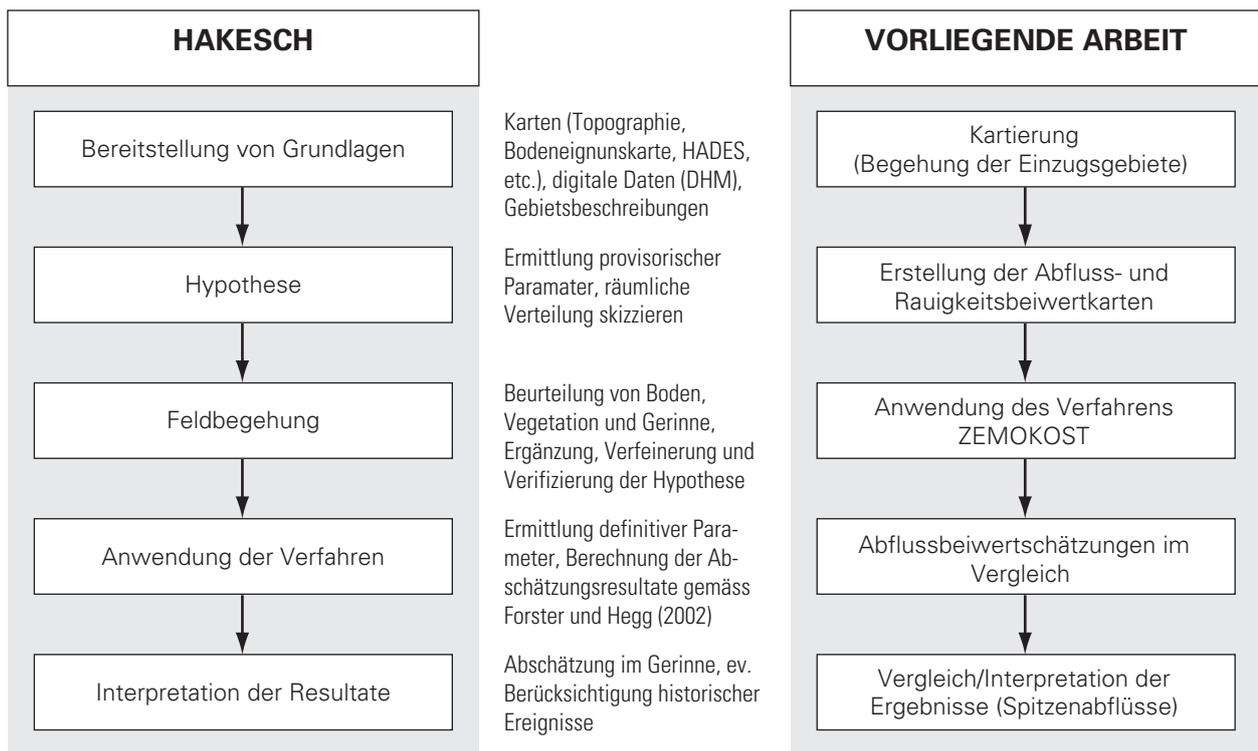


Abbildung 4-1: Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten nach HAKESCH (Spreafico et al. 2003, S. 81, verändert) und bei der vorliegenden Arbeit.

#### 4. Hochwasserabschätzung – Vorgangsweise (erweiterte Methode)

Bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten wird für die Schweiz von Spreafico et al. (2003) eine standardisierte Vorgehensweise vorgeschlagen (Abbildung 4-1, linkes Bild). Für den gegenständlichen Methodenvergleich hat sich aus Erfahrungen und Erkenntnissen im Zuge der Anwendungen der bestehenden Methoden: Geländeanleitung von Markart et al. (2004), ZEMOKOST nach Kohl und Stepanek (2005), Abflussbeiwerte (Rickli und Forster 1997) die in Abbildung 4-1 (rechtes Bild) angeführte Vorgangsweise ergeben.

Eine schematische Darstellung des gesamten Vorgehensablaufes für die Anwendung der Geländeanleitung und von ZEMOKOST zeigt Abbildung 4-2. Im Folgenden wird auf die einzelnen Arbeitsschritte genauer eingegangen.

##### 4.1 Verwendete Grundlagen – Aussagekraft

Am Anfang jeder Hochwasserabschätzung steht die Beschaffung von Unterlagen über die Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit von der Fragestellung (Abbildung 4-2).

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf eine Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugs-



Abbildung 4-2: Ausschnitt aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3).

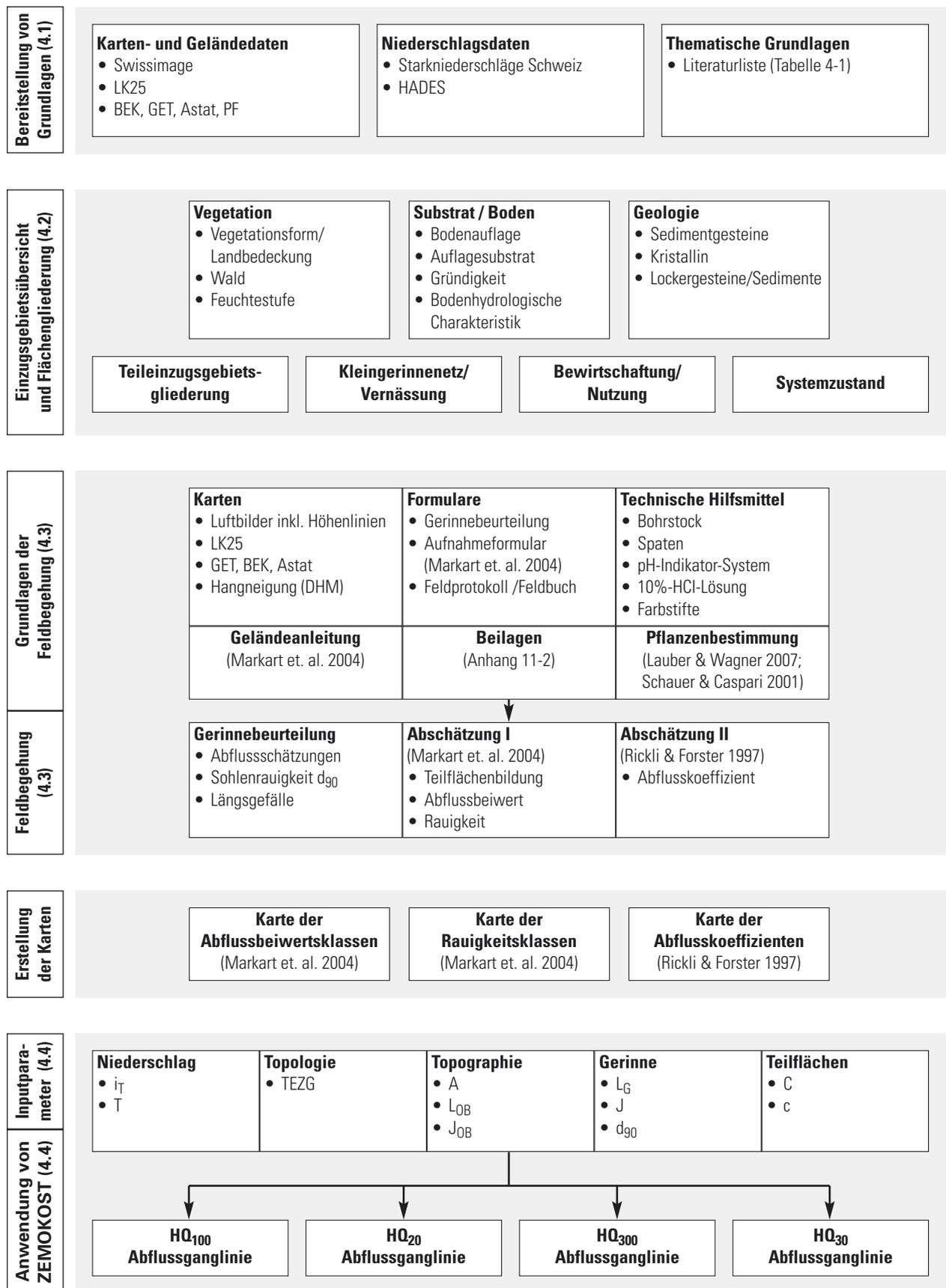


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des gesamten Vorgehensablaufes für die Anwendung der Geländeanleitung (Markart et al. 2004) und ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005).

gebieten der Schweiz. Für Österreich gilt die im Rahmen des Projektes ETALP (Projektteam ETALP 2003) entwickelte und im Projekt NAB (Naturpotentiale alpiner Berggebiete) überprüfte Vorgangsweise (Angerer et al. 2009).

#### 4.1.1 Karten und Geländedaten

Für die vorliegende Arbeit stand eine beachtliche Menge an Kartengrundlagen zur Verfügung. Zusätzliche Recherchen nach weiteren Datengrundlagen waren wenig erfolgreich, da in der Schweiz flächendeckende Daten in einem für eine Abschätzung mit der Geländeanleitung angemessenen Maßstab von 1:5 000 kaum existieren. Detaillierte Bodenkarten (M 1:5 000 bis 1:25 000) sind zwar sehr wohl vorhanden, jedoch nur für Teilgebiete der Schweiz (Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz BGS, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL, Reckenholz).

Für das am GIUB laufende Projekt von Dobmann (2009) wurden freundlicherweise vom Bundesamt für Landestopographie (SWISSTOPO) folgende Karten und Daten zur Verfügung gestellt:

- Landeskarte der Schweiz 1:25 000, Pixelkarte PK25 (ganze Schweiz):  
PK25 © 2005 Bundesamt für Landestopographie (DV 351.5)
- Digitales Höhenmodell DHM (Raster und Basismodell, ganze Schweiz):  
DHM25© 2005 Bundesamt für Landestopographie (DV002234.1)  
Die Rasterzellengröße richtet sich nach dem digitalen Höhenmodell (DHM25) und wird daher für die vorliegende Arbeit auf 25 m festgelegt.
- Primärflächen (1992/97, ganze Schweiz):  
VECTOR25 © 2005 Bundesamt für Landestopographie (DV002232.1)
- Gewässernetz (ganze Schweiz):  
VECTOR25 © 2005 Bundesamt für Landestopographie (DV002232.1)
- Bodeneignungskarte 1:200 000:  
VECTOR200 © 2000 Bundesamt für Landestopographie (DV002233.2)
- Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz:  
VECTOR © 2001 Bundesamt für Landestopographie (DV002233.2)
- Luftbilder swissimage, georeferenziert, Bodenauflösung 0,5 m (Auswahl):  
Bundesamt für Landestopographie, 2004 (DVO12687.1)

In dieser Arbeit werden bearbeitete Karten folgendermaßen zitiert: Kartendaten: SWISSTOPO, verändert

Weiter vorhandene Grundlagen:

- Arealstatistik der Schweiz (1979/85, BFS 1997)
- Geologische Karte der Schweiz 1:500.000 (Schweizerische Geologische Kommission SGK 1980)

Zudem liegen, dank anderer Arbeiten (Dobmann 2009, Schaffner 2007), etliche digitale Datensätze zu den einzelnen Einzugsgebieten vor:

- Einzugsgebietsgrenzen, Wasserscheiden
  - Gewässernetz, inklusive erweitertem Trockenrunsenetz
  - Fließrichtungen, basierend auf dem Höhenmodell (FlowDirection file)
  - Beregnungsstandorte mit den betreffenden Flächen
- Die Sichtung und Bearbeitung des Bildmaterials erfolgte unter Verwendung des Geographischen Informationssystems ArcGIS 9.2.

#### • Luftbilder

Für die Vorbereitung der Anwendung der Geländeanleitung eignen sich vor allem die Luftbilder (swissimage) (swisstopo 2005). Sie dienen der Lokalisierung von aus hydrologischer Sicht maßgebenden Vegetationseinheiten und Nutzungsformen, soweit diese erkennbar sind. Dies kann bereits vor einer Feldbegehung geschehen.

#### Hinweis zur Feldarbeit

Es ist sinnvoll Flächen unterschiedlicher Abflussdisposition bereits im Gelände auf dem Orthofoto abzugrenzen und farblich differenziert darzustellen. Dafür sind Orthofotos mit Höhenlinien (Äquidistanz: 10 m) versehen in feldtauglicher Form (A4-Format und ca. 60%-Ansicht) sinnvoll. Der Maßstab orientiert sich an der Fragestellung. Die Anwendung der Geländeanleitung ist auf der mittleren Maßstabsebene (1:10 000) und der größeren Detailebene (1:2 500 bis 1:5 000) sinnvoll. Ein Beispiel für eine solche Kartierungsvorlage gibt Abbildung 11-5.

#### • Landeskarten

Physische Karten wie die Landeskarte 1:25 000 (LK25) (SWISSTOPO 2005a) oder die Karten im Maßstab 1:25 000 bzw. 1:50 000 des BEV (Österreich) dienen primär der Orientierung im Gelände. Die direkte Routenplanung sollte auf Orthofotos im Bearbeitungsmaßstab erfolgen.

#### • Weitere Kartengrundlagen

Eine Reihe weiterer digital erhältlicher Kartengrundlagen kann für die Vorbereitung der Feld-

arbeit eingesetzt werden. Liegt beispielsweise auf schiefrigem Untergrund ein flachgründiger Boden mit geringer Wasseraufnahmefähigkeit vor, deuten diese Merkmale auf Abflussprozesse hin, welche möglicherweise bei einem Bemessungsereignis maßgebende Auswirkungen auf das Abflussgeschehen des Einzugsgebietes nehmen.

Beispiele von Kartengrundlagen für die Schweiz:

- Bodeneignungskarte (BEK) (BFS 2001)
- geotechnische Karte (GET) (BFS 2004)
- Karte der Arealstatistik (Astat) (BFS 1997)
- Karte der Primärflächen (PF) (swisstopo 2005c)
- geologische Karte (SGK 1980)

Beispiele von Kartengrundlagen für Österreich:

- elektronische Bodenkarte des BFW (eBOD, Quelle: BFW)
- geologische Karte der Republik Österreich (GBA)
- Realraumtypen nach Seger (2001)
- Informationen über Art der landwirtschaftlichen Nutzung (AMA 2007)
- Österr. Waldkarte (Bauerhansl et al. 2007)

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass in Österreich einige der angeführten Kartengrundlagen aus Datenschutzgründen nur eingeschränkt erhältlich sind bzw. nicht flächendeckend zur Verfügung stehen.

#### **Hinweis zur Feldarbeit**

„Am grünen Tisch“ getroffene Vorausscheidungen (in die Kartiergrundlage eingetragene abflussrelevante oder sonstige, heikle Flächen) sind im Gelände unbedingt zu überprüfen.

#### **4.1.2 Niederschlagsdaten**

Die für die vorliegende Arbeit notwendigen Angaben zu den maßgeblichen Niederschlagsintensitäten, Dauerstufen sowie Wiederkehrperioden basieren einerseits auf den Tafeln 2.4 (Geiger et al. 1992) und 2.4<sup>2</sup> (Jensen et al. 1997) „Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901 – 1970“ des Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES). Die Tafeln unterscheiden sich einzig in der Interpolationsmethodik. Andererseits wurden auch Niederschlagswerte (abgelesene Stationsmesswerte) aus den Niederschlags-Intensitäts-Diagrammen „Starkniederschläge in der Schweiz“ (Röthlisberger et al. 1979, 1981, 1992: Bde. 3, 4, 7) verwendet. Es wurden dabei jeweils jene zwei bis drei Stationen ausgewählt, welche gemäß Schlupe

und Wüthrich (2006) dem betreffenden Einzugsgebiet am nächsten liegen und ihm in Bezug auf die Höhenlage am ähnlichsten sind.

Beiden Verzeichnissen liegen Messwerte von Pluviographen und Tagessammlern zugrunde, woraus sich, je nach Region der Schweiz, unter Anwendung der 1. oder der 2. Extremalverteilung die jeweiligen Intensitätskurven der Starkniederschläge bestimmter Jährlichkeiten für ein ausgewähltes Gebiet ergeben.

Die genannten Datenquellen weisen Schwachstellen auf: Beide stützen sich auf Niederschlagswerte der Messperiode 1901-1970. Die Frage nach deren Gültigkeit für heutige Niederschlagsverhältnisse wird daher in Fachkreisen oft diskutiert. Es liegen zurzeit schlicht und einfach keine aktuelleren Daten für die gesamte Schweiz vor.

Mögliche Niederschlagsdaten für Österreich sind von Gattermayr (2003) in den ETALP-Kompendien beschrieben. Als Erstinformation können auch digitale Niederschlagsdaten aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs (HAÖ 2007) verwendet werden. Für Gemeinden mit über 5000 Einwohnern liegen österreichweit neue Abminderungskurven vor (eHYD - Stand 2009).

#### **4.1.3 Thematische Grundlagen**

Tabelle 4-1 enthält die wichtigsten Grundkenntnisse zu Boden, Vegetation und Nutzung. Sie erlauben die Grobcharakterisierung eines Einzugsgebietes, wie z.B. die Zugehörigkeit zu einer Vegetationslandschaft nach Hegg et al. (1993).

### **4.2 Einzugsgebietsübersicht und Flächengliederung**

Die Festlegung der Parameter der einzelnen Verfahren und die provisorische Skizzierung ihrer räumlichen Verteilung wird von Spreafico et al. (2003) unter dem Begriff „hypothetische Raumgliederung“ zusammengefasst (Abbildung 4-1, Hypothese).

Die Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) ist eine Anleitung für die Beurteilung im Feld, sie enthält daher nur grobe Angaben zu den Vorerhebungen, Inhalte der Vorbereitung sind in ETLAP (Projektteam ETALP 2003) zu finden. In Abbildung 4-4 sind mögliche Inhalte vorbereitender Arbeiten skizziert.

Bei der Geländeanleitung handelt es sich um ein Instrument für die Feldebewertung auf der mittleren Maßstabsebene (1:10 000) und der Detailebene

<b>Tabelle 4-1: Hilfsmittel und Literatur zur Erarbeitung der thematischen Grundlagen.</b>	
<b>Titel</b>	<b>Autor, Publikationsjahr</b>
<b>Vegetation</b>	
Atlas der Schweiz	swisstopo 1968
Atlas der Schweiz 2.0, digital	Institut für Kartographie, ETH Zürich 2005
Atlas schutzwürdiger Vegetationstypen der Schweiz	Hegg et al. 1993
Der große BLV Pflanzenführer	Schauer und Caspari 2001
Flora alpina	Aeschmann et al. 2004
Flora Helvetica	Lauber und Wagner 2007
Gebirge der Erde. Landschaft, Klima, Pflanzenwelt	Burga et al. 2004
Lebensräume der Schweiz. Ökologie – Gefährdung – Kennarten	Delarze et al. 1999
Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora	Landolt 1977
Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen	Ellenberg 1996
<b>Boden</b>	
Atlas der Schweiz	swisstopo 1968
Atlas der Schweiz 2.0, digital	Institut für Kartographie, ETH Zürich 2005
Boden - Agrarpedologie	Frei und Peyer 1991
Bodeneignungskarte der Schweiz	EJPD 1980
Klassifikation der Böden der Schweiz	FAL 2002
Landschaftsökologie IV. Bodenkunde	Germann et al. 2005
<b>Geologie</b>	
Allgemeine Geologie	Press und Siever 2003
Geologie der Schweiz. Vorlesungsskript.	Pfiffner 2006
Geologie der Schweiz	Labhart 2005
Geotechnische Karte	BFS 2001
<b>Kleingewässernetz/Vernässung</b>	
Gewässernetz	Swisstopo 2005d
Gewässer- und Runsennetz	Schaffner 2007
<b>Systemzustand</b>	
Atlas der Schweiz	Swisstopo 1968
Atlas der Schweiz 2.0, digital	Institut für Kartographie, ETH Zürich 2005
HADES	Swisstopo 2007

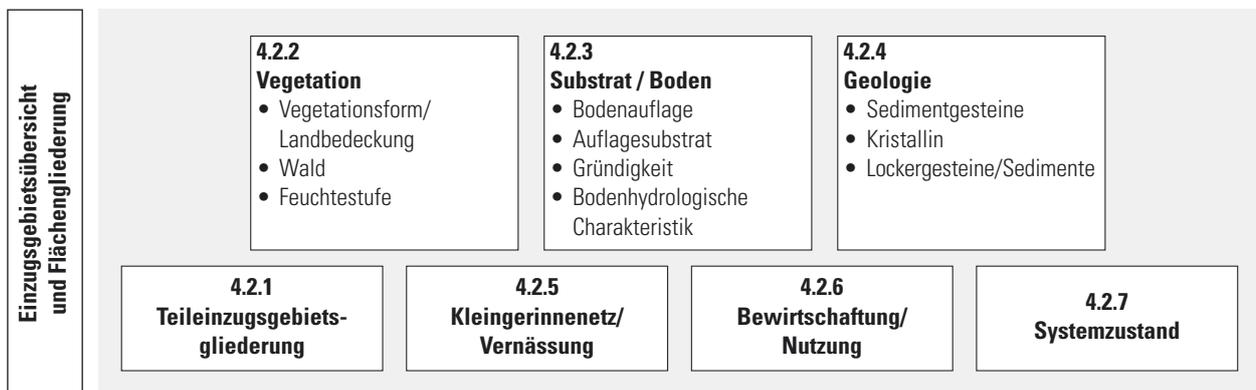


Abbildung 4-4: Ausschnitt aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3).

( $\leq 1:5\,000$ ). Besonders bei den Kartendaten sind die unterschiedlichen Maßstäbe zu beachten.

#### 4.2.1 Gliederung der Teileinzugsgebiete

Die Ausscheidung von Teileinzugsgebieten kann händisch auf einem Orthofoto oder einer Karte erfolgen, sinnvoll ist die direkte Abgrenzung der Polygone im GIS. Die Teileinzugsgebiete werden nach der Fließrichtung des Wassers von der Wasserscheide bis ins nächste Gerinne gegliedert (Abbildung 4-8). Ein Teileinzugsgebiet umfasst jene Flächen, welche bei einem Regenereignis in den Pegel des betreffenden Gerinneastes entwässern. Ein Pegel/Knotenpunkt bezeichnet in diesem Fall die Stelle, an der ein Gerinneast in das Hauptgerinne mündet. Die Aufteilung des Gerinnenetzes in einzelne Äste erfolgt fortschreitend, indem zuerst das Hauptgerinne definiert wird und danach einzelne, dem Anwender besonders im Hochwasserfall als relevant erscheinende Zuflüsse bestimmt werden.

Die definitive Unterteilung der Teileinzugsgebiete in Teilflächen hydrologischer Vegetationseinheiten erfolgt erst während der Feldbegehung (Kapitel 4.3).

#### 4.2.2 Vegetation

Die Vegetation gibt Informationen über verschiedene Bodeneigenschaften (z.B. Durchlässigkeit, Durchlüftung...) oder ist Ausdruck der vorherrschenden Art und Intensität der Bewirtschaftung (z.B. Verdichtungszeiger).

Mit der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) können folgende Eigenschaften der Vegetation beurteilt werden (siehe auch Tabelle 11-2):

- **Vegetationsform/Landbedeckung**

Ausgehend von der Landeskarte (swisstopo 2005a) und der Karte der Primärflächen (swisstopo 2005c), kann im Zuge der Vorausscheidung am GIS die Abgrenzung zwischen Wald, Weiden, und Freiflächen erfolgen. Die genaue Abgrenzung der hydrologischen Vegetationseinheiten und die Abschätzung ihrer Abflusswirksamkeit erfolgt erst während der Feldbegehung.

- Für Österreich sind auf regionaler Ebene folgende Informationen erhältlich:  
Österreichische Karte 1:50 000 und 1:25 000 des BEV – wird laufend aktualisiert

- Realraumtypen nach Seger (2001).  
Offene Schutthalden und vor allem Felsbereiche lassen sich auf den Karten gut erkennen. Mit der

nötigen Vorsicht in Bezug auf den Aktualitätsgrad der Unterlagen sind derartige Flächen bereits vor der Feldarbeit bestimmbar (vgl. auch Kapitel 4.2.4).

Sinnvoll erscheint die Ausscheidung hydrologischer Vegetationsformen bzw. Landbedeckungseinheiten am Orthofoto. So lassen sich beispielsweise Buschgesellschaften, verschiedene Waldformen (unterschiedliche Anteile von Laub- und Nadelholz), Moor- und Feuchtflächen, offener Fels und vegetationslose Schuttflächen, Gras- bzw. Rasenflächen unterscheiden.

**Trotz dieser beachtlichen Menge an Informationen kann keine auch noch so gute Karten- oder Luftbildgrundlage die Geländebegehung ersetzen. Die Karteninterpretation ermöglicht die Ausweisung einer Abflussdisposition, die Zuordnung von konkreten Abflussbeiwertklassen ist aber an die Feldbegehung gebunden.**

- **Wald**

Aus der Landeskarte (SWISSTOPO 2005a), der Karte der Primärflächen (SWISSTOPO 2005c) und aus den Orthofotos sind bereits erste Informationen zur Lokalisation und Flächenausdehnung von Wäldern zu entnehmen. Natürliche und anthropogene Veränderungen der Flächenbegrenzungen sowie lokale Charakteristika sind bei der Geländebegehung zu erfassen.

- **Feuchtestufe**

Die Feuchtezahl charakterisiert die Feuchtigkeitsverhältnisse des Bodens, wie in Kapitel 2.2.2 erläutert.

In der Einteilung nach Markart et al. (2004) wurden die 9 Feuchtestufen nach Ellenberg (1996) oder die 5 Feuchtezahlen nach Landolt (1977), in Lauber und Wagner (2007) aufgrund von Starkregensimulationen auf ca. 700 Testflächen in 4 Klassen zusammengefasst. Gerade für die Feldbeurteilung des Abflussverhaltens gilt die Aussage Landolt (1977), in Lauber und Wagner (2007), S. 25): „Zeigerwerte lassen sich in der Regel nicht messen. Es handelt sich um empirische Mittelwerte mit mehr oder weniger großem Streubreich. Eine zu feine Skalenteilung würde deshalb eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen.“ Tabelle 4-2 veranschaulicht die in dieser Arbeit benutzte Kombination der Zeigerwerte aus der Flora Helvetica (Lauber und Wagner 2007) mit den Feuchtestufen der Geländeanleitung, die für

**Tabelle 4-2:**  
Kombination des Zeigerwertes der Feuchtezahl nach Schauer (2002) mit den Angaben von Lauber und Wagner (2007).

Feuchtezahl (Lauber und Wagner 2007)	Erklärung	Feuchte-Zeigerwert- klassen (Schauer 2002)	Beschreibung	Abflussklasse <sup>1</sup> (Markart et al. 2004)
1	Ausgesprochene Trockenheitszeiger	mf	Trocken - mäßig frisch	1
2	Zeiger mäßiger Trockenheit			
3	Zeiger mittlerer Feuchtigkeitsverhältnisse	f	Frisch	1 -2
4	Feuchtigkeitszeiger	ff	Sehr frisch - feucht	(3 -) 4
5	Nässezeiger	n	Sehr feucht - nass	(4 -) 5, 6
X	Indifferentes Verhalten			

<sup>1</sup> Diese Angaben sind mit Vorsicht zu verwenden, da sie je nach Deckungsgrad oder Boden sehr variabel sind (vgl. Tabelle 4-4).

**Tabelle 4-3:** Grobe Zuordnung der Abflussbeiwertklasse anhand der Feuchtezeigerwerte von Indikatorpflanzen (nach Markart et al. 2004).

Zeigerpflanzen	Feuchtezeigerwertklasse	Abflussklasse
Einzelne Feuchtezeiger	f - ff	3 (-4)
Häufung von Feuchtezeigern	ff	4
Nässe- und Feuchtezeiger	ff - n	5
Hoher Deckungsgrad der Nässezeiger	n	6

die österreichischen und bayerischen Ostalpen entwickelt wurde.

Die Zuordnung von Feuchtezahlen aus der Bestimmungsliteratur zu den entsprechenden Feuchtezeigerwertklassen nach Schauer (2002) macht es möglich, auch mit Pflanzenarten zu arbeiten, welche in der Geländeanleitung nicht explizit als Zeigerpflanzen erwähnt werden.

Vereinfacht lassen sich nach Markart et al. (2004) anhand des Auftretens von Feuchtezeigern die in Tabelle 4-3 angeführten Zuordnungen treffen.

### Weitere Zeigerwerte

Pflanzen können auch Indikatoren für Verdichtung oder Beweidung sein. So gibt es beispielsweise viele Weideunkräuter, die vom Vieh meist wegen ihrer Ungeniessbarkeit verschmäht werden. Auf Weideflächen sind sie deutlich an ihrer größeren Verbreitung zu erkennen (z.B. Borstgras - *Nardus stricta* oder Sumpf-Kratzdistel - *Cirsium palustre*). Andere Pflanzen wiederum gedeihen auf Weiden umso besser, weil die Nährstoffverfügbarkeit durch stetige Düngung extrem gesteigert ist (z.B. Alpenampfer - *Rumex alpinus*). Pflanzen mit der Fähigkeit, trotz verdichtetem Boden wachsen zu können, sind ebenfalls in großer Anzahl auf beweideten oder sonstigen mechanischen Belastungen ausgesetzten

Flächen anzutreffen (z.B. Alpenwegerich - *Plantago lanceolata*).

Tabelle 11-1 im Anhang gibt einen Überblick zu Pflanzen, die sich als taugliche Indikatoren für die Beurteilung der Abflussdisposition in den untersuchten Schweizer Einzugsgebieten erwiesen haben.

### 4.2.3 Substrat/Boden

Die in der Bodeneignungskarte (BEK) (BFS 2001) enthaltenen Angaben zur Eignung eines Bodens erlauben, trotz der groben Auflösung (Maßstab 1:200 000), wertvolle Rückschlüsse auf die Bodenständigkeit und den Skelettanteil, Wasserdurchlässigkeit, Wasserspeichervermögen und Angaben zu möglichen Vernässungen. Zudem wird aus der verwendeten Codierung der Kartierungseinheiten ersichtlich, welcher physiogeographischen Einheit (z.B. Alpenrand, vorwiegend sandige Molasse) und welchen Formelementen der Landschaft (z.B. steile Hanglage) der betreffende Boden entspricht.

In einer Kurzübersicht zur BEK (BFS 2001) und einer ausführlicheren Datenbeschreibung des EJPD (1980) finden sich alle notwendigen Angaben für die Verwendung.

In Österreich steht die eBod (elektronische Bodenkarte - BFW 2008) allerdings nur für den Grünlandbereich in den Tallagen - als flächendeckende Bodeninformation zur Verfügung. Die

<b>Tabelle 4-4:</b> Zusammenfassung der wichtigsten bodenkundlichen Merkmale und daraus ableitbarer Hinweise.		
<b>Bodenkundliche Merkmale</b>	<b>Wichtige Eigenschaften</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Bodenaufgabe</b> (Streu und organisches Material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existenz</li> <li>• Mächtigkeit</li> <li>• Lagerungsdichte</li> <li>• Wasseraufnahmefähigkeit/ Hydrophobie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflage vorhanden?</li> <li>• wenn ja, wie mächtig (&lt; 5 cm oder &gt; 5 cm)?</li> <li>• locker oder kompakt gelagert?</li> <li>• Wasseraufnahmefähigkeit gegeben oder benetzungshemmend?</li> </ul>
<b>Auflagesubstrat</b> (Ol-, Of-, Oh-Horizonte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mull (keine halbzersetzten Produkte mehr vorhanden, Zersetzung der Pflanzenreste erfolgt meist innerhalb eines Jahres)</li> <li>• Moder</li> <li>• Rohhumus (dicke unzersetzte Schicht)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mächtige Rohhumusformen, z.B. unter alpinen Zwergsträuchern weisen sehr gute Infiltrationscharakteristika auf.</li> <li>• (Xeromorpher) Moderhumus, z.B. unter dichtem Fi-Stangenholz hat bei lang andauernden, trockenen Bedingungen häufig eine benetzungshemmende Wirkung.</li> <li>• Lockerer, leicht feuchter Mullhumus kann Niederschlagswasser i.d.R. gut aufnehmen.</li> </ul>
<b>Gründigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flachgründig (bis 30 cm)</li> <li>• Mittelgründig (30-60 cm)</li> <li>• Tiefgründig (ab 60 cm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringmächtige Bodenschichten auf suban-stehendem Fels in steilen Lagen - rasche Abflussbildung bei Starkniederschlag (oberflächennaher Interflow).</li> <li>• Gründigkeitsangaben nach Blum et al. (1996) für Österreich. Länderweise bzw. nach Autor unterschiedliche Angaben zur Bodenmächtigkeit.</li> </ul>
<b>Boden-Hydrologische Charakteristik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Struktur (Lagerung)</li> <li>• Textur (Korngrößen)</li> <li>• Skelettanteil</li> <li>• Matrixanteil</li> <li>• Wassereinflüsse</li> <li>• Eindringwiderstand</li> <li>• Kleinrelief</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• feinteilreicher und dichter Boden (hohe Schluff- und Tonanteile) - rasche oberflächliche Abflüsse bei Starkniederschlag (Instabilität des Bodenkomplexes in Hanglagen)</li> <li>• skelettreicher Boden? (&gt; 20% Vol.anteil Teilchen Ø &gt; 2 mm)</li> <li>• (Pseudo-) Vergleymerkmale? (reduzierte Infiltrationsleistung)</li> <li>• Große Eindringwiderstände (Prüfung, z.B. durch Einstecken des Bodenbohrers, Einrammen des Schuhabsatzes in Bodenoberfläche) bei Verdichtung durch Beweidung oder Befahrung.</li> <li>• Glattes Kleinrelief fördert den raschen oberflächlichen Abfluss.</li> </ul>

Polygone dieser Karte sind ebenfalls mit Angaben zu verschiedenen Bodeneigenschaften (z.B. geschätzte Leitfähigkeit bzw. Bandbreite der Bodentextur) hinterlegt.

Für die Anschätzung der Bodenverhältnisse mit der Geländeanleitung sollte jeweils auf die wichtigsten, lokal variierenden Bodenmerkmale eingegangen werden (Tabelle 4-4).

#### 4.2.4 Geologie

Der Einfluss der geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet auf die Abflussbildung und -reaktion ist enorm (siehe auch Kapitel 2.4). Daher wurde bei der Auswahl der sechs Einzugsgebiete darauf

geachtet, möglichst unterschiedliche geologische Einheiten mit einzubeziehen, um eine höchstmögliche Repräsentativität der Resultate zu erzielen.

#### Hydrogeologie

Nach Markart et al. (2004) ist zwischen folgenden lithologischen Einheiten zu differenzieren:

- **Sedimentgestein** (Kalkstein, Dolomit, Sandstein, Konglomerate, Mergel, u.a.)
- **Kristallin** (Gneis, Granit, Glimmerschiefer, Phyllit/Schiefer, Quarzite, Serpentine, Marmor, u.a.)
- **Lockergesteine/Sedimente** (Talalluvium, Wildbachschutt, Hang- und Blockschutt, lockerer Kies, Sand, Schluff (Silt), Lehm, Ton, Löss, u.a.)

Aus hydrogeologischen Untersuchungen, basierend auf lithologischen Daten und Ergebnissen von Pumpversuchen, sind Durchlässigkeitsbeiwerte für die geologischen Einheiten der Schweiz bekannt (HADES Tafel 8.2, Geiger et al. 1992). Dies ermöglicht Rückschlüsse auf hydrogeologische Eigenschaften.

### Felsflächen und Lockergestein

Die Wasserdurchlässigkeit hängt sehr stark davon ab, ob es sich um freie Felsflächen, Untergrundgestein oder z.B. um Lockergestein handelt.

Vegetationslose Felsflächen sind gemäß Geländeanleitung generell viel abflussfreudiger als eine Geröllhalde, welche in sehr geringem Umfang oder gar nicht zum oberflächlichen Abfluss beiträgt.

Felsflächen können bei sehr geringer Klüftigkeit mit viel oder bei stark geklüftetem Fels mit geringem Abfluss reagieren. Im Gelände wird dies an den Abflusrrinnen und -spuren ersichtlich, die sich allenfalls unterhalb von Felsflächen abzeichnen. Dasselbe gilt auch für geringmächtige Geröllhalden. Fließspuren im Hang sind generell ein Indikator für entweder schlecht durchlässige Böden oder verstärkt Abfluss liefernde Flächen im Oberhang.

Die Wasserdurchlässigkeit von Sandstein beispielsweise ist oft gering bis mittel. Von ebenso geringer Durchlässigkeit sind die meisten kristallinen Gesteine (z.B. unverwittertes Kristallin:  $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ ). Mergelformationen wirken mit einem  $k_f$ -Wert von  $10^{-9}$  bis  $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$  häufig als Wasserstauer. Deutlich bessere Wasserdurchlässigkeiten weisen Lockergesteine auf, solange sie eine ausreichend große Körnung besitzen (z.B. grobkörniger Sand:  $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ ).

Geologische oder geotechnische Karten bieten gute Grundlagen für eine vorbereitende Einschätzung des Einflusses des geologischen Substrates auf die Abflussbildung.

Detaillierte Angaben zu den geologischen Einheiten der sechs Einzugsgebiete gibt Kapitel 2.4.

### 4.2.5 Kleingerinnenetz/Vernässung

Es besteht eine offensichtliche Wechselbeziehung zwischen Geologie, Böden und Gerinnenetzdichte (vgl. Kapitel 2.4.2) bzw. (Sury 2006, S. 27).

Eine erste grobe Abschätzung der Ausmaße möglicher Vernässungserscheinungen und Fließprozesse an der Oberfläche kann über Orthofotos, Falschfarbenluftbilder und detaillierte physische Landeskarten erfolgen.

Auf den Luftbildern und Orthofotos sind Rinnenbildungen oft deutlich erkennbar. Die Beurteilungen bedürfen allerdings einer Überprüfung

im Gelände, da sich Abflussprozesse mit der Zeit stark verändern können. Unter Verwendung möglichst aktueller Luftbilder können Fehleinschätzungen vermieden werden. Die für diese Arbeit verwendeten Luftbilder entstammen dem Jahr 2004.

