

# **Untersuchung der naturräumlichen Rahmenbedingungen der Entstehung von Talmuren**

**Grundlage einer Modellierung zur  
Gefahrenabschätzung**

**Dissertation zu Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für  
Geowissenschaften der Ludwig-Maximilian-Universität München**

**vorgelegt von**

**Timm Mittelsten Scheid**

Berichtersteller:  
Ottfried Baume  
Michael Becht

Datum der mündlichen Prüfung:  
23.11.2011

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	
1.1	Naturgefahren im Hochgebirge.....	1
1.2	Zur Abgrenzung der Murprozesse .....	3
1.3	Die unterschiedlichen Murtypen.....	7
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>9</b>
2.1	Murauslösung.....	10
2.2	Murverlauf.....	11
2.3	Modellierung.....	13
<b>3</b>	<b>Fragestellung und methodisches Vorgehen</b>	<b>15</b>
3.1	Fragestellung.....	15
3.2	Methodisches Vorgehen .....	16
3.2.1	Kartierung.....	16
3.2.2	Die Auswahlkriterien .....	20
3.2.3	Datenaufbereitung .....	21
<b>4</b>	<b>Die Untersuchungsgebiete</b>	<b>23</b>
4.1	Allgemeines .....	25
4.1.1	Klima .....	25
4.1.2	Böden.....	25
4.2	Altmummen .....	25
4.2.1	Geländebeschreibung .....	25
4.2.2	Die Mure .....	27
4.3	Ehnbach .....	29
4.3.1	Geländebeschreibung .....	29
4.3.2	Die Muren .....	31
4.4	Heugraben.....	32
4.4.1	Geländebeschreibung .....	32
4.4.2	Die Mure.....	33
4.5	Das Gebiet „Rumer Mure“ .....	34
4.5.1	Rumer Mure .....	36
4.5.2	Rumer Langenbach .....	37
4.5.3	Mühlauer Bach .....	38
4.6	Söllbachgebiet.....	38
4.6.1	Geländebeschreibung .....	38
4.6.2	Die Muren.....	42
4.7	Waxlriesgraben .....	45
4.7.1	Geländebeschreibung .....	46
4.7.2	Die Mure.....	46

<b>5</b>	<b>Das Murmodell von Wichmann</b>	<b>47</b>
5.1	Die Berechnung der Startpunkte (DF DispoChannel) .....	47
5.1.1	Das regelbasierte Modell.....	47
5.1.2	Die beitragende Fläche (Sediment Contributing Area, SCA)48	
5.1.3	Die Gewichtung der sedimentspendenden Flächen.....	51
5.2	Theorie Laufwege (DF HazardZonation) .....	53
<b>6</b>	<b>Überprüfung und Anpassung der Gerinne und der Startpunkte</b>	<b>56</b>
6.1	Modellierung des Gerinnenetzes.....	56
6.2	DF DispoChannel: Berechnung der Startpunkte von Talmuren .....	61
6.2.1	Ergebnisse der ersten Berechnung .....	62
6.2.1.1	Ungewichtete Berechnung .....	62
6.2.1.2	Einfluss der Neigung.....	66
6.2.1.3	Einfluss der Vegetation.....	67
6.2.1.4	Einfluss von Vegetation und Neigung .....	68
6.2.2	Der Einfluss des Gesteins auf die Muranfälligkeit .....	70
6.2.2.1	Einfluss des Gesteins bei der Berechnung der sedimentspendenden Fläche (SCA) .....	71
6.2.2.2	Einfluss des Gesteins bei der Gewichtung der SCA .....	72
6.2.2.3	Einfluss von Neigung, Vegetation und Gestein .....	74
6.3	Einführung einer neuen Anrissformel.....	75
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Modellierung von Reichweite und Prozessraum</b>	<b>81</b>
7.1	Ehnbach .....	82
7.2	Waxlriesgraben .....	84
7.3	Heugraben.....	86
7.4	Mühlauer Bach.....	87
7.5	Rumer Langenbach.....	89
7.6	Rumer Mure.....	91
7.7	Söllbachgebiet .....	93
<b>8</b>	<b>Schluss</b>	<b>98</b>
8.1	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse .....	98
8.2	Ausblick.....	101
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>102</b>
<b>10</b>	<b>Literatur</b>	<b>106</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Murschäden in den Alpen .....	2
Abb. 1.2: Übergang zwischen Mure und Rutschung .....	6
Abb. 1.3: Vergleich von Talmure und Hangmure.....	9
Abb. 2.1: Vergleich von flacher, großflächiger und mächtiger Ablagerung.....	12
Abb. 3.1: Zerstörter Forstweg nach einem Unwetter mit intensiver Murtätigkeit.....	17
Abb. 3.2: Junger Laubwald vor alten Nadelbäumen auf einem Murkegel .....	18
Abb. 3.3: Transportierter Felsen als stumme Zeugen .....	18
Abb. 3.4: Levées im Rumer Langenbach (Foto: Jöhl) .....	19
Abb. 3.5: Durch Murgang gespaltener Baum .....	19
Abb. 3.6: Völlig zerstörtes Gerinne nach einem Murgang mit altem Bachbett.....	20
Abb. 4.1: Übersicht über die Untersuchungsgebiete (Grundlage: Kompasskarte 350 – Alpen; 1:500 000) ..	23
Abb. 4.2: Luftbild des Schwandner Bachs mit Murablagerung (Grundlage: Orthophoto) .....	26
Abb. 4.3: Geologische Übersicht über den Bereich Altmummen (Grundlage: GK 8427).....	27
Abb. 4.4: Schäden am Bachbett .....	28
Abb. 4.5: Ablagerungen im Mündungsbereich mit Levée .....	28
Abb. 4.6: Übersicht Ehnbach und seine Teileinzugsgebiete (Grundlage: Orthophoto) .....	29
Abb. 4.7: Geologie des Untersuchungsgebiets Ehnbach (Grundlage: Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinerverbauung, 1995) .....	30
Abb. 4.8: Murkegel an der Einmündung Kuhlochbach (Foto: Lunghammer). .....	31
Abb. 4.9: Übersicht über den Heugraben (Grundlage: Orthophoto) .....	32
Abb. 4.10: Übersicht über das anstehende Gestein sowie die Lage des Murkegels (Grundlage: GK 8432) .....	33
Abb. 4.11: Übersicht über das Gebiet Rumer Mure (Grundlage Orthophoto).....	34
Abb. 4.12: Geologie des Untersuchungsgebiets Rumer Mure (Grundlage: Geol Spezialkarte, Innsbruck und Achensee) .....	35
Abb. 4.13: Levée bei rund 1000 m ü. d. M. ....	36
Abb. 4.14: Murbahn mit Levées oberhalb des Kiechlbergs (Foto: Jöhl).....	37
Abb. 4.15: Einzugsgebiet Mühlauer Bach mit Murablagerungen (Foto: Jöhl).....	38
Abb. 4.16: Übersicht über die Teileinzugsgebiete der Gebiets Söll- und Schwarzenbach .	39
Abb. 4.17: Übersicht über die Gesteine des Söllbachgebiets (Grundlage: GK8236, 8336/8436, 8335) ..	41
Abb. 4.18: Ausgeräumtes Bachbett im Söllbachgebiet (Wurzengraben) .....	42
Abb. 4.19: Durch Murgang bewegter Block im Wegerschlaggraben .....	42
Abb. 4.20: Levées im Buchersulzgraben.....	43
Abb. 4.21: Ablagerung im Luckengraben .....	44
Abb. 4.22: Zerstörte Bundesstraße B307 (Foto: WWA Rosenheim, 1999) .....	44
Abb. 4.23: Levées auf der Brücke an der Mündung Schwarzenbach / B307 (Foto: WWA Rosenheim, 1999) .....	45
Abb. 4.24: Übersicht über das Einzugsgebiet Waxlries (Grundlage: Orthophoto) .....	46
Abb. 4.25: Ausgehöhlte Forststraße .....	47

