



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Untersuchung der Gefährdung durch Muren
im Langtauerertal (Südtirol/Italien)

—

GIS-gestützte Analyse mit hydraulischer Modellierung“

Verfasserin

Martina Reichegger

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt: Diplomstudium Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuerin / Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne Benutzung anderer, als der angegebenen Hilfsmittel verfasst habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und stimmt mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig überein.

Wien, 08.10.2012

Unterschrift

Dank

An dieser Stelle möchte ich jenen danken, die mich in meiner Diplomarbeits-Zeit unterstützt und begleitet haben:

Meinem Betreuer, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade. Herzlichen Dank für Ihre Hilfe bei der Festlegung des Themas und für die Herstellung von Kontakten, für Ihr Interesse an meiner Arbeit und für den fachlichen Input.

Ein großes Dankeschön gilt dem Team der Abenis Alpinexpert GmbH: Matthias, Andreas und Daniela. Danke für die fachliche Unterstützung und euer Vertrauen. Danke Daniela, für die Betreuung und das Korrekturlesen der Arbeit.

Für die Bereitstellung der Daten bedanke ich mich beim Amt für Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol.

Vielen Dank an Rainer Bell, für die Hilfe in GIS-Angelegenheiten.

Danke an meine Studienkollegen und Freunde, die meine Studienzeit zu dem gemacht haben, was sie war. Steffi, Casi, Chrissy, Schneida, Conny, Tom, Carmen, Stefan! Und danke, liebes ramschjet!

Danke Dir, Moritz, fürs Korrekturlesen. Und für den Urlaub zwischendurch.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie. Danke für die bedingungslose Unterstützung.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beinhaltet eine Gefahrenanalyse für Vermurung. Untersucht werden sieben Wildbacheinzugsgebiete im Langtaufertal in Südtirol (Italien). Dabei steht vor allem die Frage im Vordergrund, welche Bereiche der besiedelten Murkegel gefährdet sind. Auf Grundlage einer Geschiebebilanzierung und der Berechnung von Abflussspitzen werden die durch Muren betroffenen Flächen simuliert und Gefahrenbereiche klassifiziert.

Die Gefährdungsmodellierung erfolgt mit der Software FLO-2D, einem physikalischen Prozessmodell, das die räumliche Verteilung des Geschiebetransports auf dem Kegel simuliert. Die den Prozess dominierenden Größen Abfluss und Feststoffvolumen gehen in die Modellierung ein und werden vorab bestimmt. Der Abfluss wird mit Hilfe eines Niederschlag-Abfluss-Modells aus Gebietsniederschlägen abgeleitet, die mobilisierbaren Feststoffe werden im Zuge von Lokalaugenscheinen abgeschätzt und kartiert. Die Analysen erfolgen dabei jeweils für die in Südtirol gültigen Bemessungsereignisse (HQ30, HQ100 und HQ300). Um schließlich die Plausibilität der Simulationsergebnisse zu prüfen, werden historische Aufzeichnungen ausgewertet und das daraus resultierende Gefahrenaussmaß mit dem simulierten verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Siedlungsflächen zumindest nicht von der höheren der beiden möglichen Gefahrenstufen betroffen sind: *Sehr hoch* gefährdete Bereiche beschränken sich vorwiegend auf die Gerinne und deren Ufer. *Hoch* gefährdete Bereiche hingegen liegen auch außerhalb der Gerinne und betreffen auch Siedlungsflächen. Allerdings bleiben die berechneten maximalen Fließhöhen in Siedlungsflächen unter 0,5 Meter. Die Validierung der Simulationsergebnisse war aufgrund der spärlichen historischen Ereignisdokumentationen nur bedingt möglich – grundsätzlich ist das berechnete Gefahrenaussmaß jedoch plausibel.

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterliegen gewissen Einschränkungen, beispielsweise durch vereinfachte Modellannahmen, angenäherte Eingangsparameter, subjektive Schätzwerte und vor allem durch das nicht-lineare Prozessverhalten von Murgängen. Entsprechend aussagekräftig sind die Ergebnisse der Gefahrenzonierung.

Abstract

This diploma thesis presents a hazard assessment for debris flows in the Langtauferer valley in the province of South Tyrol, northern Italy. Seven torrent catchments are explored to identify endangered settlement areas situated on the torrential fans. The endangered areas are classified, depending on the simulation of precipitation (peak discharge) and sediment (amount and discharge).

The hazard simulation is conducted by the hydraulic FLO-2D computer model. This grid-based physical process model simulates the spatial distribution of water and sediment transport. The most important model input factors, water and sediment, has to be determined in advance: the water runoff is calculated by a rainfall-runoff model with data from areal meteorological stations, while the amount of sediment entrainable by debris flow is estimated in the field. Return periods of 30, 100 and 300 years are assumed following legal requirements in the province. For validation the results of the simulation are compared with documented historic debris flows in that area.

The comparison between simulated and historic events shows that the chosen model inputs are, in general, plausible (calculated water runoff, estimated amount of sediments). In particular, the results show that the calculated maximum flow depth is not higher than 0.5 meters for settlement areas. Due to established hazard categories, some settlement areas are *highly* prone to debris flows – though none of them are affected by *very high* debris flow hazard, which is the highest hazard class.

However, the results are subject to certain restrictions, regarding the fact that model assumptions are typically simplified, input parameters are approximated and especially because of the difficulty to simulate the non-linearity of debris flow processes.

Abkürzungen

A	Abschnitt
Aut. Prov. BZ	Autonome Provinz Bozen - Südtirol
Amph.	Versch. Amphibolite; Eklogite; Peridotite
AIDI	Associazione Italiana di Idronomia
BAUKAT30	Bautenkataster des Amtes für Wasserschutzbauten (Abt. 30)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (CH)
BWG	Bundesamt für Wasser und Geologie (CH)
BWW	Bundesamt für Wasserwirtschaft (CH)
CN	Curve Number
DGM	Digitales Geländemodell
ED30	Ereignisdokumentation des Amtes für Wasserschutzbauten (Abt. 30)
EZG	Einzugsgebiet
GIS	Geographisches Informationssystem
GDS	Grid Developer System; Programm der Software FLO-2D, erlaubt die Erstellung der Simulationsoberfläche und die räumliche Bearbeitung der Rasterattribute
GZP	Gefahrenzonenplan
HVS	Hang- und Verwitterungsschutt
HQ30	30-jährliches Hochwasserereignis (100-, 300-jährliches)
PG	Feinkörnige Paragneise; Glimmerschiefer u. Gneise mit Muskowit u. Granat
M	Gemischte Moräne mit großen Blöcken
M i. A.	Moräne im Allgemeinen
m s.l.m.	metri sul livello del mare = Meter über dem Meeresspiegel
UL	Unterlauf
ML	Mittellauf
OL	Oberlauf
SK	Schuttkegel
UIBK	Universität Innsbruck
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
ZE	Zeiteinheit

Inhaltsverzeichnis

Eidesstaatliche Erklärung.....	I
Dank	III
Kurzfassung.....	V
Abstract	VII
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ziele und Hypothesen der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Muren.....	4
2.1.1 Prozessabgrenzung	4
2.1.2 Definitionen	5
2.1.3 Disposition und Auslösung von Muren.....	6
2.1.4 Räumlich-funktionale Aspekte von Murgängen	7
2.2 Naturgefahrenanalyse.....	9
2.2.1 Das Risikokonzept in der Naturgefahrenforschung	9
2.2.2 Grundlagen der Gefahrenanalyse.....	10
2.2.3 Gefahrenzonenplanung in Südtirol.....	12
2.3 Bestimmung von Magnitude und Intensität von Muren	14
2.3.1 Frequenz-Magnitude-Beziehung	14
2.3.2 Anwendung empirischer Formeln	15
2.3.3 Geomorphologische Methoden und Laserscanning.....	18
2.4 Abfluss- und Geschiebetransportabschätzung.....	19
2.4.1 Modelltypen in der Hydrologie.....	19
2.4.2 Der Abflussprozess und seine Modellierung	21

3	Untersuchungsgebiet	25
3.1	Geographische Lage	25
3.2	Klima	26
3.3	Geomorphologie und Geologie	27
3.4	Besiedlung und Landnutzung	28
4	Datengrundlage	30
4.1	Geländemodell	30
4.2	Orthofoto.....	30
4.3	Geologie.....	30
4.4	Realnutzungskarte.....	31
4.5	Gewässernetz	32
4.6	Blockgletscher	32
4.7	Bautenkataster	32
4.8	Ereignisdokumentation	33
4.9	Niederschlagsdaten	33
4.10	Vermessung	34
5	Methodische Konzeption	35
5.1	Morphologische Charakterisierung der Einzugsgebiete.....	36
5.1.1	Vorbereitende Analyse in GIS	36
5.1.2	Geomorphologische Übersichtskartierung	36
5.1.3	Bestimmung der Feststoffvolumen: Geomorphologische Methode	38
5.2	Bestimmung des Abflusses: Niederschlag-Abfluss Modell HyGrid2k2.....	40
5.2.1	Die SCS-Methode	41
5.2.2	Berechnung von Spitzenabflüssen mit HyGrid2k2.....	44
5.3	Gefährdungsmodellierung mit FLO-2D.....	49
5.3.1	FLO-2D – Two Dimensional Flood Routing Model	50
5.3.2	Vorbereitung der Simulationsoberfläche.....	53
5.3.3	Bulking Factor.....	55

5.3.4	Modellierung in FLO-2D	56
5.3.5	Klassifikation	57
5.4	Validierung der Simulationsergebnisse	58
6	Ergebnisse.....	59
6.1	Morphologische Charakterisierung der EZG	59
6.1.1	Vorbereitende Analyse in GIS	59
6.1.2	Geomorphologische Übersichtskartierung.....	61
6.1.3	Mobilisierbare Feststoffvolumen.....	63
6.2	Abflussganglinien	72
6.2.1	Curve Number.....	72
6.2.2	Reinwasserabflüsse.....	73
6.3	Gefährdungsmodellierung mit FLO-2D	76
6.4	Ereignisdokumentation und Validierung.....	82
6.4.1	Ergebnisse der Ereignisanalyse.....	82
6.4.2	Validierung der Simulationsergebnisse	85
7	Diskussion.....	88
7.1	Geomorphologie und Feststoffpotential.....	88
7.2	Hydrologie im Untersuchungsgebiet.....	89
7.3	Diskussion der Simulationsergebnisse	91
7.4	Validierung der Ergebnisse anhand historischer Ereignisse.....	93
7.5	Diskussion der Hypothesen.....	94
8	Perspektiven	96
	Literaturverzeichnis.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten (ONR 2009).....	5
Abbildung 2.2: a) Frequenz-Magnitude-Beziehung. b) Beziehung zwischen Wiederkehrsintervall von Naturgefahren und Magnitude des Ereignisses (nach Smith 2004 in Schrott und Glade 2008) 9	
Abbildung 2.3: Kombinationsmatrix der Gefahrenstufen für Massenbewegungen und Wasser- gefahren (Aut. Prov. BZ 2006, modifiziert nach Heinimann et al. 1998)	13
Abbildung 2.4: Abflussganglinie und charakteristische Fließzeiten (Geo Data Zone 2011).....	23
Abbildung 2.5: Hochwasserwellenablauf (Dyck und Peschke 1995).....	24
Abbildung 3.1: Überblick über das Untersuchungsgebiet.....	25
Abbildung 3.2: Klimadiagramme Melag (1.915 m s.l.m.) und St.Valentin auf der Haide (1.520 m s.l.m.) (UIBK 2012).....	26
Abbildung 3.3: Das Langtaufertal, talauswärts: Melag, Wies, Kappl, Grub (eigene Aufnahme)	28
Abbildung 4.1: Wahrscheinlichkeitskurven für Starkniederschläge für mehrere Wiederkehrszeiten (Autonome Provinz Bozen - Südtirol).....	34
Abbildung 5.1: Methodische Konzeption	35
Abbildung 5.2: Richtwerte für Geschiebebeiträge ($\text{m}^3/\text{Laufmeter}$) (Marchi und D'Agostino 2004) .	39
Abbildung 5.3: Feststoffschätzung pro homogenem Gerinneabschnitt (Foto: Patzinbach)	40
Abbildung 5.4: Curve Number und effektiver Niederschlag = $f(N, CN)$ für Bodenfeuchtekategorie II nach dem SCS-Verfahren (Maniak 2005).....	42
Abbildung 5.5: Raster des akkumulierten Abflusses (<i>UpslopeArea</i>), Raster mit Fließrichtungen (<i>FlowDirection</i>) und Raster mit Verbindung der Zellen bis zum Gebietsauslass (<i>FlowDistance</i> , ohne Meter); eigene Darstellung nach Cazorzi (2002)	45
Abbildung 5.6: Trennung zwischen Hang (<i>OverlandFlow</i>) und Gewässernetz (<i>ChannelFlow</i>); Ausscheidung des Gewässernetzes anhand eines Grenzwertes (im Beispiel: 10 Entwässerungszellen); eigene Darstellung nach Cazorzi (2002)	46
Abbildung 5.7: Formen der Niederschlagsverteilungen in CLEM: Constant – Wallingford – Triangular – Alterned Blocks – Instantaneous Intensity; in grün: Gesamtniederschlag, in rot: Effektivniederschlag	48
Abbildung 5.8: Physikalischer Simulationsprozess in FLO-2D (O'Brien 2009).....	50
Abbildung 5.9: St.Venant-Gleichung und Möglichkeiten der Modellreduktion (Dyck und Peschke 1995). Abkürzungen nach O'Brien 2009: v = tiefenabhängige Geschwindigkeit, t = Zeit s, g = Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$, h = Fließtiefe, x = Abstand in Fließrichtung, S_f = Reibungskoeffizient, S_o = Sohlengefälle, Q = Abfluss m^3/s , A = Querschnittsfläche m^2	51

Abbildung 5.10: Schnittstellen im HEC-GeoRAS-Profil.....	54
Abbildung 6.1: Berechnete Einzugsgebiete	59
Abbildung 6.2: Kar (Pleiferbach)	61
Abbildung 6.3: Hang (Patzinbach, links) und Kegel (Außervallatschbach, rechts).....	62
Abbildung 6.4: Kartierung und Fotodokumentation, Pleiferbach, oberes EZG	65
Abbildung 6.5: Kartierung und Fotodokumentation, Patzinbach	66
Abbildung 6.6: Fotodokumentation Patscheiderbach (Oberlauf).....	67
Abbildung 6.7: Kartierung und Fotodokumentation Bratzenbach.....	68
Abbildung 6.8: Kartierung und Fotodokumentation Kapplerbach.....	70
Abbildung 6.9: Kartierung und Fotodokumentation Außervallatschbach	71
Abbildung 6.10: Synthetisches Gewässernetz in ROUTING TIME mit verschiedenen Grenzwerten (rot: 1600, grün: 2400).....	73
Abbildung 6.11: Ausgabefenster "Simulation results" CLEM (gekennzeichnete Informationen sind von Interesse)	74
Abbildung 6.12: Hydrograph Kapplerbach HQ100, Beregnungszeit 0,7 Stunden, Wallingford.....	74
Abbildung 6.13: Gefahrenkarte Fallerbach und Pleiferbach.....	77
Abbildung 6.14: Gefahrenkarte Patzinbach, Patscheiderbach und Bratzenbach	78
Abbildung 6.15: Gefahrenkarte Kapplerbach und Außervallatschbach.....	81
Abbildung 6.16: Vergleich der beeinträchtigten Fläche durch das Ereignis vom 27.06.1965 mit den klassifizierten Simulationsergebnissen, Kapplerbach	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Klassen der Realnutzung (Autonome Provinz Bozen - Südtirol).....	31
Tabelle 5.1: Bodenfeuchteklassen im SCS-Verfahren (Cazorzi 2002; Maniak 2005)	43
Tabelle 5.2: Bodentypen im SCS-Verfahren (Maniak 2005).....	44
Tabelle 5.3: Fließgeschwindigkeiten in ROUTING TIME (Cazorzi 2002).....	47
Tabelle 5.4: Parameter CPP (Wahrscheinlichkeitskurven für Starkniederschläge) (Autonome Provinz Bozen – Südtirol).....	47
Tabelle 5.5: Oberflächenrauigkeit nach Manning nach O'Brien (2009).....	54
Tabelle 6.1: Charakteristika der Einzugsgebiete (*= nicht im BAUKAT registriert; Abkürzungen: OL = Oberlauf, ML = Mittellauf, UL = Unterlauf, SK = Schuttkegel, HVS = Hang-und	

Verwitterungsschutt, PG= Feinkoernige Paragneise; Glimmerschiefer u. Gneise mit Muskowit u. Granat, Amph. = Versch. Amphibolite; Eklogite; Peridotite)	60
Tabelle 6.2: Feststoffschaetzung Fallerbach	64
Tabelle 6.3: Feststoffschaetzung Pleiferbach.....	64
Tabelle 6.4: Feststoffschaetzung Patzinbach	66
Tabelle 6.5: Feststoffschaetzung Patscheiderbach	67
Tabelle 6.6: Feststoffschaetzung Bratzenbach.....	68
Tabelle 6.7: Feststoffschaetzung Kapplerbach.....	69
Tabelle 6.8: Feststoffschaetzung Außervallatschbach	71
Tabelle 6.9: Berechnete CN-Werte	72
Tabelle 6.10: Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung (absteigend gereiht nach Abflussspitzen)	75
Tabelle 6.11: Ereignisdokumentation. Abkürzungen: F = Foto, T = Terrestrische Bilder, Z = Zeitungsartikel, Raff2010 = Raffener 2010, GeoM1992 = Institut für Geographie 1992. Gleiche Farben kennzeichnen gleiche Ereignisse.....	84

1 Einleitung

Gebirge als Prozessraum für Steinschläge, Lawinen und andere gravitative Massenbewegungen stellen für den Menschen seit jeher Gefahrenbereiche dar. Besonders Murgänge gelten in den Alpen als eine der bedeutendsten Naturgefahren. Denn die hohe Energie der Schlamm- und Geröllgemische führt oft zu hohen Schadenssummen (Marchi und D'Agostino 2004; Jakob und Hungr 2005). Die Murenabgänge im Sommer 2012 in Südtirol, in der Steiermark und in anderen Alpenregionen sind nur die jüngsten Beispiele für die Zerstörungskraft dieser Prozesse.

Im Zuge der Besiedlung lassen sich unterschiedliche Ansätze im Umgang mit Naturgefahren beobachten. Die Wahl der Siedlungsstandorte fiel in den Gebirgstälern bevorzugt auf die Schwemmfächer der Wildbäche; von Natur aus sind diese gut drainiert, wenig steil und stellen in vielen Hochgebirgen der Welt das einzige kultivierbare Land dar (Jakob 2005). Vor allem aber wichen die Siedler der Gefahr aus, die von den unverbauten und regelmäßig über die Ufer tretenden Talflüssen ausging (Hegg et al. 2001). Darüber hinaus begann man sich schon früh durch entsprechende Verbauungen zu schützen. In Südtirol etwa versuchte man bereits im Jahr 1239 den Fluss Talfer durch eine Querverbauung einzudämmen, und seit 1882 wird die Wildbachverbauung institutionalisiert vorangetrieben (Aut. Prov. BZ 2011^a). Durch Schutzverbauungen war es dem Menschen ermöglicht, weiter in den Einflussbereich der Naturprozesse vorzudringen.

In der Gegenwart sorgen der hohe Siedlungs- und Vermarktungsdruck, sowie Entwicklungen im Tourismus und ein verändertes Freizeitverhalten dafür, dass immer mehr Natur "erfahrbar" gemacht wird – mit entsprechenden Risiken. Infolge dieser Dynamik erweist sich eine bloß reaktive Schutzpolitik als äußerst kurzsichtig. Zudem ist nicht gewährleistet, dass zukünftige Generationen die Finanzierung und Erhaltung von kostenintensiven Schutzbauwerken bewerkstelligen können. Auch international wird eine Umkehr von einer Kultur der Reaktion hin zu einer Kultur der Prävention gefordert, etwa im Jahr 1999 von Kofi Annan (Dikau 2004). Es gilt also, Gefahren zu erkennen, das Bewusstsein für sie zu stärken und bereits ex ante technische, raumplanerische und organisatorische Maßnahmen zu treffen, um nachhaltige Sicherheit gewährleisten zu können (Rudolf-Miklau 2005). Seit Mitte des vorigen Jahrhunderts werden in den meisten Alpenländern Naturgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten berücksichtigt. Zur Darstellung und Information haben sich Karten mit Angaben zu Art und Grad der Bedrohung alpiner Gefahrenprozesse durchgesetzt (Rickenmann und Scheidl 2010). Vor diesem Hintergrund wurde in Südtirol im Jahr 1997 das „Landesraumordnungsgesetz“ verabschiedet, mit dem Ziel, im Zuge einer umfangreichen Gefahren- und Risikoanalyse Gefahrenzonenpläne für die Gemeinden zu erstellen.

Diese Diplomarbeit zeigt ein Beispiel für die Umsetzung einer Gefahrenanalyse und -zonierung bezüglich Vermurung: Für sieben Wildbachkegel im Langtaufertal (Gemeinde Graun, Südtirol, Italien) wurde eine Detailmodellierung mittels eines physikalischen Prozessmodells durchgeführt, wobei die Eingangsparameter Abfluss und mobilisierbares Geschiebe für drei Wiederkehrszeiten (30-, 100- und 300-jährliches Ereignis) vorab bestimmt werden mussten.

Die Untersuchung wurde im Zuge eines Praktikums bei der Firma Abenis Alpinexpert GmbH durchgeführt, die im Naturgefahren- und Risikomanagement tätig ist. Die Firma wurde von der Gemeinde Graun beauftragt, womit die Untersuchung nach den in Südtirol geltenden Richtlinien erfolgte.

1.1 Ziele und Hypothesen der Arbeit

Das übergeordnete Ziel dieser Diplomarbeit ist eine Gefahrenbeurteilung hinsichtlich Vermurung für sieben Wildbäche im Langtaufertal. Dabei wurden zwei zentrale Hypothesen formuliert, die jeweils mit Hilfe mehrerer Fragestellungen geprüft werden. Sie werden nun vorgestellt, und auch die Maßnahmen zu ihrer Überprüfung werden skizziert.

Hypothese 1: *Die Gefährdungsvoraussetzungen für Muren im Langtaufertal werden maßgeblich durch das maximal mobilisierbare Feststoffvolumen und den Gebietsabfluss gestellt.*

- a. Wo befinden sich die Geschiebeherde? Welche Gerinneabschnitte sind für die Geschiebemobilisierung bzw. für die Ablagerung relevant?
- b. Welche Geschiebemengen können bei einem 30-, 100- oder bei einem 300-jährlichen Starkniederschlagsereignis maximal mobilisiert werden?
- c. Welche Abflussganglinien ergeben sich bei gegebenen gebietsspezifischen Starkniederschlägen?

Hypothese 1 geht davon aus, dass durch höhere Feststoffvolumen und höhere Abflüsse auch die Gefährdung am Kegel höher ist. Unter der Annahme, dass durch Niederschlags- und daraus resultierender Abflusszunahme auch die Erosionskapazität steigt, werden sowohl die Abflussganglinien als auch maximal mobilisierbare Geschiebemengen für unterschiedliche Wiederkehrswahrscheinlichkeiten von Starkniederschlägen bestimmt. Die Abflussganglinien sollen im Zuge einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung ermittelt werden, die Schätzung der Feststoffe erfolgt mit Hilfe der geomorphologischen Methode von Hungr et al. (1984) bzw. Spreafico et al. (1999). Daneben wird die Fragestellung 1a mittels GIS-Analysen und geomorphologischer Kartierung erarbeitet.

Hypothese 2: *Das hydraulische Modell FLO-2D ist in der Lage, die Gefährdungssituation hinreichend darzustellen.*

- a. Wie hoch ist die Gefährdung durch Muren auf den besiedelten Schuttkegeln bei ermittelten Geschiebe- und Abflussmengen?
- b. Scheinen die Ergebnisse aufgrund der bestehenden Verbauungen plausibel?
- c. Lassen sich die Modellierungsergebnisse mit den in der Vergangenheit dokumentierten Ereignissen vergleichen?

Für die Gefährdungsmodellierung wird die Software FLO-2D (O'Brien et al. 1993) angewandt. Die Simulationsergebnisse stellen dabei maximale Fließhöhen dar, die anhand der in Südtirol gültigen Richtlinien in Gefahrenabstufungen klassifiziert werden sollen. Die Plausibilität der Gefahrenzonen soll anhand der bestehenden Verbauungen und anhand der Dokumentation historischer Ereignisse überprüft werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der einleitenden Problemstellung, den Hypothesen und Zielen der Arbeit (Kapitel 1) folgt nun die Ausführung der Theoretischen Grundlagen (Kapitel 2). Dazu gehören die Abgrenzung und Charakterisierung des Murgangprozesses, Grundlagen der Naturgefahrenanalyse mit Fokus auf den Richtlinien in Südtirol und der Stand der Wissenschaft zur Bestimmung von Magnitude und Intensität von Murgängen sowie zur Abschätzung des Abfluss- und Geschiebetransports.

Kapitel 3 enthält die Beschreibung des Untersuchungsgebiets bezüglich Naturraum, Besiedlung und Nutzung. Daran anschließend werden die in den Analysen verwendeten Daten angeführt (Kapitel 4).

Die Methoden für die Umsetzung der Gefahrenbeurteilung finden sich in Kapitel 5: die Charakterisierung des Einzugsgebiets durch vorbereitende Analysen in GIS, eine geomorphologische Übersichtskartierung und die Schätzung der mobilisierbaren Feststoffe (Kapitel 5.1), die Niederschlag-Abfluss-Modellierung (Kapitel 5.2), die Gefährdungsmodellierung (Kapitel 5.3) sowie dessen Validierung durch das Auswerten historischer Quellen (Kapitel 5.4).

Die Ergebnisse aller angewandten Methoden werden anschließend in Kapitel 6 vorgestellt. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse zusammenschauend diskutiert. Abschließend soll Kapitel 8 Perspektiven aufzeigen, die sich aus der Arbeit ergeben.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Inhalte der Diplomarbeit theoretisch fundiert. Für die Arbeit spielt neben dem Prozess Murgang an sich vor allem die Gefahrenanalyse, und diesbezüglich die Bestimmung gefahrenrelevanter Größen, eine wichtige Rolle.

Demnach finden sich in Kapitel 2.1 Grundlagen zum Murgangprozess und in Kapitel 2.2 Grundlagen der Gefahrenanalyse, dabei wird auch auf die Gefahrenzonenplanung in Südtirol eingegangen (Kapitel 2.2.3). Im Hinblick auf die Untersuchung der Murganggefahr werden im Anschluss Möglichkeiten zur Bestimmung von Magnitude und Intensität von Murgängen aufgezeigt (Kapitel 2.3) und in Kapitel 2.4 wird die Modellierung des Abflusses erläutert.

2.1 Muren

2.1.1 Prozessabgrenzung

Der Prozess Murgang wird in der Geomorphologie den gravitativen Massenbewegungen zugeordnet. Es sind dies hangabwärtsgerichtete Verlagerungen von Fels oder Lockergestein unter der Wirkung der Schwerkraft (Dikau und Glade 2002). Um die Bewegungen und Prozesse voneinander unterscheiden zu können, gibt es verschiedene Klassifikationsansätze.

Eine oft verwendete Klassifikation ist jene nach dem Bewegungstyp. Varnes (1978) unterscheidet die sechs Bewegungstypen *Fallen* (falls), *Kippen* (topples), *Rutschen* (slides), *Driften* (lateral spreading), *Fließen* (flows) und *Komplexe Massenbewegungen* (complex). Dieser Ansatz ordnet Muren (engl. debris flows) den *fließenden* Bewegungen zu, welche ihrerseits nach Material und Bewegungsraten differenziert werden.

Das österreichische Normungsinstitut (ONR 2009) ordnet den Prozess Murgang im Zwischenbereich von rutschenden und fluviatilen¹ Verlagerungsprozessen in einem Wildbacheinzugsgebiet ein. Verlagerungsprozesse, an denen Wasser *und* Feststoffe unterschiedlicher Größe (Fein- und Grobmaterial) beteiligt sind, werden u.a. aufgrund der volumetrischen Feststoffkonzentration unterschieden: *Hochwasser*, *fluviatiler Feststofftransport* (0 - 20 %), *murartiger Feststofftransport* (20 - 40 %) und *Murgang* (> 40 %).

¹ gleichzusetzen mit dem in der Geomorphologie verwendeten Begriff *fluvial*

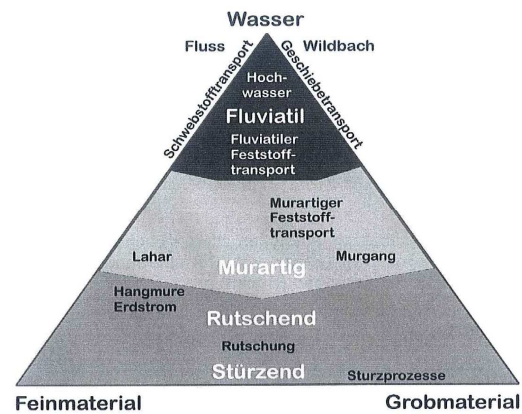


Abbildung 2.1: Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten (ONR 2009)

2.1.2 Definitionen

"Ein Murgang ist eine sehr schnelle bis extrem schnelle, reißende Bewegung (quasiviskoses Fließen) einer breiartigen Suspension aus Wasser, Erde, grobem und feinem Schutt bis zur Blockformgröße und Baumstämmen in Wildbächen oder alten Murfurchen im Hang mit mehr oder weniger steilem Gefälle." (Bunza 1976)

"Debris flow is a very rapid to extremely rapid flow of saturated non-plastic debris in a steep channel." (Hungar 2005)

"A debris flow is a gravity induced mass movement intermediate between landslide and waterflooding, with mechanical characteristics different from either of these processes." (Johnson und Rahn 1970)

Anhand dreier ausgewählter Definitionen werden die wesentlichen Charakteristiken von Murgängen hervorgehoben. In ihrer Bewegungsform können Muren als von der *Schwerkraft* angetriebene, *fließende* Bewegung angesehen werden. Sie führen beträchtliche Mengen an *Feststoffen* und oft Holz mit, sind an *steiles* Gefälle gebunden und können *hohe Geschwindigkeiten* aufweisen. Daneben wird auch das *Fließverhalten* von Muren hervorgehoben. Feststoff-Wasser-Gemische weisen eine höhere Viskosität als Wasser auf und gehorchen deshalb nicht dem newtonschen Viskositätsgesetz, sondern verhalten sich schergeschwindigkeitsabhängig ("nicht-newtonisch", "zäh") (Costa 1984; Takahashi 1991).

2.1.3 Disposition und Auslösung von Muren

Die Disposition ist die *Anfälligkeit* eines Gebietes zur Bildung und Auslösung von Prozessen, abhängig von geologischen und hydrologischen Eigenschaften. Unterschieden wird dabei zwischen Grunddisposition und variabler Disposition. Die **Grunddisposition** ist von Parametern beeinflusst, die längerfristig konstant bleiben, wie etwa die Geologie, der Pflanzenbestand und sämtliche topographische Parameter (Höhenlage, Neigung). Die **variable Disposition** ändert sich dagegen mittelfristig. Sie ergibt sich aus jahreszeitlichen Schwankungen, aus der Materialverfügbarkeit oder aus den Vorfeuchtebedingungen (Zimmermann et al. 1997).

Ist die Disposition für Muren gegeben, bedarf es zusätzlich eines **auslösenden Ereignisses**, das die Stabilität von Schuttmassen aus dem Gleichgewicht bringt. Meist handelt es sich dabei um ein Niederschlagsereignis, aber auch die Auslösung durch rapide Schneeschmelze oder seismische Aktivität ist möglich. Am wahrscheinlichsten werden Murgänge bei langandauernden Starkniederschlägen ausgelöst, unter diesen Bedingungen kann relativ schnell ein positiver Porenwasserdruck im Materialkörper zu Stande kommen (Wieczorek und Glade 2005). Positiver Porenwasserdruck herrscht vor, wenn die Schutt- und Bodenschichten völlig mit Wasser gefüllt sind und die Kohäsion zwischen den einzelnen Partikeln verloren geht. Außerdem kommen durch die Wasserfüllung der Poren Auftriebskräfte hinzu, die den Zusammenhalt noch weiter herabsetzen. Damit kann sich die Masse in Bewegung setzen (Ahnert 2003) (siehe auch Formel 2.1).

Bei kurzen Starkniederschlägen (< 1 h) ist die Infiltrationsmenge meist zu gering, um einen positiven Porenwasserdruck zu erzeugen. Bei Niederschlägen geringer Intensität sind die Infiltrationsmengen zwar groß genug, die geringe Intensität begünstigt jedoch eher ein Versickern in den Grundwasserkörper (Wieczorek und Glade 2005). Allerdings können Murgänge auch durch längere Regenperioden niedriger und mittlerer Intensitäten ausgelöst werden. Besonders tiefgründige Lockermaterialkörper oder Rutschkörper bedürfen hoher Vorfeuchte, die erst bei längerandauernden Ereignissen aktiviert werden (Zimmermann et al. 1997).

Physikalisch lässt sich die Auslösung von Murgängen mit der Grenzscherspannung erklären. Bei nicht-viskosem Fließen setzt sich eine Masse erst in Bewegung, wenn die Schubspannung einen gewissen Wert, die Grenzscherspannung $|\tau|$, überschreitet. Dargestellt wird $|\tau|$ anhand der Mohr-Colomb-Gleichung, die die treibenden Kräfte den haltenden Kräften am Hang gegenüberstellt (Formel 2.1).

$$|\tau| = (\sigma - p) \tan \theta + c \quad \text{Formel 2.1}$$

Die treibende Kraft ist die hangparallel abwärts gerichtete Scherspannung. Die haltenden Elemente sind die effektive Normalspannung $(\sigma - p)$, der Reibungswinkel φ und die Kohäsion c . Die effektive

Normalspannung ist die um den Porenwasserdruck p verminderte Normalspannung σ , die rechtwinklig zur Hangfläche wirkt. Der Reibungswinkel φ wird bestimmt durch die Kornform des Materials und die Lagerung der Körner. Bei positivem Porenwasserdruck vermindert sich die effektive Normalspannung und damit auch die haltenden Kräfte. Zum Bruch kommt es, wenn die Kohäsion annähernd Null ist und das Material von den treibenden Kräften dominiert wird. Die Scherspannung und damit die Möglichkeit zur Auslösung einer Hangbewegung ist umso größer, je steiler der Hang ist, je geringer die innere Reibung ist und je geringer die Kohäsion des vorhandenen Materials ist (Iverson 1997).

2.1.4 Räumlich-funktionale Aspekte von Murgängen

Ein Murgang kann in drei Prozessbereiche unterteilt werden: in den Anriss- oder Entstehungsbereich, in den Transportbereich und in den Ablagerungsbereich (Hungr 2005). Mögliche **Entstehungsgebiete** für Muren sind primär lockere und unbewachsene Schuttmassen an Stellen mit großem Gefälle (20-45°) (Hungr 2005). Dabei ist vor allem das Feinmaterial der Schuttmassen für die Auslösung förderlich. Denn im Gegensatz zu grobporigem Schutt, der Wasser schnell abfließen lässt, *sammelt* sich das Wasser in den feineren Poren und es kann schneller ein positiver Porenwasserdruck aufgebaut werden (Ahnert 2003). Daneben werden Murgänge auch durch Hangrutschungen oder im Gerinne selbst ausgelöst, oft werden abgelagerte Geschiebemengen plötzlich mobilisiert oder eine Verklausung bricht durch (Costa 1984).

Das Material und die Prozesse, die am Murgang beteiligt sind, werden maßgeblich durch die Geologie der Geschiebequellen bedingt. Etwa liefern massige Gesteine wie Granit oder Gneis grobkörniges, durchlässiges Material, das vorwiegend durch Sturzereignisse in das Gerinne gelangt. Weiche, schieferige Gesteine dagegen produzieren eher feinkörniges, weniger durchlässiges Material, das primär über Rutsch- und Fließprozesse ins Gerinne kommt (Mani 1996).

Nach Stiny (1931) werden die Geschiebeherde in Jung- und Altschutt unterteilt. Letzterer ist, wie der Name schon sagt, "'älter' als die jetzige Bachtätigkeit" und oft glazialen Ursprungs. Beispiele dafür sind bewachsener Gehängeschutt und bewachsene Schuttkegel sowie Eiszeitschotter oder Moränen. Demgegenüber ist Jungschutt verwitterungsabhängig und bildet sich immer wieder neu. Neben Verwitterungsschutt zählen auch Schutt aus Sturzprozessen und transportierte (Altschutt-) Ablagerungen im Gerinne dazu. Die Unterscheidung zwischen Jung- und Altschutt ist deshalb von Bedeutung, da Murgänge aus Jungschuttgebieten generell einer gewissen Periodizität unterworfen sind: nach einem Murgang muss sich mobilisierbares Geschiebe erst wieder neu bilden.

Im zweiten Prozessbereich, der **Transportzone**, bewegt sich die Mure hangabwärts. Infolge der plötzlichen Freisetzung von großen Materialmengen und durch kontinuierliches Aufstauen und Durchbrechen treten Murgänge in Schüben auf. Die Schübe können in Zeitabständen von Sekunden bis Stunden aufeinanderfolgen. Die Murenfront ist dabei gewöhnlich höher, beinhaltet die größten Kompartimente und wird gefolgt von flüssigerem Abfluss mit mehr Feinmaterial und weniger groben Blöcken (Costa 1984). Die Gesamtdichte von Muren liegt zwischen 1,8 und 2,6 g/cm³ (im Vergleich dazu liegen die Werte für Hochwasserführende Flüsse zwischen 1,01 und 1,3 g/cm³), die volumetrische Feststoffkonzentration kann Werte zwischen 25 und 70% (oder 80 %) annehmen. Die Geschwindigkeiten variieren je nach Größe, Konzentration und Sortierung des Materials sowie in Abhängigkeit von der Gerinneform. Beobachtungen zeigen Geschwindigkeiten zwischen 0,5 und 20 m/s (Takahashi 1991).

Abhängig vom Wassergehalt und von der Korngrößenverteilung können Murgänge ein unterschiedliches Fließverhalten aufweisen. Hübl (1996) unterscheidet zwischen *kohäsiven Muren* und *nicht kohäsiven Muren*. Bei ersteren überwiegt der Feinkornanteil, der Grobkornanteil kann unterschiedlich groß sein. Damit ist auch der Feinkornanteil für das rheologische Verhalten verantwortlich. Diese Murenkörper verhalten sich *viskoplastisch* (wie plastische Medien), was vor allem auf die Kohäsion des Feinmaterials zurückzuführen ist. Dagegen überwiegt bei *nicht kohäsiven Muren* die grobe Kornfraktion. Diese Muren werden auch als *granular* bezeichnet (Iverson 1997). Der Anteil der kleineren Partikel ist vernachlässigbar, und damit auch die kohäsiven Kräfte. Das Fließverhalten dieser Muren wird als *dilatant* bezeichnet. Es dominieren andere Kräfte wie die Reibungsfestigkeit und Kornkollisionen. Am Fließprozess sind neben den erwähnten Kräften auch Auftriebskräfte beteiligt, die bewirken, dass auch sehr große Blöcke in Schwebe gehalten werden. Sie entstehen durch die unterschiedliche Dichte des Wassers und der festen Bestandteile (Costa 1984).

Im Transportbereich nimmt die Mure zusätzliches Material durch Tiefen- und Seitenerosion auf. Die erodierte Menge wird als *Geschiebebeitrag* (m³ pro Laufmeter) bezeichnet. Insgesamt stehen Erosion und Deposition im Transitbereich von Muren jedoch im Gleichgewicht (Hungr 2005). Typisch ist hier die Ausbildung von *Levéés*: Durch den lateralen Wasseraustritt vergrößern sich die Reibungskräfte am Rand der Mure und längs des Gerinnes bilden sich Muredämme. Im Gerinne selbst hinterlässt die Mure eine trogförmige Hohlform (Hübl 1996).

Ablagerungsbereich: In Bereichen mit geringem Gefälle (< 10°) und an Stellen, wo das Gelände ein laterales Ausbreiten möglich macht, kommen Muren zum Stillstand. Hauptsächlich findet dieser Vorgang am Kegelhals statt (Hungr 2005). Der Austritt von Wasser erhöht die innere Reibung und die Mure lagert sich zungenförmig ab. Die Druckspannung des Materials bzw. die hohe Feststoffkonzentration an den Seiten ermöglicht die Bildung von steilen Fronten und Rändern (Costa

1984). Ablagerungen von Muren weisen keine Entmischungen auf, da alle Fraktionen mit etwa derselben Geschwindigkeit bewegt werden (Hübl 1996).

2.2 Naturgefahrenanalyse

Dieses Kapitel behandelt die Gefahrenanalyse im Kontext des Risikokonzepts der Naturwissenschaften. Neben der Erläuterung von zentralen Begriffen und theoretischen Aspekten wird die Umsetzung des Risikokonzepts in Südtirol mit besonderem Augenmerk auf die Gefahrenzonenplanung beleuchtet.

2.2.1 Das Risikokonzept in der Naturgefahrenforschung

Lawinen, Vulkanausbrüche, Muren, Flash Floods, Rutschungen oder Lahare sind **Naturereignisse**, die sich in Gebirgsregionen abspielen. Sie können mit Hilfe von verschiedenen Variablen beschrieben werden. Dabei unterscheidet man zwischen der **Magnitude** (Größe) und der **Intensität** (Stärke) des Prozesses. Bei Murgängen bildet die Magnitude das Gesamtvolumen oder den Spitzenabfluss ab, die Intensität macht die Prozessauswirkungen deutlich und gibt somit Geschwindigkeit, Reichweite, Fließtiefe, Aufprallkraft oder maximale Ablagerungsmächtigkeit wieder (Jakob 2005). In der Regel treten Ereignisse mit hoher Magnitude selten auf (geringe Frequenz, großes Wiederkehrintervall), Ereignisse kleiner Magnitude hingegen oft (große Frequenz, kleines Wiederkehrintervall) (Abbildung 2.2) (Crozier und Glade 2005; Schrott und Glade 2008).

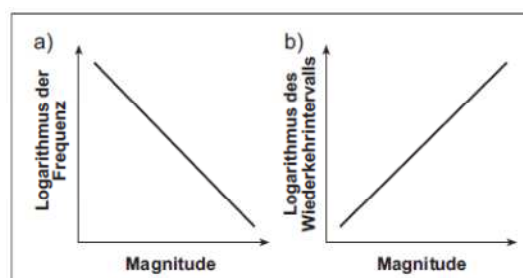


Abbildung 2.2: a) Frequenz-Magnitude-Beziehung. b) Beziehung zwischen Wiederkehrintervall von Naturgefahren und Magnitude des Ereignisses (nach Smith 2004 in Schrott und Glade 2008)

Naturprozesse werden dann zur Gefahr für den Menschen, wenn Frequenz und Magnitude eine gewisse Toleranzgrenze überschreiten und sie somit eine Bedrohung darstellen (Heinimann et al. 1998). Etwas weiter gefasst werden **Naturgefahren** als Auftretenswahrscheinlichkeit eines potentiell schadbringenden Ereignisses in einem bestimmten Raum und einer bestimmten Zeit (Varnes 1984) definiert. Die möglichen Folgen können dabei vielfältig sein: Verlust von Menschleben und

von ihrer Existenzgrundlage, Verletzungen, Schäden am Eigentum und an der Umwelt oder auch Beeinträchtigungen des öffentlichen und wirtschaftlichen Lebens (UNISDR 2009).

Mittels des **Risikobegriffs** wird die Gefahr bewertet. Die Berechnung des Risikos eines *Szenarios* i und eines *Objektes* j ($R_{i,j}$) geschieht durch die Multiplikation der *Eintretenswahrscheinlichkeit* des Szenarios p_{si} mit dem *Wert* des Objektes bzw. *Risikoelements* A_{Oj} , mit der *Verletzlichkeit* $v_{Oj,si}$ und mit der *Präsenzwahrscheinlichkeit* des Objektes j gegenüber Szenario i ($v_{Oj,si}$) (Formel 2.2).

$$R_{i,j} = f(p_{si}, A_{Oj}, v_{Oj,si}, p_{Oj,si}) \quad \text{Formel 2.2}$$

Als **Risikoelemente** werden alle gefährdeten Menschen und ihr Eigentum, wirtschaftliche Aktivitäten oder öffentliche Dienste in einem Gebiet bezeichnet (Varnes 1984). Abgesehen von Menschen kann diesen Risikoelementen ein Wert zwischen 0 (kein Schaden) und 1 (totale Zerstörung) zugeordnet werden, der, abhängig von der Magnitude, die **Vulnerabilität** (Verletzlichkeit) der Risikoelemente ausdrückt. Cutter (1996) beschreibt die Vulnerabilität auf drei Ebenen: als Exponiertheit bzw. Nähe zu einer Gefahr, als soziales Charakteristikum, etwa aufgrund unterschiedlicher Bewältigungskonzepte, und als abstrakte Eigenschaft des Raumes. Die **Präsenzwahrscheinlichkeit** stellt die zeitliche Veränderung der Risikoelemente dar, z.B. die mittlere Aufenthaltsdauer von Personen oder Fahrzeugen an einem Ort pro Zeiteinheit (ZE) (Fuchs et al. 2007). Das Risiko quantifiziert demnach die möglichen Konsequenzen einer Naturgefahr, entweder die Todesfallwahrscheinlichkeit (pro ZE) oder den Schaden in Euro (pro ZE).

Für Gefahrenbeurteilungen werden gewöhnlich mehrere Szenarien durchgespielt. Diese sogenannten **Bemessungsereignisse** dienen als Grundlage für die Dimensionierung von Schutzbauwerken und für die Gefahrenzonenplanung und werden dafür auch gesetzlich festgelegt (Kapitel 2.2.3). Bemessungsereignisse orientieren sich damit an den Schutzzielen, die sich wiederum an den gesellschaftlichen Sicherheitserwartungen der letzten Jahrzehnte und an den technischen Möglichkeiten orientieren (Rudolf-Miklau 2009).

2.2.2 Grundlagen der Gefahrenanalyse

Nach Heinimann et al. (1998) besteht die Gefahrenanalyse aus den beiden Aspekten Ereignis- und Wirkungsanalyse. Erstere hat zum Inhalt, mögliche Gefahren zu identifizieren und zu lokalisieren. Dabei sollen die wesentlichen Prozessbereiche – das sind reelle und potentielle Entstehungs-, Transit- und Ablagerungsgebiete – ausgemacht und geprüft werden. Die Wirkungsanalyse bestimmt Art, Ausdehnung und Grad der Gefährdung. Sie soll also hervorbringen, "welche Relation zwischen dem Ausmaß und der Häufigkeit des potentiellen Schadensprozesses besteht".

Es folgen Herangehensweisen an die Gefahrenanalyse. Am Anfang werden üblicherweise historischer Quellen ausgewertet. Aus Interviews mit Ansässigen, aus Chroniken und Archiven, Zeitungsartikeln, altem Kartenmaterial, Gutachten oder wissenschaftlichen Arbeiten können Informationen zu historischen Ereignissen gewonnen werden. Historische Analysen erleichtern das Verständnis typischer Naturgefahren in einer Region, ermöglichen die Schätzung von Intensität und Wiederkehrdauer (Kapitel 2.3.1) und können für die Eichung von Simulationsmodellen verwendet werden (Macconi und Sperling 2008).

Das Hinzuziehen von Bildmaterial (Luftbilder, Orthofotos) ermöglicht einen breiteren Blick auf das Prozessgebiet. Vor allem in Luftbildern sind aktive Anriss- und Erosionsgebiete meist gut erkennbar (Heinimann et al. 1998; Jakob 2005). In jedem Fall sollten Ortsaugenscheine durchgeführt werden, um ein Bild von der aktuellen Situation im Gelände zu gewinnen. Oft liefern Spuren von abgelaufenen und rezenten Massenverlagerungsprozessen, "Stumme Zeugen" genannt, Rückschlüsse auf Art, Trajektorien (Prozesspfade) und Ausdehnung der Prozesse (Hübl et al. 2003). Typische Anzeichen für Murgänge sind U-förmige Abflussrinnen mit Levées, Spuren von Ausspülungen und zungenförmige, unsortierte Ablagerungen, meist mit kaum gerundeten Steinblöcken oder Holz (Hübl et al. 2003).

Ein bewährtes Instrument in der Erkennung und Abgrenzung von Naturgefahren ist außerdem die Geomorphologische Kartierung. Eine mögliche Darstellungsform ist die Prozesskarte. Sie bildet die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit von Prozessen ab und stellt damit die Basis für eine Gefahrenzonierung. Beispiele finden sich in den Arbeiten von Seijmonsbergen, der die Formen und Prozesse etwa durch detaillierte GIS-Visualisierung abgrenzt (Seijmonsbergen und de Graaff 2006), oder auch durch halb-automatisierte zonale Statistiken und Expertenmeinungen (Seijmonsbergen 2008).

Die angeführten Methoden stellen hauptsächlich eine "rückwärtsgerichtete Indikation" abgelaufener Gefahrenereignisse dar (Heinimann et al. 1998). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Prozesse in Zukunft unter vergleichbaren Bedingungen ablaufen werden. Demgegenüber zielt die "vorwärtsgerichtete Indikation" auf das Erkennen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen ab. Hier ist das Prozessverständnis besonders wichtig, da durch das Identifizieren von bestimmten Merkmalskombinationen (Geologie, Gefälle, Bodenbedeckung) auch potentielle Gefahrendispositionen erkannt werden können. Durch den Einsatz von Modellen, die in Kapitel 2.4 noch näher vorgestellt werden, können diverse Zukunftsszenarien simuliert werden.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich der Umgang mit Naturgefahren von einem reaktiven zu einem präventiven Ansatz entwickelt hat. Ausgehend von der Naturgefahrenforschung der 1970er Jahre, die sich auf die Gefahrenerkennung und die räumliche Verteilung von Prozessen beschränk-

te, setzte man später vermehrt auf technische Schutzverbauungen und nur "punktuell" auf vorausschauende Maßnahmen. Dieser reaktive Ansatz erweiterte sich durch eine systematisch vorausschauende Gefahrenbeurteilung. Letztendlich werden Naturgefahrenanalysen erst seit wenigen Jahren durch Risikoanalysen mit präventiven Charakter erweitert (Elverfeldt von et al. 2008). Man spricht auch von einem **Integralen Risikomanagement**, das für einen weitreichenden Schutz grundsätzlich alle Maßnahmen der Vorbeugung, Intervention und Wiederherstellung berücksichtigt, aber der präventiven Maßnahmenplanung den Vorrang gibt (Kanonier 2006). Hierbei kommt der Gefahrenzonenplanung eine besondere Rolle zu. Durch die Berücksichtigung der Gefahrenzonen in der Raumplanung können Schäden von vorne herein abgewendet bzw. gemindert werden (Hegg et al. 2001; Kanonier 2006).

2.2.3 Gefahrenzonenplanung in Südtirol

Die Umsetzung eines umfassenden Schutzkonzepts wurde in Südtirol auf Grundlage des "Landesraumordnungsgesetzes" (Landesgesetz vom 11. August 1997, Nr. 13, Artikel 22*bis*) durchgesetzt. Es sieht die Erstellung von Gefahrenzonenplänen und Risikokarten sowie davon ausgehend eine entsprechende Maßnahmenplanung vor. Berücksichtigt werden dabei die in der Gebirgsregion relevanten Naturgefahren **Massenbewegungen** (Sturz, Rutschung, Einbruch, Hangmure), **Wassergefahren** (Überschwemmung, Übersarung², Vermurung, Erosion) und **Lawinen** (Fließlawine, Stau-lawine, Gleitschnee). Das Schutzkonzept fordert die getrennte Beurteilung dieser Prozesse, im Gefahrenzonenplan können sie sich hingegen überlagern. Darauf aufbauend erfolgt die Beurteilung des spezifischen Risikos (Aut. Prov. BZ 2006). In Anlehnung an die "Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren" (Heinimann et al. 1998; BUWAL 1999) läuft die Umsetzung in drei Phasen ab, wobei für diese Arbeit nur die beiden ersten von Belang sind³:

Zuerst soll die Gefahr erkannt, bestimmt und dokumentiert werden (**Phase I**). Dafür werden Recherchen und Auswertungen verschiedenster Quellen, sowie Lokalausgänge im Gelände durchgeführt. Davon ausgehend werden in **Phase II** die Gefahren abgeschätzt und Gefahrenzonen abgegrenzt (vgl. Wirkungsanalyse Kapitel 2.2.2). Dies geschieht in Abhängigkeit von den zwei Parametern *Eintrittswahrscheinlichkeit* und *Intensität* (Abbildung 2.3) und unter Berücksichtigung bestehender Schutzbauten (Aut. Prov. BZ 2006).

Die in Südtirol gültigen Bemessungsereignisse sind 30-jährliche (hohe Eintrittswahrscheinlichkeit), 100-jährliche und 300-jährliche Ereignisse (geringe Eintrittswahrscheinlichkeit). Die Intensitäten sind prozessspezifisch und werden ebenfalls in hoch, mittel und gering eingestuft. Aus der

² fluvialer Geschiebetransport

³ Die dritte Phase beinhaltet die Risikobewertung und die Maßnahmenplanung.

Kombination von Wiederkehrswahrscheinlichkeit (T_R) und Intensität ergeben sich drei Gefahrenstufen: H4, H3 und H2 (Aut. Prov. BZ 2006):

H4 Sehr hohe Gefahr: Im rot gefärbten Verbotsbereich ist mit schweren Verletzungen oder auch mit dem Verlust von Menschenleben zu rechnen. Außerdem sind schwere Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen und an der Umwelt sehr wahrscheinlich. Es kann zur Zerstörung von sozialen und wirtschaftlichen Aktivitäten kommen, Personen sind innerhalb und außerhalb von Gebäuden gefährdet, eine plötzliche Gebäudezerstörung ist möglich.

H3 Hohe Gefahr: Im blau dargestellten Gebotsbereich ist mit Verletzungen an Personen, funktionellen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, Unterbrechungen von sozialen und wirtschaftlichen Aktivitäten und mit Umweltschäden zu rechnen. Im Falle eines Ereignisses sind Personen nur *außerhalb* von Gebäuden gefährdet.