Neben den Informationen zum Gerinnecharakter eines Einzugsgebietes (vgl. Kapitel 2.4.2) liefert die Landeskarte (SWISSTOPO 2005a) mit der entsprechenden Signatur ebenso Angaben zu Sumpfflächen.

In Österreich steht die Karte des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (ÖK 1:50 000) zur Verfügung. Gerade in den letzten Jahren sind hier Nachbearbeitungen erfolgt. Es kann sein, dass Gerinne zwischen alten und neuen Kartenblättern lagemäßig um 100 m und mehr differieren. Die Geländeanleitung verweist bei der Lokalisierung solcher Flächen auf die Vegetation als Indikator aussergewöhnlicher Feuchtigkeitsverhältnisse (vgl. Kapitel 2.2).

### 4.2.6 Bewirtschaftung/Nutzung

Nach Markart et al. (2004) stellen vor allem Art und Intensität der Nutzung zentrale Einflussgrößen auf das Abflussverhalten dar. Nutzungsintensitäten können z.B. über die Indikatoren Bodenbedeckung und Verdichtung abgeschätzt werden.

Luftbilder/Orthofotos, die Primärflächenkarte und Arealstatistik liefern bei der Vorausscheidung am GIS hilfreiche Auskünfte.

Die Karte der Primärflächen (swisstopo 2005c) zeigt die Bodenbedeckung, aufgeteilt in 28 Kategorien. Es handelt sich dabei zumeist um landwirtschaftliche Nutzflächen wie Acker, Mähwiesen und Wiesen. Dank der Arealstatistik (BFS 1997) lassen sich die Primärflächen genauer unterteilen, sodass beispielsweise zwischen Almweiden, Wiesen und Ackerland unterschieden werden kann. Damit ergibt sich ein wesentlicher Vorteil für die Abschätzung von Verdichtungsanzeichen. Über die Arealstatistik der Schweiz können insgesamt 74 Nutzungskategorien differenziert werden. Trotzdem ist bei deren Verwendung wiederum die nötige Vorsicht geboten, basieren die Daten doch auf Schwarz/Weiß-Luftbildern der Jahre 1992 bis 1997 und weisen eine geringe räumliche Auflösung auf (1 ha). Feldarbeit ist auch in diesem Fall unumgänglich.

Hinweise zu Nutzungseigenschaften können auch durch die Landeskarte (SWISSTOPO 2005a) gewonnen werden. Ausgehend von der Lage von Einzelhöfen oder sonstigen Alpbetrieben, lassen sich gerade in alpinen Einzugsgebieten oft Beweidungsflächen

ableiten. Flurnamen wie beispielsweise -au, -moos, -wald, -weid oder -bad deuten zudem auf aktuelle oder vergangene Nutzungen hin. Des Weiteren sind auf der Landeskarte auch Straßen und Wege erkennbar, die möglicherweise für spezielle Landnutzungstätigkeiten wie Holzbringung angelegt wurden.

In Österreich stehen nur rudimentäre Informationen über die Landnutzung auf regionaler Ebene für die allgemeine Nutzung zur Verfügung, z.B. Nutzungsinformationen auf Gemeindeebene (AMA 2007). Ein detaillierterer Aufschlüsselungsgrad, z.B. nach Grundparzellen, ist aus Datenschutzgünden nur einem limitierten Nutzerkreis zugänglich.

Weitere Möglichkeiten, schon vor einer Geländebegehung einen Eindruck von den Nutzungen in einem Einzugsgebiet zu erhalten, bieten beispielsweise Informationen zur Art der Weideflächenutzung, zu Bestoßungsziffern oder Beweidungsdauer. Diese sind teilweise für die einzelnen Almbetriebe erhältlich (www.alporama.ch).

Wichtig ist der direkte Kontakt zu den Anwohnern. Hinweise auf künstlich angelegte Drainageleitungen oder Details zu vergangenen Hochwasserereignissen, sowie deren Ursachen und Auswirkungen aus der Sicht der Lokalbevölkerung, all dies ist in die Beurteilung miteinbezogen.

#### 4.2.7 Systemzustand

Einschätzungen zu den realistisch ungünstigsten Bedingungen (realistisches Bad-Case-Szenario, vgl. Abbildung 3-3), welche zum Zeitpunkt eines Starkre-

genereignisses im betreffenden Einzugsgebiet herrschen könnten, sind an profunde Gebietskenntnis gebunden. Überblicksinformationen, insbesondere zu den Niederschlagsverhältnissen können dem ‚Hydrologischen Atlas der Schweiz‘ (HADES) (swisstopo 2007), dem ‚Atlas der Schweiz‘ (digital, ethz 2005) oder dem Hydrologischen Atlas Österreichs (HAÖ 2007) entnommen werden.

### 4.3 Feldbegehung

Bei der Feldbegehung werden die „am grünen Tisch“ den verschiedenen Hydrotopflächen zugewiesenen Abflussbeiwerte und Rauigkeitsbeiwerte geprüft, korrigiert bzw. verfeinert (vgl. Abbildung 4-5).

Das Ergebnis der Feldarbeit sind Karten mit der genauen Teilflächengliederung, wobei jeder einzelnen Fläche eine Abfluss- und eine Rauigkeitsbeiwertsklasse nach Markart et al. (2004), im gegenständlichen Fall auch nach Rickli und Forster (1997), zugeordnet sind.

Für die Feldbegehung, wie in Spreafico et al. (2003) bzw. im Projektteam ETALP (2003) beschrieben, ist eine Kartierungsleistung von 2 bis 5 km<sup>2</sup> pro Tag, in Abhängigkeit von Umfang und Qualität der vorhandenen Datengrundlagen, der Qualität der Vorausscheidung, der Komplexität des zu bearbeitenden Einzugsgebietes und dem gewünschten Detailliertheitsgrad der Erhebung zu veranschlagen.

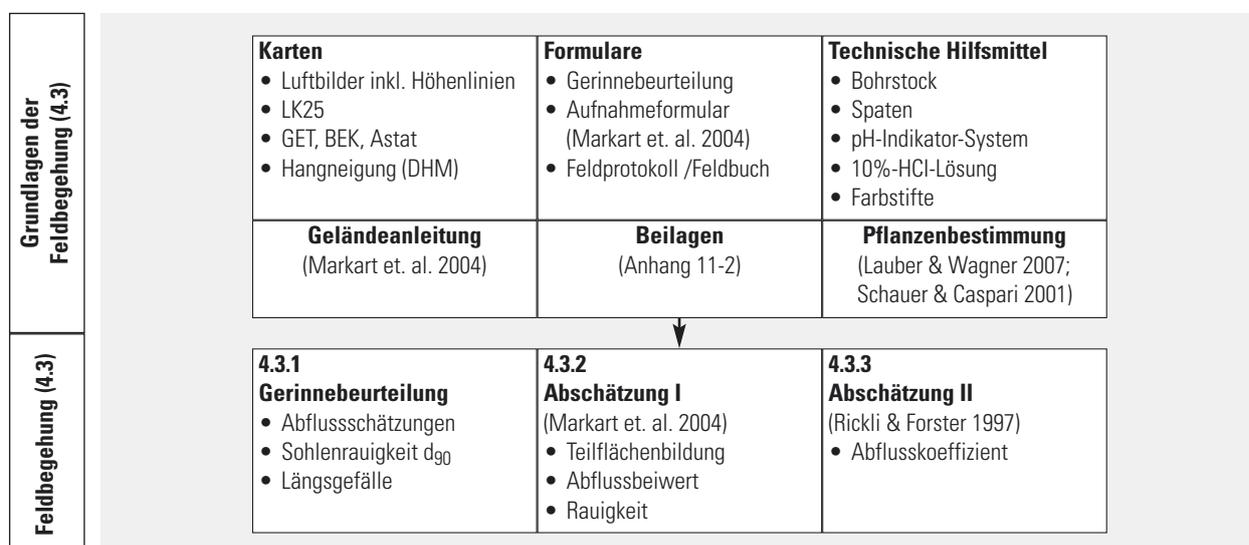


Abbildung 4-5: Detail aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3)

## Dokumentation

Neben einem Feldprotokoll mit Beschreibung der typischen Landbedeckungsformen bzw. hydrologischen Vegetationseinheiten (z.B. Geländeformular nach Markart et al. 2004), der Führung eines Feldbuches, sind Photographien und Skizzen wertvolle Ergänzungen für die nachträgliche Interpretation der Daten im Büro. Zudem sind derartige Unterlagen essentielle Belege für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

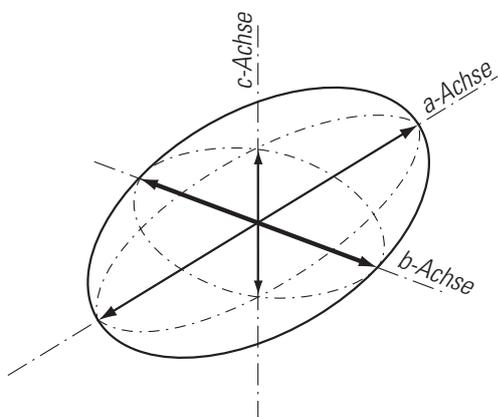
### 4.3.1 Gerinnebeurteilung

#### Standortwahl

Wichtig ist jeweils die Gerinnecharakteristik seitlicher Zuflüsse ins Hauptgerinne, welche die Knotenpunkte eines einzelnen Teileinzugsgebietes bilden (Abbildung 4-8). Die Informationen zur genauen Gerinnebeschaffenheit (z.B. Gerinnequerschnitt,  $d_{90}$ , u.a.) dieser Knotenpunkte garantieren im Anschluss eine seriöse Übertragung der Parameter in das Programm ZEMOKOST. Viele dieser Schlüsselpunkte können bereits im Zuge der Vorbereitungen auf den digitalen Kartiergrundlagen vorausgeschieden und im Verlauf der Geländebegehung aufgenommen werden.

#### Dokumentation

Wichtig ist die Dokumentation möglicher Hochwasserspuren, sowohl im Gerinne selbst als auch an den seitlichen Einhängen und den gerinnenahen Bereichen. Rezente Ereignisse sind entsprechend an umgelegtem Gras, an frisch sedimentiertem Erosionsmaterial auf der Fläche, an unterspülten Ufern, an Schwemmholzresten oder den seitlichen Levées erkennbar. Im Gegensatz dazu weisen eine flächige



**Abbildung 4-6:** Die drei Hauptachsen eines Steines. Bei der Linienzahlanalyse, bzw. der Bestimmung des  $d_{90}$ , wird die mittlere Achse (b-Achse) gemessen (Fehr 1978).

ungestörte Bodendeckung und eine bis tief ins Gerinne reichende Vegetation auf einen ruhigen, über längere Zeit konstanten Verlauf des Abflusses hin.

Die Tabelle 4-5 gibt einen Überblick zu den Kenngrößen, die für die Anwendung in ZEMOKOST notwendig sind.

### 4.3.2 Abschätzung I

#### Teilflächenbildung

Im Gelände verläuft die Abgrenzung einer einzelnen Teilfläche entlang jener Linie, welche einen markanten Wechsel der Standortcharakteristik kennzeichnet. Eine Begrenzung der in die Kartierung eingehenden Flächen auf eine Mindestgröße von 0,5 bis 1 ha - dies entspricht bei einem Kartierungsmaßstab von 1:5 000 ungefähr Fingernagelgröße - ist sinnvoll. Auf jeden Fall sollten Einheiten, die bei der Begehung zum ersten Mal angetroffen werden auch in einem Standortaufnahmeformular, wie in der Geländeanleitung vorgeschlagen, erfasst werden.

#### Anwendung der Methode nach Markart et al. (2004) im Gelände

##### • Ablauf

Die Zuordnung von Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerten erfolgt nach den in der Geländeanleitung vorgeschlagenen Indikatoren

- Vegetation: Vegetationsform/Landbedeckung, Wald, Feuchtestufe
- Boden: Bodenaufgabe, Auflagesubstrat, Gründigkeit, bodenhydrologische Charakteristik
- Geologie
- Kleingerinnenetz/Vernässung
- Bewirtschaftung/Nutzung

Falls eine Begehung der Fläche nicht möglich ist (z.B. extreme topographische Verhältnisse), ist eine Ansprache mit dem Feldstecher sinnvoll.

#### Kartierung

Kartiert wird in der Regel direkt auf die vorbereiteten Luftbilder (vgl. Kapitel 4.1.1 und Abbildung 11-5).

Die Analyse der Bodeneigenschaften erfolgt an vorhandenen Aufschlüssen wie Wegböschungen und bei Fragestellungen auf der Detailebene an repräsentativen Standorten mittels Bohrstockprofil bzw. Spatenprobe.

Mögliche Unterlagen für die Bodenansprache: Zur Abschätzung der wesentlichen Merkmale die Beilage 11.2, für die Bestimmung der Textur, bzw. der Korngrößenverteilung die Anleitung zur Fühl-

<b>Tabelle 4-5:</b> Bei der Geländebegehung mit dem Gerinneaufnahmeformular zu erfassende Gerinnekenngößen.		
<b>Parameter</b>	<b>Definition</b>	<b>Verwendung</b>
<b>Geschätzter Fließquerschnitt</b> ( $F_q$ ) bei aktuellen Abflussverhältnissen [ $m^2$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durchflossener Fließquerschnitt zur Zeit der Feldbegehung</li> <li>Anhaltspunkte bilden der benetzte Umfang (Länge der Kontaktlinie zwischen Wasserstrom und Gerinne) und die Fließtiefe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine einfache hydraulische Abschätzung dient der Plausibilisierung</li> <li>Für die Berechnung von Abflüssen (<math>Q</math>) natürlicher Gerinne im Gelände empfiehlt sich (Weingartner 2004): <math>Q = v \cdot F_q</math></li> </ul>
<b>Geschätzter Fließquerschnitt</b> ( $F_q$ ) im Hochwasserfall [ $m^2$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geschätzter, bei extremem Hochwasser maßgeblicher, durchflossener Fließquerschnitt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plausibilisierung mittels hydraulischer Abschätzung (<math>Q = v \cdot F_q</math>)</li> </ul>
<b>Geschätzte Fließgeschwindigkeit</b> ( $v$ ) bei aktuellen Abflussverhältnissen [ $m \cdot s^{-1}$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geschätzte Fließgeschwindigkeit bei ungestörtem Verlauf im Gerinne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plausibilisierung mittels hydraulischer Abschätzung (<math>Q = v \cdot F_q</math>)</li> </ul>
<b>Geschätzte Fließgeschwindigkeit</b> im Hochwasserfall [ $m \cdot s^{-1}$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schätzung im Feld ist sehr schwierig (ungenau Bestimmung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plausibilisierung mittels hydraulischer Abschätzung (<math>Q = v \cdot F_q</math>)</li> </ul>
<b>Längsgefälle</b> [ $m \cdot m^{-1}$ ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schätzung im Feld ist schwierig</li> <li>Der Einsatz eines Neigungsmessers liefert Einzelwerte (Angaben in Grad)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plausibilisierung des Absolutgefälles, basierend auf dem Gewässernetz (Schaffner 2007, swisstopo 2005d) und dem DHM (swisstopo 2005b): Äquidistanz / horizontale Gerinnelänge (längengewichteter Mittelwert)</li> <li>Weiterverwendung als Inputparameter in ZEMOKOST (Berechnung der Oberflächelaufzeit <math>t_{0B}</math>)</li> </ul>
<b>Sohlenrauigkeit</b> $d_{90}$ [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>„<math>d_{90}</math> ist eine charakteristische Korngröße des Bachbettmaterials. Eine häufig verwendete Methode zur Bestimmung der Kornverteilung in Gebirgsflüssen und Wildbächen ist die Linienzahlanalyse nach Fehr (1978)“</li> <li>„Die Rauigkeit wird mit dem Durchmesser des 90prozentigen Siebdurchgangs (<math>d_{90}</math>) der Sohle bildenden Unterschicht bestimmt“ (Fehr 1978, S. 1104). Das heißt, 90% der Sohlenkörner sind feiner als der abgeschätzte Durchmesser (siehe b-Achse in Abbildung 4-6)</li> <li>Für die Abschätzung des <math>d_{90}</math> während der Geländebegehung wird eine Linienzahlanalyse wie sie Fehr (1978) vorschlägt, gemäß mündlicher Mitteilung von B. Kohl, nicht als notwendig erachtet. Eine bloße Augenschätzung reicht für die anschließende Anwendung in ZEMOKOST völlig aus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weiterverwendung als Inputparameter in ZEMOKOST (Berechnung der Fließgeschwindigkeit bzw. der Gerinnelaufzeit)</li> </ul>

probe (Kaufmann 2006) bzw. Fingerproben nach Blum et al. (1996) und das Schema zur Klassierung der Feinerdekörnung (FAL 2002), für die Abschätzung des Skelettanteils die Vergleichstafeln (FAL 2002) bzw. Blum et al. (1996) und für eine genauere Bodentypbestimmung das Klassifikationssystem der Böden der Schweiz (FAL 2002) bzw. die Österreichische Bodensystematik (Nestroy et al. 2000) bzw. der Bestimmungsschlüssel nach Kilian (2002).

### 4.3.3 Abschätzung II

#### Anwendung der Methode nach Rickli und Forster (1997) im Gelände

Im Anschluss an die Abschätzung des Abflussbeiwertes mit der Geländeanleitung (Markart et al. 2004) wurde für die vorliegende Arbeit am selben Standort der Abflussbeiwert nach Rickli und Forster (1997) abgeleitet.

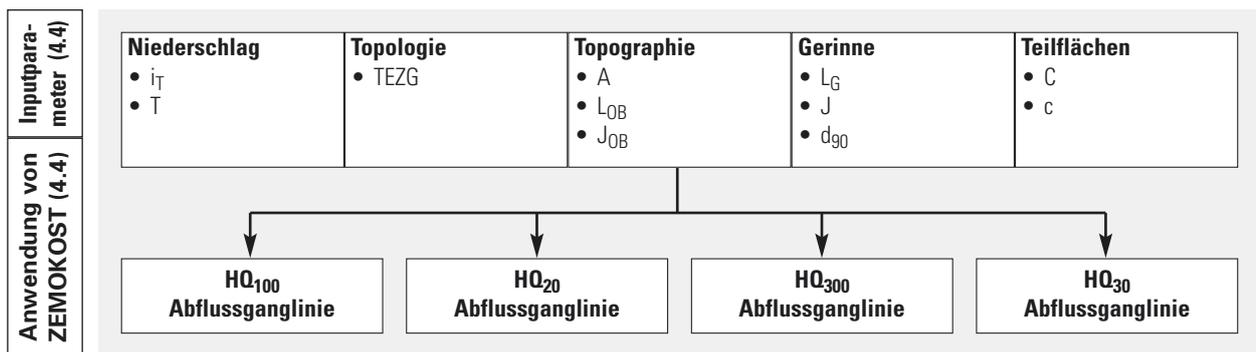


Abbildung 4-7: Detail aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3). Erklärung der Akronyme siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Kapitel 3.3

#### 4.4 Anwendung des Programms ZEMOKOST

Die ins GIS übertragenen Kartierungsergebnisse (vgl. Abbildung 4-2) können direkt in das Programm ZEMOKOST eingegeben werden.

Die essentiellen Input-Parameter für ZEMOKOST sind in Tabelle 3-6 (vgl. Kapitel 3.3) aufgelistet. Hilfreich kann die Zusammenstellung der einzelnen Inputparameter in einer separaten Datei (z.B. Microsoft-Excel) sein.

Sind alle Parameter ermittelt und in die einzelnen Tabellenblätter des Excel-Formulars von ZEMOKOST übertragen, kann die Berechnung der Abflussmengen und Ganglinien erfolgen (vgl. Abbildung 4-7).

#### 4.5 HQ-Abschätzung mit der Geländeanleitung und ZEMOKOST am Beispiel Eistlenbach

##### 4.5.1 Einzugsgebietsübersicht

Die in Tabelle 4-6 angeführten Gebietscharakteristika sind aus dem GIS abgeleitet. Sie entsprechen den Daten aus den in Kapitel 4.1 vorgestellten Kartengrundlagen. Die Angaben zum Klima sind dem „Atlas der Schweiz“ (ETHZ 2005) und jene zu den Niederschlagsverhältnissen dem HADES (SWIS-STOPO 2007) entnommen.

##### Teileinzugsgebietsgliederung

Der Ausschnitt der Landeskarte enthält auch das Gewässernetz, inklusive Trockenrinnen definiert nach Schaffner (2007), und wurde mit Feldbeobachtungen ergänzt. Es wurden die Knotenpunkte (Einmündung seitlicher Zubringer aus den Teileinzugsgebieten) festgelegt und die entsprechenden Wasserscheiden

am GIS berechnet. Anschließend erfolgte eine Anpassung von Hand, weil die resultierenden Teileinzugsgebietskonturen teilweise Überschneidungen bzw. sonstige Ungenauigkeiten aufweisen. Die gewählte Teileinzugsgebietsgliederung (Abbildung 4-8) wurde für alle folgenden Arbeitsschritte beibehalten.

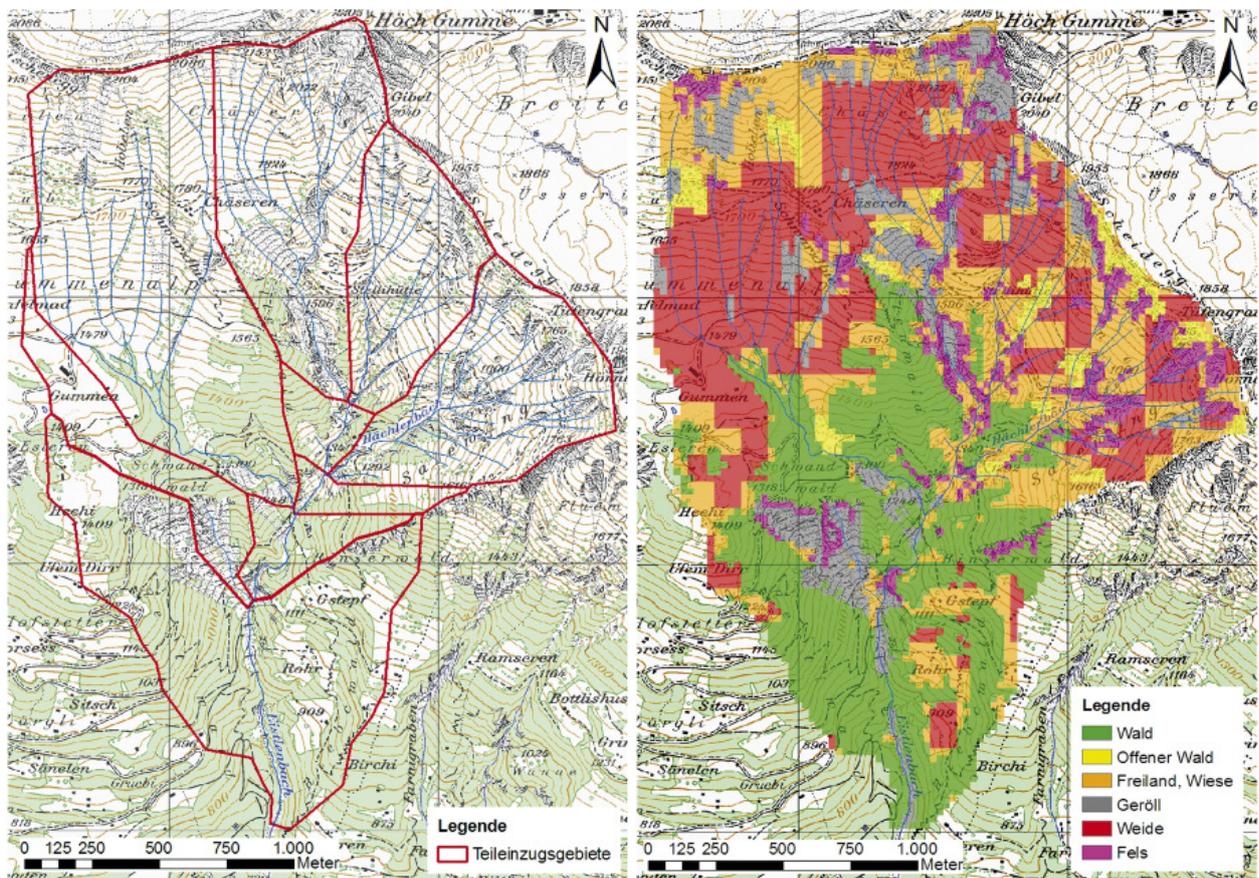
##### Vegetation

Das Einzugsgebiet des Eistlenbachs ist vor allem im unteren Bereich von ausgedehnten Waldflächen in meist steiler Lage gekennzeichnet (LK25, PF, Astat). Es handelt sich dabei in den tieferen Höhenstufen um Kalk-Buchenwälder, welche fließend in den typischen Heidelbeer-Fichtenwald der subalpinen Nadelwaldzone übergehen (Hegg et al. 1993). Ausgeprägte Humusaufgaben lassen auf Böden mit hohem Aufnahmevermögen schließen. Ab einer Höhe von 1500 m öffnen sich die Waldflächen allmählich und gehen in Wiesen, Almweiden und alpine Rasen auf sehr stark geneigten Hängen über. Diese Einheiten sind typisch für den oberen Teil des Eistlenbachs und durch eher flachgründige Böden charakterisiert. Sie werden an vielen Stellen von Oberflächenwasser aus den überliegenden Felsbereichen linear durchschnitten.

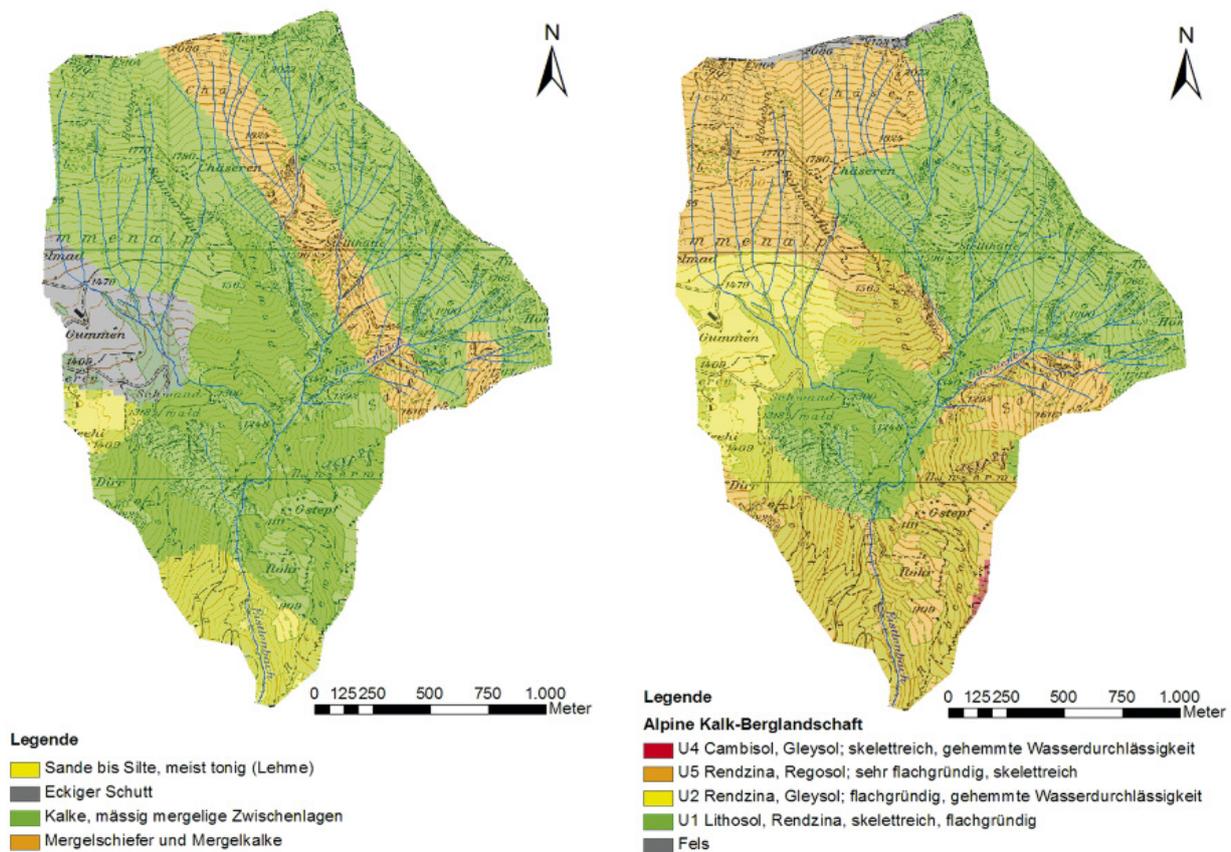
##### Boden

Die BEK (EJPD 1980) weist vor allem auf die Kategorien U1, U2 und U4 hin, wobei U für alpine Kalk-Berglandschaften steht. Die Zahlen geben Auskunft über die Formelemente der Landschaft, den Bodentyp, die Bodeneigenschaften und die Hangneigung. Daraus lässt sich ableiten, dass der Eistlenbach hauptsächlich aus flachgründigen, skelettreichen und annähernd normal durchlässigen Gesteinsböden, Rendzinen oder Regosolen mit teilweise sehr geringem Wasserspeichervermögen besteht.

<b>Tabelle 4-6: Kennzahlen des Eistlenbaches</b>	
<b>Allgemein</b>	
Gemeinde	3858 Hofstetten bei Brienz, BE
Fläche	3,94 km <sup>2</sup>
Höhendifferenz	680-2205 m ü. M.
Kartenblätter (LK25)	1189, 1209
Geologietyp	Kalk
Exposition	S
<b>Klima</b>	
Hageldauer (Total Sommer)	10-30 min
Jährliche Gewitterhäufigkeit (1931-1980)	15-20 d Jahr <sup>-1</sup> (v.a. im Sommer)
Typische Winde	Föhntal
Frühlingseinzug anhand der Löwenzahnblüte	15.Mai - 1.Juni
<b>Niederschlag</b>	
Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1951-1980, Tafel 2.2)	1400-2400 mm Jahr <sup>-1</sup>
Extreme Punktregen (1h, 100-jährlich) (1901-1970, Tafel 2.4)	65 mm h <sup>-1</sup>
Mittlere Niederschlagshöhe Juni-August (1971-1990, Tafel 2.7)	500-600 mm
Mittlerer jährliche Verdunstungshöhe (1973-1992, Tafel 4.1)	300-500 mm Jahr <sup>-1</sup>



**Abbildung 4-8:** Übersicht und Gliederung der Teileinzugsgebiete im EZG Eistlenbach, sowie Bodennutzungskarte (PF, Astat) (Kartendaten: reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091346))



**Abbildung 4-9:** Geotechnische Karte (GET) und Bodeneignungskarte (BEK) für das EZG Eistlenbach (Kartendaten: reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091346))

Die zahlreichen Runsen unterhalb der Felsflanken im oberen Teil des Einzugsgebietes (Schaffner 2007) deuten auf ungünstige Infiltrationsbedingungen der Böden hin.

### Geologie

Den größten Teil des Einzugsgebietes Eistlenbach machen die massigen Kalke mit mergeligen Zwischenlagen (19, GET) aus. Die Brüchigkeit dieser Kalke und Mergel wird zusätzlich durch die zahlreichen Trockenrunsen unterhalb der felsigen Gebiete unterstrichen. Da davon ausgegangen werden kann, dass im Hochwasserfall diese Runsen Wasser führen, ist ihr Beitrag in der Abflussabschätzung unbedingt zu berücksichtigen.

Abflussfördernd ist ein Band aus Mergelschiefer und Mergelkalke (Nr. 21 in der GET), das sich im oberen Bereich von Nordwest nach Südost erstreckt.

Einen beträchtlichen Flächenanteil weisen mit Schutt und Geröll bedeckte Flächen auf. Sie treten in direktem Anschluss an Felsbänder auf, aber auch an sämtlichen steilen Hängen entlang des Hauptbaches. Der Flurname ‚Alpriset‘ (Riset = Rutschung) weist auf dieses Lockermaterial hin.

### Hinweise auf Vernässungen/Kleingerinnennetz

Die Kategorie U2 (BEK), ein Hinweis auf Gleyböden im Gebiet der ‚Gummenalp‘, lässt in diesem Bereich eine höhere Abflussdisposition erwarten. Sonst lassen sich aus den vorhandenen Kartengrundlagen keine Hinweise bezüglich Vernässungen ableiten.

Besonders deutlich werden Kleingerinne und Runsen in den Luftbildansichten (swissimage); (vgl. Abbildung 4-10), die zugleich auch Aussagen über die Beschaffenheit der Rinnen ermöglichen. In den höheren Lagen der Wiesen- und Rasenflächen sind die Gerinne, im Gegensatz zu weiter unten liegenden Runsen, meist frei von Hochstauden oder sonstigem Bewuchs.

### Bewirtschaftung/Nutzung

Als primäre abflussrelevante Nutzung im Eistlenbach ist nach der Bodennutzungskarte (Astat, PF) die Almwirtschaft anzusehen. Alle übrigen Gebiete sind von Wald bewachsen oder ungenutzte Flächen wie Fels, Geröll und sonstiges Freiland. Die Angaben unter [www.alporama.ch](http://www.alporama.ch) (28.6.2007) deuten



Abbildung 4-10: Luftbild Eistlenbach mit Teileinzugsgebietgliederung (Kartendaten: reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091346)).

auf eine relativ intensive Bestoßung (vor allem in den Sommermonaten hin), wobei auch Waldweide üblich ist.

### Maßgebliche Systemzustände für das realistische Bad-Case Szenario

Es ist davon auszugehen, dass sich der Systemzustand durch die intensive Beweidung im Verlaufe des Sommers zunehmend verschlechtert. Die Wahrscheinlichkeit von Gewittern ist im Spätsommer besonders groß. Die Wolken stauen sich an den Berggipfeln und führen im kesselförmigen Einzugsgebiet zu konvektiven Starkniederschlägen hoher Intensität (vgl. Tabelle 4-6). Die Wetterlagen werden im Eistlenbach einerseits von den Föhn-

lagen des Aaretals und der Nähe zum Brienersee bzw. ausgiebigen Niederschlägen der Inner- und Ostschweiz aus nordöstlicher Richtung bestimmt.

### 4.5.2 Feldbegehung

Die Geländebegehung im Eistlenbach (Abbildung 4-10) erfolgte an insgesamt 5 Tagen.

### Gerinnebeurteilung

Im Eistlenbach war es aufgrund der extremen Steilheit nicht möglich jeden Knotenpunkt nach den in Kapitel 4.3.1 angeführten Kriterien zu beurteilen. Lokal erfolgten Ansprachen aus der Distanz über Feldstecher oder Ableitungen aus Abschätzungen angrenzender Gerinneabschnitte.

Für neun repräsentative Hydrotope/hydrologische Oberflächenformen wurde ein Aufnahmeformular ausgefüllt. Alle übrigen Teilflächenabschätzungen ergaben sich entweder aus Vergleichen mit bereits angesprochenen Einheiten oder aus Beobachtungen mittels Feldstecher (als Notizen im Feldbuch erfasst). Insgesamt wurden 18 verschiedene Vegetations- oder Landbedeckungsformen ausgewiesen (Tabelle 4-7).

Die Einschätzungen der Vorausscheidung am GIS wurden durch die Geländebegehung in sehr vielen Fällen bestätigt.

Die stark bewaldeten Bereiche im unteren Teil des Eistlenbaches weisen aufgrund der lockeren, mächtigen Waldbodenprofile und einer dichten Kraut- und Strauchschicht auf eine geringe Oberflächenabflussdisposition hin (Akl 1/Rkl 5). Diese Verhältnisse verändern sich, sobald die Hänge steiler werden und reine Fi-Bestände dominieren. Eine Bodenbedeckung durch Vegetation ist auf diesen Einheiten kaum vorhanden (*Piceetum nudum*). An der Bodenoberfläche waren teilweise Fließspuren vergangener Regenfälle erkennbar (Akl 2/Rkl 2).

Mit zunehmender Seehöhe gehen die Bestände in einen typischen Fichten-Heidelbeer-Wald mit

ausgesprochen günstigen hydrologischen Bedingungen über (Akl 1/Rkl 6). Bei den nordwestlich gelegenen Waldpartien des ‚Altenwaldes‘ waren noch deutliche Spuren einer Bestandesnutzung bzw. von Sturmschäden erkennbar. Nach der Geländeanleitung ist auf solchen Flächen mit einer langjährigen Beeinträchtigung der hydrologischen Waldwirkung zu rechnen und sicherheitshalber der Abflussbeiwert um eine Klasse zu erhöhen (Akl 2/Rkl 4). Lokale Bereiche mit hydrophobem Oberboden wirken zusätzlich abflussverschärfend (Akl 3/Rkl 3). Die Abflussdisposition der verschiedenen Einheiten wurde auch durch Ausschütten von Wasser und der Beobachtung der bis zur vollständigen Einsickerung zurückgelegten Fließstrecke abgeleitet.

Grünerlen und Weidenstandorte wurden in Akl 3/Rkl 4 und schlechter eingeordnet.

Auf den Weideflächen der ‚Gummenalp‘ wurden massive Trittschäden festgestellt. Dichtezeiger (wie Alpenwegerich) und typische Weidezeiger (wie Kammgras, Alpenlattich, Borstgras) sind in großer Zahl vorhanden. *Heidekraut* und der vom Vieh gemiedene Wacholder erhöhen die Rauigkeit. Der Boden entspricht einer typischen Braunerde, ist aber durch die intensive Beweidung stark verdichtet und ohne Auflage (Akl 4/Rkl 2).

Entlang des westlichen Randes des Einzugsgebietes verläuft ein über mehrere Meter breiter, jüngst planierter Streifen einer verlegten Gasleitung. Das natürliche Bodengefüge ist hier stark beeinträchtigt und die Oberfläche durch Befahren verdichtet (Akl 4/Rkl 2).