Abb. 5.1: Vergleich der Startpunktmodellierung mit unterschiedlichen Modelleinstellungen .....	50
Abb. 6.1: Modellierte Bachläufe bei zu kleinen Schwellenwerten am Bsp. des Söllbachs.....	57
Abb. 6.2: Vergleich der Modellierung mit unterschiedlichen min. Gerinnelängen am Bsp. der Rumer Mure .....	58
Abb. 6.3: Mögliche Fehler bei der Berechnung des Gerinnenetzes (Grundlage: Orthophoto) .....	59
Abb. 6.4: Vergleich des berechneten Abflusssystem im Einzugsgebiet Altmummen ohne und mit Wölbungsfilter .....	60
Abb. 6.5: Einfluss der Lage der Höhenpunkte auf das Ergebnis der Geländemodellierung (Stützel, F., 2010) .....	61
Abb. 6.6: Möglicher Startpunkt einer Talmure bei Sonthofen.....	63
Abb. 6.7: Ausgewiesene Startpunkte im Fels bei ungewichteter Modellierung (Grundlage Orthophoto) .....	64
Abb. 6.8: Modellierter Anriss und kartierter Murkegel im Gebiet Heugraben (Grundlage Orthophoto) .....	65
Abb. 6.9: Bereits geräumte Murablagerungen Altmummen/Allgäu .....	66
Abb. 6.10: Wegfallende Anrisspunkte nach der Neigungsgewichtung im Ehnbach (Grundlage Orthophoto) .....	67
Abb. 6.11: Vergleich von modellierten Anrissen zu beobachteten Murköpfen im nördlichen Ehnbach .....	69
Abb. 6.12: Fehlende Anrisspunkte in den Einzugsgebieten des nördl. Bereichs des Söllbachs.....	70
Abb. 6.13: Ausweisung eines Anrisspunktes mit bzw. ohne Gesteinsgewichtung am Bsp. Waxlriesgraben (Grundlage: Orthophoto) .....	73
Abb. 6.14: Seetonlage im nördlichen Söllbach .....	76
Abb. 6.15: Charakteristik der Muranrisse im Gerinne bezüglich der Materialeigenschaften und der Art der Auslösemechanismen (Zimmermann et.al, 1997).....	77
Abb. 6.16: Vergleich der Funktionsgeraden zur Berechnung der Startpunkte .....	78
Abb. 6.17: Anrisspunkte im Vergleich der unterschiedlichen Anrissformeln .....	80
Abb. 7.1: Prozessbereich im Kuhlochgerinne (Nordteil des Ehnbach) mit $\mu = 0,18$ .....	83
Abb. 7.2: Modellierter Prozessweg im Oberbach mit $\mu = 0,18$ .....	84
Abb. 7.3: Überblick über das Einzugsgebiet Waxlriesgraben (Grundlage: Orthophoto).....	85
Abb. 7.4: Ausgespülte Forststraße .....	85
Abb. 7.5: Modellierter Prozessweg der Heugrabenmure mit $\mu = 0,18$ .....	86
Abb. 7.6: Modellierter Prozessweg der Heugrabenmure mit $\mu_{wichtmax}$ .....	87
Abb. 7.7: Modellierter Prozessweg im Mühlauer Bach mit $\mu = 0,18$ .....	88
Abb. 7.8: Modellierter Prozessweg Mühlauer Bach mit $\mu_{wichtmax}$ .....	89
Abb. 7.9: Rumer Langenbach $\mu_{wichtmax}$ .....	90
Abb. 7.10: Modellierter Prozessraum im Rumer Langenbach mit $\mu_{min}$ .....	91
Abb. 7.11: Modellierter Prozessraum der Rumer Mure mit $\mu = 0,18$ .....	92

Abb. 7.12: Modellierter Prozessraum der Rumer Mure mit $\mu_{\max}$ .....	93
Abb. 7.13: Modellierter Prozessweg im Ochsen- und Luckengraben mit $\mu = 0,18$ .....	94
Abb. 7.14: Modellierter Prozessweg im südl. Söllbach mit $\mu_{\text{wichmax}}$ .....	95
Abb. 7.15: Modellierter Prozessweg im nördl. Söllbach mit $\mu = 0,07$ .....	96
Abb. 7.16: Prozesswege des Rumpelgraben bei unterschiedlichem $\mu$ .....	97

## **Tabellenverzeichnis:**

Tab 1.1: Wichtige Kriterien zur Unterscheidung von Mure und Hochwasser.....	5
Tab. 5.1: Einstellungen zu Berechnung der sedimentpendenden Fläche .....	51
Tab. 5.2: Geschiebequellen, Gewicht und Methodik der Ausscheidung .....	52
Tab. 6.1: Gewichtung der Gesteine nach Erosivität durch Muren .....	72
Tab. 7.1: Modelleinstellung nach WICHMANN .....	82

Bei allen Abbildungen und Fotos ohne Quellenangabe handelt es sich um Arbeiten des Autors  
 Orthophotos: Amtl. Geodaten des Bay. Landesvermessungsamts (VM 3820 B – 375)  
 Österr. Landesamts für Eich- und Vermessungswesens (GZ 70318/99).

## Danksagung:

Ohne Unterstützung von vielen Seiten wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Auf der fachlichen Seite gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Otfried Baume für seine freundliche und unkomplizierte Art zu helfen und für den Einstieg in meine akademische Laufbahn sowie Herrn Prof. Michael Becht für die Freundschaft, den Anschlag, die Betreuung, die gemeinsame Zeit an den Universitäten und den langen Atem.

Die schnelle, völlig unkomplizierte und großzügige Anschubfinanzierung der Munich Re und der Universitätsgesellschaft München war eine große Hilfe, um die Arbeit zu beginnen und die Geländearbeit durchzuführen. Vielen Dank dafür speziell an die Herren G. Berz und W. Kron.

Die gemeinsamen Exkursionen, bei denen viel (fachlich) diskutiert, gelacht und (fachfremd) geredet wurde, waren großartig. Vielen Dank dafür an: Dr. Volker Wichmann (Laserdata GmbH), Dr. Tobias Heckmann, Dr. F. Haas (KU Eichstätt – Ingolstadt), Dr. Friedrich Barnikel, Dr. habil. Mark Vetter (Uni München). Für die geologischen Erläuterungen gilt mein Dank Herrn PD Dr. M. Trappe (Uni Eichstätt).

Das Auffinden der frischen Murgänge und die Informationen über die Reparaturarbeiten wäre ohne die vielen Mitarbeiter der diversen Wasserwirtschafts- und Forstämter nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt:

Herrn H. Barnikel (WWA Rosenheim), Dipl. Ing. R. Bednarz (Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Österreich), Herrn Dr. Agerer (WLV Tirol), Herrn DI Jörg Heumader (WLV Imst), Herrn T. Loipersberger (Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft), Herr Glogau (WWA Kempten), Herr Scholz (FA Allgäu), Herr Nöß (FA Pfronten), Herr Lukas (FA Siegsdorf), Herr Meinel (FA Inzell), Herr Schimmer (FA Schleching), Herr Wieser (FA Reit i. Winkl), Herr Haigel (Straßenmeisterei Oberammergau), Herr Graßl und Herr Fuß (FA Berchtesgaden).

Wichtig war auch die Arbeit der Studenten, die als Diplomanden oder studentische Hilfskräfte immer bereit waren, dreckig nach Hause zu kommen. Vielen Dank an R. Lunghammer, B. Jöhl, den Teilnehmern des Geländepraktikums SS 99, Fabian Glaschke und Mark Withut. Damit die Arbeit tatsächlich zu einem Ende gekommen ist, bedurfte es auch immer wieder einer Motivationshilfe. Ohne die Unterstützung und den langen Atem (auch wenn es manchmal schwierig war) meiner Frau Sanni und ihrer „Verschwörung“ mit Florian Marano wäre mir wohl kurz vor Schluss die Luft ausgegangen. Für eure Hilfe und den letzten Kick kann ich euch nicht genug danken!!