H2 Mittlere Gefahr: In den gelb gekennzeichneten Hinweisbereichen können Naturgefahren geringe Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen und an der Umwelt auslösen, soziale und wirtschaftliche Aktivitäten sind jedoch nicht beeinträchtigt. Personen im Freien sind kaum gefährdet.

Sehr seltene Ereignisse ($T_R > 300$) mit hoher Intensität stellen die **Restgefahr H1** dar. Sie wird im GZP nicht dargestellt (farblos). Untersuchte Gebiete, die keine Gefahren aufweisen, werden üblicherweise in hellgrau eingefärbt.

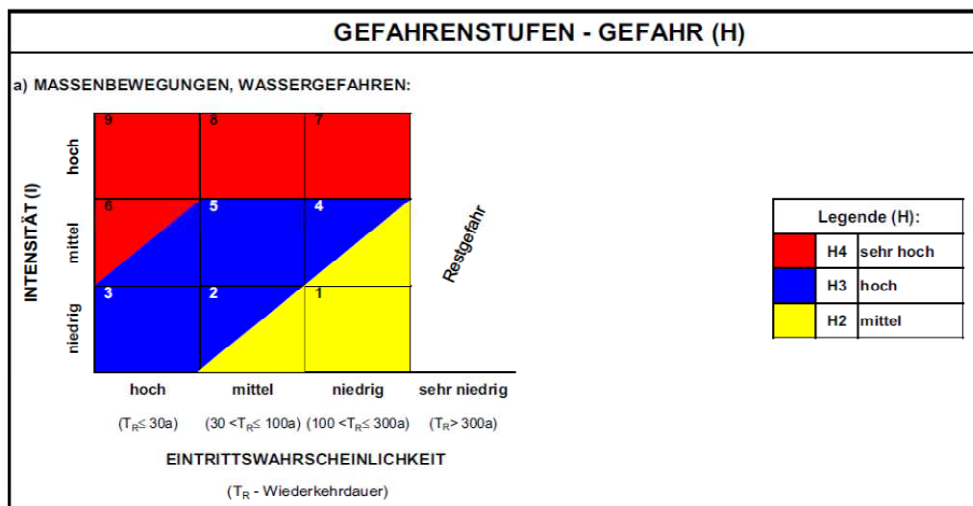


Abbildung 2.3: Kombinationsmatrix der Gefahrenstufen für Massenbewegungen und Wassergefahren (Aut. Prov. BZ 2006, modifiziert nach Heinimann et al. 1998)

Schließlich müssen die Gefahrenzonen in den Bauleitplänen der Südtiroler Gemeinden berücksichtigt werden. Relevant für die Ausweisung von Gefahrenzonen sind Siedlungs- und Infrastrukturflächen. Abhängig von der Relevanz dieser Flächen leiten sich unterschiedliche Bearbeitungstiefen ab (Aut. Prov. BZ 2006):

Bearbeitungstiefe BT05: Gefahren, die stark urbanisierte oder zu urbanisierende Flächen betreffen, müssen mit hoher Bearbeitungstiefe untersucht werden. Dies entspricht einem Bearbeitungsmaßstab von mindestens 1:5.000. Dabei sollen Modelle und Simulationen die Genauigkeit der Analyse verstärken. Die Bearbeitungstiefe BT05 ist für Ortskerne (mit einem Puffer von 300 Metern), touristische und öffentliche Einrichtungen, Baugebiete, aber auch für Streusiedlungen oder gefährdete Einzelhäuser gültig. Im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit gilt die Bearbeitungstiefe BT05 für die Kegelbereiche der Bäche Faller, Patzin, Patscheider, Bratzen, Kappler und Außer Vallatsch (It. Ausschreibung der Gemeinde Graun).

Bearbeitungstiefe BT10: Flächen, die einzeln oder nicht bebaut sind sowie Infrastrukturen und Hauptleitungen von öffentlichem Interesse beinhalten, werden mit geringer Bearbeitungstiefe analysiert, die einen Mindest-Maßstab von 1:10.000 verlangt. Die Untersuchungen können demnach auch ohne detaillierte Modellierungen erfolgen. BT10 gilt für Verkehrsflächen außerhalb von Siedlungsgebieten, Erholungseinrichtungen (Skipisten, Golf- und Reitplätze) und Hauptversorgungsleitungen ("Lifelines"). In dieser Arbeit betrifft BT10 nur den Kegelbereich des Pleiferbaches.

Bearbeitungstiefe BTØ: Unbebaute natürliche Landschaft und Netzinfrastuktur bzw. Infrastruktur mit untergeordneter Bedeutung sind für den GZP nicht von Interesse und werden nicht untersucht.

2.3 Bestimmung von Magnitude und Intensität von Muren

Nun werden die drei wichtigsten Ansätze vorgestellt, mit Hilfe derer Größe und Stärke von Murgängen abgeschätzt werden können. Es handelt sich dabei um die Herstellung der Beziehung zwischen Frequenz und Magnitude, die Anwendung von empirischen Formeln und Geomorphologische Methoden.

2.3.1 Frequenz-Magnitude-Beziehung

In Kapitel 2.2.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Frequenz-Magnitude-Beziehung das Prozessverhalten in einem Gebiet widerspiegelt und somit die Einschätzung zukünftiger Gefahrenereignisse erleichtert. Eine Reihe von Arbeiten der letzten Jahrzehnte analysiert Frequenz-Magnitude-Beziehungen bei Murgängen, wobei Intensität und Häufigkeit mit unterschiedlichen Methoden abgeschätzt werden. Beispiele dafür sind die Studien von Brochot et al. (2002, in Marchi 2004) oder Zimmermann, Mani und Romang (1997). Idealerweise beinhalten die Dokumente den Auftretenszeitpunkt (Jahr, Monat, Tag, Stunde) sowie Hinweise auf die Ereignisstärke in Form von

volumetrischen Angaben, Ablagerungen oder verursachten Schäden. Häufig wird die Frequenz von Murgangereignissen durch indirekte Datierung erfasst, wobei viel größere Zeitspannen als durch historische Aufzeichnungen erfasst werden können: Etwa werden Zeitreihen mit Hilfe von Dendrochronologie (van Steijn 1996; Stoffel 2010), Lichenometrie (van Steijn 1996; Helsen et al. 2002) oder mit Hilfe stratigraphischer Analysen abgeleitet (Blair und McPherson 1998). Die Feststoffvolumen ergeben sich aus Aufzeichnungen (Stoffel 2010) oder aus der Quantifizierung von Ablagerungen (van Steijn 1996; Helsen et al. 2002).

Im Zuge einer Wahrscheinlichkeitsanalyse wird ein statistischer Zusammenhang zwischen Frequenz und Magnitude hergestellt. Dabei werden die Ereignisse nach Stärke unterteilt und Häufigkeitskurven erstellt. Diese werden mit Verteilungsfunktionen angepasst und extrapoliert. Bei Naturgefahren bedient man sich häufig Normalverteilungen, Log-Normal-, Gumbel-, Weibull- oder Jenkinson A-Verteilungen. Als Ergebnis erhält man statistisch ermittelte Wiederkehrintervalle der Intensitäten (Hollenstein 1997, in Markau 2003).

Im Allgemeinen sind die Datenreihen aus historischen Aufzeichnungen kurz, und vor allem in Bezug auf Angaben zur Magnitude sehr spärlich und nicht ausreichend für eine statistische Auswertung (van Steijn 1996; Carrara et al. 2003; Marchi und D'Agostino 2004). Auch zeigt die Erfahrung, dass historische Quellen selektiv und subjektiv sind: Sie beschränken sich oft auf Ereignisse, in denen Verluste zu verzeichnen sind, und die Erinnerung an jüngere und katastrophale Ereignisse ist frischer (Jakob 2005).

Daneben spielt bei Murgängen die Geschiebeverfügbarkeit eine wichtige Rolle. In Einzugsgebieten, in denen die Verfügbarkeit mobilisierbarer Feststoffen unbegrenzt ist, und darum immer wieder Muren abgehen, können aufgrund der Ereignishäufigkeit theoretisch relativ stabile Frequenz-Volumen-Beziehungen hergestellt werden. Im Gegenzug währt in Einzugsgebieten mit verwitterungsabhängiger und damit begrenzt Geschiebelieferung ("weathering limited") eine gewisse Ruhephase bis zum nächsten Ereignis (vgl. *Alt-* bzw. *Jungschutt*, Kapitel 2.1.4). Das seltene Auftreten macht die Herstellung statistischer Zusammenhänge und damit Voraussagen über Frequenz und Magnitude daher schwierig (Marchi 2005).

2.3.2 Anwendung empirischer Formeln

In diesem Kapitel wird eine Auswahl an empirischen bzw. semi-empirischen Formeln vorgestellt, die aus statistischen Analysen historischer Ereignisse hervorgehen. Die Auswahl konzentriert sich dabei auf Parameter, die für die Gefahrenbeurteilung von Nutzen sind: Reichweite, Gesamtvolumen und Ablagerungsfläche.

Ein sehr einfaches empirisches Modell zur Abschätzung der **Reichweite** stammt von Heim (1932). Er prägte den Begriff der „Fahrböschung“. Synonym wird auch das Konzept des Pauschalgefälles verwendet, das Masseschwerpunkte berücksichtigt. Dieses für alle Arten von Massenbewegungen, vor allem aber für Stürze konzipierte Modell ermittelt den Reibungswinkel $\tan \alpha$ bzw. den pauschalen Widerstand: er ergibt sich aus der gesamten vertikalen Höhendifferenz H und der horizontalen Reichweite vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung, gemessen entlang des Fließweges L_R (Formel 2.3). Das Modell impliziert einen Zusammenhang zwischen der Größe des abgelagerten Volumens und der Reichweite des Ereignisses. Mit Zunahme des Volumens steigt auch die Mobilität, während der Widerstand (die Reibung) abnimmt.

$$\tan \alpha = \frac{H}{L_R}$$

Formel 2.3
Heim 1932

Vom Pauschalgefälle ausgehend entwickelten Corominas (1996) und Rickenmann (1999) Formeln zur Bestimmung der Reichweite. Sie ergeben sich jeweils aus dem Volumen des Murgangs V , multipliziert mit der vertikalen Höhendifferenz H . Corominas' Formel basiert auf 71 Murgängen (Formel 2.4), Rickenmanns auf 150 Murgängen (Formel 2.5).

$$L_R = 1,03V^{0,105} \cdot H$$

Formel 2.4
Corominas 1996

$$L_R = 1,9V^{0,16} \cdot H^{0,83}$$

Formel 2.5
Rickenmann 1999

Bei genauer Bestimmbarkeit des Startpunktes einer Mure erhält man für die Formeln plausible Werte, erst bei sehr großen Reichweiten treten vermehrt Ungenauigkeiten auf. Der Nachteil aus der Anwendung des Pauschalgefälles ergibt sich jedoch daraus, dass der exakte Startpunkt und das Längenprofil des Fließweges bekannt sein müssen. Beispielsweise zeigt sich die Bestimmung des Startpunktes als schwierig, wenn es sich um Muren handelt, die im Gerinne selbst ausgelöst werden oder mehrere Rutschungen zum Murgang beitragen (Rickenmann und Scheidl 2010).

Die **Größe der Ablagerungsfläche** lässt sich mit Hilfe des Ansatzes von Iverson et al. (1998) ableiten. Er fand einen Zusammenhang zwischen dem Volumen und der planimetrischen Ablagerungsfläche. Aus der für 27 Lahare durchgeführten semi-empirischen Untersuchung ergab sich Formel 2.6, in welcher k_B einen konstanten Mobilitätskoeffizient darstellt⁴. Der Ansatz wurde von Crosta et al. (2003) weiterentwickelt. Basierend auf 116 granularen Murgängen in den norditalienischen Alpen leitete er Formel 2.7 ab.

⁴ Die statistische Auswertung der Vulkane in den USA, Kolumbien und den Philippinen ergab einen Koeffizienten von 200.

$$B = k_B \cdot V^{2/3}$$

Formel 2.6
Iverson et al. 1998

$$B = 6,2 \cdot V^{2/3}$$

Formel 2.7
Crosta et al. 2003

Nachdem oben bereits Formeln zur Berechnung der Reichweite von Muren vorgestellt wurden, folgen nun zwei exemplarische Formeln für die Berechnung des **Volumens** von Muren. Sie enthalten jeweils die beiden morphometrischen Parameter *Größe* und *Neigung* eines Einzugsgebietes. Daneben können sie weitere Parameter enthalten.

Kronfellner-Kraus (1985) (Formel 2.8) macht das mobilisierte Volumen (V) von der Fläche (A_d , in km^2), der Neigung (S_c , in %) des EZG und dem von ihm eingeführten Torrentialitätsfaktor (K) abhängig. Die Tatsache berücksichtigend, dass infolge von Zwischenablagerungen nur ein Teil der mitgeführten Feststoffe den Gebietsauslass erreicht, beinhaltet der Faktor für die „torrentiell (wildbachlich) wirksame Abtragshöhe“ neben dem Geschiebe- und Feststoffpotential auch Transport- und Ablagerungsverhältnisse im Einzugsgebiet. Der Faktor setzt sich aus den zwei Größen a und b zusammen (Formel 2.9), wobei Kronfellner-Kraus Werte für verschiedene österreichische Regionen bestimmte. Kleine, steile EZG mit ausgedehnten Geschiebeherden und geringem oder anfälligem Bodenschutz weisen dabei tendentiell hohe Werte auf (z.B. $K = 1500$); große, ausgeräumte und gut bewachsene EZG weisen niedrige Werte auf (z.B. $K = 500$) (Kronfellner-Kraus 1984).

$$V = K \cdot A_d \cdot S_c$$

Formel 2.8
Kronfellner-Kraus 1985

$$K = a/e^{(b \cdot A_d)}$$

Formel 2.9
Kronfeller-Kraus 1985

Bei der semi-empirischen Formel 2.10 von D'Agostino (1996) zur Bestimmung des Murgangvolumens handelt es sich um eine Abwandlung von Kronfellner-Kraus' Formel. Zusätzlich zum Volumen zieht er einen geolithologischen Index (IG) hinzu, womit die vorherrschende Geologie berücksichtigt wird. Die Formel basiert auf der Analyse von 62 Murgängen mittlerer und kleiner Einzugsgebiete im östlichen Teil der Region Trentino (Italien).

$$V = 45 \cdot A_d^{0,9} \cdot S_c^{1,5} \cdot IG$$

Formel 2.10
D'Agostino 1996

Die Vorteile von semi-empirischen Formeln liegen hauptsächlich in ihrer einfachen und schnellen Anwendung (Marchi 2005). Das Ergebnis eines Parameters kann jedoch je nach angewandter Formel sehr unterschiedlich ausfallen. Diese Vorteile bedingen laut Brochot (2002, in Marchi 2004)

aber gleichzeitig Nachteile: Die Wirklichkeit kann durch die Parameter oft nicht genügend ausgedrückt werden. Daneben sind die Daten, die für die Bildung der Formeln erhoben wurden, oft bereits angenähert und nicht homogen. Und schließlich findet man bei der Anwendung empirischer Formeln zwar die Magnitude, jedoch nicht die Frequenz von Prozessen heraus. Da die Entwicklung der Formeln an eine Region geknüpft ist, ist auch die Anwendung auf das entsprechende Gebiet begrenzt (Marchi 2005; Rickenmann 2005).

2.3.3 Geomorphologische Methoden und Laserscanning

Bei geomorphologischen Methoden werden die Volumen von Murgängen durch Felderhebungen geschätzt (Marchi 2005). Da auch beim Laserscanning Volumen aufgrund der natürlichen Geländeformen abgeleitet werden, wird auch diese Methode kurz gestreift.

Einen sehr einfachen Leitfaden zur Abschätzung von mobilisierbaren Feststoffen für österreichische Wildbäche präsentierte Scheuringer (1988). Detailliertere Arbeiten gibt es von Hungr et al. (1984) für Einzugsgebiete in British Columbia, von Spreafico et al. (1999) für schweizerische Wildbäche und von Brochot et al. (2002, in Marchi 2004) für Einzugsgebiete in den französischen Alpen. Die Volumenschätzungen der drei letztgenannten Autoren erfolgen entlang homogener Gerinneabschnitte, wobei Richtwerte für erodierbares Volumen vorgeschlagen werden. Die Richtwerte hängen von der Stabilität des Bachbetts und der Böschung sowie von Ablagerungen im Gerinne ab. Genauere Ausführungen dazu finden sich in Kapitel 5.1.3.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Degetto et al. (2001). Neben Lokalausgangspunkten sollen zusätzlich auch hydrologische und hydraulische Überlegungen in die Analysen einbezogen werden, um die während eines Ereignisses potentiell erodier- und transportierbaren Feststoffe abzuschätzen. Ausgehend von der Annahme, dass einem Gerinneabschnitt auch *mehrere* Sedimentquellen (Erosionsflächen) zugewiesen werden können, werden im Vergleich zu den vorher genannten Studien nicht homogene Gerinneabschnitte, sondern homogene Sedimentquellen identifiziert. Diese sollen durch gleiche litho-morphologische und geotechnische Charakteristiken und Prozessphänomene (Erosion, Ablagerung) abgegrenzt werden.

Zur Umsetzung geomorphologischer Methoden gibt es mittlerweile eine Software, die an der Universität in Bern entwickelt wurde. Die Software SEDEX (SEDiments and EXperts) wird in Kombination mit Geländeformularen angewandt und soll vor allem die digitale Erfassung und Darstellung bereits während der Aufnahme ermöglichen. Auch in diesem Verfahren werden homogene Bach-Abschnitte gebildet, wobei die Schätzung des Geschiebes getrennt für das Gerinne, die Böschung und den Hang erfolgt. Neu ist hier vor allem die Definition von Szenarien, wie sie für Gefah-

renzonierungen üblich sind. Ausgehend von einem Grundszenario (üblicherweise ein 100-jährliches Ereignis) werden durch die Einschätzung Aktivierbarkeit über Stabilität, Material und Prozessspuren andere Szenarien (30-jährliches, 300-jährliches Ereignis) hergeleitet (Frick et al. 2011).

Vorteile aus den geomorphologischen Methoden ergeben sich ohne Zweifel aus der flexiblen Anwendung, die im Vergleich zur Feststoffbestimmung durch empirische Formeln auch die Berücksichtigung der lokalen Situation ermöglicht. Zudem erfordern diese Methoden keine dokumentierten historischen Ereignisse, womit die Anwendung auch in Regionen möglich ist, wo derartige Daten fehlen. Allerdings ist bei der Beurteilung der Feststoffquellen eine gewisse Subjektivität durch den Bearbeiter zu beachten, die der Reproduzierbarkeit der Schätzwerte Grenzen setzt (Degetto et al. 2001).

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung von Feststoffvolumen ist das Laserscanning. Dabei wird die Geländeoberfläche entweder durch flugzeuggestütztes Laserscanning (Airborne Laserscanning, ALS) oder durch terrestrisches Laserscanning (TLS) abgetastet und somit ein Höhenmodell erstellt. Durch den Vorher-Nachher-Vergleich der Geländeoberfläche können Erosionsvolumen für ein bestimmtes Ereignis gemessen werden. Beispiele für die Methode finden sich in den Arbeiten von Du und Teng (2007), Scheidl et al. (2008) und Bremer und Sass (2012). Die Ergebnisse der Oberflächenvergleiche zeichnen sich durch hohe Genauigkeit aus, die Methode ist jedoch nur für die Rekonstruktion eines individuellen Ereignisses geeignet.

2.4 Abfluss- und Geschiebetransportabschätzung

Nachdem in Kapitel 2.3 Methoden zur Abschätzung der Ereignisstärke vorgestellt wurden, wird nun die zeitliche und räumliche Verteilung des Geschiebetransportes betrachtet. Zuerst wird ein Überblick über die Modelle in der Hydrologie gegeben (Kapitel 2.4.1) und danach wird die Transformation von Niederschlag in Abfluss beschrieben (Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Modelltypen in der Hydrologie

Modelle sind Vereinfachungen der Wirklichkeit, die es erlauben, empirische Phänomene vereinfacht und damit verständlicher darzustellen (Bailer-Jones 2002). Bezogen auf die Hydrologie werden die "empirischen Phänomene" Niederschlag und Abfluss beschrieben: "Ein hydrologisches Modell ist die mathematische Repräsentation der Bewegung des Wassers und seiner Inhaltsstoffe auf einem Teil der Erdoberfläche oder im Untergrund." (Maidment 1993, in Fürst 2004).

Dabei weisen Modelle drei wesentliche Charakteristika auf: Sie zeugen von Ungenauigkeit, Inkonsistenz und Aspekthaftigkeit. Die empirische Wirklichkeit wird anhand von Annäherungen und Vereinfachungen und damit nur ungenau beschrieben (Aspekt der Ungenauigkeit). Im Zuge der Vereinfachung werden für das Modell gültige Annahmen getroffen, die durchaus im Widerspruch zu anerkannten Prinzipien, Tatsachen oder anderen Modellen stehen können (Inkonsistenz). Unter Aspekthaftigkeit versteht man, dass die meisten Modelle keine vollständige Beschreibung eines Phänomens wiedergeben, sondern nur einzelne Teile oder Teilprozesse erklären (Bailer-Jones 2002). Die Komplexität eines Modells sollte schließlich so hoch sein, dass es einerseits einfach genug ist, um Zusammenhänge deutlich zu machen, andererseits sollen alle wesentlichen Komponenten berücksichtigt werden (Anderson und Burt 1985).

Für die Wasserwirtschaft können Modelle in vielerlei Hinsicht von Nutzen sein. Neben der Vorhersage des Abflusses interessiert zum Beispiel die Dimensionierung von Wasserspeichern und von Wasserkraftwerken (Anderson und Burt 1985; Maniak 2005).

Hydrologische Modelle werden heute durchwegs als **mathematische Modelle** konzipiert (Maniak 2005), womit natürliche Phänomene durch ein Gleichungssystem abgebildet werden. Unterschieden werden hierbei *analytische* Lösungsverfahren (z.B. das Gesetz der Grundwasserströmung von Darcy oder die St.-Venant-Gleichung für den instationären Abfluss) und *numerische* (rechnergestützte) Lösungsverfahren; wobei nur letztere die räumliche Variabilität berücksichtigen können. Durch den Einsatz von leistungsstarken Rechnern und Geographischen Informationssystemen werden Genauigkeit und praktische Anwendung laufend verbessert (Fürst 2004).

Hydrologische Modelle werden nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert. Grundlegend ist nach Beven (2012) allenfalls die Unterscheidung "lumped" / "distributed" und "deterministic" / "stochastic". Konzentrierte Modelle ("**Lumped** models") betrachten das untersuchte Einzugsgebiet als einzelne Einheit, womit dessen Eigenschaften als Mittelwerte und damit pauschal zusammengefasst dargestellt werden (z.B. durch einen durchschnittlichen Rauigkeitsbeiwert für einen Untersuchungsabschnitt) (Maniak 2005; Beven 2012). Eine differenziertere Ausführung gewinnt man mit detaillierten Modellen ("**distributed** models"). Das Einzugsgebiet wird hierbei zweckmäßig in Rasterzellen aufgeteilt: Jede Zelle wird durch individuelle Parameter definiert (Topographie, Geologie, Landnutzungen) und die Berechnung der Gleichungen erfolgt für jede Zelle einzeln (Maniak 2005; Beven 2012). Die in der Arbeit verwendeten Modelle HyGrid2k2 und FLO-2D basieren auf diesem Ansatz (Kapitel 5.2 bzw. Kapitel 5.3).

Stochastische (statistische) Modelle verarbeiten Daten, die als Zufallsereignisse betrachtet werden und damit eine Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweisen (z.B. historische Hochwässer) (Dyck und Peschke 1995). Mit Hilfe statistischer Methoden (Regression, Inter- und Extrapolation)

erhält man hypothetische ("typische") Ergebnisse, die nicht mit einem speziellen Ereignis identisch zu sein brauchen. Statistische Modelle werden insbesondere dann eingesetzt, wenn die Daten schwer überschaubar und schwer erhebbar sind. Gleichzeitig müssen für eine wahrscheinlichkeitstheoretische Analyse langjährige und umfangreiche Aufzeichnungen vorliegen (Maniak 2005). **Deterministische** (parametrische) Modelle hingegen beschreiben direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen und erlauben nur *ein* Ergebnis. Niederschlag-Abfluss Modelle – wie auch das in der Arbeit angewandte Modell HyGrid2k2 – sind meistens deterministischer Natur (Beven 2012): aus einem Niederschlagsereignis wird die entsprechende Abflussganglinie abgeleitet.

Deterministische Modelle können weiter unterteilt werden nach dem Grad der Systembeschreibung: in Black Box-, Grey Box- und White Box- Modelle. **Black Box-Modelle** beschreiben die Vorgänge im Einzugsgebiet durch mathematische bzw. *empirische* Modelle. Diese berücksichtigen physikalische Grundlagen nur implizit. Beispiele sind das Einheitsganglinienverfahren, Extremwertstatistik und Regressionsanalysen (Anderson und Burt 1985; Maniak 2005). **Grey Box-Modelle** bilden die Grundgleichungen der Hydro- und Thermodynamik in vereinfachter Form ab und enthalten ein geringes Maß an Empirie. Häufig sind diese Modelle "lumped models", sie setzen sich aus mehreren gekoppelten Speichern mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammen. Ihre wenigen Modellparameter stellen Mittelwerte für das gesamte EZG dar. Ein Beispiel dafür sind Flussgebietsmodelle (Maniak 2005). **White Box-Modelle** sind *physikalische* Modelle. Sie beschreiben die Wasserbewegung mit den drei Prinzipien Masse-, Impuls- und Energieerhaltung (Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung). Aufgrund des enormen Daten- und Rechenaufwands werden physikalische Modelle üblicherweise zur Simulation einzelner Elemente des Wasserkreislaufs oder für einzelne Gebietsabschnitte eingesetzt (Makroebene) (Maniak 2005). Das in der Arbeit angewandte Modell FLO-2D gehört dieser Gruppe an.

2.4.2 Der Abflussprozess und seine Modellierung

Grundsätzlich kann Wasser *auf* und *unter* der Oberfläche abfließen. Oberflächenabfluss kommt einerseits als gesättigter Oberflächenabfluss, andererseits als Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationshemmnissen vor. Wenn der Boden zu Beginn des Niederschlags wassergesättigt ist und kein zusätzliches Wasser aufnehmen kann, spricht man von **Sättigungsabfluss** (Ahnert 2003). Diese Art von Abflussprozess findet man häufig auf flachgründigen oder feucht-nassen Böden mit geringem Speichervermögen (BWG 2003). Ist der Boden dagegen nicht wassergesättigt, die Rate des Niederschlags (mm pro Zeiteinheit) jedoch größer als die mögliche Infiltrationsrate (mm pro Zeiteinheit) in die oberste Bodenschicht, fließt das überschüssige Wasser als „**Hortonian Overland**

Flow“ ab. Dieses Phänomen tritt vor allem auf Böden und Oberflächen auf, die verdichtet oder wasserabstoßend sind (Ahnert 2003; BWG 2003).

Abfluss im Boden tritt auf, wenn Wasser durch gut durchlässige Bodenschichten auf eine Stauschicht stößt oder die Makroporen ein laterales Fließen ermöglichen. Dieser als **Zwischen- oder hypodermischer Abfluss** bekannte Prozess speist letztendlich das Grundwasser, das verzögert als **Basisabfluss** die Oberflächengewässer erreicht (Dyck und Peschke 1995).

Im Zuge einer Gefahrenbeurteilung wird der Abfluss eines Wildbaches idealerweise aus Pegelmessungen gewonnen. Liegen keine derartigen Daten vor, können sie aus der Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss abgeleitet werden. Die Transformation des Niederschlags in den Abfluss erfolgt in drei Phasen (Dyck und Peschke 1995): Abflussbildung, Abflusskonzentration und Durchflussverlauf. Im Folgenden werden die Phasen im Einzelnen beschrieben sowie Möglichkeiten der Modellierung aufgezeigt.

Abflussbildung (Landphase)

In der ersten Phase geht es darum, den Niederschlag in den abflusswirksamen Anteil (Effektivniederschlag, Direktabfluss) und in den Gebietsrückhalt aufzuteilen. Von der Vegetation aufgefangenes Niederschlagswasser verdunstet entweder oder erreicht den Boden verzögert (Interzeption). Dieser Anteil wird also zwischengespeichert und ist für den Direktabfluss nicht relevant. Dasselbe gilt für den Muldenrückhalt, jener Wasseranteil, der sich in kleinen Vertiefungen sammelt. Zieht man diese sogenannten **Anfangsverluste (I_a)** vom **Gesamtniederschlag (P)** ab, so verbleibt der **Nettoniederschlag (P_n)**, also der Anteil, der den Boden erreicht. Neben den Anfangsverlusten gibt es **Infiltrationsverluste (F)**. Das sind jene Wassermengen, die in den Boden einsickern, wobei diese Mengen von der Bodenbeschaffenheit, von der Pflanzenbedeckung und von der Feuchte des Bodens abhängen (spezifisches Aufnahmevolumen) (Dyck und Peschke 1995; Cazorzi 2002). Alle Verluste in diesem Kreislauf (Anfangsverluste und Infiltration) werden als **Gebietsrückhalt (S)** zusammengefasst, diese haben keinen Einfluss auf die Hochwasserganglinie (siehe auch Kapitel 5.2.1). Die Interzeption wird maßgeblich von meteorologischen Faktoren bestimmt. Hohe Niederschlags- und Windintensitäten etwa schmälern die rückhaltende Wirkung der Blätter. Die Muldenverluste fallen bei stark geneigten Einzugsgebieten ebenfalls sehr gering aus, womit die Infiltration den größten Teil des Gebietsrückhalts ausmacht (Dyck und Peschke 1995).

Methodisch kann das Verhältnis von Direktabfluss und Gebietsrückhalt mit verschiedenen Verfahren bestimmt werden. Beim Abflussbeiwertverfahren wird durch die Gegenüberstellung von Direktabfluss und Niederschlagsmenge ein Beiwert ermittelt. Daneben gibt es Infiltrationsindizes zur Beziehung zwischen Infiltrationsintensität und -vermögen (Dyck und Peschke 1995; Maniak

2005). In der vorliegenden Arbeit wird die Abflussbildung mit Hilfe des SCS-Verfahren ermittelt, einer auf Funktionalbeziehungen zwischen Niederschlag und Abfluss beruhenden Methode (Kapitel 5.2.1).

Abflusskonzentration (Flussbettphase)

Wenn bekannt ist, welcher Teil des Niederschlags zum Abfluss kommt, stellt sich die Frage, in welcher zeitlichen Verteilung der Abfluss am Auslassquerschnitt erscheint. Das Ergebnis der zweiten Phase ist somit die Abflussganglinie (Abbildung 2.4). Bei der Abflusskonzentration lassen sich mehrere charakteristische Fließzeiten unterscheiden, die im Allgemeinen von der zurückgelegten Distanz, dem Gefälle und der Rauigkeit im EZG abhängen. Zum einen gibt es die **Verzögerungszeit** t_v (lag time), sie stellt den "Zeitabstand zwischen den Schwerpunkten von Effektivniederschlag und Direktabfluss" dar. Eine zweite repräsentative Zeit ist die **Konzentrationszeit** t_c . Sie kommt "bei einem gleichmäßig überregneten Gebiet, das als Ganzes zum Abfluss beiträgt" der Fließzeit bei, "die ein Wasserteilchen benötigt, um vom äußersten Punkt der Wasserscheide bis zum Gebietsauslass zu kommen". Gleichzeitig ist dies die Zeit vom Niederschlagsbeginn bis zum Zeitpunkt, wo "der gesamte effektive Niederschlag den Gebietsauslass erreicht" (Maniak 2005).

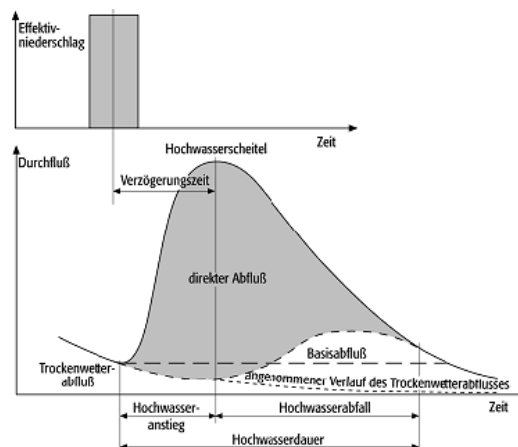


Abbildung 2.4: Abflussganglinie und charakteristische Fließzeiten (Geo Data Zone 2011)

Die Ermittlung der Ganglinie erfolgt über einfache Ansätze wie dem Einheitganglinienverfahren (Maniak 2005) oder linearen Speichermodellen (Einzellinearspeicher, Speicherkaskade). Daneben gibt es die Isochronenmethode (Zeit-Flächen-Diagramm) und kombinierte Translations- und Speichermodelle (Dyck und Peschke 1995; Maniak 2005).

Durchflussverlauf (Wellenabflachungsphase)

Die dritte Phase beschreibt die zeitliche Verschiebung des Abflusses (Translation) und die Abflachung der Ganglinie am Pegel. Die Berechnung des Wellenablaufs, auch „Flood Routing“ genannt, ist vor allem bei möglicher Ausuferung in Überschwemmungsgebieten oder beim Durchfließen von

Speichern von Interesse (Maniak 2005). Der Ablauf von Hochwasserwellen ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt. Die Abflusswelle am Pegel A wird im Längsquerschnitt über den Pegel B bis zum Pegel C allmählich abgeflacht, wobei sich die Scheiteldurchflüsse verkleinern ($Q_{SA} > Q_{SB} > Q_{SC}$), die Durchlaufzeiten hingegen verlängern ($t_{gA} < t_{gB} < t_{gC}$) und die Hochwassersummen zwischen den Pegeln annähernd gleich bleiben ($SQ_A \approx SQ_B \approx SQ_C$) (Dyck und Peschke 1995).

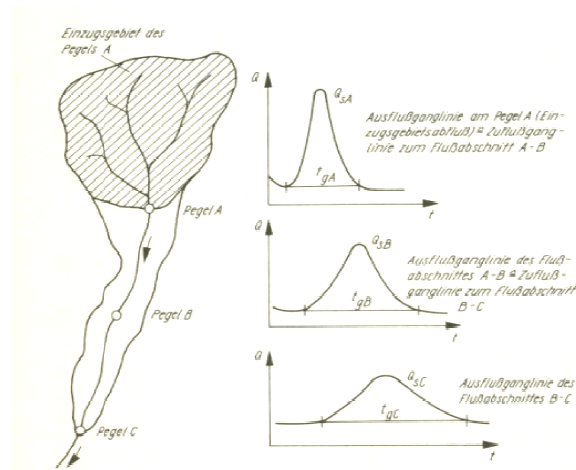


Abbildung 2.5: Hochwasserwellenablauf (Dyck und Peschke 1995)

Die Wasserbewegung im Gewässerbett kann allgemein als eindimensionaler, instationärer (dynamischer) Strömungsprozess verstanden werden, d.h. die mittlere Fließgeschwindigkeit und die Wassertiefe ändern sich im Verlauf der Zeit an jeder Stelle des Gewässers. Darstellen lässt sich die Wellenbewegung mit der St.Venant-Gleichung, einem hydrodynamischen Modell (Abbildung 5.9, Kapitel 5.3). In dieses ist einerseits die Dynamische Grundgleichung (Bewegungsgleichung) für die Energiebilanz, andererseits die Kontinuitätsgleichung zur Berücksichtigung der Massenbilanz integriert (Zufluss – Abfluss = Rückhalt). Zudem wirken Schwerkraft und Reibungskräfte (z.B. ausgedrückt durch die Manning-Gleichung). Im Zuge einer Modellsimulation wird die Dynamische Grundgleichung je zwischen zwei benachbarten Querschnitten gelöst (Dyck und Peschke 1995; Maniak 2005).

Da hydraulische Berechnungsverfahren umfangreiche Profildaten erfordern und außerdem je nach Auflösung und Größe des Gebietsausschnittes hohe Berechnungszeiten anfallen, kann neben den reduzierten hydrodynamischen Modellen (Diffusionswellenansatz bzw. kinematischer Wellenansatz) auch auf konzeptionelle Verfahren zurückgegriffen werden. Diese berücksichtigen wenig physikalisch begründbare Parameter. Beispiele sind das Muskingum-Verfahren oder Kalinin-Miljukov-Verfahren (Dyck und Peschke 1995).

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit umfasst sieben Wildbäche am Nordhang des Langtaufertals in Südtirol (Norditalien) (Abbildung 3.1). Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die naturräumlichen Gegebenheiten, die Besiedlung und die Landnutzung.

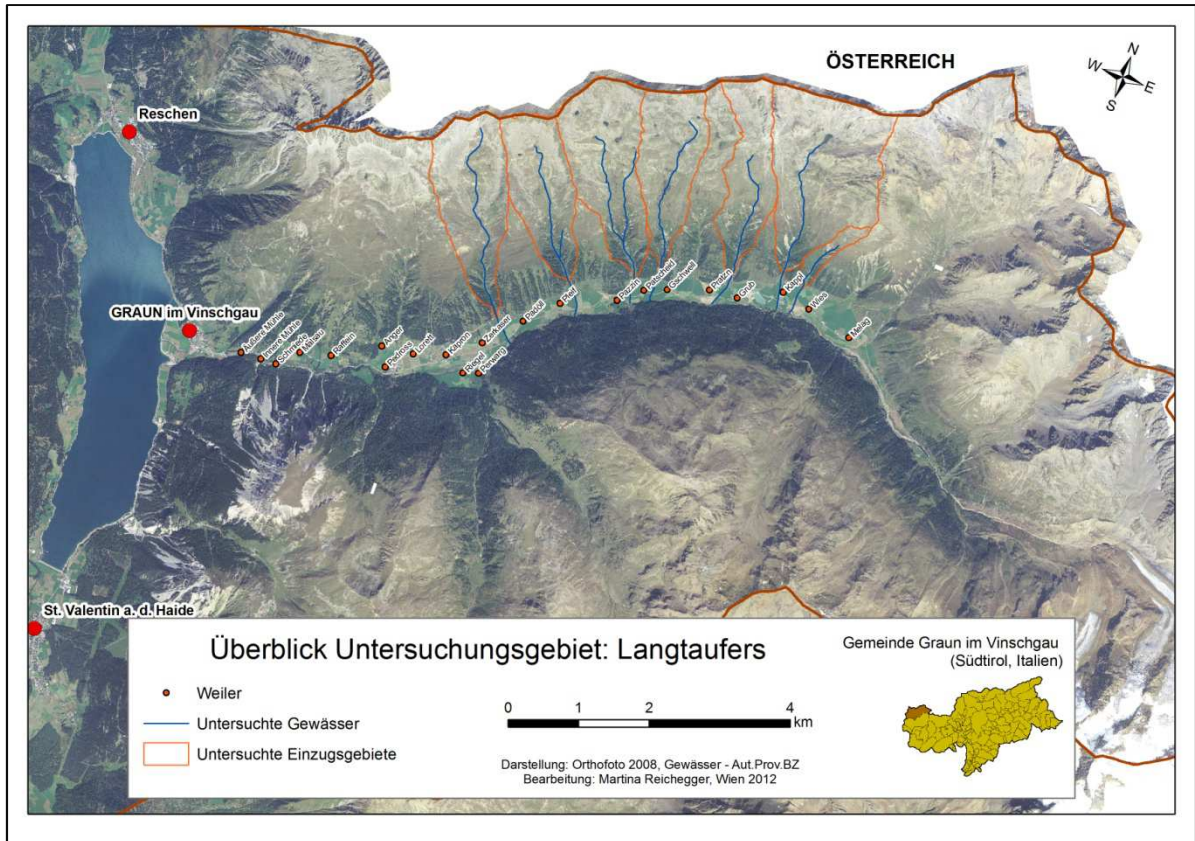


Abbildung 3.1: Überblick über das Untersuchungsgebiet

3.1 Geographische Lage

Langtaufers ist eine Fraktion der Gemeinde Graun im Vinschgau. Das gleichnamige Tal verläuft in ost-nord-östlicher Richtung, nach einem Knick nach Südosten und endet mit den Gletschern der Öztaler Alpen (Weißkugel, Weißsee-Spitze, Langtauferer Ferner). Es wird vom Karlinbach entwässert, der bei Graun in den Reschensee mündet. In den 20 Weilern des Tals leben 446 Menschen (Stand Volkszählung 2001) (Homepage der Gemeinde Graun i.V. o. J.). Die Weiler liegen zwischen 1.650 (Malsau) und 1.919 Höhenmetern (Melag). Da ein Viertel der Dauersiedlungen oberhalb von 1.800 m Meereshöhe liegt, gilt das Langtaufertal als einzigartiges Hochtal in den Ostalpen (Hohenegger 1969).

3.2 Klima

Das Klima im Langtaufertal wird maßgeblich durch seinen Gebirgscharakter bestimmt. Dies bedeutet grundsätzlich, dass die Temperaturen mit der Höhe abnehmen und die Niederschläge zunehmen. Die vermeintlich hohen Niederschläge treffen für das Langtaufertal jedoch nicht ganz zu, denn Südtirol liegt im Zentrum der Alpen, und die umgebenden Gebirgszüge (Alpenhauptkamm im Norden, Cevedale- und Adamellogruppe im Westen und Dolomiten im Osten) schirmen die Provinz weitgehend von den großen atmosphärischen Zirkulationen in Europa und damit auch von feuchten Strömungen ab. Deshalb gilt die Provinz im alpenweiten Durchschnitt als eine trockene Region. Besonders der Vinschgau gehört zu den trockensten Regionen in den Alpen (Aut. Prov. BZ 2010). Der Alpenhauptkamm schützt das Tal zusätzlich vor den im Etschtal wehenden "Oberwinden" (Nordwinden) (Hohenegger 1969).

Nach Köppen kann der Region ein boreales Klima vom Typ *Df* zugeordnet werden. *D* steht dabei für eine mittlere Monatstemperatur kälter als -3°C im kältesten Monat und von über 10°C im wärmsten Monat; *f* bedeutet, dass der Niederschlag sich auf das ganze Jahr verteilt (Aut. Prov. BZ 2010). Tatsächlich weist die Klimastation in Melag zwischen 1980 und 2000 im Dezember einen mittleren Wert von $-5,2^{\circ}\text{C}$ auf, die Klimastation in St.Valentin auf der Haide nahe des Taleinganges im Jänner mittlere $4,3^{\circ}\text{C}$ und im durchschnittlich wärmsten Sommermonat jeweils mehr als 10°C . Der stärkere Temperaturabfall am Ende des Sommers weist auf den kontinentalen Einfluss hin (Abbildung 3.2). Das inneralpine Klima bewirkt Niederschlagsmaxima im Sommer (Gewitter) und -minima im Winter. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt für Melag 801 mm, für St.Valentin auf der Haide 606 mm (Zeitraum 1980-2000) (UIBK 2012). Fliri (1975) erwähnt für die Station Hinterkirch (Kappl) einen mittleren jährlichen Niederschlag von 635 mm.

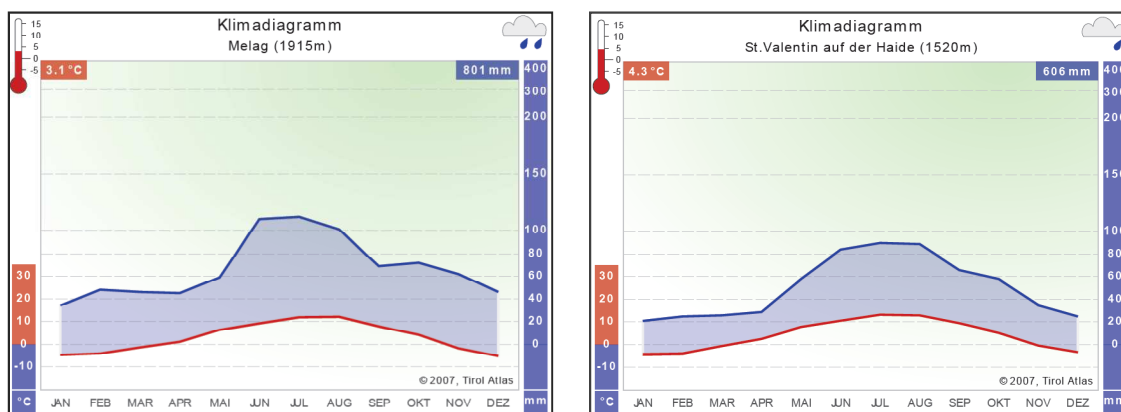


Abbildung 3.2: Klimadiagramme Melag (1.915 m s.l.m.) und St.Valentin auf der Haide (1.520 m s.l.m.) (UIBK 2012)

3.3 Geomorphologie und Geologie

Das Langtauerertal ist als klassisches glaziales Trogtal ausgebildet (Abbildung 3.3). Die übersteilen Hänge gehen in ausgeprägte Trogschultern über, die möglicherweise Reste eines voreiszeitlichen, tertiären Talbodens sind. Darüber, am Kamm entlang, finden sich einzelne Karbildungen, die teilweise von Blockmoränen durchzogen und mit Schutt wieder aufgefüllt sind. Als Einzelformen findet man, dem Talursprung entsprechend, glaziale und periglaziale Ausbildungen. Endmoränen und Moränenwälle zeugen von Gletscherständen der letzten Eiszeit (Würmglazial, bis vor ca. 10.000 Jahren). Beispiele periglazialen Ursprungs sind Blockgletscher bzw. durch Gelifluktion bewegte Schuttströme (siehe Kapitel 6.1.2). Im Bereich des Talbodens fallen die großen und kleinen Schuttkegel auf, die durch lokale Murenabgänge entstanden und fruchtbaren, besiedlungsfähigen Boden schufen (Fischer 1965; Hohenegger 1969; Raffeiner 2010).

Das Tal gehört geologisch dem Altkristallin der Ostalpen an, seine Gipfel haben Anteil am Ötztal-Stubai-Komplex. Lithologisch besteht das Ötztal-Stubai-Kristallin hauptsächlich aus Metamorphiten: am nördlichen Taleingang aus Tonalitgneisen, weiter im Talinnern dominieren Schiefer- und Augengneise. Eine geologische Ausnahme bildet der südlich des Taleingangs gelegene Jaggl (Endknopf), der aus Wettersteinkalk mit einer Decke aus Raiblerschichten besteht (Hammer 1911; Hohenegger 1969). Das Altkristallin des Ötztal-Stubai-Komplexes weist eine polymetamorphe Entstehung auf, d.h. die heutigen Gesteine unterliegen mitunter drei Morphoseereignissen. Das älteste von ihnen ist das kaledonische Ereignis (Präkambrium, Altpaläozoikum), wodurch sich lokal (z.B. im vorderen Ötztal und im Bereich des Reschenpasses) Migmatite bildeten. Das zweite Ereignis ist die variszische Metamorphose des Jungpaläozoikums, die in allen Einheiten eine Veränderung der Gesteine bewirkt hat. Zugleich erfolgte auch eine intensive Schieferung und Faltung. Das dritte Ereignis ist die alpine Metamorphose in der Oberkreide (eo-alpine Phase) und im Tertiär (neo-alpine Phase, lokal begrenzt). Die Gebirgsbildungsphasen schufen schließlich aus den ursprünglich metamorphen sandigen bis tonigen Sedimenten das heute vorherrschende Festgestein der Paragneise und Glimmerschiefer, darunter mischen sich Orthogneise, Amphibolite und Eklogite (Stingl und Mair 2005).

Neben diesen Festgesteinen finden sich in der Geologischen Karte außerdem die sie überlagernden Produkte der jüngsten erdgeschichtlichen Zeit, dem Quartär (Abbildung A.1 im Anhang). Das Quartär umfasst die vergangenen 2,6 Mio. Jahre und damit die gesamte letzte Eiszeit. Die Gebilde des Pleistozän und auch des Holozän zeigen sich als Moränenkörper, Periglazialformen, fluviale Ablagerungen (Alluvionen und Schwemmfächer) und Verwitterungsprodukte (Hangschutt und Schuttkegel). Die Verwitterung wirkt dabei unterschiedlich stark. Die leicht verwitterbaren Schiefergneise werden schnell in dünne Platten zerlegt und liefern damit reichlich Schutt vor Ort. Ent-

sprechend rasch bilden sich auf diesem Untergrund runde, sanfte Geländeformen, wohingegen die Karbonatfelsen (Jaggl) schroffe Konturen bilden (Raffener 2010). Relativ verwitterungsstabil sind Tonalitgneise und Amphibolite, die als Felsstufen im Gelände hervortreten (Hammer 1911; Hohenegger 1969).



Abbildung 3.3: Das Langtaufertal, talauswärts: Melag, Wies, Kappl, Grub (eigene Aufnahme)

3.4 Besiedlung und Landnutzung

Die Siedlungen im Langtaufertal bestehen nur aus kleinen Weilern und einzelnen Gehöften. Talwärts aufgeführt sind dies *Äußere Mühle, Innere Mühle, Schmiede, Malsau, Raffein, Pedross, Loret, Angerhof, Kapron, Perwarg, Riegl, Zerkaser, Padöll, Pleif, Pazzin, Patscheid, Gschwell, Pratzn, Grub, Kappl / Hinterkirch, Wies und Melag* (Abbildung 3.1). Die Weiler liegen an den Rändern oder zwischen den einzelnen Schuttkegeln. Der Beginn der Besiedlung im Tal ist unbekannt, jedoch zeugen die teils rätoromanischen Namen von früher Nutzung. Vermutlich wurden die Almen ab dem 12. Jahrhundert durch die Marktgenossenschaft Mals bewirtschaftet, die dauerhafte Besiedlung vollzog sich wohl erst Ende des 13. Jahrhunderts, die ersten Urkunden über die landesfürstlichen Viehhöfe stammen jedenfalls aus dem Jahr 1317. Durch fortgesetzte Erbteilungen entwickelten sich aus den anfänglichen Schwaighöfen (Einzelhöfen) die Kleinsiedlungen. Als erste Siedler gelten vor allem die Walliser, die den Ruf guter Viehzüchter hatten. Neben der Züchtung von Galtvieh, Schafen, Ziegen und Kühen wurden schon seit jeher Felder bestellt. Durch die windgeschützte und sonnenreiche Lage des Tals gedeihen Kartoffeln und Getreide – trotz seiner Höhe (Hohenegger 1969). Überdies wird seit Anfang der 1960er Jahre die Wasserkraft des Karlinbachs und seiner Zu-

bringer genutzt. Zusammen mit dem Speicherbecken von Melag, das in abflussarmen Zeiten eine möglichst gleichmäßige Abflussmenge gewährleisten soll, produziert das Kraftwerk Graun durchschnittlich ca. 41.000.000 kWh pro Jahr (HYDROS GmbH/srl 2010). Die jahrhundertlange Weide- und Holznutzung, vor allem am Sonnenhang des Tals, haben die dort verbreiteten Lärchenwälder nach und nach zurückgedrängt, so dass die Bestände zumeist schütter und überaltert sind, abgesehen von einzelnen wiederaufgeforsteten Flächen. Demgegenüber findet man auf der Schattenseite große geschlossene Waldbestände von Fichten und Lärchen, und im inneren Talbereich und oberhalb von 1.800 m s.l.m. Zirben und Lärchen. Die aktuelle Waldgrenze liegt im Bereich des Hangknicks auf 2.200 m s.l.m., die Baumgrenze reicht etwa 200 m höher (Hohenegger 1969).

4 Datengrundlage

Dieses Kapitel beinhaltet die Beschreibung der für die Analysen verwendeten extern bezogenen Daten. Auf selbst erhobenen Daten (Abfluss- und Geschiebeschätzung) baut die Gefährdungsmodellierung auf (Kapitel 6.1 und 6.2).

Die meisten für die Analysen erforderlichen Daten wurden vom Amt für Wasserschutzbauten (Abteilung 30) der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol zur Verfügung gestellt: Geodaten (Geländemodell, Orthofoto, Geologie, Realnutzung, Gewässernetz und Blockgletscher) sowie Auszüge aus dem Bautenkataster, Auszüge aus der Ereignisdatenbank und Niederschlagsdaten (Kapitel 4.1 – 4.9). Die Vermessung der Gerinneabschnitte wurde durch die Abenis Alpinexpert GmbH durchgeführt. Alle verwendeten Geodaten sind im UTM-Koordinatensystem „GCS_ETRF_1989“ abgebildet, welches sich auf das Referenzellipsoid WGS 1984 mit Geodätischem Datum ETRF1989 bezieht. Das Untersuchungsgebiet liegt in der Zone 32N.

4.1 Geländemodell

Grundlage für alle räumlichen Analysen bildet das Höhenmodell (Geländemodell), welches in Südtirol flächendeckend in einer Netzmaschengröße von 2,5 m vorliegt. Das Modell wurde mit einem LiDAR-System (Light Detection and Ranging) erstellt, die Höhenpunkte wurden mittels Laserscan aus der Luft aufgenommen. Laserpunktdichte und Höhengenaugigkeit schwanken dabei leicht je nach Besiedlungsdichte (Aut. Prov. BZ 2012^a).

4.2 Orthofoto

Das Orthofoto ist hauptsächlich als Basis für Kartierungen und Analysen von Nutzen, und für die Verortung von Objekten, etwa im Zuge der Simulation mit der Software FLO-2D (Kapitel 5.3.2). Das Orthofoto wurde im Sommer 2006 durch Flugaufnahmen mit CCD-Kamera erstellt. Dabei entstanden die Endbilder durch so genannte „Abtaststreifen“, womit eine Auflösung von mindestens 0,5 m garantiert wird (Aut. Prov. BZ 2012^b).

4.3 Geologie

Die Daten der Geologie liegen als Shapefile vor und repräsentieren die digitalisierte Form der Geologischen Karte im Maßstab 1:50.000. Sie finden Eingang in die Berechnung des Versickerungs-

vermögens der Böden (CN-Werte, Kapitel 5.2.2) und liefern zudem grundsätzliche Hinweise über die ablaufenden Prozesse. Von den 16 in der Gemeinde Graun befinden sich die folgenden neun Einheiten innerhalb der Einzugsgebiete der untersuchten Bäche (Abbildung A.1 im Anhang):

- Hang- und Verwitterungsschutt
- Gemischte Moräne mit großen Blöcken
- Moräne im Allgemeinen
- Feinkoernige Paragneise; Glimmerschiefer und Gneise mit Muskowit und Granat
- Dioritisch-tonalitische Gneise ("Gsieser Gneis")
- Muskovit-(Biotit-) Granitgneise ("Antholzer Gneis")
- Verschiedene Amphibolite; Eklogite; Peridotite
- Schuttkegel
- Rezente fluviale Sedimente, Alluvionen.