Die Weideintensität nimmt mit zunehmender Seehöhe merklich ab (Akl 3/Rkl 4), die Böden werden flachgründiger und weisen zunehmend einen höheren Grobanteil auf. Die immer spärlicher werdende Vegetation beschränkt sich auf Gräser und Rosetten- oder Kriechpflanzen (Hemikryptophyten). Besonders an den nordöstlichen Hängen des Einzugsgebietes treten Rostseggenhalden auf, eine typische Vegetationsform feuchter Runsen (Akl 4/Rkl 2).

Die obersten Kalkfelspartien sind, aufgrund ihrer Klüftung und damit günstigeren Wasseraufnahmefähigkeit, einer etwas niedrigeren Abflussklasse zuzuordnen (Akl 4/Rkl 2) als die Mergelschiefer (Akl 5/Rkl 1). Die Hangschuttflächen/Geröllhalden im obersten Teil des EZG und die erodierten Flächen, wie die ‚Alpriseten‘, haben einen geringen Einfluss auf die Abflussbildung im Hochwasserfall (Akl 1/Rkl 6). Dagegen sind die Rutschflächen und offenen Flächen entlang des

**Tabelle 4-7:** Abflussbeiwert-, Rauigkeitsklassen für die verschiedenen Vegetations- und Landbedeckungsformen des Eistlenbaches ermittelt nach Markart et al. (2004) und die entsprechenden Abflusskoeffizienten nach Rickli und Forster (1997).

Vegetationsform/ Landbedeckung	Abflussbeiwertklasse	Rauigkeitsklasse	Abflusskoeffizient
Sonstige Rasen und Gräser	4	2	0,25
Planie	4	2	0,35
Weide/Mähwiese	4; 3; 4	3; 2; 2	0,35
Bürstlingrasen mit Heide, beweidet	4; 4	4; 2	0,35
Alpenrosenheide	2	5	0,15
Nadelwald	1	6	0,05
Mischwald	1	5	0,05
Laubwald	2	2	0,15
Erlengebüsch	4	4	0,35
Fels Kalk	3	2	0,4
Fels Mergelschiefer	5	1	0,7
Fels und Erlen	4	4	0,4
Föhre und Erle in Steillage	3	5	0,25
Geröll	1	6	0,1
Rutschung	4	2	0,6
Gerinne	5	1	0,6
Strasse	5	1	0,8
Hof	5	2	0,4

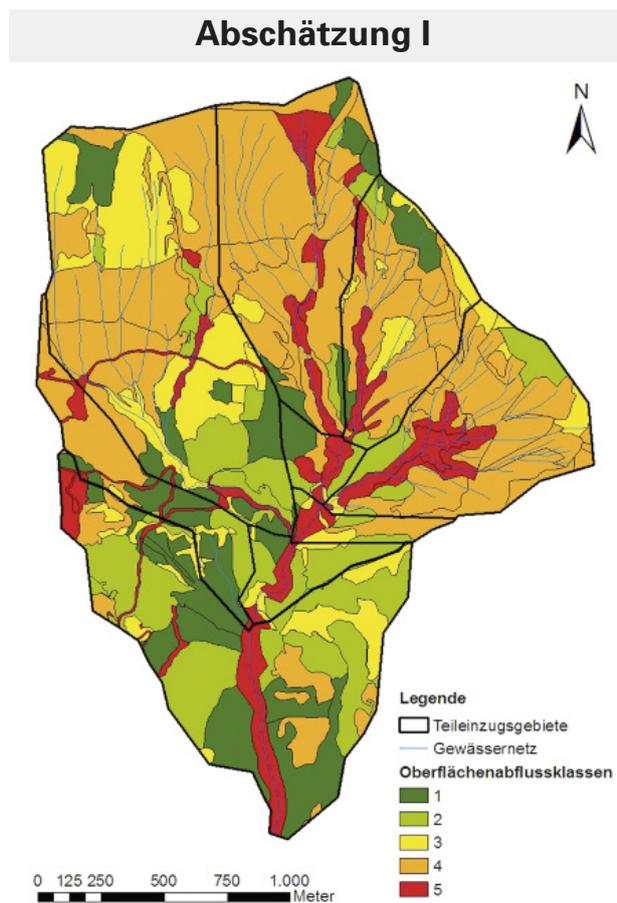
Gerinnes im Starkregenfall stark abfluss- und abtragswirksam (Akl 4/Rkl 2).

Die Einheit „Binserwald“ (Waldbestand von Buche dominiert) wird wegen des spärlichen oder gänzlich fehlenden Unterwuchses und sonstiger Bodenvegetation etwas schlechter bewertet als die übrigen Waldflächen (Akl 2/Rkl 2).

Tabelle 4-7 enthält neben den Abflusskoeffizienten nach Markart et al. (2004) auch jene nach Rickli und Forster (1997).

### Hinweise zur Abschätzung der Gerinneverhältnisse im Feld

Vereinfacht können die seitlichen Gerinneabhängungen (ein- bis zweifache Gerinnebreite) zum Gerinne

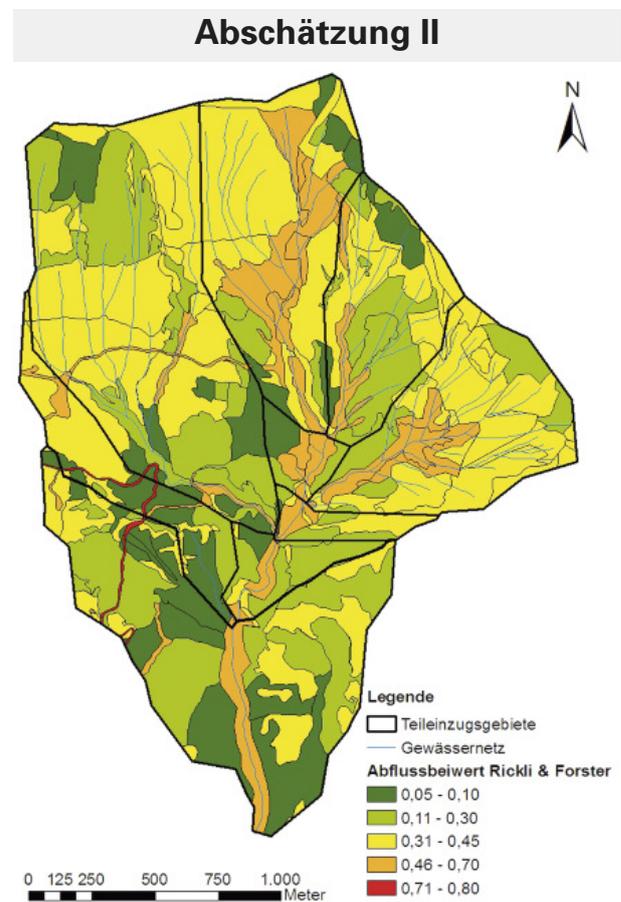
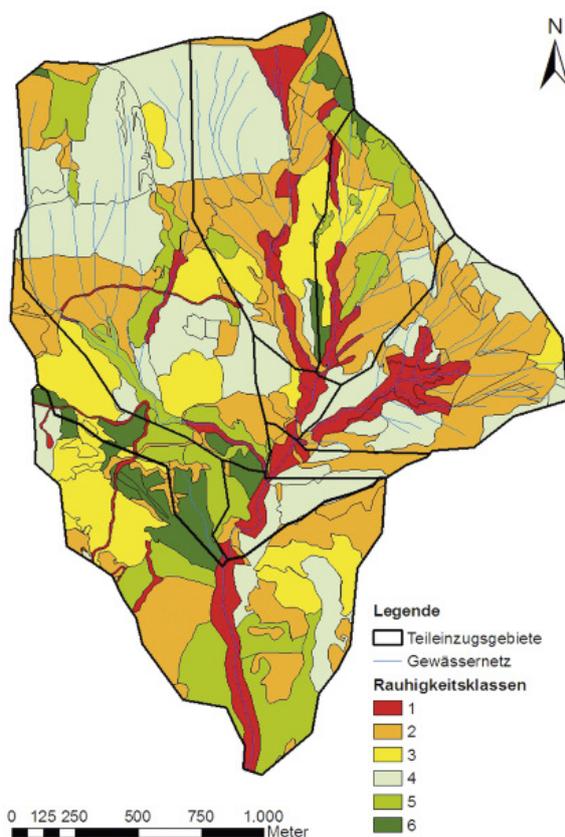


dazu gerechnet werden. Bei aktuellen oder sich abzeichnenden Nachböschungsprozessen (offene Flächen) kann dieser Streifen deutlich größer sein. Bei Straßen, Höfen oder sonstigen Gebäuden wird in der Regel mit hohem Abfluss gerechnet, da es sich um versiegelte Flächen handelt. Die Zuordnung der Abflussklasse 5 kann gerade bei Almgebäuden und Stallungen, infolge intensivster Nutzung, um eine Fläche von drei- bis maximal zehnfacher Größe des Stallgebäudes erweitert werden. Verdichtete Flächen sollten aber als solche erkennbar sein (Lägerflur, deutlich reduzierte Bodendeckung).

#### 4.5.3 Kartenerstellung

Die drei für den Eistlenbach erstellten Karten sind in Abbildung 4-11 dargestellt.

Auf den ersten Blick fällt die für den Eistlenbach typische Zweiteilung der Einzugsgebietsfläche auf. Die nach der Geländenanleitung Markart et al. (2004) erstellte Abflussbeiwertkarte weist für den oberen Bereich des EZG abflussfreundige Teilflächen (Weiden und flachgründige, sehr steile Grashänge)



**Abbildung 4-11:** Karten zu den Teilflächen im EZG Eistlenbach mit den entsprechend abgeschätzten Oberflächenabfluss- und Rauigkeitsklassen (Markart et al. 2004), sowie Abflusskoeffizienten nach Rickli und Forster 1997.

aus. Der stark bewaldete untere Teil hat vergleichsweise geringen Einfluss auf das Abflussgeschehen.

Deutlich geringere Abflussdispositionen ergeben sich beim Vorgehen gemäß Rickli und Forster (1997).

#### 4.5.4 Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST

Das Laufzeitverfahren erfordert die Eingabe der in Kapitel 3.3 angeführten Inputparameter.

##### Niederschlagsparameter

Die erforderlichen Niederschlagsdaten wurden nach den im Kapitel 4.1.2 angeführten Vorgaben ermittelt. Für den Eistlenbach sind die Niederschlagsmessstationen *Brienz-Kienholz* und *Lungern* charakteristisch (Röthlisberger et al. 1979: Bde. 3, 4).

Vor Verwendung der extremen Punktregen aus den Tafeln 2.4 und 2.4<sup>2</sup> (HADES, digital), wurden sie mit den regional dargestellten Angaben der entsprechenden Kartenblätter des HADES (swiss-topo 2007) verglichen.

Die Berechnungen der jeweiligen Niederschlagsintensitäten für die Dauerstufen der Wiederkehrperioden von 100, 20, 300 oder 30 Jahren erfolgten beim Eistlenbach mittels 2. Extremalverteilung.

##### Hinweis zu den verschiedenen Funktionen von ZEMOKOST

Im Modell ist eine Funktion integriert, welche dem Anwender für dieselben Niederschlagsintensitäten

und Jährlichkeiten verschiedene Berechnungsvarianten gewährt. Der Nutzer kann entscheiden, welche Wertebereiche der Abflussbeiwerts- und Rauigkeitsklassen (obere, untere Klassengrenze, Klassenmitte) in die Berechnung aufgenommen werden sollen. Damit hat er die Möglichkeit, die Ausgangsbedingungen in einem Einzugsgebiet, also gewissermassen den Systemzustand, festzulegen.

Indem er dem Programm beispielsweise signalisiert, jeweils nur die oberen Abflussbeiwerte eines Klassenbereiches zu wählen, setzt er automatisch schlechtere Systembedingungen voraus (Tabelle 4-8: orange Zeile). Lässt er das Modell auch noch die unteren Rauigkeitswerte der Klassenbereiche in die Berechnungen mit einbeziehen, so werden die absolut schlechtesten der möglichen Voraussetzungen angenommen (Tabelle 4-8: rote Markierung, Akl: o, Rkl: u). Folglich ergeben die Hochwasserabschätzungen für diese Annahmen eindeutige Höchstwerte bezüglich der Abflussspenden.

Normalerweise wird die Standardeinstellung beibehalten, welche sowohl für die Abflussbeiwerte als auch für die Rauigkeitswerte jeweils den Mittelwert des abgeschätzten Klassenbereichs in die Berechnung integriert (Tabelle 4-8: gelbe Zeile, Akl: m, Rkl: m). Eine Übersicht aller Ergebnisse ist in Tabelle 11-5 dargestellt. Analog zu den eben beschriebenen Klassenbereichen werden hier die Kennzeichnungen o, m und u für ‚obere Werte‘, ‚mittlere Werte‘ und ‚untere Werte‘ verwendet.

**Tabelle 4-8:** Resultate der HQ-Abschätzungen mit ZEMOKOST im Eistlenbach.

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Eistlenbach						
Niederschlagsinput		Brienz, Kienholz	Lungern (1905-1977)	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>	
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]			
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)				
T100	o	u	34,9	90,7	33,6	17
		m	30,9	82,4	29,7	14,9
	m	u	23,7	63,1	22,9	11,5
		m	20,7	56,5	20	10
	u	m	12,4	34,4	12,2	6,1
T20	o	u	16,3	32,2	16,8	9,8
		m	14,2	28,5	14,6	8,4
	m	u	10,9	22	11,2	6,5
		m	9,4	19,2	9,7	5,6
	u	m	5,8	11,7	5,9	3,4

## Resultate der Berechnungen mit ZEMOKOST ( $HQ_x$ )

Für die Niederschlagsmessstation Lungern ergeben sich extrem hohe  $HQ_x$ -Werte. Die Ursache dafür liegt in den deutlich höheren Niederschlagsintensitätsmesswerten für alle Dauerstufen in Lungern. In Anbetracht der übrigen Ergebnisse, die durch geringere Abweichungen einheitlicher erscheinen, ist davon auszugehen, dass diese Schätzungen mit den Inputdaten der Station Lungern kaum repräsentativ sein können. Trotz der Nähe dieser Station zum Einzugsgebiet dürfte die Tatsache, dass sie sich in nordöstlicher Richtung (jenseits des Brünigpasses) befindet, ausschlaggebender sein. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Messstation Lungern von den Betrachtungen ausgeschlossen. Die mit den Niederschlagsmesswerten der HADES-Tafel 2.4<sup>2</sup> ermittelten  $HQ$ -Werte erscheinen sehr niedrig.

In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Niederschlagsdaten der Station Brienz die für den Eistlenbach typischen Niederschlagsverhältnisse am besten repräsentieren (Tabelle 6-1).

Im Vergleich mit den  $HQ_{100}$ -Abschätzungen über HAKESCH (Sury 2006), ein in Kapitel 1.2 kurz erläutertes Abschätzverfahren, zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung. Sury verwendete für die Abschätzungen mit HAKESCH im Eistlenbach ausschließlich die Daten der HADES-Tafel 2.4. Wird von einem mittleren Systemzustand (Akl: m, Rkl: m) ausgegangen, stimmen die  $HQ_x$ -Schätzungen von ZEMOKOST mit jenen von HAKESCH überein. HAKESCH schlägt für ein  $HQ_{100}$  eine Abflusshöhe von  $24.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  und für ein  $HQ_{20}$  von  $14.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  vor.

Eine noch bessere Übereinstimmung ergibt sich, wenn für die  $HQ_x$ -Schätzungen schlechtere Ausgangsbedingungen angenommen werden (z.B. Akl: m, Rkl: u). Es ist jedoch unklar, inwiefern derartige Modelleinstellungen der Realität entsprechen.

## 5. Anwendungen

### 5.1 Untersuchungsgebiete

Wie in der Einleitung angedeutet, konzentrierte sich der Test der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) auf sechs Einzugsgebiete der Schweiz. Die Ergebnisse der Untersuchungen und Berechnungen für den Eistlenbach wurden ausführlich im vorhergehenden Kapitel präsentiert. Im Folgenden erfolgt eine geraffte Darstellung der Resultate aus den fünf weiteren Testgebieten. Die räumliche Lage ist aus Abbildung 5-1 ersichtlich, Tabelle 5-1 gibt eine Kurzcharakteristik.

### 5.2 Ergebnisse der Anwendung der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) und von ZEMOKOST auf die weiteren Testgebiete

Die untersuchten Gebiete liegen am Alpennordrand des Kantons Bern (Abbildung 5-1). Insgesamt handelt es sich um sechs relativ kleine Einzugsgebiete, mit Flächenausdehnungen von  $0,61 \text{ km}^2$  (Sperbelgraben) bis  $5,19 \text{ km}^2$  (Dürrenwaldbach). Die maximale Seehöhe variiert zwischen  $2922 \text{ m SH}$  (Hostetbach) bzw.  $1110 \text{ m SH}$  (Witenbach).

Siedlungsflächen sind nur in untergeordnetem Umfang vertreten, z.B. im tiefsten Teil des Spissibachs.

Die Abbildungen 5-2 bis 5-7 zeigen die wichtigsten Landbedeckungseinheiten und -formen und sollen einen Eindruck der einzelnen Testgebiete vermitteln. Einsicht in die gesamten Resultate der Hochwasserabschätzungen gibt Tabelle 11-5.

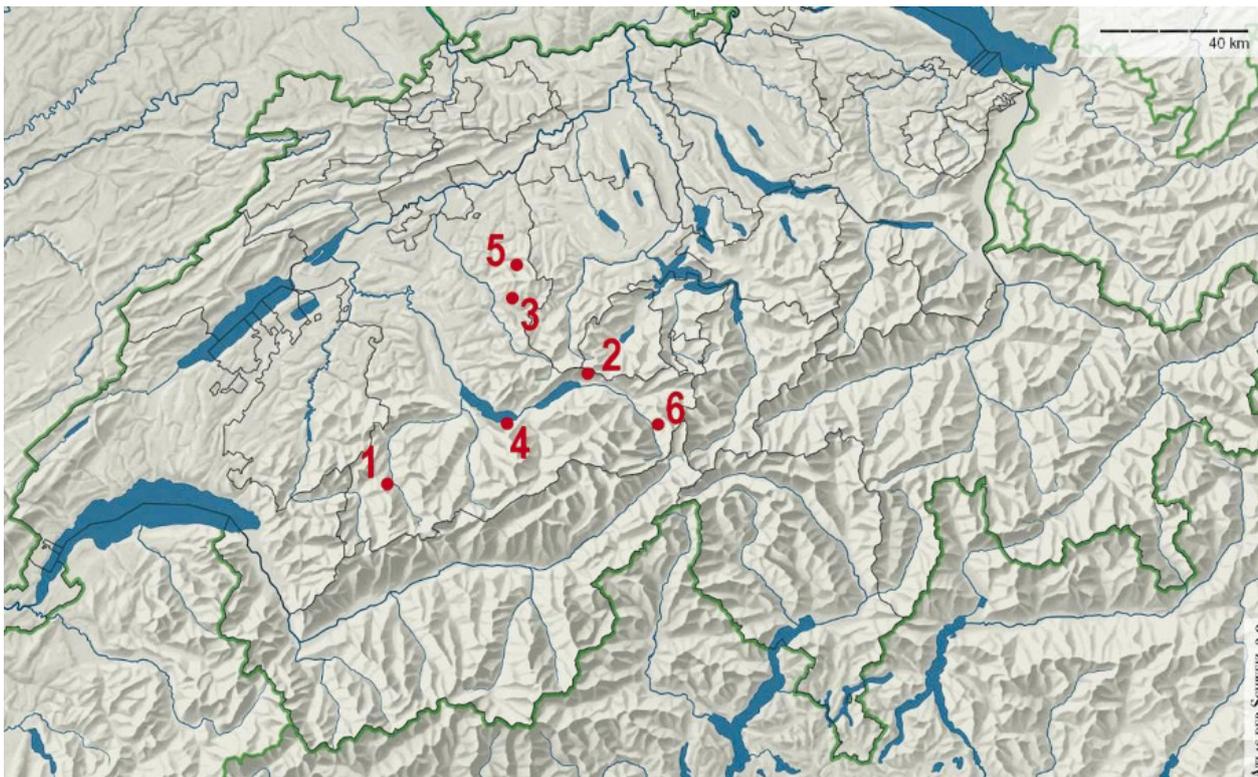


Abbildung 5-1: Lage der sechs Einzugsgebiete (Kartengrundlage: Atlas der Schweiz 2.0, Kartographie ETHZ, 2005).

Tabelle 5-1: Kurzcharakteristik der sechs Testgebiete.

Bach-Name	Gemeinde, Kanton	Geologietyp	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Mittlere Höhe [m ü.M.]	Abbildung
Dürrenwaldbach	St. Stephan, BE	Flysch/ Bündnerschiefer	5,19	1689	5-2
Eistlenbach	Hofstetten, BE	Kalk	3,94	1443	5-3
Witenbach	Langnau, BE	Molasse	4,04	915	5-4
Spissibach	Leissigen, BE	Flysch/Bündnerschiefer	2,64	1427	5-5
Sperbelgraben	Wasen i. E., BE	Molasse	0,61	1057	5-6
Hostetbach	Guttannen, BE	Kristallin	4,02	1961	5-7



Abbildung 5-2: Wichtige Landbedeckungsformen im Eistlenbach.



Abbildung 5-3: Wichtige Landbedeckungsformen im Dürrenwaldbach.



Abbildung 5-4: Wichtige Landbedeckungsformen im Witenbach.



Abbildung 5-5: Wichtige Landbedeckungsformen im Spissibach.



Abbildung 5-6: Wichtige Landbedeckungsformen im Sperbelgraben.



Abbildung 5-7: Wichtige Landbedeckungsformen im Hostetbach.

## 5.2.1 Dürrenwaldbach

### Einzugsgebietsübersicht

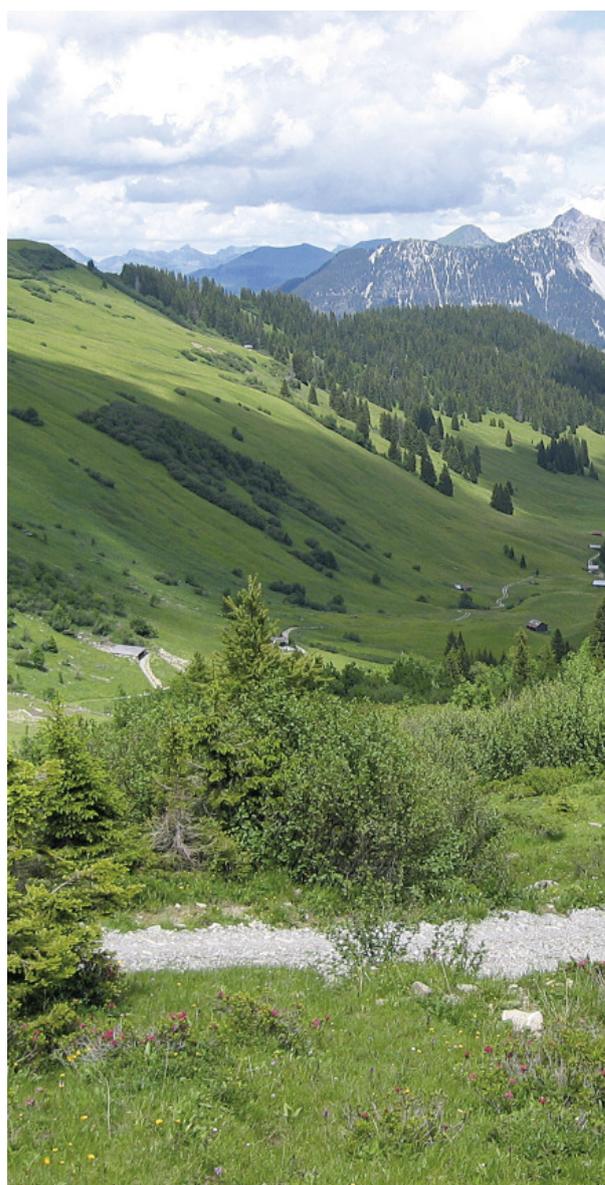
Tabelle 5-2: Kennzahlen des Dürrenwaldbaches.	
<b>Allgemein</b>	
Fläche	5.19 km <sup>2</sup>
Höhendifferenz	1016-2362 m ü. M.
Gemeinde	3772 St. Stephan, BE
Fläche	5.19 km <sup>2</sup>
Kartenblätter (LK25)	1246, 1266
Geologietyp	Flysch/Bündnerschiefer
Exposition	SE
<b>Niederschlag</b>	
Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1951-1980, HADES Tafel 2.2)	1400-2000 mm Jahr <sup>-1</sup>
Extreme Punktregen (1h, 100-jährlich) (1901-1970, HADES Tafel 2.4)	40 mm h <sup>-1</sup>

#### Typische Merkmale:

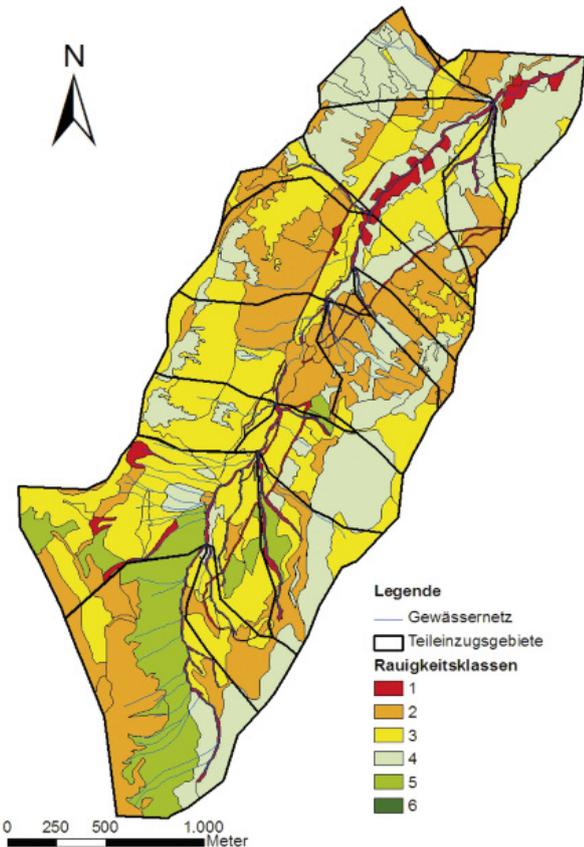
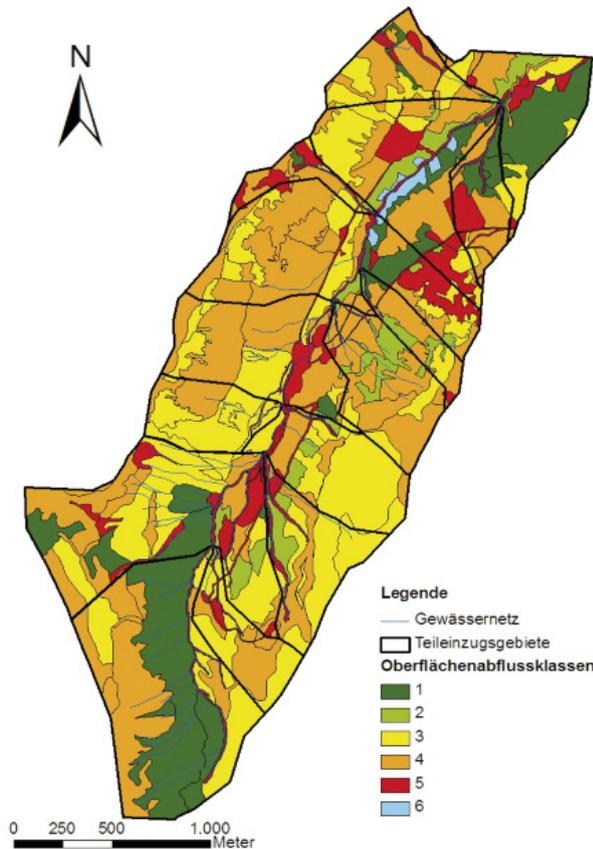
- Geringer Waldflächenanteil
- Heidelbeer-Fichten-Wälder bis alpine Rasen
- Intensiv genutzte Weideflächen dominieren
- Waldweide vorhanden
- Zahlreiche Feuchtwiesen (z.T. beweidet) und ver-nässte Flächen mit entsprechender Rinnenbildung
- Zwergstrauchvegetation mit Alpenrose (v.a. NW-Hänge)
- In Abflussrichtung geschichtete Felsbänder aus Mergelschiefer- und Kalkphylliten (v.a. oberer Bereich des EZG)

Tabelle 5-3: Dominante Einheiten des Dürrenwaldbaches (Teilflächengliederung).

Vegetationsform/ Landbedeckung	Abflussbeiwertklasse	Rauigkeitsklasse	Abflusskoeffizient
Weide	4	2	0,35
Mähwiese	3	3	0,25
Alpenrosenheide mit Borstgras, beweidet	3	3	0,35
Nadelwald	2	4	0,15
Nadelwald, dicht	1	4	0,05
Nadelwald, beweidet	3	3	0,25
Feuchtwiesen	4	3	0,45
Fels Flysch, Kalk	4	2	0,65
Geröll	1	5	0,1



### Abschätzung I



### Kartenerstellung

Folgende Aspekte werden aus Abbildung 5-8 deutlich erkennbar:

- intensive Weidenutzung und Verdichtung
- geringer Waldanteil
- Feuchtwiesen

### Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST

Tabelle 5-4: Resultate der HQ<sub>100</sub>-Abschätzungen mit ZEMOKOST im Dürrenwaldbach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang).

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Dürrenwaldbach			
Niederschlagsinput			HADES 2.4
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)	
T100	o	u	16,2
		m	14
	m	u	11,3
	u	m	6,1

In der vorliegenden Arbeit werden die Niederschlagsmesswerte der HADES-Tafel 2.4 vorgeschlagen (Tabelle 6-1).

Ein Vergleich der HQ<sub>x</sub>-Schätzungen bei mittlerem Systemzustand (Akl: m, Rkl: m) mit jenen von HAKESCH (Sury 2006) macht Differenzen sichtbar. Der Abfluss ergibt für das HQ<sub>100</sub> 17 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Eine bessere Übereinstimmung mit den anderen Berechnungen ergibt sich bei Verwendung der absolut schlechtesten Systemeigenschaften (Akl: o, Rkl: u).

Der Vergleich mit der Empfehlung für ein HQ<sub>100</sub> von 13.9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> aus den Modellberechnungen nach Schaffner (2007) bestätigt die Plausibilität der HQ<sub>100</sub>-Abschätzungen mit ZEMOKOST.

Abbildung 5-8: Karten zu den Teilflächen im Dürrenwaldbach mit den angeschätzten Oberflächenabflusswertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I).

## 5.2.2 Witenbach

### Einzugsgebietsübersicht

Tabelle 5-5: Kennzahlen des Witenbaches.	
Allgemein	
Gemeinde	3550 Langnau im Emmental, BE
Fläche	4,04 km <sup>2</sup>
Höhendifferenz	720-1110 m SH
Kartenblätter (LK25)	1168
Geologietyp	Molasse
Exposition	S
Niederschlag	
Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1951-1980, HADES Tafel 2.2)	1400-2000 mm Jahr <sup>-1</sup>
Extreme Punktregen (1h, 100-jährlich) (1901-1970, HADES Tafel 2.4)	55 mm h <sup>-1</sup>

#### Typische Merkmale:

- rundliche Form des Einzugsgebietes
- Mittelstark verfestigte Konglomerate (Nagelfluh) mit Mergel- und Sandsteinlagen bilden den geologischen Untergrund
- skeletthaltige, mittelgründige Böden, die zu Vernässung neigen können (v.a. in Gerinnenähe und auf stauenden Stufen)
- z.T. unterirdisch angelegte Drainagesysteme
- intensive Weidenutzung im Talboden und an den steilen Flanken
- gut gepflegte und selten beweidete Mähwiesen auf den oberen Stufen
- Fichten- und Tannenwald entlang der steilen Gräben der Zuflüsse und den Geländekanten
- Rutschungen infolge intensiver Waldnutzung

Tabelle 5-6: Dominante Einheiten des Witenbaches.

Vegetationsform/ Landbedeckung	Abflussbeiwertsklasse	Rauigkeitsklasse	Abflusskoeffizient
Weide	4	2	0,35
Weide	3	2	0,25
Mähwiese	2	3	0,25
Nadel-Mischwald	1	4	0,05
Wald, z.T. vernässt, gerinnenah	2	4	0,1
Rutschung im Wald	4	2	0,35
Hof	5	2	0,4



## Abschätzung I

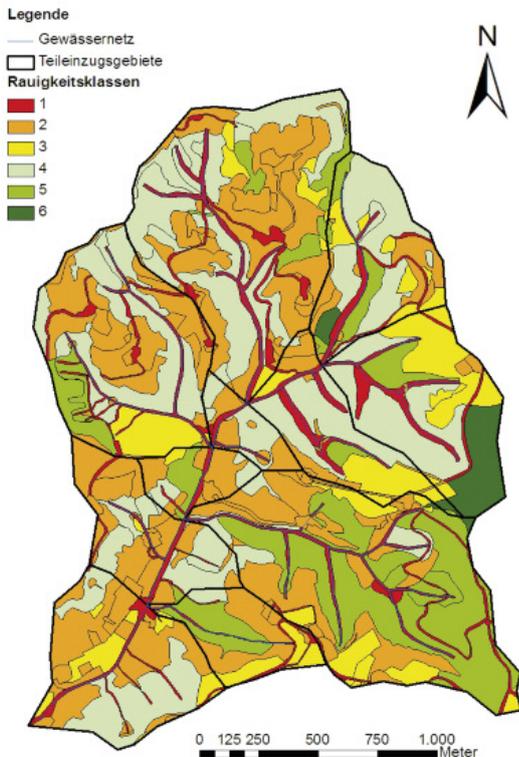
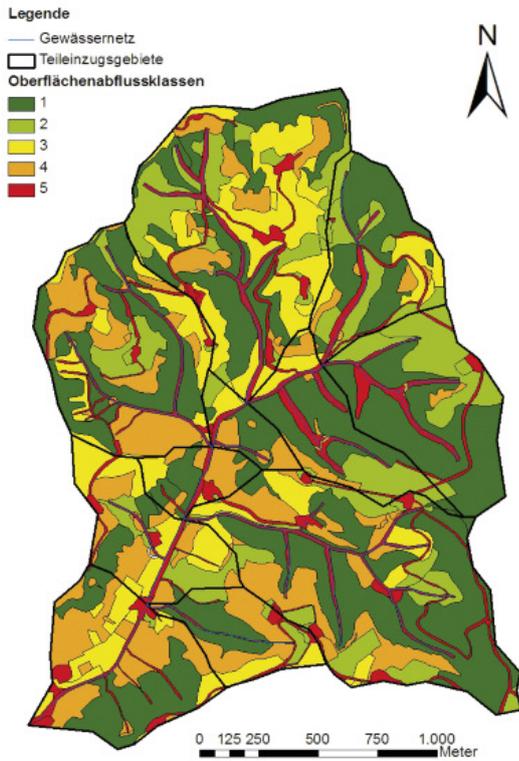


Abbildung 5-9: Karten zu den Teilflächen im Witenbach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I).

## Kartenerstellung

Folgende Aspekte werden in Abbildung 5-9 deutlich erkennbar:

- Unterschied Wald – Weideflächen/Mähwiesen
- Sturmgeschädigter/forstwirtschaftlich genutzter Wald
- Drainierte Flächen haben reduzierte Oberflächenabflussbeiwerte

## Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST

Tabelle 5-7: Resultate der  $HQ_{100}$ -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Witenbach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang).

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Witenbach			
Niederschlagsinput			Escholzmatt
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)	
T100	o	u	15,4
		m	13,3
	m	u	9,8
	u	m	8,5
	u	m	4,9

Vorliegende Arbeit bezieht sich auf die Niederschlagsmesswerte der Station Escholzmatt (Tabelle 6-1). Die Messstation liegt in einem ähnlich engen Graben („Chrachen“) wie sie im Witenbach anzutreffen sind. Sie repräsentiert die Niederschlagsverhältnisse des EZG am besten, insbesondere die typischen, starken Gewitterniederschläge.

Ein erster Vergleich der Resultate mittlerer Systemzustände (Akl: m, Rkl: m) mit jenen von HAKESCH zeigt Unterschiede. HAKESCH schlägt für ein  $HQ_{100}$  24,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> vor. Die Differenzen werden zwar vermindert, sobald von schlechteren Systembedingungen ausgegangen wird (Akl: o, Rkl: u), es wird aber dennoch nicht die Höhe der Werte von HAKESCH erreicht.

Die Situation im Hochwasserfall wird bei Verwendung der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) im Witenbach weniger dramatisch eingeschätzt. Eine mögliche Ursache dafür ist in der Waldwirkung zu sehen, die nach der Gländeanleitung positiv zu bewerten ist. Waldflächen machen einen beachtlichen Teil des Einzugsgebietes aus.