Aber auch allen anderen Freunden und der Familie muss ich danke sagen. Christina für den Speicher, Brigitte, Bernd und Jens für die psychologische, geländetechnische und überhaupt elterliche Unterstützung, Chris für das kostenlose Exil, die völlig fachfremde Sicht und die vielen fröhlichen Kaffeepausen. Jonas und Anna für das Angebot, alles zu lesen und Jan für die unaufdringliche Hilfe, die aber immer da war.

Bei allen, die ich jetzt vergessen habe und das Gefühl haben, hierher zu gehören möchte ich mich entschuldigen und Danke sagen.

# 1 Einführung

## 1.1 Naturgefahren im Hochgebirge

Der natürliche Lebensraum in Hochgebirgen unterliegt einer ständigen Veränderung. Aufgrund der großen Höhendifferenz und der speziellen Klimabedingungen sind die Abtragungsraten durch Erosion bzw. Denudation hier höher als in den Ebenen. Die Abtragung findet dabei nicht langsam und konstant statt, sondern vor allem durch extreme Einzelereignisse wie Lawinen, Rutschungen Hochwasser o.Ä. Dabei gehen die Prozesse oftmals in einander über oder greifen ineinander, so dass eine klare Zuordnung der Abtragung zu einzelnen Prozessen nicht immer möglich ist.

Die meisten der Abtragungsprozesse treten nur sehr unregelmäßig und in großen zeitlichen Abständen auf (Murgänge, Felsstürze etc.) oder haben stark unterschiedliche Dimensionen (Lawinen, Rutschungen, Murgänge etc.). Für Menschen in den betroffenen Gebieten kommen solche Ereignisse daher meist überraschend („gab es seit Menschengedenken noch nicht“) und sind in ihren Auswirkungen auf genutzte Flächen häufig katastrophal (Abb. 1.1). Der bis vor rund hundert Jahren eher dünn besiedelte und lediglich extensiv genutzte Lebensraum in den Hochlagen der Alpen wird vom Menschen zunehmend intensiver genutzt. Hauptsächlich durch die Zunahme der touristischen Nutzung werden Anlagen (Hotels, Lifte, Gaststätten etc.) und Infrastruktur (Straßen, Bahnlinien usw.) immer weiter in bislang (fast) unbewohnte Gegenden gebaut. Waren es bis vor rund hundert Jahren noch eher wenige Menschen, die von Massenbewegungen, deren Auftreten sowie Prozessbereichen und Wiederkehrhäufigkeit betroffen waren, nimmt die Zahl der Betroffenen immer mehr zu. Für die verantwortlich handelnden Gemeinden und Behörden stellt sich zunehmend die Frage nach Möglichkeiten der Prävention. Nur wenn die Ausweisung gefährdeter Flächen und damit verbunden die Frage nach der Häufigkeit des Auftretens der Naturgefahren befriedigend geklärt ist, ist die Ausweisung von Bauflächen bzw. die Realisierung von Schutzmaßnahmen möglich. Infolge des Bedarfs der Bevölkerung und der verantwortlichen Institutionen an Informationen über Massenbewegungen beschäftigt sich die Wissenschaft seit etwa 40 Jahren mit diesen Prozessen.

Die Erforschung von Massenbewegungen hat demzufolge eine lange Tradition und entsprechend viele Definitionen für einzelne Prozesse und deren Abgrenzung wurden veröffentlicht (z.B. LAATSCH & GROTTENTHALER 1972, VARNES 1978, HEGG 1997).

Um die stattfindende Prozesse und ihre Auslösung besser zu verstehen, müssen Basisdaten (Niederschlag, Temperatur, Versickerung etc.) sowie Rahmenbedingungen (Relief, Geologie, Abflussverhalten usw.) teilweise auch über einen längeren Zeitraum erhoben werden. Dauerhaft eingerichtete Klimastationen sind im Hochgebirge indes nur lückenhaft vorhanden. Temporäre Messstationen wie z.B. im Rahmen eines Forschungsprojekts errichtete Stationen sind im Sommer lediglich mit hohem personellem Aufwand und im Winter schneebedingt meist überhaupt nicht zu erreichen (u.a. TOGNACCA ET AL. 2000). Zahlreiche Arten von Massenbewegungen werden durch intensive Niederschläge begünstigt. Das sind neben eher lang anhaltenden Frontalniederschlägen (z.B. Vb-Wetterlage) auch kleinräumige Gewitterniederschläge, die von dem vorhandenen Messnetz aber oftmals nicht erfasst werden.

Neben der Schwierigkeit, auslösende Faktoren zu messen, sind auch die Möglichkeiten, den Prozess selbst zu beobachten und zu analysieren, limitiert. Große Teile der Gebirge sind nach wie vor unbewohnt, so dass selbst große Ereignisse häufig erst viel später entdeckt werden und bereits durch andere, erosiv wirkende Prozesse verändert wurden. Des Weiteren unterscheiden sich die Prozesse sowohl in der Größe (Steinschlag bis Bergsturz) als auch in der Geschwindigkeit (Hangkriechen bis Murgang) deutlich voneinander.



Abb. 1.1: Murschäden in den Alpen

Der Verlauf ist meist recht komplex – eine Beobachtung sowie eine quantitative Messung von Massenbewegungen sind folglich nur mit großem Aufwand zu realisieren (BECHT 1995). Häufig werden auch Messanlagen, die auf kleine oder mittlere Ereignisse ausgelegt sind, durch ein unerwartet großes Ereignis zerstört. Umgekehrt können kleine Ereignisse oftmals nicht exakt erfasst werden, wenn die Stationen auf große ausgelegt sind. Die geringe Frequenz und

die Unregelmäßigkeit des Auftretens erschweren es zudem, den Prozessen eine Jährlichkeit zuzuordnen. Damit ist es aber nur unter großen Schwierigkeiten möglich, Gegenmaßnahmen richtig zu dimensionieren bzw. die Balance zwischen finanziellem Aufwand zur Sicherung des Lebensraums und dem vertretbaren Restrisiko zu finden (u.a. BUNZA, 1996; HEINIMANN 1998). Die genannten Einflüsse auf die Erhebung von Eingangsdaten sowie die Messung des Ereignisses selbst erschweren die Rekonstruktion der alten und die Vorhersage neuer Ereignisse erheblich.

## ***1.2 Zur Abgrenzung der Murprozesse***

Eine Form der Massenbewegungen sind Muren, die wegen ihres plötzlichen Auftretens, ihrer hohen Zerstörungskraft und der damit verbundenen Gefährdung für Personen und Sachwerte ein seit längerer Zeit sowohl in der Presse als auch in der Wissenschaft stark diskutiertes Thema darstellen. Die Erscheinungsform von Muren ist nicht einheitlich. Da sie eine Art Übergangstellung zwischen Hochwasser und Rutschung einnehmen (Abb. 1.2), treten sowohl verhältnismäßig trockene und feinmaterialarme, als auch Muren mit einem hohen Wassergehalt und viel Feinmaterial bzw. Boden auf, die eher an verflüssigte Rutschungen erinnern. Sie sind in kleinen, teilweise selbstgeschaffenen Rinnen am Hang oder in Schuttkegeln (RIEGER 1999) zu finden, aber auch in Bachbetten von mehreren Zehner-Metern Breite (CHEN 2000). Die Zusammensetzung von Muren kann von feinen vulkanischen Aschen über eine Mischung von Holz, Boden und Schutt bis hin zu grobem Schutt reichen. Dabei können sie ein Schuttvolumen bis zu einigen Millionen Kubikmetern (CHEN 2000) transportieren. Einige Muren laufen nur wenige Hundert Meter weit und bleiben weitgehend unbemerkt am Hang liegen, andere fließen mehrere Kilometer in das Vorland und können große Schäden an Gebäuden anrichten sowie Menschenleben gefährden (z.B. TAKAHASHI 1991).