4.4 Realnutzungskarte

Die Realnutzungskarte wurde für Südtirol auf Grundlage der Landeskartographie und Luftbildinterpretation erstellt und liegt landesweit im Maßstab 1:10.000 vor. Sie richtet sich nach dem Klassifikationsschema und der Methodik, wie sie im EU-Projekt CORINE Landcover im Maßstab 1:100.000 europaweit angewendet wurde (Mani et al. 2008). Im Untersuchungsgebiet ist die Landnutzung hauptsächlich für die Zuordnung des Versickerungsvermögens der Böden nützlich (Kapitel 5.2.2). Innerhalb der untersuchten Einzugsgebiete finden sich folgende Klassifikationen (Abbildung A.2 im Anhang):

Bodenbedeckung	Kurzbeschreibung
Fels	An der Oberfläche anstehendes Festgestein
Vegetationsloses Lockermaterial	Alle weitgehend vegetationslosen Lockermaterialflächen; dazu gehören Geröll, Sturzhalden, Gletscherschutt und Erosionsflächen, soweit im Luftbild erkennbar
Stehendes Gewässer	Natürliche oder künstliche Seen
Krummholz und Latschen	Strauchvegetation zusammengesetzt aus Latsche, Grünerle und anderen höheren Sträuchern; einzelne Bäume; Vorkommen v.a. im subalpinen Bereich
Wald	Bestehend aus Nadel- und / oder Laubbäumen, auch in Gesellschaft mit Sträuchern; außerdem auch dem Wald zugehörige Flächen wie Holzlagerplätze, vernässte Zonen, sowie Flächen, die aufgrund von Naturereignissen oder Nutzung zweitweise keine Baumvegetation aufweisen
Bestocktes Grasland	Grasland mit Überschirmungsgrad durch Bäume zwischen 5% und 20%
Grasland	Extensiv (Weide) oder intensiv (Mähwiese) genutztes Grasland, sowie Zwergsträucher (Alpenrose, Wacholder, Vaccinien, usw.), mit Ausnahme von höheren Sträuchern und Krummholz
Ackerland	Landwirtschaftlich kultivierte, also regelmäßig gepflügte bzw. saisonal brachliegende, meist im Fruchtwechsel bewirtschaftete Flächen und landwirtschaftlich intensiv genutztes Grünland
Hecken und Flurgehölze	Höhere Sträucher vorwiegend entlang von Gewässern, an Waldrändern und in Fluren
Einzelhaus, Streusiedlung	Siedlungen außerhalb von Ortschaften ohne erkennbaren Siedlungsverband
Kleinsiedlung	Locker bebaute Bereiche ländlichen Charakters
Straßen und Zubehörfächen	Zubehörfächen wie z.B. Autobahnraststätten, Tankstellen, Parkplätze, Böschungen

Tabelle 4.1: Klassen der Realnutzung (Autonome Provinz Bozen - Südtirol)

4.5 Gewässernetz

In Südtirol wird jedes Fließgewässer durch eine Objektidentifikation (ObjektID) gekennzeichnet, welche sich aus den Vorflutern des Baches und einer fortlaufenden Nummer zusammensetzt. Für den Kapplerbach wäre dies z.B. die ObjektID „A.505.85“: der Buchstabe A definiert den übergeordneten Vorfluter Etsch, die Zahl 505 den Vorfluter Karlinbach und die Nummer 85 steht für den Kapplerbach. Das Gewässernetz dient hauptsächlich als Kartierhilfe und für den Vergleich des synthetischen Gewässernetzes (Kapitel 5.2.2).

4.6 Blockgletscher

Für die Geomorphologische Kartierung (Kapitel 5.1.2) wurden die Blockgletscher aus einem Shapefile übernommen. Es handelt sich dabei um einen Zusammenschnitt aus mehreren Quellen, u.a. eine Studie der Universität München (Institut für Geographie 1992) und das Projekt CARG (Carta Geologica d'Italia 1:50.000). Unter den kartierten Blockgletschern werden aktive, inaktive und fossile Blockgletscher unterschieden, die Beurteilung erfolgte teilweise über die Vegetationsbedeckung und die Gletschernähe.

4.7 Bautenkataster

Der Bautenkataster BAUKAT30 ist ein vom Amt für Wasserschutzbauten laufend aktualisiertes Verzeichnis und umfasst alle bestehenden Schutzbauwerke in Wildbächen, Lawenstrichen und an Hängen in Südtirol. In den Wildbächen sind dies Querwerke (u.a. Konsolidierungssperren, Sohl-schwellen), Längswerke (u.a. Stützmauern, Uferschutzmauern, Künetten) und Brücken. Die Bauwerke sind als Geodaten verortet und durch eine Bilddatenbank verknüpft. Außerdem sind ihr Erbauungsjahr, Informationen zum Material, ihre Höhe und ihr baulicher Zustand angeführt (Aut. Prov. BZ 2008). Die bestehenden Schutzbauten spielen bei der Gefahrenanalyse eine wesentliche Rolle, da sie das Schadenpotential vermindern. Jene, die sich im Schadenswirkungsbereich befinden, können in der Gefährdungsmodellierung berücksichtigt werden (Kapitel 5.3.2). Da sie grundsätzlich für 100-jährliche Ereignisse konzipiert werden, dienen sie zudem als Maßstab für die Plausibilitätskontrolle der Simulationsergebnisse.

4.8 Ereignisdokumentation

Ebenso wie vorhandene Schutzbauwerke werden in Südtirol auch historische Ereignisse über Wildbachgeschehen in der Datenbank ED30 des Amtes für Wasserschutzbauten gesammelt und laufend ergänzt. Ältere Ereignisse werden mittels verschiedener Quellen begründet, jüngere Ereignisse werden von beauftragten Technikern unmittelbar nach dem Ereignis dokumentiert. Die amtliche Dokumentation umfasst Wildbach- und Flussereignisse, also Murgänge, Überschwemmungen und Erosionsphänomene. Neben dem informatischen Archiv beinhaltet das Informationssystem gegebenenfalls verfügbare Geodaten sowie die multimediale Dokumentation (Terrestrische Bilder, Luftfotos, Videos). Idealerweise beinhaltet die Dokumentation folgende Mindestanforderungen: Prozessstyp und Kurzbeschreibung des Ereignisses (*Was?*), Ort des Geschehens (*Wo?*), Zeit bzw. Datum (*Wann?*). Daneben liegen im günstigen Fall auch Informationen über mobilisiertes Volumen oder Schäden an Verbauungen, Gebäuden o.ä. vor. Für die Ereignisanalyse in dieser Arbeit stellt die ED30 die wichtigste Informationsquelle dar (Kapitel 5.4).

4.9 Niederschlagsdaten

Die Niederschlagsdaten werden im Zuge der Niederschlag-Abfluss-Modellierung verwendet (CLEM, Kapitel 5.2.2). Sie liegen als Wahrscheinlichkeitskurven für Starkniederschläge vor (CPP = curve di possibilità pluviometrica). Die Kurven beschreiben die Beziehung zwischen maximaler Niederschlagsintensität (in mm) und der Dauer eines Ereignisses (in Stunden), für eine bestimmte Wiederkehrszeit (Abbildung 4.1). Bei den Daten handelt es sich um eine Regionalisierung von Starkniederschlägen unterschiedlicher Dauer (von 15 Minuten bis 24 Stunden) von 24 Messstationen (mindestens 15 Aufzeichnungsjahre). Die Niederschläge wurden statistisch ausgewertet. Das angewandte Wahrscheinlichkeitsmodell ist das GEV (Generalized Extreme Value) von Jenkinson (1955), die Parameterschätzung basiert auf den „L-moments“ von Hosking (1990) (AIDI 2003). Für die Berechnung der maximalen Abflussspitzen sind die beiden Parameter α und n der Formel 5.9 entscheidend, die durch eine Regression geschätzt werden.

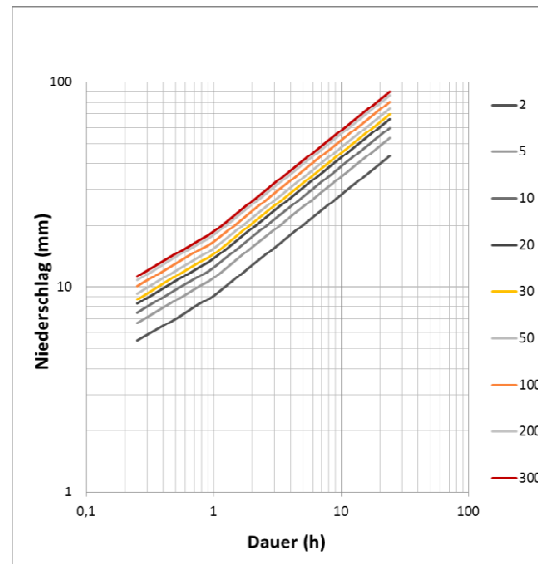


Abbildung 4.1: Wahrscheinlichkeitskurven für Starkniederschläge für mehrere Wiederkehrszeiten (Autonome Provinz Bozen - Südtirol)

4.10 Vermessung

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert, müssen Flächen mit hoher Bearbeitungstiefe möglichst detailliert untersucht werden. Um die Genauigkeit der hydraulischen Simulation zu erhöhen, wurden die Gerinneabschnitte einiger Bäche vermessen. Es sind dies die Kegelbereiche der Bäche Faller, Patzin, Patscheider und Kappler. Die Vermessung erfolgte im Sommer 2010 durch die Abenis Alpinexpert GmbH mit dem Theodolit des Typs Trimble 5600 DR 200+.

5 Methodische Konzeption

Für die Gefahrenmodellierung der Kegelbereiche wurde die Software FLO-2D gewählt (O'Brien et al. 1993), mit der die Gerinnegeometrie und das Feststoff-Wasser-Gemisch der vorangehenden Analysen berücksichtigt werden kann. Da Abflussmessungen im Untersuchungsgebiet fehlen, wurden die Spitzenabflüsse mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell berechnet (HyGrid2k2, Cazorzi 2002). Die Schätzung des maximal mobilisierbaren Geschiebes erfolgte während der Geländeerhebung mit der morphologischen Feldmethode von Hungr et al. (1984) bzw. Spreafico et al. (1999). Die abschließende Validierung wurde anhand der Ereignisdokumentation und anhand bestehender Schutzbauten vorgenommen. Alle Analysen wurden jeweils für die Bemessungsereignisse HQ30, HQ100 und HQ300 durchgeführt.

Die methodische Vorgehensweise ist wie folgt: Zuerst werden die Einzugsgebiete charakterisiert (Kapitel 5.1), im Anschluss werden die verwendeten Modelle HyGrid2k2 (Kapitel 5.2) und FLO-2D (Kapitel 5.3) und die zur Modellierung nötigen Schritte beschrieben und abschließend erfolgt die Validierung in Kapitel 5.4. Die Zusammenhänge zwischen Datenstruktur, Methoden und Ergebnissen werden mit den jeweiligen Kapitelnummern in Abbildung 5.1 verdeutlicht.

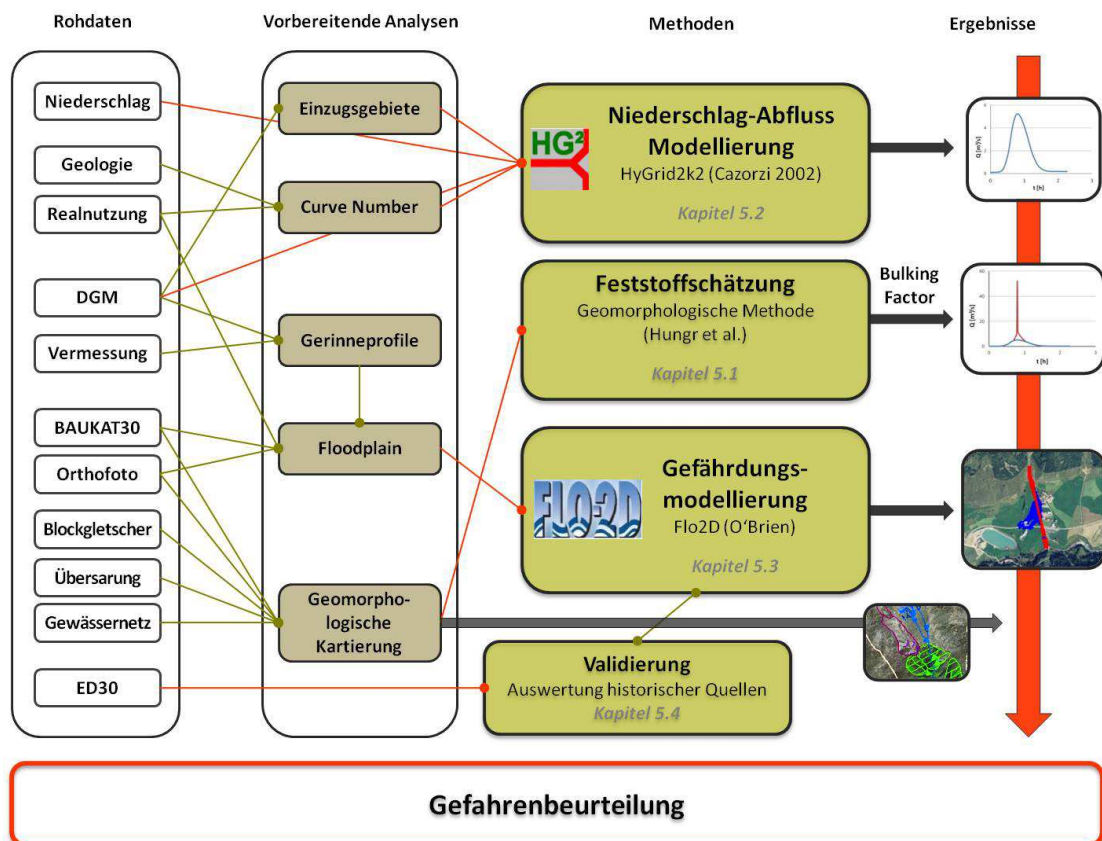


Abbildung 5.1: Methodische Konzeption

5.1 Morphologische Charakterisierung der Einzugsgebiete

5.1.1 Vorbereitende Analyse in GIS

Als Vorbereitung für die Geländebegehung wurden im GIS einige Analysen durchgeführt, die einen Überblick und eine grundlegende Charakterisierung der EZG liefern sollen. Dazu gehört die Ableitung von Hillshades und Neigungskarten aus dem Höhenmodell (ArcGIS 9.3 im *Spatial Analyst*), die Ausweisung der Einzugsgebiete und davon ausgehend die Berechnung verschiedener Parameter sowie die Angabe der jeweiligen Schutzverbauungen.

Die Ausscheidung der Einzugsgebiete erfolgte in ArcView3.2a mit dem Einzugsgebietstool, welches die Entwässerungsgebiete auf Grundlage des Höhenmodells und auf Grundlage eines Schwellenwerts für die Gerinnebildung (1 ha) ausweist. Daneben wurden die Fließgeschwindigkeit im Gerinne und außerhalb des Gerinnes (2 m/s bzw. 0,1 m/s) und zusätzlich ein Suchradius von 25 m angegeben. Durch interaktives Bestimmen des Gebietsauslasses erfolgten die Berechnungen. Es wurden u.a. folgende Größen abgeleitet: Fläche [km²], minimale/mittlere/maximale Meereshöhe [m] und mittlere Hangneigung [Grad °]. Als Gebietsauslass gilt der oberste Punkt des Schuttkegels, da für die Modellierung in FLO-2D an diesem Punkt die hydrologischen Daten vorliegen müssen.

In ArcGIS 9.3 wurde das Shapefile *Realnutzung* anschließend auf die Größe der Einzugsgebiete mit dem Befehl *Clip* zugeschnitten, um den Waldanteil zu berechnen. Auch die obere Waldgrenze wurde abgelesen. Die Bachläufe wurden grob in Oberlauf (relativ flacher Quellbereich), Mittellauf (steiler Hangbereich) und Unterlauf (Kegelbereich) gegliedert und in dreidimensionale Linien umgewandelt (Befehl: *Features to 3D*). Damit konnte mit Hilfe des Profilgraphen das Gefälle berechnet werden (Höhendifferenz / Länge). Darüber hinaus wurde für jeden Abschnitt die vorherrschende Geologie ermittelt, sowie die bestehenden Schutzverbauungen angeführt.

5.1.2 Geomorphologische Übersichtskartierung

Die geomorphologische Übersichtskartierung soll den Fokus auf die vorherrschenden Prozesse innerhalb der Einzugsgebiete lenken. Dies sind die für die Gefahrenanalyse wichtigen Feststoffherde und die mit ihnen verknüpften Ablagerungsflächen oder markante Murenablagerungen. Daneben werden periglaziale Prozesse in den Quellbereichen der Bäche betrachtet. Als Grundlage für die Kartierung dienen das Orthofoto, das Höhenmodell (Hillshade, Neigungskarte), sowie eigene Beobachtungen aus der Geländebegehung. Der verwendete Kartierschlüssel wurde von der Abenis Alpinexpert GmbH zur Verfügung gestellt; er wurde in Anlehnung an den „Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene“ (BUWAL und BWW 1995) entworfen. Im Folgenden werden die ein-

zelen kartierten Phänomene ausgehend vom Quellgebiet bis zur Mündung aufgelistet sowie die Kartierkriterien erläutert.

Umgrenzung eines Kares (Darstellungsform: Linie): Die Karumgrenzung bezeichnet jene Linie, die die Hohlform des glazial entstandenen Kares abgrenzt und die teilweise ident ist mit den Einzugsgebietsgrenzen. Sie konnte aus dem Hillshade und der Neigungskarte eindeutig abgegrenzt werden.

Schuttstrom aufgrund von Gelifluktion (Polygon): Im Karbereich können mit Hilfe des Orthofotos und des Hillshades Fließstrukturen erkannt werden, die als zusammengehörende Flächen abgegrenzt werden (Blockgletscher). Ihre Aktivität (aktiv, inaktiv, fossil) lässt sich grundsätzlich von der Vegetationsbedeckung (fossil) ableiten. Bei eingefallenen Schuttströmen kann man von Inaktivität ausgehen. Auch vom Shapefile *Blockgletscher* kann man auf die Aktivität schließen.

Blockgletscher (Loben) – aktiv / nicht aktiv (Linie): Diese Linien markieren klare Fließwülste der Schuttströme. Ihre Aktivität wurde aus der Kartierung der Schuttströme übernommen (siehe oben).

Quelle – dauernd / zeitweise (Punkt): Dauernde Quellen sind punktförmige Wasseraustritte, welche den Anfang von dauernd wasserführenden Gerinnen bilden. Zeitweise Quellen speisen demnach nur *zeitweise* wasserführende Gerinne.

Gerinne – dauernd / zeitweise wasserführend (Linie): Dauernd wasserführende Gewässer werden kartiert, wenn sie im Orthofoto als Wasserlinien ersichtlich sind. Deuten Hohlformen auf dem Orthofoto eine zumindest periodische oder episodische Wasserführung an, sollten diese bei der Geländebegehung überprüft werden.

Gebiet mit diffus verteilten Quellen (Polygon): Diese Gebiete werden aus dem Orthofoto aus durchnässten Flächen abgeleitet, welche flächenhafte Austritte von Wasser kennzeichnen.

Moorgebiet, Vernässungszone (Polygon): Im Unterschied zu den diffus verteilten Quellgebieten haben Vernässungszonen oft eine erkennbare Durchlaufstrecke für einen Bach und liegen in Mulden.

See (Polygon): auf dem Orthofoto ersichtliche Binnengewässer.

Muldensee (Polygon): Wie der Name schon sagt, werden kleinere Seen in Mulden kartiert, die sich innerhalb der Blockströme befinden können.

Nährgebiet von Murgängen – aktiv / nicht aktiv (Polygon): Flächen, die sich dem Herkunftsgebiet von Murenmaterial einordnen lassen. Als *aktiv* gelten vegetationsfreie und rezent zerfurchte Erosionsflächen; als *inaktiv* werden (wieder) bewachsene Flächen ausgewiesen, die aufgrund der Morphologie als klar abgrenzbare Erosionsfurchen erkennbar sind.

Transportrinne Murgang – aktiv / nicht aktiv (Linie): Die Unterscheidung der Aktivität erfolgte aufgrund des Bewuchses und des Vorhandenseins von rezenten Ablagerungen, und außerdem kongruent mit der Aktivität der Nährgebiete.

Murdämme, Levées – aktiv / nicht aktiv (Linie): Linienförmige Murenablagerungen im Ablagerungsgebiet oder außerhalb davon gelten als aktiv, wenn sich noch Feinmaterial in den Zwischenräumen befindet.

Murkopf – aktiv / nicht aktiv (Linie): markante Murköpfe, die in der Geländebegehung ausgemacht werden konnten.

Murschuttablagerungen (Polygon): Als Murschuttablagerungen werden jene Ablagerungen kartiert, die sich in und außerhalb des Gerinnes eindeutig Murprozessen zuordnen lassen.

Gemischte Ablagerungen (Polygon): Gemischte Ablagerungen können neben Murschutt auch Produkte anderer Prozesse beinhalten (z.B. Felssturz).

Murkegel (ca. 7,5° Längsneigung) – aktiv / nicht aktiv (Polygon): Die Begrenzungen der Murkegel wurden aus dem Hillshade abgeleitet. Die Abschätzung der Aktivität sollte anhand von sichtbaren Aufschüttungen am Kegel erfolgen.

Trockenmauer (Linie): quer zur Fließrichtung verlaufende Trockenmauer im Gerinne.

Schutzdamm allgemein (Linie): als Erdwall konzipierter Schutzbau, welcher vorwiegend dem Geschieberückhalt und der Kanalisierung von Murenmaterial dient.

Schutzmauer (Linie): aus dem Bautenkataster übernommene Schutzbauten zum Abblocken von Muren.

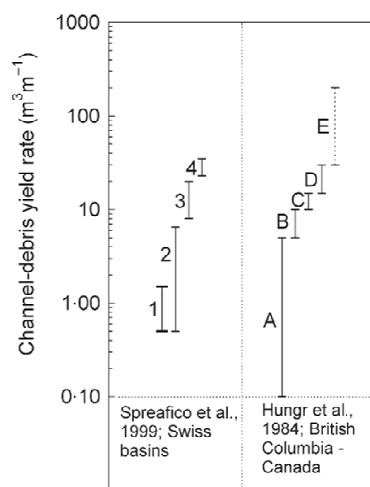
Sperre, Wasserschutzbauwerk (Punkt): aus dem Bautenkataster übernommene Konsolidierungssperren in den Gerinnen.

5.1.3 Bestimmung der Feststoffvolumen: Geomorphologische Methode

Die Wahl der geomorphologischen Methode zur Ermittlung des Feststoffvolumens ergab sich vor allem aus der Möglichkeit, die lokale Situation von Gerinneabschnitten berücksichtigen zu können. Die Vorgehensweise folgt den Arbeiten von Hungr et al. (1984, Anwendung in British Columbia, Kanada) und Spreafico et al. (1999, Anwendung in der Schweiz). Beide hatten zum Ziel, jenen Anteil am gesamten Feststoffangebot zu bestimmen, der bei einem Niederschlagsereignis in Bewegung gesetzt werden kann. Genau genommen bezieht sich die Schätzung nicht auf die effektiven, sondern auf die maximalen Transportkapazitäten (Hegg et al. 2001). Grundsätzlich sind beide Arbeiten gleich aufgebaut: die Feststoffschätzung erfolgt durch Lokalaugenscheine, Orthofotos und durch Bildmaterial. Das Gerinnenetz wird in Abschnitte unterteilt, die in Bezug auf die feststoffrelevanten Prozesse homogen sind. Beispielsweise kann der Kegelbereich aufgrund der geringeren Neigung klar vom Mittellauf abgegrenzt werden.

Für die gewählten Bach-Abschnitte werden nun die Feststoffe quantifiziert. Hier unterscheiden sich die beiden Arbeiten. Hungr et al. (1984) ordnen den Abschnitten einen einheitlichen

Geschiebebeitrag zu: das erodierbare Volumen pro Laufmeter (e_i in Formel 5.1). In diesem Schätzwert sollen alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden: die Erosionen im Bachbett und der Böschungen, sowie Wertminderungen durch die Umlagerung von Material. Auch das Volumen von Rutschungen mit Konnektivität zum Bachbett ist im Geschiebebeitrag enthalten. Multipliziert man den Geschiebebeitrag e_i mit der Länge des Abschnitts, und bildet man die Summe aller Abschnitte, ergibt sich die Geschiebelieferung für das Einzugsgebiet. Im Gegensatz dazu erfolgt die Feststoffquantifizierung bei Spreafico et al. (1999) separat für das Bachbett und die Böschung und unter Einbezug eines dimensionslosen Reduktionskoeffizienten, der lokale Extreme ausgleicht. Zusätzliche Erosionsquellen an den Hängen wie Rutschungen oder Runsen sollen detailliert behandelt werden. Die Geschiebelieferung für das gesamte EZG ergibt sich folglich aus der Summe der Geschiebebeiträge, aus der Summe der Böschungsbeiträge und aus der Summe der Erosionsquellen. Für die Schätzwerte kann man sich an einer Skala orientieren. Die Richtwerte verstehen sich pro Laufmeter für verschiedene morphologische Gegebenheiten (Abbildung 5.2). Für das Untersuchungsgebiet der Diplomarbeit sind Werte bis maximal $10 \text{ m}^3/\text{m}$ realistisch, das entspricht in etwa den Bereichen 1 und 2 (nach Spreafico et al. 1999) bzw. A und B (nach Hungr et al. 1984).



Legende zu Abbildung 5.2

Spreafico et al. (1999): 1) Bachbett nicht erodierbar, Uferhöhe 3-6 m, dünne Bodenschicht auf Anstehendem; 2) Bett 5 m breit, teilweise Sedimentschicht auf Anstehendem, Uferhöhe 3-6 m, dünne Bodenschicht auf Anstehendem; 3) Bett 5 m breit, lockerer Schutt, Uferhöhe 3-6 m, erosionsanfälliges Material (Schutt, Moräne, Rutschungs-, Murenablagerung); 4) Bett 10 m breit, lockerer Schutt, Uferhöhe 3-6 m, erosionsanfälliges Material.

Hungr et al. (1984): A) Bett nicht erodierbar, Ufer nicht erodierbar; B) Bett: dünne Sedimentschicht auf Anstehendem, Ufer nicht erodierbar; C) Bett: lockerer Schutt, Ufer: Talus > 5 m hoch, erodierbar, inaktive Seitenhänge; E) Bett: lockerer Schutt, Ufer: Talus > 20 m hoch, erodierbares Material, Seitenhänge potentiell instabil

Abbildung 5.2: Richtwerte für Geschiebebeiträge ($\text{m}^3/\text{Laufmeter}$) (Marchi und D'Agostino 2004)

Für diese Diplomarbeit wurde folgende Vorgehensweise gewählt: die Schätzung erfolgte pro homogenem Abschnitt in Form von einheitlichen Geschiebebeiträgen pro Laufmeter (nach Hungr), womit Böschungserosionen und Zwischenablagerungen berücksichtigt wurden. Rutschungen, Runsen oder Erosionsflächen an den Hängen wurden hingegen wie bei Spreafico getrennt behandelt. Die Quantifizierung erfolgte durch Multiplikation der Fläche mit der mittleren Erosionstiefe (Formel 5.1).

$$V = \sum_{i=1}^n L_i \cdot e_i + \text{Gesindebeherde}$$

Formel 5.1
nach Hungr et al. 1984
und Spreafico et al. 1999



Abbildung 5.3: Feststoffschätzung pro homogenem Gerinneabschnitt (Foto: Patzinbach)

Um der Abhängigkeit zwischen Erosionskapazität und Abfluss Rechnung zu tragen, ist der beschriebene Quantifizierungsvorgang nur für das 100-jährliche Bemessungsereignis vorgesehen. Für ein HQ30-Szenario wird die Feststoffmenge mit einem Reduktionsfaktor vermindert, der dem Verhältnis zwischen dem 30- und 100-jährlichen Spitzenabfluss (Reinwasser) entspricht. Das bei einem 300-jährlichen Niederschlagsereignis zusätzlich mobilisierte Geschiebe wird entweder durch höhere Geschiebebeiträge oder durch zusätzliche, inaktive Flächen erweitert.

Die Begehung der untersuchten Bäche erfolgte von unten nach oben. Ausgestattet mit Höhenmesser, Kompass, Laser-Distanzmesser und Klinometer wurden neben dem Gerinnebeitrag pro Abschnitt die Höhenlage, die mittlere Gerinnebreite und die Neigung aufgenommen. Dazu wurden Angaben zum Material und zum Prozess des fluvialen Systems gemacht und diese mit Fotos dokumentiert.

5.2 Bestimmung des Abflusses: Niederschlag-Abfluss Modell HyGrid2k2

Die Abflussganglinien wurden mit *HyGrid2k2* berechnet, einem an der Universität Udine entwickelten Niederschlag-Abfluss-Modell. *HyGrid2k2* besteht aus einer Gruppe von Programmen, mit denen räumliche Daten im *GRID*-Format (.grd) bearbeitet werden können (Kapitel 5.2.2). Basierend auf dem Konzept des *Soil Conservation Service* (Kapitel 5.2.1) berechnet das Modell den abflusswirksamen Anteil eines Niederschlagsereignisses, wobei für die Ausbreitung der Abflusswelle der

kinematische Ansatz und für die Simulation des Basisabflusses ein Einzellinearspeicher dient (Cazorzi 2002).

5.2.1 Die SCS-Methode

Die SCS-Methode ist ein empirisch fundiertes Verfahren und wurde in den 1950er Jahren vom US Soil Conservation Service (SCS) speziell für die Abflussberechnung kleiner Einzugsgebiete entwickelt (bis 250 km). Die Kalkulation der Abflüsse erfolgt auf Grundlage von Niederschlagsmessungen (Niederschlagshöhe N), von gebietsspezifischen Parametern für Boden und Vegetation und unter Berücksichtigung der Bodenfeuchte (U.S. Department of Agriculture 1964; U.S. Department of Agriculture 1972).

Die Methode geht davon aus, dass jedem Gebiet ein maximaler spezifischer Gebietsrückhalt S zugeordnet werden kann, gemäß seiner Bodeneigenschaften. Wie in Kapitel 2.4.2 bereits beschrieben, beschränkt sich dieser Rückhalt auf die maximale (=potentielle) Infiltrationsmenge. Der aktuelle Gebietsrückhalt F (die *aktuelle* Infiltrationsmenge) kann demnach höchstens so groß sein wie S . Gleichzeitig kann der effektive Niederschlag P_e (Gesamtniederschlag P minus Anfangsverlust I_a) höchstens so groß sein wie der Gesamtniederschlag N . Daraus ergibt sich zwischen den beiden *aktuellen* Größen F und P_e den zwei *potentiellen* Größen S und P_n folgende Beziehung, die dann gilt, wenn der Abfluss einsetzt ($P > I_a$)⁵:

$$\frac{F}{S} = \frac{P_e}{P_n} \quad \text{für } P > I_a \quad \text{Formel 5.2}$$

Nachdem der Abfluss einsetzt wird der gesamte Regen zu Abfluss oder zu aktuellem Rückhalt:

$$(P_n - I_a) = F + P_e \quad \text{Formel 5.3}$$

Dabei gilt $P_n = P - I_a$ und $F = P_n - P_e = P - I_a - P_e$, wodurch aus den Formeln 5.2 und 5.3 der Gebietsabfluss P_e abgeleitet werden kann.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Formel 5.4}$$

Die in der Gleichung berücksichtigten Anfangsverluste, die den Anstieg der Hochwasserwelle nach Niederschlagsbeginn verzögern, sind das Wasser aus Muldenrückhalt und Interzeption. Sie werden

⁵ Die Formeln 5.2 bis 5.7 wurden aus Maniak (2005) entnommen.

ausgehend von Feldmessungen in den USA mit $0,2 S^6$ (0,2 % des Gebietsrückhalts) beziffert. Für $I_a = 0,2S$ äußert sich der Abfluss (Formel 5.4) wie folgt (Formel 5.5):

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{Formel 5.5}$$

Der maximale Gebietsrückhalt S wird mit Hilfe eines Index, der Kurvennummer CN (Curve Number) ausgedrückt:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{bzw.} \quad CN = \frac{1000}{(S + 10)} \quad \text{Formel 5.6}$$

Dabei sind alle Werte in Zoll ausgedrückt. Durch die Umwandlung von Zoll in Millimeter mit dem Faktor 25,4 wird Formel 5.6 zu:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{bzw.} \quad CN = \frac{25400}{(S + 254)} \quad \text{Formel 5.7}$$

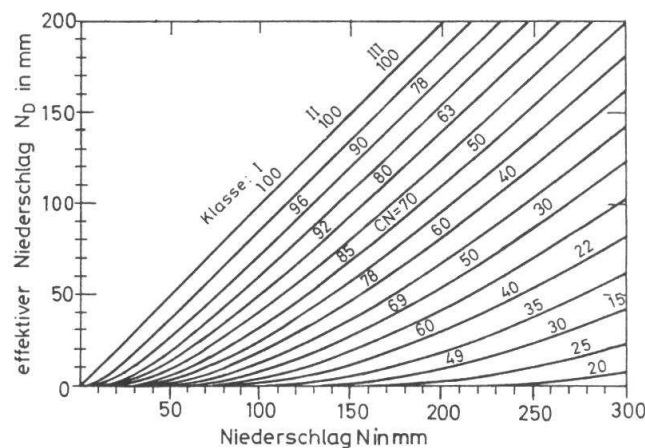


Abbildung 5.4: Curve Number und effektiver Niederschlag = $f(N, CN)$ für Bodenfeuchteklasse II nach dem SCS-Verfahren (Maniak 2005)

Die Curve Number

"CN ist ein Maß für das maximale Speichervermögen S in Abhängigkeit von dem Boden, seiner Nutzung und dem Vorregen (...)" (Maniak 2005). Theoretisch reichen die Werte von 0 bis 100, wobei ein Wert von 0 totale Infiltration und keinen Abfluss bedeutet, bei einem Wert von 100 der Niederschlag hingegen gänzlich abfließt. Jeder CN-Wert verfügt über eine charakteristische Kurve, die die

⁶ In CLEM wird aufgrund von Erfahrungen in Gebirgseinzugsgebieten ein Wert von **0,15** angenommen (Carzorzi 2002).

Beziehung zwischen Niederschlag und dem daraus resultierenden Direktabfluss (effektivem NS) darstellt. Ein CN-Wert von 40 bewirkt bei einem Niederschlagsereignis von 240 mm beispielsweise 50 mm Abfluss, ein Niederschlag von 100 mm oder weniger versickert bei gleichem CN-Wert ganz (Abbildung 5.4). Wie aus der Definition hervorgeht, gilt dies jedoch nur unter bestimmten Vorfeuchtebedingungen. Im SCS-Verfahren werden drei Bodenfeuchteklassen unterschieden, wobei ein Vorregenindex den Niederschlag der letzten 5 Tage und die Jahreszeit berücksichtigt (Tabelle 5.1). Ein CN-Wert von 40 entspricht bei sehr feuchten Bedingungen (Bodenfeuchtekategorie III) einem CN-Wert von 22 und bei sehr trockenen Bedingungen (Bodenfeuchtekategorie I) einem CN-Wert von 60 (Kurven Abbildung 5.4) (Cazorzi 2002; Maniak 2005).

Bodenfeuchtekategorie I	Der Boden ist trocken; die Niederschlagssumme der letzten 5 Tage beträgt weniger als 30 mm in der Vegetationsperiode und weniger als 15 mm während der Wachstumsruhe.
Bodenfeuchtekategorie II	Der Boden ist feucht; die Niederschlagssumme der letzten 5 Tage liegt zwischen 36 und 53 mm in der Vegetationsperiode und zwischen 13 und 28 mm außerhalb dieser Zeit.
Bodenfeuchtekategorie III	Der Boden ist nahezu gesättigt; die Niederschlagssumme der letzten 5 Tage ist höher als 53 mm (Vegetationsperiode) bzw. höher als 28 mm (außerhalb der Wachstumszeit).

Tabelle 5.1: Bodenfeuchtekategorien im SCS-Verfahren (Cazorzi 2002; Maniak 2005)

Die Zuweisung der CN-Werte erfolgt unter Annahme von mittleren Feuchtebindungen (Bodenfeuchtekategorie II). Die Erhöhung bzw. Verminderung des Speichervermögens aufgrund trockener bzw. gesättigter Bedingungen ergibt sich durch die Umrechnung mit folgenden Formeln (Cazorzi 2002):

$$CN_I \approx \frac{CN_{II}}{2,334 - 0,01334 \, CN_{II}} \quad \text{bzw.} \quad CN_{III} \approx \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,0059 \, CN_{II}} \quad \text{Formel 5.8}$$

In HyGrid2k2 dient die Bodenfeuchtekategorie auch als Eichungsparameter und kann somit auch höher als 3 gesetzt werden (Cazorzi 2002).

Die weiteren auf die Curve Number Einfluss nehmenden Faktoren sind der Boden und dessen Nutzung. Die SCS-Methode sieht hierbei die Einteilung in vier hydrologische Bodentypen vor (Tabelle 5.2). Die Kapazität des Oberflächenabflusses nimmt von A nach D zu, während die hydrologische Leitfähigkeit der Böden abnimmt. Die Bodentypen werden auf die Geologie umgemünzt; jede geologische Einheit entspricht damit einer Permeabilitätsklasse von 1 bis 4 (Tabelle A.1 im Anhang). Anschließend kann aus der Kombination von Bodennutzung (Realnutzung) und festgelegter Permeabilitätsklasse der CN-Wert aus Tabelle A.2 (im Anhang) zugewiesen werden (Cazorzi 2002; Maniak 2005).

Bodentyp A / Permeabilitätsklasse 1	Böden mit großem Versickerungsvermögen, auch nach starker Befeuchtung, z.B. tiefgründige Sande und Kiese; hohe hydrologische Leitfähigkeit
Bodentyp B / Permeabilitätsklasse 2	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen (wenn gesättigt); mäßig tiefe oder tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur, z.B. Sandböden, Löß, lehmiger Sand
Bodentyp C / Permeabilitätsklasse 3	Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauender Schicht; z.B. flachgründige Sandböden, sandiger Lehm
Bodentyp D / Permeabilitätsklasse 4	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen; Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel

Tabelle 5.2: Bodentypen im SCS-Verfahren (Maniak 2005)

5.2.2 Berechnung von Spitzenabflüssen mit HyGrid2k2

In diesem Kapitel wird die Zuweisung von CN-Werten erläutert sowie die Umsetzung der HyGrid2k2-Module beschrieben. Tabelle A.3 (im Anhang) gibt einen Überblick zu den Input- und Output-Dateien der Module und der verwendeten Werte.

CURVE NUMBER

Die praktische Zuteilung erfolgte in ArcGIS 9.3, wobei eine neue Spalte im Shapefile Geologie mit den passenden Permeabilitätsklassen versehen wurde und eine neue Spalte im Shapefile Realnutzung eine Nutzungsnummer (entsprechend der Tabellen A.1 und A.2 im Anhang) erhielt. Mit Hilfe der Option *Identity* (*Arc Toolbox: Analysis Tools > Overlay > Identity*) können die zwei Shapefiles geometrisch miteinander verschnitten werden. Dadurch entsteht ein neues Shapefile, welches die Attribute beider Features beinhaltet (Permeabilitätsklassen und Nummern der Realnutzung). Die Kombination der beiden Attribute führt schließlich zur Zuweisung des CN-Wertes. Wald (33) kombiniert mit Moränenmaterial (Klasse 1) erhält beispielsweise den Wert 36 (Tabelle A.2 im Anhang). Damit die CN-Daten in HyGrid2k2 gelesen werden können, müssen sie im *Float*-Format vorliegen. Dafür wird das Shapefile zunächst in ein Raster und dieses dann in ein *Float*-File umgewandelt. Die Umwandlung in das *Float*-Format muss außerdem für die auf die EZG zugeschnittenen und in der Modellierung erforderlichen Höhenmodelle durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, dass die Raster eines Einzugsgebietes (DGM und CN) dieselbe Ausdehnung haben.

PIT REMOVER

Wenn im digitalen Geländemodell Rasterzellen enthalten sind, die einen niedrigeren Höhenwert aufweisen als alle sie umgebenden Zellen, kann es bei der Berechnung des Gebietsabflusses zu Problemen kommen, da Wasser, das in die tieferliegende Zelle hineinfließt, in keine Richtung weiter abfließen kann. Solche lokalen Vertiefungen (pits) können beispielsweise kleine Mulden im Ge-

lände darstellen oder auch aufgrund von Approximation bzw. Interpolation bei der Erstellung des DGMs entstanden sein. Mittels des Moduls PIT REMOVER werden sie identifiziert und entfernt (Cazorzi 2002; Fürst 2004).

UPSLOPE AREA

Mit Hilfe des senkenlosen Höhenmodells (PIT REMOVER) ist es möglich, die Wege des oberflächlichen Abflusses bis zur Pegelstation zu bestimmen. Je nach Algorithmus (*D8 Classic*, *Multiple Flow*, *D infinite* oder *D8 Facets*) folgt das Wasser unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten. Für die Berechnungen wurde der einfachste und am häufigsten verwendete Algorithmus *D8 Classic* eingesetzt. Hierbei wird angenommen, dass das Wasser immer zur Gänze in Richtung der steilsten Neigung abfließt (Fürst 2004). Die Zellenwerte im Raster *UpslopeArea* drücken jeweils die Anzahl an Zellen aus, die in die jeweiligen Zellen entwässern (Abbildung 5.5 links). Damit ergibt sich zusätzlich das Raster *FlowDirection* mit acht möglichen Fließrichtungen und das Raster *FlowDistance*, das auf Grundlage des berechneten Fließwegs die Entfernungen bis zur Pegelstation in Metern ausdrückt (Abbildung 5.5 mitte bzw. rechts) (Cazorzi 2002).

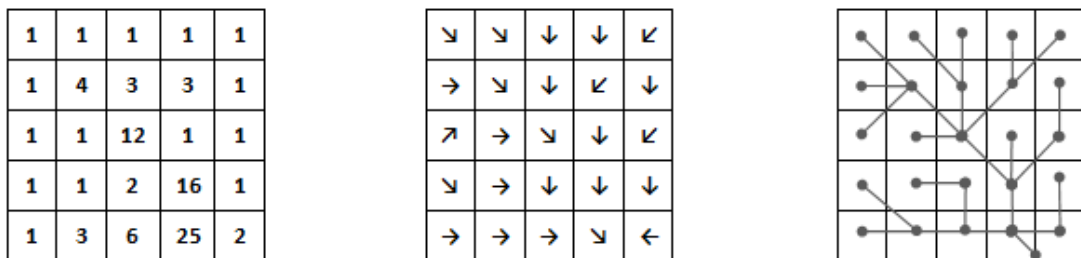


Abbildung 5.5: Raster des akkumulierten Abflusses (*UpslopeArea*), Raster mit Fließrichtungen (*FlowDirection*) und Raster mit Verbindung der Zellen bis zum Gebietsauslass (*FlowDistance*, ohne Meter); eigene Darstellung nach Cazorzi (2002)

AREA HYDRO NET

Mit dem Programm AREA HYDRO NET wird nun das synthetische Entwässerungsnetz berechnet. Dafür werden die akkumulierten Abflusswerte der Ergebnisdatei *UpslopeArea* mit Hilfe eines Schwellenwerts klassifiziert. Zellen mit einem Wert über dem Schwellenwert ergeben ein miteinander verknüpftes Gewässernetz (*ChannelFlow*), alle anderen Zellen werden als Hang (*OverlandFlow*) ausgewiesen (Abbildung 5.6). Dies ist deshalb wichtig, da Abflüsse im Kanal unter anderen Bedingungen ablaufen als am Hang. Unter der Annahme, dass 1 ha des oberflächlichen Abflusses benötigt wird, damit ein zusammenhängendes Entwässerungsnetz gebildet wird, wird der Schwellenwert im vorliegenden 2,5 m Raster mit 1.600 Pixeln festgesetzt ($10.000 \text{ m}^2 / (2,5 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m}) = 1.600$). Zusätzlich wird ein höherer Schwellenwert von 2.400 ($1,5 \text{ ha} \rightarrow 15.000 \text{ m}^2 / 6,25 = 2.400$) getestet, der ein weniger dichtes Netz ausgibt. Die Ergebnisdatei

NetSynth wird anschließend durch Umwandlung (*Float*-Format in *Raster*-Format) in GIS importiert und mit dem bestehenden Gewässer-Shapefile bzw. den Tiefenlinien des Höhenmodells überlagert und visuell verglichen.

1	1	1	1	1
1	4	3	3	1
1	1	12	1	1
1	1	2	16	1
1	3	6	25	2

Weiters werden vom Modul AREA HYDRO NET noch zwei Rasterdateien mit Fließlängen ausgegeben. Die Fließlängen am Hang (*Overland*) stellen die Distanz in Metern in Richtung der Abflusslinien bis zum hydrologisch nächstgelegenen Pixel des Gewässernetzes dar, die Fließlänge im Kanal (*Channel*) wird für jede Zelle bis zum Gebietsauslass berechnet.

Abbildung 5.6: Trennung zwischen Hang (*OverlandFlow*) und Gewässernetz (*ChannelFlow*); Ausscheidung des Gewässernetzes anhand eines Grenzwertes (im Beispiel: 10 Entwässerungszellen); eigene Darstellung nach Cazorzi (2002)

ROUTING TIME

Die Unterscheidung von Hang und Gewässernetz (AREA HYDRO NET) ermöglicht nun die gesonderte Berechnung von Fließzeiten. Dieser Schritt erfolgt auf Grundlage des kinematischen Ansatzes pro Pixel bis zum Gebietsauslass. Da die Fließzeiten von der zurückgelegten Distanz sowie von der Fließgeschwindigkeit abhängen, finden sowohl das Richtungs-Raster (*FlowDirection*) und der akkumulierte Abfluss (*UpslopeArea*) Eingang in das Modul, als auch eine vorab definierte Fließgeschwindigkeit.

Grundsätzlich wird die Fließgeschwindigkeit von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst (Wassermenge, Gefälle, Rauigkeit des Geländes). Der Einfachheit halber unterscheidet das Modell jedoch lediglich zwischen der Bewegung am Hang und der Bewegung im Kanal. Diese Unterteilung erfolgt anhand jenes Schwellenwerts, mit dem in AREA HYDRO NET das Gewässernetz ausgeschieden wurde (*unterer Schwellenwert*). Basierend auf der Annahme, dass der Ablauf der Geschwindigkeit ab einer gewissen Wassertiefe (*UpslopeArea*) signifikant zunimmt, und diese Zunahme in diesem einfachen Modell nicht berücksichtigen werden kann, wird innerhalb des Kanals zusätzlich eine dritte Geschwindigkeit definiert. Ein zweiter Schwellenwert (*oberer Schwellenwert*) unterteilt das Gewässernetz nach *fester* und nach *variabler* Geschwindigkeit (Tabelle 5.3).

Netz mit variabler Geschwindigkeit	UpslopeArea > 1.000.000	$v = [ch_v] \cdot \left(\frac{[UpslopeArea]}{[1.000.000]} \right)^{exp}$ Exponent = 0,07
	oberer Schwellenwert = 1.000.000	
Netz mit fester Geschwindigkeit	1.000.000 > UpslopeArea > 1.600 (2.400)	$v = [v_{ch}] = 2m/s$
	unterer Schwellenwert = 1.600 (2.400)	
Hang	1.600 (2.400) > UpslopeArea	$v = [v_{sl}] = 0,1m/s$

Tabelle 5.3: Fließgeschwindigkeiten in ROUTING TIME (Cazorzi 2002)

Für kleine bis mittlere Gebirgsbäche schlägt Cazorzi (2002) im Kanal Geschwindigkeiten zwischen 1 und 4 m/s vor. Ausgehend davon wird der progressive Anstieg der Geschwindigkeit berechnet, indem man die Beziehung zwischen dem akkumulierten Abfluss und dem oberen Schwellenwert um einen Exponenten erhöht. Am Hang werden Geschwindigkeiten zwischen 0,01 und 0,05 m/s empfohlen.

Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeiten, der Pixelgröße und des Azimuth (*FlowDirection*) wird nun die Durchflusszeit pro Pixel berechnet. Mittels Aufsummieren der Durchflusszeiten entlang der Fließwege erhält man schließlich die Fließzeit pro Pixel bis zum Gebietsauslass (*RoutingTime*).

CLEM – Cinematic Local Excess Model

Abschließend werden mit dem Cinematic Local Excess Model die Abflussganglinien der Bäche simuliert. Eingangsdaten dafür sind die vorbereiteten CN-Werte, die berechneten Fließzeiten (*RoutingTime*) und die Niederschlagsdaten.

Angenommen wird ein räumlich gleich verteilter Niederschlag (über das gesamte EZG), wobei zwischen mehreren zeitlichen Intensitätsverläufen gewählt werden kann. In jedem Fall wird die totale Niederschlagshöhe h über die gesamte Niederschlagsdauer t durch die beiden Parameter a und n bestimmt (Formel 5.9). Abgeleitet werden die Parameter von den Wahrscheinlichkeitskurven (curve di possibilità pluviometrica, CPP) für Starkniederschläge (genannt "Italiana") (Cazorzi 2002).

$$h = a \cdot t^n$$

Formel 5.9

Wiederkehrszeit (Jahre)	2	5	10	20	30	50	100	200	300	Niederschlagsdauer	< 1 h	> 1 h
a	9,1	11,1	12,5	13,8	14,5	15,5	16,7	18,0	18,7	n	0,37	0,49

Tabelle 5.4: Parameter CPP (Wahrscheinlichkeitskurven für Starkniederschläge) (Autonome Provinz Bozen – Südtirol)

Mit dem Modul CLEM wird per iteratives Herantasten jene Berechnungsdauer und -verteilung gesucht, bei der maximale Abflussspitzen erreicht werden. Je nach Wiederkehrszeit und gewählter Niederschlagsdauer werden aus der Tabelle 5.4 die Parameter a und n für den Niederschlag herangezogen. Je niedriger dabei die Dauer angenommen wird, desto stärker wird die Abflussintensität. Die Dauer, bei welcher die höchste Abflussintensität zu Stande kommt, kann als **kritische Berechnungsdauer** bezeichnet werden. An Niederschlagsverteilungen stehen fünf zur Auswahl: *Constant*, *Wallingford*, *Triangular*, *Alterned Blocks* und *Instantaneous Intensity* (Abbildung 5.7).

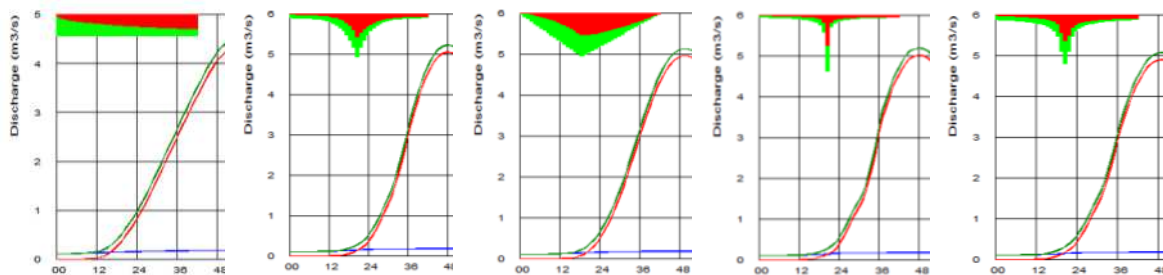


Abbildung 5.7: Formen der Niederschlagsverteilungen in CLEM: *Constant* – *Wallingford* – *Triangular* – *Alterned Blocks* – *Instantaneous Intensity*; in grün: Gesamtniederschlag, in rot: Effektivniederschlag

Die Niederschlagsverteilung *Constant* beschreibt einen zeitlich konstanten Blockregen. Dabei wird eine typische Abflusskurve in S-Form kreiert. Der Abfluss wird ab dem Punkt konstant, ab dem das gesamte EZG gleichzeitig zum Abfluss beiträgt. *Wallingford* kennzeichnet eine symmetrische dimensionslose Gauß-Verteilung, bei der die gesamte Niederschlagsmenge nach verschiedenen Intervallen gewichtet übertragen wird. Aus der Tatsache, dass die Verteilung nicht konstant ist, folgt, dass es eine Zeitspanne bzw. einen Impuls maximaler Intensität geben muss, womit auch der maximale Abfluss höher als bei konstanter Beregnung ist. Die dreieckige Form des Typs *Triangular* konzentriert die Beregnungsspitze bei ca. 45 % der Dauer. Die beiden letzten Verteilungen *Alterned Blocks* und *Instantaneous Intensity* weisen die Niederschlagsspitzen in der Mitte der Niederschlagsdauer auf, wobei die Zu- und Abnahme unterschiedlich ist (bei jeweils logarithmischer Zunahme des Direktabflusses).

Anhand eines internen Berechnungsintervalls (Δt) summiert das Modul den Niederschlag auf und interpoliert ihn. Anschließend wird für jede Zelle der Abflussbeitrag nach den Formeln 5.5 und 5.7 (SCS-Methode, Kapitel 5.2.1) quantifiziert. Durch die Umrechnung auf die Pixelgröße und das Berechnungsintervall (Δt) wird der Effektivniederschlag (P_e in mm) in Abfluss (m^3/s) umgewandelt (Formel 5.10).

$$Q_{dir} = \frac{1000 \cdot P_e \cdot \text{Pixelfläche}}{\Delta t} \quad \text{Formel 5.10}$$

Die Fließzeit, welche im Modul ROUTING TIME berechnet wurde (*RoutingTime*), entspricht gleichzeitig einer Verzögerungszeit, mit der der Abfluss pro Pixel den Gebietsauslass erreicht. Anhand dieser Zeit wird der berechnete Effektivniederschlag auf den Hydrographen aufgetragen.