Die mit ZEMOKOST ermittelten Werte liegen jedoch auf einem vergleichbaren Niveau mit dem  $HQ_{100}$  nach Schaffner (2007). Die Regressionsanalyse ergibt ein  $HQ_{100}$  von 11,9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

### 5.2.3 Spissibach

#### Einzugsgebietsübersicht

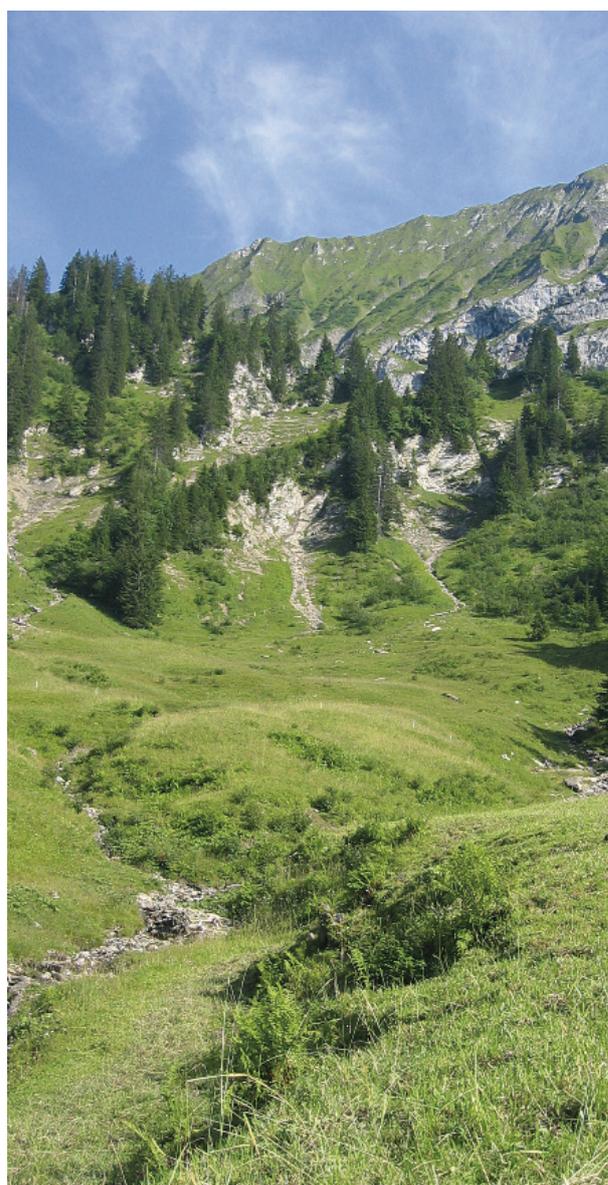
Tabelle 5-8: Kennzahlen des Spissibaches.	
Allgemein	
Gemeinde	3706 Leissigen, BE
Fläche	2,63 km <sup>2</sup>
Höhendifferenz	605-2248 m SH
Kartenblätter (LK25)	1228
Geologietyp	Flysch/Bündnerschiefer
Exposition	N
Niederschlag	
Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1951-1980, HADES Tafel 2.2)	1400-2400 mm Jahr <sup>-1</sup>
Extreme Punktregen (1h, 100-jährlich) (1901-1970, HADES Tafel 2.4)	50 mm h <sup>-1</sup>

#### Typische Merkmale:

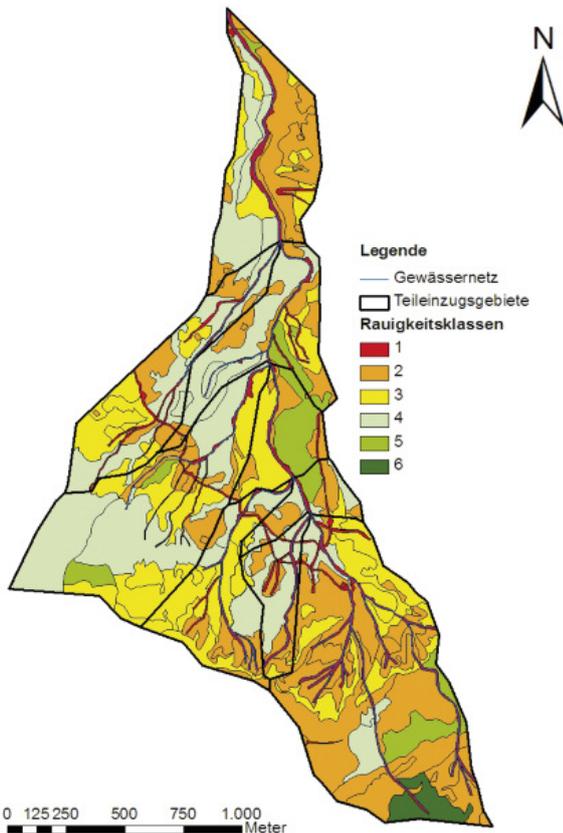
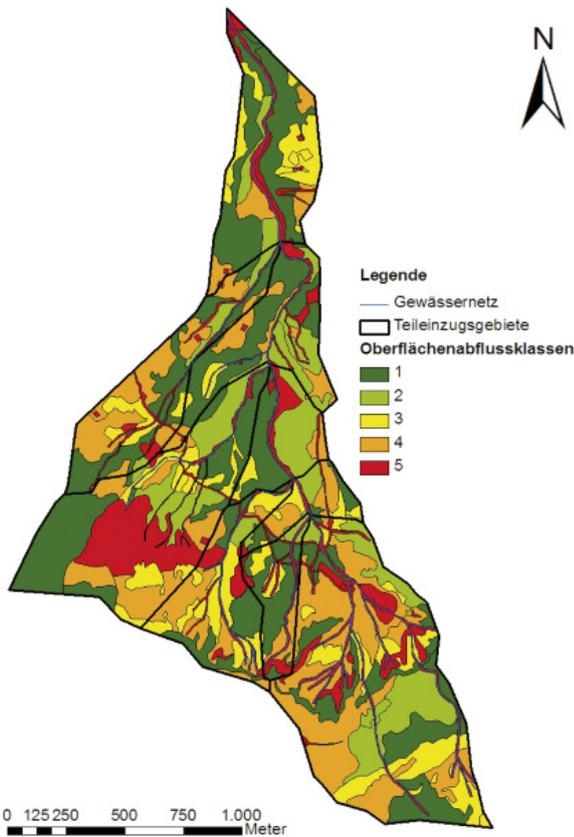
- starkes Gefälle
- Kalkbuchenwälder und subalpine Nadelwälder
- Sehr flachgründige, skelettreiche Böden mit gehemmter Wasserdurchlässigkeit (Ver-nässungstendenz, gleyige Braunerdeböden)
- Zahlreiche Sumpf- und Feuchtflächen (zusätzlich verdichtet durch Beweidung)
- Dichtes Gerinne- und Runsennetz über Mergel-schiefer- bis Kalkphyllit (Ausnahme: stark geklüftete Kalke am „Morgenberghorn“)

Tabelle 5-9: Dominante Einheiten im Spissibach (Teil-flächengliederung).

Vegetationsform/ Landbedeckung	Abflusswertklasse	Rauigkeitsklasse	Abflusskoeffizient
Fichtenwald	1	4	0,05
Fichtenwald, feucht	2	4	0,15
Weide	4	3	0,45
Fulwasser, Niedermoor	5	4	0,55
Fels Kalk	3	2	0,4
Rutschungen	4	2	0,6
Gerinne	5	1	0,6



### Abschätzung I



### Kartenerstellung

Folgende Aspekte werden in Abbildung 5-10 deutlich erkennbar:

- Intensiv beweidete Wiesen
- Feuchtgebiete
- zu Vernässung neigende Teilflächen, Rutschungen
- Unterschied Wald – Weide / Freiflächen

### Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST

**Tabelle 5-10:** Resultate der HQ<sub>100</sub>-Abschätzungen mit ZEMOKOST im Spissibach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang).

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Spissibach			
Niederschlagsinput			Interlaken
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)	
T100	o	u	28,8
		m	24,8
	m	u	19,4
	u	m	16,6
	u	m	10

Interlaken erweist sich, anhand der gemessenen Niederschlagswerte im Spissibach selbst (Spissibach HQ: Internetquelle), als die repräsentativste Messstation. Die HQ<sub>x</sub>-Vorschläge dieser Arbeit beziehen sich daher im Weiteren auf die Niederschlagsmesswerte der Station Interlaken.

Eine Gegenüberstellung der HQ<sub>100</sub>-Abschätzungen mit ZEMOKOST und der Vorschläge von HAKESCH zeigt beachtliche Ähnlichkeit. Das Verfahren HAKESCH schätzt den hundertjährigen Abfluss auf HQ<sub>100</sub> 16 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Berechnungen aus gemessenen Abflüssen im Gebiet (Schaffner 2007) zufolge beträgt ein HQ<sub>100</sub> im Spissibach 14,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Das Modell nach Schaffner (2007) empfiehlt mit HQ<sub>100</sub> 14,2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> einen sehr ähnlichen Wert. Auch diesen Ergebnissen vermögen die Abschätzungen mit ZEMOKOST, unter Annahme mittlerer Einzugsgebietsvoraussetzungen (Akl: m, Rkl: m, u), zu entsprechen.

**Abbildung 5-10:** Karten zu den Teilflächen im Spissibach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I).

## 5.2.4 Sperbelgraben

### Einzugsgebietsübersicht

**Tabelle 5-11: Kennzahlen des Sperbelgrabens.**

Allgemein	
Gemeinde	3457 Wasen im Emmental, Sumiswald, BE
Fläche	0,61 km <sup>2</sup>
Höhendifferenz	911-1203 m ü. M.
Kartenblatt (LK25)	1148
Geologietyp	Molasse
Exposition	SW
Niederschlag	
Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1951-1980, HADES Tafel 2.2)	1400-2000 mm Jahr-
Extreme Punktregen (1h, 100-jährlich) (1901-1970, HADES Tafel 2.4)	45 mm h <sup>-1</sup>

#### Typische Merkmale:

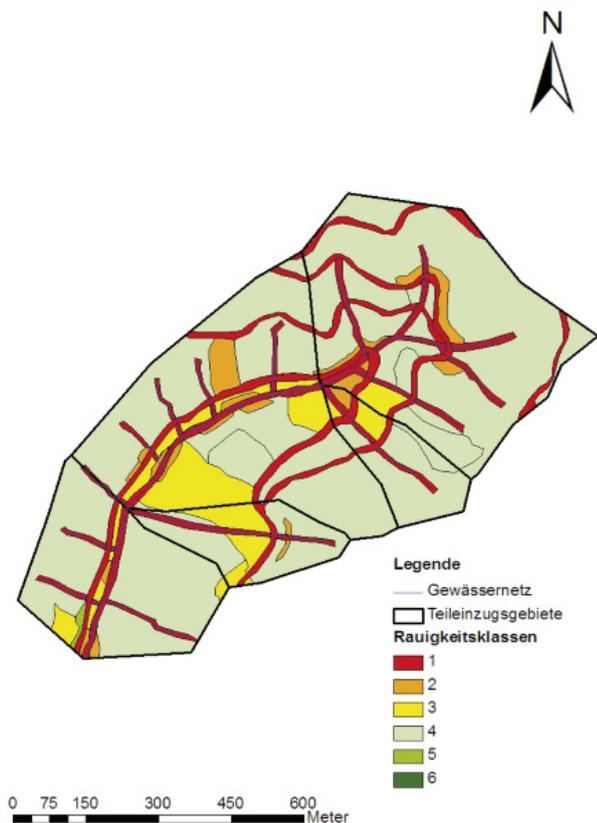
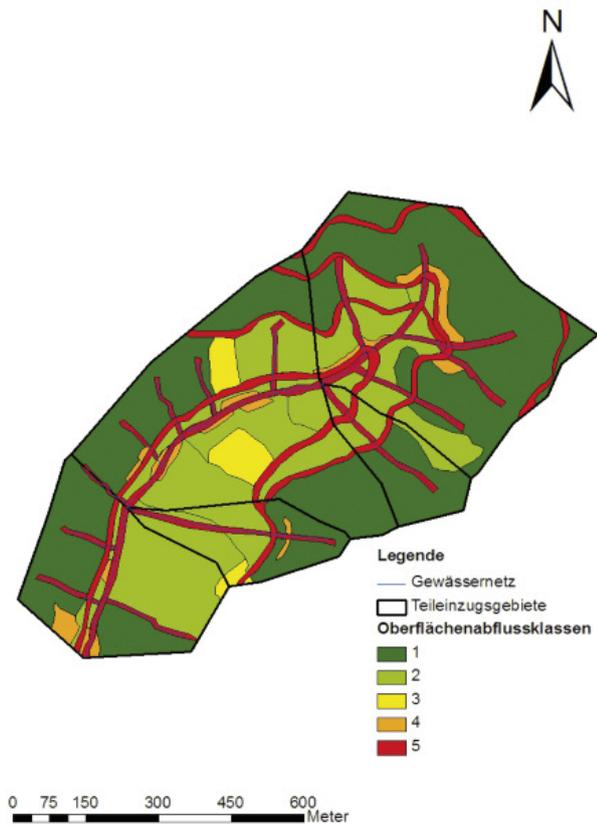
- Leicht podsolige, grundfeuchte Braunerdeböden
- Mischwald mit hohem Fichten-Anteil
- trotz mächtiger Humushorizonte stellenweise abflussfreundige Bereiche (Feuchtezeiger und oberflächliche Fließspuren v.a. über Sandstein- und Mergellagen des konglomeratischen Untergrundes)
- steile Hänge mit zahlreichen Runsen entlang des Gerinnes



**Tabelle 5-12: Dominante Einheiten des Sperbelgrabens.**

Vegetationsform/ Landbedeckung	Abflussbeiwertklasse	Rauigkeitsklasse	Abflusskoeffizient
Mischwald, feucht	2	4	0,15
Mischwald, Nadelwald dominant	1	4	0,05
Gerinne	5	1	0,6
Naturstrasse	5	1	0,7

### Abschätzung I



### Kartenerstellung

Folgender Aspekt wird in Abbildung 5-11 deutlich erkennbar:

- flächendeckender Wald

### Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST

**Tabelle 5-13:** Resultate der  $HQ_{100}$ -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Sperbelgraben (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang).

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Sperbelgraben			
Niederschlagsinput			HADES 2.4
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)	
T100	o	u	1,3
		m	1,1
	m	u	0,8
	u	m	0,7
	u	m	0,3

Die Niederschlagswerte der *HADES-Tafel 2.4* werden in der vorliegenden Arbeit als Grundlage für die  $HQ_x$ -Vorschläge herangezogen (Tabelle 6-1).

Im Vergleich zu bereits vorhandenen  $HQ_x$ -Abschätzungen ergeben sich nur geringe Differenzen. Das Verfahren HAKESCH sowie Berechnungen, basierend auf gemessenen Abflüssen (Schaffner 2007), liefern Abflusswerte für ein  $HQ_{100}$  von 1,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Die Empfehlungen der Modellabschätzungen nach Schaffner (2007) sind mit einem  $HQ_{100} > 2,4$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> leicht höher.

Im Allgemeinen liegen die Abschätzungen durchwegs auf vergleichbarem Niveau. Die mit ZEMOKOST erzielten Hochwassererwartungswerte erscheinen plausibel.

**Abbildung 5-11:** Karten zu den Teilflächen im Sperbelgraben mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I).

## 5.2.5 Hostetbach

### Einzugsgebietsübersicht

Tabelle 5-14: Kennzahlen des Hostetbaches.	
<b>Allgemein</b>	
Gemeinde	3864 Guttannen, BE
Fläche	4,02 km <sup>2</sup>
Höhendifferenz	1000-2922 m SH
Kartenblätter (LK25)	1210, 1230
Geologietyp	Kristallin
Exposition	SW
<b>Niederschlag</b>	
Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1951-1980, HADES Tafel 2.2)	2000-3200 mm Jahr <sup>-1</sup>
Extreme Punktregen (1h, 100-jährlich) (1901-1970, HADES Tafel 2.4)	55 mm h <sup>-1</sup>

#### Typische Merkmale:

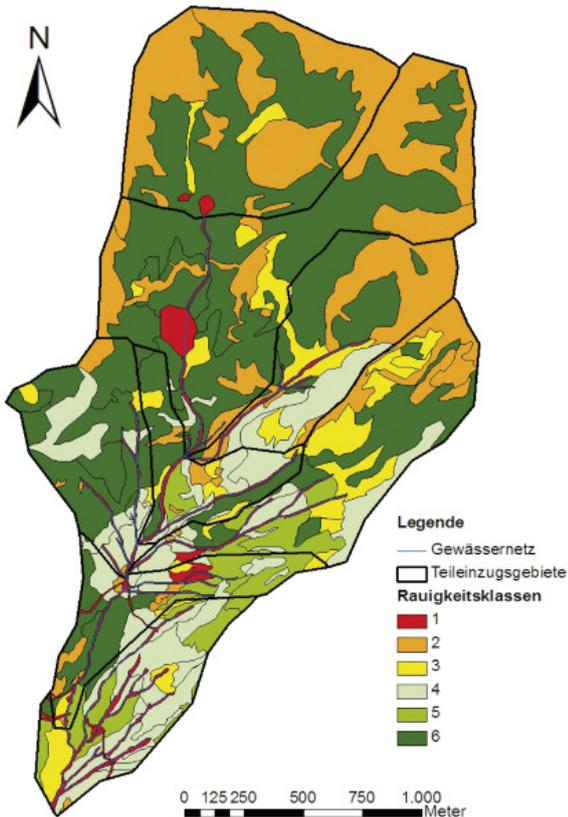
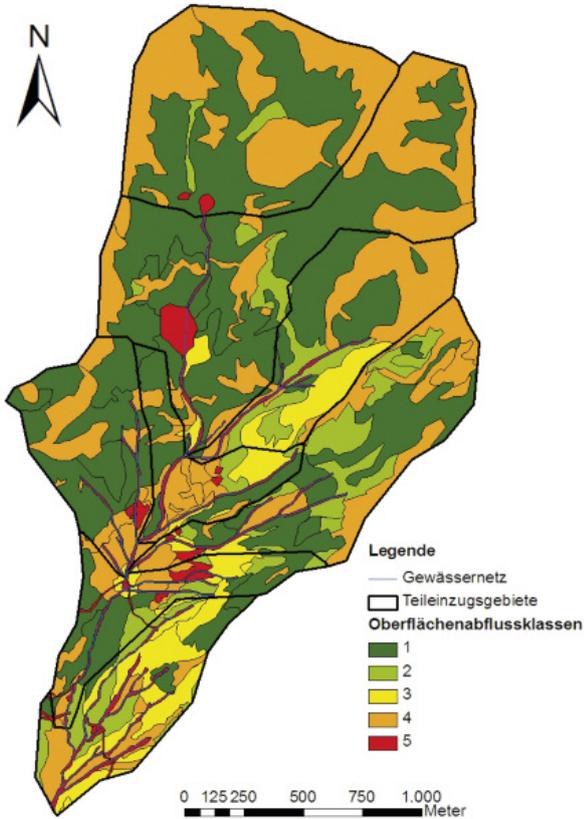
- Große Felsflächen und Blockhalden aus wasserundurchlässigen Zweiglimmer- und Biotitgneisen (v.a. obere Hälfte des EZG)
- Alpine Rasen auf flachgründigen und extrem skelettreichen Böden
- Flächige Alpenrosen- und Heidelbeerheiden (ab ca. 1700 - 2300 m SH)
- allseits steile Hänge (> 30°)
- Feuchtflächen mit zahlreichen oberflächlichen Abflüssen (v.a. westlicher Teil des EZG)
- Mäßig genutzte Weideflächen mit z.T. hohem Borstgrasanteil
- Heidelbeer-Fichtenwald mit dichter Zwergstrauchvegetation auf flachgründigen Silikatböden
- Grünerlen- und Weidebuschvegetation in Gerinnenähe
- Grasflächen, Ruderalstandorte und lichte Birken-Erlen-Wälder auf den flachgründigen, steilen Südwesthängen (Serizit-Chloritgneise/-Schiefer), dichtes Runsennetz

Tabelle 5-15: Dominante Einheiten im Hostetbach (Teilflächengliederung).

Vegetationsform/ Landbedeckung	Abflusswertklasse	Rauigkeitsklasse	Abflusskoeffizient
Hochstaudenflur, Grünerle und Weide	3	4	0,2
Alpenrosenheide	1	6	0,1
Alpine Rasen	4	2	0,35
Nadelwald	1	6	0,15
Wald, Birken, Erlen, Gras, mit Felsflächen	4	4	0,2
Feuchtwiese	4	4	0,45
Fels, vegetationslos	4	2	0,8
Fels mit Alpenrosen	3	4	0,4
Geröll	1	6	0,05
Geröll, grasbewachsen	2	3	0,2



### Abschätzung I



### Kartenerstellung

Folgende Aspekte werden in Abbildung 5-12 deutlich erkennbar:

- Unterschied vegetationslose Zonen – Alpenrosenheiden und Nadelwälder
- Abflussfreundliche Südwesthänge

### Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST

**Tabelle 5-16:** Resultate der  $HQ_{100}$ -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Hostetbach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang)

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Hostetbach			
Niederschlagsinput			Guttannen
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)	
<b>T100</b>	o	u	8
		m	7,1
	m	u	5,1
		m	4,5
	u	m	2,5

Die  $HQ_x$ -Ergebnisse mit ZEMOKOST weichen stark von jenen von HAKESCH oder von Schaffner (2007) ab. Nach HAKESCH ergibt sich ein  $HQ_{100}$  von 28 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Die Anwendung der Methode nach Schaffner (2007) führt zu einem Ergebnis für ein  $HQ_{100}$  von >16 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Auch bei Annahme der schlechtest möglichen Systembedingungen (Akl: o, Rkl: u) liegen die ZEMOKOST-Ergebnisse deutlich unter den HAKESCH-Resultaten.

Die Abflussbeiwertzuordnungen erscheinen plausibel: Der mittlere Abflussbeiwert für das gesamte Einzugsgebiet des Hostetbachs liegt nach HAKESCH bei 0,32 ( $\Psi_{tot}$ ; Rickli und Forster 1997), nach ZEMOKOST bei 0,31 ( $\Psi_{const}$ ; Markart et al. 2004).

**Abbildung 5-12:** Karten zu den Teilflächen im Hostetbach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I).

## Zusammenfassender Überblick und Vergleich der Einzugsgebiete

Die Eigenschaften und Charakteristiken der bearbeiteten Einzugsgebiete sind in Tabelle 5-17 zusammenfassend wiedergegeben. Der Darstellung können zudem die relevanten Aspekte einer Anwendung der Geländeanleitung entnommen werden. Diese sind entsprechend dem Vorgehensablauf während einer Abschätzung mit dem Aufnahmeformular angeordnet: Vegetationseinheit, Boden, Geologie, Nutzung. Die im Gebiet mit besonderer Ausprägung vorhandenen und daher unbedingt zu berücksichtigenden Aspekte sind zusätzlich markiert.

### 5.2.6 Vergleich der Einzugsgebiete

Der geologische Untergrund der Einzugsgebiete Dürrenwaldbach und Spissibach ist sehr ähnlich (Flysch/Bündnerschiefer). Beiden ist die Dominanz von Mergelschiefer und Kalkphylliten gemein. Entsprechend hoch ist demnach auch die Abflussdisposition in beiden Gebieten einzuschätzen (mittlerer Gebietsabflussbeiwert  $\Psi_{\text{due}} = 0,45$ ,  $\Psi_{\text{spi}} = 0,35$ ).

Auf Grund des um 29% höheren Waldanteils bis in tiefere Höhenstufen liegt der mittlere Abflussbeiwert des Spissibachs um 0,1 tiefer als jener des Dürrenwaldbachs.

Im Eistlenbach sind stärkere Abflussreaktionen auf schiefrigem Mergel- bis Kalkphyllituntergrund zu erwarten, diese Formationen treten hier in Form eines gebietsquerenden Bandes auf. Zudem spielen die hohen Anteile von steilen unbewachsenen Felsflächen eine abflussfördernde Rolle.

Der Hostetbach hebt sich deutlich von den übrigen Testgebieten ab. Er spiegelt als einziger den alpinen Charakter hoch gelegener Wildbacheinzugsgebiete wider. Aspekte wie jene der Nutzung treten in den Hintergrund; große Flächen an Fels, Geröll, alpinem Rasen und Zwergstrauchheide bestimmen das Abflussgeschehen.

Witenbach und Sperbelgraben: In Bezug auf die Wirkung der Weidenutzung auf Abflussvorgänge unterscheiden sich die beiden Gebiete kaum von den anderen vier Gebieten, es dominieren die Abflussklassen 3 oder 4. Auch die Waldflächen weisen kein grob unterschiedliches Abflussverhalten auf.

Ihr flächenmäßiger Anteil ist aber deutlich höher. Im Sperbelgraben ist Wald die einzige Landbedeckungseinheit.

Deutliche Differenzen zu den anderen Gebieten ergeben sich zudem bei näherer Betrachtung der Einzugsgebietsformen. Die Gebiete des Emmentals, insbesondere der Witenbach, besitzen eine eher

rundliche Grundform, mit sternförmiger Anordnung der Zuflüsse zum Hauptgerinne.

### 5.2.7 Feststellungen zum Vergleich der Abschätzung nach Markart et al. (2004) mit jener nach Rickli und Forster (1997)

Beim Vergleich der Ergebnisse aus Abschätzung I (Geländeanleitung nach Markart et al. 2004) und Abschätzung II (Verfahren nach Rickli und Forster 1997) ist zu berücksichtigen, dass die Methoden jeweils von unterschiedlichen Abflussbeiwertdefinitionen ausgehen: Die Angaben in der Geländeanleitung beziehen sich auf das Verhältnis des oberflächlichen Abflusses zur Niederschlagsmenge bei Abflusskonstanz, weil dadurch auch Abflussereignisse bei unterschiedlichen Randbedingungen (z.B. hohe vs. niedrige Vorbefeuchtung) vergleichbar werden. Rickli und Forster (1997) verwenden den Gesamtabflussbeiwert (= Verhältnis des gesamten Abflusses zur Gesamtniederschlagsmenge).

- Ein Blick auf alle sechs bearbeiteten Einzugsgebiete zeigt, dass die Abschätzung nach Rickli und Forster (1997) zu generell kleineren Abflussbeiwerten führt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass bei der Schätzung des Gesamtabflussbeiwertes die Vorbedingungen (Boden trocken oder Boden nass, Initialabstraktion u.a.) mit in den Abflussbeiwert einfließen. Das Verfahren von Markart et al. (2004) unterstellt ein realistisches Bad-Case-Szenario (schlechte Vorbedingungen), im Berechnungsansatz ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005) wird die Initialabstraktion in der Abhängigkeit von der Rauigkeit der jeweiligen Teilfläche separat berechnet. Zudem gibt es Unterschiede im Detaillierungsgrad der beiden Verfahren. Rickli und Forster (1997) beziehen nicht jenes Spektrum an Einflussgrößen in eine Abschätzung mit ein, wie es von Markart et al. (2004) vorgeschlagen wird - z.B. die Auswirkungen von Hydrophobie-Effekten (Borstgrasrasen) und Vernässungstendenzen. Die Berücksichtigung solcher Standortfaktoren resultiert in entsprechend höheren Abflussbeiwerten.
- Art und Intensität der Nutzung fallen bei Rickli und Forster (1997) deutlich weniger ins Gewicht.
- Die positive Wirkung des Waldes auf das Abflussgeschehen in einem Einzugsgebiet wird von beiden Verfahren gleichermaßen betont. Beide Abschätzungsverfahren liefern tendenziell niedrige Abflussbeiwerte für Waldflächen.

**Tabelle 5-17:** Die sechs Wildbachzugsgebiete im Überblick – abflussbestimmende Faktoren sind fett gedruckt.

WBEZG	Vegetationseinheiten	Böden	Geologie	Nutzung	Oberflächenabfluss- klasse	Abflussbeiwert (Rickli & Forster)	Raugigkeitsklasse
<b>Dürrenwaldbach</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weiden/Mähwiesen</li> <li>• Nadelwald</li> <li>• Hochstaudenfluren</li> <li>• Alpine Heiden</li> <li>• Feuchtwiesen/ Niedermoore</li> <li>• Erlengebüsch</li> <li>• Bürstlingrasen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parabraunerde</li> <li>• Braunpodsol</li> <li>• Regosol</li> <li>• Gleyböden</li> </ul> <p>Flachgründig, skelett- reich, z.T. <b>grundhass</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flysch/ Bündnerschiefer</b></li> </ul> <p>(v.a. tonige Sande, Silte und Mergelschiefer- Kalkphyllite)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Mittel-intensive Beweidung</b></li> <li>• Keine Nutzung</li> </ul>			
<b>Spissibach</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mischwald (Laubwald dominant)</li> <li>• Laubwald</li> <li>• <b>Mähwiese/Weide</b></li> <li>• Hochstaudenfluren</li> <li>• Sonstige Rasen und Gräser</li> <li>• Bürstlingrasen</li> <li>• <b>Nadelwald</b></li> <li>• <b>Mischwald</b></li> <li>• Alpine Heide</li> <li>• <b>Feuchtwiese/Feucht- fläche/Niedermoor</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Braunerde</li> <li>• Podsol</li> <li>• Gleyböden</li> </ul> <p>Flachgründig, skelett- reich, <b>grundfeucht</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flysch/Bündner- schiefer</b></li> </ul> <p>(v.a. Mergelschiefer bis Kalkphyllite und tonige Sande/Silte)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Mittel-intensive Beweidung</b></li> <li>• Keine Nutzung</li> </ul>			
<b>Eistlenbach</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sonstige Rasen u. Gräser</b></li> <li>• <b>Weide/Mähwiese</b></li> <li>• <b>Bürstlingrasen</b></li> <li>• Alpine Heide</li> <li>• <b>Nadelwald</b></li> <li>• <b>Mischwald</b></li> <li>• Laubwald</li> <li>• Erlengebüsch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Braunerde</li> <li>• Podsol</li> <li>• Gleyböden</li> <li>• Regosol</li> </ul> <p><b>sehr flachgründig</b> skellettreich</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kalk</b></li> </ul> <p>(v.a. massige Kalke mit mergeligen Zwischen- lagen und Mergelschiefer bis Kalkphyllit)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittel-intensive Beweidung</li> <li>• Forstwirtschaft</li> <li>• Keine Nutzung</li> </ul>			

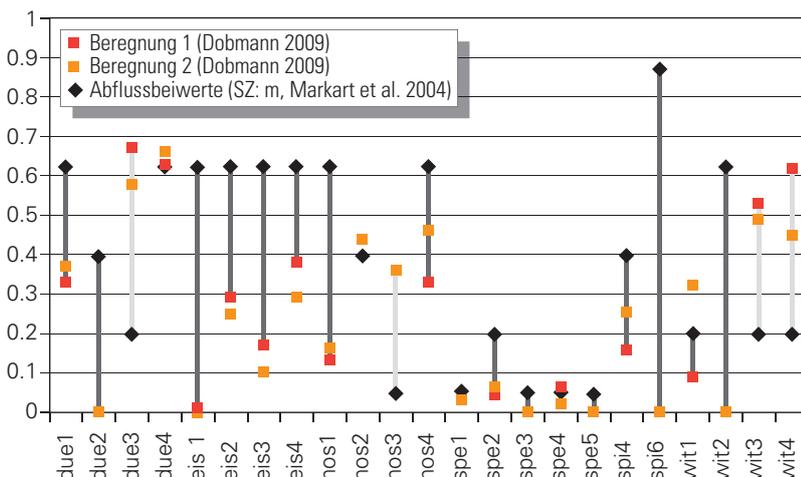
WBEZG	Vegetationseinheiten	Böden	Geologie	Nutzung	Oberflächenabfluss- klasse	Abflussbeiwert (Rickli & Forster)	Rauigkeitsklasse
Hostetbach	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochstaudenflur</li> <li>• Alpine Heide</li> <li>• Grünland/Weide</li> <li>• Alpine Rasen</li> <li>• Bürstlingrasen</li> <li>• Mischwald (Nadelwald dominant)</li> <li>• Fels</li> <li>• Latsche</li> <li>• Feuchtwiese</li> <li>• Nadelwald</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ranker</li> <li>• Regosol</li> <li>• Lithosol</li> <li>• Podsol</li> <li>• Fels</li> </ul> <p><b>Sehr flachgründig, extrem skelettreich</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kristallin</b> (v.a. Zweiglimmer- bis Biotitgneise und Serizit-Chloritgneise- bis Schiefer)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittlere Beweidung</li> <li>• <b>Keine Nutzung</b></li> </ul>			
Witenbach	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grünland/ Mähwiesen/ Weiden</li> <li>• Mischwald (Fichten dominant)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Braunerden (neutral, sauer, podsolig)</li> <li>• Regosol</li> </ul> <p>Mittel-tiefgründig, skeletthaltig, z.T. <b>grundfeucht</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Molasse</b> (v.a. Konglomerate mit Sandstein-Mergellagen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Intensive Beweidung</b></li> <li>• Keine Nutzung</li> <li>• Forstwirtschaft</li> <li>• <b>Drainagesysteme</b></li> </ul>			
Sperbelgraben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mischwald (Nadelwald dominant)</li> <li>• Mähwiese/Weide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Braunpodsol,</li> <li>• Saure Braunerde</li> </ul> <p>Mittelgründig, skeletthaltig, z.T. grundfeucht</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Molasse</b> (Konglomerate, schwach bis mittelstark verfestigt)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Keine Nutzung</b></li> <li>• Forstwirtschaft</li> <li>• Geringe Beweidung</li> </ul>			

## 6. Ergebnisse und Analyse

Der erste Teil des Kapitels beinhaltet den Vergleich der Abflussbeiwerte nach Markart et al. (2004) mit Resultaten von Beregnungsexperimenten in Dobmann (2009), sowie mit den nach Rickli und Forster (1997) ermittelten Abflusskoeffizienten. Dabei stehen einerseits die Werte aus den Feldbegehungen der vorliegenden Arbeit zur Verfügung (Abschätzung II, vgl. Kapitel 5), andererseits liegen auch Abflussbeiwerte von Sury (2006) vor, die ebenfalls nach der Methode Rickli und Forster (1997) für jedes der sechs Einzugsgebiete abgeschätzt wurden.

Im zweiten Teil werden die  $HQ_{100}$  der sechs Einzugsgebiete miteinander verglichen und zu den Resultaten anderer Studien (Sury 2006, Schaffner 2007) in Relation gesetzt. Die Auswertungen der Ergebnisse beziehen sich vor allem auf die  $HQ_{100}$ - und  $HQ_{20}$ -Werte, da es an  $HQ_{300}$ - und  $HQ_{30}$ -Vergleichsdaten mangelt und diese daher nicht sinnvoll eingeordnet werden können.

Als Vergleichswerte dienen schließlich jene  $HQ_{100}$ -Vorschläge von ZEMOKOST, welche eingangs bezüglich Einfluss von Niederschlagsdaten und von unterschiedlichen Systemzuständen besprochen und herausgefiltert wurden. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Kapitel 11.2 (Tabelle 11-5) nachzuschlagen.



**Abbildung 6-1:** Vergleich zwischen gemessenen (Dobmann 2009) und nach der Geländeanleitung ermittelten Abflussbeiwerten einzelner Beregnungsstandorte (nummeriert) in den sechs Einzugsgebieten (x-Achse).

Überschätzungen = dunkle Balken, Unterschätzungen = helle Balken. (due: Dürrenwaldbach, eis: Eistlenbach, hos: Hostetbach, spe: Sperbelgraben, spi: Spissibach, wit: Witenbach).

## 6.1 Die Abflussbeiwerte

### 6.1.1 Vergleich mit gemessenen Abflussbeiwerten

Aus den sechs bearbeiteten Einzugsgebieten liegen Messungen aus Beregnungsversuchen mit einer Kleinregenanlage vor ( $1 \text{ m}^2$  Auftragsfläche - Dobmann 2009). An mindestens vier ausgewählten Standorten je Testgebiet führte Dobmann je zwei Beregnungen durch ( $i_N = 60 \text{ mm h}^{-1}$ ). Diese Abflussbeiwerte sind in der Abbildung 6-1 den Abflussbeiwerten nach Markart et al. (2004) - Mittelwerte der für die betreffende Teilfläche abgeschätzten Abflussbeiwertklasse - gegenübergestellt.

Die Abweichungen zwischen den gemessenen Abflussbeiwerten und den nach Markart et al. (2004) geschätzten Werten werden aus Abbildung 6-1 deutlich sichtbar. In den meisten Fällen wurde mit der Feldansprache nach der Geländeanleitung überschätzt (dunkle Balken).

Mögliche Ursachen für die Differenzen:

Generell:

- Aus den Beregnungen erhält man Punktinformationen, die nur begrenzt repräsentativ für größere Teile eines Einzugsgebietes sind. Die Zuordnung von Abflussbeiwerten nach der Geländeanleitung erfolgt i.d.R. für Homogenbereiche  $\geq 1 \text{ ha}$ .

- Vergleiche von Oberflächenabflussbeiwerten ermittelt mit einer Großregenanlage ( $50 \text{ m}^2$ ) und mit einer Kleinregenanlage ( $1 \text{ m}^2$ ) von Markart und Kohl (1995) ergaben auf ein und derselben Fläche sehr große Differenzen. Auf hoch durchlässigen Flächen kann mit Kleinregenanlagen das tatsächliche Abflussverhalten deutlich überschätzt werden. Dieser Effekt könnte z.B. auf den Standorten (wit3) und (wit4) - gepflegte Mähwiesen - zum Tragen gekommen sein.
- Die Beregnungen wurden in drei (wit, eis, hos) von sechs EZG vor Einsetzen der maximalen Nutzungsintensität an den Testflächen durchgeführt.

- Besonders auffallend sind in Abbildung 6-1 die konstant hohen Abflussbeiwertschätzungen an allen Standorten des Eistlenbachs. Die Ursache dafür liegt in der Anordnung der Berechnungsstandorte von Dobmann (2009), die auf verhältnismäßig engem Raum durchgeführt wurden. Diese arbeitsintensiven Untersuchungen repräsentieren daher nur eine relevante Substratgruppe und eine relevante hydrologische Vegetationsform bzw. Nutzungseinheit. Aufgrund des großen Borstgrasanteiles dieser Weideflächen wird der Abflussbeiwert in Abhängigkeit des bei Markart et al. (2004) beschriebenen Hydrophobieeffektes - basierend auf umfangreichen Messdaten von Bürstlingrasen - als hoch eingeschätzt.