TOGNACCA (1999, S.13) konstatiert diesbezüglich „Murgänge lassen sich dank ihrer Materialzusammensetzung und ihrem Verhältnis zwischen solider und fluider Phase von anderen terrestrischen Massenumlagerungsprozessen qualitativ unterscheiden. Die Übergänge zu anderen Prozessen [...] sind dennoch fließend und heutzutage sind noch keine allgemeingültigen quantitativen Kriterien bekannt, die eine zweifellose und saubere Abtrennung der verschiedenen Phänomene ermöglichen.“

Vermutlich durch die Vielzahl der Erscheinungsformen ist neben dem Begriff „Mure“ bzw. „Murgang“ (der meist den Bewegungsablauf einer Mure beschreibt; LAATSCH & GROTTENTHALER 1972) eine große Zahl anderer Begriffe für vergleichbare Phänomene entstanden. Dabei handelt es sich nicht nur um Lokal- oder Dialektbegriffe, auch in der wissenschaftlichen Diskussion werden neue Begriffe geprägt, um Besonderheiten der untersuchten Muren zu beschreiben. Das lässt sich sowohl in der deutschen als auch in der internationalen Literatur verfolgen. Schlammstrom, Sturzstrom, Erdfließen, Erd- oder Bergschlupf, Geröllstrom, mud flow, mud stream, debris avalanche, debris torrent und Lahar sind einige der Begriffe, die sich in der Literatur finden. HUNGR (2005) fasst die Begriffe der englischsprachigen Literatur zusammen und klassifiziert in debris flow, mud flow, debris flood und debris avalanche. Dabei definiert er debris flow als „Very rapid to extremely rapid flow of saturated non-plastic debris in a steep channel. Plasticity index is less than 5% in sand and finer fractions“ (S.14). Ein mud flow dagegen sei plastisch und haben einen deutlich höheren Wassergehalt (> 5 %). Debris flood beschreibt er als ein stark geschiebeführendes Hochwasser in einem steilen Kanal. Im Gegensatz dazu steht die „debris avalanche“, bei der es sich um ein schnelles, flaches Fließen von mindestens teilweise gesättigtem Material ohne Vorhandensein eines Kanals handelt.

Aufgrund der oben angesprochenen teilweise sehr unterschiedlichen Entstehungs- und Erscheinungsformen, sowie der Problematik von Nomenklatur und Abgrenzung ist die Verwendung des Begriffs „Mure“ nicht immer einheitlich. Schon STINY (1910) schreibt über die Problematik, dass viele Autoren nicht zwischen „echten Muren“ und „Wildbächen im allgemeinen“ zu trennen vermögen. Auch RIEGER (1999, S.1) bemängelt: „[...] Damit ist bereits ein zentrales Problem genannt, das bei der Bearbeitung und Bewertung der Forschungsergebnisse immer wieder auftaucht [...]. Bei der Durchsicht von Quellentexten stellt sich häufig die Frage, ob der jeweilige Autor sich tatsächlich mit dem Untersuchungsobjekt Muren befasst oder vielmehr mit Hochwasserereignissen, die fälschlich als Muren tituliert werden.“

So wird der Begriff „Mure“ in den Medien, aber auch bei Fachleuten z. B. in der Forstverwaltung, Feuerwehr oder dem Technischen Hilfswerk (THW), nicht nur für geschiebereiches Hochwasser, sondern auch für viele Arten der Massenbewegung, vor allem aber für Rutschungen benutzt.

So lässt sich im Einsatzbericht des THW Berchtesgadener Land (<http://www.thw-bgl.de/einsaetze/2002/12.08.02/Laufen.html>) unter der Überschrift „Katastrophenalarm in BGL – Mure bedroht Haus in Laufen“ Folgendes lesen:

**“Einsatzlage:**

*Haus am Fuße eines etwa 35 m hohen Hanges, der untere Bereich des Hanges wurde im Hausbereich ausgekoffert und mit einer Zyklopenmauer in ca. 70% Winkel gefasst. Bedingt durch starke Regenfälle riss der Hang oberhalb des Hauses auf einer Breite von etwa 15m auf und drohte das Haus zu verschütten. Die Alarmierung erfolgte über die FFW Laufen.*

**Sicherung:**

*Als Sofortmaßnahme wurde der Hang großflächig über Mure, Abrisskante und die oberen Hangteile mit Planen abgedeckt, um eine weitere Gewichtsbelastung und Verflüssigung der Bodenschichten durch Regen- und Oberflächenwasser zu verhindern. Natürlich wurde das Gebäude auch sofort evakuiert [...]. Um Bewegungen der Massen und Veränderungen der Belastungen ablesen zu können, wurde zum einem die Mure mit Holzpflocken beiderseits markiert, zum anderen die Abstände der Gerüstdiagonalen mittig gemessen. Alle Werte wurden im Einsatzprotokoll festgehalten und regelmäßig überwacht.“*

Dass es sich bei der im Text beschriebenen Gefährdung eher um eine drohende Rutschung denn um eine Mure handelt, ist deutlich.

Auch in der wissenschaftlichen Diskussion wird der Begriff nicht immer einheitlich gebraucht. Teilweise ist seine Verwendung auch von Land zu Land unterschiedlich. Ein Beispiel dafür gibt KUHLE (1984), der Muren mit linienhaften Rutschungen gleichsetzt. „In den Alpen, [...], gehen die meisten Rutschungen linienhaft vor sich (Muren) [...]. Auslösend sind vornehmlich die Schneeschmelze im Frühjahr und Sommer.“ Weiter schreibt er: „Morphographisch sind Rutschungen mit tendenziell linienhaftem Grundriß und beidseits der zentralen Tiefenlinie zwei Wallformen (Muren oder murähnlich) von breitflächigen, [...] Rutschungen zu unterscheiden.“

Auch LORENTE ET AL. (2003, S.686) vermischen die Begriffe „debris flow“ und „landslide“: „Most landslide scars developed around 30° [...]. This is consistent with other studies where most debris flows occur between 25° and 38° [...]“. Weiter unten im Artikel werfen die Autoren die Frage auf, aus welchem Grund die untersuchten „Muren“ schon ab einer Hangneigung von ca. 18° zum Stillstand kommen und vermuten, dass es mit dem Gestein (Flysch) zu tun haben muss. Bei einer beschriebenen Gesamtlänge der „Muren“ von ca. 70m und einem durchschnittlichen Volumen von ca. 180 m<sup>3</sup> liegt zumindest die Vermutung nahe, dass es sich um eine Rutschung handelt.

Auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist deshalb zu überprüfen, ob es sich im Sinne des Bearbeiters überhaupt um eine Mure handelt oder ob nicht vielmehr eine andere Form der Massenbewegung untersucht wird.

Aufgrund der Stellung der Muren zwischen Rutschung und Hochwasser existiert keine Definition, die sowohl die Mure beschreibt, als sie auch von allen anderen Prozessen eindeutig abgrenzt (TOGNACCA 1999). LAATSCH & GROTTENTHALER (1972) definieren Muren eindeutig, ohne sie aber von anderen Massenbewegungen abzugrenzen. So schreiben sie über Muren: „Diese breiartigen aus Wasser, Erde und Grobschutt zusammengesetzten, oft Baumstämme und Blöcke transportierenden Massen benutzen Wildbachfurchen oder über der Baumgrenze auch durch ältere Murgänge tief in den Hang eingekerbte Murbetten“.