Jener Niederschlagsanteil, der nicht zu Direktabfluss wird, wird im Modell einheitlich in einem Speicher gesammelt. Die lineare Entleerung dieses Speichers produziert einen Basisabfluss. Die Entleerung wird durch einen Parameter (*alfa*) kontrolliert und basiert auf der Aktualisierung der Kontinuitätsgleichung (Formel 5.11). Für die Simulation wird der Parameter mit 7 beziffert. *Storage* entspricht dem gespeicherten Volumen, das mit 0,1 (100 l/s) angegeben wird. *Outflow* entspricht dem Abflussvolumen, das pro Zeitintervall abgegeben wird, und *Inflow* ist die Differenz zwischen Gesamtniederschlag und P_e . Abschließend wird der Basisabfluss zum Direktabfluss addiert, womit die Abflussganglinie komplett ist (Cazorzi 2002).

$$Outflow_j = alfa \cdot Storage_{j-1} \rightarrow Storage_j = Storage_{j-1} + Inflow_j - Outflow_j$$

Formel 5.11

Als zeitliches Berechnungsintervall, für das die Ergebnisse am Ende vorliegen, wird 1 Minute gewählt. Als Bodenfeuchtekategorie wird ein Wert von 4 angenommen (siehe auch Kapitel 7).

5.3 Gefährdungsmodellierung mit FLO-2D

FLO-2D ist ein rasterbasiertes, physikalisches Prozessmodell zur Berechnung von Hochwässern. Es wurde von O'Brien et al. (1993) an der Colorado State University entwickelt und eignet sich zur eindimensionalen Berechnung des Gerinneabflusses sowie für den zweidimensionalen Oberflächenabfluss bei Überbordung. Alle Übergangsformen von Reinwasserabflüssen bis hin zu voll ausgebildeten Muren können simuliert werden. Das Programm erlaubt die Berechnung von Fließtiefe, Geschwindigkeiten und von Wasserdruck und eignet sich damit für die Gefahrenzonierung.

Die Gefährdungsmodellierung erfordert im Vorhinein zwei wesentliche Schritte: die Erstellung der topographischen Simulationsoberfläche und die Vorbereitung des hydrologischen Inputs. Der erste Schritt wird im Grid Developer System (GDS) durchgeführt, einem Teil des Softwarepakets von FLO-2D. Um die Geometrie dabei möglichst genau abbilden zu können, wird zunächst die Vermessung in das Höhenmodell integriert (in ArcView 3.2a). Danach werden die HEC-GeoRas-Profile des Gerinnes abgeleitet (Kapitel 5.3.2). Der zweite Schritt ist die Erstellung des Murgang-Hydrographs und damit die Umverteilung der geschätzten Feststoffmengen auf den Reinwasser-

hydrographen (Kapitel 5.3.3). Im Folgenden wird die Funktionsweise des Modells FLO-2D erläutert (Kapitel 5.3.1).

5.3.1 FLO-2D – Two Dimensional Flood Routing Model

FLO-2D bietet unterschiedliche Simulationsmöglichkeiten. Wesentlich ist die Berechnung der Wellenabflachung, wobei das Wasser oberflächlich in acht mögliche Richtungen (Overland Flood Routing, Abbildung 5.8), im Kanal (Channel Flow Routing) oder auf Straßen (Street Flow) fließen kann. Auch der Austausch zwischen diesen Bereichen wird berechnet, etwa das Überlaufen des Kanals auf die Oberfläche und umgekehrt das Rückfließen in den Kanal (Channel Overland Interface). Daneben besteht die Möglichkeit der Modellierung von Stau- und Rückströmeffekten und die Berücksichtigung von Brücken. Der hydrographische Input kann entweder durch die Modellierung des Niederschlags (*Fan or Floodplain Rainfall*) oder der Hochwasserwelle in Form eines Hydrographen erfolgen. In die Modellierung können außerdem Elemente einbezogen werden, die den Fließprozess behindern, wie etwa Gebäude oder Mauern (ARF = Area Reduction Factors). Sie beeinflussen sowohl die Fließwege als auch die Wasserspeicherung (O'Brien 2009).

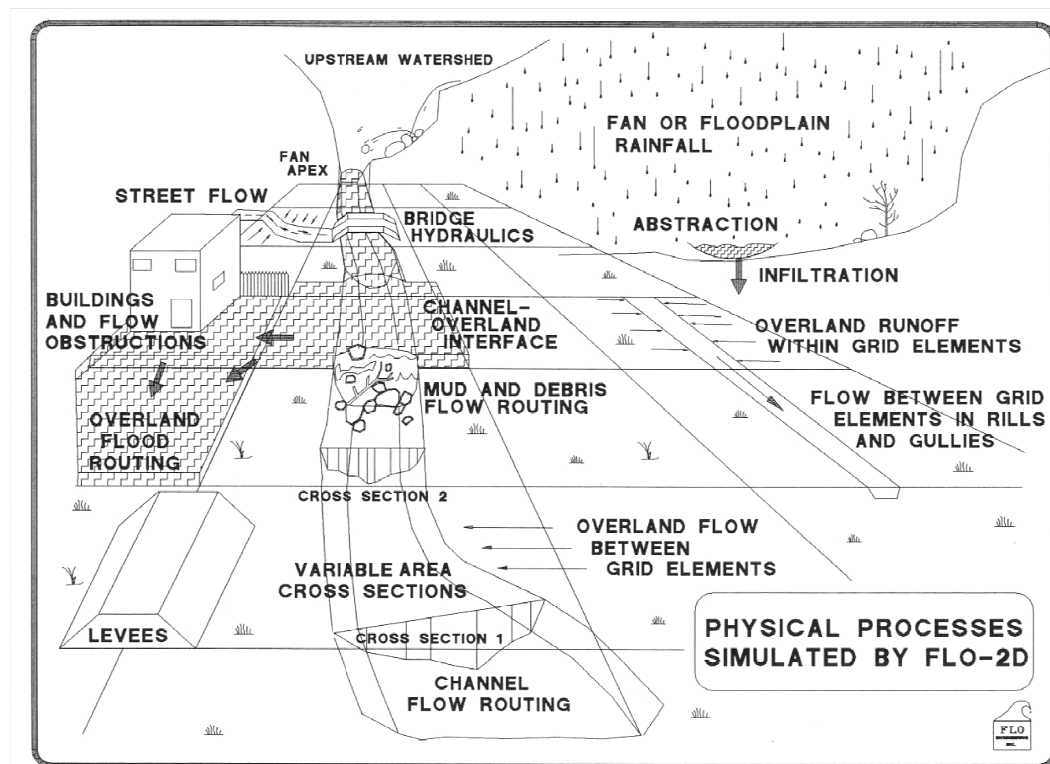


Abbildung 5.8: Physikalischer Simulationsprozess in FLO-2D (O'Brien 2009)

Wie in Abbildung 5.8 angedeutet, geschieht die Berechnung auf Rastergrundlage. Die Fortbewegung der Hochwasserwelle wird dabei maßgeblich durch die beiden Rasterattribute Höhe (Topographie) und Fließwiderstand gesteuert. Der Fließwiderstand wird mittels Oberflächenrauigkeit

nach Manning berücksichtigt; die Topographie ergibt sich aus dem digitalen Höhenmodell und der Gerinnegeometrie, die aus aneinandergereihten Querprofilen erstellt wird (Kapitel 5.3.2). Dabei kann die natürliche Profilform übernommen werden, oder eine künstliche Form verwendet werden (rechteckig bzw. trapezförmig). Dem Kanal wird eine durchschnittliche Rauigkeit zugewiesen. Abseits des Kanals orientiert sich die Rauigkeit an der Bodenbedeckung.

FLO-2D wendet für die Ausbreitung und Abflachung der Hochwasserwelle den **dynamischen Wellenansatz** an, der die Bewegungsgleichung für die Energiebilanz und die Kontinuitätsgleichung zur Berücksichtigung der Massenbilanz in sich vereint (Kapitel 2.4.2). Bei steileren Hängen mit relativ gleichmäßigem Fließen wäre grundsätzlich die Anwendung des kinematischen Wellenansatzes ausreichend. Oberflächenabfluss auf komplexerer Topographie, auf der Wellenabschwächung und Speicheränderungen eine größere Rolle spielen, erfordert hingegen die Anwendung der um den Druck- und den Reibungsgradienten erweiterte diffusen Wellengleichung. Die lokalen und konvektiven Beschleunigungsglieder sind schließlich für die Simulation der Wellenausbreitung bei ebenen Hängen oder unbeständigen Bedingungen relevant. In FLO-2D wird das vollständige Gleichungssystem angewandt (O'Brien 2009) (Abbildung 5.9).

Dynamische Grundgleichung (Bewegungsgleichung) (Energiebilanz)					Kontinuitätsgleichung (Massenbilanz)
$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_o = 0$					$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$
lokale	konvektive	Druckglied	Reibungsgefälle	Gerinnegefälle	Hydrologische Verfahren
Beschleunigung (Trägheitsglieder)		Kinematischer Wellenansatz			
Diffusionswellenansatz					
Lösung des vollständigen Gleichungssystems, dynamischer Wellenansatz					

Abbildung 5.9: St.Venant-Gleichung und Möglichkeiten der Modellreduktion (Dyck und Peschke 1995). Abkürzungen nach O'Brien 2009: v = tiefenabhängige Geschwindigkeit, t = Zeit s, g = Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$, h = Fließtiefe, x = Abstand in Fließrichtung, S_f = Reibungskoeffizient, S_o = Sohlengefälle, Q = Abfluss m^3/s , A = Querschnittsfläche m^2

Die Differentialformen der dynamischen Grundgleichung werden mit Hilfe von Finiten Elemente numerisch gelöst. Dabei erfolgen die Berechnungen grundsätzlich mittels Durchschnittswerten zwischen zwei Rasterzellen (Höhe, Rauigkeit). Das Berechnungsschema wird nun grob skizziert.

Die Fließtiefe für die Berechnung der Geschwindigkeit für das nächste Berechnungsintervall wird auf Grundlage des vorherigen Intervalls mittels linearer Schätzung erreicht (mittlere Tiefe

zwischen zwei Zellen oder zwei Profilen). Für das erste Intervall erhält man die Geschwindigkeit aus der Diffusen Wellengleichung, ausgehend davon wird die vollständige Gleichung gelöst. Der Abfluss am Übergang zwischen zwei Zellen ergibt sich aus der Geschwindigkeit und dem durchströmten Querschnitt (Profil), beim Oberflächenabfluss kann die Zellenbreite von Objekten vermindert sein (ARF). Für ein Berechnungsintervall wird der Abflusszuwachs aller acht möglichen Richtungen (bzw. nächstes oder voriges Profil) aufsummiert: $\Delta Q_x^{i+1} = Q_N + Q_O + Q_S + Q_W + Q_{NO} + Q_{SO} + Q_{SW} + Q_{NW}$. Die Volumenänderung (Nettoabfluss pro Intervall) wird auf die verfügbare Speicherfläche der Rasterzelle (bzw. des Profils) verteilt und die endgültige Fließtiefe bestimmt. Für jede Zelle erfolgt am Ende des Berechnungsschrittes noch die Prüfung der numerischen Stabilität. Der Vergleich von Eingangsvolumen, Änderungen in Speichern oder Verlusten zeigen die Volumenerhaltung der Berechnung.

Das Programm ermöglicht die Simulation von Reinwasserabflüssen und Murgängen, aber auch allen Übergangsformen (z.B. hyperkonzentrierte Abflüsse). Das unterschiedliche rheologische Verhalten einer Flüssigkeit wird im Modell über die Parameter Grenzschubspannung und Viskosität berücksichtigt (Kapitel 2.1). Sie werden in Abhängigkeit von der volumetrischen Feststoffkonzentration gemessen und durch Exponentialfunktionen dargestellt (Formel 5.13, Kapitel 5.3.4). Die Koeffizienten und Exponenten dieser Kurven werden als Eingangswerte für die Simulation benötigt. Im Handbuch werden Werte aus der Literatur für unterschiedliche Verhältnisse vorgeschlagen (Kapitel 5.3.4).

Die Wahl der Auflösung richtet sich nach dem Zweck der Modellierung. Große Hochwässer können etwa in kleineren Maßstäben berechnet werden als spezifische Fragestellungen, bei denen das Ergebnis maßgeblich von einer detailreichen topographische Grundlage abhängt. In jedem Fall sollte ein Kompromiss zwischen erforderter Genauigkeit, Qualität des vorhandenen Höhenmodells sowie Rechnerleistung und Zeitaufwand gefunden werden (Hübl 2000). Mit einer Rasterbreite von 5 m wird in der vorliegenden Arbeit versucht, der Genauigkeitsanforderung an Gefahrenzonierungen gerecht zu werden.

Mögliche Ergebnisse der Modellsimulation sind Fließtiefe, Geschwindigkeit und Druck für jedes Rasterelement und zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Diese Prozessintensitäten werden je als Shapefile abgespeichert und können problemlos in ArcGis9.3 importiert werden. Die rasterbasierte Berechnung begünstigt dabei die weitere Verarbeitung in Gefahrenzonen (Kapitel 5.3.5). Während der Simulation werden auch laufend die Inputs, Outputs, Veränderungen in Speichern und Volumenverluste des Systems aufgezeichnet und gespeichert.

Unberücksichtigt bleibt im Modell der Aspekt der Sohlenerosion und damit einhergehend erhöhte Feststofffrachten. Dies kann bei der Simulation in Gerinneabschnitten mit allgemein ho-

hem Erosionspotential zu Ungenauigkeiten führen. Im Ablagerungsbereich von Wildbächen oder bei natürlichen oder künstlichen Kanälen ist der Aspekt der Sohlenerosion hingegen vernachlässigbar.

5.3.2 Vorbereitung der Simulationsoberfläche

Modifizierung des Höhenmodells

Vermessungen von Kanälen im Kegelbereich liegen für die Bäche Pleifer, Patscheider, Patzin und Kappler vor. Die Integration der Vermessung in das Höhenmodell wurde in ArcView3.2a durchgeführt. Dies geschah im *Map Calculator* mit folgender Formel: $(([DEM\ alt]).isNull.con([DEM\ neu]),([DEM\ alt])))$ und durch die anschließende Konvertierung in ein Raster. Für die weitere Bearbeitung (Ableitung der Gerinneprofile) wurden die Raster in das *TIN*-Format umgewandelt. Dieses Format bietet gegenüber Rasterdaten den Vorteil, dass markante Geländelinien berücksichtigt werden können (Fürst 2004). Das erleichtert die Erstellung der Profile für die Gefährdungsmodellierung.

Für die Bäche Bratzen und Außervallatsch wurde ebenfalls eine *TIN*-Datei (aus dem DGM) erstellt. Die beiden Bäche wurden nicht vermessen, die Simulation war ursprünglich also ohne Kanal vorgesehen. Es stellte sich jedoch heraus, dass das 5 Meter-Raster die Tiefenlinie nicht erkannte (Kapitel 7). Die Simulation in FLO-2D wurde somit für alle Bäche außer für den Fallerbach mit Kanalelementen durchgeführt.

Zeichnen der Profile mit der Erweiterung HEC-GeoRAS in ArcGIS9.3

Die Gerinneprofile wurden mit der HEC-GeoRAS-Erweiterung in ArcGIS 9.3 erstellt. Dafür wurde in ArcGIS9.3 für jeden Bach eine eigene Geodatabase mit folgenden Layern erstellt: *Stream Centerline* (Mittellinie des Gewässers), *Bank Lines* (die beiden Oberkanten der Ufer), *Flow Paths* (die Fließwege), und *XS Cut Lines* (Schnittlinien). Im *Editor* wurden die Layer digitalisiert: Die *Bank Lines* grenzen den Kanal vom Hang ab, die drei *Flow Paths* markieren die äußeren Punkte der Kanalsohle, sowie die mittlere Fließlinie (= *Stream Centerline*). Im rechten Winkel zur Fließrichtung wurden danach in gleichmäßigen Abständen die Schnittlinien über den Kanal gelegt. Die Profile ergeben sich damit aus den gezeichneten Schnittstellen (Abbildung 5.10). Mit Hilfe der Höheninformation in *TIN*-Format wurden die Schnittlinien in 3D-Profile umgewandelt (Merwade 2009).

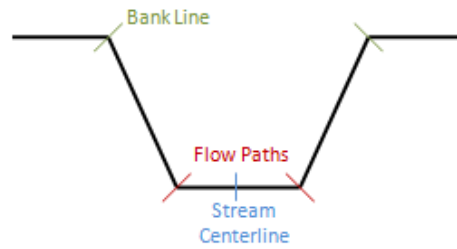


Abbildung 5.10: Schnittstellen im HEC-GeoRAS-Profil

Grid Developer System (GDS)⁷

Im GDS von FLO-2D wurde eine Simulationsoberfläche für jeden einzelnen Wildbachkegel erstellt. Nach der Umwandlung in ein *ASCII*-Format wurde das Höhenmodell in GDS importiert und ein 5-Meter-Raster darüber gelegt. Durch die Interpolation der Höheninformation erhält man die Rasteroberfläche, die als Simulationsgrundlage dient und der nun Attribute hinzugefügt werden können. Die Rauigkeit beim Oberflächenabfluss wird über Manning-Werte berücksichtigt, die, in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung, einen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit und auf die Fließtiefen haben. Die Zuordnung der Werte erfolgte in ArcGIS9.3 auf Basis des Orthofotos (Tabelle 5.5). Das erstellte Shapefile mit Manning-Werten wurde in das GDS importiert und dort auf das 5-Meter-Raster umgelegt.

Oberflächenrauigkeit nach Manning	Bedeckung
0,03	Asphalt
0,06	Schotterweg
0,20	kurzes Gras (Wiesen)
0,40	Gebüsch, Weide
0,48	dichte Vegetation (z.B. Wald, Waldflächen entlang des Bachbetts)
0,80	Speicherbecken

Tabelle 5.5: Oberflächenrauigkeit nach Manning nach O'Brien (2009)

Durch das Auswählen einzelner Zellen können der Überflutungsplattform verschiedene Elemente hinzugefügt werden, die den Murgang eventuell behindern. Durch diese *Area Reduction Factors* (ARF) wird der Abfluss entweder teilweise oder gänzlich blockiert (in eine, mehrere oder alle der 8 Fließrichtungen). Die Gebäude auf dem Schwemmkegel wurden vereinfacht als vollständige Barrikade gekennzeichnet. Schutzmauern wurden in Form von *Levéés* zur Simulationsoberfläche hinzugefügt. Hierfür sind pro Zelle die Angabe der Höhe der Schutzwirkung nötig, sowie die Angabe des Azimuths, aus der die Gefahr kommt. Die Abmessungen der Schutzmauern wurden dem Bautenkaster entnommen. Importiert man das Orthofoto in das GDS, lassen sich Gebäude und Verbauun-

⁷ Die detaillierten Arbeitsschritte finden sich im Anhang.

gen durch einzelnes Auswählen der betreffenden Zellen kennzeichnen. Anschließend werden die Attribute hinzugefügt (Abbildung A.4 im Anhang).

Ein letzter wesentlicher Bestandteil der Überflutungsfläche ist der Kanal mit seiner Abfolge von HEC-GeoRAS Profilen. Das folgende Procedere ist für alle Kanäle gleich: Nach dem Import in das GDS wurde zunächst die linke Kanalbegrenzung angepasst und die Querprofile einzelnen Zellen zugeordnet. Da nicht für jede Begrenzungszelle ein Profil vorlag, wurde der Kanal für die Bereiche dazwischen interpoliert. Darauf aufbauend wurde die rechte Uferlinie berechnet (Abbildung A.5 im Anhang). Nun wurde am oberen Kanalrand eine Eingangszelle für den Abflusshydrographen definiert. Der Hydrograph wurde dort als Textdokument gespeichert. Damit die Kontinuitätsgleichung erfüllt werden kann, musste gleichzeitig auch ein Ausflusselement am Ende des Kanals eingefügt werden, sowie ein geschlossenes Band an Abflusszellen am Rand der Simulationsoberfläche, das gegebenenfalls überbordendes Wasser registriert.

5.3.3 Bulking Factor

Der Gesamtabfluss Q_t einer Mure lässt sich aufgliedern in den Reinwasserabfluss Q_w und in den Feststoffabfluss Q_s ($Q_t = Q_w + Q_s$). Q_s erhält man durch die Multiplikation der volumetrischen Feststoffkonzentration C_v mit dem Gesamtabfluss Q_t ($Q_s = C_v \cdot Q_t$). Durch Umformung ergibt sich folgende Gleichung (Chen et al. 2008):

$$Q_t = \frac{Q_w}{(1 - C_v)} \quad \text{Formel 5.12}$$

Basierend auf diesem Zusammenhang wurden die geschätzten Feststoffmengen auf der Abflussganglinie verteilt. Es wurde die vereinfachende Annahme getroffen, dass sich die volumetrische Feststoffkonzentration mit Ansteigen der Hochwasserwelle kontinuierlich erhöht, ihren Höhepunkt zugleich mit der Hochwasserspitze erreicht und dann wieder kontinuierlich abnimmt. Die höchste Konzentration an Geschiebe wurde mit 0,565 (56,5 %) angenommen, der Wert am Beginn bzw. am Ende des Materialtransports mit 0,1 (10 %).

Die Zunahme der Konzentration erfolgte in Abhängigkeit von der Anzahl an Zeitschritten, vom Beginn der Feststoffmitnahme bis zu ihrem Maximum: $c_1 + (c_{max} - c_1) \cdot \frac{n-x}{n}$; wobei c_1 die Anfangskonzentration (0,1) ist, c_{max} die maximale Konzentration (0,565), n die Anzahl der Zeitschritte bis zum Maximum und x die Zahl des jeweiligen Zeitschrittes (beginnend mit 1 bis zum Maximum, danach wiederum beginnend mit 1). Das Ausgabeintervall der berechneten Hydrographen in HyGrid2k2 liegt bei 1 Minute, womit sich z.B. für die 3. Minute nach Beginn der Bulk-Phase bei einer Anstiegszeit von 10 Minuten folgende Berechnung ergibt: $0,1 + (0,565 - 0,1) \cdot \frac{10-3}{10} =$

0,4255. Die Konzentrationsabnahme geschieht nach dem gleichen Prinzip: $c_1 - (c_{max} - c_1) \cdot \frac{n-x}{n}$. Dieser errechnete Wert (im Beispiel 0,4255) stellt die volumetrische Feststoffkonzentration für das dritte Intervall nach Beginn des Feststofftransports dar. Durch Anwendung der Formel $BF = 1/(1 - C_v)$ erhält man nun den **Bulking Factor**, also den um die Feststoffkonzentration C_v erhöhten Reinwasserabfluss (O'Brien 2009). Diese Berechnung erfolgt für alle Zeitabschnitte, die von Feststofftransport betroffen sind. Durch die Berechnung des mittleren Reinwasserabflusses und des mittleren BF pro Intervall kann schließlich der reine Feststoffgehalt in m^3 herausgerechnet werden: $V_d = \sum BF - \sum Q_w$. Das Geschiebevolumen V_d muss schließlich mit dem geschätzten Volumen übereinstimmen. Gegebenenfalls wird die Bulk-Phase erweitert oder eingegrenzt.

5.3.4 Modellierung in FLO-2D

Durch die Speicherung eines Simulations-Projekts im GDS (Abbildung A.6 im Anhang) werden die zum Raster hinzugefügten Elemente (z.B. Kanal, Gebäude, Inflow-Element) sowie diverse Einstellungen für die Simulation automatisch als ".DAT"-Dateien gespeichert. Diese bilden die Eingangsdaten für das Modell FLO-2D und müssen für die Simulation einzeln aufgeladen werden. Nachfolgend werden die einzelnen ".DAT"-Dateien und die gewählten Einstellungen angeführt.

In *CONT.DAT* wurde als Simulationszeit die Hochwasserdauer (Zeitspanne des jeweiligen Hydrographen) und als Outputintervall 4,8 Minuten (0,08 Stunden) festgesetzt. Daneben werden hier Systemkomponenten (z.B. ob Kanäle, Levées oder andere ARF im Projekt enthalten sind) oder die modellierten Prozesse (z.B. Mure, Niederschlag, Grundwasser) angezeigt. *TOLER.DAT* enthält spezifische Angaben zur numerischen Simulation (Surface Detention, Percent Change in Flow Depth, Dynamic Wave Stability Coefficient). Diese Werte beeinflussen beispielsweise die Volumenerhaltung. Infolge von Stabilitätsproblemen wurden sie bei der Simulation individuell angepasst. Im Layer *INFLOW.DAT* sind der Hydrograph und das Inflow-Element gespeichert. Bei Simulationen mit einem Kanal enthält *CHAN.DAT* auch die Profildaten mit der Rauigkeit für den Kanal (Manning: 0,04). In *ARF.DAT* sind die Reduktionsfaktoren und in *LEVEE.DAT* sind die Schutzmauern gespeichert. Die letzte Datei ist *SED.DAT*. Hier werden die Parameter für die Rheologie angegeben. Die Grenzschubspannung und die Viskosität eines Murganges werden in FLO-2D durch die Formel 5.13 ausgedrückt. Im FLO-2D-Handbuch (O'Brien 2009) werden Beispielstudien mit unterschiedlichem Fließverhalten vorgeschlagen. Für die Diplomarbeit werden die Werte von Kang und Zhang (1980) gewählt, die das Fließverhalten granularer Murgänge charakterisieren⁸. Die Werte für die Grenzschubspannung betragen $\alpha_2 = 1,75$ und $\theta_2 = 7,82$; die Werte für die Viskosität betragen $\alpha_1 = 0,0405$

⁸ Ein Vergleich durch Ausprobieren anderer Werte und die Erfahrung der Abenis Alpinexpert GmbH bestätigten die Anwendbarkeit der Parameter von Kang und Zhang (1980) für dieses Gebiet.

und $\beta_1 = 8,29$. Weiters wird die spezifische Gravitationskraft der Feststoffe mit 2,65 angegeben und der laminare Fließwiderstand mit 5000.

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C v}$$

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C v}$$

Formel 5.13

Nach dem Aufladen aller Layer wird die Simulation gestartet. In einem externen Fenster kann man die Simulation mit verfolgen (Abbildung A.7 im Anhang).

5.3.5 Klassifikation

Am Ende des Wellendurchlaufs in FLO-2D lagen für jedes Rasterelement Fließtiefe, Geschwindigkeit und Druck vor, jeweils in einem Shapefile gespeichert. In ArcGIS9.3 wurden die Ergebnisse klassifiziert. Angewandt wurde jenes Klassifikationsschema für Vermurung, das der Gefahrenzonierung in Südtirol zu Grunde liegt (Kapitel 2.2.3). Bei Wassergefahren gelten grundsätzlich die drei Intensitätsstufen *mittel*, *hoch* und *sehr hoch*. Bei Murgängen sind mittlere Intensitäten jedoch nicht bekannt. *Hohe* Intensität wird durch Ablagerungsmächtigkeiten $\leq 1 \text{ m}$ oder Geschwindigkeiten $\leq 1 \text{ m/s}$ repräsentiert, *sehr hohe* Intensität durch Ablagerungsmächtigkeiten $> 1 \text{ m}$ oder Geschwindigkeiten $> 1 \text{ m/s}$. Die Auswahl der Intensitätsstufe soll aufgrund des *ungünstigeren* Parameters (Ablagerungsmächtigkeit oder Geschwindigkeit) getroffen werden. Die Ablagerungsmächtigkeiten fallen in vorliegender Arbeit ungünstiger aus. Da die Simulation von Ablagerungen jedoch generell schwierig ist, da sie stark an topographische Gegebenheiten gebunden ist, wird nach Fließhöhen klassifiziert.

Für ein Bemessungsereignis ließe sich die Zonierung durch einfaches Reklassifizieren der Ergebnisse erreichen – da im GZP jedoch die Ergebnisse von allen drei Bemessungsereignissen zusammengefasst werden, reicht dieser Schritt nicht aus. Einer Rasterzelle soll jeweils die höchste berechnete Gefahrenstufe zugewiesen werden. Erhielte man als Ergebnis für HQ30 und HQ100 beispielsweise eine Ablagerungshöhe $< 1 \text{ m}$ (hohe Gefahr), für HQ300 aber darüber (sehr hohe Gefahr), so würde die Rasterzelle mit sehr hoher Gefahr ausgewiesen.

Die Lösung wurde demnach durch ein Additionsverfahren im *Raster Calculator* erreicht. Dafür wurde nach einer Umwandlung der Shapefiles in Raster eine einfache Reklassifizierung in *hohe* ($< 1 \text{ m} \rightarrow \text{Wert } 1$) und *sehr hohe* Intensität ($> 1 \text{ m} \rightarrow \text{Wert } 2$) vorgenommen (Befehl: *Reclassify*). Zellen ohne Daten wurde die Klasse 0 (Null) zugewiesen. Anschließend erfolgte die Addition der reklassifizierten Raster im *Raster Calculator* nach dem Schema *Output = (rec_HQ30+rec_HQ100+rec_HQ300)*. Damit erhält jede Rasterzelle einen Wert, aus dem die Zusammensetzung der unterschiedlichen Bemessungsereignisse hervorgeht: Werte von 1 bis 3 können nur zu Stande kommen, wenn die Intensitäten aller drei Bemessungsereignisse *hoch* sind

(1+1+1), alle Werte > 3 beinhalten mindestens eine *sehr hohe* Intensität. So können alle möglichen Kombinationen berücksichtigt werden. Eine erneute Reklassifizierung in *hohe* Intensität mit Werten von 1 bis 3 und *sehr hohe* Intensität mit Werten von 4 bis 12 ergibt die Gefahrenzonen (diese Klassifizierung wurde in Kapitel 2.2.3, Abbildung 2.3 bereits dargestellt).

5.4 Validierung der Simulationsergebnisse

Die Validierung der Simulationsergebnisse in FLO-2D erfolgte einerseits anhand der bestehenden Schutzbauten, andererseits anhand von dokumentierten Ereignissen. Schutzbauten werden in der Regel für 100-jährliche Ereignisse konzipiert, die Simulationsergebnisse für 100-jährliche Ereignisse wurden somit daraufhin geprüft.

Für die dokumentierten Ereignisse wurde zunächst eine Ereignisanalyse durchgeführt. Vorwiegend wurde dafür die Ereignisdatenbank ED30 der Provinz verwendet, daneben wurde zusätzlich nach folgenden Quellen gesucht (Zischg et al. 2007):

- gedruckte Dokumente: Zeitungen, Annale, Studien, technische Berichte
- handgeschriebene Dokumente: Chroniken, Tagebücher, Notizen, Urkunden
- Zeichen auf dem Gebiet, z.B. Schilder, Votivtafeln
- historische Karten, z.B. planimetrische Darstellungen, geografische Karten
- historische Fotografien
- mündliche Aussagen

Wesentliche Stichpunkte für die Analyse bildeten Zeitpunkt des Geschehens, Informationen zu Vorbedingungen und Ursachen, betroffene Fläche, mobilisierte Feststoffe und dokumentierte Schäden.

6 Ergebnisse

6.1 Morphologische Charakterisierung der EZG

Im ersten Ergebnisteil finden sich die mittels GIS berechneten Einzugsgebiete mit ausgewählten Gebietseigenschaften und die Ergebnisse der Geländebegehung, die einerseits die kartographische Verortung von relevanten Prozessen, andererseits die eigentliche Feststoffschätzung beinhalten.

6.1.1 Vorbereitende Analyse in GIS

Die untersuchten Einzugsgebiete am Nordwest-Hang des Langtauerertals beginnen in den Karen am italienisch-österreichischen Grenzkamm. Sie schließen jeweils aneinander an und nehmen lediglich den Kammbereich des Gschwellbachs, der nicht untersucht wird. Abbildung 6.1 zeigt die sieben EZG mit den Hauptgerinnen in unterschiedlichen Farben.

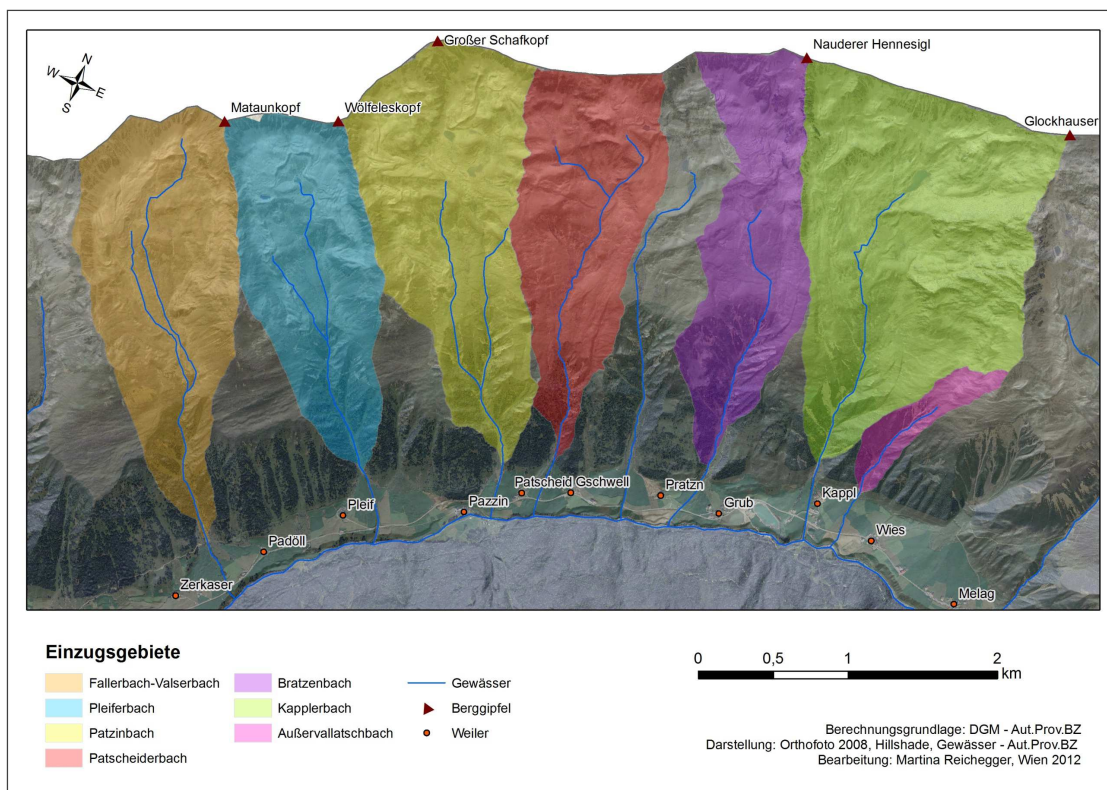


Abbildung 6.1: Berechnete Einzugsgebiete

Die Größe der EZG schwankt zwischen 26 ha (0,26 km²) für den Außervallatschbach und 3,23 km² für den Kapplerbach. Die anderen EZG entwässern eine je etwa 2 km² große Fläche (Tabelle 6.1). Aufgrund der bereits angesprochenen Gegebenheiten des Gletschertals (Kapitel 3) findet man die mittlere Höhe der EZG einheitlich auf etwa 2.500 m s.l.m., etwas oberhalb der aktuellen Waldgren-

ze (ca. 2.200 m), und die minimale Höhe (Austritt der Bäche auf die Schuttkegel) mit talauswärt abnehmenden Werten auf 1.961 m bis 1824 m. Die höchsten Punkte bilden die Gipfel der Öztaler Alpen: der Mataunkopf (2.893 m), der Wölfeleskopf (2.893 m), der Große Schafkopf (2.998 m), der Nauderer Hennesigl Spitz (etwas westlich davon: 3.042 m) und der Glockhauser (3.027 m; etwas abseits des höchsten Punkts des Kappler-EZGs). Eine Ausnahme bildet das kleinste EZG, das des Außervallatschbachs, welches seinen höchsten Punkt auf 2.654 m am Trogknick des Tals hat.

	Faller- Valser	Pleifer	Patzin	Patscheider	Bratzen	Kappler	Außer Vallatsch
Fläche [km²]	2,12	1,71	2,32	1,73	1,56	3,23	0,26
Min. Höhe [m]	1824	1891	1870	1892	1916	1961	1950
Mittlere Höhe [m]	2506	2498	2528	2512	2518	2590	2302
Max. Höhe [m]	2892	2893	2998	2936	3042	3027	2654
Mittlere Neigung [°]	26	28	26	22	26	26	32
Waldgrenze [m]	2220	2240	2270	2220	2210	2190	2160
Bewaldung [%]	4,7	8,5	4,8	4,3	6,2	1,2	10,8
Geologie OL	HVS	HVS, Mo- räne i.A.	HVS	HVS, Mus- kovit	Moräne	Moräne	/
Geologie ML	HVS	PG	PG, HVS	PG	PG, HVS	PG	PG, Amph.
Geologie UL	SK	SK	SK	SK	SK	SK, Moräne	SK, Moräne
Gefälle OL [°]	23	27	28	23	20	26	/
Gefälle ML [°]	48	45	44	50	43	40	54
Gefälle SK [°]	31	32	29	30	22	23	25
Verbauung ML	/	/	/	15 Sper- ren*	/	13 Sperren 1 Mauer	/
Verbauung SK	2 Sperren Schwellen*	/	2 Mauern 1 Schwelle 1 Sperre Künette	Künette	Künette	10 Schwellen 2 Sperren 1 Mauer Künette	4 Mauern Graben

Tabelle 6.1: Charakteristika der Einzugsgebiete (*= nicht im BAUKAT registriert; Abkürzungen: OL = Oberlauf, ML = Mittellauf, UL = Unterlauf, SK = Schuttkegel, HVS = Hang- und Verwitterungsschutt, PG= Feinkoernige Paragneise; Glimmerschiefer u. Gneise mit Muskowit u. Granat, Amph. = Versch. Amphibolite; Eklogite; Peridotite)

Ausgehend von den geomorphologischen Gegebenheiten des Tals lassen sich die Bachläufe jeweils grob in Oberlauf (OL), Mittellauf (ML) und Unterlauf (UL) einteilen, wobei der Oberlauf das Kar und den relativ leicht geneigten Hang oberhalb der Trogschulter umfasst (20-28°), der Mittellauf die steilen Hänge umfasst (40-50°) und der Unterlauf aus dem Schuttkegel besteht (22-31°). Eine Ausnahme stellt wiederum der Außervallatschbach dar, der so gesehen keinen Oberlauf hat. Die Bewaldung beschränkt sich auf die Mittelläufe und stellt, abhängig von der Lage und der Größe der EZG, zwischen 1,2 % und 10,8 % der Gesamtfläche dar. Durch die quartäre Überprägung setzen sie sich im oberen Teil hauptsächlich aus Hang- und Verwitterungsschutt bzw. aus Moränenmaterial zusammen, und im mittleren Teil findet sich neben Schuttmaterial hauptsächlich anstehendes Gestein (Paragneise, Glimmerschiefer, Gneise, Amphibolite).

Die Mittel- und Unterläufe der Bäche sind teilweise verbaut. Den geringsten Verbauungsgrad weisen der Faller-, der Pleifer- und der Bratzenbach auf; am stärksten verbaut ist der Lauf des

Kapplerbachs. Mit Ausnahme des Faller- und des Pleiferbachs, die in ihren natürlichen Gräben fließen, sind die Unterläufe durch Künetten eingeregelt. Der Unterlauf des Außervallatschbachs hat einen künstlichen Graben für die Fassung von Murmaterial. Schutzmauern für den Materialrückhalt und für die Richtungsweisung finden sich in den Kegelbereichen der Bäche Patzin, Kappler und Außervallatsch. Verbauungen in Form von Konsolidierungssperren existieren außerdem in den Mittelläufen von Patscheider- und Kapplerbach. Laut Bautenkataster ist 2003 das Erbauungsjahr (bzw. das Jahr der Instandhaltung). Die Verbauungen des Außervallatschbachs stammen aus dem Jahr 2010. Mit Ausnahme des Kapplerbachs, dessen Konsolidierungssperren zwei Mängel aufweisen („Kronenstein ausgebrochen“, „am rechten Flügel unterspült“), sind alle Schutzverbauungen in gutem Zustand.

6.1.2 Geomorphologische Übersichtskartierung

Durch die geomorphologische Kartierung wird auf die in den Einzugsgebieten dominanten Prozesse hingewiesen: periglaziale Prozesse, fluviale Prozesse und gravitative Massenbewegungen. Die Abbildung A.9 (im Anhang) ist das Ergebnis der Kartierung, die im Anschluss an die Geländebegehung mit Hilfe des Orthofotos und des Höhenmodells (Hillshade, Neigungskarte) um weitere Einzelheiten ergänzt wurde. Darin kennzeichnen violette Farbtöne die periglazialen Prozesse, Blautöne die fluvialen Prozesse und Grüntöne die Murenprozesse als Kombination von fluvialen Prozessen und gravitativen Massenbewegungen. Daneben sind bestehende Verbauungen rosa eingefärbt. In der Karte wird die räumliche Dominanz der Prozesse besonders deutlich. Periglazialprozesse konnten im Karbereich verortet werden, wo die Bäche ihren Ursprung haben. Am Hang und am Hangfuß wird die Aktivität der Wildbäche deutlich. Es folgen Beschreibungen dreier repräsentativer Ausschnitte der Kartierung.

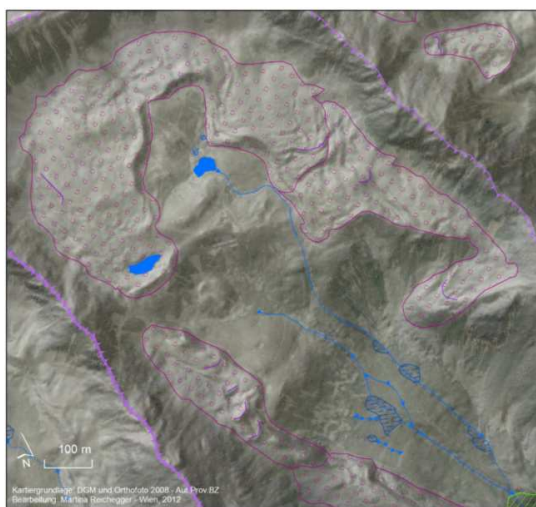


Abbildung 6.2: Kar (Pleiferbach)

Eindeutige, die Einzugsgebiete umschließende Kare weisen die Bäche Faller, Pleifer (Abbildung A.9) und Kappler auf. Hier, von etwa 2.400 m ansteigend bis zum Kamm, gibt es Schutthalden, in denen teilweise klare Fließstrukturen erkennbar sind. Diese Schuttströme, die aufgrund von Gelifluktion in Bewegung sind, konnten in allen EZG als inaktiv eingestuft werden; die teilweise leicht eingefallenen oder grasbedeckten Formen und auch die Einordnung von bereits bestehenden Kartierungen bestätigen dies (kartierte Blockgletscher, Kapitel 4.6). Inmitten der Schuttströme finden sich die dauernd bzw. zeitweise aktiven Quellen der Gebirgsbäche. Außerdem sammelt sich in den Hohlformen der Kare Wasser in Seen, die in einigen Fällen auch als (dauernde) Quellen fungieren. Muldenseen sieht man vor allem an den Zungen der gefrorenen Schuttströme, wo sie langsam auftauen oder einsacken und sich Niederschlag sammelt.



Abbildung 6.3: Hang (Patzinbach, links) und Kegel (Außervallatschbach, rechts)

Im Hangbereich der Einzugsgebiete wird die Erosionskraft der Wildbäche an zahlreichen Nischen deutlich. Ihre Formen deuten auf ein Zurückweichen der Hänge durch rückschreitende Erosion hin. Die größten (aktiven und inaktiven) Geschiebeherde von Murgängen befinden sich oberhalb der bewaldeten Hänge. Daneben finden sich auch zahlreiche Spuren von oberflächlicher Bodenerosion, die nicht unbedingt mit dem Gerinne verbunden sein müssen. In Abbildung 6.3 sieht man am Beispiel des Patzinbaches das Nebeneinander an aktiven und inaktiven Erosionsflächen (hell- bzw. dunkelgrün) und Transportrinnen von Murgängen im oberen Mittellauf. Daneben fallen unbewaldete Tiefenlinien auf, die vermutlich als Lawenstriche⁹ fungieren.

Der dritte Ausschnitt aus der geomorphologischen Kartierung zeigt den Ablagerungsbereich des Außervallatschbachs. Oberhalb einer Schutzverbauung am Hangaustritt findet sich eine typische

⁹ Lawenstriche wurden nicht kartiert

Ablagerungsfläche von Muren mit Murkopf und Levées (Abbildung 6.3, rechts). In den anderen EZG ist dieser Ablagerungsbereich nicht so deutlich ausgebildet, oft sind die Bäche am Hangaustritt verbaut oder das Tal ist generell sehr eng. Auch Ablagerungen von Murgängen auf den Kegeln sind selten, offenbar werden und wurden die Kegel für die landwirtschaftliche Nutzung eingeebnet. Ein Beispiel für einen Kegel, der die Beeinflussung von Muren deutlich macht, ist der Pleiferbach (Abbildung A.12 im Anhang). Weitere Ablagerungen von Murgängen konnten entlang der Bäche Patscheider und Außervallatsch beobachtet werden (Abbildungen A.14 und A.19, jeweils rechts, im Anhang). Diese Formen sind in der Kartierung als Levées gekennzeichnet.

6.1.3 Mobilisierbare Feststoffvolumen

Die folgenden Tabellen (Tabellen 6.2 bis 6.8) enthalten die Ergebnisse der geomorphologischen Methode. Die einzelnen Abschnitte (A) werden anhand folgender Attribute beschreiben: kumulierte Höhe in Hektometern, Prozesscharakter, Geologie (basierend auf der geologischen Karte), mittlere Gerinnebreite, Gefälle, Länge und geschätztes maximal mobilisierbares Volumen. Die Volumen sind dabei einerseits Mengenangaben pro Laufmeter (m^3/lfm) oder auch punktuelle Eintritte (Seiteninput SI) in Form von Erosionsflächen oder Erosionskanälen in das Gerinne. Die Unterteilung der Abschnitte erfolgte unabhängig von der grundsätzlichen Teilung in Ober-, Mittel- und Unterlauf (Kapitel 6.1.1) und versteht sich *entgegen* der Fließrichtung. Die Kartierung der Bach-Abschnitte findet sich in Abbildung A.10 im Anhang. Aufgrund der teils sehr steilen bzw. zugewachsenen Gerinneabschnitte im Mittellauf konnten die zu erhebenden Parameter nicht alle vor Ort aufgenommen werden. Teilweise wurden sie daher mittels des Höhenmodells (z.B. Gefälle), des Orthofotos und eigenen Bildaufnahmen (z.B. des Feststoffvolumens) geschätzt. Die Werte der Gerinnebreite fehlen für diese Abschnitte jedoch.

Fallerbach-Valserbach

Das Gerinne des Fallerbachs wurde in vier Abschnitte unterteilt (Tabelle 6.2). Im ersten ist das Bachbett teilweise gepflastert, wodurch kaum Erosion möglich ist. Im zweiten Abschnitt (oberhalb des Wasserspeichers) wird Material zwischengelagert (Abbildung A.11 im Anhang), hier werden $2,5 \text{ m}^3$ mobilisierbares Geschiebe pro Laufmeter angenommen. Danach wird das Gerinne sehr steil und eng, orographisch links stößt man auf anstehenden Fels und rechts auf wuchernde Strauchvegetation; eine weitere Begehung war hier nicht mehr möglich. Die wenigen möglichen Feststoffherde können jedoch mittels GIS im Hang- und Verwitterungsschutt verortet werden.

Die auf alle Abschnitte summierte Menge an mobilisierbaren Feststoffen beläuft sich auf 2.655 m^3 . Es werden keine Seiteninputs angenommen. Für das HQ30 lässt sich ein um 20 % ver-

minderter Wert berechnen, und im HQ300 kommen zwei weitere derzeit inaktive Erosionsflächen hinzu.

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m³/lfm]	SI [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]
1	0 - 1,63	reguliertes Bachbett, Geschiebetransport,	SK	~ 3,5	16	561	0,5	0	280	Verminderungs-faktor HQ30/ HQ100	2 inaktive Flächen, A3: Erosion 0,2m
2	1,63 - 3,03	Zwischenlagerung	HVS, PG	-	18	370	2,5	0	926		
3	3,03 - 6,03	Geschiebetransport, Erosion	HVS	-	27	580	2,5	0	1.449		
4	6,03 - 10,28	Oberlauf	HVS	-	14	1708	0	0	0		
								2.655		2.166	4.655

Tabelle 6.2: Feststoffschatzung Fallerbach

Pleiferbach

Der Pleiferbach fließt im Unterlauf als einziger der sieben Bäche unverbaut in seinem natürlichen Graben. Auf 1.822 m s.l.m., bei der bestehenden Sohlschwelle, wird dem Bach ein zweiter Abschnitt zugeordnet, in dem sich Altschutt und Äste von Sträuchern sammeln (1,25 m³/lfm) (Tabelle 6.3). Oberhalb des Waldes beginnt der dritte Abschnitt, in dem sich das Bachbett etwas verbreitert und das Gelände steiler wird. In diesem Abschnitt gibt es orographisch links einen markanten Graben, in dem gegenwärtig jedoch kein Wasser fließt. Ihm sind viele kleine offene Grasnarben zuzuordnen, die die oberste Verwitterungsschicht freilegen (Abbildung 6.4). Für das HQ100 wird aus diesem Graben ein Seiteneintrag von 120 m³ miteinbezogen. Der vierte Abschnitt bildet den Übergang zum Oberlauf. Im Gegensatz zu den darunter liegenden Abschnitten 2 und 3 findet hier aufgrund der höheren Neigung keine Zwischenlagerung statt. An zahlreichen kleineren vegetationslosen Flächen ist anstehender Gneis sichtbar (feinkörnige Paragneise), dessen oberste Verwitterungsschicht in die Schätzung des HQ300 Eingang findet. Für das HQ300 resultieren aus der Schätzung 1.415 m³, für das HQ100 resultieren 3.979 m³ und für das HQ30 ergibt sich ein um 0,83 verminderter Wert.

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m³/lfm]	SI [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]
1	0 - 0,85	UL unverbaut bis Sohlschwelle	SK	~ 1,6	13	265	0	0	0	Verminderungs-faktor HQ30/ HQ100	diverse Flächen (12.819 m²; Erosion 0,2m)
2	0,85 - 1,53	Geschiebe und Totholz, Ablag	SK	~ 2,5	17	234	1,25	0	293		
3	1,53 - 4,93	Geschiebe und Totholz, Ablag	SK, HVS	~ 3,4	23	869	1	120	989		
4	4,93 - 5,03	Erosion, steil	HVS (M i.A.)	~ 2,9	27	265	0,5	0	133		
5	5,03 - 9,12	Oberlauf	HVS, M i.A.	-	20	1.135	0	0	0		
								1.415		1.163	3.979

Tabelle 6.3: Feststoffschatzung Pleiferbach

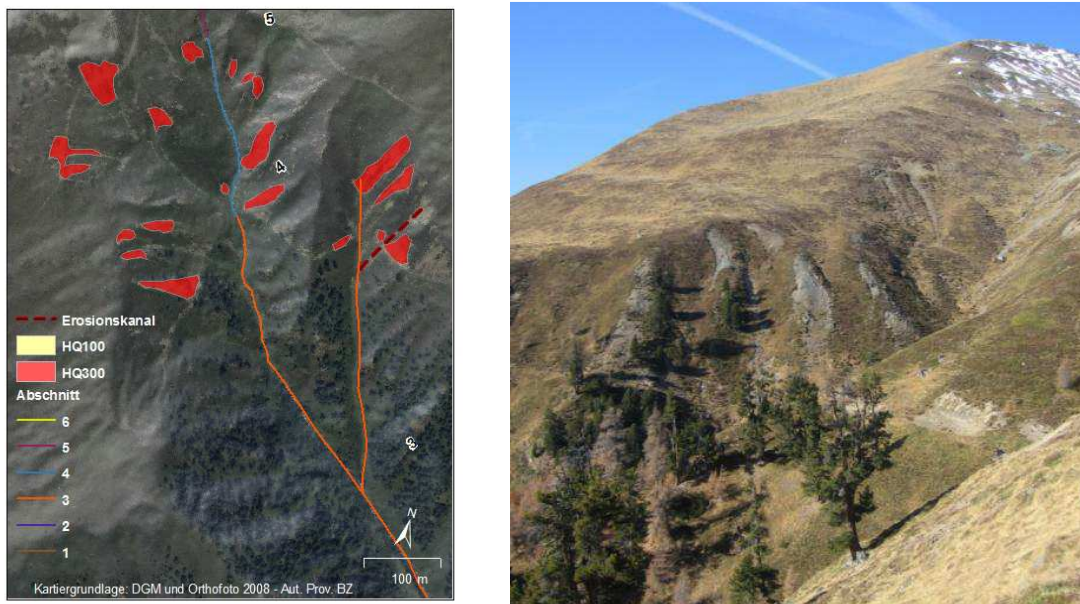


Abbildung 6.4: Kartierung und Fotodokumentation, Pleiferbach, oberes EZG

Patzinbach

Der Patzinbach lassen sich im Unterlauf in zwei Prozessabschnitte unterteilen: von der Mündung in den Karlinbach bis auf 1.834 m s.l.m. ist der Bach durch eine Künette eingeregelt (mit Sperren von 5 m Abstand in der Künette) (Tabelle 6.4), der daran anschließende Abschnitt 2 ist sehr kurz (138 m) und etwas flacher, und unterscheidet sich von A1 hauptsächlich dadurch, dass es sich um einen Ablagerungsbereich handelt. Die Ablagerung findet innerhalb zweier Erdwälle statt (orographisch links 3,5 m hoch, rechts 4 m hoch). Am bewaldeten Hang wird das Gelände steiler, auf dieser Strecke kann Geschiebe transportiert werden ($2,5 \text{ m}^3/\text{lfm}$). Als Seiteninput wird eine kleine Ablagerungsfläche (42 m^3) dazugerechnet. Auf 2.068 m s.l.m. treffen zwei Fließarme aufeinander. Im Hauptarm liegt weniger mobilisierbares Material im Gerinne, für den Zufluss werden diverse kleinere Flächen (269 m^3) sowie eine Erosionsrinne (10 m^3) addiert. Abschnitt 5 ist durch Erosion gekennzeichnet (Abbildung 6.5). Aufgrund der Ablagerungen im und entlang des Gerinnes werden $5 \text{ m}^3/\text{lfm}$ abgeleitet. Zusätzlich wird ein beträchtlicher Seiteninput einberechnet (Erosionskanal: 94 m^3 und 1.602 m^3 aus Flächen). Geologisch fällt dieser Abschnitt in den Bereich des Hang- und Verrittungsschutts. Das feine Material im Bachbett lässt aber auch verlagertes Moränenmaterial der Erosionsnischen vermuten. Insgesamt ergibt die Schätzung für das HQ30 mobilisierbares Geschiebe von 4.128 m^3 , für das HQ100 4.990 m^3 und für das HQ300 6.075 m^3 .