Diskussion an Beispielen:

- Markant sind die Differenzen der Standorte (spi6) und (wit2). Da von einer hohen Vorbefeuchtung ausgegangen wird, wird der ersten Fläche eine hoher Abflussbeiwert zugeordnet (Akl 5). Im Witenbach ist die nahe Lage des Berechnungsstandortes zum Hof für den Unterschied verantwortlich. Die Teilflächen um Höfe und Stallungen werden in der Abschätzung nach Markart et al. (2004) mit relativ hohen Abflussbeiwertklassen versehen, da es sich meist um intensiv genutzte und verdichtete Flächen handelt (Akl 4).
- Die Standorte Dürrenwaldbach (due3, Akl 2) und Hostetbach (hos3, Akl 1) sind geprägt von Zwergsträuchern wie Alpenrose und Heidelbeere, die nach der Geländeanleitung den oberflächlichen Abflussprozess maßgeblich reduzieren. Die Kleinberegnung kann aber nur in Teilbereichen mit niedrigerem Bewuchs und glatterem Boden durchgeführt werden. Dadurch wird das Retentionsvermögen der Gesamtfläche der umliegenden Zwergsträucher aber nicht genutzt und die Abflussdisposition der Gesamtfläche, wenn man sich nur auf die Berechnungswerte bezieht, überschätzt.
- Nach der Geländeanleitung ist von realistisch schlechten hydrologischen Bedingungen auszugehen, schlechteren als sie bei den Berechnungen vorlagen (Grundlage für die Abflussbeiwertansprache ist das Bemessungsereignis = „Realistisches Bad-Case“ *Szenario*).
- Bei diesen Beurteilungen fließt auch die Subjektivität des Betrachters ein. Die richtige Ansprache nach der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) braucht einige Übung. Es ist durchaus möglich, dass immer wieder Einheiten unter- bzw. überschätzt werden. Wie wiederholte Vergleiche in österreichischen Wildbacheinzugsgebieten zeigen, gleichen sich solche Fehler (wenn nicht systematisch falsch angesprochen wird) bei Durchführung von Abflussbeiwertkartierungen für ein gesamtes Einzugsgebiet i.d.R. aus.

### 6.1.2 Die Abflussbeiwerte nach Rickli und Forster (1997)

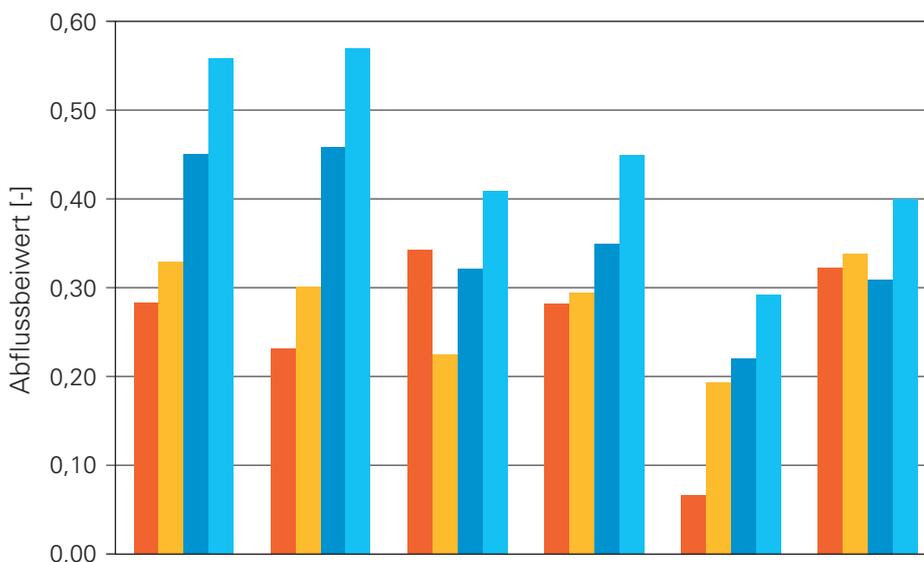
Im Folgenden werden die Resultate der Abschätzung in den sechs Testgebieten nach der Methode von Markart et al. (2004) mit den Ergebnissen von Sury (2006) und jenen der Methode nach Rickli und Forster (1997, orange und rote Datenreihen, siehe Abbildung 6-2) verglichen. Berücksichtigt wird dabei jeweils das hundertjährige Hochwasser, welches aufgrund der repräsentativsten Niederschlagsdaten berechnet wurde (Werte von Messstationen oder aus HADES, siehe auch Kapitel 5.2). Die Maximalwerte (hellblaue Datenreihe), welche sich unter Annahme der schlechtesten Systemzustände (Akl: o, Rkl: u; vgl. auch Kapitel 4.5.4) ergeben, sind hier lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt. Sie werden in den folgenden Betrachtungen nicht mitberücksichtigt.

Aus Abbildung 6-2 wird ersichtlich, dass lediglich bei den Einzugsgebieten Witenbach und Sperbelgraben etwas größere Differenzen zu Sury (2006) auftreten (Abweichung in der Größenordnung von 0,1). Die mittlere Abweichung über alle sechs ist mit 0.0363 vernachlässigbar gering.

Bei der Abflussbeiwertabschätzung nach Rickli und Forster (1997) – Abschätzung II, ergeben sich Unterschiede zu Sury (2006). So wurden 40% der Waldflächen im Witenbach in der vorliegenden Studie besser beurteilt als in der Arbeit von Sury.

Diese geht davon aus, dass einerseits die Waldflächen aufgrund ihrer Flachgründigkeit den Abfluss lediglich gering dämpfen und hat deshalb höhere Abflussbeiwerte ( $\Psi = 0,25$ ) vergeben. Zudem nehmen in Sury (2006) die gerinnenahen Bereiche mit einem Abflussbeiwert von 0,45 immerhin 20% mehr Fläche ein als in der Abschätzung II (Rickli und Forster 1997) und erhöhen damit den Gesamt-abflussbeiwert des Witenbachs beachtlich.

Eine ähnliche Situation zeigt sich im Sperbelgraben. In Sury (2006) sind ausgedehnte Waldflächen mit einem Abflussbeiwert von 0.05 ausgewiesen. Nach Abschätzung II (Rickli und Forster



	Dürrenwaldbach	Eistlenbach	Witenbach	Spissibach	Sperbelgraben	Hostetbach
Abschätzung II (Rickli & Forster (1997) in: Sury (2006))	0,25	0,23	0,34	0,28	0,07	0,32
$ \Delta $	0,05	0,07	0,12	0,01	0,13	0,02
Abschätzung II (Rickli & Forster 1997)	0,33	0,30	0,23	0,29	0,19	0,34
$ \Delta $	0,12	0,16	0,10	0,06	0,03	0,03
Abschätzung I (SZ: m, m), Markart et al. 2004)	0,45	0,46	0,32	0,35	0,22	0,31
Abschätzung I (SZ: o, u), Markart et al. 2004)	0,56	0,57	0,41	0,45	0,29	0,40

**Abbildung 6-2:** Vergleich der flächengewichteten Abflussbeiwerte in den sechs Einzugsgebieten.  $|\Delta|$  = Betrag der Differenz der flächengewichteten Mittelwerte zu Sury (2006)

1997) sind dieselben Flächen zwischen 0,1 bis 0,15 zu bewerten, zusätzlich sind eine Reihe anderer Einheiten stärker negativ zu gewichten (Rutschungen, bis an die Oberfläche reichende Nagelfluh, Sandsteinlagen oder Mergelschiefer und gerinnenahe Bereiche - Abflussbeiwert 0,6). Dadurch wird der hohe Abflussbeiwert der Abschätzung II erklärbar und nachvollziehbar.

Bei einer gesamthaften Betrachtung der Ergebnisse in Abbildung 6-2 ist ein durchgehender Trend höherer Abflussbeiwerte der Abschätzung I erkennbar. Die maßgebliche Ursache der Unterschiede liegt darin, dass Abschätzung II sich am aktuell vorherrschenden Zustand (Gesamtabflussbeiwert) und nicht an realistisch schlechten möglichen Systembedingungen („Realistisches Bad-Case“-Szenario nach Markart et al. 2004,  $\Psi_{const}$ ) orientiert, wie schon in Kapitel 5.2.7 angeführt.

Die Initialabstraktion wird in der Methode von Markart et al. (2004) bzw. dem zugehörigen Berech-

nungsansatz ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005) separat über die Rauigkeit ermittelt.

In der Geländeanleitung fließen Nutzungseinflüsse (z.B. Beweidung, anthropogene Versiegelung) stärker in die Bewertung ein. Im Hostetbach sind Nutzungseinflüsse von geringer Bedeutung, hier wurden die absolut geringsten Differenzen in der Bewertung festgestellt.

Es ist daher festzuhalten:

**Bei Anwendung von Abflussbeiwertverfahren zur Abschätzung des Gebietsabflusses ist stets zu berücksichtigen welcher Abflussbeiwert ( $\Psi_{const}$  bei Abflusskonstanz oder Gesamtabflussbeiwert  $\Psi_{ges}$ ) dem jeweiligen Bewertungsverfahren zugrunde liegt. Im Gesamtabflussbeiwert ist jeweils der aktuelle Systemzustand enthalten, für die Berechnung des Bemessungsereignisses ist jedoch ein realistisch schlechter Systemzustand anzunehmen (siehe Markart et al. 2004).**

## 6.2 Resultate der HQ-Abschätzungen

Im folgenden Abschnitt werden die Resultate der HQ-Berechnungen mit ZEMOKOST für die sechs Einzugsgebiete miteinander verglichen.

### 6.2.1 Der Einfluss des Niederschlagsinputs

Die Ergebnisse in der Abbildung 6-3 zeigen die HQ<sub>100</sub> der sechs Testeinzugsgebiete für die jeweils spezifisch vorliegenden Niederschlagsdaten (HADES Tafeln und Niederschlagsmessstationen).

Die Namen der Stationen sind in der Abbildung 6-3 aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Genauere Angaben diesbezüglich liefern die Darstellungen der Ergebnisse in Tabelle 11-5. Um die Abflüsse vergleichbar zu machen, werden bei den Berechnungen die Standardeinstellungen (Akl: o, Rkl: u) verwendet.

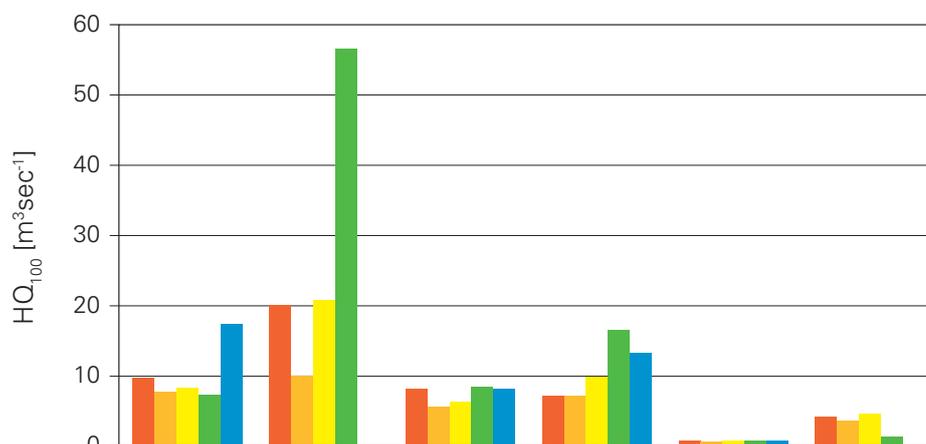
Die HQ<sub>100</sub>-Ergebnisse in Abbildung 6-3 zeigen eine durch den Niederschlagsinput verursachte hohe Variabilität, insbesondere bei Eistlenbach, Dürrenwaldbach und Spissibach. Selbst wenn die ausgewählten Niederschlagsdaten nur geringfügige Unterschiede innerhalb der Intensitätsstufen aufweisen, äußert sich dies in deutlichen Auswirkungen auf die Resultate der Abflussberechnungen (z.B. Eistlenbach, Abbildung 6-3).

Aus der Abbildung 6-3 wird sichtbar, welche Niederschlagsdatenquelle jeweils repräsentativ für ein Einzugsgebiet ist. Alle folgenden Darstellungen und Analysen beziehen sich auf die in Tabelle 6-1 angeführten Messstationen oder HADES-Tafel.

Es werden die hundertjährigen Abflussmengen in Bezug auf die Fläche des Einzugsgebietes ausgewiesen. Abbildung 6-4 zeigt die Abflussspenden der sechs Gebiete. Auffallend sind die Ergebnisse für Eistlenbach und Spissibach. Diese Wildbachsysteme reagieren anscheinend viel intensiver als die übrigen Gebiete auf den Inputparameter Niederschlag (ähnliche Topographie und Gebietseigenschaften).

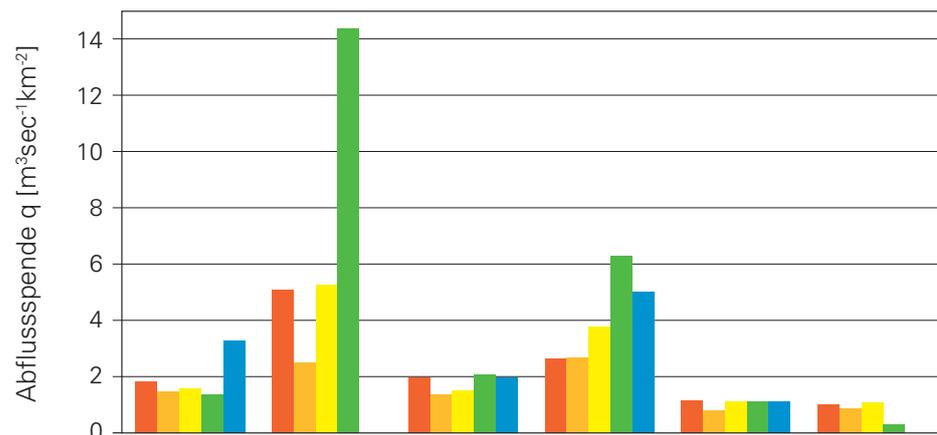
**Tabelle 6-1:** Repräsentative Niederschlagsdaten für die sechs Einzugsgebiete.

Wildbacheinzugsgebiet	Messtation / HADES-Tafel
Dürrenwaldbach	HADES-Tafel 2.4
Eistlenbach	Messtation I: Brienz
Witenbach	Messtation II: Escholzmatt
Spissibach	Messtation II: Interlaken
Sperbelgraben	HADES-Tafel 2.4
Hostetbach	Messtation I: Guttannen



	Dürrenwaldbach	Eistlenbach	Witenbach	Spissibach	Sperbelgraben	Hostetbach
HADES 2.4 [m³ sec <sup>-1</sup> ]	9,7	20	8,1	7	0,7	4,2
HADES 2.42 [m³ sec <sup>-1</sup> ]	7,7	10	5,6	7,1	0,5	3,6
Station I [m³ sec <sup>-1</sup> ]	8,3	20,7	6,2	9,9	0,7	4,5
Station II [m³ sec <sup>-1</sup> ]	7,3	56,5	8,5	16,6	0,7	1,3
Station III [m³ sec <sup>-1</sup> ]	17,3		8,1	13,2	0,7	

**Abbildung 6-3:** Der Einfluss des Inputparameters Niederschlag in ZEMOKOST auf die Hochwasserabflüsse in den Testgebieten (genauere Angaben zu den Stationsnamen jedes Einzugsgebietes finden sich in Kapitel 5.2 und in Tabelle 11-5).



	Dürrenwaldbach	Eistlenbach	Witenbach	Spissibach	Sperbelgraben	Hostetbach
HADES 2.4 [m³ sec⁻¹]	1,87	5,08	2	2,66	1,15	1,04
HADES 2.42 [m³ sec⁻¹]	1,48	2,54	1,39	2,7	0,82	0,9
Station I [m³ sec⁻¹]	1,6	5,25	1,53	3,76	1,15	1,12
Station II [m³ sec⁻¹]	1,41	14,34	2,1	6,31	1,15	0,32
Station III [m³ sec⁻¹]	3,33		2	5,02	1,15	

**Abbildung 6-4:**

Vergleich der Abflussspenden der sechs Testgebiete bei Verwendung verschiedener N-Input-Grundlagen (ZEMOKOST).

### 6.2.2 Der Einfluss der Abflussbeiwert- und Rauigkeitsklassen in ZEMOKOST

Das Laufzeitverfahren ZEMOKOST bietet dem Anwender die Möglichkeit auch Anpassungen in der Berechnung vorzunehmen.

Die Standardeinstellung berücksichtigt die Mittelwerte der Abflussbeiwertklassen, daneben ist es dem Anwender überlassen z.B. mit den oberen oder unteren Werten der Klassenbreite in den Berechnungen zu operieren. Eine Änderung der Standardeinstellung impliziert auch eine Änderung der Systemeigenschaften.

Wie bereits in Kapitel 4.5.4 erwähnt, lässt sich daraus beispielsweise ein Hochwasserabfluss unter Annahme sehr schlechter Ausgangsbedingungen herleiten (Verwendung der oberen Klassengrenzen der Abflussbeiwertklassen, andererseits der unteren Klassengrenzen der Rauigkeitsklassenbereiche [Akl: o, Rkl: u] Verschlechterung des Systemzustandsindex auf bis zu -6). Die Berechnungen liefern bei dieser Ausgangslage maximale Abflussspitzen.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerte auf das  $HQ_{100}$  werden aus Abbildung 6-5 ersichtlich. Eine Veränderung der Abflussbeiwerte [Akl: o, Rkl: m] in allen Einzugsgebieten hat größeren Einfluss auf die HQ-Ergebnisse als eine Variierung der Rauigkeitsbeiwerte [Akl: m,

Rkl: u] Die Rauigkeit (c) geht primär in die Berechnungen der mittleren Fließgeschwindigkeit des Abflusses ( $v_m$ ) ein. Ihr Einfluss auf die Abflussspitze (Q) ist damit nicht im gleichen Maße ausschlaggebend wie jener der Abflussbeiwerte.

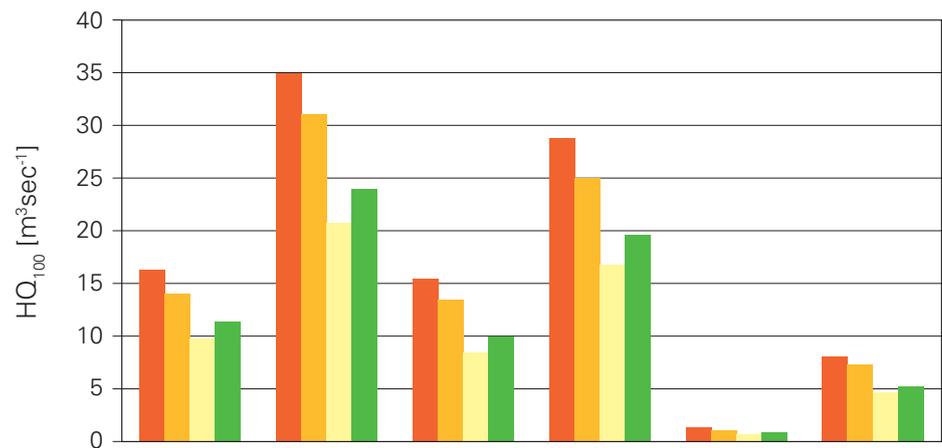
### 6.2.3 Die $HQ_{100}$ -Vergleichswerte aus anderen Abschätzungsverfahren

Für alle sechs Einzugsgebiete liegen Vergleichswerte aus Berechnungen mit anderen Abschätzverfahren vor. Zum einen die Ergebnisse aus den Anwendungen von HAKESCH in Sury (2006), zum anderen die Vorschläge von Schaffner (2007). Diese Verfahren und ihre Resultate wurden bereits in Kapitel 5.2 diskutiert.

Abbildung 6-6 zeigt nun die Ergebnisse für alle sechs bearbeiteten Wildbacheinzugsgebiete im Überblick. Für ZEMOKOST sind die Ergebnisse der Varianten A (Bad-Case) und B (mittlerer Systemzustand) dargestellt.

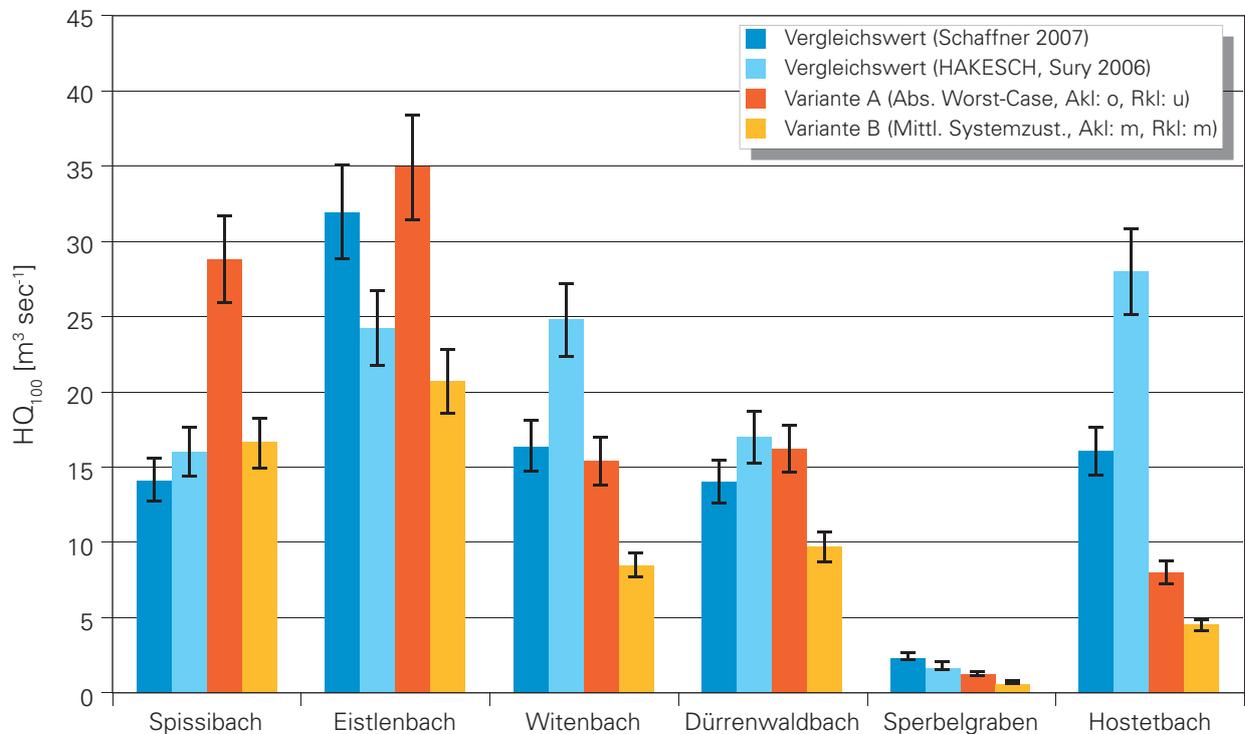
Für die Einzugsgebiete Sperbelgraben, Spissibach und Dürrenwaldbach sind die Abweichungen neglibel. Es handelt sich um die Anwendung von Schätzverfahren und die Abweichungen liegen im Bereich weniger  $m^3 \text{ sec}^{-1}$ .

Beim Witenbach liefern die Methoden nach Schaffner (2007) und ZEMOKOST vergleichbare



	Dürrenwaldbach	Eistlenbach	Witenbach	Spissibach	Sperbelgraben	Hostetbach
o, u	16,2	34,9	15,4	28,8	1,3	8
o, m	14	30,9	13,3	24,8	1,1	7,1
m, m	9,7	20,7	8,5	16,6	0,7	4,5
m, u	11,3	23,7	9,8	19,4	0,8	5,1

**Abbildung 6-5:** Der Einfluss der Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerte auf die HQ<sub>100</sub>-Berechnungen in ZEMOKOST. Erklärung der Abkürzungen: Abflussbeiwert- (Akl) und Rauigkeitsklassen (Rkl); o = obere Werte eines Klassenbereichs; m = mittlere Werte eines Klassenbereichs; u = untere Werte eines Klassenbereichs.



**Abbildung 6-6:** Vergleich zwischen den HQ<sub>100</sub>-Vorschlägen (A, B) unter der Verwendung von ZEMOKOST und den Vergleichswerten von HAKESCH und Schaffner (2007). Die markierte Abweichung beträgt je 10% nach oben und nach unten. Die Variante A geht von den oberen Grenzen der Abflussbeiwertklassen- (Akl: o) und den unteren Grenzen der Rauigkeitsbeiwertklassen (Rkl: u) aus. Variante B entspricht der ZEMOKOST- Standardeinstellung (Akl: m, Rkl: m).

**Tabelle 6-2:** HQ<sub>100</sub>-Vorschläge und analog dazu die Abflussspenden für die sechs Testgebiete ermittelt nach ZEMOKOST (die markierten Werte werden in Abbildung 6-7 in die Abflüsse der Schweiz eingeordnet).

Einzugsgebiet	Herkunft der Niederschlagsdaten	HQ <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] (Variante B, Akl: m, Rkl: m)	HQ <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] (Variante A, Akl: o, Rkl: u)	Abflussspende q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> ] (Variante B, Akl: m, Rkl: m)	Abflussspende q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> ] (Variante A, Akl: o, Rkl: u)
Dürrenwaldbach	HADES 2.4	9,7	<b>16,2</b>	1,9	<b>3,1</b>
Eistlenbach	Messstation Brienz	<b>20,7</b>	34,9	<b>5,3</b>	8,9
Witenbach	Messstation Escholzmatt	8,5	<b>15,4</b>	2,1	<b>3,8</b>
Spissibach	Messstation Interlaken	<b>16,6</b>	28,8	<b>6,4</b>	11,1
Sperbelgraben	HADES-Tafel 2.4	0,7	<b>1,3</b>	1,1	<b>2,1</b>
Hostetbach	Messstation Guttannen	4,5	<b>8</b>	1,1	<b>2</b>

Resultate, die Berechnungsergebnisse aus Sury (2006) liegen weit darüber, ähnlich wie im Hostetbach.

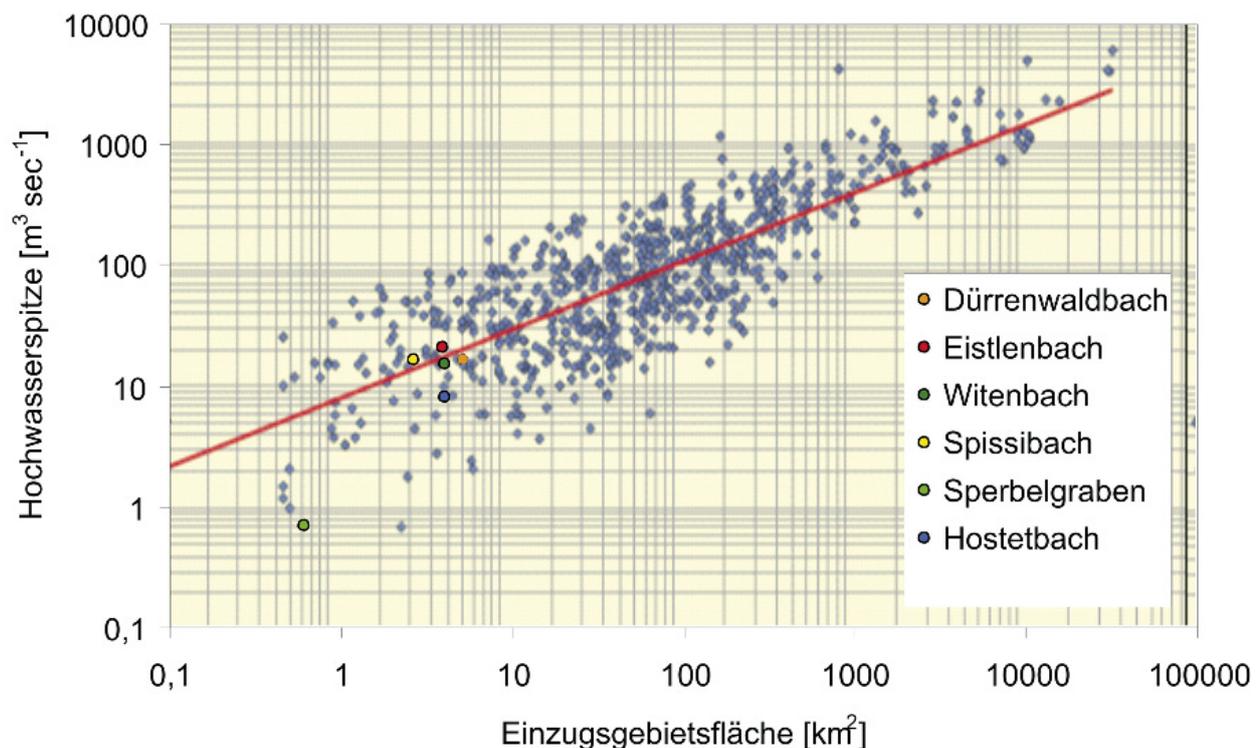
Für den Eistlenbach und den Spissibach liegen die Berechnungen mit ZEMOKOST-Eingangsparameter-Variante B näher bei den anderen Berechnungsergebnissen.

Die Auswahl eines einzigen, eindeutigen HQ<sub>100</sub>-Wertes für ein Einzugsgebiet erweist sich als schwierig. Es ist prinzipiell sinnvoller, anstelle eines einzelnen Abflusswertes eine Bandbreite vorzuschlagen, deren Grenzwerte im konkreten Fall z.B. die Varianten A und B bilden können. Der Vorschlag würde damit alle in einem Bereich des Möglichen liegenden Hochwasserabflüsse erfassen,

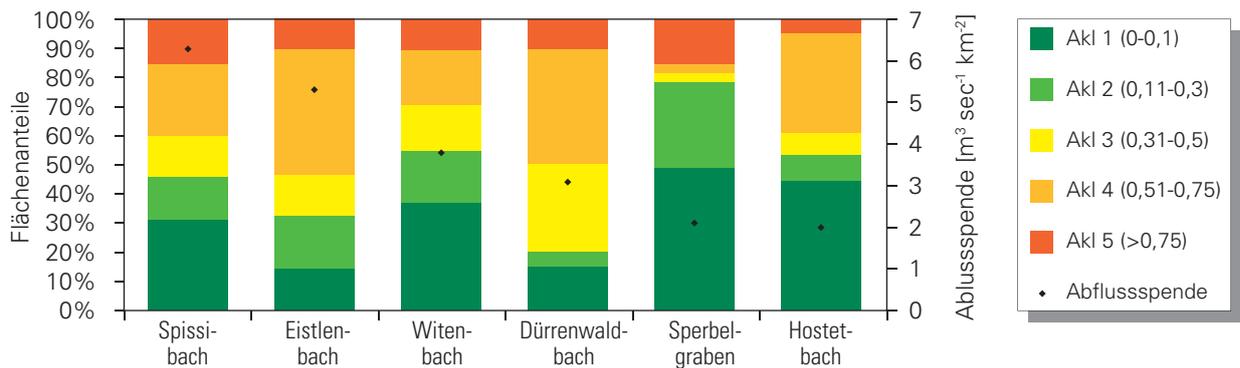
welche im bearbeiteten Einzugsgebiet zu erwarten sind. Eine Übertragung dieses Vorschlages auf die sechs Einzugsgebiete zeigt Tabelle 6-2.

#### 6.2.4 Einordnen der HQ<sub>100</sub>-Berechnungsergebnisse in Hochwasserabflüsse der Schweiz

Die Einordnung der in Tabelle 6-2 vorgestellten HQ<sub>100</sub>-Vorschläge in die Gesamtheit aller je beobachteten Höchstabflüsse der Schweiz in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche sind realistisch. Die HQ<sub>100</sub>-Vorschläge von ZEMOKOST liegen dabei im unteren Bereich. In diesem Zusammenhang wird noch einmal darauf verwiesen, dass mit der Methode



**Abbildung 6-7:** Einordnung der mit ZEMOKOST berechneten HQ<sub>100</sub>-Vorschläge in die höchsten in der Schweiz bis 1990 beobachteten Abflüsse (Weingartner 1999 in Spreafico und Weingartner 2005, verändert).



**Abbildung 6-8:** Zusammenhang zwischen den Flächenanteilen der zugewiesenen Abflussbeiwertklassen und der Abflussspende. Die Anordnung der Einzugsgebiete entspricht der Höhe ihrer Abflussspende  $q$ , welche sich, mit Ausnahme des Eistlenbachs und des Spissibachs (Vorschlag B; Akl: m, Rkl: m), auf den Vorschlag A (Akl: o, Rkl: u) beziehen (vgl. Tabelle 6-2).

der Abschätzung von Feldparametern nach MARKART et al. (2004) und ZEMOKOST als darauf aufbauendem N/A-Modell die Abflussganglinien bzw. –spitzen für das realistische Bad-Case-Szenario (= Bemessungsereignis – in Österreich das 150-jährliche Abflussereignis) berechnet werden.

### 6.3 Analyse der Abflussspenden

Aufgrund der Flächenanteile der einzelnen Abflussbeiwert- wie auch Rauigkeitsklassen in Bezug auf das gesamte Einzugsgebiet soll gezeigt werden, inwiefern diese beiden Parameter die jeweiligen Abflussspenden beeinflussen.

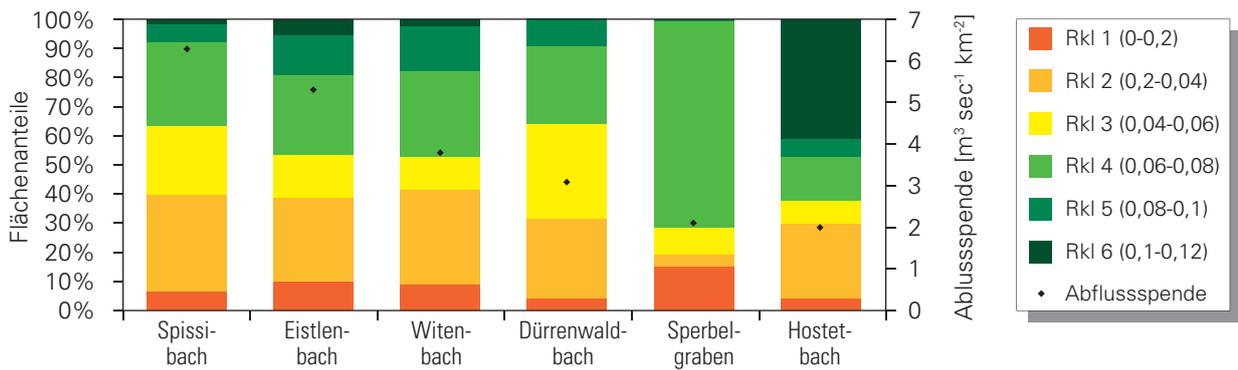
Mit Ausnahme des Dürrenwaldbaches, der sich deutlich von den Ergebnissen der übrigen Einzugsgebiete abhebt, ist mit zunehmendem Anteil der Abflussbeiwertklassen 1 und 2 eine Reduktion in den Abflussspenden erkennbar (Abbildung 6-8). Die abflussdämpfende Wirkung der Einheiten Wald, Zwergstrauchheide und Geröllhalden wird bestätigt - besonders eindrücklich im Sperbelgraben.

Gebiete mit einem großen Anteil an Teilflächen der Abflussbeiwertklassen 3 und 4 liefern höhere Abflussspenden, wobei der Dürrenwaldbach aus diesem Schema ausschert. Aufgrund der gerade in diesem Gebiet (vgl. Kapitel 5.2.1) besonders intensiven Weidenutzung fallen viele Flächen in die Abflussbeiwertklassen 3 und 4. Im Dürrenwaldbach scheinen jedoch zusätzlich andere Aspekte die Abflussprozesse zu dominieren. Hier wird die Abflussspende auch durch die lang gestreckte Form des Einzugsgebietes und der Lage der rasch Abfluss liefernden Flächen in Relation zum Vorfluter beein-

flusst. Zudem unterliegen weite Teile des Einzugsgebietes keiner Intensivweide. Die steilen Bergflanken werden pfleglich gemäht und sind von Beweidung frei gestellt. Diese Hänge sind zwar teilweise vernässt, weisen aber eine sehr raue Oberfläche auf.

Zudem machen sich Feuchtwiesen und Niedermoore in der Abflussbildung bemerkbar. Wenn in einem Einzugsgebiet vorhanden, erhöhen sie zusätzlich die Flächenanteile der Abflussklasse 5, wie am Beispiel des Spissibachs in Abbildung 6-8 zu erkennen ist. Im Verhältnis zu den Abfluss reduzierenden Flächen der Klassen 1 und 2 macht die Abflussbeiwertklasse 5 in diesem Gebiet einen größeren Anteil aus als in den übrigen. Kirnbauer et al. (2009) konnten im Einzugsgebiet des Löhnersbaches bei Saalbach in Salzburg (Österreich) einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Abflussreaktion an Messpegeln im Vorfluter und den Abflussspenden von Feuchtfeldern feststellen. Feuchtfelder reagierten im Löhnersbach rasch und signifikant auf konvektive Starkregen. Niedermoore und natürliche Feuchtfelder weisen gegenüber sekundär vernästen Standorten in der Regel jedoch eine höhere Rauigkeit auf, wirken also etwas stärker Abfluss verzögernd (Markart et al. 2004). Das Puffervermögen unterhalb solcher Flächen liegender Waldflächen (Akl 1 und 2) ist eingeschränkt, da sich der Abfluss aus den Abfluss liefernden überliegenden Einheiten rasch konzentriert und die Waldflächen linear durchschneidet.

Die Pufferwirkung von Waldvegetation ist umso geringer, je weiter der Bestand vom Bach oder dem Vorfluter entfernt liegt. Im Spissibach haben die Feuchtfelder direkten Gerinneanschluss - dadurch kommt die Abfluss dämpfende Wirkung der Waldvegetation nicht in vollem Umfang zum Tragen.



**Abbildung 6-9:** Zusammenhang zwischen den Flächenanteilen der zugewiesenen Rauigkeitsklassen und der Abflussspende. Die Anordnung der Einzugsgebiete entspricht der Höhe ihrer Abflussspende  $q$ , welche sich, mit Ausnahme von Eistlenbach und Spissibach (Vorschlag B; Akl: m, Rkl: m), auf den Vorschlag A (Akl: o, Rkl: u) beziehen (vgl. Tabelle 6-2).