Für BUNZA (1976, S.325) wird ein Murgang definiert als:“[...] 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.“

Eine klare Abgrenzung zwischen Mure und Hochwasser nicht aber zu Rutschungen findet sich auch bei COSTA (1984, S.268): „Debris flows are a gravity-induced mass movement intermediate between landsliding and waterflooding, with mechanical characteristics different from either of these processes (JOHNSON 1970). A debris flow is a form of rapid mass movement of a body of granular solids, water, and air (VARNES 1978). Flow properties vary with water and clay content, and sediment size and sorting.“

Weitgehende Einigkeit herrscht über die Abgrenzung von Muren zu einem geschiebereichen Hochwasser anhand messbarer Eigenschaften. Folgende Kennzahlen haben sich in der Literatur etabliert (vgl. Tab. 1.1):

	Mure	Hochwasser
Feststoffanteil [Gew.-%]	70-90	bis 40
Dichte [ $\text{g/cm}^3$ ]	1,8-2,6	1,01-1,3
Feststofffracht	während des Murgangs konstant	während des Hochwassers variabel
Deposition	nur als Ganzes; Mure bleibt en bloc stehen	selektiv, abhängig von Korngröße und Fließgeschw.
Sortierung	Nicht vorhanden	gut
Schichtung	Praktisch nicht vorhanden	gut

Tab 1.1: Wichtige Kriterien zur Unterscheidung von Mure und Hochwasser (RIEGER, 1999, S.1; nach COSTA 1984)

Folgende weitere Eigenschaften werden Muren im Allgemeinen zugeschrieben:

- Muren sind ein Gemisch aus Luft, Feststoffen und Wasser in unterschiedlichen Konzentrationen ggf. mit Holz oder anderen organischen Stoffen.
- Die groben Feststoffe (Steine und Wildholz) befinden sich hauptsächlich in der Murfront und nehmen im Verlauf des Murgangs deutlich ab.
- Die Mure bewegt sich als Einheit, d.h. Wasser und Feststoffe trennen sich nicht, wenn sie langsamer wird (anders als Wasser mit Geschiebe), sie bleibt mehr oder weniger ruckartig stehen (vergleichbar mit Beton).
- Das Fließverhalten unterscheidet sich sowohl von Wasser als auch trockenem Schutt
- Je nach Zusammensetzung unterscheidet man viskose und granulare Muren
- Die größte Mächtigkeit findet man an der Front, danach nimmt sie ab. Ein Ereignis kann aus mehreren Schüben bestehen.

- Muren nehmen auf ihrem Weg Material aus dem Gerinne auf und arbeiten es mit ein. „In order to check the origin of transported debris, we carried out the particle size analysis on the soil of the slope surface near the valley head, deposits on the valley floor, soils from valley side walls, samples from flowing debris flow and deposits on the fan. The result shows that most substances sampled from debris flow and fan were transported from the valley floor and only a very small part from slope surface” (OKUDA et al. 1980, S. 158)
- Die Geschwindigkeit von Murgängen schwankt zwischen 0,5 bis ca. 20 m/s. Entscheidend für die Geschwindigkeit sind die Geschiebekonzentration, Korngrößenzusammensetzung sowie Form, Neigung, Breite als auch die Anzahl und Art der Kurven im Gerinne (COSTA 1984).



Abb. 1.2: Übergang zwischen Mure und Rutschung nahe Ruhpolding/Bayern

### 1.3 Die unterschiedlichen Murtypen

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Erscheinungsformen von Muren können diese auch, je nach Intention des Autors, nach verschiedenen Kriterien zusammengefasst werden. Dabei ist die Abgrenzung verschiedener Murtypen – ähnlich wie bei Lawinen – sehr variabel.

DAVIES (1997) unterteilt die Muren in kleine und große. Kleine Muren treten in Einzugsgebieten auf, die max.  $1\text{km}^2$  groß sind und ein Gefälle größer 10 % aufweisen. Auslöser ist der Materialeintrag in das Gerinne und dessen Mobilisierung durch intensive Niederschläge. Allerdings muss laut Davies ausreichend Material vorhanden sein, um eine Dichte von  $1,6\text{-}1,8\text{ t/m}^3$  zu erreichen. Er führt damit als zweite Größe die Materialverfügbarkeit ein. Große Muren treten in deutlich größeren Einzugsgebieten auf ( $\text{Zehner km}^2$ ), das Gefälle ist deutlich flacher (um  $5^\circ$ ), ein Ereignis besteht aus 10- 100 Einzelschüben und die Materialzusammensetzung ist sowohl während eines Ereignisses als auch innerhalb eines Schubes gleich. Als typisches Beispiel nennt DAVIES die Muren in den chinesischen Lössgebieten.

Einen anderen Ansatz wählt BONNET-STaub (1999). Er unterscheidet die Muren nach ihrer Materialzusammensetzung in granulare und kohäsiven Muren. Dabei zieht er hauptsächlich die Korngrößen unter 20 mm zur Differenzierung heran. Auch postuliert er, dass Muren leichter entstehen können, wenn im Einzugsgebiet gröberes Material zu finden ist.

Eine sehr umfassende Unterteilung von Muren legt TOGNACCA (1999) vor. Er fasst die verschiedenen Ursachen zusammen und schlägt folgende Gliederung vor:

1. Klassifizierung nach dem Entstehungsmechanismus:
  - Entstehung infolge bodenmechanischer Instabilität.
  - Entstehung infolge progressiver Erosion
2. Klassifizierung nach dem Entstehungsort
  - Entstehung im Gerinne
  - Entstehung am Hang

In seiner Arbeit befasst er sich ausschließlich mit grobkörnigen (granularen) Muren, d.h. Murgängen, die im Gegensatz zu viskosen nur wenig Boden und/oder Feinmaterial enthalten. Dabei werden die Entstehungsmechanismen in einem Kanal im Labor analysiert. Neigung und Korngröße werden dabei variiert.

SLAYMAKER (2007, S. 308) benutzt den Begriff des debris torrent und unterscheidet in zwei Gruppen: „Debris torrent systems may be separated into two groups: supply-limited and transport-limited (DIETRICH AND DUNNE, 1978; BENDA AND DUNNE, 1987). In supply-limited debris torrent systems, sediment supply rate controls debris torrent production; hence, a debris torrent may or may not be triggered during a peak flow event, depending on the amount of debris available in the gully. In transport-limited systems, generation of threshold peak flow in the basin triggers debris torrents; the generous sediment supply in these basins may derive from channels incised into sources of deep, unconsolidated material or shattered bedrock.“ Diesen Ansatz verwenden auch WICHMANN ET AL. (2002), setzen ihn aber mit Hangmuren (transport-limited) und Talmuren (sediment-limited) gleich.

TAKAHASHI (2007) fasst die unterschiedlichen Klassifikationen aus dem chinesischen Raum zusammen und unterteilt zum einen in „mud-stone-flow“ und „water-stone-flow“. Entscheidend dabei ist die Frage, ob der Zwischenraum zwischen den Steinen mit Wasser oder Feinmaterial gefüllt ist. Zum anderen kann auch nach dem auslösenden Ereignis (Niederschlag, Schneeschmelze) oder nach der mechanischen Ursache (Erosion des Bachbetts, Rutschung wird zu Mure, kollabieren eines Rutschungsdamms) unterteilt werden.

JOHNSON & RODINE (1984) unterscheiden nach der Entstehungsart der Muren; dabei werden vor allem zwei Ursachen hervorgehoben:

- Auslösung durch progressive Erosion. Das Lockermaterial der Gerinnesohle wird durch den Anstieg des Abflusses erodiert.
- Auslösung durch bodenmechanische Instabilität. Porenwasserüberdruck führt zu einer Rutschung. Weitere Wasserzufuhr verflüssigt die Rutschung und verändert sie zu einer Mure.

Diese Unterteilung wird von anderen Autoren noch verfeinert (z.B. IVERSON ET AL., 1997).

TAKAHASHI (1981) und SASSA (1984) differenzieren zwischen Muren, die in einem Gerinne entstehen, und Muren, die an einem Hang anreißen. Während SASSA bei beiden Murtypen die gleiche Art der Auslösung sieht (Porenwasserüberdruck), ist für TAKAHASHI ein Unterschied zu sehen. Hangmuren entstehen für ihn wie bei SASSA durch einen Porenwasserüberdruck, Talmuren dagegen durch progressive Erosion und Bodenverflüssigung.

COSTA (1984, S. 271) nimmt zwar keine explizite Unterteilung vor, konstatiert aber: „Debris flows usually follow pre-existing drainageways, but can move down hillslopes and across unobstructed fan surfaces in almost any direction...“ Somit kann man auch hier eine Unterteilung in Muren am Hang und in der Tiefenlinie zumindest vermuten.

HAEBERLI ET AL. (1991), ZIMMERMANN (1997) und RIEGER (1999) verfeinern diese Unterscheidung noch in jeweils zwei Unterklassen. Dabei gehen sie vom jeweiligen Anrissort aus. Bei Hangmuren differenzieren sie zwischen Anrissen im Lockermaterial oder im Kontaktbereich zwischen Fels und Schutthalde, bei Talmuren sehen sie diese entweder in mit Moränen gefüllten Felscouloirs oder durch Geschiebemobilisation im Gerinne selbst.