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m³/lfm]	SI [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]
1	0 - 0,72	Künette	SK	~ 5,5	16	257	0	0	0	Verminderungsfaktor HQ30/HQ100	diverse Flächen (5.425m²; Erosion 0,2m)
2	0,72 - 1,12	Ablagerung; Dämme	SK	~ 5,7	14	138	0	0	0		
3	1,12 - 2,87	Geschiebetransport	HVS	~ 5,5	19	525	2,5	42	1.354		
4	2,87 - 3,77	Geschiebetransport	HVS	-	21	236	2		473		
Z (4)		Geschiebetransport und Erosionsflächen	HVS	-	25	333	0	279	279		
5	3,77 - 4,27	Erosionsflächen	HVS	-	12	238	5	1697	2.885	0,83	1.085
6	4,27 - 9,00	Oberlauf	HVS, M	-	24	1.056	0	0	0		
								4.990		4.128	6.075

Tabelle 6.4: Feststoffschtzung Patzinbach

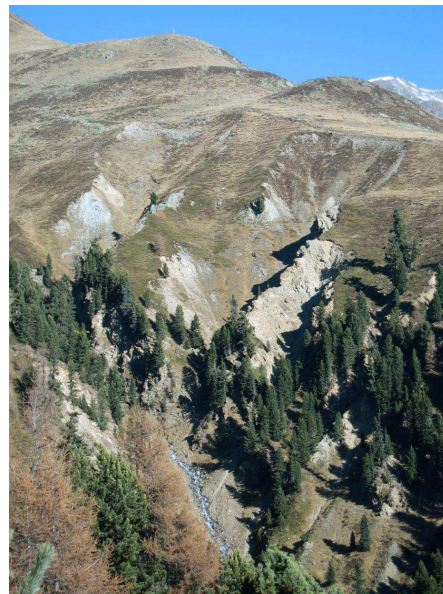
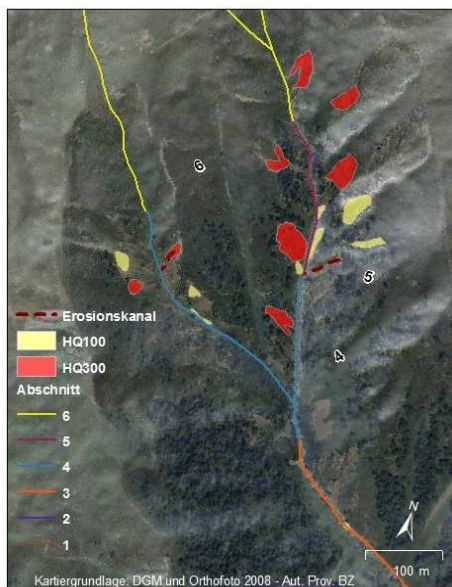


Abbildung 6.5: Kartierung und Fotodokumentation, Patzinbach

Patscheiderbach

Der Patscheiderbach lässt sich vergleichsweise einfach in Abschnitte unterteilen. Sein Kegelbereich bildet den Abschnitt 1 (Tabelle 6.5). Daran schließt eine Transportstrecke mit einer Reihe von Konsolidierungssperren an, auf der sich Transport und Zwischenlagerung abwechseln (Abbildung A.14 im Anhang). Kleine Geschiebeinseln werden in die Schätzung von 2 m³/lfm einbezogen. Ab einer Höhe von 1.940 m s.l.m. fallen parallel zum Gerinne laufende Murenablagerungen auf. Diese sind offensichtlich schon älter, teilweise sind sie überwachsen und das Feinmaterial ist ausgewaschen. Auf 2.200 m s.l.m. beginnt mit der Verengung des Tals der dritte Abschnitt. Der gesamte Mittellauf (A2 und A3) befindet sich innerhalb der Zone der Paragneise und Glimmerschiefer, anstehendes Gestein ist hier zu beiden Seiten des Bachs sichtbar. Ab dort ist zu Fuß kein Weiterkommen mehr

möglich. Trotzdem kann man von weiter oben und auf dem Luftbild die Geschiebeherde des Bachs ausfindig machen. Die vegetationslosen Stellen werden für das HQ300 mit 10 cm Erosionstiefe berücksichtigt. Für das Gerinne werden, wie für A2, 2 m³/lfm mobilisierbare Feststoffe angenommen, womit insgesamt nur geringe Feststoffmengen resultieren. Der Oberlauf des Patscheiderbachs konnte besonders gut eingesehen werden (Abbildung 6.6).

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m ³ /lfm]	SI [m ³]	Feststoff [m ³]	Feststoff [m ³]	Feststoff [m ³]
1	0 - 1,15	Künette	SK	3	19	407	0	0	0	Verminderungs- faktor HQ30/ HQ100 0,8	diverse Flächen (2.883m ² : 288
2	1,15 - 2,35	15 Sperren; Transport und Ablag.	PG	~ 5	23	343	2	0	687		
3	2,35 - 4,25	Erosion	PG	-	21	490	2	0	981		
4	4,25 - 7,97	Oberlauf	HVS	-	11	1.839	0	0	0		
								1.668		1.354	1.956

Tabelle 6.5: Feststoffschätzung Patscheiderbach



Abbildung 6.6: Fotodokumentation Patscheiderbach (Oberlauf)

Bratzenbach

Auch der Bratzenbach ist im Unterlauf durch eine Künette verbaut. Im Orthofoto (und auch im Höhenmodell) wird ein ursprünglich anderer, zum Weiler Grub führender Gewässerlauf angedeutet. Von 1.900 m bis 2.140 m s.l.m. kann eine Transport- und Ablagerungsstrecke identifiziert werden (Tabelle 6.6, Abbildung A.13 im Anhang). Im unteren Bereich des 2. Abschnitts findet sich auch etwas Totholz, das jedoch nicht verklausungsgefährdend ist. Mit der Neigungsänderung oberhalb des Waldes beginnt Abschnitt 3. In diesem können diverse erodierbare Flächen und ein markantes, inaktives Murgerinne ausgemacht werden, in dem der Feinanteil gänzlich ausgewaschen ist (Abbil-

dung 6.7). Für ein 100-jährliches Ereignis wird dieser Kanal und eine ihm zugehörige Fläche mit einbezogen (zusammen 655 m³), im Bachbett selbst hingegen kann bei dieser Wiederkehrsdauer davon ausgegangen werden, dass sich Erosion und Ablagerung ausgleichen. Für das HQ300 werden zusätzliche Flächen eingerechnet und das mobilisierbare Volumen im Bachbett erhöht (Abbildung 6.7).

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m ³ /lfm]	SI [m ³]	Feststoff [m ³]	Feststoff [m ³]	Feststoff [m ³]
1	0 - 0,9	Künette	SK	~ 3,8	13	419	0	0	0	Verminderungsfaktor HQ30/HQ100	A2:2m ³ /lfm, A3:1,5 m ³ /lfm + Flächen (7.864m ² ; Erosion 0,1m)
2	0,9 - 3,25	Transportstrecke, Zwischenlagerung; bis 2100m Totholz	HVS, PG	~ 3	16	778	1,75	0	1361		
3	3,25 - 4,9	Erosionsflächen; Bachbett stabil	PG	~ 2	25 (33)	361	0	655	655		
4	4,9 - 7,91	Oberlauf	M	~ 1	17	984	0	0	0	0,84	786
								2.016		1.685	3.357

Tabelle 6.6: Feststoffschatzung Bratzenbach



Abbildung 6.7: Kartierung und Fotodokumentation Bratzenbach

Kapplerbach

Der Kapplerbach ist der am meisten verbaute der sieben untersuchten Bäche. Im Unterlauf ist der Verbaungsgrad des Kapplerbachs besonders hoch: das Bachbett wird durch eine Künette und einzelne Konsolidierungssperren gestaltet; außerdem zieht sich von 1.910 m eine Schutzmauer bis auf fast 1.950 m s.l.m., die den sehr knapp an das Gerinne neben dem Gerinne liegenden Weiler Kappl vor Naturgefahren schützen soll (Abbildung A.17 im Anhang). Mit dem Ende der Künette

beginnt Abschnitt 2, in der 13 Konsolidierungssperren Material sammeln und das Bachbett vor Erosion schützen (Tabelle 6.7, Abbildung A.16 im Anhang). In dieses Teilstück münden drei aktive Murgerinne: auf 1.980 m s.l.m. orographisch links (Abbildung A.16 im Anhang), auf 1.995 m und auf 2.035 m orographisch rechts. Für ein 100-jährliches Ereignis wird für diese drei Murgerinne eine Erosionstiefe von 1,2 m (links) bzw. 1 m (rechts) angenommen. Dazu werden für das Gerinne 1,75 m³/lfm mobilisierbare Feststoffe geschätzt, die sich zwischen den Sperren ablagern. Das Material besteht aus fein- und grobkörnigem Jung- und Altschutt, dazwischen gibt es Spuren vergangener Murereignisse. Den verbauten Abschnitt 2 schließt nach oben hin eine Trockenmauer ab. Oberhalb von dieser eröffnet sich auf orographisch rechter Seite eine rund 8 km² große Erosionsfurche, die bis an die obere Geländekante reicht (Abbildung 6.8). Diese völlig vegetationsfreie Fläche hat laut geologischer Karte im oberen Bereich Anteil an Moränenmaterial. Im unteren Bereich befindet sich eine etwa 1,5 km² große und teilweise 2 m mächtige Ablagerung mit reichlich Feinmaterial (2.800 m³). Neben einer weiteren kleinen Fläche am rechtsseitigen Hang (180 m³) wird für das HQ100 außerdem ein Geschiebebeitrag von 1,5 m³/lfm berechnet. Der Oberlauf des Kapplerbachs befindet sich gänzlich im Moränenbereich, womit auch feineres Material mitgespült werden kann. Für die 300-jährliche Schätzung wird das Volumen um lediglich zwei aktive, aber etwas weiter vom Bachlauf entfernte Flächen auf orographisch rechter Seite im Moränenmaterial erweitert.

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m ³ /lfm]	SI [m ³]	Feststoff [m ³]	Feststoff [m ³]	Feststoff [m ³]
1	0 - 0,8	Künette	SK, M	~ 3	15	411	0	0	0	Verminderungsfaktor HQ30/HQ100	diverse Flächen (3.398m ² ; Erosion 0,2m)
2	0,8 - 1,65	Konsolidierungssperren mit Ablagerung, Erosionskanäle	HVS, PG	~ 4	23	481	1,75	1.417	2.258		
3	1,65 - 3,3	unverbaut, Zwischenlag., Transport, Erosionsflächen	PG	~ 5	25	237	1,5	3.267	3.623		
4	3,3 - 5,67	Oberlauf	M	~ 2	23	1.589	0		0	0,83	680
								5.881		4.855	6.740

Tabelle 6.7: Feststoffschätzung Kapplerbach

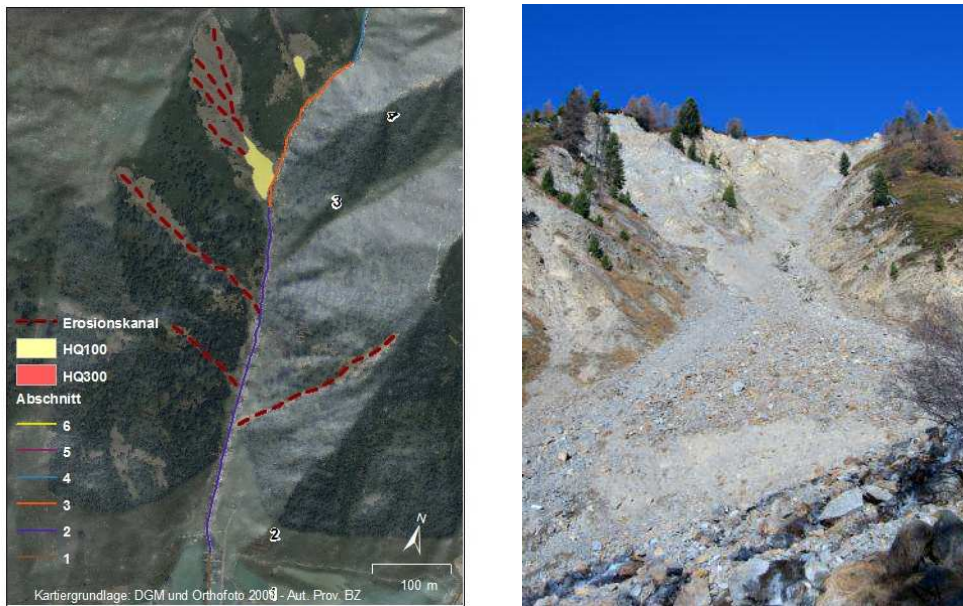


Abbildung 6.8: Kartierung und Fotodokumentation Kapplerbach

Außervallatschbach

Das kleinste untersuchte Einzugsgebiet befindet sich vollständig am Hang, mit Erosionsflächen im obersten Teil des Gerinnes (A4) (Tabelle 6.8). Die vielen vegetationslosen Furchen deuten auf rege Murgangaktivität in jüngster Vergangenheit hin. Die einzelnen Nischen wurden teilweise als Kanäle, teilweise als Flächen in die 100-jährliche Schätzung einbezogen (Abbildung 6.9). Sie nehmen den ganzen oberen Teil des Gerinnes ein; sie ziehen sich, ausgehend vom Bachbett, an den Hängen entlang bis an den Rand des Einzugsgebiets. Folglich wird davon ausgegangen, dass bei einem stärkeren Niederschlagsereignis als HQ100 nicht wesentlich mehr Material mobilisiert werden kann. Der darunter liegende Abschnitt 3 ist fast unbewaldet mit nur wenig Strauchvegetation, wodurch dieses Teilstück gut begehbar ist. Längs des Gerinnes gibt es hier eine gleichmäßige Ablagerung (Levéés), die die Höhe des letzten Ereignisses markiert. In diesem Abschnitt wird für das HQ100 $1,75 \text{ m}^3$ Material pro Laufmeter geschätzt. Darunter anschließend verbreitert sich das Tal deutlich, und plötzlich auftretende starke Unebenheiten und eine verringerte Neigung deuten auf den Auflandungsbereich der Muren hin (A2). Sowohl kleine Levées (Abbildung A.19 im Anhang) als auch ein deutlicher Murkopf (auf 2.025 m s.l.m.: 5,4 m bis 9,4 m breit, 5 m lang, 5 m hoch) weisen auf Murprozesse hin (Abbildung 6.9). Die Ablagerungen finden sich hinter vier Schutzmauern (Dämme aus Drahtschotterkörben), die die Mure in den darunter anschließenden Graben (A1) kanalisieren sollen (Abbildung A.18 im Anhang). Der Wasserlauf wird in östliche Richtung zum Weiler Wies abgeleitet.

								HQ100		HQ30	HQ300
A	Kumulierte Höhe [hm]	Beschreibung	Geol.	Breite [m]	Gefälle [°]	Länge [lfm]	Feststoff [m³/lfm]	SI [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]	Feststoff [m³]
1	0 - 1,15	Kanal für Gesteinschutts, Wasser wird nach Wies abgeleitet	SK, M	~ 6	35	444	0	0	0	Verminderungsfaktor HQ30/HQ100 0,88	keine zusätzlich aktivierbaren Flächen
2	1,15 - 1,99	Ablagerung, Murkopf;	PG, Amph.	~ 3	10 (20)	249	0	0	0		
3	1,99 - 3,49	Transportstrecke	PG	~ 3	28	313	1,75		547		
4	3,49 - 5,61	Erosionsflächen	PG	~ 2	44	372	0	2.192	2.192		
									2.739	2.422	2.739

Tabelle 6.8: Feststoffschatzung Außervallatschbach

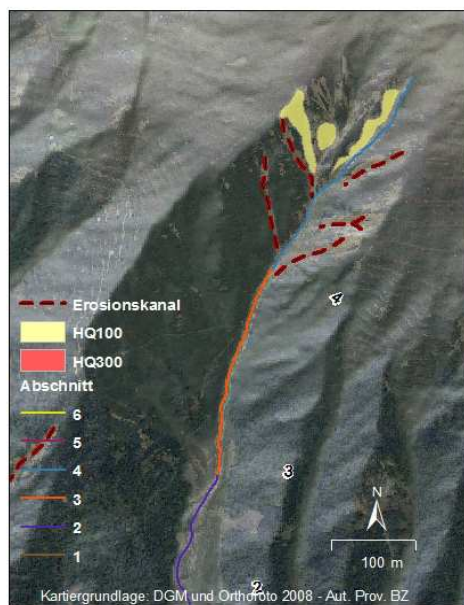


Abbildung 6.9: Kartierung und Fotodokumentation Außervallatschbach

6.2 Abflussganglinien

6.2.1 Curve Number

Abbildung A.20 im Anhang und Tabelle 6.9 sind das Ergebnis der Zuweisung von CN-Werten aus der Kombination der geologischen Permeabilität und der Bodennutzung (Kombinationsmatrix, Tabelle A.2 im Anhang). Im Untersuchungsgebiet gibt es demnach keine Böden der Permeabilitätsklasse 3 (z.B. flachgründige Sandböden, sandige Lehmböden mit geringem Versickerungsvermögen; vgl. Tabelle Methode) und nur wenige Böden der Permeabilitätsklasse 2 (mittleres Versickerungsvermögen, Moränenmaterial). Hauptsächlich werden die Klassen 1 (großes Versickerungsvermögen, Schuttmaterial) und 4 (geringes Versickerungsvermögen, Metamorphite) vorgefunden.

Alle vorgefundenen Kombinationen aus geologischer Permeabilität und Landnutzung finden sich in Tabelle 6.9. Die Ergebnisse der Curve Number erreichen Werte zwischen 30 und 100. Sehr hohe Werte bedeuten, dass ein Großteil des Niederschlagswassers oberflächlich abfließt (z.B. für Fels ohne oder mit Schuttbedeckung, Wald auf Anstehendem). Bei niedrigen Werten kann ein Großteil des Niederschlags versickern (z.B. Grasland oder Wald auf Schuttmaterial). Stehenden Gewässern wurde ein theoretischer Wert von 100 zugewiesen.

Die räumliche Verteilung (Abbildung A.20 im Anhang) zeigt in den Karen ausgedehnte Bereiche an grauen (CN 30), roten (53) und grünen (72, 52) Flächen. Der Kamm ist hellblau (99) markiert. Am Hang dominieren die Farben violett (36), braun (79) und rosa (78). In hellgrün (94), teilweise auch in rot (53) stechen die Erosionsnischen der EZG hervor, die vegetationsloses Lockermaterial auf Fels bzw. auf Schuttmaterial darstellen.

CN	Realnutzung	Permeabilität	
30	Grasland / bestocktes Grasland / Ackerland	&	1
36	Wald	&	1
52	Krummholz und Latschen	&	1
53	Vegetationsloses Lockermaterial	&	1
58	Grasland / bestocktes Grasland / Ackerland	&	2
71	Fels	&	1
72	Vegetationsloses Lockermaterial	&	2
78	Grasland / bestocktes Grasland / Ackerland	&	4
79	Wald	&	4
88	Fels bzw. Krummholz und Latschen	&	2 bzw. 4
94	Vegetationsloses Lockermaterial	&	4
99	Fels	&	4
100	Stehende Gewässer / Feuchtflächen		-

Tabelle 6.9: Berechnete CN-Werte¹⁰

¹⁰ Die Farben entsprechen der Legende in Abbildung A.20 im Anhang

6.2.2 Reinwasserabflüsse

Es werden nun die Ergebnisse der Abflussmodellierung aufgeführt. Zuerst werden die Ergebnisse der Modellierung mit der Software HyGrid2k2 beschrieben. Anschließend folgt die Präsentation der Abflussganglinien.

Das Ergebnis des HyGrid2k2-Moduls PITREMOVER ist eine Textdatei, in der jedes als Senke (Pit) identifizierte Pixel aufgelistet wird. Die Pixel haben eine Ortsinformation (Zeile, Spalte, Höhe der Zelle), sowie die neu zugewiesenen Höhe. Dieses neue Höhenmodell ohne Senken wird im Modul UPSLOPE AREA weiterverarbeitet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist ein Raster mit der Anzahl an Zellen, die jeweils in ein Pixel entwässern. Daneben werden die Fließdistanz (hydrographische Distanz in m) und die Fließrichtung (Azimuth) abgespeichert. Anhand der Ergebnisdateien des Moduls UPSLOPE AREA und anhand eines Grenzwerts wurde im nächsten Modul, AREA HYDRO NET, ein synthetisches Netzwerk entworfen.

Anschließend erfolgte die Plausibilitätsprüfung in ArcGIS9.3, wobei das errechnete Fließnetz daraufhin kontrolliert wurde, ob natürliche Tiefenlinien mit den Fließwegen übereinstimmen. Abbildung 6.10 zeigt am Beispiel des Pleiferbachs den Unterschied zweier Grenzwerte für die Gewässerdichte. Das grüne Netz entspricht einem Grenzwert von 1,5 ha (2.400 Pixel, weniger dichtes Netz), die rote Erweiterung einem Grenzwert von 1 ha (1.600 Pixel, dichteres Netz). Der Vergleich der natürlichen Tiefenlinien und des bestehenden Gewässernetzes mit dem synthetischen Netz lieferte grundsätzlich bessere Übereinstimmungen beim dichteren Netz, womit für alle Einzugsgebiete 1.600 Pixel als Grenzwert angewandt wurde.

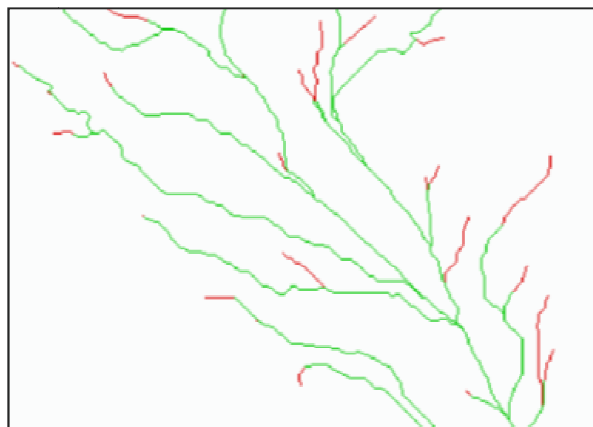


Abbildung 6.10: Synthetisches Gewässernetz in ROUTING TIME mit verschiedenen Grenzwerten (rot: 1600, grün: 2400)

Mit dem erstellten Gewässernetz erfolgte anschließend die Berechnung der Fließzeiten bis zum Gebietsauslass mit Hilfe des kinematischen Ansatzes im Modul ROUTING TIME. Das daraus resultierende Raster findet neben der Curve Number Eingang in das Modul Cinematic Local Excess Model (CLEM).

Die Abflussberechnung im CLEM liefert drei Ergebnisfenster. Parameter Definition enthält die gewählten Eingabeparameter und die Berechnungsdauer. Die Simulationsergebnisse (Simulation results) umfassen detaillierte Ergebnisse des Abflusses, außerdem auch die durch die Bodenfeuchte veränderte Curve Number. Von Interesse ist der maximale Spitzenabfluss (Maximum discharge, Total) (Abbildung 6.11). Daneben muss darauf geachtet werden, dass die gesamte Fläche zum Abfluss beiträgt (Contributing area = 100 %) und der veränderte CN-Wert zwischen 88 und 92 liegen soll (Cazorzi 2002).

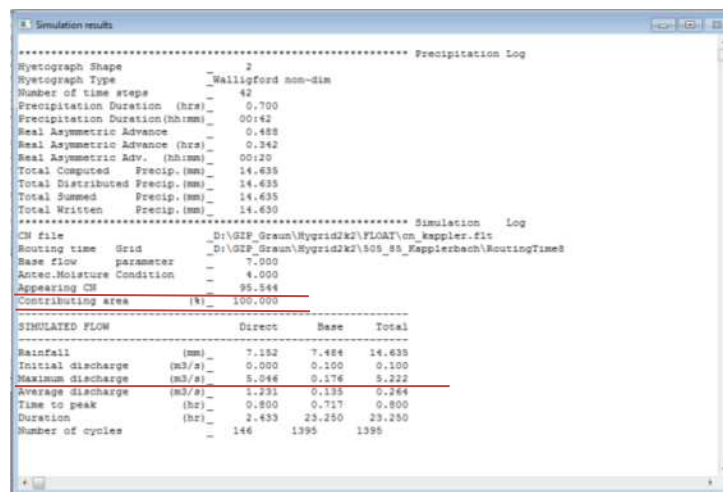


Abbildung 6.11: Ausgabefenster "Simulation results" CLEM (gekennzeichnete Informationen sind von Interesse)

Das dritte Ergebnisfenster ist die graphische Darstellung des berechneten Abflusses (Abbildung 6.12). Es zeigt die Abflussganglinie mit dem Gesamtabfluss, dem Direktabfluss und dem Basisabfluss (dunkelgrün, rot bzw. blau). Links auf der oberen Achse ist der Verlauf des gesamten und des effektiven Niederschlags dargestellt (grün bzw. rot).

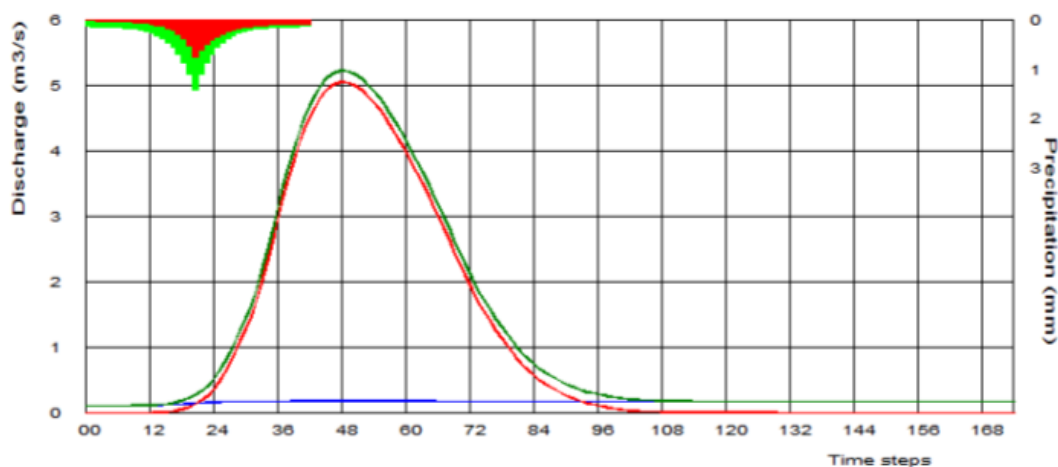


Abbildung 6.12: Hydrograph Kapplerbach HQ100, Berechnungszeit 0,7 Stunden, Wallingford

Im Zuge der Modellberechnung wird außerdem eine Simulationsdatei erstellt, die in Excel für die Verteilung der Feststofffrachten bearbeitet werden kann (in Kapitel 5.3.3). Neben dem zeitlichen Verlauf der totalen Abflusshöhe werden hier für jeden Zeitschritt auch Direkt- und Basisabfluss, Niederschlag und Speicherung angeführt.

Die graphische Darstellung der Abflussganglinien findet sich pro Bach und pro Bemessungsereignis in den Tabellen A.4 bis A.10 und Abbildungen A.21 bis A.27 im Anhang. Zusammengefasst werden die Ergebnisse in Tabelle 6.10. Pro Bemessungsereignis wird hier die kritische Beregnungsdauer aufgelistet. Weiters umfasst Tabelle 6.10 die auf die EZG-Fläche umgerechneten spezifischen Abflüsse q (q_{30} , q_{100} , q_{300}) und die an die Vorfeuchtebedingungen angepassten CN-Werte. Für fast alle Bäche führte der Niederschlagsverlauf Wallingford zu maximalen Abflüssen, im Fall des Außervallatschbachs wurde die Variante Alterned Blocks verwendet.

Die höchsten Spitzenabflüsse weist der Kapplerbach auf ($4,3 \text{ m}^3/\text{s} - 5,2 \text{ m}^3/\text{s} - 6,1 \text{ m}^3/\text{s}$), die niedrigsten der Bratzenbach ($1,1 \text{ m}^3/\text{s} - 1,3 \text{ m}^3/\text{s} - 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Die Ergebnisse der anderen Bäche schwanken für HQ 30 zwischen $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$, für HQ100 zwischen $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und für HQ300 zwischen $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ und $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Bezogen auf die Größe des Einzugsgebiets hat der Außervallatschbach relativ hohe Abflüsse, gefolgt von den Bächen Kappler, Pleifer, Patscheider und Bratzen. Die geringsten spezifischen Abflüsse zeigt der Fallerbach.

EZG	NS-	HQ	NS-	HQ	NS-	HQ	Größe EZG [km ²]	q_{30} [m ³ /s]	q_{100} [m ³ /s]	q_{300} [m ³ /s]	CN 30	CN 100	CN 300
	Dauer [h]	30 [m ³ /s]	Dauer [h]	100 [m ³ /s]	Dauer [h]	300 [m ³ /s]							
Kappler	0,7	4,311	0,7	5,222	0,7	6,08	3,23	1,3	1,6	1,9	96	96	95
Patzin	2	1,919	2	2,32	2	2,705	2,32	0,8	1	1,2	91	91	90
Pleifer	0,8	1,588	0,8	1,932	0,8	2,258	1,71	0,9	1,1	1,3	95	95	95
Patscheider	2	1,411	2	1,738	2	2,057	1,73	0,8	1	1,2	89	88	88
Faller	0,9	1,276	0,9	1,564	0,9	1,846	2,13	0,6	0,7	0,9	90	90	90
Außervallatsch	0,6	1,287	0,4	1,456	0,3	1,624	0,26	4,9	5,5	6,2	94	94	94
Bratzen	0,6	1,097	0,6	1,312	0,6	1,515	1,56	0,7	0,8	1	95	95	95

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung (absteigend gereiht nach Abflussspitzen)

Damit bei gegebenen Niederschlägen diese Abflüsse erreicht werden, müssen die Einzugsgebiete bis zu zwei Stunden überregnet werden. Zwei Stunden beträgt die Hochwasserdauer beim Patzin- und beim Patscheiderbach, bei allen anderen EZG bleibt sie unter einer Stunde.

Die korrigierten CN-Werte fallen in allen Fällen eher hoch aus. Die Sollwerte (88-92) werden für die Bäche Kappler, Außervallatsch und Bratzen überschritten.

6.3 Gefährdungsmodellierung mit FLO-2D

Die um den Bulking-Faktor erhöhten Reinwasserabflüsse finden sich in tabellarischer und graphischer Form im Anhang (Tabellen A.4 bis A.10 und Abbildungen A.21 bis A.27). Es folgen nun pro Bach die Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung mit FLO-2D, wobei die Ergebnisse je Bemessungsereignis beschrieben werden (ohne Darstellung) und die resultierenden Gefahrenzonen vorgestellt werden (Abbildung 6.13 bis 6.15).

Fallerbach-Valserbach

Die Klassifizierung der hydraulischen Modellierungsergebnisse zeigt für den Fallerbach ein recht eindeutiges Bild (Abbildung 6.13). Außerhalb des Gerinnes betragen die Fließhöhen maximal 37 cm, was der mittleren Gefahrenstufe (blau) entspricht. Die hohe Gefährdung beschränkt sich auf das Gerinne, dort fließt die Mure bis zu 1,8 m hoch (HQ300). Die Berechnungen zeigen keine Gefahr für die Weiler Zerkaser (orographisch rechts) und Padöll (orographisch links).

Pleiferbach

Die Simulation auf dem Kegel des Pleiferbachs ist die einzige, die ohne integriertes Gerinne durchgeführt wurde. Die Berechnungen zeichnen ein Fließen im Gerinne nach – an zwei Stellen bricht der Bach jedoch aus und es bilden sich formentypische Fließloben aus. Die Fließhöhen außerhalb des Bachlaufs fallen sehr gering aus, sie erreichen maximal 20 cm. Die von der Vermurung betroffene Fläche des 30-jährlichen Bemessungsereignisses hat im Vergleich zum 300-jährlichen um etwa 24 % zugenommen (Tabelle A.11 im Anhang).

Annähernd für die gesamte beeinflusste Fläche ergibt die Zonierung die hohe Gefahrenstufe (blau), nur einzelne Zellen entlang der Gewässertiefenlinie im oberen Kegelbereich werden als hoch gefährdet ausgewiesen. Für den Weiler Pleif (orographisch rechts) besteht aufgrund der Simulation keine Bedrohung (Abbildung 6.13).

Patzinbach

Am Kegelhals des Patzinbachs gibt es eine Schutzverbauung, die in die Berechnungen einbezogen wurde. Zwei Erdwälle (Höhe 4 m orographisch rechts bzw. 3,5 m orographisch links) sollen im Fall einer Mure das Material kanalisieren und zurückhalten (Abbildung 6.14). Die Modellierung zeigt, dass der Bach dazu tendiert, bei einer leichten Verengung in der Mitte des Kegels auszubrechen. Dort zeigen sich maximale Fließhöhen von 0,2 m (HQ30), 0,6 m (HQ100) und 0,7 m (HQ300). Demnach werden die Ausuferungen im Zuge der Klassifikation umgemünzt auf die Gefahrenstufe H3

(blau). Weder der Weiler Patzin (orographisch rechts) noch Patscheid (orographisch links) sind laut Berechnungen direkt von der Mure betroffen.

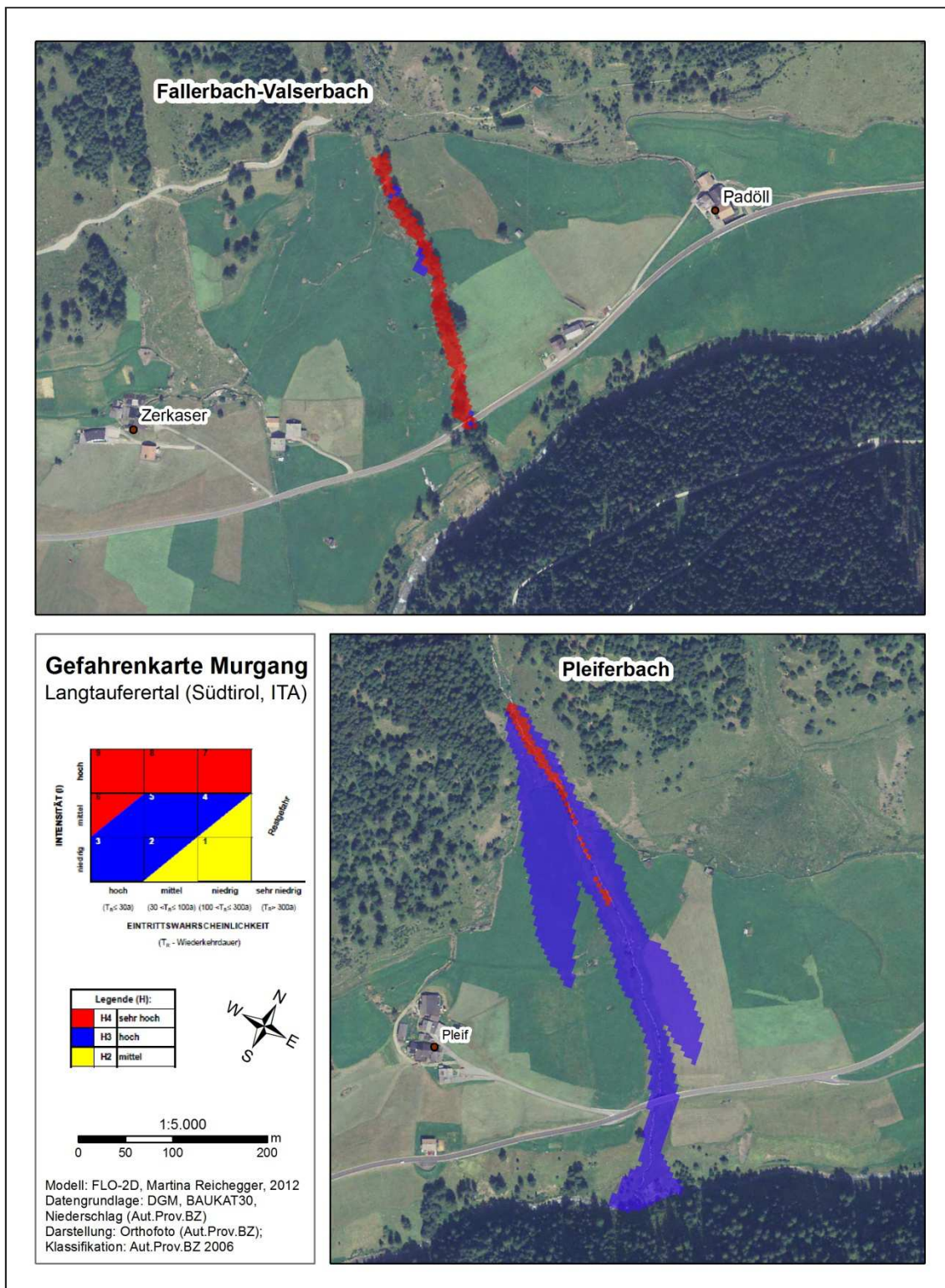


Abbildung 6.13: Gefahrenkarte Fallerbach und Pleiferbach

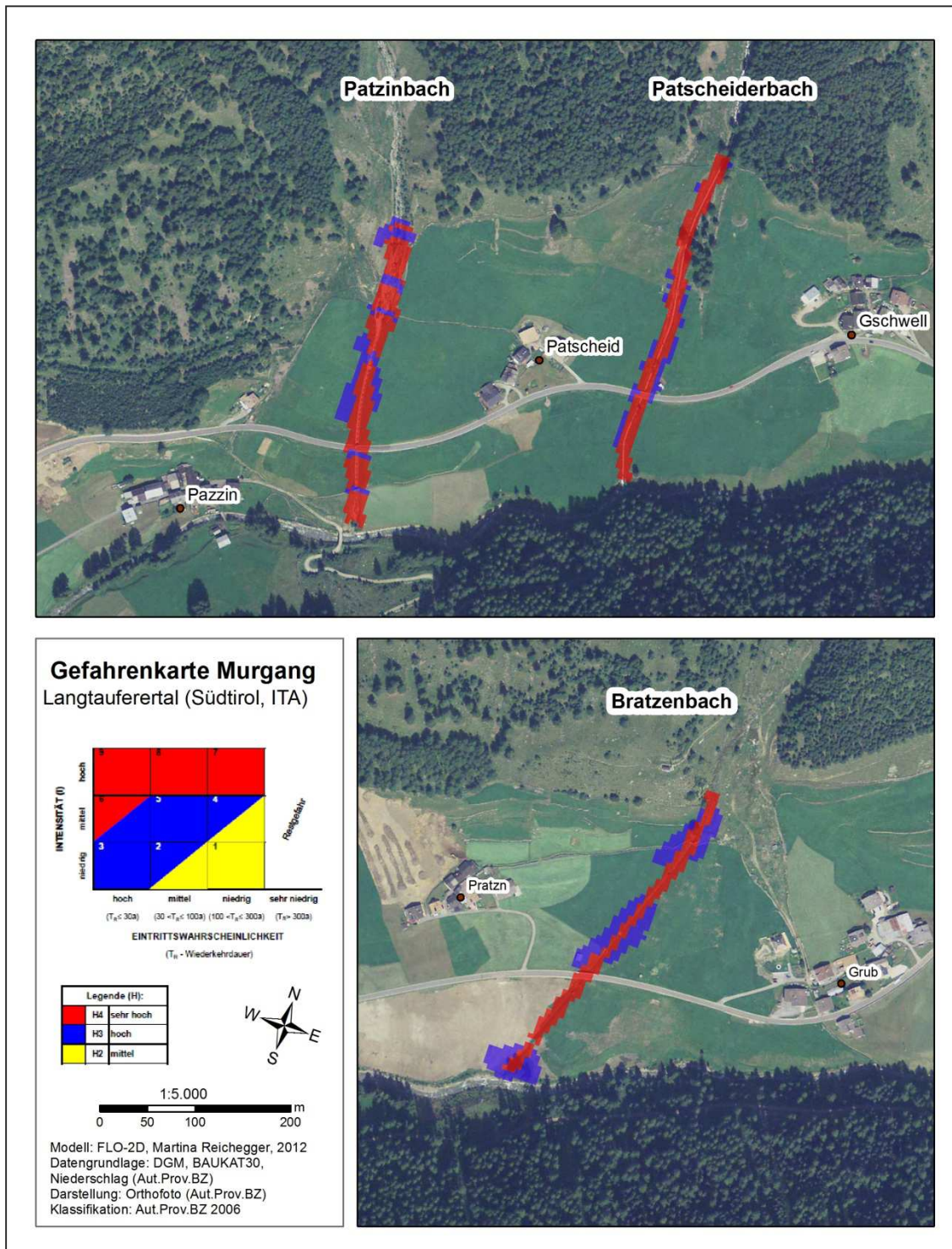


Abbildung 6.14: Gefahrenkarte Patzinbach, Patscheiderbach und Bratzenbach

Patscheiderbach

Im Fall des Patscheiderbachs konnten für alle drei Bemessungsereignisse kaum Ausuferungen festgestellt werden. Dadurch zeichnet sich ein klares Bild ab: im Kanal entstehen Fließhöhen von maximal 2,13 m (HQ30), 2,35 m (HQ100) und 3 m (HQ300), die als sehr hoch gefährdend klassifiziert werden. Außerhalb des Kanals sind die Fließhöhen geringer und damit auch die Gefahr (Abbildung

6.14). Die Ausuferungen bleiben ausschließlich im Bereich des Gerinneufers. Laut vorliegenden Ergebnissen besteht für die Weiler Gschwell (orographisch links) und Patscheid (orographisch rechts) keine nennenswerte Gefahr.

Bratzenbach

Die Topographie des Bratzenbach-Kegels bedingt drei potentielle Ausbruchsstellen, die für alle drei Szenarien ähnlich sind. Knapp unterhalb des Startpunkts der Simulation wird der Kanal zu beiden Seiten überflutet. Unmittelbar darunter gibt es eine etwa 100 m lange Strecke und auch an der Mündung in den Karlinbach tritt der Bratzenbach über die Kanalufer. Die maximalen Fließhöhen liegen dabei zwischen 0,7 m (HQ30) und 0,94 m (HQ100), womit die Flächen in jedem Fall als hoch gefährdet ausgewiesen werden (H3). Im Kanal selbst entsprechen die Fließhöhen sehr hoher Gefährdung. Die betroffenen Flächen außerhalb des Kanals sind bei einem 300-jährlichen Ereignis um etwa 70 % größer (2400 m²) verglichen mit einem 30-jährlichen Ereignis (Tabelle A.11 im Anhang).

Im Falle einer Mure ist für die Weiler orographisch rechts (Pratzen) und links (Grub) des Bachs keine Gefahr zu erkennen, Materialablagerungen auf den Feldern und die Verschüttung der Straße sind jedoch möglich (Abbildung 6.14).

Kapplerbach

In der FLO-2D-Simulation wurde die Längsverbauung mitberücksichtigt, die sich vom Kegelhals bis zu den Häusern von Kappl zieht. Die Höhe der Steinmauer nimmt zum Kegelhals hin kontinuierlich zu, von 0,5 m bis 2 m. Die hoch gefährdeten Flächen sind bei allen Bemessungsereignissen die gleichen. Abbildung 6.15 verdeutlicht, dass diese Bereiche nur den Kanal betreffen, wobei die maximalen Abflusshöhen leicht variieren (HQ30: 2,64 m; HQ100: 2,95 m; HQ300: 2,92 m). Bereits bei einem 30-jährlichen Ereignis zeigen die Berechnungen ein Überlaufen des Kanals, vor allem auf der orographisch rechten Seite, aber auch orographisch links zum Weiler Kappl hin. Die Fließhöhen betragen am Kanalufer maximal 0,65 m, auf der Fläche hingegen lediglich bis zu 20 cm. Bei einem 100-jährlichen Ereignis vergrößert sich die Überflutungsfläche im Vergleich zu einem 30-jährlichen Ereignis um ca. 67 %, das entspricht in etwa 0,5 ha (Tabelle A.11 im Anhang). Dies wirkt sich in einer Annäherung an den Weiler Kappl aus; hier wird die Mure bis zum Ende der Schutzverbauung zurückgehalten, unterhalb werden nahe der Häuser maximale Fließhöhen zwischen 0,2 m und 0,49 m berechnet. Orographisch rechts beeinflusst ein 100-jährliches Ereignis große Teile der Felder.

Für ein 300-jährliches Ereignis ist das Bild ähnlich, die Überflutungsflächen sind jedoch minimal geringer als für ein 100-jährliches Ereignis. Dies kann aufgrund des Abflussverlaufs zurückzuführen sein, da die Mure beispielsweise früher ausufert und die Kapazität des Kanals im unteren Teil folglich ausreicht. Orographisch rechts kanalisiert sich das Murenmaterial in der Straße nach

Kappl und in einer Tiefenlinie in Richtung des Gasthofs an der Hauptstraße. Hinter dem Gebäude wird das Material gestaut, hier ergeben sich maximale Fließhöhen von einem halben Meter (HQ100, HQ300). Auf der Hauptstraße, wo sich der Materialstrom weiter verteilt, sind Fließhöhen bis zu 30 cm möglich (HQ100, HQ300). Für die Kirche, die sich auf einer kleinen Anhöhe (Moräne) befindet, besteht demnach keine Gefahr.

Bei einem Murgang im Kapplerbach ist die Wahrscheinlichkeit, dass die angrenzenden Felder übermurt werden, sehr groß. Nach dem Klassifikationsschema der Autonomen Provinz Bozen werden die landwirtschaftlichen Flächen, die Häuser nahe am Gerinne, das Gebäude an der Hauptstraße sowie ein Teil der Straße als hoch gefährdet ausgewiesen. Dies entspricht einer Gefährdung von Personen nur außerhalb von Gebäuden. Es können auch funktionelle Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, wie auch Umweltschäden entstehen, und die Unterbrechung von sozialen und wirtschaftlichen Aktivitäten ist möglich.

Außervallatschbach

Am Gebietsauslass des Außervallatschbachs sorgen vier Dämme aus Drahtschotterkörben dafür, dass das Geschiebe gebremst und in den darunter befindlichen Graben geleitet wird. Die Dämme wurden in der Simulation als "Levéés" berücksichtigt. Die beiden oberen sind 2 m hoch, die beiden unteren 1,5 m. Das Ergebnis der Gefahrenzonierung zeigt für alle drei Bemessungsereignisse ein ähnliches Bild: im Kanal bedingen Fließhöhen bis zu 1,84 m (HQ100) eine sehr hohe Gefahr. Außerhalb davon sind Fließhöhen und damit die Gefahr geringer (Abbildung 6.15). Der von der Mure beeinflusste Bereich beschränkt sich auf den Rand des Grabens, dessen Durchflussquerschnitt ca. 6 m² beträgt.

Laut Simulationsergebnissen besteht somit keine Gefahr für die angrenzenden Weiler Kappl (orographisch rechts) und Wies (links). Eine Entladung des Kanals auf die Straße scheint jedoch sehr wahrscheinlich¹¹.

¹¹ Der Graben besteht nur bis zur Straße, womit die Simulation mit dem Setzen des Ausfluss-Elements am Grabenende stoppt.

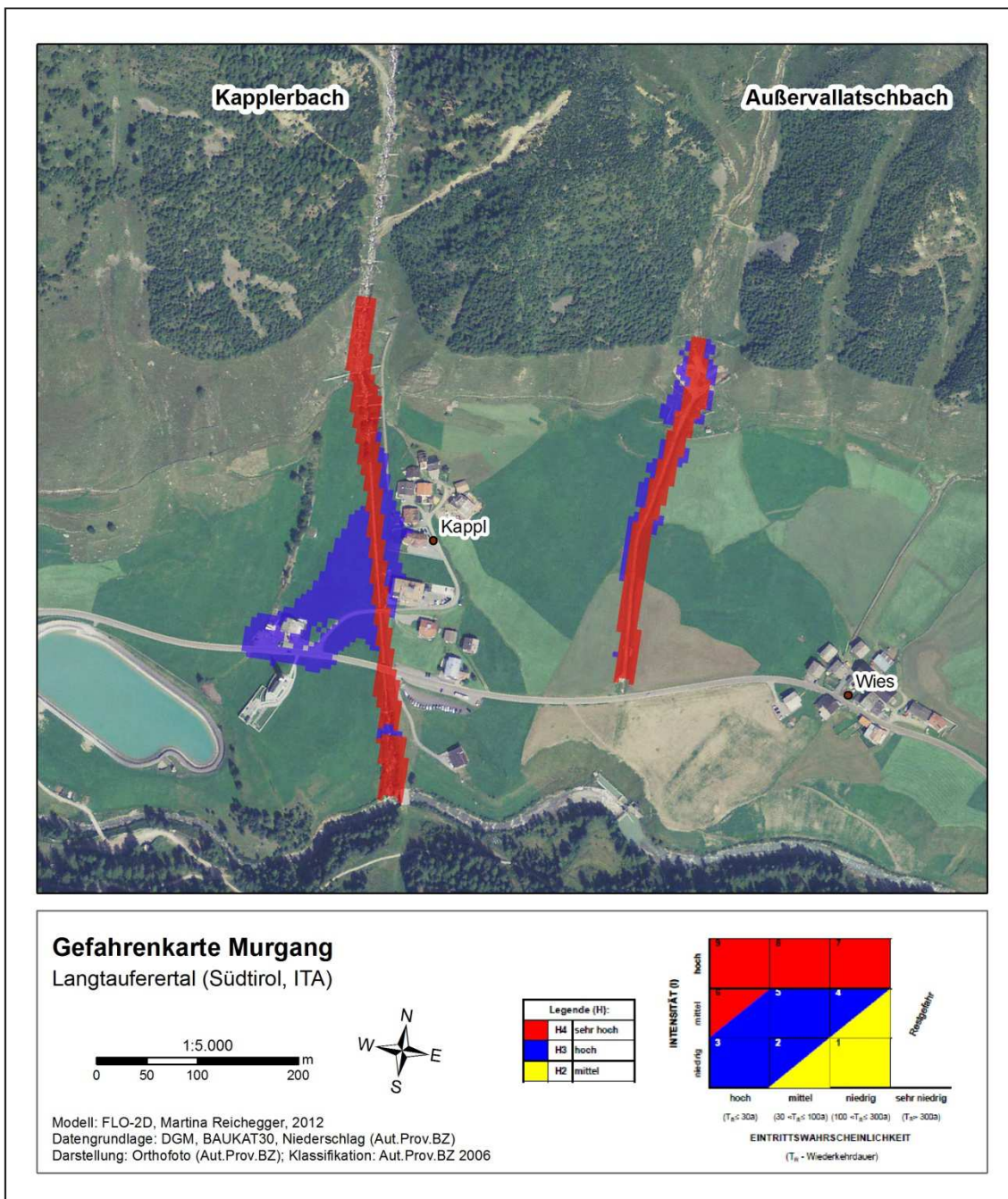


Abbildung 6.15: Gefahrenkarte Kapplerbach und Außervallatschbach

6.4 Ereignisdokumentation und Validierung

Für die Ereignisanalyse fanden sich neben der Ereignisdatenbank ED30 noch andere verwertbare Quellen: die Feuerwehrchroniken der Gemeinden Graun und St. Valentin a.d. Haide, das Talbuch Langtaufers (Raffener 2010), ein Bericht über Langtaufers (Hohenegger 1969), eine Studie der Universität München (Institut für Geographie 1992) und das Zeitschriftenarchiv der Tessmann Bibliothek Bozen, welches Tiroler Tageszeitungen des 19. und 20. Jahrhunderts archiviert. Daneben konnte der Kontakt zu einem Chronisten aus dem Tal hergestellt werden. In Tabelle sind die recherchierten Wildbachereignisse angeführt.

6.4.1 Ergebnisse der Ereignisanalyse

Für den **Fallerbach** konnte lediglich ein Murgangereignis gefunden werden, und zwar im Jahr 1901. Der Quelle nach dürfte es eine außergewöhnlich große Katastrophe gewesen sein (Pfarrchronik von Pedross in ED30). Nahezu alle Bäche des Langtaufertals waren infolge heftiger Regenfälle über die Ufer getreten¹². Die Schäden bezogen sich im Untersuchungsbereich vor allem auf Äcker, Wiesen und Wege. Die Ablagerungen auf den Bratzenwiesen waren "meterhoch", die aufgerissenen Gräben nahmen Maße bis zu 8 m Tiefe und 15 bis 18 m Breite an (Gschwellbach¹³). Der Kapplerbach grub sich ein neues Bachbett (vgl. Abbildung 6.15, entlang der Baumreihe). Die Feuerwehren waren eine ganze Woche mit den Aufräumarbeiten beschäftigt.

Der **Pleiferbach** und der **Bratzenbach** traten neben dem Großereignis von 1901 noch je einmal über die Ufer, in den Jahren 1970 bzw. 1969, Details zu diesen Ereignissen fehlen jedoch (ED30).

Der **Patzinbach** war seit 1898 von fünf Vermurungen betroffen. Infolge eines Niederschlagsereignisses im Jahr 1958 wurden die umliegenden Felder des Patzin- und Patscheiderbachs mit Geschiebe überlagert. Insgesamt wurden durch die Muren 1,2 ha Felder und 2,8 ha Wiesen überlagert. Laut Freiwilliger Feuerwehr (FF) Graun bestand auch Gefahr für die Häuser links und rechts des Patzinbachs (ED30). Die jüngste Aufzeichnung für den Patzinbach enthält als einzige eine volumetrische Schätzung (460 m³). Die Mure wurde durch flächenhafte Erosionen an den Hängen begünstigt und löste Schäden an Verbauungen aus.

Auch für den **Patscheiderbach** sind fünf Wildbachereignisse dokumentiert, das jüngste im Jahr 1995. Außer den Schäden an Kulturgründen im Jahr 1901 und an Flächen im Jahr 1958 (siehe oben) wurden keine weiteren Schäden dokumentiert.

¹² Mit Ausnahme des Außervallatschbachs ist dieses Ereignis für alle untersuchten Bäche in der ED30 dokumentiert.