Bei gleich bleibenden Flächenanteilen der einzelnen Rauigkeitsklassen kann sich die Abflussspende verändern (Abbildung 6-9). Dies zeigen die Ergebnisse der Einzugsgebiete Eistlenbach, Spissibach und Witenbach. Der Hostetbach weist die geringste Abflussspende auf. Alleine die vergleichsweise hohen Anteile der Rauigkeitsklassen 4, 5 und 6 lassen eine verlangsamende Wirkung auf die Abflussprozesse im gesamten Einzugsgebiet vermuten. Es ist daher naheliegend, dass die niedrige Abflussspende des Hostetbachs gerade auf die großen Anteile an Geröll- und Blockhalden und alpinen Zwergstrauchheiden (Rkl 5 und 6) zurückzuführen ist. Diese reichen häufig bis nahe ans Gerinne. Ebenso gilt hier: Raue Flächen in einem Einzugsgebiet können nur bei günstiger Lage ihre volle Wirksamkeit entfalten.

Ältere Versionen des Laufzeitverfahrens ZEMO-KOST erlaubten eine Gliederung des gesamten Wildbacheinzugsgebietes in bis zu 27 getrennte Teileinzugsgebiete. Seit 2009 ist die Unterteilung der EZG in beliebig viele Teileinzugsgebiete möglich. Daher sind jeweils auch die Ergebnisse für die einzelnen Teileinzugsgebiete verfügbar und lassen sich separat analysieren.

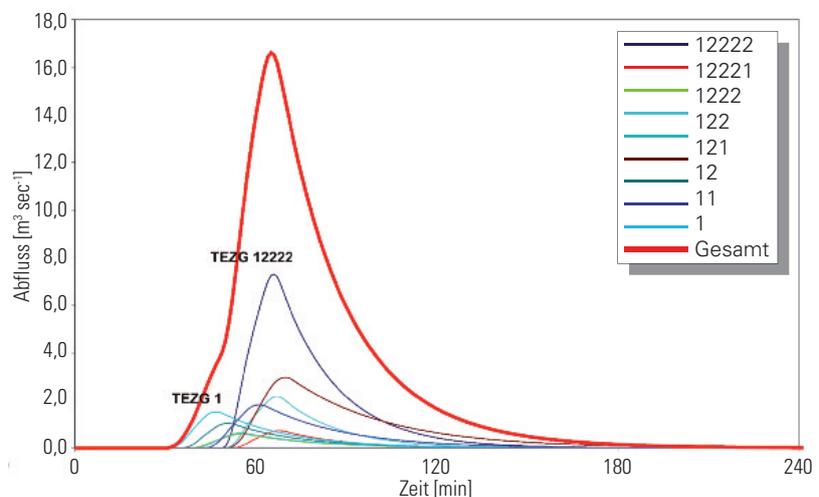
Insbesondere im Hinblick auf bauliche Schutzmaßnahmen erweist sich diese Möglichkeit als außerordentlich wertvolles Hilfsmittel. Teileinzugsgebiete mit starkem Einfluss auf die Abflussprozesse eines Einzugsgebietes und mit einem hohen Beitrag zu

dessen Gesamtabflussspende werden dadurch lokalisierbar. Es können auch die Effekte einfacher Abflussmindernder Maßnahmen (z.B. Auswirkungen von Retentionsmaßnahmen) überprüft werden.

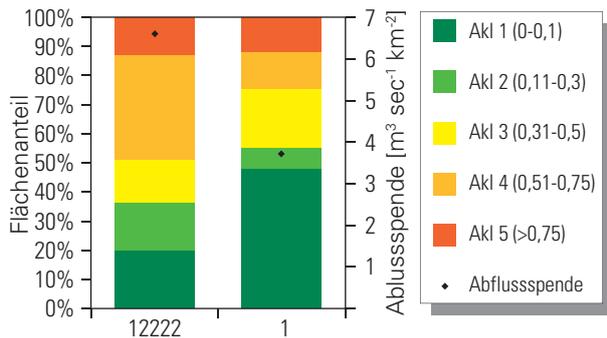
## 6.4 Analyse von zwei Teileinzugsgebieten am Beispiel des Spissibaches

Aus Abbildung 6-10 wird sofort ersichtlich, dass TEZG 12222 den Gesamtabfluss am stärksten beeinflusst. Die Abflussganglinie des TEZG 1 z.B. weist einen vergleichsweise flacheren Verlauf auf. Im Hinblick auf mögliche bauliche Schutzmaßnahmen kann davon ausgegangen werden, dass v.a. TEZG 12222 die Abflussprozesse des Spissibaches maßgeblich bestimmt.

Bei näherer Betrachtung der Flächenanteile der Abflussbeiwertklassen und Abflussspenden des



**Abbildung 6-10:** Gesamtabflussganglinie (rot) und Ganglinien der einzelnen Teileinzugsgebiete des Spissibaches.



**Abbildung 6-11:** Gegenüberstellung der Flächenanteile der zugewiesenen Abflussbeiwertklassen und der Abflussspende des TEZG 12222 und des TEZG 1 des Spissibaches.

TEZG 12222 (Abbildung 6-11) werden die Ursachen deutlich.

Annähernd 50% der Teilflächen sind den Abflussklassen 4 und 5 zuzuordnen. Dies ist auf die zahlreichen Rutschungen, die intensive Weidenutzung des Freilandes und die Feuchflächen im Gebiet zurückzuführen. TEZG 1 hebt sich mit einem 50%-Anteil von Flächen der Akl 1-2 deutlich davon ab.

Mit einem mittleren Abflussbeiwert ( $\bar{\Psi}$ ) 0,44 liegt das TEZG 12222 entsprechend über dem Abflussbeiwert des TEZG 1 ( $\bar{\Psi}$ : 0,3) als auch über dem gemittelten Abflussbeiwert des gesamten Gebietes ( $\bar{\Psi}$ : 0,35).

Unter Miteinbezug der Unterschiede zwischen den Rauigkeitsklassen wird der massive Einfluss des TEZG 12222 auf das Abflussgeschehen des Spissibaches im Hochwasserfall ersichtlich.

## 6.5 Diskussion

In drei von sechs Testgebieten werden mit dem N/A-Modell ZEMOKOST Resultate erzielt, die direkt mit vorliegenden anderen Ergebnissen vergleichbar sind (Dürrenwaldbach, Sperbelgraben, Spissibach - vgl. Abbildung 6-6).

Im *Witenbach* liegt ZEMOKOST vergleichbar mit den Resultaten von Schaffner (2007), hier liegen die unter Anwendung von HAKESCH von Sury (2006) erzielten Werte deutlich darüber.

Markante Abweichungen gibt es im Eistlenbach und im Hostetbach. Die Ursache könnte auch in den unterschiedlichen Methoden der Verfahren (HAKESCH, ZEMOKOST) liegen.

In Anbetracht ihrer Einzugsgebietscharakteristik fällt auf, dass sich der *Witenbach* und der *Sperbel-*

graben als einzige der untersuchten Gebiete auf dem fürs Mittelland typischen Molasseuntergrund befinden. Eine geologische Einheit, deren Reaktion auf Starkregenereignisse bisher im Ostalpenraum nur ungenügend über Starkregensimulationen untersucht werden konnte und daher – wie von Markart et al. (2006) beschrieben – noch nicht ausreichend in die Geländeanleitung integriert werden konnte.

Die Anwendung der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) zur Abschätzung der Abflussbeiwerte und oberflächlichen Rauigkeiten erweist sich insgesamt als geeignet. Dies kann mit Unterstützung der Resultate aus den Vergleichen der verschiedenen Abflussbeiwerte (vgl. 6.1.2), mit deutlicher Sicherheit gesagt werden.

Die Untersuchungen und Interpretationen sollten auf wesentlich mehr als die sechs Einzugsgebiete der Schweiz ausgedehnt werden, um allgemein gültige Aussagen machen zu können.

In ETALP (Projektteam ETALP 2003) ist das Verfahren der Abflussbeiwertschätzung nach Markart et al. (2004) und die N/A-Modellierung nach ZEMOKOST (Stepanek et al. 2004) für Österreich auf der mittleren Maßstabsebene (1:10.000) und auf der Detailebene ( $\leq 1:5.000$ ) als standardisierte Vorgangsweise festgelegt worden. Dieses Verfahren wird laufend im Rahmen von Modellvergleichen (z.B. Kohl et al. 2008) bzw. Plausibilitätsanalysen (Stöffler 2007, Totschnig 2007) überprüft und weiterentwickelt.

## 7. Erfahrungen aus den Berechnungen mit ZEMOKOST

- Die Anwendung von ZEMOKOST in den sechs Einzugsgebieten zeigte eine unterschiedliche Sensitivität in Bezug auf die verschiedenen Inputparameter.
- Besonderes Gewicht erhalten die Abflussbeiwert- ( $C$ ) und Rauigkeitsklassen ( $c$ ) (Abbildungen 6-5 und Abbildung 6-6) in der Formel von Izzard (1946) sowie die eingesetzten Niederschlagsintensitäten ( $i_T$ ) (Abbildung 6-3). Von deutlich geringerer Bedeutung sind die Hangneigung ( $J$ ) und die Hauptgerinnelänge ( $L_G$ ).
- Die Anleitung zum Laufzeitverfahren ZEMOKOST beschränkt sich auf ein kurzes und knapp gehaltenes Handout. Die Herleitung der Inputparameter erfolgt nach der Geländeanleitung

von Markart et al. (2004) bzw. der Grundlage von Zeller (1974 bzw. 1981). Die Herausgabe einer umfassenden Arbeit zu ZEMOKOST ist vorgesehen. Derzeit wird ZEMOKOST als MS-Excel-File auf Anfrage an Dritte weiter gegeben. ZEMOKOST wird laufend weiter entwickelt – Support ist über Email von den Autoren erhältlich (Bernhard.Kohl@uibk.ac.at).

- Bei nachvollziehbar erhobenen Datengrundlagen kommt man mit ZEMOKOST mit den Standardeinstellungen zu sehr guten Ergebnissen. Das Tool bietet jedoch auch die Möglichkeiten eines Feintunings, um z.B. Fehleinschätzungen in den Felddatenaufnahmen zu korrigieren. Diverse Zusatzfunktionen des Programms bieten vielfältige Möglichkeiten, die Berechnungen genau auf ein Einzugsgebiet abzustimmen und anzupassen. Dadurch besteht jedoch für unerfahrene Anwender die Gefahr, den Bezug zur Realität zu verlieren - welche Optionen unbedingt eingeschaltet und welche weggelassen werden können - um die plausibelste Variante durchzurechnen.
- Optimal ist die Verwendung von ZEMOKOST in Kombination mit einem Geografischen Informationssystem (GIS).
- Es handelt sich bei ZEMOKOST um ein auf MS-Excel basiertes Programm, dadurch ist die typische Gliederungsstruktur in einzelne Tabellenblätter vorgegeben. In logischer Abfolge ist damit die Eingabe der einzelnen Inputparameter in die dafür vorgesehenen, orange hinterlegten Felder gewährleistet. Entsprechend der gewohnten, standardisierten Funktionsweise von MS-Excel erfolgen die Verknüpfungen und Auswertungen. Das Verfahren ZEMOKOST ist nicht selbsterklärend. An der Integration eines Hilfesystems und dessen laufender Verbesserung wird gearbeitet.
- Es ergeben sich MS-WINDOWS bzw. MS-Office-spezifische Probleme, z.B. Kompatibilitätsprobleme zwischen neueren und älteren WINDOWS-Versionen. Daher wurde ZEMOKOST bisher standardmäßig in der MS-EXCEL-Version 2003 weiter gegeben. Bei eventuellen Fehlermeldungen wird um Kontaktaufnahme unter folgender Email-Adresse ersucht: Bernhard.Kohl@uibk.ac.at
- Die Ergebnisse werden nicht nur in Zahlenform, sondern parallel dazu in grafischer Form dargestellt.
- Eine vorangehende Zusammenstellung der erforderlichen Inputparameter in einem separaten Excel-Formular erwies sich als sehr hilfreich und sinnvoll. Die Herleitung der einzelnen Größen wird um einiges einfacher und auch die anschließende Übertragung der Daten in die Tabellenblätter von ZEMOKOST kann damit auf effiziente Art und Weise erfolgen.
- Kleinste, nachträgliche Veränderungen der Inputparameter oder sonstiger Einstellungen sollten stets mit der Betätigung des Buttons zur Berechnung des Bemessungsereignisses abgeschlossen werden. Erst dadurch erfolgt die Neuberechnung.
- Die Anwendung von ZEMOKOST kann rasch zu einer großen Datenmenge führen, gerade bei der Auswertung unterschiedlicher Niederschlagsdaten, wie in der vorliegenden Arbeit. Es empfiehlt sich die geordnete Archivierung in nachvollziehbar dokumentierten Excel-Dateien.
- Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass mit dem N/A-Modell ZEMOKOST zuverlässige Resultate zu erzielen sind. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist aber an die sorgfältige Durchführung gebietspezifischer Analysen gebunden. Das heißt, jedes Einzugsgebiet ist als Einzelfall mit eigener Charakteristik zu betrachten.

## 8. Synthese

### 8.1 Vorschläge für eine Adaptierung und Erweiterung der Geländeanleitung von Markart et al. (2004)

In diesem Abschnitt wird die Geländeanleitung als eigenständiges Element und nicht als Teil des Gesamtprojektes ETALP (Projektteam ETALP 2003) betrachtet, wie es in Österreich der Fall ist. Die folgenden Vorschläge sind auf eine supranationale Anwendung der Methode, insbesondere der Schweiz, ausgerichtet. Sie basieren auf den Erkenntnissen aus der in dieser Arbeit durchgeführten Anwendung der Geländeanleitung:

- Die Geländeanleitung ist ein Handbuch für die Beurteilung der Parameter  $C$  (Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz) und  $c$  (Rauigkeit der Oberfläche) im Gelände. Sie enthält nur in untergeordnetem Umfang Hinweise zur Vorbereitung der Felderhebung bzw. der Kartierungsgrundlagen. Diese liegen für Österreich als Ergebnisse des ETALP-Projektes (Projektteam ETALP 2003) für verschiedene Maßstabebenen vor. In Sprea-

fico et al. (2003) wird eine Vorgangsweise zur Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten vorgeschlagen, deren Grundstruktur sich auch in Bezug auf eine Anwendung der Geländeanleitung in der Schweiz eignet (siehe Kapitel 4.2).

- Für eine Anwendung in der Schweiz wird eine Anpassung der Geländeanleitung vorgeschlagen. Diese sollte umfassen:

1. Erweiterung um Anwendungsbeispiele bzw. Beurteilungsbeispiele für typische Vegetationseinheiten der Schweiz
2. Grundsätzliche Erweiterung der angefügten Liste der Zeigerpflanzen auch um Pflanzen der Schweiz

Durch die Erfahrungen aus den Feldarbeiten dieser Arbeit entstand bereits ein erster Vorschlag für eine erweiterte Liste an Zeigerpflanzen (Tabelle 11-1).

- Die für 2011 vorgesehene Neuauflage der Geländeanleitung sollte eine Reihe von Ergänzungen erfahren:

1. Erweiterung der Geländeanleitung durch eine Beilage mit spezieller Ausrichtung auf die Feldarbeit, mit klaren Hinweisen und Hilfestellungen für die Erhebung im Gelände, insbesondere für die Erstellung von Abflussbeiwertkarten und Rauigkeitskarten im Gelände.
2. Präzisierung von Vorgaben und Richtlinien durch Bilder und Grafiken (z.B. Flächenanteile der Trittschäden, unterschiedlich abflusswirksame Anordnungsweisen von Vegetationseinheiten wie Alpenrosen (mosaikartig oder linienförmig), typische Erkennungsmerkmale starker Abflussprozesse im Hang, etc.).
3. Ergänzung um eine Liste generell gültiger Abflussbeiwerte, insbesondere für anthropogen beeinflusste Flächen (Parkplätze, Straßen, Intensivsiedlungsgebiete etc.).

## 8.2 Vorschläge zur Optimierung von ZEMOKOST im Hinblick auf weitere Anwendungen in der Schweiz

Zu Testzwecken wurden verschiedene Versionen ausgewählten Benutzern überlassen, so auch in dieser Arbeit. Die kritische Rückmeldung aller Beteiligten soll die Entwicklung des Programms unterstützen und die Praxistauglichkeit erhöhen.

Die ZEMOKOST-Versionen bis Mitte 2008 enthalten nur eine Kurzanleitung (Kohl und Stepanek 2005). Eine erweiterte Version mit integrierter Hilfsfunktion ist in Vorbereitung.

## 9. Fazit und Ausblick

Für weitere Anwendungen der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) bei der Beurteilung der Abflussdisposition in der Praxis wird eine standardisierte Vorgangsweise vorgeschlagen. In Österreich ist die im Rahmen des Projektes ETALP (Projektteam ETALP 2003) von einer interdisziplinär zusammengesetzten Expertengruppe erarbeitete Vorgangsweise gültig.

Für die Schweiz kann die in Kapitel 4 vorgestellte Erhebungstechnik in Kombination mit den von Spreafico et al. (2003) vorgestellten Grundlagen zur Anwendung kommen. Durch dieses standardisierte Vorgehen werden die Durchführung der Erhebungen mit der Geländeanleitung und die anschließende Hochwasserabschätzung mit ZEMOKOST wesentlich erleichtert.

Der Bedarf nach einer supranational abgestimmten und vergleichbaren Vorgangsweise ist gegeben – eine solche sollte im Rahmen eines eigenen Projektes länderübergreifend entwickelt werden.

Im Allgemeinen bestätigt sich einmal mehr die Erkenntnis, dass es sich bei einem Wildbacheinzugsgebiet stets um ein „Individuum“ höchster Komplexität handelt. Dessen Abflussdynamik und Prozesse mit einem Modell möglichst realitätsnah zu erfassen, bleibt schwierig. Diesbezüglich kann auch ein noch so normiertes Vorgehen oder vereinheitlichtes Abschätzverfahren nicht alle zusammenwirkenden Aspekte erklären.

Die in Kapitel 1.4 formulierten Fragen lassen sich folgendermaßen beantworten:

- Die Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) ist grundsätzlich auf schweizerische Verhältnisse übertragbar.
- Die Anwendung von ZEMOKOST bewährt sich durchaus auch in schweizerischen Einzugsgebieten. Für die untersuchten sechs Testgebiete konnten plausible Resultate erzielt werden.
- Die Hochwasserdisposition eines Einzugsgebietes lässt sich aus Abflussbeiwertkarten sehr gut ablesen.

Aus den Erfahrungen der vorliegenden Untersuchungen lassen sich folgenden Fragen und Problemstellungen für weitere Arbeiten ableiten:

- Die geringe Zahl an untersuchten Einzugsgebieten erlaubt keine allgemein gültigen Aussagen bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Einzugsgebietscharakteristik und den Abflussprozessen. Die Interpretationen der  $HQ_x$ -Abschätzungen haben für die behandelten Einzelfälle Gültigkeit und nur eingeschränkten Anspruch auf eine Generalisierung. Um eine breitere Abstützung der Analysen und Folgerungen zu gewährleisten, bedarf es weiterer Untersuchungen, in ähnlichen und in komplexeren Einzugsgebieten.
- In Anbetracht einer Anpassung der Geländeanleitung an schweizerische Verhältnisse sind ebenfalls weitere Untersuchungs- und Anwendungsgebiete erforderlich, insbesondere sind Starkregensimulationen in hydrologischen Vegetationsformen bzw. auf geologischen Einheiten durchzuführen, die bisher im Ostalpenraum noch nicht erfasst wurden (z.B. Einzugsgebiete auf der Alpensüdseite der Schweiz, Jura).
- Zudem würden zusätzliche Berechnungsversuche, die die Grundlage der Anleitung nach Markart et al. (2004) darstellen, in der Schweiz zu Messdaten führen, welche als Grundlage und fundierte Belege für weitere Abschätzungen dienen könnten. Damit wäre die Zuordnung spezifischer Abflussbeiwerte auch in der Schweiz mit klaren Argumenten abgesichert.
- Über eingehendere und systematische Untersuchungen zur Sensitivität der einzelnen Inputparameter von ZEMOKOST könnten die Berechnungen verfeinert und genauer auf das betrachtete Einzugsgebiet abgestimmt werden. Die Güte der Anwendung ließe sich damit steigern.
- Aufgrund der beachtlichen Differenzen, welche sich durch den Vergleich der mit einer Kleinregenanlage gemessenen (Dobmann 2009) und abgeschätzten (Markart et al. 2004) Abflussbeiwerte gezeigt haben, wäre zu überprüfen, ob es sich dabei tatsächlich um Gründe wie die Berechnungsflächengröße handelt (vgl. Kapitel 6.1.1). Eine Gegenüberstellung von Ergebnissen aus Experimenten mit Großregenanlagen, wie sie der Geländeanleitung zugrunde liegen, und Resultaten von Kleinregenanlagen, wie von Dobmann (2009) angewendet, könnten möglicherweise hilfreiche Erkenntnisse liefern. Dies würde zusätzlich

die Anpassung der Geländeanleitung an schweizerische Einzugsgebiete erleichtern und beschleunigen. Im Gegensatz zu Experimenten mit Großregenanlagen liegt in der Schweiz eine Reihe von Messungen auf kleinen Versuchsflächen vor (z.B. Dobmann 2009, Merz et al. 2009, u.a.).

## 10. Literaturverzeichnis

### 10.1 Literatur

- AESCHIMANN, D., LAUBER, K., MICHEL, A. (2004): Flora alpina. Ein Atlas sämtlicher 4500 Gefäßpflanzen der Alpen. – Bern: Haupt.
- AMA (2007): Daten Mehrfachantrag (MFA) 2007. – Argarmarkt Austria.
- ANGERER, J., HÜBL, J., KOHL, B., MARKART, G., PIRKL, H., PITTRACHER M., SAUSGRUBER, J.T, SCHIEGG, H.O. (2009): Nachhaltiges Risiko-Management Enterbach – Inzing Tirol/Austria. – Schlussbericht - Interreg III b-Projekt, Alpine Space, :nab „Naturraumpotentiale alpiner Berggebiete“ Workpackage 7 / Evaluierung der Methodik ETALP.
- BARBEN, M. (2001): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. – Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern.
- BAUERHANSL, C., KOUKAL, T., SCHADAUER, K. (2007): Erste österreichweite Waldkarte. – Österr. Forstzeitung 12.
- BLUM, W.E.H., SPIEGEL, H., WENZEL, W.W. (1996): Bodenzustandsinventur, Konzeption, Durchführung und Bewertung, Empfehlungen zu einer Vorgangsweise in Österreich. – Arbeitskreis Bodenzustandsinventur der ÖBG. Bundesministerium f. Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage.
- BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE (Hrsg., 2001): Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). – Bern 2001.
- BUNZA, G., SCHAUER, T. (1989): Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der bayerischen Alpen. – Informationsbericht 2/89 des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, München. ☒ 127–150.
- BUNZA, G., JÜRGING, P., LÖHMANNRÖBEN, R., SCHAUER, T., ZIEGLER, R. (1996): Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten – Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. – Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft. ☒ Heft 27, 25-36.
- BURGA, C.A., KLÖTZLI F., GRABHERR, G. (2004): Gebirge der Erde. – Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart. ISBN 3-8001-4165-5.
- COMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (1991): CORINE biotopes manual. Habitats of the European Community. – Data specifications. Vol. 3. Luxembourg: Office for Official Publications.

- COSANDEY C., ANDRÉASSIAN, V., MARTIN, C., DIDON-LESCOT, J.F., LAVABRE, J., FOLTON, N., MATHYS, N., RICHARD, D. (2005): The hydrological impact of the mediterranean forest: A review of French research. – *Journal of Hydrology* 301, 235-249.
- DELARZE, R., GONSETH, Y., GALLAND, P. (1999): Lebensräume der Schweiz. Ökologie – Gefährdung – Kennarten. – Originalausgabe: «Guides des milieux naturels de Suisse». Delachaux et Niestlé, 1998. Deutschsprachige Ausgabe: Ott Verlag, Thun. ISBN 3-7225-6749-1.
- DIN 18130 (1998): Baugrund- Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes. – Deutscher Normenausschuss, Berlin.
- DIN 19663 (1985): Wildbachverbauung; Begriffe, Planung und Bau. – Deutscher Normenausschuss, Berlin.
- DOBMAN, J. (2009): Hochwasserabschätzungen in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz – Interpretations- und Praxis-hilfe. – Dissertation in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern.
- FAL - Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (Hrsg., 2002): Klassifikation der Böden der Schweiz. Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definition der Begriffe, Anwendungsbeispiele. – Zürich - Reckenholz.
- ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer und dynamischer und historischer Sicht. – UTB Eugen Ulmer, Stuttgart. 5. Auflage. ISBN 3-8252-8104-3.
- FEHR, R. (1978): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial. – Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, Zürich. In: Schweizer Ingenieur und Architekt, Vol. 105, 1104-1109.
- FORSTER, F., HEGG, C. (2002): A suggestion for the estimation of floodpeak discharge in small torrential catchments. – Proc. ICFE 2002. Bern. In: Spreafico et al. (2003): Hochwasserabschätzung in Schweizerischen Einzugsgebieten - Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4, Bern, 2003.
- FREI, E., PEYER, K. (1991): Boden - Agrarpedologie. Eigenschaften, Entstehung, Verbreitung, Klassierung, Kartierung des Bodens und Nutzung im Pflanzenbau. – Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart.
- GATTERMAYR, W. (2003): Übersicht vorhandener wissenschaftlicher Grundlagen und Modelle betreffend den Niederschlag. – Projektteam ETALP (Hsg): Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Abfluss-, Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. Kompendien Niederschlag/Abfluss. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- GEIGER, H., RÖTHLISBERGER, G., STEHLI, A., ZELLER, J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901 - 1970. – In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- GERMANN P., SCHICHLER B., DIESBERGEN C. (2005): Landschaftsökologie IV. Bodenkunde. Skript zur Vorlesung im SS 2005. Geographisches Institut der Universität Bern.
- GODINA R., G. BLÖSCHL (2006): Aufgaben und Methoden der hydrologischen Regionalisierung. Wiener Mitteilungen Band 197: Methoden der hydrologischen Regionalisierung. 7-19.
- HAGEN, K., GANAHL, E., HÜBL, J. (2007): Analyse und Evaluierung von gebräuchlichen empirischen Ansätzen zur Hochwasserabschätzung in Wildbächen. – BFW-Dokumentation, Nr. 137.
- HAÖ (2009): Hydrologischer Atlas Österreichs. – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hsg.)
- HEGG, C., RICKENMANN, D., FORSTER, F. (2001): Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. – In: Bull. Angew. Geol. Vol. 6, Nr.1, WSL Birmensdorf, 85-97.
- HEGG, C. (2006): Waldwirkung auf Hochwasser. – LWF-Wissen 55, 29-33.
- HEGG, O., BÖGUIN, C., ZOLLER, H. (1993): Atlas schutzwürdiger Vegetationstypen der Schweiz. – Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 160 Seiten.
- HERMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. – Teubner Studienbücher Geographie, Stuttgart.
- IZZARD, C.F. (1946): Hydraulics of runoff from developed surfaces. – In: Proc. Highway Research Boar., Vol. 26, 129-150.
- JENEWEIN, S. (2003): Entwicklung einer GIS-basierten Applikation (PROMAB<sup>GIS</sup>) für die Berechnung von Abfluss und Feststofffrachten in Wildbacheinzugsgebieten unter Verwendung des prozessorientierten Ansatzes PROMAB. – Diplomarbeit, Institut für Geographie, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- JENSEN, H., LANG, H., RINDERKNECHT, J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. – In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.42. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- JOHANNSEN, R., MARKART, G. (2007): Hydrologische Grundlagen der Ingenieurbiologie. – Fachartikel, Mitteilungen der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V., Achen. Nr. 29, 2-10.
- KAUFMANN, A. (2006): Agrarpedologie. – Vorlesungsunterlagen Blockkurs. Zollikofen.
- KHR - Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (2001): Übersicht über die Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Erfahrungen aus den Rhein-anliegerstaaten. – Bericht Nr. I-19, Lelystad NL.
- KIENHOLZ, H., KELLER, H., AMMAN, W., WEINGARTNER, R., GERMANN, P., HEGG, C., MANI, P., RICKENMANN, D. (1998): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. – Schlussbericht NFP31. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998.
- KILIAN, W. (2002): Schlüssel zur Bestimmung der Böden Österreichs. – Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft. Heft 67
- KIRNBAUER, R., HAAS, P., CHIFFLARD, P., TILCH, N., ZILLGENS, B., JOHST, M., STEIDL, R. (2009): Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone - Abschlussbericht 1998-2008. – Institut für Ingenieurhydrologie und Wassermengenwirtschaft, TU-Wien.
- KLEBINDER, K., MARKART, G., SOTIER, B., JOCHEM, A. (2008): Naturgefahrenmanagement BUWELA – Geländeaufnahmen. – Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawenverbauung, GBL Südliches Niederösterreich und Burgenland.
- KOHL, B., STEPANEK, L. (2005): ZEMOKOST - neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. – BFW-Praxisinformation 8, 21-22

- KOHL, B., SOTIER, B., KLEBINDER, K., JOCHEM, A., MARKART, G. (2008): Hydrologie Finsing – Szenarienanalyse. – Bericht an den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung, Sektion Tirol, 40 Seiten.
- KOHL, B., MARKART, G. (2009): Von der Starkregensimulation zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen kleiner Einzugsgebiete. – Forum Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (eingereicht).
- KÖLLA, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwässern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. – Mitteilungen der Versuchsanstalt Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH, Nr. 87, Zürich.
- KUICHLING, E. (1889): The Relation Between Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts. – Transactions ASCE, Vol. 20, Nr. 402, 1-60, 1889.
- LABHART, T.P. (2005): Geologie der Schweiz. – 7. Auflage, Ott Verlag, Bern.
- LANDOLT, E. (1977): Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. – Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH Zürich, Stiftung Rübel, 64. Heft.
- LAUBER, K., WAGNER, G. (2007): Flora Helvetica. – Farbfotos von 3000 Blüten- und Farnpflanzen der Schweiz, Artbeschreibungen und Bestimmungsschlüssel. 4. Auflage. Verlag Paul Haupt, Bern. ISBN 3-258-06313-3.
- LORENZ, P., SKODA, G. (2000): Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ( $D < 12$  Stunden) mit inadäquaten Daten. – Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich. Heft 80, 1-24.
- LOUIS, C. (1967): Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels. – Veröff. des Inst. für Boden- und Felsmechanik der Universität Fridericiana, Karlsruhe.
- MARKART, G., KOHL, B. (1995): Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten. – Ergebnisse der Berechnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach in Salzburg. FBVA Berichte, Nr. 89, ISSN 1013-0713.
- MARKART, G., B. KOHL, P. ZANETTI (1996): Einfluss von Bewirtschaftung, Vegetation und Boden auf das Abflussverhalten von Wildbacheinzugsgebieten - Ergebnisse von Abflussmessungen in ausgewählten Teileinzugsgebieten des Finsingtales (Zillertal/Tirol). Beitrag Symposium INTERPRAEVENT, Garmisch-Partenkirchen, Juni 1996, Tagungsband 1, 135-144.
- MARKART, G. (2000): Zum Wasserhaushalt von Hochlagenaufforstungen - am Beispiel der Aufforstung von Haggen bei St. Sigmund im Sellrain. – FBVA-Berichte, Nr. 117.
- MARKART, G., KOHL, B., GALLMETZER, W., PRAMSTRALLER, A. (2000): Wirkungen von Begrünungen auf das Abflussverhalten in Wildbacheinzugsgebieten bei Starkregen. – Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2000 – Villach / Österreich, Tagungspublikation, Band 2, 53-64.
- MARKART, G., KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G., STERN, R. (2004): Provisorische Geländeleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). – BFW-Dokumentation, Wien, (3). <http://bfw.ac.at/rz/bfw-cms.web?dok=4343>.
- MARKART, G., KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G., STERN, R. (2006): Geländeleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen – Grundzüge und erste Erfahrungen. – Wien: Technische Universität, 2006. Wiener Mitteilungen, Band 197: Methoden der hydrologischen Regionalisierung, 159-178.
- MARKART, G., KOHL, B., PERZL, F. (2007): Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung - eine unterschätzte Größe? – LWF Wissen 55, 34-43.
- MARKART, G., KLEBINDER, K., KOHL, B. (2008): Indicators for evaluation of surface runoff potential in critical land use areas. – Proceedings of the conference MONITOR/08 – Systems behind a safer environment. International Conference on Monitoring Methods, 21<sup>st</sup>/22<sup>nd</sup> Feb. 2008, Raumberg-Gumpenstein, Styria - Austria, 69-79.
- MERZ, A., ALEWELL, C., HILTBRUNNER, E., BÄNNINGER, D. (2009): Plant-compositional effects on surface runoff and sediment yield in subalpine grassland. – J. Plant Nutr. Soil Sci., DOI: 10.1002/jpln.200800231.
- MÜLLER R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. – Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich 4: 188 S.
- MÜLLER, M. (2006): Blockkurs Agrarpädagogie II. – Skript (SS 2006). Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL, Zollikofen.
- NAEF, F., SCHERRER, S., FAEH, A. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Größe extremer Hochwasser. – Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms, NFP31. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- NESTROY, O., DANNEBERG, O.H., ENGLISCH, M., GESSL, A., HAGER, H., HERZBERGER, E., KILIAN, W., NELHIEBE, P.L., PECINA, E., PEHAMBERGER, A., SCHNEIDER, W., WAGNER, J. (2000): Systematische Gliederung der Böden Österreichs (Österreichische Bodensystematik 2000). – Mitt. Österr. Bodenkundl. Ges., Heft 60.
- PIFFNER, A. (2006): Geologie der Schweiz. – Vorlesungsskriptum Institut für Geologie, Universität Bern.
- PRESS, F., SIEVER, R. (2003): Allgemeine Geologie. – Einführung in das System Erde. Spektrum Verlag, Elsevier GmbH, München. 3. Auflage.
- PROJEKTTTEAM ETALP (2003): Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. – Handbücher, Version 11.12.2003, BMLFUW, Wien.
- RICKENMANN, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. – Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 103.
- RICKENMANN, D. (1996): Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. – Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf. In: Wasser, Energie, Luft; Jg. 88, Heft 11/12, 298-304.
- RICKLI, C., FORSTER, F. (1997): Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. – In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Jg. 148, Nr. 5, 367-385.

- RÖTHLISBERGER, G., GEIGER, H., ZELLER, J. (1979, 1981, 1992): Starkniederschläge in der Schweiz. – 7 Bände, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.
- SCHAFFNER, F. (2007): Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugsgebieten auf der Grundlage von Einzugsgebietskenngrößen. – Diplomarbeit - Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 393.
- SCHAUER, T., CASPARI, C. (2001): Der große BLV Pflanzenführer. – Über 1500 Blütenpflanzen Mitteleuropas, davon 1140 farbig abgebildet. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München. ISBN 3-405-16014-6.
- SCHAUER, T. (2002 - schriftliche Mitteilung): Pflanzen als Abflusszeiger - Auswertungen von Beregnungsversuchen. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.
- SCHNETZER, I. (2007): Wildbäche – Flächenstatistik – Geodatenmanagement. – WLK.GIS-Statusbericht, Stand XII/2006, Stabsstelle Geoinformation, BMLFUW, S. 10.
- SCHLUEP, D., C. WÜTHRICH, C. (2006): Die Erstellung einer Datenbank von repräsentativen „Niederschlags-Messstationen“ für ausgewählte Wildbäche. – Seminararbeit, Geographisches Institut Bern.
- SCHÖBERL, F., STÖTTER, J., SCHÖNLAUB, H., PLONER, A., SÖNSER, T., JENEWEIN, S., RINDERER, M. (2004): PROMABGIS: Ein GIS-basiertes Werkzeug für die Ermittlung von Massenbilanzen in alpinen Einzugsgebieten. – Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – Riva / Trient, Tagungsband 1, Thema III, 271-282.
- SCHWARZ, O. (1974): Hydrogeographische Studien zum Abflussverhalten von Mittelgebirgsflüssen. – Rhein-Mainische Forschungen, Heft 76.
- SCS (1985): National Engineering Handbook. – Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service. USDA. Washington D.C.
- SEGER, M. (2001): Rauminformationssystem Österreich - ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes. – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation; Nr. 89.
- SPREAFICO, M., WEINGARTNER, R., BARBEN, M., RYSER, A. (2003): Hochwasserabschätzung in Schweizerischen Einzugsgebieten - Praxishilfe. – Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4, Bern.
- SPREAFICO, M., WEINGARTNER, R. (2005): Hydrologie der Schweiz. – Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern.
- STEPANEK, L., KOHL, B., MARKART, G. (2004): Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss. – Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Riva - Trient, 101-112.
- STÖFFELER, R. (2007): Die Eignung des Niederschlag-Abflussmoduls ZEMOKOST zur Abschätzung von Hochwasserwerten anhand von Beispielen in der Steiermark. – Diplomarbeit, Universität Graz.
- SURY, B. (2006): Anwendung der Software HAKESCH in Wildbacheinzugsgebieten - Evaluation und Empfehlung. – Diplomarbeit - Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 362, Bern, 2006.
- TOTSCHNIG, R.F. (2007): Abschätzung des Fließzustandes in steilen Wildbächen. – Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- VIVIROLI, D. (2007): Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse für unbeobachtete Einzugsgebiete der Schweiz. – Dissertation in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Bern, 2007.
- VOGT, S., FORSTER, F. (1999): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten. Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasser Bemessungsganglinie. – Interner Hydrologie-Bericht B360, WSL, Birmensdorf.
- VOLK, G., FUCHS, H. (2004): HYDR<sup>2</sup>AC (Hydrological Rainfall Runoff Model for Alpine Catchments). – In: BMLFUW (Hsg): Neue Wege in der Gefahrenabschätzung – Planung und Entwicklung zum Schutz vor Naturgefahren, 56-57.
- WEINGARTNER, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen. Grundlagen und Anwendungen. – Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 37, Bern.
- WEINGARTNER, R. (2004): Landschaftsökologie III - Hydrologie. – Vorlesungsskript 2004/05. Geographisches Institut, Bern.
- WEISKOPF, K. (2002): Analyse zur räumlichen Variabilität der Interzeption von Fichten und Zirben im Bergwaldbereich – Auswertung der Interzeptionsmessungen von S. Stauder im Zillertal / Tirol. – Diplomarbeit an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- ZELLER, J. (1974, 1981): Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. – Bericht der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf. Nr. 126.
- ZELLER, J. (1975): Berechnung der Abflusswassermenge. – Vorlesungsunterlagen Wildbach und Hangverbau, Abteilung VI, ETH-Z. (unveröff.).
- ZEPF, H. (2003): Geomorphologie - Eine Einführung. – 2. Aufl., UTB Verlag Schöningh - Paderborn. Reihentitel: Grundriss allgemeine Geographie; Band 2164.