Diese von den zuletzt genannten Autoren getroffene Unterteilung in Tal- und Hangmuren wird aufgegriffen und in der vorliegenden Abhandlung weiterverwendet. Bei Geländearbeiten ist die Unterteilung in Hang- und Talmuren gut nachzuvollziehen (Abb.1.3). Wegen ihrer verschiedenen Herkunft in einem Gerinne bzw. an einem Hang ist eine eindeutige Unterscheidung auch im Gelände möglich, was bei anderen Einteilungen nicht immer gegeben ist. Weitere Unterschiede können im Gelände festgestellt werden. Die Form der Ablagerungen variieren meist; bei Hangmuren sind Levées und Ablagerungen im Normalfall deutlicher; auch in der Ablagerungsgröße und der Lauflänge unterscheiden sich Tal- und Hangmuren. Talmuren sind in der Regel größer und laufen länger.

Die Talmuren werden in der vorliegenden Studie weiter analysiert. Da sich im Verlauf der Untersuchung ein Unterschied innerhalb der Gruppe der Talmuren ergab, wird eine Unterteilung der Talmuren in viskos und granular (BONNET-STAU, I., 1999; TOGNACCA, 1999) vorgenommen. Dieses wird für die Analyse der Ergebnisse als notwendig und sinnvoll erachtet.



Abb. 1.3: Vergleich von Talmure (oben) und Hangmure (unten) [Photo: Rieger (unten)]

## 2 Stand der Forschung

Lediglich wenn die Prozessbereiche von Muren sowie deren Wiederkehrdauer einigermaßen sicher vorhergesagt werden können, ist es möglich, die Bevölkerung vor den drohenden Gefahren durch Muren zu schützen. Damit muss es ein Ziel der Murforschung sein, zu verstehen, wo und weshalb Muren ausgelöst werden, wie häufig und in welcher Größe sie auftreten und welche Prozesse innerhalb eines Murgangs ablaufen. Mittels dieser Grundlagen kann der Versuch erfolgen, den vom Menschen bewohnten und bewirtschafteten Teil der Gebirge in gefährdete und ungefährdete Gebiete einzuteilen, wie das bei Lawinen inzwischen in vielen Ländern üblich ist. Dazu ist es nötig, Murgangmodelle zu erstellen, die grundsätzlich gefährdete Täler genauso ausweisen wie Prozessbereich und Reichweite der potenziell abgehenden Muren.

## 2.1 *Murauslösung*

Die Beobachtung von Murgängen ist schwierig, sie werden meist unerwartet und / oder in eher unzugänglichen Regionen ausgelöst. Da noch immer qualitative und quantitative Daten fehlen, ist die Entstehung von Muren abschließend noch nicht geklärt (TOGNACCA 1999). Die Entscheidung, die Einteilung der Muren in Tal- und Hangmuren zu übernehmen, erweist sich hier als Vorteil, da die Klassifizierung im Gelände einfach vorgenommen werden kann. Eine Aussage über die auslösenden Mechanismen kann dabei allerdings nicht getroffen werden. Ausgelöst werden Muren meist durch einen starken Anstieg des Wasserangebots. Dazu kommt es durch lang anhaltende Frontalniederschläge oder kurze Starkregenereignisse oft auch im Zusammenhang mit intensiver Schneeschmelze. Dabei ist nicht so sehr die absolute Wassermenge ausschlaggebend, sondern das Verhältnis des aktuellen Abflusses zum üblichen Wasserangebot der Region (SANDERSEN ET AL. 1996). Durch das hohe Wasserangebot kommt es entweder zu einer bodenmechanischen Instabilität oder zu progressiver Erosion (u.a. JOHNSON & RODINE 1984). In beiden Fällen ist die zentrale Rolle des Wassers offensichtlich.

Die Ursache der Murgengese durch progressive Erosion ist eine deutliche Zunahme des Abflusses und des Sedimenttransports. Durch die laterale Erosion der Prallhänge und des Bachbetts selbst nimmt der Sedimenttransport weiter zu. Es entstehen neue Angriffspunkte und die Erosion beschleunigt sich. Über einen intensiven Geschiebetransport kommt es zu einem hyperkonzentrierten Abfluss und schließlich zu einem Murgang. Zu stark ansteigenden Abflussmengen kommt es nach starken Niederschlägen, aber auch Eis- und Schneeschmelze besonders in Verbindung mit Niederschlägen oder der Bruch einer Blockade im Gerinne können dazu führen. Der Ausbruch eines Gletschersees ist zwar eher selten, führt aber aufgrund der großen Wassermengen in den talabwärts liegenden Tälern meist zu großen Murgängen und entsprechenden Zerstörungen.

Vor allem in steilem Gelände sind die Fließbedingungen und die Kräfteverhältnisse nur sehr schwierig zu verstehen und lediglich zum Teil erforscht. Abhängig sind sie vom Gefälle, der Durchlässigkeit des Untergrunds, der Rauigkeit und dem Zusammenspiel von Oberflächen- und Grundwasser (TOGNACCA, 1999).

Zur Murauslösung durch bodenmechanische Instabilität kommt es entweder durch eine Abnahme der inneren Reibung oder durch eine Zunahme der äußeren Belastung; möglich ist aber auch eine Kombination beider Ursachen. Meist wird dabei anfangs eine Rutschung ausgelöst, die sich mit zunehmendem Deformationsgrad und Verflüssigung zu einer Mure wandelt. Dazu ist es sicher notwendig, dass die Masse eine gewisse Strecke zurücklegt (IVERSON ET AL., 1997). Die Abnahme der inneren Scherfestigkeit ist ein länger andauernder Prozess. Dabei spielt die Auswaschung von Körnern aus einem durchlässigen Boden durch fließendes Wasser genauso eine Rolle, wie die chemische und physikalische Verwitterung. Auch das Auftauen von Permafrostböden, besonders in den Hochlagen der Gebirge, bedingt eine Schwächung der inneren Scherfestigkeit. Deutlich schneller kann die äußere Belastung zunehmen und eine Instabilität des Bodengefüges bewirken. Die Ursache hierfür liegt häufig in den hydrologischen Rahmenbedingungen. Sowohl ein Anstieg des Grundwasserspiegels als auch der Aufbau eines Porenwasserüberdruckes kann die Belastung deutlich erhöhen. BONTE ET AL. (2000) können bei der künstlichen Auslösung einer Talmure allerdings nur eine untergeordnete Rolle des Porenwasserüberdruckes feststellen. Weitere Möglichkeiten sind oberhalb stattfindende Rutschungen, Felssturz oder die Vibrationen, die durch das Schwanken der Bäume im Wind über die Wurzeln in den Boden übertragen werden.

Bei der ebenfalls in der vorliegenden Arbeit vorgenommenen Unterteilung der Murgänge in viskos und granular finden sich noch weitere Unterschiede bei der Murauslösung. „Es ist interessant zu bemerken, dass der von TAKAHASHI (1991) beschriebene, granulare Murgangtyp andere Gesetzmäßigkeiten bezüglich des Auftretens zeigt, als die eher viskosen Murgänge. Bei den ersteren scheint die Regenintensität kurz von dem Ereignis die entscheidende Rolle zu spielen. Bei den anderen dagegen, hat der Vorregen und demzufolge der Sättigungsgrad des Bodens einen wesentlichen Einfluss“ (TOGNACCA, 1999, S. 35).