¹³ Angabe nur zur Veranschaulichung; der Gschwellbach wurde nicht untersucht.

Die meisten Murgänge führte der von Pfarrer Franz Habicher als "heimtückisch" bezeichnete "**Kapplbach**", der bei dem Ereignis im Jahr 1901 "fast am meisten zu fürchten war" (Pfarrchronik von Pedross in ED30). Bereits im Mittelalter weisen Steuer- und Zinsnachlässe für den Weiler Kappl auf Murschäden hin. Im Jahr 1965 gab es im Frühsommer sogar vier Ausbrüche innerhalb von elf Tagen. Fotos dokumentieren die tatkräftige Abwehr durch die Anrainer (Abbildung A.28 im Anhang), und Zeichnungen der Erosions- und Überflutungsabgrenzungen geben einen Eindruck vom Ausmaß der Mure (Abbildung 6.16). Weiters deutet ein Zeitungsartikel in der Tageszeitung "Dolomiten" vom 2. Juli 1987 (Abbildung A.29 im Anhang) auf ein größeres Ereignis hin. Durch die Schneeschmelze wurden an der orographisch rechten Hangseite des Kapplerbachs große Mengen an Feststoffen mitgerissen, sodass der Bach "zu einer gefährlichen Mure anwuchs, die [...] beim Weiler Kappl über die Ufer trat." Die Folge war die Vermurung der Landesstraße sowie eines Hektars Wiesenfläche, die Zufahrt zu Kappl wurde durch die Massen zerstört.

Für das talinnerste und kleinste der untersuchten EZG, das des **Außervallatschbachs**, sind insgesamt acht Vermurungen dokumentiert, die erste im Jahr 1965. Unmittelbar betroffen war eigentlich nur der Weiler Wies an der orographisch linken Seite, nur einmal, im Jahr 1965, lenkte die Mure auch nach rechts in Richtung Kappl. Beim jüngsten Ereignis im Jahr 2005 wurde die Straße überschwemmt (Abbildung A.30 im Anhang).

Bach	Datum	Beschreibung	Quelle
Fallerbach	02.06.1901	Schneeschmelze und Gewitter lösen Murgänge im gesamten Tal aus	ED30
Pleiferbach	02.06.1901	Schneeschmelze und Gewitter lösen Murgänge im gesamten Tal aus	ED30
	10.08.1970	– (keine Details dokumentiert)	ED30
Patzinbach	22.06.1898	Übermuerung von zwei „Mannmahd“ Frühwiese und Äckern	Raff2010
	02.06.1901	Schneeschmelze und Gewitter lösen Murgänge im gesamten Tal aus; Verwüstung der Wiesen und Gefahr für die "Ställe"	ED30
	11.05.1958	Gewitter mit Hagel; die Schutzverbauungen im unteren Teil werden tw. zerstört; Bach tritt über die Ufer, die Feststoffe überlagern die umliegenden Felder; Gefahr auch für die Häuser links und rechts des Bachs; betroffene Flächen insgesamt (Patzin, Patscheid): 1,2 ha Felder und 2,8 ha Wiesen	ED30
	11.07.1959	FF-Einsatz: zwei Tage	
	11.06.2008	Volumen: 460 m³ , ausgelöst nach drei Regentagen durch flächenhafte Erosionen orographisch links, auf 2.250 m; auf 1.850 m Ausuferung und Ablagerung von ca. 160 m³, anschließend Fortbewegung im Kanal, volle Auslastung; Schäden an Verbauungen	ED30: F
Patscheiderbach	02.06.1901	Schneeschmelze und Gewitter lösen Murgänge im gesamten Tal aus	ED30
	11.05.1958	Geschiebe überlagert den Bereich entlang der gepflasterten Künette; insgesamt betroffene Flächen (Patzin, Patscheid): 1,2 ha Felder, 2,8 ha Wiesen	ED30
	21.06.1965	Vermurung des Kapplerhofs und von Patscheid; FF-Einsatz: zehn Männer, 28 Std.	ED30
	12.06.1983	–	ED30
	29.05.1995	Hangabbruch nach heftigem Regen	ED30: F
Bratzenbach	02.06.1901	Schneeschmelze und Gewitter lösen Murgänge im gesamten Tal aus	ED30
	14.05.1969	–	ED30

Kapplerbach	14.- 16. Jh	Indirekte Hinweise auf Mur- und Hochwasserereignisse in Form von Steuer- und Zinsnachlässen für den Weiler Kappl, da die Eintrichtung der Abgaben wegen Murschäden nicht möglich war	GeoM92
	01.01.1593	Streit um Zinsnachlass; Kapplerbach hat einen „Viertel Teil“ des Kapplhofs vermurt, Bildung eines neuen Grabens und Verschüttung von Wiesen	ED30
	22.06.1898	heftige Regenfälle, Anschwellen des Kapplerbachs, Übermuerung von zwei Mannmahd Frühwiese der Grubhofbesitzer	Raff2010
	02.06.1901	Schneeschnelze und Gewitter lösen Murgänge im gesamten Tal aus; Kapplerbach gräbt sich neues Bachbett	ED30
	03.07.1961	–	
	01.01.1962	heftige Regenfälle und Schneeschnelze; Bach tritt über die Ufer, Material überschwemmt die Felder, bedroht Kapplhof	
	21.06.1965	Vermuerung des Kapplerhofs und von Patscheid; FF-Einsatz: zehn Männer, 28 Std.	ED30
	27.06.1965	Vermuerung in Kappl und Wies	ED30: F, T
	30.06.1965	Ausbruch des Kapplbachs	ED30
	01.07.1965	Ausbruch des Kapplbachs; FF-Einsatz: 412 Stunden	ED30
	14.08.1969	Vermuerung von Wiesen und Äckern	ED30
	30.06.1987	Schneeschnelze	ED30: F; Z
	28.07.1997	Heftige Regenfälle	ED30
	2001	Vermuerung	Raff2010
Außer-vallatschbach	27.06.1965	Vermuerung in Kappl und Wies	ED30
	14.05.1967	Vermuerung bei den Mühlen, Wies	ED30
	27.06.1967	Vermuerung bei den Mühlen, Wies	ED30
	31.07.1967	„Mure Wies“	ED30
	14.08.1969	„Mure Wies“	ED30
	13.07.1970	„Mure Wies“	ED30
	17.08.1970	„Mure Wies“	ED30; Z
	23.08.2005	Vermuerung von Verkehrswegen	ED30: F; Z

Tabelle 6.11: Ereignisdokumentation. Abkürzungen: F = Foto, T = Terrestrische Bilder, Z = Zeitungsartikel, Raff2010 = Raffener 2010, GeoM1992 = Institut für Geographie 1992. Gleiche Farben kennzeichnen gleiche Ereignisse.

Zusätzlich zu den angeführten Quellen wurde im März 2011 ein Telefongespräch mit einem Chronisten aus Langtaufers geführt. Dessen Informationen decken sich im Allgemeinen mit den dargelegten Ereignissen. Er erwähnte allenfalls Schäden durch Muren an Bewirtschaftungsflächen und wies außerdem auf die Lawinengefahr im Winter hin.

Auch Hohenegger merkt in seinem Bericht über das Langtaufertal die Gefahr durch Muren an. Demnach näherte man sich im Zuge der Besiedlung dem Geländestreifen links und rechts des Bachlaufs "nur ungern, da die Fluren zu stark durch Muren gefährdet waren und man zu oft 'Mure putzen' musste".

Zusammenfassend kann beobachtet werden, dass die meisten Murgänge im Sommer verzeichnet wurden (Mai – August), wenn das jährliche Niederschlagsmaximum und die Schneeschnelze zusammenfallen. Die dokumentierten Schäden beschränken sich hauptsächlich auf Wirtschaftsflächen. Aber auch die Gefahr für die Weiler und die Höfe (v.a. für den Kapplerhof) wird erwähnt. Die Murgänge im Langtaufertal scheinen durch eine eher lange und unregelmäßige Wiederkehrdauer

geprägt zu sein. In den letzten 100 Jahren wurde für den Fallerbach nur ein Ereignis dokumentiert, und für die Bäche Pleifer und Bratzen je zwei. Mit Abstand am häufigsten traten die Bäche Außervallatsch und Kappl über die Ufer (8 bzw. 14-mal).

6.4.2 Validierung der Simulationsergebnisse

Nun werden die dokumentierten historischen Ereignisse mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Für den Vergleich werden nur jene Ereignisse herangezogen, die am detailliertesten dokumentiert sind: die in den Jahren 1901, 1965 (21.06. und 27.06.), 1958, 2005 und 2008.

Im Jahr 1901 gab es ein Großereignis mit einer "meterhohen Übermuring der Bratzenwiesen". Dieses Ausmaß kann durch die Modellierungen nicht bestätigt werden. Die modellierten maximalen Fließtiefen reichen zwar an einen Meter heran, betreffen jedoch lediglich den Gerinnerand. Unbekannt ist jedoch, ob die Künette damals schon bestand.

Das Ereignis im Jahr 1958, das die Bäche Patscheid und Patzin betraf (in Tabelle rosa markiert), löste Zerstörungen an den umliegenden Wiesen und Feldern aus (4 ha) und gefährdete die Weiler Patzin und Patscheid. Für den Patscheiderbach wurden "Geschiebeüberlagerungen im Bereich der ge-pflasterten Künette" dokumentiert. Solche Schäden scheinen auch aufgrund der Modellierungsergebnisse für größere Ereignisse (HQ100, HQ300) plausibel. Jedoch fallen in der Modellierung die insgesamt betroffenen Flächen bedeutend kleiner aus (0,4 ha für HQ300).

Das Ereignis vom 21.06.1965 löste eine "Vermurung von Patscheid" aus. Eine Bedrohung des Ortes kann durch die Ergebnisse der Modellierung allerdings nicht nachvollzogen werden.

Für das Murereignis im Kapplerbach am 27.06.1965 enthält die Ereignisdokumentation ED30 neben Fotos (Abbildung A.28 im Anhang) eine Aufzeichnung der beeinträchtigten Fläche. Vergleicht man die Modellierungsergebnisse mit dieser Fläche, so stimmen die Überflutungsflächen an der orographisch linken Seite überein (Abbildung 6.16). Orographisch rechts sind die betroffenen Flächen zwar in etwa gleich groß, die Mure im Jahr 1965 bricht jedoch bereits am Kegelhals aus.

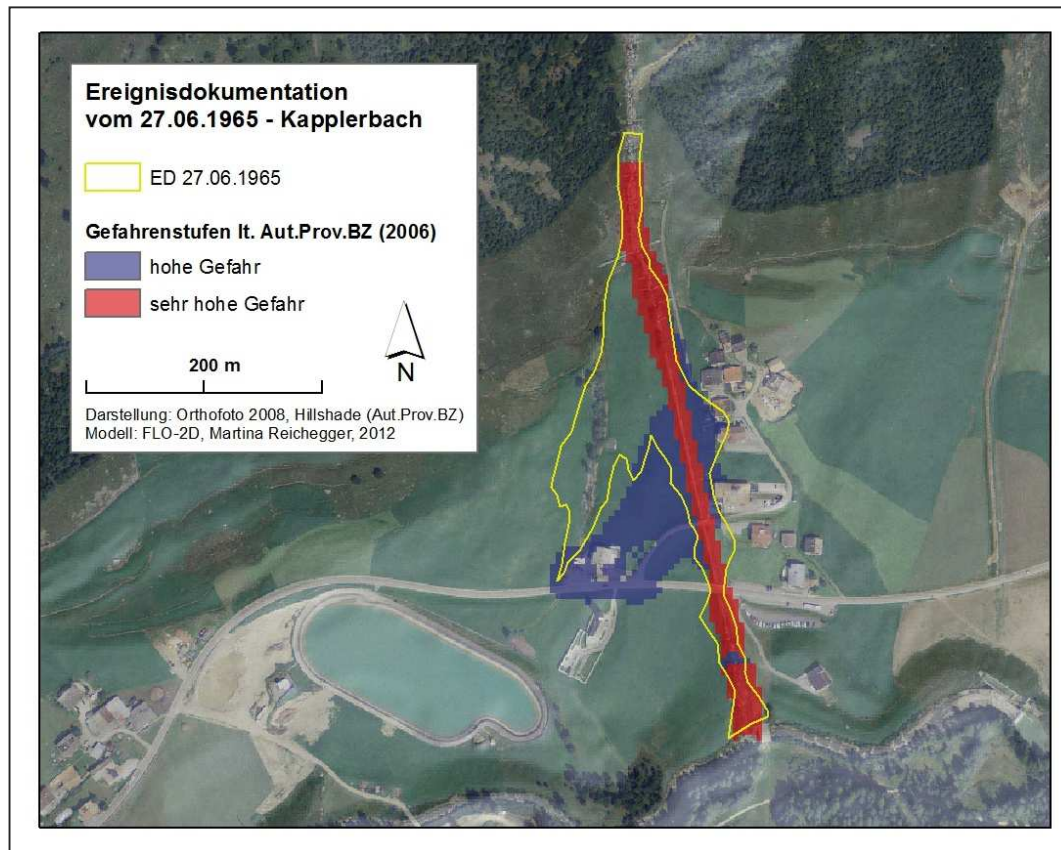


Abbildung 6.16: Vergleich der beeinträchtigten Fläche durch das Ereignis vom 27.06.1965 mit den klassifizierten Simulationsergebnissen, Kapplerbach

Der Weiler Wies wurde durch den Außervallatschbach mehrmals vermurt (Tabelle 6.11). Seit dem Jahr 2010 gibt es jedoch Schutzdämme am Kegelhals, die in der Modellierung berücksichtigt wurden. Daher ist eine Gefährdung des Weilers nicht mehr gegeben. Jedoch kann die Straße durchaus übermurt werden, wie es im Jahr 2005 bereits der Fall war.

Allein für das Jahr 2008 wurden mobilisierte Feststoffmengen dokumentiert, und zwar für den Patzinbach. Dieser führte laut ED30 460 m³ Feststoffe mit sich. Im Bereich der Schutzwälle auf 1.850 m Höhe lagerte sich ein Teil der Feststoffe ab. Unterhalb der Wälle war der Kanal zwar voll ausgelastet, das Feststoff-Wasser-Gemisch trat allerdings nicht über die Ufer. Bei der Begehung des Patzinbachs wurden für ein 30-jährliches Hochwasser 1.354 m³ Feststoffe geschätzt (Tabelle 6.11). Diese geschätzte Menge ist fast drei Mal so groß wie die dokumentierte Menge. Die Simulation ergab, dass die geschätzte Menge höchstwahrscheinlich auf etwa 1.820 m s.l.m. über die Ufer tritt.

Neben den oben genannten, detailliert dokumentierten Ereignissen, gibt es nur für den Kapplerbach noch eine Reihe von Ereignissen, die zwar vage dokumentiert sind, die sich aber für einen Vergleich eignen, mit folgenden Schäden: die Beeinträchtigung des Weilers Kappl und der angrenzenden Wiesen (mehrmals) sowie der Straße und der Zufahrt zu Kappl (Tageszeitung Dolomiten vom 2. Juli 1987, Abbildung A.29 im Anhang). Diese Beeinträchtigungen bilden sich auch in den Ergebnissen der Modellierung ab.

Einen weiteren Anhaltspunkt für die Validierung der Ergebnisse bieten außerdem die Schutzbauwerke, welche in der Regel für 100-jährliche Bemessungsereignisse konzipiert sind. Mit Ausnahme des Faller- und des Pleiferbachs sind alle untersuchten Bäche auf dem Kegel durch Schutzmauern, Künetten oder einen Graben verbaut (Tabelle 6.1, Kapitel 6.1.1). Sieht man sich die Modellierungsergebnisse der HQ100-Szenarien in Verbindung mit diesen Bauwerken an, ergibt sich folgendes Bild:

Für den Patzinbach werden kleinflächige Ausuferungen berechnet, die maximalen Fließhöhen liegen meist unter 20 cm. Der Patscheiderbach weist für das HQ100 nur einzelne Überflutungszellen am Gerinnerand auf, die Fließhöhen liegen meist unter 10 cm. Die Simulationsergebnisse für den Bratzenbach ergeben drei Austrittsstellen aus dem Kanal mit mittleren Fließhöhen von 15 cm. Der Außervallatschbach bleibt größtenteils innerhalb des Grabens. Nur einige wenige Zellen am Ufer weisen mittlere Fließhöhen von 17 cm auf.

Die einzigen großflächigen Ausuferungen werden für den Kapplerbach berechnet. Der Bach tritt bereits bei den Volumen eines 30-jährlichen Szenarios über die Kanalbegrenzung.

Die Rückhaltemauern für die Bäche Patzin, Kappler und Außervallatsch werden in keinem der drei Bemessungsereignisse überwunden.

7 Diskussion

Die abschließende Diskussion soll alle in der Untersuchung berücksichtigen Aspekte zusammenschauend beleuchten. Damit werden die Hypothesen der Arbeit getestet, sowie die Gefahrenanalyse kritisch hinterfragt.

7.1 Geomorphologie und Feststoffpotential

Die Geländeanalysen haben das Murgangpotential der Einzugsgebiete deutlich gemacht. Ein hohes Murgangpotential haben laut Jakob (2005) kleine Einzugsgebiete $< 5 \text{ km}^2$ mit einem durchschnittlichen Gefälle von $> 15^\circ$. Die untersuchten EZG der Arbeit sind zwischen $0,26 \text{ km}^2$ und $3,23 \text{ km}^2$ groß und weisen mittlere Neigungen zwischen 22° und 32° auf. Aus der geomorphologischen Kartierung (Abbildung A.9 im Anhang) geht klar hervor, dass für Murgänge hauptsächlich der Mittellauf der Bäche unterhalb des Hangknicks relevant ist. In diesen Bereichen beträgt die mittlere Hangneigung sogar 40° bis 50° . Die Schätzung der Geschiebelieferung konzentrierte sich damit auf den Mittellauf. Zwar befinden sich in den Karen oberhalb davon ausgedehnte Schuttflächen und Moränenmaterial – Fließstrukturen weisen auf das Vorhandensein von Permafrost hin, der durch Aufschmelzen grundsätzlich Geschiebepotential darstellt – allerdings limitieren die relativ geringen Hangneigungen in den Karen den Geschiebetransport bis zum Hangknick und die Schuttflächen können als Geschiebeherde ausgeschlossen werden.

Die Schätzung der Geschiebelieferung in Anlehnung an die Methode von Hungr et al. (1984) bzw. Spreafico et al. (1999) ergab sich aus den verschiedensten Prozessspuren im Gelände, wie etwa Ablagerungen im und außerhalb des Bachbetts, und durch die Schätzung der möglichen Erosionstiefe der Gerinne und Erosionsflächen. Die Gerinnebeiträge liegen überwiegend zwischen 1 und $2,5 \text{ m}^3$ pro Laufmeter, selten darunter und nur für einen kurzen Abschnitt des Patzinbachs deutlich darüber ($5 \text{ m}^3/\text{lfm}$). Die Gerinnebeiträge sind Allgemeinen höher, wenn der Gerinneabschnitt Anteil am Hang- und Verwitterungsschutt (HVS) hat. Die höchsten Feststoffmengen werden mit 5.000 m^3 bzw. 7.000 m^3 für die Einzugsgebiete des Patzin- bzw. Kapplerbachs berechnet. Relativ zur Größe des EZGs liefert der Außervallatschbach die meisten Feststoffe (2.700 m^3).

Ein direkter Zusammenhang zwischen den geschätzten Feststoffvolumen und der Geologie lässt sich für keinen der Bäche feststellen. Für Bäche, deren Feststoffherde in gleichen geologischen Bereichen liegen, wurden stark unterschiedliche Geschiebemengen geschätzt (z.B. Faller- und Patzinbach; Pleifer-, Patscheider-, Kappler- und Fallerbach). Hohe Geschiebesummen sind im Untersuchungsgebiet vor allem auf drei Faktoren zurückzuführen: wenn Erosionsflächen im HVS mit dem Gerinne verbunden sind (Patzinbach), wenn die Erosionsflächen Anteil am Moränen-

material haben (Kapplerbach) oder wenn die Erosionsflächen gänzlich unbewaldet sind (Außervallatschbach). Die Feststoffherde konnten hauptsächlich im unbewaldeten oberen Mittellauf verortet werden, nur im EZG des Kapplerbaches reichen sie auch bis nahe an den Gebietsauslass heran (Abbildung 6.8).

Bei der Geländebegehung konnten aktuell keine verklausungsgefährdeten Stellen ausgemacht werden. Die Bäche weisen etwa keine markanten Richtungsänderungen auf und das Schwemmholzpotential ist insgesamt eher gering. Die Hänge sind zwar bewaldet, an das Gerinne reichen jedoch nur einzelne Bäume heran. Die Korngrößen im Bachbett reichen von kleinen bis hin zu größeren Komponenten mit bis zu $0,5 \text{ m}^3$.

Die Anwendung der geomorphologischen Methode zur Feststellung des Geschiebepotentials erwies sich als sehr geeignet, denn im Gegensatz zur Berechnung von Feststoffvolumen allein aus empirischen Formeln kann die lokale Situation berücksichtigt werden. Beispielsweise haben die EZG der beiden Bäche Faller und Patzin fast identische Größen ($2,12 \text{ km}^2$ bzw. $2,32 \text{ km}^2$) und identische mittlere Hangneigungen (26°). Für diese beiden Bäche, ergäbe, die Berechnung von Geschiebemengen anhand empirischer Formeln somit fast identische Ergebnisse. Durch die Anwendung der geomorphologischen Methode ergaben sich hingegen Geschiebemengen von 2.166 m^3 bzw. 4.128 m^3 (für HQ100, vgl. Tabelle 6.2 und Tabelle 6.4). Ein weiterer Vorteil der geomorphologischen Methode ist, dass mit ihr mehrere Szenarien berücksichtigt werden können (HQ30, HQ100, HQ300).

Ein Nachteil der geomorphologischen Methode liegt gleichzeitig in der subjektiven Feststoffabschätzung durch den jeweiligen Bearbeiter. Auch waren wegen dem hohen Gefälle und wegen der Vegetation nicht alle Mittelläufe der Bäche direkt einsehbar. Daneben wurde für die 30-jährlichen Schätzungen eine grobe Annäherung getroffen: Ausgehend von der Feststoffschätzung für ein 100-jährliches Ereignis wurde durch einen Verminderungsfaktor die Feststoffmengen für ein 30-jährliches Ereignis abgeleitet. Dieser Verminderungsfaktor nimmt ein lineares Prozessverhalten an, was bei Muren allerdings nicht der Fall ist.

Eine wesentliche Hilfestellung für die Untersuchungen bot das Geographische Informationssystem ArcGIS9.3. Die GIS-Analysen erleichterten nicht nur die Berechnung der EZG und verschiedener Parameter, sondern auch die Orientierung im Feld und die nachträgliche digitale Kartierung.

7.2 Hydrologie im Untersuchungsgebiet

Mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell HyGrid2k2 wurden die Abflussganglinien abgeleitet, unter Berücksichtigung des Digitalen Höhenmodells und des Bodenversickerungsvermögens. Das Versickerungsvermögen ist ein für die Abflussbildung wesentlicher Faktor. Im Modell wird es durch die

Curve Number ausgedrückt, einer Kombination von Geologie und Landnutzung. Durch die rasterbasierte Berechnung kann die Curve Number in HyGrid2k2 sehr differenziert angewandt werden.

Für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung werden regionalisierte Starkniederschlagsereignisse herangezogen. Zwar existiert in Südtirol ein engmaschiges Messnetz – trotzdem kann die Variabilität von Niederschlägen bekanntlich auch auf kleinem Raum sehr hoch sein. Auch decken Niederschlagsaufzeichnungen nur einen begrenzten Zeitraum ab, in Südtirol werden sie seit rund 100 Jahren systematisch durchgeführt (Aut. Prov. BZ 2011^b). Ein 300-jährlicher Starkregen muss demnach nicht zwingend in den Aufzeichnungen enthalten sein. Obwohl diesem Umstand durch Extrapolation Rechnung getragen wird, muss darauf hingewiesen werden, dass die Niederschlagsparameter lediglich angenäherte Werte darstellen können.

In Kapitel 2.1.3 wurde ausgeführt, dass neben kurzen Starkniederschlägen durchaus auch länger andauernde Niederschläge zu Murgängen führen können. Vor allem Geschiebeherde in tiefgründigem Lockermaterial bedürfen hoher Vorfeuchte und werden eher bei lang andauernden Ereignissen aktiviert (Zimmermann et al. 1997). Daneben kann Schmelzwasser den Boden durchfeuchten. Laut Ereignisdokumentation wurden die größten (dokumentierten) Murgänge in Langtaufers infolge von Starkniederschlägen in Kombination mit Schmelzwasser ausgelöst (Kapitel 6.4.1). In den berechneten Abflüssen konnte Schmelzwassereintrag allerdings nicht berücksichtigt werden.

Dennoch können im Modell HyGrid2k2 Vorfeuchtebedingungen angenommen werden, üblicherweise vom Wert 1 (trockene Verhältnisse) bis zum Wert 3 (nahezu gesättigte Verhältnisse). Idealerweise trägt im Moment des Spitzenabflusses jede Rasterzelle des EZGs bei. Dafür reichte der Vorfeuchtwert von 3 allerdings nicht aus, weshalb ein Vorfeuchtwert von 4 angenommen wurde. Dadurch lagen die CN-Werte zwar teilweise über dem Sollwert, die zum Abfluss beitragende Fläche betrug jedoch in allen EZG 100%.

Die errechneten Spitzenabflüsse liegen für ein 100-jährliches Ereignis zwischen 5 m³/s (Kapplerbach) und 1,5 m³/s (Fallerbach). Generell nimmt die Höhe der Abflüsse mit zunehmender EZG-Größe zu. Ausnahmen bilden der Fallerbach, der bezogen auf die Größe seines EZG die geringsten Abflüsse aufweist, und der Außervallatschbach, dessen EZG am kleinsten ist, aber zu den höchsten spezifischen Abflüssen führt.

Generell erwies sich das Modell HyGrid2k2 für die Berechnung der Abflüsse als geeignet. Das Konzept des SCS für die Abflussbildung und der kinematische Ansätze für die Berechnung der Fließzeiten wird mit dem Modell mit relativ geringem Datenaufwand umgesetzt. Die Kompatibilität mit ArcGIS war außerdem eine ideale Voraussetzung für die Bearbeitung der Eingangsdaten. Trotz mancher Modell- und Datenunschärfen erscheinen die berechneten, eher geringen Spitzenabflüsse plausibel, auch aufgrund der relativ geringen Niederschläge im Tal.

7.3 Diskussion der Simulationsergebnisse

Das physikalische Modell FLO-2D erwies sich für die Beantwortung der Fragestellung als geeignet, da es einerseits die eindimensionale Berechnung des Gerinneabflusses, als auch die flächige Ausbreitung bei Überbordung auf dem Kegel erlaubt. Vor allem die Möglichkeit, abflussbehindernde Elemente zu kennzeichnen, ist ein wesentlicher Vorteil des Modells. Dadurch werden sowohl bedrohte Gebäude, als auch schützende Elemente in der Simulation berücksichtigt. Einen großen Vorteil stellte die Kompatibilität mit ArcGIS dar. Die Simulationsergebnisse konnten in GIS problemlos nachbereitet und klassifiziert werden.

Der Genauigkeitsanspruch einer Gefahrenanalyse ist sehr hoch – vor allem auf kleiner Maßstabsebene, wo es um die Gefahreneinschätzung und -abgrenzung bewohnter Gebiete geht. Verlangt werden möglichst detaillierte Informationen zu Reichweiten, Fließtiefen oder Geschwindigkeiten. Die Wahl der Auflösung von 5 Metern orientiert sich am Zeitaufwand, der Rechnerleistung und der Datenverfügbarkeit, und war im Großen und Ganzen zufriedenstellend. Innerhalb der 5-Meter-Rasterzellen werden gewisse Inhomogenitäten jedoch vernachlässigt und ausgeglichen, was sich wesentlich auf die simulierten Prozesse auswirken kann. Beispielsweise ist der Kanal des Patscheiderbachs an manchen Stellen 7 m breit. Anfänglich erfolgte die Simulation nur zweidimensional. Dadurch war die Tiefenlinie des Kanals nicht mehr klar erkennbar, und die Mure verteilte sich großflächig über den Kegel, wodurch die Gefahrensituation für die Ortschaft Patscheid kritisch wurde. Durch eine Simulation mit extra eingefügten Kanalprofilen (2,5 m Auflösung) zeigte sich jedoch, dass das Fassungsvermögen des Kanals völlig ausreichend ist. Dieses Beispiel illustriert den hohen Anspruch an die Datengenauigkeit.

Mit Ausnahme des Pleiferbachs wurden alle Modellierungen mit eingefügten Kanalprofilen durchgeführt. Dies macht sich in den Simulationsergebnissen bemerkbar: der Pleiferbach ufer großflächig aus und weist die größten von Muren betroffenen Flächen auf. Ähnliche Fließmuster wären möglicherweise auch bei anderen Bächen zu sehen, besäßen sie nicht einen klarer definierten oder verbauten Kanal.

Obwohl die Simulation mit Kanalprofilen – zumindest innerhalb der Gerinne – deutlich realitätsnäher durchgeführt werden kann, ergeben sich dennoch Unsicherheiten. Die Zuordnung der einzelnen Kanalprofile zu einer Rasterzelle bestimmt zugleich die Höhe der angrenzenden Zelle, und somit, ob die Mure an dieser Stelle ausufert, oder ob sie möglicherweise wieder in den Kanal zurückläuft. Neben der Datenauflösung ist also auch exaktes und umsichtiges Arbeiten nötig. Auch wird angenommen, dass die Kanalprofile während eines Hochwassers unbeschädigt bleiben und dass auch alle anderen Schutzbauwerke der Mure Stand halten.

Auch das Modell selbst stellt hohe Genauigkeitsanforderungen an die Daten. Beispielsweise beeinträchtigen unvollständige oder sprunghafte Gerinneprofile und Datenfehler die Berechnung. Dies kann sich in Fehlern bezüglich der Volumenerhaltung oder der numerischen Stabilität auswirken. Durch die Anpassung interner Parameter (in der Datei *TOLER.DAT*) konnten die Stabilitätsprobleme größtenteils behoben werden.

Wie bereits erläutert, wird das Fließverhalten von Murgängen von unterschiedlichen Faktoren bestimmt (Kapitel 2.1). Für die Simulation werden die volumetrische Feststoffkonzentration (Bulking-Faktor) und die beiden rheologischen Parameter Viskosität und Grenzscher Spannung berücksichtigt, angepasst an granulare Murgänge. Bei der Anwendung des Bulking-Faktors wird ein *worst case*-Szenario angenommen: Das Szenario geht davon aus, dass die gesamte geschätzte Feststoffmenge innerhalb eines Ereignisses mobilisiert wird, dass die maximale Feststoffkonzentration von etwa 60 % erreicht wird und dass die Mure den Gebietsauslass überhaupt erreicht. Die Annahme eines *worst case*-Szenarios lässt für die Interpretation der Ergebnisse einen gewissen Spielraum.

Die beiden rheologischen Parameter Viskosität und Grenzscher Spannung wurden aus der Literatur übernommen. Idealerweise würde man ihre Eignung anhand der realen Ausmaße eines Ereignisses eichen, indem notfalls alternative, passendere Parameter aus der Literatur herangezogen werden. Die beiden Parameter können aber auch im Labor bestimmt werden, allerdings eher nur für feineres Material, der Einfluss grober Komponenten auf die Rheologie ist schwieriger zu quantifizieren. Generell ist die Bestimmung der passenden rheologischen Parameter eine der größten Schwierigkeiten bei numerischen Simulationen (Rickenmann 2007). Die tatsächlichen Parameter können je nach Ereignis und auch innerhalb eines Murgangs variieren (komplexes Prozessverhalten). Für das Untersuchungsgebiet waren die Werte aus der Literatur allerdings zufriedenstellend.

Für jede Nutzungsfläche können, je nach Schutzbedarf, unterschiedliche maximal zulässige Gefahrenstufen festgesetzt werden (Kienholz 2005). Für Weiler und für Verkehrswege mit regionaler und kommunaler Bedeutung schlägt Kienholz etwa vor, dass für häufige (HQ30) und seltene Ereignisse (HQ100) die geringste Gefahrenstufe tolerierbar ist (entspricht H2, gelbe Zone, in Abbildung 2.3), und für ein sehr seltenes Ereignis (HQ300) die mittlere Gefahrenstufe tolerierbar ist (entspricht H3, blaue Zone, in Abbildung 2.3).

Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse der Simulation zufriedenstellend. Anhand der Fließtiefen wurden auf den untersuchten Kegeln Bereiche mit *hoher* und mit *sehr hoher* Gefahr abgegrenzt. Die Ergebnisse zeigen, dass *sehr hoch* gefährdete Flächen außerhalb der Gerinne nur

sehr selten und wenn, dann kleinflächig vorkommen, dass kaum Siedlungsflächen und Verkehrswege betroffen sind, und dass die Fließhöhen außerhalb der Gerinne relativ gering sind.

7.4 Validierung der Ergebnisse anhand historischer Ereignisse

Die flächendeckende und laufend aktualisierte südtiroler Ereignisdatenbank ED30 erwies sich als äußerst hilfreich. Ihre Hinweise auf Murgänge stützen sich auf Zinsnachlässe im Mittelalter, Chronikauszüge, Einsatzstunden der Feuerwehr und Schäden vor allem an Feldern. Jüngere Ereignisse sind häufig auch durch Fotos dokumentiert.

Die Analyse zeigt, dass die Wildbachereignisse im Langtaufertal durch eine lange und unregelmäßige Wiederkehrdauer geprägt sind. Die Unregelmäßigkeit zeigt sich an den längeren Ruhepausen zwischen den Ereignissen und an oftmals knapp aufeinander folgenden Ereignissen. Allerdings kann die Unregelmäßigkeit auch durch die Nicht-Erfassung von Ereignissen zu Stande kommen. Die Aufbauschung von Großereignissen und das Vernachlässigen von kleineren Ereignissen ohne nennenswerte Schäden, sowie fehlende Dokumentation in Ausnahmезuständen (z.B. in den Kriegsjahren) sind als Mängel historischer Analysen allgemein bekannt. Beispielsweise liegt für das Großereignis von 1901 ein ausführliches Zeitdokument vor, aber für kleinere Ereignisse sind die Angaben spärlich. Eine Häufung der dokumentierten Ereignisse ab etwa 1950 kann auch mit einer gestiegenen Aufmerksamkeit und einer häufigeren Berichterstattung durch die Medien zusammenhängen. Eine Einordnung der Intensität der Ereignisse erwies sich als schwierig, da quantitative Angaben zu Abfluss und Geschiebe meist fehlen. Dennoch kann eine Aussage über das größte je dokumentierte Murgangereignis getroffen werden, nämlich jenes von 1901, bei dem die Schneeschmelze in Kombination mit einem Niederschlagsereignis der Auslöser war und von dem das ganze Tal betroffen war. Ansonsten deuten nur wenige Dokumente auf größere Ereignisse hin (z.B. im Jahr 1958: Patzin- und Patscheiderbach; im 1965: Patscheider- und Kapplerbach). Hinweise auf die Intensität ergaben sich allenfalls aus dokumentierten Schäden, welche sich meist auf landwirtschaftliche Flächen beschränken.

Die unregelmäßige Wiederkehrdauer und die dürftigen Angaben zur Ereignisintensität hätten eine korrekte statistische Auswertung in Form einer Frequenz-Magnitude-Beziehung nicht ermöglicht. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass eine statistische Ableitung von Wiederkehrintervallen selbst dann zweifelhaft wäre, wenn eine gute Datenbasis vorläge. Denn natürliche Prozesse weisen häufig ein nicht-lineares Verhalten auf (Schrott und Glade 2008), beispielsweise kann auf einer Periode mit häufigen Murgängen eine längere Ruheperiode folgen, da die Einzugsgebiete "leergesäumt" sind und die Verwitterung erst wieder arbeiten muss (Marchi 2005).

Trotz der mangelhaft dokumentierten historischen Ereignisse wurde an ihnen die Plausibilität der Simulationsergebnisse überprüft. Dabei deckten sich die Anhaltspunkte für das Ausmaß vergangener Ereignisse nur teilweise mit den Simulationsergebnissen. Vielfach scheinen die Vermurungen in der Vergangenheit katastrophaler ausgefallen zu sein, als es die Simulationen mit FLO-2D zeigen. Dies kann mehrere Ursachen haben. Möglicherweise gab es die Schutzbauwerke noch nicht oder sie waren in einem anderen Zustand. Auch ist die Geländeoberfläche in ständigem Wandel begriffen, und schon kleine Veränderungen (z.B. Einebnungen oder Ablagerungen) können die Fließrichtung von Muren beeinflussen. Daneben können ungenaue Angaben wie etwa "Vermurung Patscheid" (1965) sehr weitläufig interpretiert werden. Die Richtung, in die die Muren tendentiell aus dem Gerinne ausbrechen, stimmt jedoch im Großen und Ganzen mit den archivierten Ereignissen überein (z.B. Kapplerbach, Abbildung).

Darüber hinaus zeigen die Simulationsergebnisse, dass die vorhandenen Schutzbauten, die einem 100-jährlichen Hochwasser standhalten sollten, auch in der Simulation als ausreichend bemessen erscheinen. Lediglich der Kapplerbach tritt in der Simulation schon bei einem 30-jährlichen Ereignis über die Ufer und vermurt große Flächen.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass die simulierten Gefahrenzonen auf dem Wissen vergangener Ereignisse basiert. Sie können demnach nur das Eintreten oder Nicht-Eintreten eines Ereignisses vollständig bestätigt werden (Egner und Pott 2010).

7.5 Diskussion der Hypothesen

Die eingangs formulierten Hypothesen sollen abschließend überprüft werden.

Hypothese 1: Die Gefährdungsvoraussetzungen für Muren im Langtaufertal werden maßgeblich durch das maximal mobilisierbare Feststoffvolumen und den Gebietsabfluss gestellt.

Hypothese 1 kann bestätigt werden. Die implizite Annahme, dass das Geschiebe nur bis zur Auslastung der Transportkapazität transportiert wird, und eine hohe Gefährdung am Kegel demnach sowohl hohe Feststoffvolumen als auch hohe Abflüsse voraussetzt, spiegelt sich in den Ergebnissen wider. Der am höchsten gefährdete Kegel ist jener des Kapplerbachs; hier wurden sowohl die höchsten Feststoffvolumen als auch die höchsten Spitzenabflüsse ermittelt. Demgegenüber weisen die Bäche Faller und Patscheider die geringsten Feststoffvolumen und geringe Abflüsse auf, womit keine nennenswerte Gefahr außerhalb der Gerinne zu erwarten ist. Am Beispiel des Patzinbachs wird deutlich, dass auch die Höhe des Abflusses wesentlich zur Gefährdungssituation am Kegel

beiträgt. Hier wurden die zweit-höchsten Feststoffvolumen geschätzt, die Gefährdung ist im Vergleich zu Bächen mit niedrigeren Feststoffvolumen aber nicht wesentlich höher.

Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass andere Aspekte wie Rasterauflösung, Gerinnegeometrie und die Schutzbauwerke großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

Hypothese 2: *Das hydraulische Modell FLO-2D ist in der Lage, die Gefährdungssituation hinreichend darzustellen.*

Hypothese 2 kann bestätigt werden. Mit der Gerinnegeometrie, abflussbehindernden Elementen und rheologischen Eigenschaften kann FLO-2D wichtige Faktoren berücksichtigen. Trotz der diskutierten Unschärfen – unvollständige historische Dokumentation, subjektive Schätzwerte, Aspekthaftigkeit der Modelle und nicht-lineares Prozessverhalten von Murgängen – können mit FLO-2D plausible Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet erzielt werden.

8 Perspektiven

In der Diskussion wurden einige Aspekte angeschnitten, die in der Arbeit zwar nicht berücksichtigt wurden, die aber zu einer vertiefenden Untersuchung reizen.

Die Gefahrenanalyse und damit die Bestimmung des Gefahrenausmaßes bildet nur einen Teilaspekt eines umfassenden Schutzkonzepts ab. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit wäre die Bestimmung des Schadenspotentials (Vulnerabilitätsanalyse) und des Schadensausmaßes (Risikoanalyse) wünschenswert. Risikoanalysen bewerten die Gefahr und ermöglichen damit sinnvolle Kosten-Nutzen-Analysen, die bei der Planung von Schutzmaßnahmen oder bei der Abwägung von Nutzungsmöglichkeiten hilfreich sind (Kienholz 2005).

Wie in der Diskussion erwähnt, bietet die Anwendung der Geomorphologischen Methode zur Ermittlung von Feststoffvolumen gegenüber der Anwendung empirischer Formeln große Vorteile. Eine Geländebegehung ist allerdings nicht in allen Fällen möglich. Durch die Formulierung von empirischen Gesetzmäßigkeiten speziell für das Untersuchungsgebiet könnte der Bearbeitungsaufwand für eine grobe, aber plausible Abschätzung deutlich minimiert werden.

Die Modellierungsergebnisse in FLO-2D könnten durch die Erhebung der beiden maßgeblichen Parameter für das Fließverhalten von Muren (die Grenzschubspannung und die Viskosität) verbessert werden. In den meisten Fällen ist es zwar nicht möglich, die rheologischen Parameter für das komplette Kornspektrum des mobilisierbaren Sediments im Labor zu bestimmen. Von einem Teil des Materials (z.B. den Feinanteil) kann aber auf das Gesamtmaterial geschlossen werden. Für ein reales Ereignis können die Parameter anhand des Murgangmaterials rückgerechnet werden.

Durch veränderte Umweltbedingungen, vor allem in Bezug auf das Klima, können sich auch die Naturprozesse und die Gefahren ändern. Der Klimawandel wird sich, global gesehen, im Alpenraum besonders stark manifestieren. Eine Auswertung von Klimaszenarien für Südtirol hat gezeigt, dass die Klimaentwicklung eher *extremen* Szenarien folgt (Zebisch et al. 2011). Durch die Erderwärmung ist die Zunahme von heißen Sommertagen und damit auch eine Zunahme von konvektiven Niederschlägen wahrscheinlich. Die Sensitivität der Wildbacheinzugsgebiete auf die Klimaänderung könnte anhand von verschiedenen Szenarien geprüft werden. In einer Studie von Staffler et al. (Staffler et al. 2008) wurde untersucht, ob und inwiefern das Gefahrenausmaß sich bei einer Zunahme von Starkniederschlägen auswirken würde. Darüber hinaus sind auch andere Szenarien vorstellbar, wie etwa ein verändertes Niederschlagsverhalten im Winter.

Grundsätzlich ist die gewählte Vorgangsweise und sind die gewählten flexiblen Methoden auch auf andere Gebiete anwendbar.

Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (2003): Einführung in die Geomorphologie. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- AIDI (2003): Relazione n. 2: Analisi del regime delle piogge intense per la provincia autonoma di Bolzano. Bozen.
- Anderson, M. G. und T. P. Burt (1985): Modelling strategies. In: M. G. Anderson und T. P. Burt (1985): Hydrological Forecasting. Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore, John Wiley & Sons Ltd.
- Aut. Prov. BZ (2008): IHR - Informationssystem zu hydrogeologischen Risiken. Methodischer Endbericht. Bozen.
- Aut. Prov. BZ (2010): Wassernutzungsplan für die Autonome Provinz Bozen. Teil 1: Aktuelle Situation: 182.
- Aut. Prov. BZ (2011^a): Wildbach- und Lawinenverbauung - Geschichte.
<http://www.provinz.bz.it/wasserschutzbauten/wildbachverbauung/geschichte.asp>; zuletzt eingesehen am 25.08.2012.
- Aut. Prov. BZ (2011^b): Pressemitteilungen.
http://www.provinz.bz.it/lpa/285.asp?aktuelles_action=4&aktuelles_article_id=360107; zuletzt eingesehen am 02.10.2012.
- Aut. Prov. BZ, Abteilung Informationstechnik. (2012^a): Digitales Geländemodell.
<http://www.provinz.bz.it/informatik/kartografie/landeskartografie-digitales-Gelaendemodell.asp>
zuletzt eingesehen am 25.08.2012.
- Aut. Prov. BZ, Abteilung Informationstechnik. (2012^b): Orthofoto.
<http://www.provinz.bz.it/informatik/kartografie/landeskartografie-orthofoto.asp>; zuletzt eingesehen am 25.08.2012.
- Aut. Prov. BZ, Abteilung Wasserschutzbauten. (2006): Richtlinien zur Erstellung der Gefahrenzonenpläne (GZP) und zur Klassifizierung des Spezifischen Risikos (KSR). Bozen.
- Bailer-Jones, D. M. (2002): Naturwissenschaftliche Modelle: Von Epistemologie zu Ontologie. Argument und Analyse - Sektionsvorträge, GAP4 e-Proceedings. Paderborn, Mentis Verlag.
- Beven, K. (2012): Rainfall-Runoff Modelling. Chichester, Wiley-Blackwell.
- Blair, T. C. und J. G. McPherson (1998): Recent debris flow processes and resultant form and facies of the Dolomite alluvial fan, Owens Valley, California. J. Sediment. Res. 68: 800-818.
- Bovis, M. J. und M. Jakob (1999): The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. Earth Surface Processes and Landforms 24: 1039-1054.
- Bremer, M. und O. Sass (2012): Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. Geomorphology 138: 49-60.

Brochot, S., L. Marchi und M. Lang (2002): L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 61 (4): 389-402.

Bunza, G. (1976): Geologisch-morphologische Grundlagen der Wilbachkunde. Teil 1: Systematik und Analyse alpiner Massenbewegungen. München.

BUWAL (1999): Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 107/I.

BUWAL und BWW (1995): Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene. Bern.

BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Bern.

Carrara, A., G. Crosta und P. Frattini (2003): Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 1125-1142.

Cazorzi, F. (2002): HyGrid2k2. Guida di riferimento, Università degli Studi di Udine, Novembre 2002.

Chen, J. C., C. D. Jan und M. H. Lee (2008): Reliability analysis of design discharge for mountainous gully flow. *Journal of Hydraulic Research* 46 (6): 835-838.

Corominas, J. (1996): The angle of reach as mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33: 260-271.

Costa, J. E. (1984): Physical geomorphology of debris flows. In: J. E. Costa und P. J. Fleisher (1984): *Developments and applications of geomorphology*. Berlin, Springer: 268-317.

Crosta, G. B., S. Cucchiari und P. Frattini (2003): Validation of semi empirical relationships for the definition of debris-flow behaviour in granular materials. *Proc.3rd International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*: 821-831. Rotterdam, Millpress.

Crozier, M. J. und T. Glade (2005): Landslide Hazard and risk: Issues, Concepts, and approach. In: T. Glade, M. Anderson und M. Crozier (2005): *Landslide hazard and risk*. Chichester, Wiley: 1-40.

Cutter, S. (1996): Vulnerability to environmental hazards. *Progra. Human Geogra.* 20: 529-539.

D'Agostino, V. (1996): Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale. Novara (Italy).

Degetto, M., G. Crucil, A. Pimazzoni, et al. (2001): An estimate of the sediments volume entrainable by debris flow along Strobel and south Pezori's channels at Fiammes (Dolomites, Italy). *Proceedings of the 5th International Conference: Debris-Flow Hazard Mitigation - Mechanics, Prediction and Assessment*: 845-854. Padova, Italy.

Dikau, R. (2004): Die Bewertung von Naturgefahren als Aufgabenfeld der Angewandten Geomorphologie. *Zeitschrift für Geomorphologie* 136: 179-191.

Dikau, R. und T. Glade (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau* 54: 38-45.

Du, J.-C. und H.-C. Teng (2007): 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation. *Automation in Construction* 16: 657-663.

Dyck, S. und G. Peschke (1995): *Grundlagen der Hydrologie*. Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH.

Egner, H. und A. Pott (2010): "Ja, irgendwo muss man die Grenze ziehen" - Über Risikomanagement von Naturgefahren in der Schweiz. Ein Gespräch mit Dr. Michael Bründl (SLF, Davos). In: H. Egner und A. Pott (2010): *Geographische Risikoforschung. Zur Konstruktion verräumlichter Risiken und Sicherheiten*. Schriftenreihe für Forschung und Praxis, Band 147. Stuttgart, Franz Steiner Verlag.

Elverfeldt von, K., T. Glade und R. Dikau (2008): *Naturwissenschaftliche Gefahren- und Risikoanalyse*. In: C. Felgentreff und T. Glade (2008): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag: 31-46.

Fischer, K. (1965): *Murschuttkegel, Schwemmkegel und Kegelsimse in den Alpentälern*. Mit. Geogr. Ges. München 50.

Fliri, F. (1975): *Das Klima der Alpen im Raum Tirols: Monographien zur Landeskunde Tirols 1* Innsbruck.

Frick, E., H. Kienholz und H. Romang (2011): *SEDEX Anwenderhandbuch*. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.

Fuchs, S., K. Heiss und J. Hübl (2007): Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 7: 495-506.

Fürst, J. (2004): *GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag.

Geo Data Zone (2011): Hochwasserganglinie. <http://www.geodz.com/deu/d/Hochwasserganglinie>; zuletzt eingesehen am 04.10.2012.

Hammer, W. (1911): Die Schichtfolge und der Bau des Jaggl im oberen Vintschgau. *Jahrbuch der k.u.k. Geologischen Reichsanstalt* 61: 1-40.

Hegg, C., D. Rickenmann und F. Forster (2001): Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. *Bull. angew. Geol.* 6 (1): 85-97.

Heim, A. (1932): *Bergsturz und Menschenleben*. Zürich, Fretz & Wasmuth Verlag AG.

Heinimann, H. R., K. Hollenstein, H. Kienholz, et al. (1998): *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Bern.

Helsen, M. M., P. J. M. Koop und H. v. Steijn (2002): Magnitude-frequency relationships for debris flows on the fan of the Chalance torrent, Valgaudemar (French Alps). *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (12): 1299-1307.

Hohenegger, H. (1969): Langtaufers: ein abgeschiedenes Hochtal im Spiegel seiner Geschichte. *Der Schlern* 43: 266-280.

Hollenstein, K. (1997): *Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken*. Zürich.

Homepage der Gemeinde Graun i.V. (o. J.): Zahlen und Fakten. <http://www.gemeinde.graun.bz.it>; zuletzt eingesehen am 25.08.2012.

Hosking, J. R. M. (1990): L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. J. R. Stat. Soc, Ser. B 52 (2): 105-124.

Hübl, J. (1996): Muren als Transportprozessform in Einzugsgebieten. Interpraevent 3: 93-101.

Hübl, J. (2000): Zweidimensionale Modellierung von Murgängen anhand zweier ausgewählter Beispiele in Österreich. Interpraevent 3: 179-190.

Hübl, J., G. Bunza, K. Hafner, et al. (2003): ETAlp - Erosion, Transport in Alpinen Systemen "Stummer Zeugen Katalog".

Hungr, O. (2005): Classification and terminology. In: M. Jakob und O. Hungr (2005): Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin Heidelberg, Springer: 9-23.

Hungr, O., G. C. Morgan und R. Kellerhals (1984): Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal 21 (4): 663-677.

HYDROS GmbH/srl (2010): Kraftwerk Graun. <http://www.hydros.bz.it/index.php?id=615>; zuletzt eingesehen am 17.08.2012.

Institut für Geographie, U. M. (1992): Modelluntersuchung zur Erfassung und Bewertung des Gefährdungspotentials durch Muren sowie Lawinen im Langtaufener Tal. München.

Iverson, R. M. (1997): The Physics of Debris Flows. Reviews of Geophysics 35 (3): 245-296.

Iverson, R. M., S. P. Schilling und J. W. Vallance (1998): Objective delineation of lahar inundation hazard zones. GSA Bulletin 110: 972-984.

Jakob, M. (2005): Debris-flow hazard analysis. In: M. Jakob und O. Hungr (2005): Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin Heidelberg, Springer: 411-443.

Jakob, M. und O. Hungr (2005): Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin Heidelberg, Springer.

Jenkinson, A. F. (1955): The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. Quarterly J. Royal Met. Soc.: 87-158.

Johnson, A. M. und P. H. Rahn (1970): Mobilization of debris flows. Zeitschrift für Geomorphologie 9: 168-186.

Kang, Z. und S. Zhang (1980): A preliminary analysis of the characteristics of debris flow. International Symposium on River Sedimentation: 213-220. Beijing, China.

Kanonier, A. (2006): Raumplanungsrechtliche Regelungen als Teil des Naturgefahrenmanagements In: L. Khakzadeh, S. Fuchs und K. Weber (2006): Recht im Naturgefahrenmanagement. Innsbruck: 123-153.

Kienholz, H. (2005): Analyse und Bewertung alpiner Naturgefahren - eine Daueraufgabe im Rahmen des integralen Risikomanagements. Geographica Helvetica 11: 3-15.

Kronfellner-Kraus, G. (1984): Extreme Feststofffrachten und Grabenbildung von Wildbächen. *Interpraevent* 2: 109-118.

Kronfellner-Kraus, G. (1985): Quantitative estimation of torrent erosion. Tsukuba (Japan).

Macconi, P. und M. Sperling (2008): Ereignisdokumentation an der Abteilung Wasserschutzbauten (ED30). In: Aut. Prov. BZ Abteilung Wasserschutzbauten (2008): IHR Informationssystem zu hydrogeologischen Risiken. Methodischer Endbericht. Bozen: 27-30.

Maidment, D. R. (1993): GIS and Hydrological Modeling. In: M. F. Goodchild, B. O. Parks und L. T. Steyaert (1993): *Environmental Modeling with GIS*. New York, Oxford, Oxford University Press.

Mani, P. (1996): Sedimentkaskaden in Wildbacheinzugsgebieten - ein GIS-basierter Ansatz. *Interpraevent* 3 (71-81).

Mani, P., H. Staffler und E. Berger (2008): Gefahrenhinweiskarte Wildbäche - Prozesse Murgang und Übersarung. In: Aut. Prov. BZ Abteilung Wasserschutzbauten (2008): IHR Informationssystem zu hydrogeologischen Risiken. Methodischer Endbericht. Bozen: 31-41.

Maniak, U. (2005): *Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Berlin Heidelberg Springer-Verlag.

Marchi, L. (2005): Elementi per la determinazione dell'intensità delle colate detritiche. *Université Européenne d'été sur les risques naturels*. Courmayeur (AO): 2.1 - 2.20.