## 10.2 Karten und digitale Daten

- BFS (Hrsg., 1997): Arealstatistik der Schweiz (1992/97).
- BFS (Hrsg., 2001): Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000 (überarbeitete Version). Basierend auf der Bodeneignungskarte der Schweiz, 1980. – Bundesamt für Statistik. (Vertrag vom 14. Januar 2005, Bundesamt für Landestopographie DV002233.2).
- BFW (2008): Elektronische Bodenkarte – eBOD.
- BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN - BEV (Stand 2009): Österreichische Karte 1:50 000 und 1:25 000 – ÖK50 und ÖK25V.
- EJPD Eidg. Justiz- und Polizeidepartement, Bundesamt für Raumplanung (Hrsg., 1980): Bodeneignungskarte der Schweiz. Maßstab 1:200 000.
- HARTL, H., R. STERN, R., M. SEGER, M. (2001): Karte der aktuellen Vegetation von Kärnten. M 1 : 50 000. – Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten.
- HAÖ (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hsg.)
- ETHZ - Institut für Kartographie der ETH Zürich (Hrsg., 2005): Atlas der Schweiz 2.0, digital.

- SGK Schweizerische Geologische Kommission (Hrsg., 1980): Geologische Karte der Schweiz. Maßstab 1:500 000.
- SWISSTOPO (1968): Atlas der Schweiz. – Bundesamt für Landestopographie.
- SWISSTOPO (Hrsg., 2003): Landeskarte der Schweiz. Maßstab 1:25 000. – Bundesamt für Landestopographie.
- SWISSTOPO (Hrsg., 2005a): Digitale Landeskarte der Schweiz. – Maßstab 1:25 000. Bundesamt für Landestopographie. Blätter 1148 (Stand 2000), 1168, 1189, 1209, 1228, 1266 (Stand 1998), 1246 (Stand 2004), 1210,1230 (Stand 1999). (Vertrag vom 14. Januar 2005, Bundesamt für Landestopographie DV351.5).
- SWISSTOPO (Hrsg., 2005b): Digitales Höhenmodell DHM (Raster und Basismodell, ganze Schweiz). Maßstab 1: 25 000. – Bundesamt für Landestopographie. (Vertrag vom 14. Januar 2005, Bundesamt für Landestopographie DV002234.1).
- SWISSTOPO (Hrsg., 2005c): Primärflächen der Schweiz, digital. Maßstab 1:25 000. Blätter 1148 (Stand 2000), 1168, 1189, 1209, 1228, 1246, 1266 (Stand 1998), 1210,1230 (Stand 1999). – Bundesamt für Landestopographie (Vertrag vom 14. Januar 2005, Bundesamt für Landestopographie DV002232.1).
- SWISSTOPO (Hrsg., 2005d): Gewässernetz der Schweiz, digital. Maßstab:1:25 000. – Bundesamt für Landestopographie. (Vertrag vom 14. Januar 2005, Bundesamt für Landestopographie DV002232.1).
- SWISSTOPO (Hrsg., 2005): Luftbilder swissimage, digital (TIFF) georeferenziert auf der Basis des digitalen Geländemodells DTM-AV und DHM25 für Gebiete > 2000 m ü. M. Bodenauflösung 0,5 m. – Bundesamt für Landestopographie. Blätter 1148, 1168, 1189, 1209, 1228, 1246, 1266, 1210, 1230 (Flugjahr 2004). (Vertrag vom 14. Januar 2005, Einvernehmen mit dem Bundesamt für Landestopographie DV012687.1).
- SWISSTOPO (2007): Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). – Bundesamt für Landestopographie.
- FVA: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau: <http://www.fva-bw.de/>
- GBA Geologische Karte der Republik Österreich. [http://www.univie.ac.at/Geobib\\_Austria/geologicalmaps.htm](http://www.univie.ac.at/Geobib_Austria/geologicalmaps.htm) bzw. <http://www.geologie.ac.at/de/GEOMARKT/gok200image.html>
- HADES: Hydrologischer Atlas der Schweiz, digital: [http://www.hades.unibe.ch/hades\\_d/index.htm](http://www.hades.unibe.ch/hades_d/index.htm)
- LWF: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF, Freising: <http://www.lwf.bayern.de/>
- Schweizerische Abrisbeitsgemeinschaft für Bergegebiete SAB: <http://www.alporama.ch>
- Spissibach HQ: Niederschlags- und Abflussdaten Leissigen: <http://www.agnat.ch/index.php?userhash=46988377&navID=333&l=d>
- Waldwissen.net: Informationen für die Forstpraxis (Hrsg. LWF, BFW, WSL, BLV, FVA): <http://www.waldwissen.net/>
- WSL: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, ETH Zürich: <http://www.wsl.ch/>
- 
- Verfasser:**
- Dipl.-Geogr. Carol Hemund  
Geographisches Institut der Universität Bern  
Gruppe für Hydrologie  
Haller Str. 12  
CH-3012 Bern  
[hemund@giub.unibe.ch](mailto:hemund@giub.unibe.ch)
- Dipl.-Ing. Dr. Dr.hc Gerhard Markart  
Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen  
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald,  
Naturgefahren und Landschaft (BFW)  
Rennweg 1 – Hofburg  
6020 Innsbruck  
[Gerhard.Markart@uibk.ac.at](mailto:Gerhard.Markart@uibk.ac.at)
- Mag. Bernhard Kohl  
Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen  
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald,  
Naturgefahren und Landschaft (BFW)  
Rennweg 1 – Hofburg  
6020 Innsbruck  
[Bernhard.Kohl@uibk.ac.at](mailto:Bernhard.Kohl@uibk.ac.at)
- Dipl.-Geogr. Dr. Judith Dobmann  
Geographisches Institut der Universität Bern  
Gruppe für Hydrologie  
Haller Str. 12  
CH-3012 Bern  
[judith.dobmann@schweiz.org](mailto:judith.dobmann@schweiz.org)
- Univ.Prof. Dr. Rolf Weingartner  
Geographisches Institut der Universität Bern  
Gruppe für Hydrologie  
Haller Str. 12  
CH-3012 Bern  
[wein@giub.unibe.ch](mailto:wein@giub.unibe.ch)

### 10.3 Internet

- BFW: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien: <http://bfw.ac.at/>
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW: <http://www.blw.admin.ch>, <http://www.blw.admin.ch/agroscope/>
- Bundesamt für Umwelt BAFU: <http://www.bafu.admin.ch>
- Bundesamt und Forschungszentrum für Wald (Wien, A): <http://bfw.ac.at>
- eBOD – BFW: Elektronische Bodenkarte <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=7066>
- eHYD – das Portal für hydrographische Daten Österreichs im Internet – Abteilung Wasserhaushalt im Bundesministerium für land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: [www.wassernet.at/filemanager/download/45414/](http://www.wassernet.at/filemanager/download/45414/)
- Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL: <http://www.wsl.ch>

## 11. Anhang

### Anhang 1 - Indikatorpflanzen

**Tabelle 11-1:** Zusammenstellung der im Verlaufe der Feldarbeiten für die vorliegende Arbeit häufig vorgefundenen Indikatorpflanzen. Die Angaben beziehen sich vor allem auf nordalpine Gebiete der Schweiz und basieren einerseits auf Angaben der Geländeanleitung (Markart et al. 2004), andererseits auf eigenen Erfahrungen.

<sup>1</sup>Der hydrologische Indikatorwert entspricht der Abflussklasse nach **Markart** et al. (2004). Die Zuordnungen sind mit Vorsicht zu verwenden (vgl. Kapitel 4.2.2, Tabelle 4-3).

Indikatorpflanze	Lateinischer Name	Lauber und Wagner (2007)	Zeigerwert	Feuchtezahl	Feuchtezeigerklassen	Hydrologischer Indikatorwert <sup>1</sup>
Acker-Kratzdistel	<i>Cirsium arvense</i>	2215	Weideunkraut	3	f	1 - 2
Ährige Rapunzel	<i>Phyteuma spicatum</i>	1925	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Alpen-Ampfer	<i>Rumex alpinus</i>	481	Weide-, Überdüngungszeiger	4	ff	3 - 4
Alpen-Anemone	<i>Pulsatilla alpina</i>	155	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Alpen-Greis-Kraut	<i>Senecio alpinus</i>	2169	Feuchte-, Weide-, Überdüngungszeiger	4	ff	3 - 4
Alpenhelm	<i>Bartsia alpina</i>	1822	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Alpenkratzdistel	<i>Cirsium spinosissimum</i>	2223	Feuchtezeiger, Weideunkraut	4	ff	3 - 4
Alpenliebstock	<i>Ligusticum mutellina</i>	1471	Weidezeiger	3	f	1 - 2
Alpen-Lieschgras	<i>Phleum alpinum</i>	2780	Weidezeiger	3	f	1 - 2
Alpenlöwenzahn	<i>Taraxacum alpinum</i>	2297	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Alpen-Milchlattich	<i>Cicerbita alpina</i>	2305	Feuchte-, Nährstoffzeiger	4	ff	3 - 4
Alpen-Rispengras	<i>Poa alpina</i>	2654	Weidezeiger	3	f	1 - 2
Alpen-Wegerich	<i>Plantago alpina</i>	1726	Verdichtungszeiger	3	mf - f	2
Alpen-Ziest	<i>Stachys alpina</i>	1668	Weide-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Arve/Zirbe	<i>Pinus cembra</i>	90	Magerkeits-, Säure-, Frischezeiger	3	f	1 - 2
Arznei-Baldrian	<i>Valeriana officinalis</i>	2013	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Bärtige Glockenblume	<i>Campanula barbata</i>	1900	Weide-, Säurezeiger	3	f	1 - 2
Behaarte Hainsimse	<i>Luzula pilosa</i>	2453	Frische-, Magerkeitszeiger	3	f	1 - 2
Berg-Ahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>	1361	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Bergfarn	<i>Oreopteris limbosperma</i>	37	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Berg-Flockenblume	<i>Centaurea montana</i>	2235	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Berg-Goldnessel	<i>Lamium galeobdolon montanum</i>	1662	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Berghauswurz	<i>Sempervivum montanum</i>	897	Trockenheits-, Säurezeiger	2	mf	1
Berg-Reitgras	<i>Calamagrostis varia</i>	2769	Frischezeiger	2	mf	1 - 2
Besenheide	<i>Calluna vulgaris</i>	788	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Betonienblättrige Rapunzel	<i>Phyteuma betonicifolium</i>	1923	Frische-, Magerkeitszeiger	3	f	1 - 2
Bewimperte-Alpenrose	<i>Rhododendron hirsutum</i>	785	Frische-, Kalkzeiger	3	f	1 - 2
Bewimperter Steinbrech	<i>Saxifraga aizoides</i>	901	Feuchtezeiger	4	ff - n	4 - 5
Blattreiches Läusekraut	<i>Pedicularis foliosa</i>	1813	Feuchte-, Nährstoffzeiger	4	ff	3 - 4
Blauer Eisenhut	<i>Aconitum neomontanum</i>	139	Nährstoffzeiger, Weideunkraut	4	ff	3 - 4
Blaugras	<i>Sesleria caerulea</i>	2681	Trocken-, Basenzeiger	2	mf	1

Indikatorpflanze	Lateinischer Name	Lauber und Wagner (2007)	Zeigerwert	Feuchtezahl	Feuchtezeigerklassen	Hydrologischer Indikatorwert 1
Blaugrüne Binse	<i>Juncus inflexus</i>	2435	Weide-, Feuchtezeiger	4	ff - n	4 - 5
Bleiche Segge	<i>Carex pallescens</i>	2562	Frische-, Magerkeitszeiger	3	f	1 - 2
Borstgras/ Bürstling	<i>Nardus stricta</i>	2724	Weide-, Säurezeiger, Weideunkraut	3	f	4 - 5
Braune Segge	<i>Carex Nigra</i>	2541	Nässezeiger	5	n	5
Breitblättriges Knabenkraut	<i>Dactylorhiza majalis</i>	2975	Nässezeiger	5	n	5,6
Brombeere	<i>Rubus fruticosus</i>	1030	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Buntschwengel	<i>Festuca varia</i>	2624	Säure-, Magerkeits-, Trockenheitszeiger	2	mf	1 - 2
Drahtschmiele	<i>Avenella flexuosa</i>	2733	Trocken-, Magerkeitszeiger	2	mf	1 - 2
Echte Nelkenwurz	<i>Geum urbanum</i>	934	Feuchte-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Echter Wacholder	<i>Juniperus communis</i>	97	Trockenzeiger, Weideunkraut	2	mf	1
Echter Waldmeister	<i>Galium odoratum</i>	1939	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Echtes Johanniskraut	<i>Hypericum perforatum</i>	497	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Eisenhutblättriger Hahnenfuss	<i>Ranunculus aconitifolius</i>	169	Nässezeiger	5	n	5
Europäische Trollblume	<i>Trollus europaeus</i>	116	Feuchtezeiger	4	ff - n	3 - 5
Feld-Thymian	<i>Thymus serpyllum</i>	1701	Trockenheitszeiger	2	mf	1
Feld-Witwenblume	<i>Knautia arvensis</i>	1993	Frische-, Lichtzeiger	2	mf	1
Flatter-Binse	<i>Juncus effusus</i>	2433	Feuchte-, Verdichtungszeiger	4	ff - n	5
Französisches Raygras	<i>Arrhenatherum elatius</i>	2736	Frische-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Gebirgs-Kälberkropf	<i>Chaerophyllum hirsutum</i>	1409	Feuchtezeiger	4	ff	4
Gebräuchlicher Augentrost	<i>Euphrasia rostkoriana</i>	1833	Feuchte-, Weidezeiger	4	ff	3 - 4
Gebräuchlicher Baldrian	<i>Valeriana officinalis</i>	2013	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Geissfuss	<i>Aegopodium podagraria</i>	1453	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Gelbe Segge	<i>Carex flava</i>	2589	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Gelber Eisenhut	<i>Aconitum vulparia</i>	133	Feuchtezeiger, Weideunkraut	4	ff	3 - 4
Gelber Enzian	<i>Gentiana lutea</i>	1509	Frischezeiger, Weideunkraut	3	f	1 - 2
Gemeine Brunelle	<i>Prunella vulgaris</i>	1645	Frische-, Weidezeiger	3	f	1 - 2
Gemeiner Frauenmantel	<i>Alchemilla vulgaris</i>	993	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Gemeiner Löwenzahn/ Rauhes Milchkraut	<i>Leontodon hispidus</i>	2265	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Gemeiner Wasserdost	<i>Eupatoria cannabina</i>	2025	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Gemeines Knäuelgras	<i>Dactylis glomerata</i>	2674	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Gemeines-Kammgras	<i>Cynosium cristatus</i>	2675	Weidezeiger (Berg- und Almwiesen)	3	f	1 - 2
Gewöhnliche Goldrute	<i>Solidago virgaurea</i>	2029	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Glattes Brillenschötchen	<i>Biscutella laevigata</i>	739	Trocken-, Kalkzeiger	2	mf	1
Glieder-Binse	<i>Juncus articulatus</i>	2449	Feuchte-, Verdichtungszeiger	4	ff - n	5
Gold-Pippau	<i>Crepis aurea</i>	2319	Weide-, Frischezeiger	3	f	1 - 2
Grauer Alpendost	<i>Adenostyles alliariae</i>	2026	Feuchtezeiger	4	ff	4
Grau-Erle	<i>Alnus incaua</i>	258	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Grossblütiges Sonnenröschen	<i>Helianthemum grandiflorum</i>	526	Trocken-, Magerkeitszeiger	2	mf	1
Grosse Brennessel	<i>Urtica dioica</i>	273	Weide-, Nährstoff-, Frischezeiger	3	f	1 - 2
Grosses Alpenglößchen	<i>Soldanella alpina</i>	837	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Grüner Alpenlattich	<i>Homogyne alpina</i>	2156	Frischezeiger, Schneetälchen	3	f	1 - 2

Indikatorpflanze	Lateinischer Name	Lauber und Wagner (2007)	Zeigerwert	Feuchtezahl	Feuchtezeigerklassen	Hydrologischer Indikatorwert <sup>1</sup>
Grün-Erle	<i>Alnus viridis</i>	259	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Hainlattich	<i>Aposeris foetida</i>	2277	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Hänge-Segge	<i>Carex pendula</i>	2561	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Heidelbeere	<i>Vaccinium myrtillus</i>	790	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Himbeere	<i>Rubus idaeus</i>	1027	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Hornklee	<i>Lotus corniculatus</i>	1157	Frischezeiger	2	mf	1 - 2
Horst/ Immergrüne Segge	<i>Carex sempervirens</i>	2583	Trockenzeiger	2	mf	1
Huflattich	<i>Tussilago farfara</i>	2160	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Hunds-Quecke	<i>Agropyron caninum</i>	2687	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Kelchsimsenlilie	<i>Tofieldia calyculata</i>	2833	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Kleine Brunelle	<i>Prunella vulgaris</i>	1645	Frische-, Weidezeiger	3	f	1 - 2
Knäuelblütige Glockenblume	<i>Campanula glomerata</i>	1897	Frischezeiger	2	mf	1 - 2
Knöllchen Knöterich	<i>Polygonum viviparum</i>	460	Weide-, Frischezeiger	3	f	1 - 2
Kohldistel	<i>Cirsium oleraceum</i>	2224	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Kriechender Günsel	<i>Ajuga reptans</i>	1623	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Kriechender Hahnenfuss	<i>Ranunculus repens</i>	196	Weide-, Verdichtungszeiger	4	ff	4
Kriechendes Fingerkraut	<i>Potentilla reptans</i>	950	Frische-, Weide-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Läger-Rispengras	<i>Poa supine</i>	2652	Weidezeiger (Berg- und Almwiesen)	4	ff	3 - 4
Langhaariges Habichtskraut	<i>Hieracium pilosella</i>	2345	Trocken- und Weidezeiger	2	mf	1-2
Leg-Föhre	<i>Pinus mugo</i>	94	Trockenzeiger, Kampfzone	2	mf	1
Männliches Knabenkraut	<i>Orchis mascula</i>	2991	Frische-, Weidezeiger	3	f	3
Mauerlattich	<i>Myselis muralis</i>	2304	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Meisterwurz	<i>Peucedanum ostruthium</i>	1479	Feuchtezeiger	3	f	1 - 2
Pfeifengras	<i>Molinia caerulea</i>	2695	Feuchtezeiger	4	ff	4 - 5
Pfennigkraut	<i>Lysimachia nummularia</i>	845	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Preiselbeere	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	789	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Purpurlattich/ Hasenlattich	<i>Prenanthes purpurea</i>	2308	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Quirlblättriger Salomonssiegel	<i>Polygonatum Verticillatum</i>	2901	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Rainkohl	<i>Lapsana communis</i>	2258	Frische-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Rasen-Haarbinse	<i>Trichophorum caspitosum</i>	2478	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Rasenschmiele	<i>Deschampsia cespitosa</i>	2734	Weide-, Staunässe-, Verdichtungszeiger	4	ff	4
Rauschbeere/ Moorbeere	<i>Vaccinium uliginosum</i>	791	Nässezeiger	5	n	4 - 5
Riesen-Schachtelhalm	<i>Equisetum telmateja</i>	14	Nässezeiger	5	ff - n	5
Riesenschwingel	<i>Festuca gygantea</i>	2637	Feuchte-, Staunässezeiger	4	ff - n	4 - 5
Ross-Minze	<i>Mentha longifolia</i>	1715	Weide-, Feuchtezeiger	4	n	5
Rostblättrige Alpenrose	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	786	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Rost-Segge	<i>Carex ferruginea</i>	2581	Feuchte-, Basenzeiger	4	ff	3 - 4
Rot-Klee	<i>Trifolium pratense</i>	1129	Weide- und Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Rundblättriger Steinbrech	<i>Saxifraga rotundifolia</i>	905	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Sal-Weide	<i>Salix caprea</i>	597	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Schaft-Kugelblume	<i>Globularia nudicaulis</i>	1891	Weide-, Trockenzeiger	2	mf	1
Schlaffe Segge	<i>Carex flacca</i>	2567	Feuchte-, Basenzeiger	3	f - ff	2 - 3
Schlangen-Knöterich	<i>Polygonum bistorta</i>	452	Feuchtezeiger	4	ff	4

Indikatorpflanze	Lateinischer Name	Lauber und Wagner (2007)	Zeigerwert	Feuchtezahl	Feuchtezeigerklassen	Hydrologischer Indikatorwert <sup>1</sup>
Schmalblättriges Wollgras	<i>Eriophorum angustifolium</i>	2476	Nässe-, Säurezeiger	5	n	5
Schwarzes Männertreu	<i>Nigritella nigra</i>	2961	Weide-, Trockenheitszeiger	2	mf	1
Spitz-Wegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	1721	Verdichtungszeiger	2	mf	1 - 2
Stinkender Storchenschnabel	<i>Geranium robertianum</i>	1369	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Sumpf-Baldrian	<i>Valeriana dioica</i>	2010	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Sumpf-Dotterblume	<i>Ca,tha palustris</i>	115	Nässezeiger	5	n	5
Sumpf-Herzblatt	<i>Parnassia palustris</i>	921	Feuchtezeiger	4	Ff - n	4 - 5
Sumpf-Kratzdistel	<i>Cirsium palustre</i>	2217	Feuchtezeiger, Weideunkraut	4	ff - n	4 - 5
Sumpf-Labkraut	<i>Galium palustre</i>	1947	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Sumpf-Pippau	<i>Crepis paludosa</i>	2335	Feuchte- und Weidezeiger	4	ff	3 - 4
Sumpfschachtelhalm	<i>Equisetum palustre</i>	21	Feuchtezeiger, Weidezeiger	4	ff - n	4 - 5
Torfmoos	<i>Sphagnum</i>		Nässezeiger		n	5
Vielblütige Hainsimse	<i>Luzula multiflora</i>	2461	Frischezeiger-, Magerkeitszeiger	3	f	2
Waldbinse	<i>Scirpus sylvaticus</i>	2481	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Wald-Hainsimse	<i>Luzula sylvatica</i>	2460	Feuchte-, Säure-, Magerkeitszeiger	3	f	1 - 2
Wald-Reitgras	<i>Calamagrostis arundinaceae</i>	2770	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Wald-Sauerklee	<i>Oxalis acetosella</i>	1399	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Wald-Schwingel	<i>Festuca altissima</i>	2638	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Wald-Segge	<i>Carex sylvatica</i>	2577	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Wald-Springkraut	<i>Impatiens noli-tangere</i>	1393	Feuchte-, Nährstoffzeiger	4	ff	3 - 4
Wald-Storchenschnabel	<i>Geranium sylvaticum</i>	1379	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Wasserdost	<i>Eupatorium cannabinum</i>	2025	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Wechselblättriges Milzkraut	<i>Chrysosplenium alternifolium</i>	919	Nässezeiger	5	n	5
Weisse Pestwurz	<i>Petasites albus</i>	2175	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Weisse Taubnessel	<i>Lamium album</i>	1661	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Weisser Germer	<i>Veratrum album</i>	2838	Weide-, Nährstoff-, Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4
Wiesen Bärenklau	<i>Heracleum Sphondylium</i>	1489	Frische-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Wiesen-Augentrost	<i>Euphrasia rostkoviana</i>	1833	Feuchte-, Weidezeiger	4	ff	3 - 4
Wiesen-Flockenblume	<i>Centaurea jacea</i>	2250	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Wiesen-Glockenblume	<i>Campanula patula</i>	1903	Weide-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Wiesen-Labkraut	<i>Galium album</i>	1961	Frische-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Wiesenspippau	<i>Crepis biennis</i>	2337	Weide- und Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Wiesen-Schwingel	<i>Festuca pratensis</i>	2621	Weide-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Winter Schachtelhalm	<i>Equisetum hyemale</i>	49	Feuchtezeiger	4	ff - n	4 - 5
Wirbeldost	<i>Clinopodium vulgare</i>	1694	Trocken-, Magerkeitszeiger	2	mf	1
Wolliges Honiggras	<i>Holcus lanatus</i>	2727	Feuchte-, Weide-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Zarte Binse	<i>Juncus tenuis</i>	2439	Frische-, Nährstoffzeiger	3	f	1 - 2
Zottiger Klappertopf	<i>Rhinantus alectorolophus</i>	1845	Frischezeiger	3	f	1 - 2
Zottiges Weidenröschen	<i>Epilobium hisrutum</i>	1270	Feuchtezeiger	4	ff	3 - 4

### 11.1 Beilagen der Feldbegehung

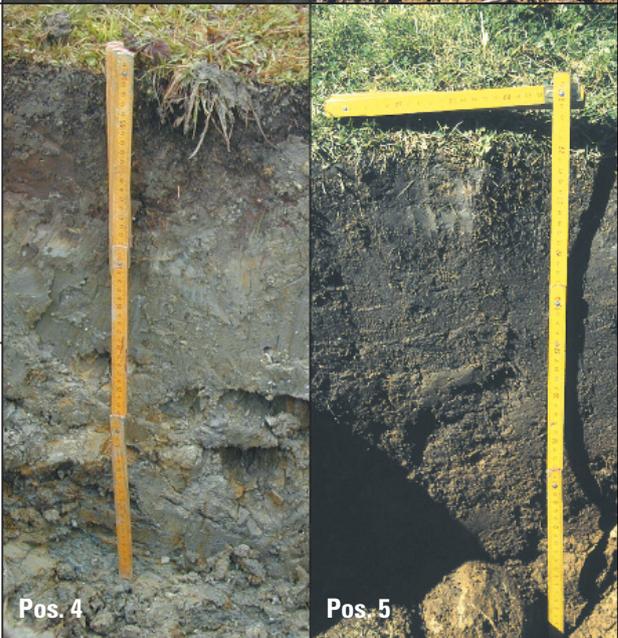
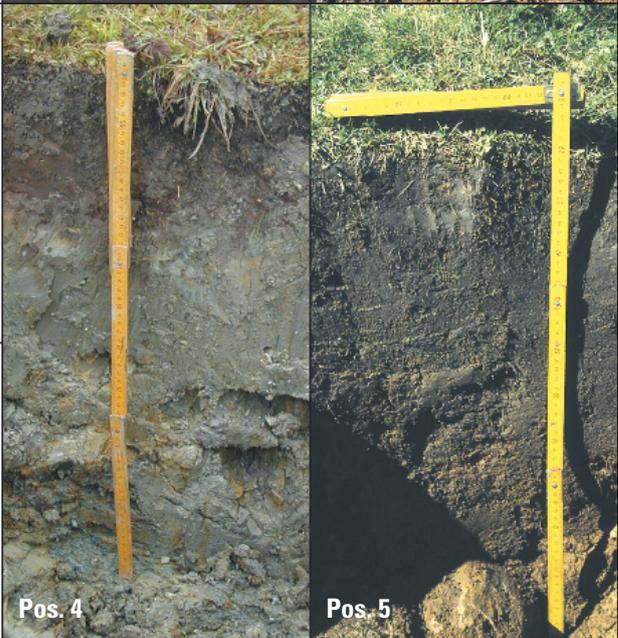
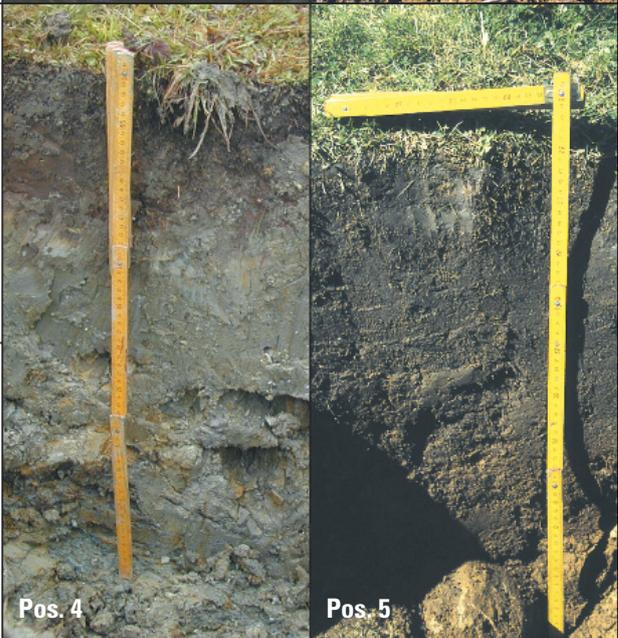
Schema zur Anschätzung der Abflussbeiwertklasse (Fichtenwald)			
Pos.	Böden	Beschreibung	
1	<b>Grob-Böden</b> locker	<b>Skelettreiche, grobkörnige</b> Böden mit hohem Grobanteil (Kies, Sand) <b>Wasserdurchlässigkeit sehr hoch</b>	 Pos. 1
2	<b>Grob-Böden</b> mit Feinanteil <b>locker</b>	<b>Skelettreiche, grobkörnige bis gemischt-körnige</b> Böden mit hohem Grobanteil (Kies, Sand), wobei maximal bis zu 20% Ton- und Feinschluff enthalten sein können. <b>Wasserdurchlässigkeit hoch-mittel</b>	 Pos. 2  Pos. 3
3	<b>Fein-Böden</b> <b>locker</b>	<b>Gemischt- bis feinkörnige Böden</b> mit Schluff- und Tonanteilen bis 40%. <b>Wasserdurchlässigkeit hoch- mittel</b>	 Pos. 2  Pos. 3
4	Fein-Böden <b>bindig</b>	Diese <b>gemischt- bis feinkörnigen</b> Böden enthalten höhere Schluff- und Tonanteile (> 40%), sie verhalten sich bindig (plastisch). Der vorhandene Grobanteil wird nur in Trockenphasen (Schwundrisse) hydrologisch wirksam. Die <b>Wasserdurchlässigkeit ist mittlering</b> , das Wasserbindevermögen deutlich bis hoch. Die plastischen Eigenschaften ändern sich mit dem Wassergehalt.	 Pos. 4  Pos. 5
5	<b>Fein-Böden</b> <b>verdichtet, dicht</b>	Das <b>Infiltrationsverhalten</b> von Grob-Böden mit Feinanteil bzw. Fein-Böden ist durch mechanische Belastung (Befahren, Planie, Weide) <b>weiter reduziert</b> . In diese Kategorie sind z.B. ehemals lockere, aber durch Planie verdichtete Feinböden einzuordnen.	 Pos. 4  Pos. 5

Abbildung 11-1: Einteilung der Böden aufgrund der im Feld einfach abschätzbaren Kenngrößen Grob-/ Feinanteil und Lagerung (aus Markart et al. 2004, S. 13).

<b>Gründigkeit von Waldböden</b>	
<b>Gründigkeit</b>	<b>Bodentiefe (cm)</b>
sehr flachgründig	< 15
flachgründig	15-30
mittelgründig	30-60
tiefgründig	60-120
sehr tiefgründig	> 120

<b>Auswirkungen verschiedener Nutzungen, Eingriffe und Maßnahmen auf den Oberflächenabfluss bei Starkregen in Abhängigkeit vom Untergrund</b>				
<b>Nutzungsart/Eingriff</b>	<b>Grob-Boden, skelettreich, locker</b>	<b>Grob-Boden, skelettreich, mit Feinanteil, locker</b>	<b>Fein-Boden locker</b>	<b>Fein-Boden bindig</b>
Planie	+/-	-	--	--
Beweidung extensiv	+/-	+/-	--	--
Beweidung intensiv	-	--	---	--
Befahren extensiv	+/-	-	--	-
Befahren intensiv	-	--	--	--
Planie + Zusatzbelastung (Beweidung, Befahren, Schipistenpräparierung)	+/-	--	---	--
Holznutzung	(+/-)	(+/-)	(+/-)(-)	(-)/(--)
Drainage	+/+	+/+	+	++
Düngung	+/+	+/+	++	+
Begrünung, ingenieurbiolog. Maßnahmen	+/+	+	+++	++

Zeichenerklärung:

+/- indifferent, geringfügige Verschlechterung

- deutliche Verschlechterung

-- sehr starke Verschlechterung

--- extreme Verschlechterung

() vorübergehend, reversibel

+/- indifferent, geringfügige Verbesserung

+ deutliche Verbesserung

++ sehr starke Verbesserung

+++ extreme Verbesserung

**Abbildung 11-2:** Die Gründigkeit von Waldböden (nach Blum et al. 1996, in: Markart et al. 2004, S: 14, 15) und die Auswirkungen verschiedener Nutzungen, Eingriffe und Maßnahmen auf den Oberflächenabfluss bei Starkregen in Abhängigkeit vom Untergrund.

<b>Merkmale zur Abschätzung der Weidewirkung bzw. -intensität</b>	
<b>Weideintensität</b>	<b>Merkmale</b>
keine	Keine
gering	Spuren einzelner Viehtritte, Weidegang eher linear - z.B. Verbindungen zwischen zwei Weidegründen; vereinzelt Spuren von Dung. Im Wald zusätzlich: Vereinzelte Verletzungen an Wurzelanläufen
mittel	Deutliche Vertrittspuren, aber an keiner Stelle Reduktion des Deckungsgrades unter 0,7. Bei herbstlicher Kurzweide auf Mähwiesen: Für ein bis zwei Wochen mit konzentriertem Viehbestand bestoßen. Diese Nutzung ist besonders im Frühsommer bei hoch stehendem Gras nur schwer erkennbar. Weidezeiger vorhanden. Im Wald: Verletzungen an Wurzelanläufen, Spuren von Verbiss durch Weidevieh an Jungwüchsen.
intensiv, hoch	Sehr starker Vertritt, Zeigerpflanzen für intensive Beweidung und Bodenverdichtung: Binsen, Kriechhahnenfuß, Rasenschmiele, Rossminze. Vor allem in steileren Lagen auf Grob-Böden mit Feinanteil, Fein-Böden und bindigen Böden Reduktion des Deckungsgrades unter 0,7 (besonders während und nach Perioden mit feuchter Witterung). Ausbildung deutlicher Viehgangln, diese sind zum Teil offen bzw. erodiert. In ebenen Lagen (besonders auf feinteilreichen und bindigen Böden): Sehr starke Verwundungen der Grasnarbe (Viehtritte), offensichtliche Verdichtungserscheinungen im Oberboden (z.B. bei Pferdeweide), Häufung von Viehtritten. Gehäuftes Auftreten von Lägerfluren (z.B. div. Ampfer-Arten als Zeiger. Häufung von Exkrementen (Dung). Nur an offenen Aufschlüssen sichtbar: Schichtige Lagerung des Oberbodens. Im Wald: Gehäuftes Auftreten von Verletzungen an Wurzelanläufen, Vertrittschäden und Verbiss an Jungpflanzen.
früher beweidet	In steileren Lagen: Viehgangln (verwachsen) oder unruhiges unregelmäßiges Mikrorelief (verwachsene Viehtritte). Am Bodenprofil: Dichtere Bodenschichten ab 5-8 cm Tiefe (Weidestausohle) bei Grob-Böden mit hohem Feinanteil, Fein-Böden und bindigen/dichten Böden.

<b>Zeigerwertklassen der Bodenvegetation</b>	
<b>tr-mf</b>	trocken - mäßig frisch
<b>f</b>	frisch
<b>ff</b>	sehr frisch - feucht
<b>n</b>	sehr feucht - nass

**Abbildung 11-3:** Merkmale zur Abschätzung der Weidewirkung bzw. -intensität und Zeigerwertklassen der Bodenvegetation (aus Markart et al. 2004, S. 16, 20).

Anschätzen der Rauigkeit			
	Asphalt, Beton, Fels, Eis		
	Rohböden, offene Brachflächen	RKL 2	> 10% Deckungsgrad/ Sukzessionsgrad
	Rasenstandorte	RKL 1	<b>Borstgrasrasen</b> ( <i>Nardus stricta</i> ), <b>Schিপisten</b> mit hohem Anteil von Bürstling, <b>Verdichtung</b> (Beweidung oder sonstige mechanische Belastung)
		RKL 3	Intensiv betreut und gepflegt von Beginn der Herstellung an ( <b>Begrünung, Düngung</b> , Vermeidung von mechan. Belastung, Mahd mit leichtem Gerät, Liegenlassen des gemähten Grases zur <b>Mulchung</b> ), <b>Mähwiesen</b> (je nach Pflegegrad)
	Feuchtfächen	RKL 4	hoher Anteil an <b>Moosen</b> und hochstehenden Gräsern
	Zwergstrauchheiden	RKL 3 RKL 3-4 RKL 5 RKL 6	Borstgras mit <b>Besenheide</b> vergesellschaftet <b>Erlen-</b> und <b>Birkenstandorte</b> <b>Vaccinien</b> (Heidelbeere, Preiselbeere, Rauschbeere) flächige <b>Alpenrosenbestände</b>
	Waldstandorte	RKL 1	Piceetum nudum Je nach <b>Unterwuchs</b> (vorhandene Bodenvegetation) und <b>Mikrorelief</b> (glatte Oberfläche - Abfluss fördernd, viele kleine Mulden - Abfluss verzögernd)
	Räumliche Verteilung		<i>Beispiel:</i> Viehgangeln, 50% Alpenrosen (RKL 6), 50% Borstgrasrasen (RKL 1):
		RKL 4 RKL 3	<b>Gürtelförmige</b> Anordnung der Alpenrose <b>Insel-</b> bzw. <b>Mosaikartige</b> Anordnung der Alpenrose

Abbildung 11-4: Anschätzen der Rauigkeit (nach Markart et al. 2004, S. 28, verändert).