## **2.2 Murverlauf**

Muren folgen in der Regel den vorgegebenen Tiefenlinien, können indes auch aus diesen ausbrechen. Dabei können sie sich durch sogenannte Levées, die als Geschiebedämme entlang der Murbahn abgelagert werden, ihr eigenes Bett bauen. Die seitlichen Levées sind bei Hangmuren meist deutlicher ausgeprägt (COSTA 1984) als bei Talmuren, die in dem deutlich tiefer eingeschnittenen Bachbett fixiert sind und seitlich nur wenig Platz zur Ablagerung aufweisen. Eine Richtungsänderung der Mure wird durch die Tatsache begünstigt, dass sich Murgänge meist in mehreren Schüben in Abständen von Sekunden bis Stunden ereignen. Die vorangegangenen Murschübe blockieren dabei den ursprünglichen Fließweg und ermöglichen so dem nachfolgenden Murschub eine Richtungsänderung, die auch seitlich über die Levées hinweg führen kann.

Ein Murgang kann meist in drei Bereiche eingeteilt werden. Anschließend an das hydrologische Einzugsgebiet findet sich das Erosionsgebiet, in dem Material in die Mure eingearbeitet wird. Bei Talmuren kann das auch „nur“ ein Gerinneabschnitt sein. Das Transportgebiet stellt den Übergang zwischen Erosions- und Akkumulationsgebiet dar. Durch laterale Entwässerung kommt es hier meist zur Ablagerung der seitlichen Levées, während in der Mitte des Gerinnes weiter Erosion stattfindet (RIEGER 1999). Besonders ausgeprägt ist das Transportgebiet bei Hangmuren zu finden. Bei Talmuren dagegen kommt es häufig zu einem mehrfachen Wechsel von Transport, Akkumulation und Erosion. Im Akkumulationsgebiet kommt der Murgang zum Stillstand. Kurz vor den Stillstand ist die Geschwindigkeit oft so gering, dass die Vegetation im Prozessbereich den Murgang ablenkt und dabei nicht beschädigt wird (COSTA 1984). Die Ablagerungen können dabei sehr unterschiedlich aussehen. Je nach Materialzusammensetzung und Wassergehalt können die Ablagerungen eher mächtig und klar abzugrenzen sein oder flach und sehr großflächig verteilt (Abb. 2.1).

Eine Sortierung der Murablagerungen ist normalerweise nicht zu finden. Muren sind durch die Eigenschaft charakterisiert, dass sich Wasser und Geschiebe nicht mehr trennen lassen. Ein Murgang bleibt normalerweise auch als Ganzes stehen. Eine Sortierung ist deshalb auch nicht zu erwarten. Die Reichweite einer Mure ist sehr unterschiedlich. Sie reicht von mehreren Hundert Metern (meist Hangmuren) bis zu Kilometern (meist Talmuren). Hauptgrund für die unterschiedliche Reichweite ist der Feinkorngehalt des Murgangs. Je höher der Anteil an Feinmaterial ist, desto geringer ist die Wasserdurchlässigkeit und damit die Entwässerung. Dadurch erhöht sich der Porwasserdruck, und die Reichweite nimmt zu (COSTA 1984).



Abb. 2.1: Vergleich von flacher, großflächiger (oben) und mächtiger (unten) Ablagerung

Über die Rheologie einer Talmure existieren zahlreiche Studien (Zusammenstellung u.a. bei INNES 1983, COSTA 1988, TAKAHASHI 1991). Dabei gibt es unterschiedliche Ansätze, welche die verschiedenen Aspekte des Fließverhaltens erklären können. Für eine eher feinkörnige Matrix wird meist der Ansatz des viskos-plastischen Fließens verwendet (u. a. JOHNSON & RODINE, 1984). Eher grobkörnige Muren dagegen werden häufig durch das Modell der dispersiven Scherspannung erklärt (u. a. TAKAHASHI, 1991).

Allgemein anerkannt ist mittlerweile, dass sich Murgänge nicht wie Newton'sche Flüssigkeiten verhalten (RICKENMANN 1988). Vielmehr ist für Murgänge entweder das Bingham-Modell (JOHNSON & RODINE 1984) oder das Coulomb-viskose Modell anzuwenden. Wasser und Feststoffe bilden dabei eine homogene Suspension, ohne dass es zur Entmischung der einen von der anderen Komponente kommt, solange die Bewegung anhält (DAVIES 1988). Murgänge sind demnach keine Prozesse des Sedimenttransports in einer Flüssigkeit, sondern schnelle Massenbewegungen (STRUNK 1995).

„Ganz allgemein zeigt die reichhaltige Literatur zur Rheologie von Muren, wie wenig das Phänomen ‚Murgang‘ wegen seiner Vielfältigkeit noch verstanden wird“ (KERSCHNER, 1999, S.80). Die Schwierigkeit die Rheologie zu fassen beschreiben IVERSON ET AL. (2000, S. 522): „[...] realistic, unsteady debris flows composed of poorly sorted sediment do not have fixed rheologies.“ Außerdem unterscheidet sich das Fließverhalten von Muren je nach Feststoffanteil. JAKOB & BOVIS (1996, S. 15) können nachweisen, dass granulare Muren bei gleichem Spitzenabfluss ein deutlich kleineres Volumen haben als Muren aus vulkanischem Gestein (Lahare). „The data points [...] indicate two sub-populations of flows: muddy flows of mainly volcanic origin and granular flows derived from granitic-type materials.“ Auch diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine weitere Unterteilung der Talmuren in granular und viskos vorgenommen werden muss.

### **2.3 Modellierung**

Obwohl inzwischen viele Modellansätze veröffentlicht worden sind, um Muren zu modellieren, gibt es bisher noch keinen Ansatz, mit dem alle Aspekte eines Murgangs abgebildet werden können.

Um das räumliche Auftreten von Muren und die prinzipielle Anfälligkeit eines Gebiets beschreiben zu können, werden meist empirisch-statistische Verfahren angewendet. Dabei werden die naturräumlichen Rahmenbedingungen eines Gebiets ausgewertet und mit den Anrisszonen von Muren verglichen. RIEGER (1999) modelliert Anrisszonen von Hangmuren durch eine Parameter- und Klassengewichtung unter Anwendung bivariater Methoden. ELLEN & MARK (1993) berechnen aus Gestein, Neigung und Exposition eine Erosionsrate einzelner Gebiete. Auf der Grundlage der räumlichen Verteilung alter Ereignisse werden mittels logistischer Regressionen Murganganrisszonen ausgewiesen.

Viele Murgänge entwickeln sich aus Rutschungen. Als Ersatz für Murmodelle können in diesen Fällen auch solche für flachgründige Rutschungen verwendet werden (MONTGOMERY & DIETRICH 1994; DUAN & GRANT 2000; LIENER 2000), die auf der Annahme basieren, dass in Bereichen, in denen bereits Muren angerissen sind, wieder Muren anreißen können. Diese Annahme setzt voraus, dass sich die Verhältnisse innerhalb des Untersuchungsgebiets nicht ändern. Ferner bleibt fraglich, ob Muren dieser Art immer an den gleichen Stellen entstehen.

Sind die Niederschlagsverhältnisse in einem Gebiet bekannt, die zu Murgängen geführt haben, kann eine Intensität-Dauer-Funktion des Niederschlags erstellt werden (CAINE 1980, JOHNSON & SITAR 1990), die vermutlich auch zukünftig Muren auslösen wird. Damit erhält man Angaben über die Auslösewahrscheinlichkeit im untersuchten Gebiet. SANDERSEN ET AL. (1996) kritisieren, dass eine Formel für ein murauslösendes Ereignis (u. a. von CAINE 1980) in unterschiedlichen klimatischen Regionen auch an die unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten angepasst werden muss. Nach der Auswertung von 30 Murereignissen entwickeln sie eine Formel für den kritischen Niederschlag, der vom durchschnittlichen Jahresniederschlag eines Gebiets abhängig ist. Diese Art der Modellierung lässt indes außer Acht, dass zur Auslösung einer Mure nicht nur genug Abfluss, sondern auch genug Geschiebe vorhanden sein muss.