Marchi, L. und V. D'Agostino (2004): Estimation of Debris-Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surf. Processes and Landforms* 29: 207-220.

Merwade, V. (2009): Tutorial on using HEC-GeoRAS with ArcGIS 9.3.

O'Brien, J. S. (2009): *FLO-2D Reference Manual*, Version 2009, FLO-2D Software, Inc.

O'Brien, J. S., P. Y. Julien und W. T. Fullerton (1993): Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119: 244-261.

ONR (2009): Österreichisches Normungsinstitut, ONR 24 800: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffserklärungen und Klassifizierungen.

Raffeiner, H. (2010): *Talbuch Langtaufers*. Lana, Tappeiner.

Rickenmann, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards* 19 (1): 47-77.

Rickenmann, D. (2005): Runout prediction methods. In: M. Jakob und O. Hungr (2005): *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg, Springer: 305-324.

Rickenmann, D. (2007): Modellierung von Murgängen und Sedimenttransport in Wildbächen. Tagespublikation zum 1. Departmentkongress Bautechnik und Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Wien, Ernst und Sohn Verlag: 29-35.

Rickenmann, D. und C. Scheidl (2010): Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen. *Wasser Energie Luft* 1: 17-26.

Rudolf-Miklau, F. (2005): Alpine Naturgefahren - Sicherheit, Schutz und Risiko: Wo liegen die Grenzen? Wildbach- und Lawinenverbau 69 (153): 31-39.

Rudolf-Miklau, F. (2009): Naturgefahren-Management in Österreich: Vorsorge, Bewältigung, Information. Wien, LexisNexis ARD ORAC.

Scheidl, C., D. Rickenmann und M. Chiari (2008): The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 8: 1113-1127.

Scheuringer, E. (1988): Ermittlung der maßgeblichen Geschiebefracht an Wildbach-Oberläufen. Wildbach- und Lawinenverbau, Jg. 52 109: 87-95.

Schrott, L. und T. Glade (2008): Frequenz und Magnitude natürlicher Prozesse. In: C. Felgentreff und T. Glade (2008): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag: 133-140.

Seijmonsbergen, A. C. und L. W. S. de Graaff (2006): Geomorphological mapping and geophysical profiling for the evaluation of natural hazards in an alpine catchment. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 6 (185-193).

Seijmonsbergen, H. (2008): Digital geomorphological information for alpine hazard studies using laser altimetry data and GIS. Interpraevent - Conference Proceedings 2.

Smith, K. (2004): Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster (4. Ausgabe). London, Routledge.

Spreafico, M., C. Lehmann und O. Naef (1999): Recommandations concernant l'estimation de la charge sédimentaire dans les torrents. Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle (GHO), communication n. 4a: 48 pp plus annexes. Berne.

Staffler, H., R. Pollinger, A. Zischg, et al. (2008): Spatial variability and potential impacts of climate change on flood and debris flow hazard zone mapping and implications for risk management. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 8: 539-558.

Stingl, V. und V. Mair (2005): Einführung in die Geologie Südtirols. Bozen.

Stiny, J. (1931): Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Wien, Julius Springer Verlag.

Stoffel, M. (2010): Magnitude-frequency relationships of debris flows - A case study based on field surveys and tree-ring records. Geomorphology 116: 67-76.

Takahashi, T. (1991): Debris flow. Rotterdam, Balkema.

U.S. Department of Agriculture, S. C. S. (1964): SCS National Engineering Handbook. Section 4. Washington.

U.S. Department of Agriculture, S. C. S. (1972): SCS National Engineering Handbook. Washington. Section 4: 762.

UIBK (2012): Tirolatlas Kartenset Niederschlag. Mittlerer Jahresniederschlag 1980 - 2000. <http://tirolatlas.uibk.ac.at/>; zuletzt eingesehen am 14.08.2012.

UNISDR (2009): UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Geneva (Switzerland), United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR).

van Steijn, H. (1996): Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. *Geomorphology* 15: 259-273.

Varnes, D. J. (1978): Slope movement types and processes. In: R. L. Schuster und R. J. Krizek (1978): *Landslides - Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report, 176. National Academy of Sciences: 11-33.

Varnes, D. J. (1984): *Landslides hazard zonation: a review of principles and practice*. Paris, UNESCO.

Wieczorek, G. F. und T. Glade (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flow. In: M. Jakob und O. Hungr (2005): *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin Heidelberg, Springer.

Zebisch, M., U. Tappeiner, M. Elmi, et al. (2011): *Klimareport Südtirol*. Bozen.

Zimmermann, M., P. Mani, P. Gamma, et al. (1997): *Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz*. Zürich.

Zimmermann, M., P. Mani und H. Romang (1997): Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 90: 415-420.

Zischg, A., P. Macconi, R. Pollinger, et al. (2007): Historische Überschwemmungs- und Murgangereignisse in Südtirol. Erhebung und Dokumentation. *Der Schlern*. 3 (81): 3-16.

Anhang

Anhang A – Datengrundlagen	iii
Anhang B – Methode	iv
Anhang C – Ergebnisse	ix
Lebenslauf	xxxi

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A. 1: Geologie.....	iii
Abbildung A.2: Karte der Realnutzung.....	iii
Abbildung A.3: Benutzeroberfläche GDS. Begrenzung für Berechnungsfläche in rot, Grid-Erstellung (Screenshot)	vi
Abbildung A.4: Interpolierte Manning-Werte (links); Definition von ARF (rechts) (Screenshots).....	vi
Abbildung A.5: Zuweisen von HEC-RAS Profilen (links) und erstellter Kanal (rechts).....	vii
Abbildung A.6: Inflow/Outflow Element definieren (links); Floodplain FPLAIN.DAT mit erstellten Layern speichern (rechts) (Screenshot)	viii
Abbildung A.7: Simulationsfenster FLO-2D	viii
Abbildung A. 8: Zeichenerklärung Geomorphologische Kartierung	ix
Abbildung A.9: Geomorphologische Übersichtskartierung	x
Abbildung A.10: Geomorphologische Methode, Bach-Abschnitte	xi
Abbildung A.11: Fallerbach, unverbauter Unterlauf (links), Mittellauf (rechts)	xii
Abbildung A.12: Pleiferbach, Murkegel	xii
Abbildung A.13: Patzinbach, Verbauung (Quelle: BAUKAT30)	xii
Abbildung A.14: Patscheiderbach, Murkegel (links) und Mittellauf mit Ablagerungen (rechts)	xii
Abbildung A.15: Bratzenbach, Mittellauf.....	xiii
Abbildung A.16: Kapplerbach, Konsolidierungssperren (links) und Erosionskanal (rechts)	xiii
Abbildung A.17: Kapplerbach, Unterlauf	xiii
Abbildung A.18: Außervallatschbach, Verbauung.....	xiii
Abbildung A.19: Außervallatschbach, Ablagerungsbereich (links) und Mittellauf (rechts)	xiv
Abbildung A.20: Curve Number	xiv
Abbildung A.21: Fallerbach-Valserbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xvi
Abbildung A.22: Pleiferbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xviii

Abbildung A.23: Patzinbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xx
Abbildung A.24: Patscheiderbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xxii
Abbildung A.25: Bratzenbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xxiv
Abbildung A.26: Kapplerbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xxv
Abbildung A.27: Außer Vallatschbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300	xxvii
Abbildung A.28: Murgang im Kapplerbach vom 27.06.1965 (Quelle: ED30)	xxix
Abbildung A.29: Tageszeitung Dolomiten vom 2. Juli 1987	xxix
Abbildung A.30: Murgang im Außervallatschbach vom 23.08.2005 (Quelle: ED30)	xxix

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A.1: Geologische Einheiten laut Geologie-Shapefile mit abgeleiteten Permeabilitätsklassen aufgrund hydrologischer Bodentypen für die Zuweisung von CN-Werten (nach Cazorzi 2002 und Maniak 2005)	iv
Tabelle A.2: Kombinationsmatrix aus Realnutzung und Permeabilitätsklassen (hydrologischem Bodentyp) für die Zuweisung von CN-Werten (Maniak 2005)	iv
Tabelle A.3: Eingangsdaten, Ergebnisdateien und gewählte Parameter der Module in HyGrid2k2 ...	v
Tabelle A.4: Fallerbach-Valserbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xv
Tabelle A.5: Pleiferbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xvii
Tabelle A.6: Patzinbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xix
Tabelle A.7: Patscheiderbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xxi
Tabelle A.8: Bratzenbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xxiii
Tabelle A.9: Kapplerbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xxv
Tabelle A.10: Außer Vallatschbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)	xxvi
Tabelle A.11: Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse in FLO-2D (* insgesamt; ** nur außerhalb des Kanals)	xxviii

Anhang A – Datengrundlagen

Abbildung A. 1: Geologie

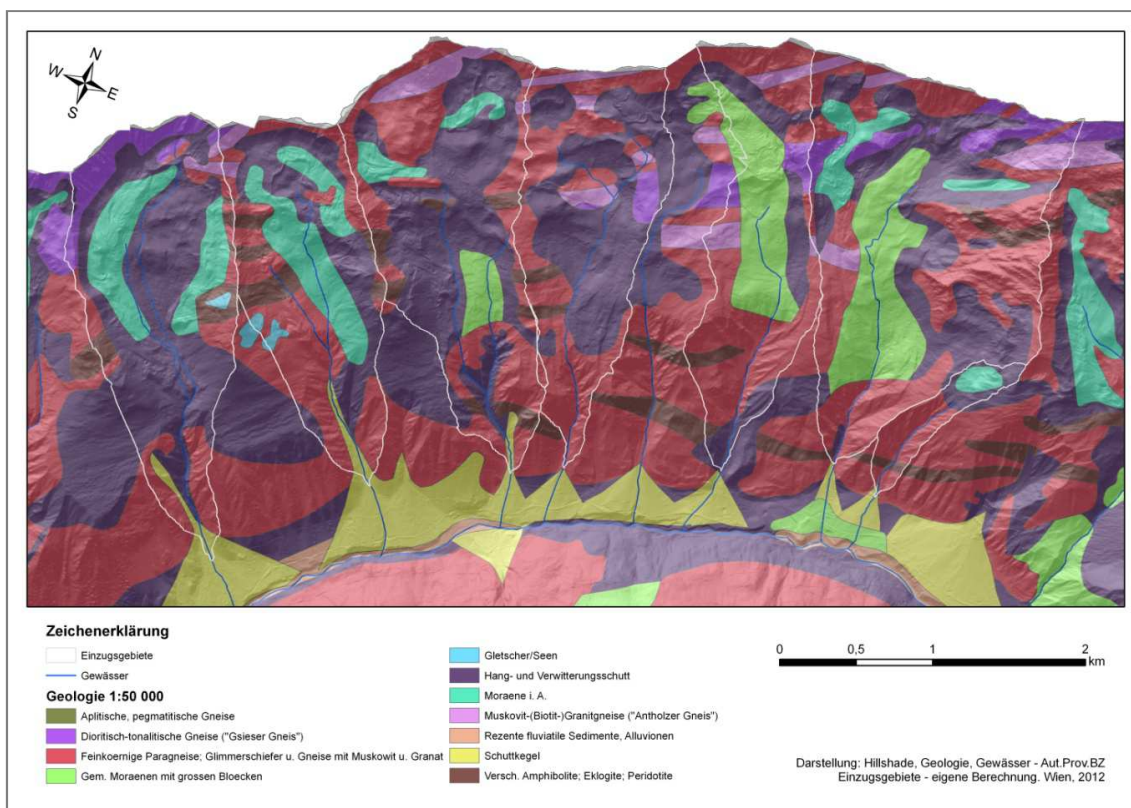
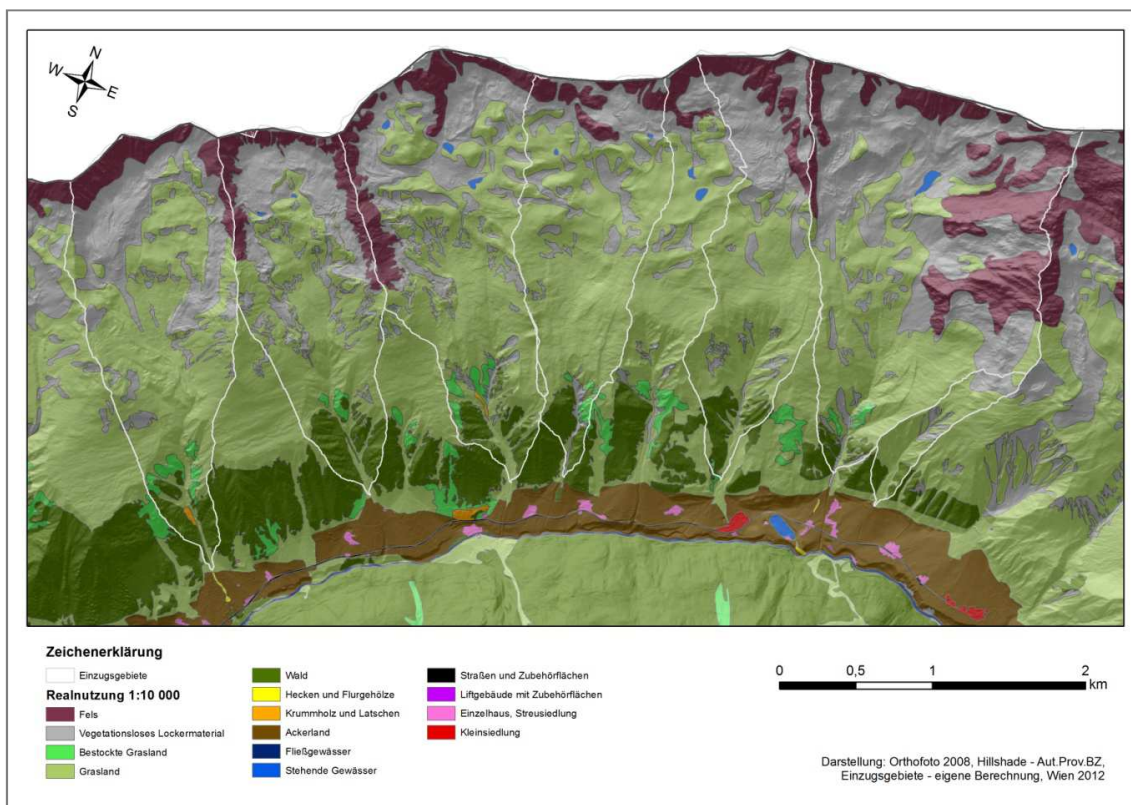


Abbildung A.2: Karte der Realnutzung



Anhang B – Methode

Tabelle A.1: Geologische Einheiten laut Geologie-Shapefile mit abgeleiteten Permeabilitätsklassen aufgrund hydrologischer Bodentypen für die Zuweisung von CN-Werten (nach Cazorzi 2002 und Maniak 2005)

Geologische Einheit	Permeabilitätsklasse
Gletscher/Seen	0
Hang- und Verwitterungsschutt	1
Hang- und Verwitterungsschutt	1
Rezente fluviatile Sedimente, Alluvionen	1
Schuttkegel	1
Schwemmkegel	1
Undiff. Sedimente: Kalke u. Dolomite, Phyllite, Schiefer, Quarzite	1
Gem. Moraenen mit grossen Bloecken	2
Moraene i. A.	2
Muskovit-(Biotit-)Granitgneise ("Antholzer Gneis")	4
Quarzdiorite; Gabbros m. Hornblende	4
Quarzite (glimmerführend)	4
Aplitische, pegmatitische Gneise	4
Augengneise m. Biotit (u. Muskowit) ("Texelspitz-Gn."); geschiefert ("Tauferer Gneis")	4
Dioritisch-tonalitische Gneise ("Gsieser Gneis")	4
Feinkörnige Paragneise; Glimmerschiefer u. Gneise mit Muskowit u. Granat	4
Versch. Amphibolite; Eklogite; Peridotite	4

Tabelle A.2: Kombinationsmatrix aus Realnutzung und Permeabilitätsklassen (hydrologischem Bodentyp) für die Zuweisung von CN-Werten (Maniak 2005)

Realnutzung	Nr.	Permeabilitätsklassen			
		1	2	3	4
Abbaufläche	1	77	86	91	94
Ackerland	2	30	58	71	78
Bestockte Grasland	3	30	58	71	78
Dauerkulturen	4	36	60	73	79
Deponie, Abraumhalde	5	100	100	100	100
Dichte städtische Bebauung	6	92	94	96	98
Einzelhaus, Streusiedlung	7	100	100	100	100
Eisenbahnlinien und Zubehörflächen	8	92	94	96	98
Entsorgungsanlage	9	92	94	96	98
Fels	10	71	88	99	99
Feuchtfächen	11	100	100	100	100
Fließgewässer	12	100	100	100	100
Flughafen	13	100	100	100	100
Friedhof	14	30	58	71	78
Gletscher	15	100	100	100	100
Grünfläche innerhalb Siedlungen	16	30	58	71	78
Grasland	17	49	69	79	84
Hecken und Flurgehölze	18	45	66	77	83
Industrie und Gewerbeflächen	19	92	94	96	98
Kleinsiedlung	20	59	74	82	86
Krummholz und Latschen	21	52	65	72	88
Liftgebäude mit Zubehörflächen	22	50	57	80	92
Lockere städtische Bebauung	23	88	90	92	94
Militärfläche	24	88	90	92	94
Nicht klassifizierbare, künstliche Oberfläche	25	100	100	100	100
Sonstige öffentliche Einrichtungen	27	92	94	96	98
Sonstige landwirtschaftliche Flächen	26	70	80	87	90

Sport und Freizeiteinrichtungen	28	88	90	92	94
Staudamm	29	0	0	0	0
Stehende Gewässer	30	100	100	100	100
Straßen und Zubehörfächen	31	74	84	90	92
Vegetationsloses Lockermaterial	32	53	72	80	94
Wald	33	36	60	73	79

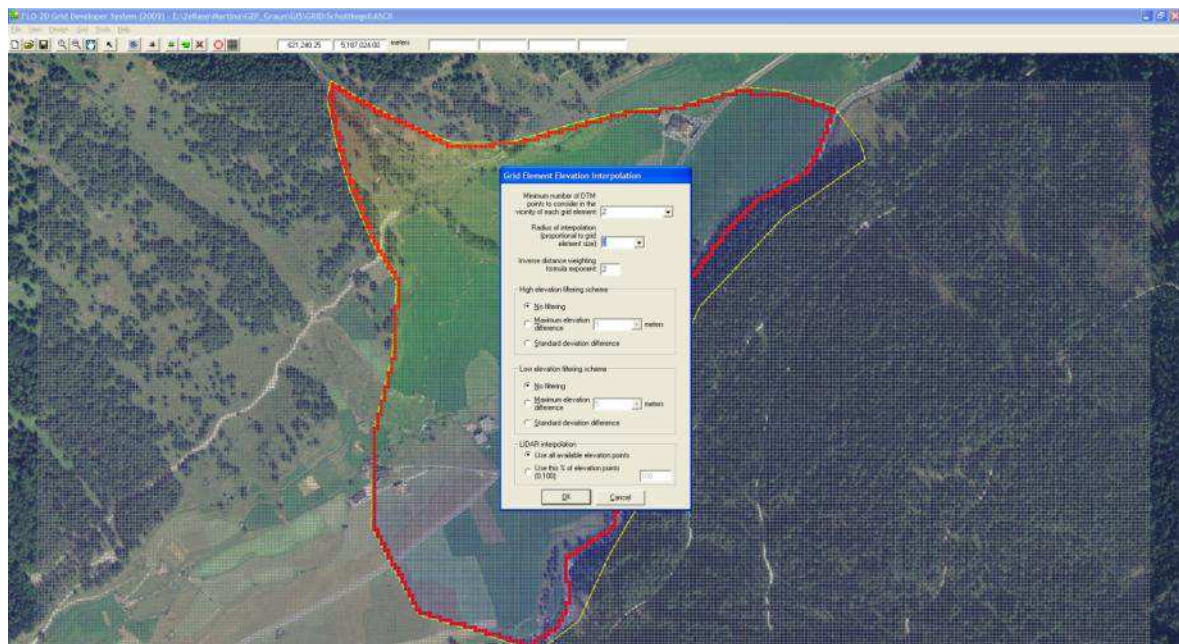
Tabelle A.3: Eingangsdaten, Ergebnisdateien und gewählte Parameter der Module in HyGrid2k2

PIT REMOVER	
Eingangsdatei	DGM
Ergebnisdatei	DGMnoPIT
UPSLOPE AREA	
Eingangsdatei	DGMnoPIT
Ergebnisdatei I	UpslopeArea
Ergebnisdatei II	FlowDirection (Fließrichtung für jedes Pixel, Azimuth)
Ergebnisdatei III	FlowDistance (hydrographische Distanz in Metern)
AREA HYDRO NET	
Eingangsdatei I	Upslope Area
Eingangsdatei II	FlowDirection
Eingangsdatei III	FlowDistance Grid File
Ergebnisdatei I	NetSynth
Ergebnisdatei II	Overland
Ergebnisdatei III	Channel
ROUTING TIME	
Eingangsdatei I	UpslopeArea
Eingangsdatei II	FlowDirection
Ergebnisdatei I	Routing Time
Ergebnisdatei II	Velocity
CLEM	
Eingangsdaten I	CN-Werte
Eingangsdatei II	Routing Time
Eingangsdaten III	Niederschläge (Parameter n und a, Tabelle 5.4)
Bodenfeuchtekategorie	4
Input Time Step	1 [min]
Initial Discharge	0,1 (100 l/sec)
Recession Parameter	7 (alfa)
Output Time Step	1 [min]

Grid Developer System (GDS)

- ASCII Datei auswählen: *File > New Project > from Existing ASCII Grid File*
- Grid erstellen: *Grid > Create Grid (5m)*
- Begrenzung für Berechnungsfläche definieren: *Grid > Setup Computation Area > Define Modeling Boundary with Polygon*
- Höhe auf 5m Grid interpolieren: *Tools > Options > Interpolation* (4 ASCII-Punkte für 1 Zelle; Radius 2,5; Invers distance weighting formula exponent 2) (Abbildung A.3)
- *Grid > Interpolate Elevation Points*

Abbildung A.3: Benutzeroberfläche GDS. Begrenzung für Berechnungsfläche in rot, Grid-Erstellung (Screenshot)



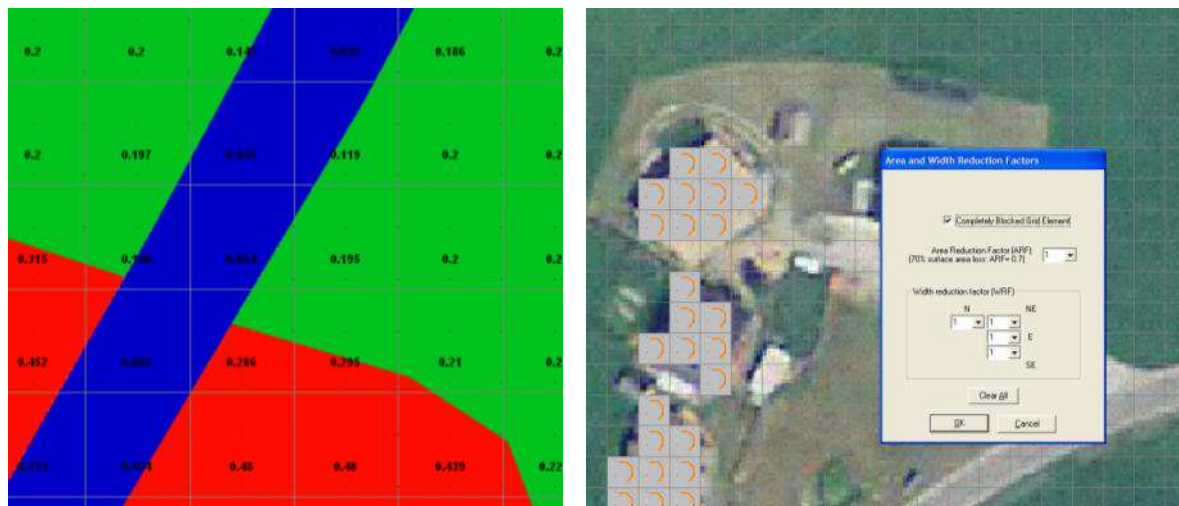
Manning-Werte (Abbildung A.4, links)

- File > Import Shape File
- Grid > Compute Manning Coefficients

Area reduction factors (ARF) und Levees

- Zellen markieren: Grid > Select > Grid Elements
- Bei Häusern: Grid > Assign Parameter > Area and width: completely blocked Grid Element (Abbildung A.4, rechts)
- Bei Levees wird die Richtung der Schutzwirkung und die veränderte Geländeoberfläche angegeben: Grid → Assign Parameter > Levee

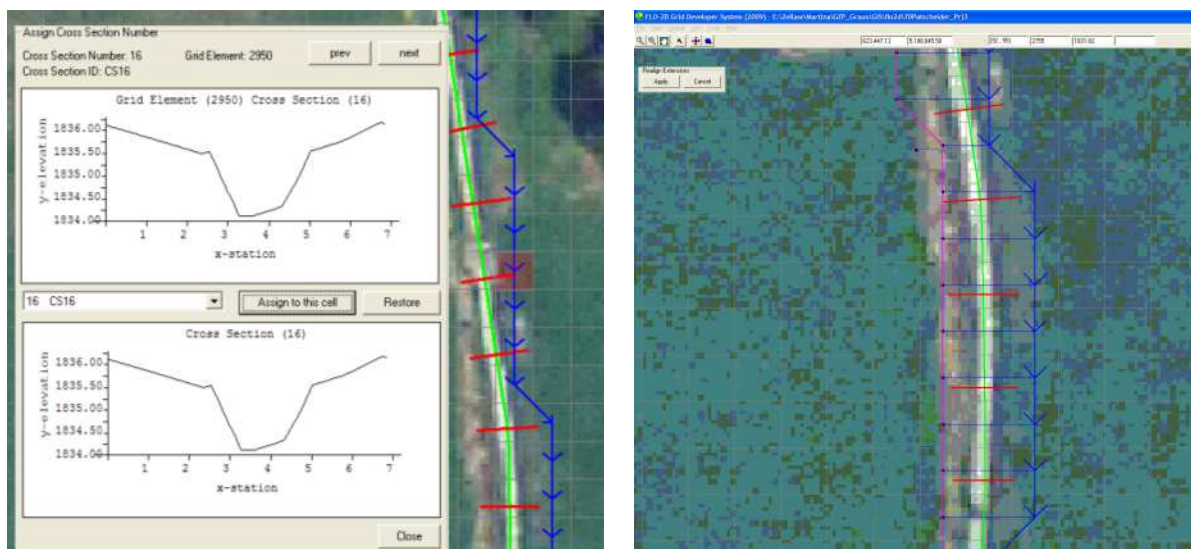
Abbildung A.4: Interpolierte Manning-Werte (links); Definition von ARF (rechts) (Screenshots)



HEC-RAS Channel importieren, Kanal definieren und Profile zuweisen

- *File > Import HEC RAS Channel > prj. laden > save cross sections as Flo2D XSEC.File*
- *Tools > Create Channel Segments with a Polyline*
- Manuelle Korrektur: Durch Klick an Linie des Kanals öffnet sich ein Menü *> Realign Channel*; Punkte in jene Zellen ziehen, in denen ein Segment (Profil) beginnt; Punkte sollten nicht im Kanal selbst (direkt auf der Mittellinie) liegen
- Menü Kanal *> Edit Channel Segment Parameters*: Shape auf N (natural) setzten, Xsec auf 0 *> OK > Validate the Channel Segment Parameters*
- Menü Kanal *> Assign Cross Section Number*: pro Zelle, wo eine Profillinie anfängt, ein Profil zuordnen (Abbildung A.5, links)
- Menü Kanal: *Edit Channel Segment Parameters > Interpolate Cross Sections* (überschreiben)
- Menü Kanal: *Edit Channel Segment Parameters > Calculate Right banks*
- Rechtes Ufer manuell korrigieren: Menü Kanal: *Realign Extensions*; Punkte sollten dort gesetzt sein, wo rote Profile enden; auf die Länge des Profils achten; in etwa parallel zum linken Ufer orientieren (Abbildung A.5, rechts)

Abbildung A.5: Zuweisen von HEC-RAS Profilen (links) und erstellter Kanal (rechts)



Inflow/Outflow Elemente definieren (Abbildung A.6, links)

- Zellen markieren
- *Grid > Assing Parameter to Selection (oder Rechtsklick) > Inflow/Outflow Condition*
- Outflow Element (no hydrograph): Grenzzellen am Rand des Berechnungsbereichs, die vom überbordenden Wasser erreicht werden können; nie zwei übereinander ausweisen, nur nebeneinander bzw. schräg versetzt; für jeden Kegel
- Inflow Element with hydrograph: Element am Anfang des Kanals, wo das erste Profil ansetzt; "Channel" und "Mud hydrograph" auswählen, Hydrograph laden (.txt) und speichern; für jene Kegel mit Kanal-Simulation
- Outflow Element (no hydrograph): Element am Ende des Kanals, wo das letzte Profil gesetzt ist; "Channel" auswählen; für jene Kegel mit Kanal-Simulation
- Abschließend: Floodplain speichern (Abbildung A.6, rechts)

Abbildung A.6: Inflow/Outflow Element definieren (links); Floodplain FPLAIN.DAT mit erstellten Layern speichern (rechts) (Screenshot)

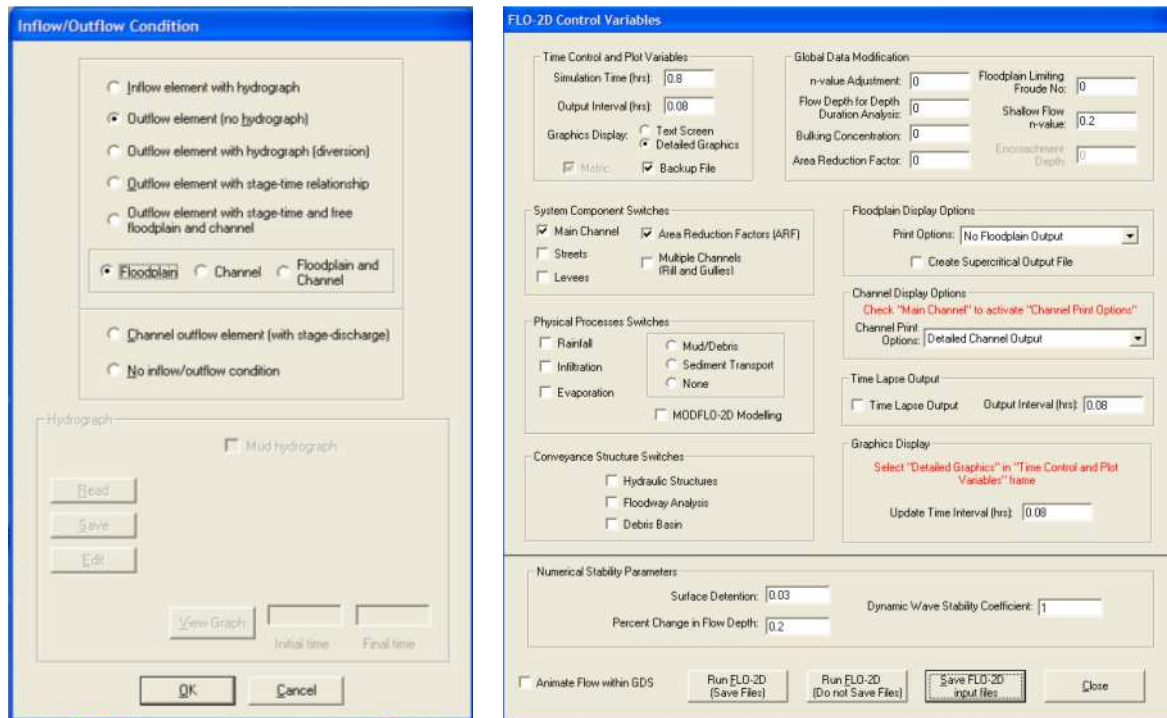
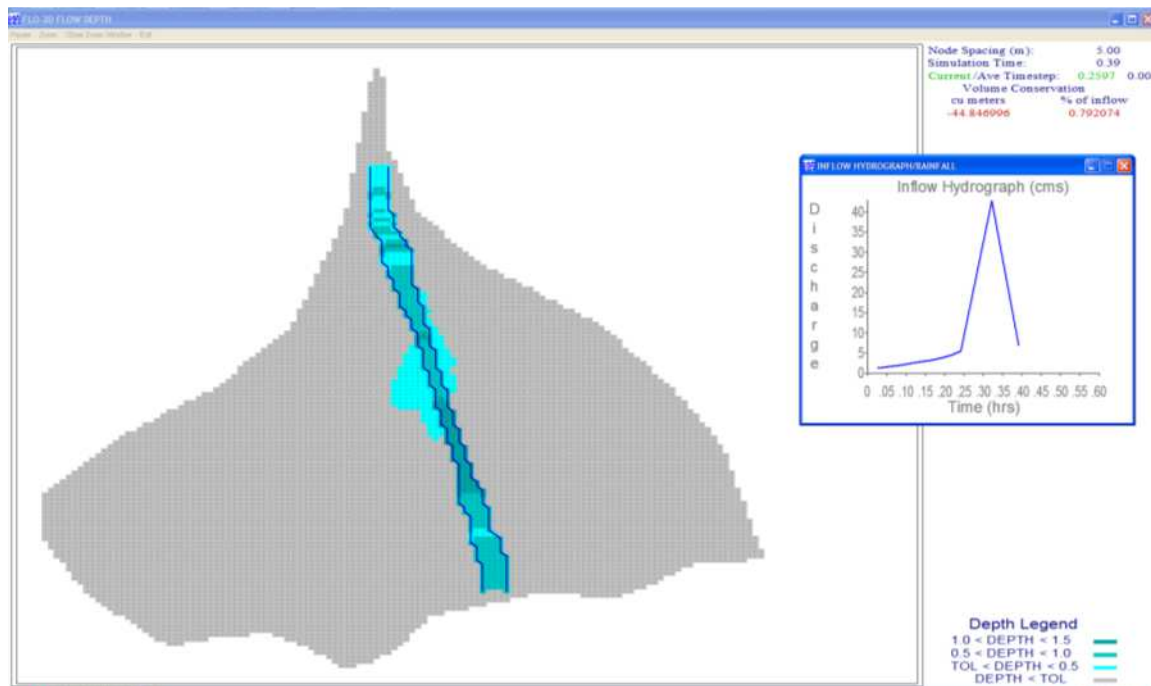


Abbildung A.7: Simulationsfenster FLO-2D



Anhang C – Ergebnisse

Abbildung A. 8: Zeichenerklärung Geomorphologische Kartierung

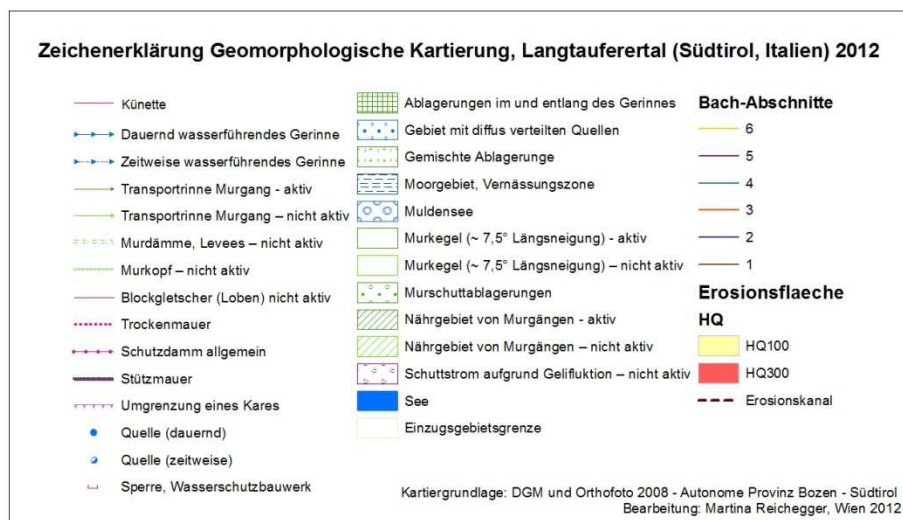


Abbildung A.9: Geomorphologische Übersichtskartierung

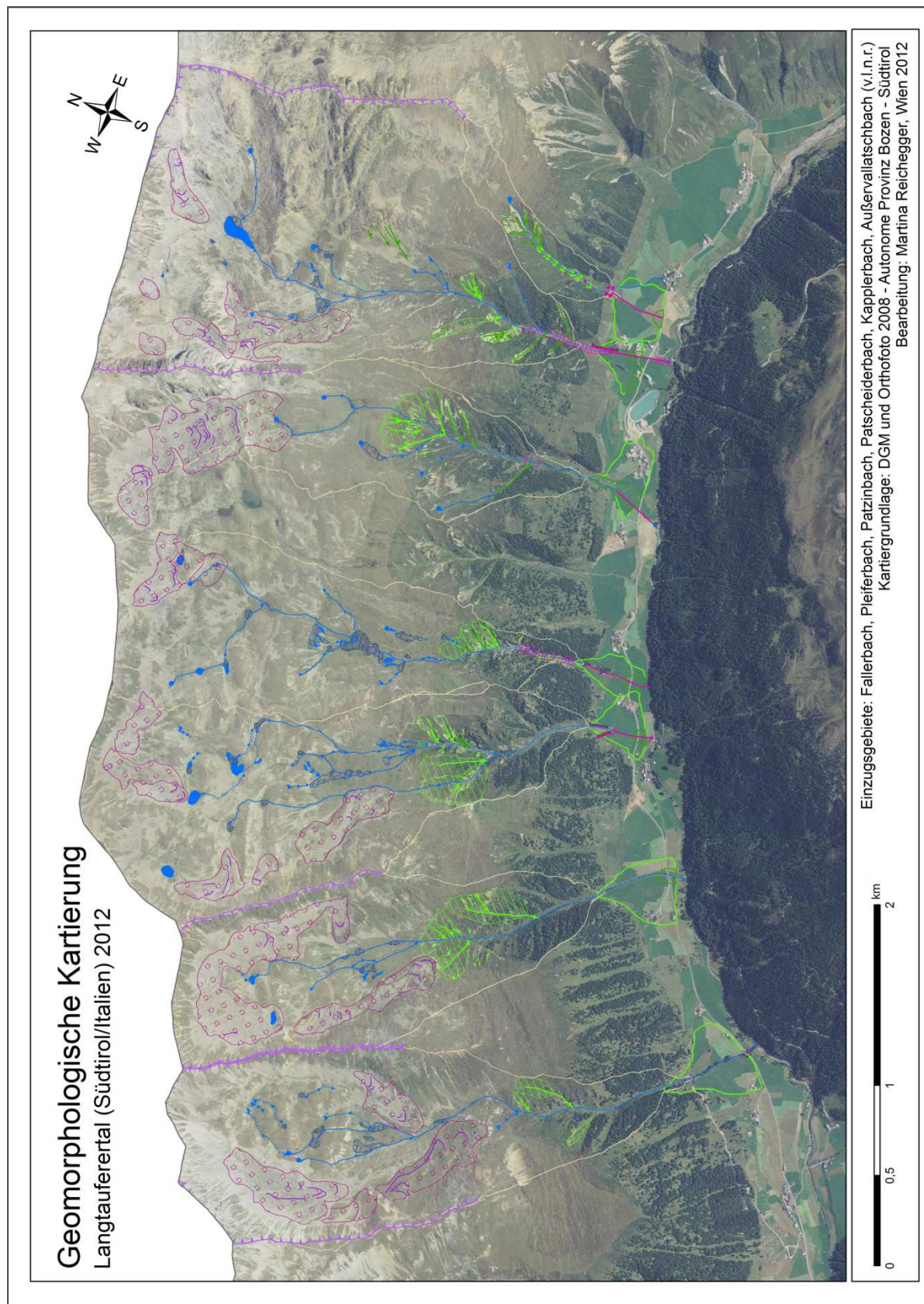


Abbildung A.10: Geomorphologische Methode, Bach-Abschnitte

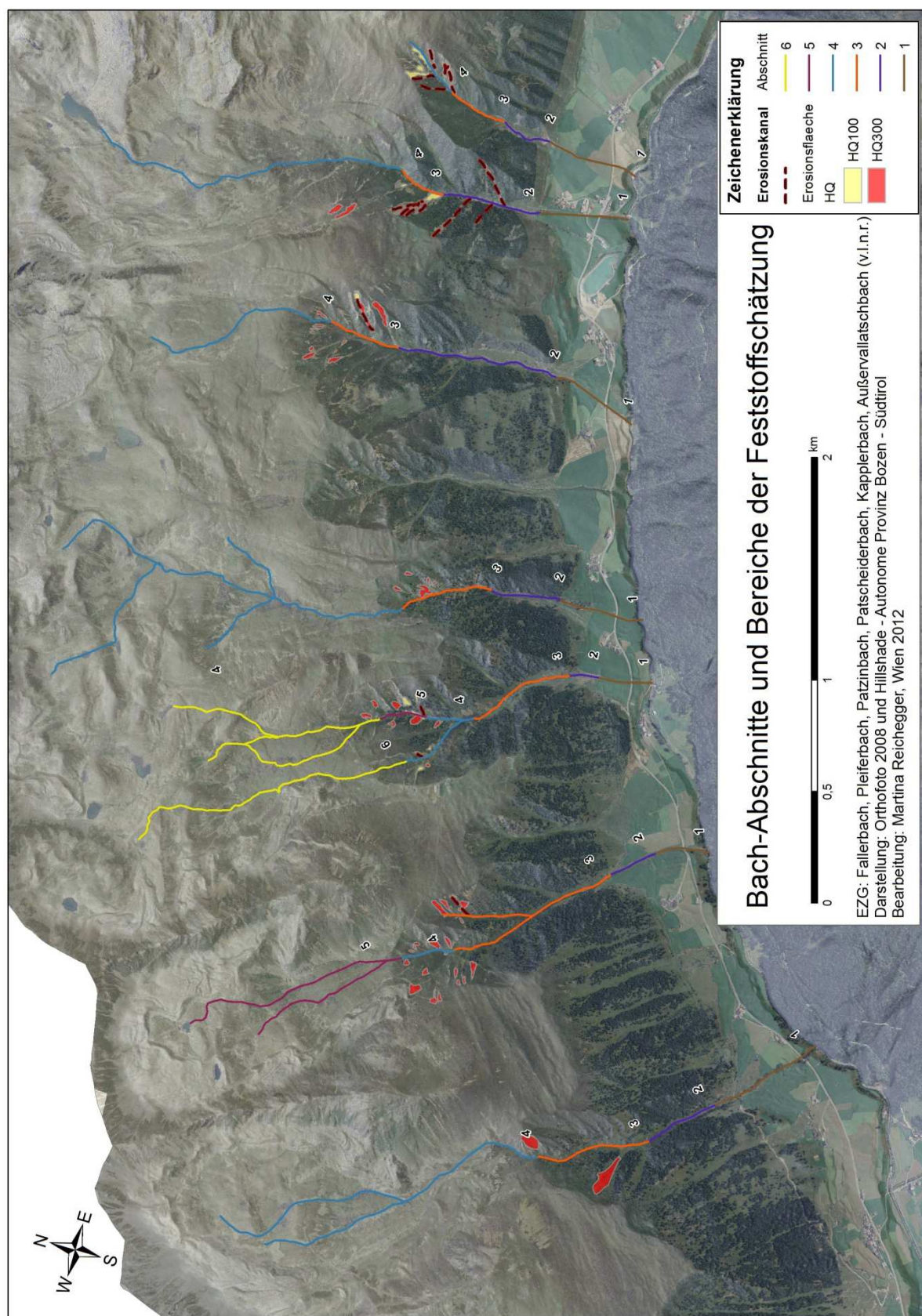


Abbildung A.11: Fallerbach, unverbauter Unterlauf (links), Mittellauf (rechts)



Abbildung A.12: Pleiferbach, Murkegel



Abbildung A.13: Patzinbach, Verbauung (Quelle: BAUKAT30)



Abbildung A.14: Patscheiderbach, Murkegel (links) und Mittellauf mit Ablagerungen (rechts)



Abbildung A.15: Bratzenbach, Mittellauf



Abbildung A.16: Kapplerbach, Konsolidierungssperren (links) und Erosionskanal (rechts)



Abbildung A.17: Kapplerbach, Unterlauf



Abbildung A.18: Außervallatschbach, Verbauung



Abbildung A.19: Außervallatschbach, Ablagerungsbereich (links) und Mittellauf (rechts)



HyGrid2k2

Abbildung A.20: Curve Number

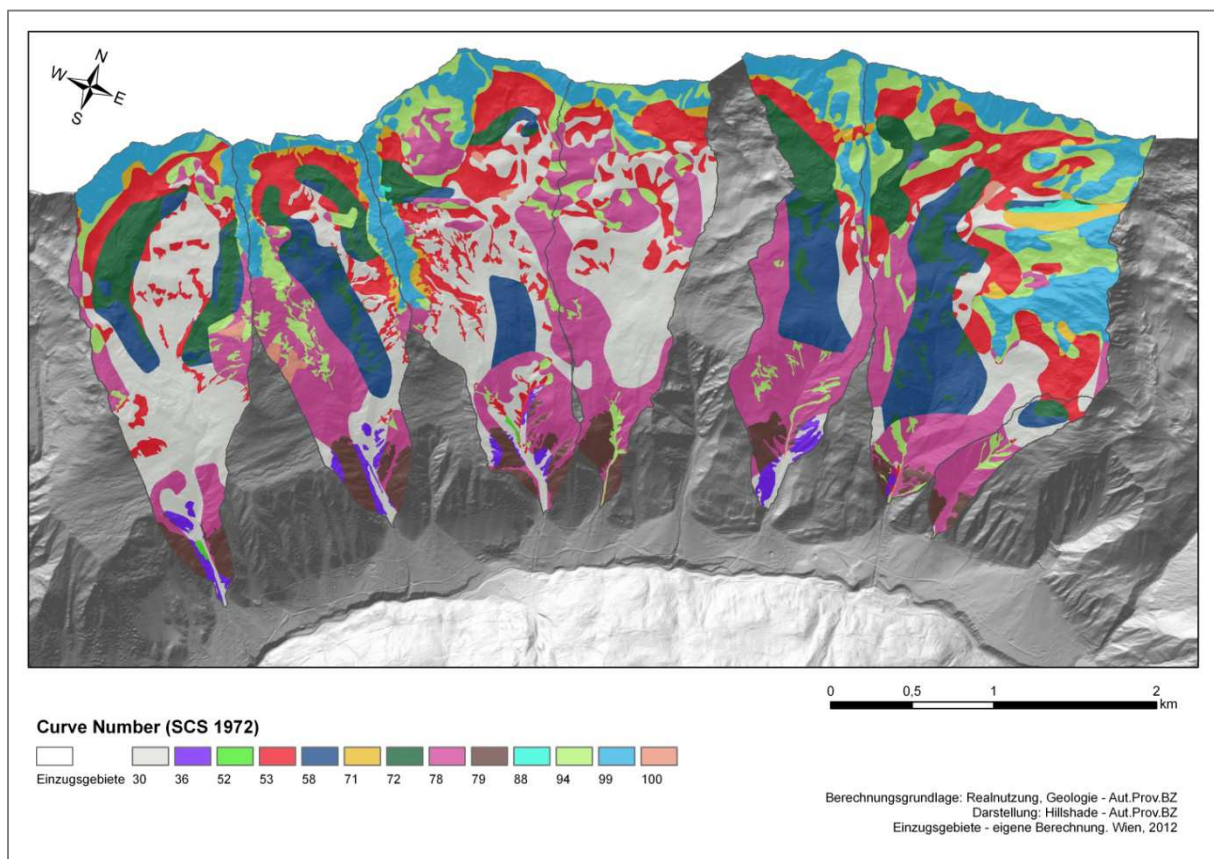


Tabelle A.4: Fallerbach-Valserbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]
0,65	0,46	0,100	0,51	0,67	0,64	0,100	0,71	0,52	0,23	0,100	0,26
0,67	0,52	0,126	0,59	0,68	0,72	0,129	0,83	0,53	0,26	0,119	0,29
0,68	0,58	0,151	0,69	0,70	0,80	0,157	0,95	0,55	0,29	0,137	0,34
0,70	0,65	0,177	0,78	0,72	0,89	0,186	1,09	0,57	0,33	0,156	0,39
0,72	0,71	0,202	0,89	0,73	0,97	0,214	1,24	0,58	0,38	0,175	0,46
0,73	0,78	0,228	1,01	0,75	1,06	0,243	1,40	0,60	0,43	0,193	0,54
0,75	0,85	0,253	1,13	0,77	1,14	0,271	1,57	0,62	0,50	0,212	0,63
0,77	0,92	0,279	1,27	0,78	1,22	0,300	1,74	0,63	0,58	0,231	0,75
0,78	0,98	0,304	1,41	0,80	1,29	0,328	1,92	0,65	0,67	0,249	0,89
0,80	1,04	0,330	1,55	0,82	1,36	0,357	2,11	0,67	0,77	0,268	1,04
0,82	1,09	0,355	1,69	0,83	1,41	0,385	2,30	0,68	0,86	0,287	1,21
0,83	1,14	0,381	1,84	0,85	1,46	0,414	2,48	0,70	0,96	0,305	1,38
0,85	1,18	0,406	1,98	0,87	1,49	0,442	2,67	0,72	1,06	0,324	1,57
0,87	1,21	0,432	2,12	0,88	1,52	0,471	2,87	0,73	1,17	0,343	1,77
0,88	1,23	0,457	2,26	0,90	1,54	0,499	3,07	0,75	1,27	0,361	1,98
0,90	1,25	0,483	2,41	0,92	1,55	0,528	3,28	0,77	1,37	0,380	2,21
0,92	1,26	0,508	2,56	0,93	1,56	0,556	3,51	0,78	1,46	0,398	2,43
0,93	1,27	0,534	2,72	0,95	1,56	0,585	15,64	0,80	1,55	0,417	2,65
0,95	1,27	0,559	2,89	0,97	1,56	0,562	3,57	0,82	1,62	0,436	2,87
0,97	1,28	0,585	12,76	0,98	1,56	0,539	3,37	0,83	1,68	0,454	3,08
0,98	1,27	0,559	2,89	1,00	1,54	0,516	3,18	0,85	1,73	0,473	3,29
1,00	1,26	0,534	2,71	1,02	1,52	0,493	3,00	0,87	1,77	0,492	3,48
1,02	1,25	0,508	2,54	1,03	1,50	0,470	2,83	0,88	1,80	0,510	3,67
1,03	1,23	0,483	2,38	1,05	1,47	0,446	2,66	0,90	1,82	0,529	3,86
1,05	1,21	0,457	2,22	1,07	1,44	0,423	2,49	0,92	1,83	0,548	4,05
1,07	1,18	0,432	2,08	1,08	1,40	0,400	2,33	0,93	1,84	0,566	4,25
1,08	1,15	0,406	1,93	1,10	1,35	0,377	2,17	0,95	1,85	0,585	18,46
1,10	1,11	0,381	1,80	1,12	1,31	0,354	2,02	0,97	1,84	0,572	4,30
1,12	1,08	0,355	1,67	1,13	1,26	0,331	1,88	0,98	1,83	0,558	4,15
1,13	1,04	0,330	1,55	1,15	1,21	0,308	1,75	1,00	1,81	0,545	3,98
1,15	1,00	0,304	1,43	1,17	1,16	0,285	1,62	1,02	1,79	0,531	3,82
1,17	0,96	0,279	1,33	1,18	1,12	0,262	1,51	1,03	1,76	0,518	3,65
1,18	0,92	0,253	1,24	1,20	1,07	0,239	1,41	1,05	1,73	0,504	3,49
1,20	0,89	0,228	1,15	1,22	1,02	0,215	1,30	1,07	1,69	0,491	3,31
1,22	0,85	0,202	1,06	1,23	0,97	0,192	1,20	1,08	1,64	0,477	3,13
1,23	0,81	0,177	0,98	1,25	0,93	0,169	1,11	1,10	1,59	0,464	2,96
1,25	0,77	0,151	0,91	1,27	0,88	0,146	1,03	1,12	1,53	0,450	2,78
1,27	0,73	0,126	0,84	1,28	0,84	0,123	0,95	1,13	1,47	0,437	2,62
1,28	0,70	0,100	0,78	1,30	0,80	0,100	0,78	1,15	1,41	0,423	2,45
								1,17	1,36	0,410	2,30
Q _w	2333	V _d [m³]	2128	Q _w	2877	V _d [m³]	2610	1,18	1,30	0,396	2,16
Q _d	4461	Schätzung	2166	Q _d	5487	Schätzung	2655	1,20	1,25	0,383	2,02
								1,22	1,19	0,369	1,89
								1,23	1,13	0,356	1,76
								1,25	1,08	0,343	1,63
								1,27	1,02	0,329	1,52
								1,28	0,97	0,316	1,42
								1,30	0,92	0,302	1,32
								1,32	0,88	0,289	1,24
								1,33	0,84	0,275	1,16
								1,35	0,81	0,262	1,09
								1,37	0,77	0,248	1,02
								1,38	0,73	0,235	0,96
								1,40	0,70	0,221	0,90
								1,42	0,66	0,208	0,84
								1,43	0,63	0,194	0,78
								1,45	0,59	0,181	0,72
								1,47	0,55	0,167	0,66
								1,48	0,52	0,154	0,61
								1,50	0,49	0,140	0,57
								1,52	0,46	0,127	0,52
								1,53	0,43	0,113	0,48
								1,55	0,40	0,100	0,45
								Q _w	3886	V _d [m³]	4295
								Q _d	8181	Schätzung	4655

Abbildung A.21: Fallerbach-Valserbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300