**Feuchtestufe**

keine	1
geringmächtig < 5 cm, locker, elastisch-federnd	2
geringmächtig < 5 cm, kompakt, periodisch austrocknend, benetzungshemmend	3
> 5 cm, locker, leicht feucht, aufnahmefähig	4
> 5 cm, kompakt, periodische Austrocknung, benetzungshemmend	5

**Auflagesubstrat**

Mull	1	Moder	2	Rohhumus	3
------	---	-------	---	----------	---

**Auflageart**

mullartig	1	moderartig	2	hydromorph	3	xeromorph	4
-----------	---	------------	---	------------	---	-----------	---

Anmerkung:

Bodenaufbau (cm)	Horizont	Struktur	Textur	Struktur:	
bis 5				blockig	1
5 bis 10				skelettreich (> 20%) - locker	2
10 bis 20				feinteilreich - locker	3
20 bis 30				feinteilreich - bindig	4
30 bis 40				feinteilreich - dicht	5
40 bis 50				Torf	6
50 bis 60					
größer 60					

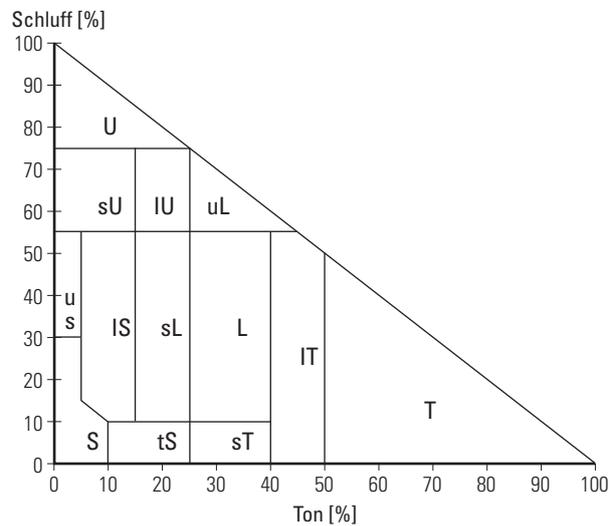
**Boden-Hydrologische Charakterisierung**

blockig	1
skelettreich (> 20%) - locker	2
feinteilreich - locker	3
feinteilreich - bindig	4
feinteilreich - dicht	5
Torf	6

matrixgestützt	1
skelettgestützt	2

**Anteil der Matrix**

matrixarm bis matrixfrei	1
mässig matrixreich	2
matrixreich	3



**Wassereinfluss**

pseudovergleyt	1
vergleyt	2

Skelettanteil <= (in %)	5	10	15	20	25	30	40	50	>50
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**Eindringwiderstand (Bodenbohrer)**

gering	1
mittel	2
hoch	3

**Kleinrelief**

glatt	1
leicht bewegt	2
stark bewegt	3

Anmerkung:

**Geologie**

**Karbonat**

Kalkstein	1
Dolomit	2
Rauhwacke	3
Sandstein	4
Konglomerat	5
Mergel	6
andere	7

**Kristallin**

Gneis	8
Grobgneis	9
Paragneis / Glimmerschiefer	10
Phyllit / Schiefer (1)	11
Quarzit	12
Serpentinit	13
Marmor	14
andere (2)	15

**Lockergestein / Sedimente**

Talalluvium	16
Wildbachschutt	17
Hangschutt (3)	18
Blockschutt	19
Kies (locker/halbfest)	20
Sand (locker/halbfest)	21
Schluff / Lehm (locker/halbfest)	22
Ton (locker/halbfest)	23
Löß / Lößlehm	24
andere	25

andere:

- (1) alle Schiefer und Phyllite außer Glimmerschiefer z.B. Albitschiefer und -phyllit, Graphitphyllit
- (2) harte Kristallingesteine (z.B. Eklogit, Kalksilikatfels, Basalt, ...)
- (3) auch Verwitterungs- und Solifluktionsschutt

**Massenbewegungen / Prozesse / Morphologie**

**gravitativ**

Kriechmasse	1
Rutschmasse	2
Sturzmasse	3

**fluviatil**

Talverfüllung	4
Terrasse / Geländestufe	5
fluviatile Erosion	6
Schwemmkegel/-fächer	7
Wildbachablagerung	8

**periglazial**

Solifluktion	9
--------------	---

**Vernässung**

ja  nein

**wenn ja, Vernässung anthropogen?**

ja  nein

**Hinweise auf Fließen an der Oberfläche**

ja

**Kleingerinnenetz**

nicht / kaum ausgebildet .....  1      mittel .....  2      Häufung von Kleingerinnen .....  3

**Bewirtschaftung / Nutzung / technische Eingriffe**

**technische Eingriffe**

**Anmerkung**

Weg / Wegböschung	1	<input type="text"/>
linienförmig (z.B. Holzriesen)	2	<input type="text"/>
hydrologisch (Drainagen)	3	<input type="text"/>
mechanische Verdichtung	4	<input type="text"/>
Sonstige	5	<input type="text"/>

**Weide**

keine	<input type="checkbox"/> 1
gering	<input type="checkbox"/> 2
mittel	<input type="checkbox"/> 3
intensiv	<input type="checkbox"/> 4
ehemalig	<input type="checkbox"/> 5

**Abgeschätzter Abflussbeiwert**

Oberflächenabfluss in % des Niederschlages	Abflussbeiwertklasse (AKI)	Zuordnung	Anmerkung
0			
>0-10			
11-30			
31-50			
51-75			
>75			
1,0 (vernässte, versiegelte Flächen)			



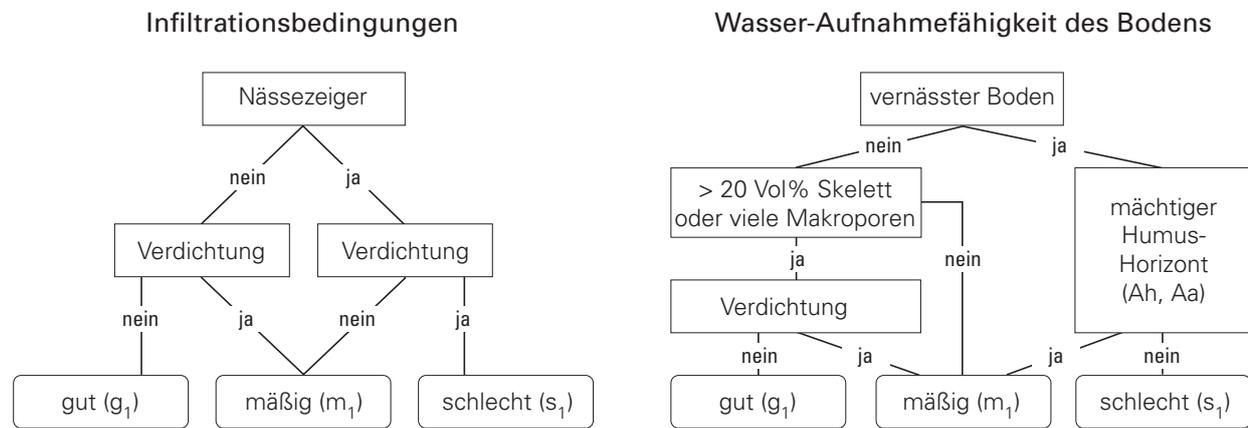


**Abbildung 11-5:** Kartierungsvorlage Eistlenbach. Luftbild inkl. Höhenlinien, M 1:5 000 (Kartendaten: reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091346))

Tabelle 11-3: Beilagen zur Abschätzung II (aus Rickli und Forster 1997).

**Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten**

**Bestimmung des Abflusskoeffizienten nach Rickli & Forster**



	Abflusskoeffizient $\Psi$				
	$g_1g_2$	$g_1m_2, m_1g_2$	$g_1s_2, m_1m_2, s_1g_2$	$m_1s_2, s_1m_2$	$s_1s_2$
Wald	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45
Freiland mit Vegetation	0.1	0.25	0.35	0.45	0.55

**Beurteilung der Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche**

**Nässezeiger:** eingeschränkte Infiltration von Niederschlagswasser, falls Nässezeiger auftreten (= häufige Bodensättigung)

**Verdichtung:** verdichtete Bodenoberflächen bei starker Beweidung, intensivem und häufigem flächendeckendem Befahren, bei Skipistennutzung (v.a. feinkörnige Böden!)

Im Zweifelsfalle:

- > Vielfältige und dichte Kraut- und Strauchschicht = Positiver Einfluss auf Infiltration
- > Dachziegelartige Anordnung, hydrophob wirkender Pflanzenreste (noch nicht vollständig zersetzt) = negativer Einfluss auf Infiltration

**Beurteilung des Bodens bezüglich der Wasser-Aufnahmefähigkeit**

**Gley, Pseudogley, Stagnogley** (vernässte Böden):

Hohe Wassersättigung, geringe Durchlässigkeit = verminderte Wasser-Aufnahmefähigkeit

**Lockere Braunerden, Rendzinen:** Gute Durchlässigkeit = grosse Wasser-Aufnahmefähigkeit

**Skelettanteil:** > 20 Vol.-% = gut durchlässig ( $\emptyset > 2$  mm)

**Makroporen:** Pflanzenwurzeln, durch Tiere (Regenwurm), Schwundlöcher = gesteigerte Wasser-Aufnahmefähigkeit

**Horizontmächtigkeit über undurchlässigen Schichten:** < 40 cm = negative Auswirkung

**Humus Horizonte (Ah, Aa):** > 20 cm über vernässten Böden = erhöhte Wasser-Aufnahmefähigkeit

**Abflusskoeffizient für vegetationslose Flächen**

**Lockergesteine:** Gletscher- und Bachablagerungen, Bergsturzmaterial, Gehängeschutt → je nach Kornverteilung, Verdichtung, Schichtmächtigkeit über dichtem Untergrund

Hoher Abflusskoeffizient:

- > Grosser Ton- und Feinanteil
- > Hohe Lagerungsdichte
- > Geringe Mächtigkeit (Lockergesteine über Fels)
- > Permafrost

	Abflusskoeffizient $\Psi$
Lockergestein	$0.05 < \Psi < 0.8$
Fels	$0.4 < \Psi < 0.8$

**Fels:** undurchlässig (wenn kompakt, wenig zerklüftet oder hangparallele Stauschichtung). Anders bei Kalk, Dolomit, Gips (Karsterscheinungen)

**Einfluss der Hangneigung auf Abflusskoeffizienten**

→ Dies wird erst nach der Flächengewinnung des mittleren Wertes  $\Psi_m$  des gesamten Einzugsgebietes (Abflusskoeffizienten der Teileinzugsgebiete  $\Psi_m$ ) berücksichtigt.

Hangneigung	$\Psi_{tot}$
$J > 60\%$	$\Psi_m + 0.05$
$20\% > J < 60\%$	$\Psi_m$
$J < 20\%$	$\Psi_m - 0.03$

**Tabelle 11-4:** Angaben zur Bodenbestimmung.

**Bestimmung der Bodenart mit der Fühl- oder Fingerprobeprobe**

- ➔ Bodenmaterial zwischen Daumen und Zeigefinger zerreiben und kneten
- ➔ Probe nicht zu trocken, nicht zu nass (trockene Proben anfeuchten)

Einzelne **Kornfraktionen** weisen folgende Eigenschaften auf:

**Ton** feucht: formbar, klebrig, „**beschmutzend**“;  
 „Reibflächen“ glatt, **glänzend**

**Schluff** feucht: weniger gut formbar als Ton, **mehlig** (geriebener Teig), kaum klebrig, nicht beschmutzend;  
 „Reibflächen“ **stumpf**, nicht glänzend

**Sand** feucht: **nicht formbar**, nicht „beschmutzend“;  
 beim Reiben **Körner** spürbar (Feinsand: nur zwischen den Zähnen)

Fühlprobe an feuchten Bodenproben <sup>1</sup>		
1. Probe schlecht bis nicht formbar		
Probe <b>nicht</b> formbar, lose, kein Ton fühlbar		0 - 5 % Ton
Probe etwas formbar, sehr schwach bindig		5 - 10 % Ton
2. Probe formbar		
Gleitflächen nicht glänzend, <b>stumpf</b> bis rissig	Probe schwach bindig, schlecht ausrollbar, Ausrollgrenze (Ø der Rollen) > 8 mm	10 - 20 % Ton
	Probe mittelbindig, ausrollbar, Ausrollgrenze 5 - 8 mm	20 - 30 % Ton
	Probe stark bindig, klebrig, Ausrollgrenze 3 - 5 mm (Gleitflächen oft glänzend)	30 - 40 % Ton
Gleitflächen <b>glänzend</b> , Probe tonig	Probe sehr stark bindig, stark klebrig, Ausrollgrenze 2 - 3 mm	40 - 50 % Ton
	Probe extrem bindig und klebrig, Ausrollgrenze < 2 mm	> 50 % Ton
Probe auffallend <b>mehlig</b>		> 40 % Schluff
<sup>1</sup> Quelle: Nach A. Kaufmann (geändert) aus: Skript „Blockkurs Agrarpedologie II“ (SS 2006)		

## 11.2 ZEMOKOST (HQ<sub>x</sub>-Berechnungen)

**Tabelle 11-5:** Ergebnisse der Hochwasserabflussberechnungen mit ZEMOKOST für die sechs Einzugsgebiete. Es sind jeweils die 100-, 20-, 300- und 30-jährlichen HQ<sub>x</sub> dargestellt.

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Eistlenbach						
Niederschlagsinput			Brienz, Kienholz	Lungern (1905-1977)	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]			
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)				
T100	o	u	34,9	90,7	33,6	17
		m	30,9	82,4	29,7	14,9
	m	u	23,7	63,1	22,9	11,5
		m	20,7	56,5	20	10
	u	m	12,4	34,4	12,2	6,1
T20	o	u	16,3	32,2	16,8	9,8
		m	14,2	28,5	14,6	8,4
	m	u	10,9	22	11,2	6,5
		m	9,4	19,2	9,7	5,6
	u	m	5,8	11,7	5,9	3,4
T300	o	u	50,9	257,5	54,3	24,9
		m	45,5	232,9	48,5	22
	m	u	35,4	185,7	37,6	17
		m	31,4	167,6	33,3	14,8
	u	m	19,3	107,6	20,4	9,1
T30	o	u	19,4	43,2	20	11,2
		m	16,9	38,5	17,4	9,7
	m	u	13	29,7	13,4	7,5
		m	11,3	26,2	11,6	6,5
	u	m	6,9	15,9	7,1	4

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Dürrenwaldbach							
Niederschlagsinput			Lenk	Lauenen	Turbach	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]				
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)					
T100	o	u	14,1	12,5	28,7	16,2	13
		m	12,2	10,7	24,7	14	11,3
	m	u	9,4	8,5	20	11,3	9
		m	8,3	7,3	17,3	9,7	7,7
	u	m	5,4	4,5	10,8	6,1	4,7
T20	o	u	9,3	8,4	18,4	10,8	9
		m	7,9	7,2	15,9	9,2	7,7
	m	u	6,1	5,4	12,7	7,2	5,9
		m	5,3	4,7	10,9	6,2	5,1
	u	m	3,6	3,2	6,8	3,7	3,5
T300	o	u	16,8	15,2	36,7	20,3	15,8
		m	14,6	13,2	32	17,6	13,8
	m	u	11,8	10,7	25,5	14,2	11,1
		m	10,1	9,2	22,1	12,3	9,6
	u	m	6,6	5,7	13,5	7,8	6
T30	o	u	10,4	9,4	20,8	12,1	10
		m	8,9	8,1	18	10,4	8,6
	m	u	6,9	6,2	14,3	8,3	6,6
		m	6	5,3	12,3	7,1	5,7
	u	m	4	3,6	7,7	4,3	3,8

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Witenbach						
Niederschlagsinput			Langnau i. E.	Escholzmatt	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]			
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)				
T100	o	u	11,3	15,4	14,5	10
		m	9,8	13,3	12,6	8,7
	m	u	7,1	9,8	9,3	6,5
		m	6,2	8,5	8,1	5,6
	u	m	3,5	4,9	4,5	3,2
T20	o	u	7,6	9,2	8,3	6,6
		m	6,6	8	9,6	5,6
	m	u	4,9	6	6,2	4,2
		m	4,2	5,1	5,3	3,6
	u	m	2,3	2,9	3	1,9
T300	o	u	14,4	19,3	18,3	12,8
		m	12,5	17	16	11,1
	m	u	9,3	12,6	11,8	8,3
		m	8	11	10,3	7,2
	u	m	4,5	6,3	5,8	4
T30	o	u	8,5	10,5	10,8	7,4
		m	7,4	9,1	9,3	6,4
	m	u	5,5	6,8	6,9	4,7
		m	4,7	5,9	6	5,9
	u	m	2,6	3,3	3,3	2,2

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Spissibach							
Niederschlagsinput			Beatenberg	Interlaken	Kiental	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]				
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)					
T100	o	u	17,5	28,8	20,6	12	12,3
		m	15	24,8	18,5	10,3	10,6
	m	u	11,7	19,4	14,9	8,2	8,4
		m	9,9	16,6	13,2	7	7,1
	u	m	5,9	10	8,4	4,3	4,3
T20	o	u	10,8	15,8	11,1	7,9	7,4
		m	9,2	13,5	9,4	6,8	6,3
	m	u	7,3	10,6	7,4	5,4	5
		m	6,2	9	6,3	4,6	4,3
	u	m	3,8	5,4	3,7	2,8	2,6
T300	o	u	21,5	40	25,8	15,2	16,3
		m	18,6	34,5	22,2	13,1	14
	m	u	14,7	27	17,4	10,4	11,1
		m	12,7	23,2	14,8	9	9,5
	u	m	7,8	14	8,9	5,5	5,8
T30	o	u	12,2	18,7	12,9	8,9	8,6
		m	10,5	16	11	7,6	7,3
	m	u	8,3	12,5	8,6	6	5,8
		m	7,1	10,7	7,3	5,1	4,9
	u	m	4,3	6,4	4,4	3,1	3

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Sperbelgraben							
Niederschlagsinput			Kuttelbad	Kurzzeitalp	Wasen i.E.	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]				
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)					
T100	o	u	1,4	1,3	1,3	1,3	1
		m	1,2	1,1	1,1	1,1	0,9
	m	u	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
		m	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
	u	m	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
T20	o	u	0,8	1,1	0,9	0,8	0,7
		m	0,7	0,9	0,8	0,7	0,6
	m	u	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4
		m	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3
	u	m	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
T300	o	u	1,7	1,6	1,6	1,6	1,3
		m	1,5	1,4	1,4	1,4	1,1
	m	u	1	0,9	1	1	1,1
		m	0,9	0,8	0,8	0,9	0,7
	u	m	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3
T30	o	u	1	1,2	1	0,9	0,8
		m	0,8	1	0,9	0,8	0,7
	m	u	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5
		m	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4
	u	m	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2

HQ <sub>x</sub> ZEMOKOST Hostetbach							
Niederschlagsinput			Guttannen	Grimsel Hospitz	HADES 2.4	HADES 2.4 <sup>2</sup>	
Jährlichkeit (T) (Niederschlag und HQ <sub>x</sub> )	Systemzustand bei unterschiedlichen Wertebereichen		HQ <sub>x</sub> [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]				
	Abflussklassen (C)	Rauigkeitsklassen (c)					
T100	o	u	8	2,6	7,6	6,3	
		m	7,1	2,3	6,7	5,6	
	m	u	5,1	1,5	4,8	4	
		m	4,5	1,3	4,2	3,6	
	u	m	2,5	0,6	2,3	1,9	
T20	o	u	5	1,6	4,8	3,9	
		m	4,4	1,4	4,2	3,4	
	m	u	3,2	0,9	3	2,4	
		m	2,8	0,8	2,6	2,1	
	u	m	1,5	0,3	1,4	1,1	
T300	o	u	9,9	3,5	9,9	8,3	
		m	8,8	3,1	8,8	7,4	
	m	u	6,3	2,1	6,3	5,3	
		m	5,6	1,8	5,5	4,7	
	u	m	3,1	0,9	3	2,6	
T30	o	u	5,7	1,9	5,4	4,5	
		m	5	1,6	4,8	3,9	
	m	u	3,6	1	3,4	3,9	
		m	3,2	0,9	3	2,5	
	u	m	1,7	0,4	1,6	2,8	

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Einordnung der Hochwasserabschätzverfahren (Spreafico et al. 2003).....	11
Abbildung 2-1:	Abflussprozesse und Reaktionsweisen bei Starkregen nach Spreafico et al. (2003) .....	21
Abbildung 3-1:	Schematischer Ablauf einer Abflussbeiwertsschätzung. ....	24
Abbildung 3-2:	Initialabstraktion, Abstraktionszeit ( $t_A$ ) und Sättigungsabflussbeiwert $\Psi$ einer Starkregensimulation; annähernd trapezförmige $\Psi$ Abflussganglinie (Stepanek et al. 2004).....	25
Abbildung 3-3:	Zusammenhang zwischen Abstraktionszeit und Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ( $\Psi_{const}$ ) mit einem Vertrauensbereich von +/- 95% (Stepanek et al. 2004).....	25
Abbildung 3-4:	Rauigkeitsklassifizierung nach unterschiedlichen Oberflächen- und Vegetationstypen (Markart et al. 2004, S. 29). 26	26
Abbildung 3-5:	Abflusskoeffizienten $\Psi$ für den Einsatz in Hochwasser-Bemessungsansätzen. $\Psi$ wird für Wald und Freiland in Abhängigkeit von den Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche und von der Wasser- Aufnahmefähigkeit des Bodens festgelegt (Rickli und Forster 1997, verändert).....	27
Abbildung 4-1:	Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten nach HAKESCH (Spreafico et al. 2003, S. 81, verändert) und bei der vorliegenden Arbeit. ....	30
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung des gesamten Vorgehensablaufes für die Anwendung der Geländeanleitung (Markart et al. 2004) und ZEMOKOST (Kohl und Stepanek 2005).....	30
Abbildung 4-3:	Ausschnitt aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise .....	31
Abbildung 4-4:	Ausschnitt aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3). ....	34
Abbildung 4-5:	Detail aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3).....	39
Abbildung 4-6:	Die drei Hauptachsen eines Steines. Bei der Linienzahlanalyse, bzw. der Bestimmung des $d_{90}$ , wird die mittlere Achse (b-Achse) gemessen (Fehr 1978).....	40
Abbildung 4-7:	Detail aus dem Ablaufschema zur gewählten Vorgangsweise (siehe Abbildung 4-3). Erklärung der Akronyme siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Kapitel 3.3 .....	42
Abbildung 4-8:	Übersicht und Gliederung der Teileinzugsgebiete im EZG Eistlenbach, sowie Bodennutzungskarte (PF, Astat) (Kartendaten: reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091346)) .....	43
Abbildung 4-9:	Geotechnische Karte (GET) und Bodeneignungskarte (BEK) für das EZG Eistlenbach .....	44
Abbildung 4-10:	Luftbild Eistlenbach mit Teileinzugsgebietsgliederung. ....	45
Abbildung 4-11:	Karten zu den Teilflächen im EZG Eistlenbach mit den entsprechend abgeschätzten Oberflächenabfluss- und Rauigkeitsklassen (Markart et al. 2004), sowie Abflusskoeffizienten nach Rickli und Forster 1997. ....	47
Abbildung 5-1:	Lage der sechs Einzugsgebiete .....	50
Abbildung 5-2:	Wichtige Landbedeckungsformen im Eistlenbach. ....	51
Abbildung 5-3:	Wichtige Landbedeckungsformen im Dürrenwaldbach. ....	51
Abbildung 5-4:	Wichtige Landbedeckungsformen im Witenbach.....	51
Abbildung 5-5:	Wichtige Landbedeckungsformen im Spissibach. ....	52
Abbildung 5-6:	Wichtige Landbedeckungsformen im Sperbelgraben.....	52
Abbildung 5-7:	Wichtige Landbedeckungsformen im Hostetbach. ....	52
Abbildung 5-8:	Karten zu den Teilflächen im Dürrenwaldbach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I). ....	54
Abbildung 5-9:	Karten zu den Teilflächen im Witenbach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklasse (oben) und Rauigkeitsklassen (unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I). ....	56
Abbildung 5-10:	Karten zu den Teilflächen im Spissibach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen (oben) und Rauigkeitsklassen ( unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I). ....	58
Abbildung 5-11:	Karten zu den Teilflächen im Sperbelgraben mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen ( oben) und Rauigkeitsklassen ( unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I). ....	60
Abbildung 5-12:	Karten zu den Teilflächen im Hostetbach mit den angeschätzten Oberflächenabflussbeiwertklassen ( oben) und Rauigkeitsklassen ( unten) nach Markart et al. (2004, Abschätzung I). ....	62
Abbildung 6-1:	Vergleich zwischen gemessenen (Dobmann 2009) und nach der Geländeanleitung ermittelten Abflussbeiwerten einzelner Beregnungsstandorte (nummeriert) in den sechs Einzugsgebieten (x-Achse). ....	66
Abbildung 6-2:	Vergleich der flächengewichteten Abflussbeiwerte in den sechs Einzugsgebieten. $\Delta I$ = Betrag der Differenz der flächengewichteten Mittelwerte zu Sury (2006) .....	68
Abbildung 6-3:	Der Einfluss des Inputparameters Niederschlag in ZEMOKOST auf die Hochwasserabflüsse in den Testgebieten (genauere Angaben zu den Stationsnamen jedes Einzugsgebietes finden sich in Kapitel 5.2 und in Tabelle 11-5). ....	69

Abbildung 6-4: Vergleich der Abflussspenden der sechs Testgebiete bei Verwendung verschiedener N-Input-Grundlagen (ZEMOKOST). .....	70
Abbildung 6-5: Der Einfluss der Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerte auf die HQ <sub>100</sub> -Berechnungen in ZEMOKOST. ....	71
Abbildung 6-6: Vergleich zwischen den HQ <sub>100</sub> -Vorschlägen (A, B) unter der Verwendung von ZEMOKOST und den Vergleichswerten von HAKESCH und Schaffner (2007). .....	71
Abbildung 6-7: Einordnung der mit ZEMOKOST berechneten HQ <sub>100</sub> -Vorschläge in die höchsten in der Schweiz bis 1990 beobachteten Abflüsse (Weingartner 1999 in Spreafico und Weingartner 2005, verändert). .....	72
Abbildung 6-8: Zusammenhang zwischen den Flächenanteilen der zugewiesenen Abflussbeiwertklassen und der Abflussspende. Die Anordnung der Einzugsgebiete entspricht der Höhe ihrer Abflussspende q, welche sich, mit Ausnahme des Eistlenbachs und des Spissibachs (Vorschlag B; Akl: m, Rkl: m), auf den Vorschlag A (Akl: o, Rkl: u) beziehen (vgl. Tabelle 6-2). ....	73
Abbildung 6-9: Zusammenhang zwischen den Flächenanteilen der zugewiesenen Rauigkeitsklassen und der Abflussspende. Die Anordnung der Einzugsgebiete entspricht der Höhe ihrer Abflussspende q, welche sich, mit Ausnahme von Eistlenbach und Spissibach (Vorschlag B; Akl: m, Rkl: m), auf den Vorschlag A (Akl: o, Rkl: u) beziehen (vgl. Tabelle 6-2). .....	74
Abbildung 6-10: Gesamtabflussganglinie (rot) und Ganglinien der einzelnen Teileinzugsgebiete des Spissibaches. ....	74
Abbildung 6-11: Gegenüberstellung der Flächenanteile der zugewiesenen Abflussbeiwertklassen und der Abflussspende des TEZG 12222 und des TEZG 1 des Spissibaches. ....	75
Abbildung 11-1: Einteilung der Böden aufgrund der im Feld einfach abschätzbaren Kenngrößen Grob-/ Feinanteil und Lagerung (aus Markart et al. 2004, S. 13). ....	87
Abbildung 11-2: Die Gründigkeit von Waldböden (nach Blum et al. 1996, in: Markart et al. 2004, S: 14, 15) und die Auswirkungen verschiedener Nutzungen, Eingriffe und Maßnahmen auf den Oberflächenabfluss bei Starkregen in Abhängigkeit vom Untergrund. ....	88
Abbildung 11-3: Merkmale zur Abschätzung der Weidewirkung bzw. -intensität und Zeigerwertklassen der Bodenvegetation (aus Markart et al. 2004, S. 16, 20). ....	89
Abbildung 11-4: Anschätzen der Rauigkeit (nach Markart et al. 2004, S. 28, verändert). ....	90
Abbildung 11-5: Kartierungsvorlage Eistlenbach. Luftbild inkl. Höhenlinien, M 1:5 000 .....	95

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht zu den Höhenstufen der Alpen mit Hinweis auf die entsprechenden Vegetationsgesellschaften und deren hydrologischem Zeigerwert (nach Burga et al. 2004 - verändert). .....	17
Tabelle 2-2: Gruppierung der Bodentypen in Bodenklassen im Hinblick auf deren Einfluss auf Hochwasser-Abflussvorgänge (nach Kölla 1986, S. 75, verändert). .....	18
Tabelle 2-3: Charakterisierung der geologischen Einheiten, die in Bezug auf die sechs Untersuchungsgebiete von Bedeutung sind (Quellen: Pfiffner (2006), Labhart (2005), EJPD (1980) und Geotechnische Karte (GET) (BFS 2001)). .....	19
Tabelle 3-1: Hydrologische Vegetationseinheiten (nach Markart et al. 2004, S. 12) .....	23
Tabelle 3-2: Abflussbeiwertsklassen (nach Markart et al. 2004, S. 21) .....	24
Tabelle 3-3: Beispiele für die Einordnung hydrologischer Vegetations bzw. Landbedeckungsformen nach Ihrem Abflussverhalten. ..	24
Tabelle 3-4: Mittlerer Wert der Initialabstraktion nach Abbildung 3-3 für die jeweilige Abflussbeiwertsklasse (Markart et al. 2004, S. 26). .....	25
Tabelle 3-5: Standardisierte Abflussbeiwerte für vegetationsfreie Flächen nach Sury (2006, S. 40) .....	27
Tabelle 3-6: Inputparameter von ZEMOKOST. ....	28
Tabelle 4-1: Hilfsmittel und Literatur zur Erarbeitung der thematischen Grundlagen. ....	34
Tabelle 4-2: Kombination des Zeigerwertes der Feuchtezahl nach Schauer (2002) mit den Angaben von Lauber und Wagner (2007). ....	36
Tabelle 4-3: Grobe Zuordnung der Abflussbeiwertsklasse anhand der Feuchtezeigerwerte von Indikatorpflanzen (nach Markart et al. 2004). ....	36
Tabelle 4-4: Zusammenfassung der wichtigsten bodenkundlichen Merkmale und daraus ableitbarer Hinweise. ....	37
Tabelle 4-5: Bei der Geländebegehung mit dem Gerinneaufnahmeformular zu erfassende Gerinnekenngößen. ....	41
Tabelle 4-6: Kennzahlen des Eistlenbaches .....	43
Tabelle 4-7: Abflussbeiwert-, Rauigkeitsklassen für die verschiedenen Vegetations- und Landbedeckungsformen des Eistlenbaches ermittelt nach Markart et al. (2004) und die entsprechenden Abflusskoeffizienten nach Rickli und Forster (1997). ....	46
Tabelle 4-8: Resultate der HQ-Abschätzungen mit ZEMOKOST im Eistlenbach. ....	48
Tabelle 5-1: Kurzcharakteristik der sechs Testgebiete .....	50
Tabelle 5-2: Kennzahlen des Dürrenwaldbaches. ....	53
Tabelle 5-3: Dominante Einheiten des Dürrenwaldbaches (Teilflächengliederung). ....	53
Tabelle 5-4: Resultate der HQ <sub>100</sub> -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Dürrenwaldbach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang). ....	54
Tabelle 5-5: Kennzahlen des Witenbaches. ....	55
Tabelle 5-6: Dominante Einheiten des Witenbaches. ....	55
Tabelle 5-7: Resultate der HQ <sub>100</sub> -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Witenbach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang). ....	56
Tabelle 5-8: Kennzahlen des Spissibaches. ....	57
Tabelle 5-9: Dominante Einheiten im Spissibach (Teilflächengliederung). ....	57
Tabelle 5-10: Resultate der HQ <sub>100</sub> -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Spissibach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang). ....	58
Tabelle 5-11: Kennzahlen des Sperbelgrabens. ....	59
Tabelle 5-12: Dominante Einheiten des Sperbelbaches .....	59
Tabelle 5-13: Resultate der HQ <sub>100</sub> -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Sperbelgraben (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang). ....	60
Tabelle 5-14: Kennzahlen des Hostetbaches. ....	61
Tabelle 5-15: Dominante Einheiten im Hostetbach (Teilflächengliederung). ....	61
Tabelle 5-16: Resultate der HQ <sub>100</sub> -Abschätzungen mit ZEMOKOST im Hostetbach (siehe auch Tabelle 11-5 im Anhang) .....	62
Tabelle 5-17: Die sechs Wildbacheinzugsgebiete im Überblick – abflussbestimmende Faktoren sind fett gedruckt. ....	64
Tabelle 6-1: Repräsentative Niederschlagsdaten für die sechs Einzugsgebiete. ....	69
Tabelle 6-2: HQ <sub>100</sub> -Vorschläge und analog dazu die Abflusspenden für die sechs Testgebiete ermittelt nach ZEMOKOST (die markierten Werte werden in Abbildung 6-7 in die Abflüsse der Schweiz eingeordnet). ....	72
Tabelle 11-1: Zusammenstellung der im Verlaufe der Feldarbeiten für die vorliegende Arbeit häufig vorgefundenen Indikatorpflanzen. Die Angaben beziehen sich vor allem auf nordalpine Gebiete der Schweiz und basieren einerseits auf Angaben der Geländeanleit .....	83
Tabelle 11-2: Aufnahmeformular aus Klebinder et al. (2008) - mit spezifischer Ausrichtung auf das Projekt Naturgefahrenmanagement BUWELA ‚Bucklige Welt - Wechselland‘, d.h. das Formular ist an die lokalen Gegebenheiten angepasst worden. ....	91
Tabelle 11-3: Beilagen zur Abschätzung II (aus Rickli und Forster 1997). ....	96
Tabelle 11-4: Angaben zur Bodenbestimmung. ....	97
Tabelle 11-5: Ergebnisse der Hochwasserabflussberechnungen mit ZEMOKOST für die sechs Einzugsgebiete. Es sind jeweils die 100-, 20-, 300- und 30-jährlichen HQ <sub>x</sub> dargestellt. ....	98



**BFW-Dokumentation**  
Schriftenreihe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien

			Preis in Euro
2004	1	DANNEBERG O.H., POCK H., WANDL M. Entwicklung effizienter, EDV-gestützter Arbeitsverfahren zur Parametrisierung der Bodenformen einiger ausgewählter Kartierungsbereiche: Abschlussbericht. 26 S	2,86
2004	2	SMIDT ST. Waldschädigende Luftverunreinigungen: Eigenschaften - Nachweis - Monitoring - Waldschadensforschung - Immissionsschutz. 183 Seiten	20,13
2004	3	MARKART G., KOHL B., SOTIER B., SCHAUER T., BUNZA G., STERN R. Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). 83 Seiten	9,68
2004	4	GSCHWANTNER T., SCHADAUER K. Datenmodelle der Österreichischen Waldinventur 2000/02. 76 Seiten	8,36
2007	5	MARKART G., PERZL F., KOHL B., LUZIAN R., KLEEMAYR K., ESS B., MAYERL J. 22. und 23. August 2005 - Analyse von Hochwasser- und Rutschungsereignissen in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs . 48 Seiten	9,50
2007	6	ANDRECS P., HAGEN K., LANG E., STARY U., GARTNER K., HERZBERGER E., RIEDEL F., HAIDEN T. Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). 75 Seiten	28,00
2007	7	KRISTÖFEL F., NEUMANN M. Abschlussbericht zum Waldschaden-Beobachtungssystem (WBS): Zusammenstellung von Metadaten und kritische Analyse. 45 Seiten	10,00
2008	8	SMIDT ST. Wirkungen von Luftschadstoffen auf Pflanzen unter besonderer Berücksichtigung von Waldbäumen. 241 Seiten	15,30
2008	9	SMIDT ST., HERMAN F., PLATTNER J., PAUSCH J. 20 Jahre immissionsökologische Forschung am BFW - Risikobewertung von Gebirgswäldern anhand von Freilanduntersuchungen	18,00
2009	10	SMIDT ST., HERMAN F., PLATTNER J. Immissionssituation und Ernährungszustand der Wälder der Nördlichen und Südlichen Kalkalpen, 62 Seiten	25,00
2010	11	KINDERMANN G. Erste österreichweite Jahrringanalyse - Daten, Methoden und Ergebnisse, 77 Seiten	18,00
2011	12	HEMUND, C., MARKART, G., KOHL, B., DOBMANN, J., WEINGARTNER, R. Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen – Evaluation der Geländeanleitung	
2010	13	SCHÜLER, S., WEISSENBACHER, L. Herkunftsversuche mit Stiel- und Traubeneiche aus Österreich und angrenzenden Ländern , 40 Seiten	
2011	14	SMIDT, ST. Teil 1 – Lexikon; Teil 2 - Anhang Waldschädigende Luftverunreinigungen und Klimawandel Druckversion des Textteiles des gleichnamigen Online Lexikons ( <a href="http://www.luftschadstoffe.at">http://www.luftschadstoffe.at</a> ), 2 Mappen, 818 Seiten	
2011	15	REIMOSER, S. , WILDAUER, L., SMIDT, ST., REIMOSER, F. Veränderung von Jagdstrecken, Wildlebensraum und Jagdgesetzgebung seit 1891 in einem Wienerwald-Revier , 122 Seiten	