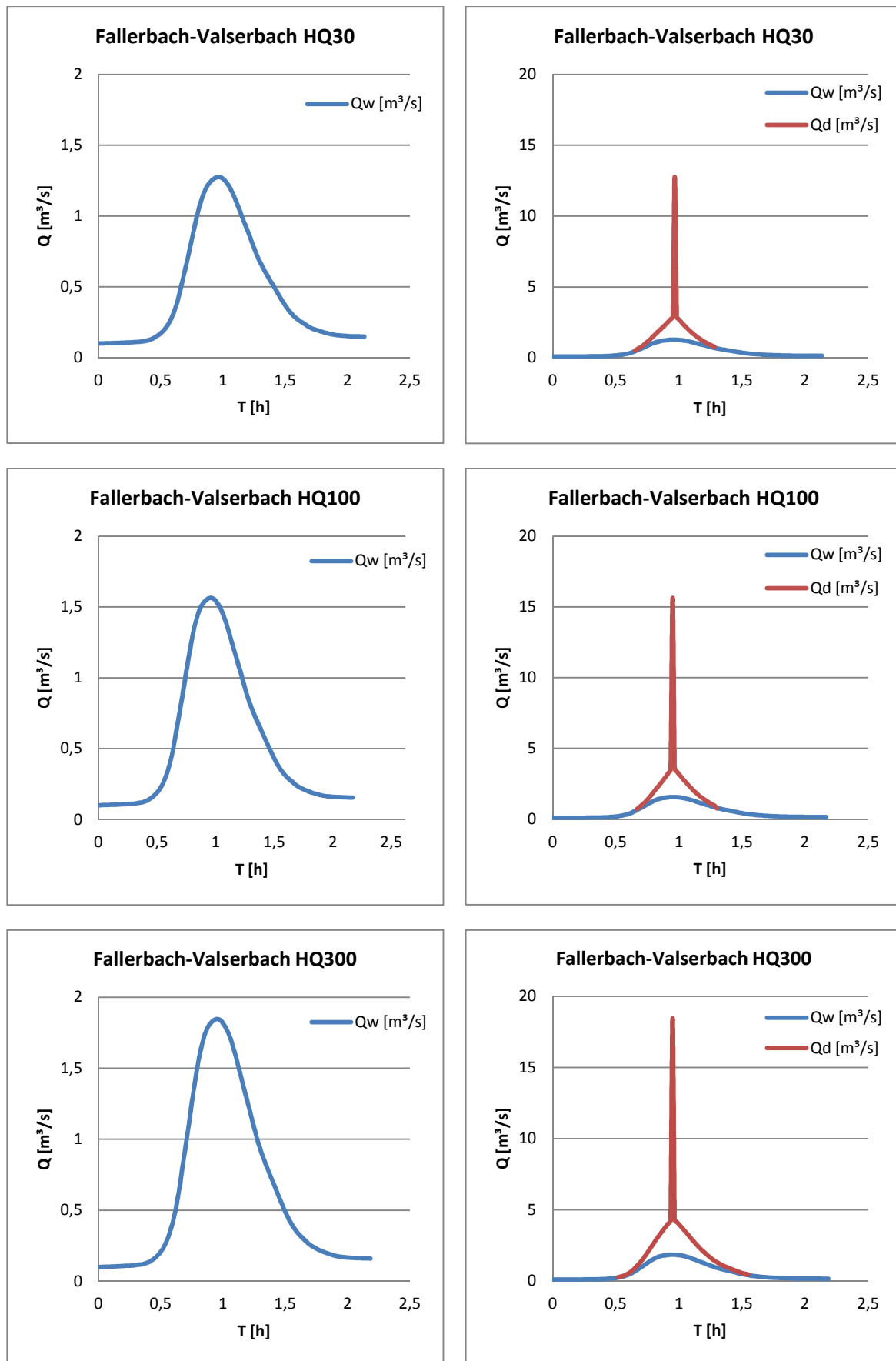


Tabelle A.5: Pleiferbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m ³ /s]		[m ³ /s]	[h]	[m ³ /s]		[m ³ /s]	[h]	[m ³ /s]		[m ³ /s]
0,72	1,54	0,100	1,72	0,72	1,88	0,100	2,09	0,52	1,13	0,100	1,26
0,73	1,57	0,262	2,12	0,73	1,91	0,262	2,59	0,53	1,29	0,132	1,48
0,75	1,58	0,423	2,74	0,75	1,93	0,423	3,34	0,55	1,42	0,165	1,70
0,77	1,59	0,585	14,67	0,77	1,93	0,585	19,32	0,57	1,53	0,197	1,90
0,78	1,59	0,464	2,96	0,78	1,93	0,464	3,60	0,58	1,62	0,229	2,10
0,80	1,58	0,343	2,41	0,80	1,92	0,343	2,92	0,60	1,69	0,262	2,29
0,82	1,57	0,221	2,02	0,82	1,91	0,221	2,45	0,62	1,76	0,294	2,49
0,83	1,56	0,100	1,73	0,83	1,89	0,100	2,10	0,63	1,84	0,326	2,73
								0,65	1,92	0,359	3,00
Q _w	753	V _d [m ³]	1062	Q _w	916	V _d [m ³]	1380	0,67	2,01	0,391	3,30
Q _d	1815	Schätzung	1163	Q _d	2296	Schätzung	1415	0,68	2,09	0,423	3,63
								0,70	2,16	0,456	3,96
								0,72	2,20	0,488	4,30
								0,73	2,23	0,520	4,66
								0,75	2,25	0,553	5,03
								0,77	2,26	0,585	22,58
								0,78	2,26	0,565	5,18
								0,80	2,24	0,545	4,93
								0,82	2,23	0,524	4,68
								0,83	2,20	0,504	4,44
								0,85	2,17	0,484	4,21
								0,87	2,13	0,464	3,98
								0,88	2,09	0,444	3,76
								0,90	2,04	0,423	3,54
								0,92	1,99	0,403	3,33
								0,93	1,92	0,383	3,12
								0,95	1,86	0,363	2,91
								0,97	1,79	0,343	2,72
								0,98	1,72	0,322	2,54
								1,00	1,66	0,302	2,38
								1,02	1,60	0,282	2,23
								1,03	1,54	0,262	2,09
								1,05	1,48	0,241	1,96
								1,07	1,43	0,221	1,83
								1,08	1,37	0,201	1,71
								1,10	1,31	0,181	1,59
								1,12	1,24	0,161	1,48
								1,13	1,17	0,140	1,36
								1,15	1,10	0,120	1,25
								1,17	1,02	0,100	1,14
								Q _w	4255	V _d [m ³]	3824
								Q _d	8079	Schätzung	3979

Abbildung A.22: Pleiferbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300

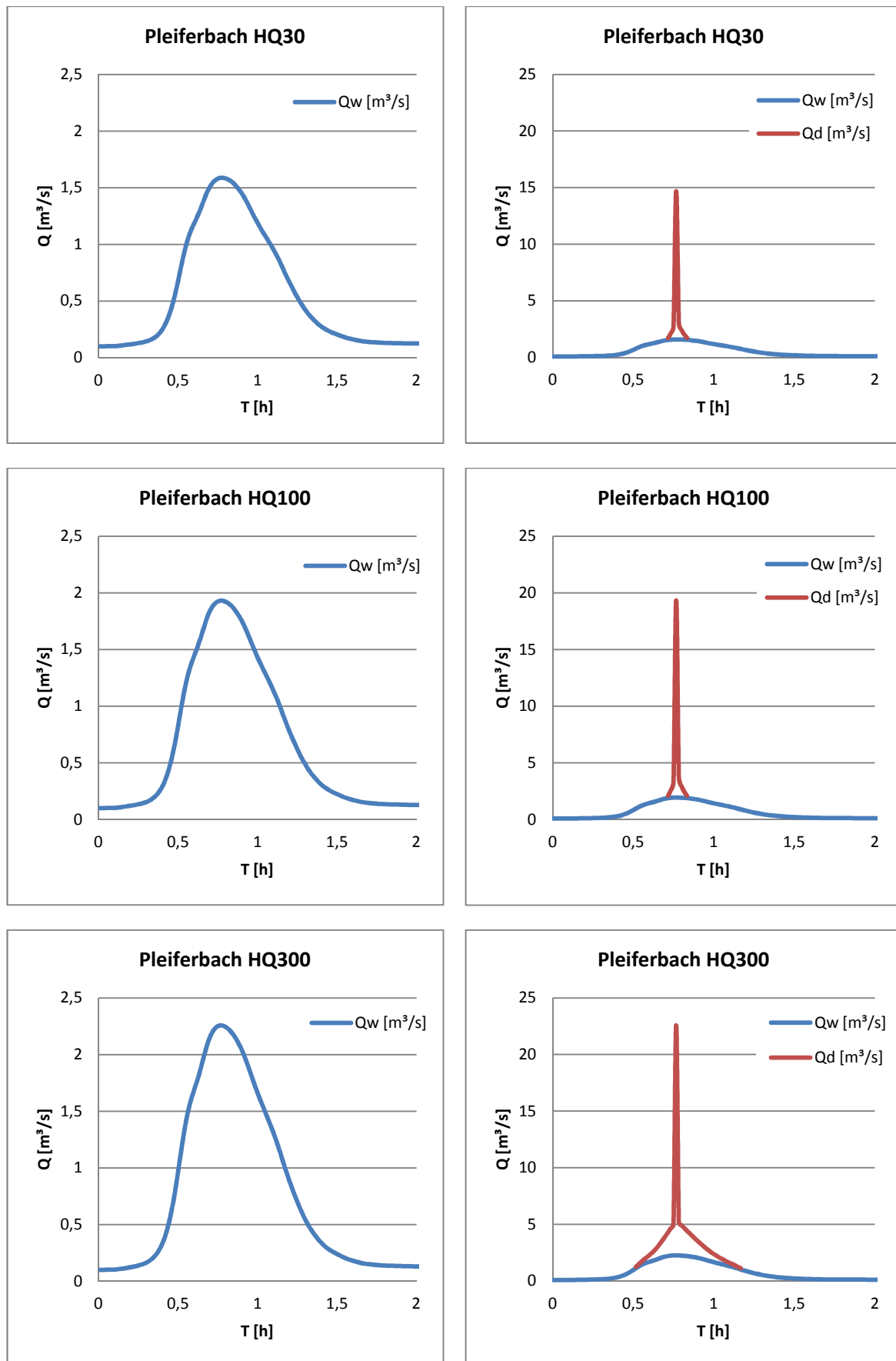


Tabelle A.6: Patzinbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]
1,22	1,30	0,100	1,45	1,22	1,57	0,100	1,74	1,20	1,72	0,100	1,91
1,23	1,37	0,129	1,57	1,23	1,65	0,127	1,88	1,22	1,82	0,126	2,08
1,25	1,43	0,157	1,70	1,25	1,72	0,154	2,03	1,23	1,91	0,151	2,25
1,27	1,49	0,186	1,82	1,27	1,79	0,181	2,18	1,25	2,00	0,177	2,43
1,28	1,54	0,214	1,96	1,28	1,85	0,208	2,34	1,27	2,08	0,202	2,61
1,30	1,59	0,243	2,09	1,30	1,91	0,235	2,50	1,28	2,16	0,228	2,79
1,32	1,63	0,271	2,24	1,32	1,97	0,262	2,67	1,30	2,23	0,253	2,98
1,33	1,68	0,300	2,39	1,33	2,02	0,289	2,84	1,32	2,29	0,279	3,18
1,35	1,72	0,328	2,55	1,35	2,07	0,316	3,03	1,33	2,35	0,304	3,38
1,37	1,76	0,357	2,73	1,37	2,12	0,343	3,22	1,35	2,41	0,330	3,60
1,38	1,79	0,385	2,92	1,38	2,17	0,369	3,43	1,37	2,47	0,355	3,83
1,40	1,83	0,414	3,12	1,40	2,21	0,396	3,65	1,38	2,52	0,381	4,07
1,42	1,85	0,442	3,32	1,42	2,24	0,423	3,88	1,40	2,57	0,406	4,33
1,43	1,88	0,471	3,55	1,43	2,27	0,450	4,12	1,42	2,61	0,432	4,59
1,45	1,89	0,499	3,78	1,45	2,29	0,477	4,37	1,43	2,64	0,457	4,87
1,47	1,91	0,528	4,04	1,47	2,30	0,504	4,64	1,45	2,67	0,483	5,15
1,48	1,91	0,556	4,32	1,48	2,31	0,531	4,94	1,47	2,68	0,508	5,46
1,50	1,92	0,585	19,19	1,50	2,32	0,558	5,25	1,48	2,70	0,534	5,79
1,52	1,92	0,569	4,46	1,52	2,32	0,585	23,20	1,50	2,70	0,559	6,14
1,53	1,92	0,554	4,30	1,53	2,32	0,570	5,39	1,52	2,71	0,585	27,05
1,55	1,91	0,538	4,14	1,55	2,31	0,555	5,19	1,53	2,70	0,570	6,29
1,57	1,90	0,522	3,98	1,57	2,30	0,540	5,00	1,55	2,70	0,556	6,06
1,58	1,89	0,507	3,84	1,58	2,29	0,524	4,81	1,57	2,68	0,541	5,85
1,60	1,88	0,491	3,69	1,60	2,27	0,509	4,63	1,58	2,67	0,526	5,64
1,62	1,87	0,475	3,56	1,62	2,26	0,494	4,46	1,60	2,65	0,512	5,43
1,63	1,85	0,460	3,42	1,63	2,24	0,479	4,29	1,62	2,63	0,497	5,23
1,65	1,83	0,444	3,30	1,65	2,22	0,464	4,13	1,63	2,61	0,482	5,04
1,67	1,82	0,429	3,18	1,67	2,20	0,449	3,98	1,65	2,59	0,467	4,85
1,68	1,80	0,413	3,06	1,68	2,17	0,433	3,83	1,67	2,56	0,453	4,67
1,70	1,78	0,397	2,95	1,70	2,15	0,418	3,69	1,68	2,53	0,438	4,50
1,72	1,76	0,382	2,84	1,72	2,12	0,403	3,55	1,70	2,50	0,423	4,34
1,73	1,73	0,366	2,73	1,73	2,09	0,388	3,41	1,72	2,47	0,409	4,17
1,75	1,71	0,350	2,63	1,75	2,06	0,373	3,28	1,73	2,43	0,394	4,01
1,77	1,68	0,335	2,53	1,77	2,03	0,358	3,16	1,75	2,40	0,379	3,86
1,78	1,66	0,319	2,44	1,78	2,00	0,343	3,04	1,77	2,36	0,365	3,72
1,80	1,64	0,303	2,35	1,80	1,97	0,327	2,93	1,78	2,33	0,350	3,58
1,82	1,61	0,288	2,26	1,82	1,94	0,312	2,82	1,80	2,29	0,335	3,44
1,83	1,59	0,272	2,18	1,83	1,91	0,297	2,72	1,82	2,25	0,320	3,32
1,85	1,57	0,256	2,10	1,85	1,88	0,282	2,62	1,83	2,22	0,306	3,19
1,87	1,54	0,241	2,03	1,87	1,85	0,267	2,53	1,85	2,18	0,291	3,08
1,88	1,52	0,225	1,96	1,88	1,82	0,252	2,43	1,87	2,15	0,276	2,97
1,90	1,49	0,210	1,89	1,90	1,79	0,236	2,35	1,88	2,11	0,262	2,86
1,92	1,47	0,194	1,82	1,92	1,76	0,221	2,26	1,90	2,07	0,247	2,75
1,93	1,44	0,178	1,75	1,93	1,72	0,206	2,17	1,92	2,03	0,232	2,65
1,95	1,41	0,163	1,69	1,95	1,69	0,191	2,09	1,93	1,99	0,218	2,55
1,97	1,38	0,147	1,62	1,97	1,65	0,176	2,00	1,95	1,95	0,203	2,45
1,98	1,35	0,131	1,56	1,98	1,61	0,161	1,92	1,97	1,91	0,188	2,35
2,00	1,32	0,116	1,50	2,00	1,58	0,145	1,84	1,98	1,86	0,173	2,25
2,02	1,29	0,084	1,41	2,02	1,54	0,130	1,77	2,00	1,82	0,159	2,16
2,03	1,26	0,100	1,40	2,03	1,50	0,115	1,69	2,02	1,77	0,144	2,07
				2,05	1,46	0,100	1,62	2,03	1,72	0,129	1,98
Q _w	4995	V _d [m³]	3958	Q _w	6107	V _d [m³]	4902	Q _w	7300	V _d [m³]	5864
Q _d	8953	Schätzung	4128	Q _d	11009	Schätzung	4991	Q _d	13163	Schätzung	6075

Abbildung A.23: Patzinbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300

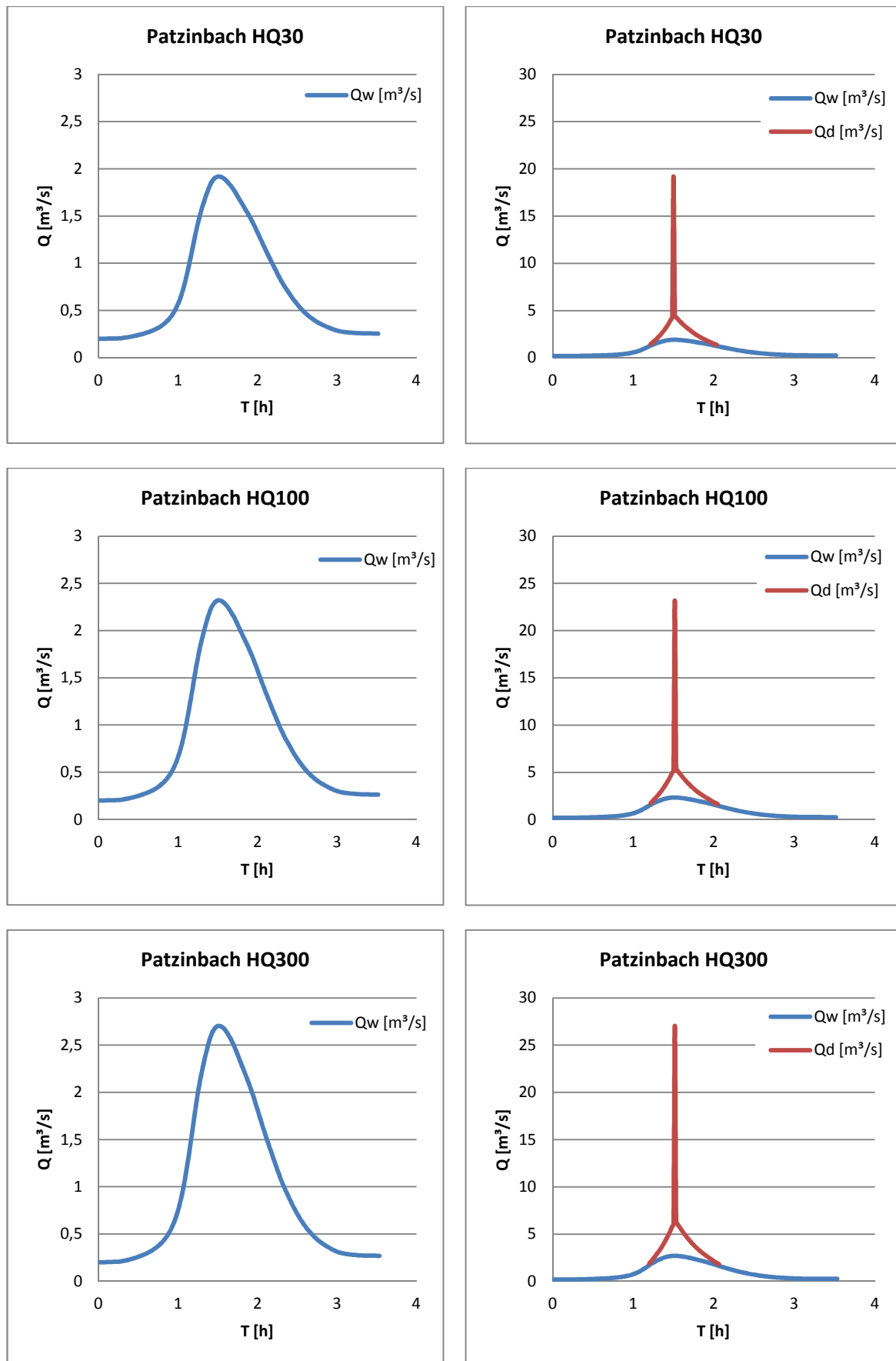


Tabelle A.7: Patscheiderbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]
1,43	1,38	0,100	1,53	1,42	1,68	0,100	1,83	1,43	2,01	0,100	2,23
1,45	1,39	0,197	1,73	1,43	1,70	0,262	2,30	1,45	2,03	0,262	2,75
1,47	1,40	0,294	1,98	1,45	1,71	0,343	2,61	1,47	2,04	0,423	3,54
1,48	1,41	0,391	2,31	1,47	1,73	0,423	2,99	1,48	2,05	0,585	4,94
1,50	1,41	0,488	2,75	1,48	1,73	0,504	3,50	1,50	2,06	0,585	20,57
1,52	1,41	0,585	3,40	1,50	1,74	0,585	17,38	1,52	2,06	0,524	4,32
1,53	1,41	0,531	7,70	1,52	1,74	0,524	3,65	1,53	2,05	0,464	3,83
1,55	1,41	0,477	2,69	1,53	1,74	0,464	3,24	1,55	2,05	0,403	3,43
1,57	1,40	0,423	2,43	1,55	1,73	0,403	2,90	1,57	2,04	0,343	3,10
1,58	1,39	0,369	2,20	1,57	1,72	0,343	2,62	1,58	2,02	0,282	2,81
1,60	1,38	0,316	2,01	1,58	1,71	0,282	2,38	1,60	2,00	0,221	2,57
1,62	1,36	0,262	1,85	1,60	1,69	0,221	2,18	1,62	1,98	0,161	2,36
1,63	1,35	0,208	1,70	1,62	1,68	0,161	2,00	1,63	1,95	0,100	2,20
1,65	1,33	0,154	1,57	1,63	1,66	0,100	1,84				
1,67	1,31	0,100	1,43								
				Q _w	1435	V _d [m³]	1644	Q _w	1584	V _d [m³]	1928
Q _w	1244	V _d [m³]	987	Q _d	3079	Schätzung	1668	Q _d	3512	Schätzung	1956
Q _d	2231	Schätzung	1354								

Abbildung A.24: Patscheiderbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300

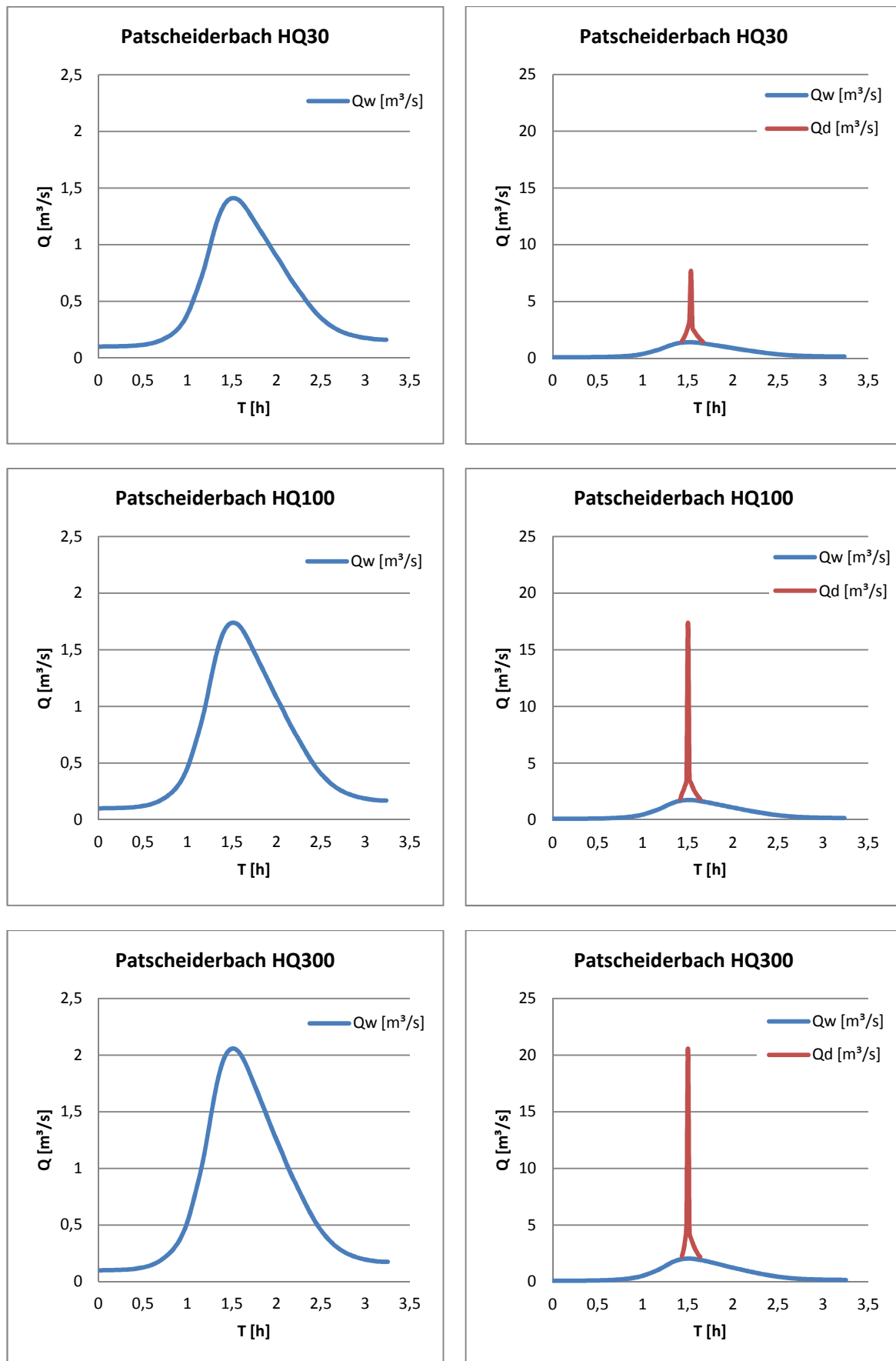


Tabelle A.8: Bratzenbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]
0,62	0,53	0,100	0,59	0,57	0,49	0,100	0,55	0,42	0,18	0,100	0,20
0,63	0,59	0,126	0,68	0,58	0,54	0,123	0,61	0,43	0,21	0,116	0,23
0,65	0,65	0,151	0,77	0,60	0,59	0,146	0,69	0,45	0,25	0,132	0,28
0,67	0,70	0,177	0,85	0,62	0,66	0,169	0,79	0,47	0,29	0,149	0,34
0,68	0,75	0,202	0,94	0,63	0,73	0,192	0,90	0,48	0,34	0,165	0,41
0,70	0,79	0,228	1,02	0,65	0,80	0,215	1,02	0,50	0,39	0,181	0,48
0,72	0,82	0,253	1,10	0,67	0,86	0,239	1,13	0,52	0,44	0,197	0,55
0,73	0,85	0,279	1,18	0,68	0,92	0,262	1,24	0,53	0,49	0,213	0,62
0,75	0,88	0,304	1,26	0,70	0,96	0,285	1,34	0,55	0,54	0,229	0,70
0,77	0,91	0,330	1,36	0,72	1,00	0,308	1,45	0,57	0,58	0,246	0,77
0,78	0,94	0,355	1,46	0,73	1,04	0,331	1,55	0,58	0,64	0,262	0,87
0,80	0,97	0,381	1,57	0,75	1,07	0,354	1,66	0,60	0,70	0,278	0,97
0,82	1,00	0,406	1,68	0,77	1,11	0,377	1,78	0,62	0,78	0,294	1,10
0,83	1,03	0,432	1,80	0,78	1,15	0,400	1,91	0,63	0,87	0,310	1,25
0,85	1,05	0,457	1,93	0,80	1,18	0,423	2,05	0,65	0,95	0,326	1,41
0,87	1,07	0,483	2,06	0,82	1,21	0,446	2,19	0,67	1,02	0,343	1,55
0,88	1,08	0,508	2,19	0,83	1,24	0,470	2,34	0,68	1,08	0,359	1,68
0,90	1,09	0,534	2,34	0,85	1,27	0,493	2,50	0,70	1,13	0,375	1,81
0,92	1,10	0,559	2,49	0,87	1,28	0,516	2,65	0,72	1,18	0,391	1,93
0,93	1,10	0,585	10,97	0,88	1,30	0,539	2,81	0,73	1,22	0,407	2,06
0,95	1,09	0,548	2,41	0,90	1,31	0,562	2,98	0,75	1,26	0,423	2,18
0,97	1,08	0,510	2,20	0,92	1,31	0,585	13,12	0,77	1,30	0,440	2,32
0,98	1,05	0,473	2,00	0,93	1,31	0,553	2,93	0,78	1,34	0,456	2,46
1,00	1,02	0,436	1,81	0,95	1,30	0,520	2,71	0,80	1,38	0,472	2,61
1,02	0,98	0,398	1,63	0,97	1,28	0,488	2,50	0,82	1,42	0,488	2,77
1,03	0,94	0,361	1,47	0,98	1,25	0,456	2,29	0,83	1,45	0,504	2,92
1,05	0,89	0,324	1,32	1,00	1,21	0,423	2,09	0,85	1,47	0,520	3,07
1,07	0,85	0,287	1,19	1,02	1,16	0,391	1,90	0,87	1,49	0,537	3,22
1,08	0,80	0,249	1,07	1,03	1,11	0,359	1,72	0,88	1,51	0,553	3,36
1,10	0,76	0,212	0,96	1,05	1,05	0,326	1,56	0,90	1,51	0,569	3,51
1,12	0,71	0,175	0,87	1,07	1,00	0,294	1,41	0,92	1,52	0,585	15,15
1,13	0,67	0,137	0,78	1,08	0,94	0,262	1,27	0,93	1,51	0,569	3,50
1,15	0,63	0,100	0,70	1,10	0,89	0,229	1,15	0,95	1,49	0,553	3,34
				1,12	0,84	0,197	1,04	0,97	1,47	0,537	3,17
				1,13	0,78	0,165	0,94	0,98	1,43	0,520	2,98
				1,15	0,73	0,132	0,84	1,00	1,38	0,504	2,79
				1,17	0,68	0,100	0,75	1,02	1,33	0,488	2,59
								1,03	1,26	0,472	2,39
								1,05	1,20	0,456	2,20
								1,07	1,13	0,440	2,02
								1,08	1,07	0,423	1,86
								1,10	1,01	0,407	1,70
								1,12	0,95	0,391	1,56
								1,13	0,89	0,375	1,42
								1,15	0,83	0,359	1,29
								1,17	0,77	0,343	1,16
								1,18	0,70	0,326	1,05
								1,20	0,65	0,310	0,94
								1,22	0,59	0,294	0,83
								1,23	0,54	0,278	0,74
								1,25	0,49	0,262	0,66
								1,27	0,45	0,246	0,59
								1,28	0,41	0,229	0,53
								1,30	0,37	0,213	0,48
								1,32	0,35	0,197	0,43
								1,33	0,32	0,181	0,39
								1,35	0,30	0,165	0,35
								1,37	0,27	0,149	0,32
								1,38	0,25	0,132	0,29
								1,40	0,23	0,116	0,26
								1,42	0,22	0,100	0,24

Abbildung A.25: Bratzenbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300

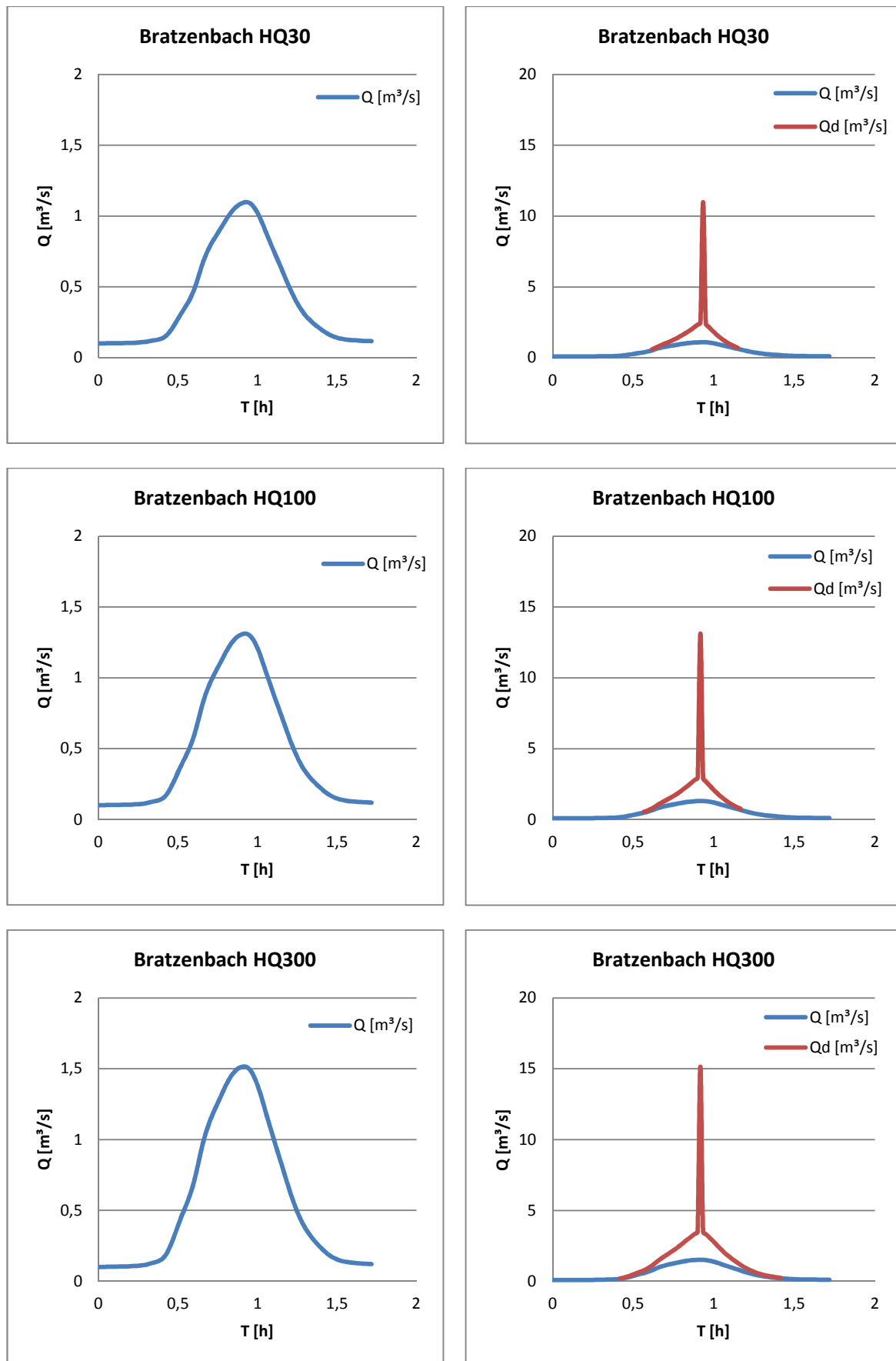
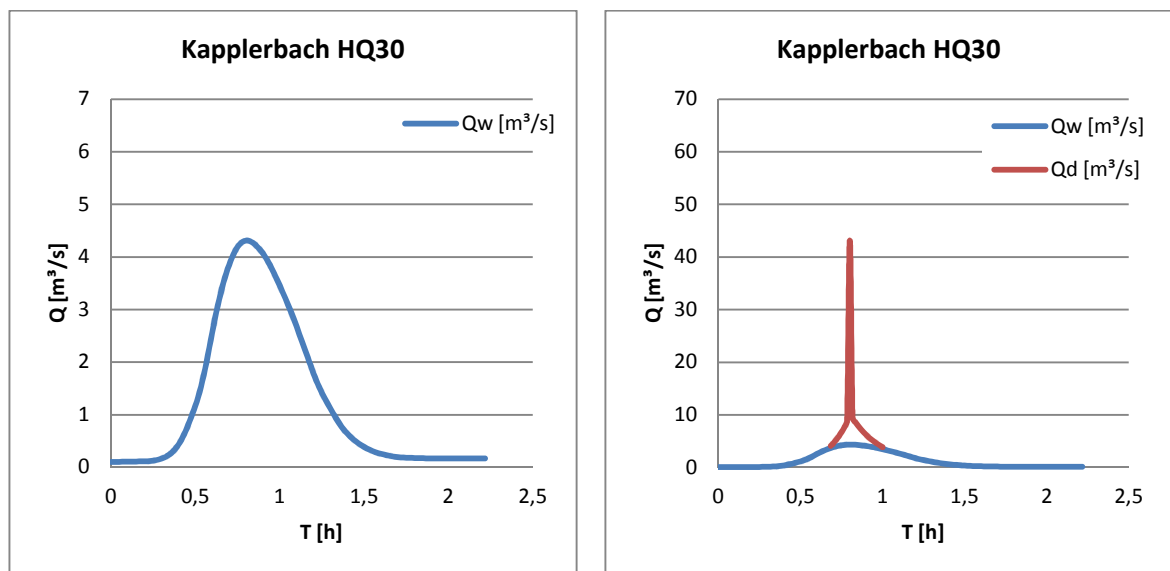


Tabelle A.9: Kapplerbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]
0,68	3,69	0,100	4,10	0,70	4,69	0,100	5,21	0,73	5,82	0,100	6,47
0,70	3,85	0,169	4,63	0,72	4,85	0,181	5,92	0,75	5,94	0,221	7,63
0,72	3,98	0,239	5,23	0,73	4,98	0,262	6,75	0,77	6,02	0,343	9,15
0,73	4,10	0,308	5,92	0,75	5,09	0,343	7,74	0,78	6,06	0,464	11,31
0,75	4,19	0,377	6,73	0,77	5,16	0,423	8,95	0,80	6,08	0,585	60,80
0,77	4,25	0,446	7,68	0,78	5,21	0,504	10,50	0,82	6,07	0,524	12,76
0,78	4,29	0,516	8,86	0,80	5,22	0,585	52,22	0,83	6,03	0,464	11,24
0,80	4,31	0,585	43,11	0,82	5,21	0,548	11,53	0,85	5,97	0,403	10,00
0,82	4,31	0,545	9,46	0,83	5,18	0,510	10,59	0,87	5,89	0,343	8,96
0,83	4,29	0,504	8,64	0,85	5,13	0,473	9,74	0,88	5,80	0,282	8,08
0,85	4,25	0,464	7,92	0,87	5,07	0,436	8,98	0,90	5,70	0,221	7,32
0,87	4,20	0,423	7,28	0,88	5,00	0,398	8,30	0,92	5,58	0,161	6,65
0,88	4,14	0,383	6,71	0,90	4,91	0,361	7,69	0,93	5,44	0,100	6,05
0,90	4,07	0,343	6,19	0,92	4,81	0,324	7,11	Q _w 4591			V _d [m³] 6867
0,92	3,99	0,302	5,72	0,93	4,69	0,287	6,58	Q _d 11457			Schätzung 6740
0,93	3,90	0,262	5,28	0,95	4,57	0,249	6,09				
0,95	3,80	0,221	4,87	0,97	4,44	0,212	5,63				
0,97	3,69	0,181	4,50	0,98	4,29	0,175	5,20				
0,98	3,57	0,140	4,16	1,00	4,15	0,137	4,81				
1,00	3,46	0,100	3,84	1,02	4,00	0,100	4,45				
Q _w	4820	V _d [m³]	4819	Q _w	5799	V _d [m³]	5839				
Q _d	9639	Schätzung	4855	Q _d	11639	Schätzung	5881				

Abbildung A.26: Kapplerbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300



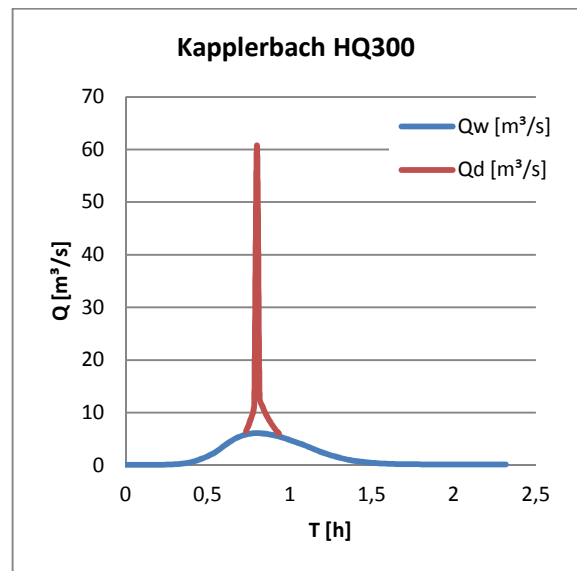
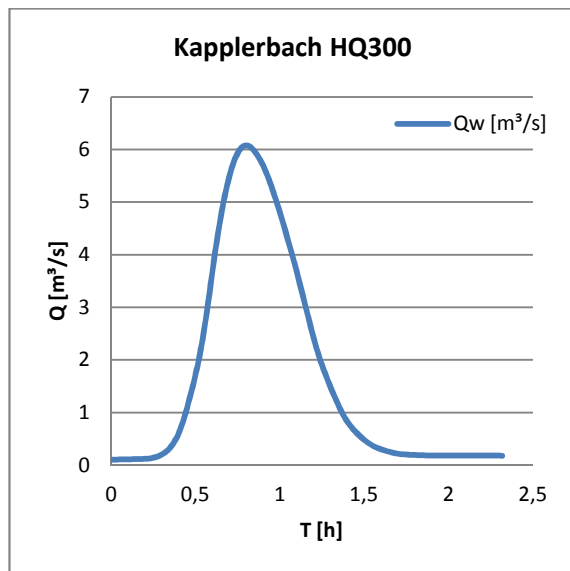
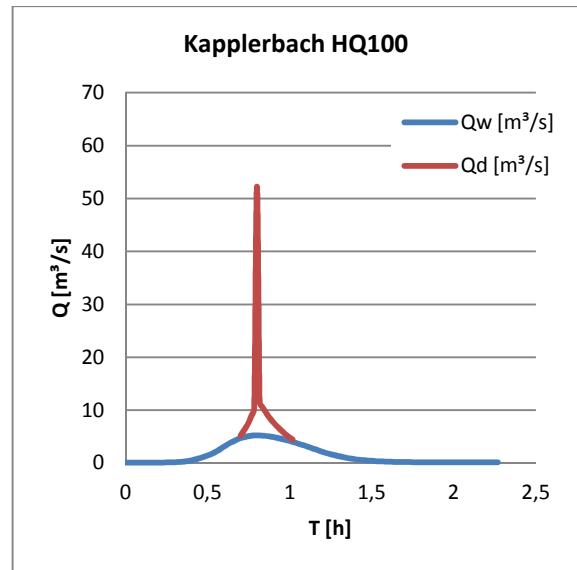
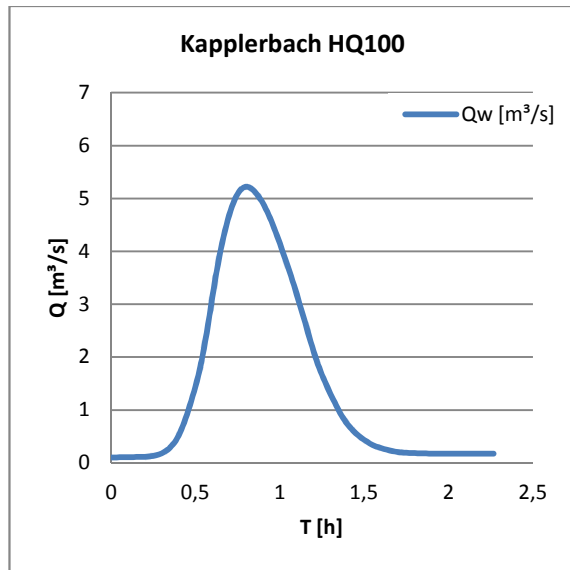
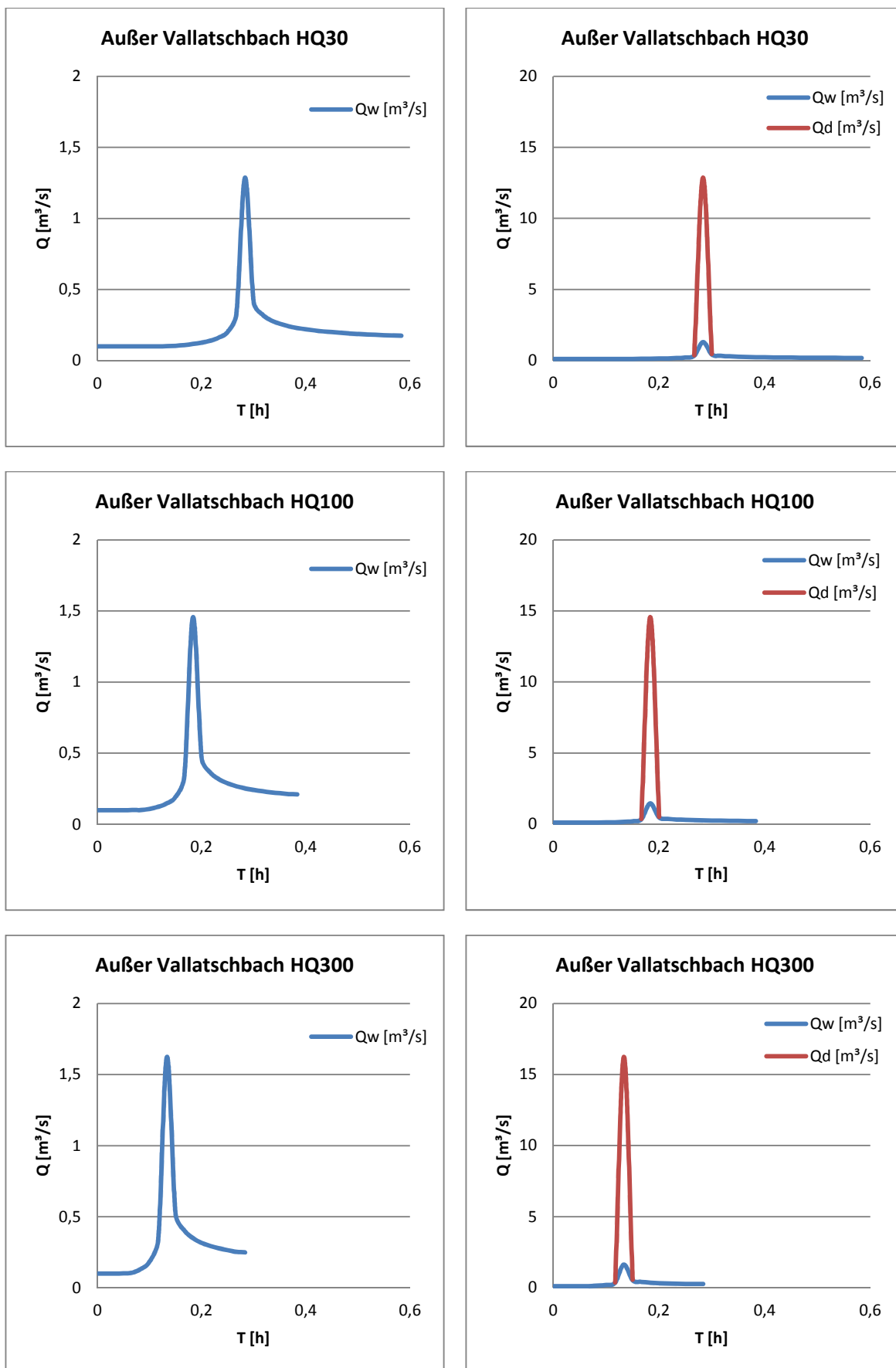


Tabelle A.10:Außer Vallatschbach. Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Bulking Factor (cv)

HQ30				HQ100				HQ300			
t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d	t	Q _w	c _v	Q _d
[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]	[h]	[m³/s]		[m³/s]
0,27	0,33	0,100	0,36	0,17	0,33	0,100	0,37	0,12	0,34	0,100	0,38
0,28	1,29	0,585	12,87	0,18	1,46	0,585	14,56	0,13	1,62	0,585	16,24
0,30	0,41	0,100	0,45	0,20	0,46	0,100	0,52	0,15	0,52	0,100	0,57
Q _w	115	V _d [m³]	699	Q _w	127	V _d [m³]	790	Q _w	139	V _d [m³]	881
Q _d	814	Schätzung	2422	Q _d	917	Schätzung	2739	Q _d	1020	Schätzung	2739

Abbildung A.27: Außer Vallatschbach Reinwasserabfluss (links) und Muren-Hydrograph (rechts) HQ30, HQ100, HQ300



FLO-2D

Tabelle A.11: Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse in FLO-2D (* insgesamt; ** nur außerhalb des Kanals)

	Fallerbach	Pleiferbach (ohne Kanal)	Patzinbach	Patscheider- bach	Bratzenbach	Kapplerbach	Außer vallatschbach	
HQ 30	maximale Fließhöhe* [m]	1,62	2,55	1,51	2,13	2	2,64	1,75
	maximale Fließhöhe** [m]	0,17	-	0,25	0,09	0,71	0,65	1,32
	maximal überflutete Fläche *[m²]	104,70	-	689,63	0,00	3.435,90	7.563,36	2.240,38
	maximal überflutete Fläche** [m²]	637,88	22.700,00	2.037,49	525,00	3.871,60	8.831,07	2.792,34
	Anzahl der Rasterzellen**	8	-	45	6	176	321	139
HQ100	maximale Fließhöhe* [m]	1,81	2,84	1,59	2,35	2,12	2,95	1,84
	maximale Fließhöhe** [m]	0,35	-	0,58	0,19	0,84	0,9	1,41
	maximal überflutete Fläche *[m²]	489,64	-	1.405,08	85,94	5.008,75	12.661,67	2.689,61
	maximal überflutete Fläche** [m²]	878,83	22.125,00	2.821,79	138,94	5.554,82	13.937,33	3.284,23
	Anzahl der Rasterzellen**	24	-	96	37	259	545	154
HQ300	maximale Fließhöhe* [m]	1,88	3,19	1,63	3,02	2,27	2,92	1,46
	maximale Fließhöhe** [m]	0,37	-	0,69	0,4	0,95	0,8	0,89
	maximal überflutete Fläche *[m²]	267,02	-	1.596,69	1.891,01	5.798,81	11.758,69	3.028,99
	maximal überflutete Fläche** [m²]	845,88	28.225,00	3.090,06	1.984,41	6.713,42	12.179,38	3.091,84
	Anzahl der Rasterzellen**	15	-	102	157	286	502	162

Veränderung der betroffenen Fläche **

HQ30-HQ100	367,66%	-	103,74%	-	45,78%	67,41%	20,05%
HQ100-HQ300	-45,5%	27,57%	13,6%	2100,4%	15,8%	-7,1%	12,6%
HQ30-HQ300	155,0%	24,34%	131,5%	-	68,8%	55,5%	35,2%

Ereignisanalyse

Abbildung A.28: Murgang im Kapplerbach vom 27.06.1965 (Quelle: ED30)



Abbildung A.29: Tageszeitung Dolomiten vom 2. Juli 1987

Kapplbach überflutet Wiesen und Wege Schneesmelze richtet in Langtaufers Schäden an / Wildbäche führen viel Wasser

Langtaufers (M) — Später als in anderen Jahren setzte heuer im Hochgebirge die Schneeschmelze ein. Durch die Hitze der letzten Tage stürzten aber derartige Wassermassen die Berghänge hinunter, daß viel Erdreich und Geröll mitgerissen wurde. Der Kapplbach in Langtaufers wuchs so zu einer gefährlichen Mure an, die am vorgestrigen Abend beim Weiler Kappl über die Ufer trat, eine Brücke beschädigte, Wiesen überflutete und die Landesstraße für einige Stunden verlegte. In einem mehrstündigen Einsatz der Feuerwehren von Langtaufers, Graun, Reschen und St. Valentin gelang es, die Wassermassen einigermaßen zu bändigen.

Der stark angeschwollene Kapplbach an der orographisch rechten Seite von Langtaufers riß an den kahlen Hängen des Äußeren Schafberges große Massen von Geröll und Erdreich mit. Diese verlegten an der Brücke zum Weiler Kappl den Durchfluß, so daß sich die Mure über die Ufer in die angrenzenden Wiesen ergoß, die unmittelbar vor der ersten Mahd stehen. Mehr als ein Hektar Wiesenfläche wurde zerstört, auch die Zufahrt nach Kappl ist nicht mehr befahr-

bar. Die Feuerwehren errichteten Holzwehren und trugen die beschädigte Brücke ab, um das naheliegende Gasthaus „Gletscherblick“ zu schützen. Für die Kirche St. Nikolaus, die auf einer Moränenaufschüttung steht, bestand keine Gefahr. Die Mure ergoß sich aber in den kleinen Stausee, der vom Karlinbach gespeist wird. Auch die Rohrleitung, welche den Bach in den Stausee führt, war zeitweise in Gefahr. Die Lan-

desstraße wurde von den Geröllmassen überflutet, die bis zum Weiler Grub reichten. Sie wurde vom Landesbauhof Lichtenberg in einem Nacheinsatz sofort wieder befahrbar gemacht. Genaue Schadensschätzungen lagen bis gestern Abend noch nicht vor.

Am gestrigen Mittwoch ging über die Kaproner Alm ein schweres Gewitter mit Hagelschlag nieder. Der Riglbach auf der orographisch linken Talseite schwoll an und führte viel Erdreich mit. Da er aber in den letzten Jahren gut verbaut wurde, trat er nicht über die Ufer und richtete keine nennenswerten Schäden an. Die Bevölkerung von Langtaufers ist wegen der raschen Schneeschmelze besorgt, weil sich die Vorfälle der vergangenen Tage wiederholen könnten.

Abbildung A.30: Murgang im Außervallatschbach vom 23.08.2005 (Quelle: ED30)



Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Martina Reichegger

Geburtstag: 21.01.1986

Geburtsort: Bruneck

Staatsbürgerschaft: Italien

E-Mail: martina.reichegger@hotmail.com

Bildungsgang

2005 – 2012: Diplomstudium Theoretische und Angewandte Geographie

am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien

Schwerpunktfach: Angewandte Geomorphologie

Wahlfach 1: Globale Umweltveränderungen

Wahlfach 2: Alpine Naturgefahren (Universität für Bodenkultur, Wien)

2000 – 2005: Handelsoberschule Bruneck

Berufliche Tätigkeiten / Praktika

November 2011 bis März 2012: Abenis Alpinexpert GmbH (Bozen)

Februar 2011: Amt für Geologie und Baustoffprüfung (Kardaun)

2009 und 2010: Universität Wien, Tutorin für Landschaftsökologie

Sprachkenntnisse

Deutsch (Muttersprache)

Italienisch (Zweisprachigkeitsnachweis A)

Englisch (in Wort und Schrift)

Spanisch (Grundkenntnisse)

EDV-Kenntnisse

Microsoft Office, ArcGIS, SPSS für Windows