PRICE (1976) simuliert die Evolution von Kegeln mit stochastisch gesteuerten Prozessen und leitet daraus eine Wiederkehrdauer von Murgängen ab, WARD (1994) entwickelt ein Regressionsmodell für Muren aus Rutschungen. Damit lässt sich vorhersagen, wie hoch der Anteil der Feststoffe ist, der den Vorfluter erreicht. Dabei bezieht er die Hangneigung, die Distanz zum Vorfluter sowie das Anfangsvolumen der Rutschung mit ein. Da das Ergebnis eher auf die Frage abzielt, wie viel Prozent der ursprünglichen Rutschmasse den Vorfluter erreicht, ist das Modell lediglich bedingt zur Reichweitenanalyse geeignet (auch BATHURST ET AL., 1997). Den von HEIM (1932) eingeführten Begriff der Fahrböschung, den er verwendet, um Bergstürze zu klassifizieren, nimmt SCHEIDEGGER (1975) auf und weist einen Zusammenhang zwischen

Volumen des Bergsturzes und dem Pauschalgefälle nach. Für Muren wird ein Trend in kristallinem Gestein aufgezeigt (VAW 1992). Nach den schweren Unwettern in der Schweiz 1987 wurde nach praktischen Ansätzen gesucht, um das Gefährdungspotenzial von Talmuren in Gefahrenhinweiskarten großflächig darstellen zu können. HEINIMANN ET AL. (1998) beschreiben dafür den Einsatz des Pauschalgefälles. Dabei wird allerdings die Größe des lokalen Einzugsgebiets zusammen mit dem Gefälle für die Berechnung der Reichweite herangezogen. Dabei gilt die Größe des Einzugsgebiets als Ersatzgröße für die zu erwartende Abflussmenge. Da aber bei dieser Methode starke Gefällwechsel keine Berücksichtigung finden, ist sie eher für eine grobe Einschätzung geeignet.

Die Reichweite von Hangmuren, die aus Rutschungen entstehen, berechnen MARK & ELLEN (1995) auf Basis von einem Modell von CANNON (1993). Abhängig von Neigung und hydraulischem Radius wird das ursprünglich zur Verfügung stehende Material entlang des Prozessweges abgelagert. Der Murgang bleibt stehen, wenn das gesamte Material verbraucht ist. BENDA & CUNDY (1990) berechnen Reichweite und Volumen von Talmuren aus *zero order basins*. Der Murgang stoppt in dem Modell, wenn die Neigung im Gerinnes unter  $3,5^\circ$  fällt oder ein Vorfluter in einem Winkel größer  $70^\circ$  erreicht wird. Das Volumen wird dabei abgeschätzt. In allen Gerinneabschnitten über  $10^\circ$  Neigung wird eine Erosionsrate von  $8 \text{ m}^3/\text{m}$  postuliert.

Numerische Modelle, welche die Murgangswelle simulieren, gehen von einem rein hydraulischen Prozess aus und werden eingesetzt, um tatsächlich abgelaufene Murgänge (Talmuren) nachzurechnen. Dabei wird bei den meisten Modellen der Geschiebetransport nicht berücksichtigt. Die Erhebung der benötigten Parameter wie Gerinnegeometrie oder Materialeigenschaften ist sehr aufwendig. Die Schwierigkeit die Rheologie zu fassen beschreiben IVERSON ET AL. (2000, S. 522): „[...] realistic, unsteady debris flows composed of poorly sorted sediment do not have fixed rheologies.“ Außerdem unterscheidet sich das Fließverhalten von Muren je nach Feststoffanteil in geringem Maße. COSTA (1984) stellt fest, dass der Tongehalt in Muren die Entwässerung und somit den Porenwasserdruck beeinflusst. Dadurch führe ein höherer Tongehalt zu einer größeren Reichweite. GAMMA (2000) weist darauf hin, dass mit der Größe des Einzugsgebiets auch die Abflussmenge steigt und sich so eine gewisse Verdünnung der Mure ergibt (ZIMMERMANN, 1991). Dadurch verlängert sich der Fließweg des Murgangs. Bei den meisten Modellen bleiben der Geschiebetransport und das Anwachsen der Murfront unberücksichtigt (RICKENMANN 1991). Viele dieser Modelle wurden auf größere Lahars (TAKAHASHI ET AL. 1987) oder Dammbüche (SCARLATOS & SINGH 1986) angewendet. Bei alpinen Murgängen allerdings, die sich meist in steilen Gerinnen ereignen, ist über die Randbedingungen des Fließverhaltens nicht genug bekannt, um diese Modelle anzuwenden. Ferner kann z. B. das Anhalten der Talmuren bei einem Gefälle größer als null Grad nicht simuliert werden. Zur Simulation sowohl von Reinwasserabflüsse als auch von Muren kann das zweidimensionale Modell FLO-2D (O'BRIEN ET AL. 1993) benutzt werden. Die meisten Modelle benötigen als Grundlage eine große Anzahl Parameter wie genaue Gerinnegeometrie, Korngrößenverteilung, Konzentration u. Ä. Um die Murgefahr für ein größeres Gebiet (ein ganzes Tal bis zu einem Gebirge) darzustellen, sind diese Modelle damit nicht geeignet. Der Aufwand und die Kosten der Parametererhebung sind für größere Gebiete einfach zu hoch.

Ein Zwei-Parameter-Modell wurde von VOELLMY (1955) entwickelt und von SALM (1966) verfeinert. Mit dem Modell können die Auslaufdistancen von Lawinen berechnet werden. Dabei wird die Fließbewegung durch zwei Reibungsparameter charakterisiert. KÖRNER (1980) entwickelt auf dieser Grundlage ein Zwei-Parameter-Modell, das auch PERLA, CHENG & MCCHUNG (1980) benutzen. Dabei wird die Lawine als idealisierter Massepunkt gesehen, dessen Geschwindigkeitsentwicklung sich entlang einer Bahn berechnen lässt, die in Segmente gleicher Neigung unterteilt ist. PERLA ET AL. (1980) nehmen an, dass die Bewegung hauptsächlich durch den *Gleitreibungskoeffizienten*  $\mu$  sowie das Verhältnis *Masse zu Hemmung* ( $M/D$ ) gesteuert wird. RICKENMANN & KOCH (1997) und KOCH (1998) vergleichen verschiedene Ansätze und stellen dabei fest, dass sich die gemessenen Geschwindigkeiten von Talmuren gut mit dem Zwei-Parameter-Modell nach PERLA ET AL. (1980) darstellen lassen. Ein weiterer Vorteil des Modells besteht darin, dass es den Prozess auch bei Gefällen größer als null anhalten lassen kann. Die Anwendung beschreibt RICKENMANN (1990, 1991). GAMMA (2000) und ZIMMERMANN ET AL. (1997) verbessern das Modell mit einem random walk, um Ausbreitung und Reichweite zu berechnen. In das *dfwalk*-Modell, das auf der Basis des Zwei-Parameter-Modells entsteht, baut GAMMA (2000) außerdem einen Ansatz ein, der es ermöglicht, eine Blockade des Gerinnes durch eine Talmure zu simulieren. Dadurch kann auch das Ausbrechen des neuen Murschubs aus der Tiefenlinie modelliert werden. WICHMANN ET AL. (2002) verwenden diesen Ansatz, auch um Hangmuren zu simulieren. 2006 veröffentlicht WICHMANN eine Weiterentwicklung des von HEINIMANN ET AL. (1998) vorgestellten Modells (siehe Kap. 5). Mit diesem Modell können potenzielle Anrissgebiete sowohl von Tal- als auch von Hangmuren ausgewiesen werden. In einem zweiten Schritt werden Reichweite und Prozessbereich sowie Erosions- und Akkumulationsgebiete modelliert. Das Modell ergibt in den zwei Untersuchungsgebieten in den Bayerischen Kalkalpen eine gute Übereinstimmung von modelliertem Prozess und tatsächlichem Murgang. Dabei wurde das Modell an einem Teil der in den Gebieten gefundenen Talmuren geeicht und an einem anderen Teil überprüft. Damit stellt sich die Frage, ob das Modell auch in anderen Gebieten zu vergleichbar guten Ergebnissen kommt.

### 3 Fragestellung und methodisches Vorgehen

#### 3.1 Fragestellung

Im Jahr 2006 präsentiert Wichmann im Rahmen des SEDAG-Projekts (HECKMANN ET AL., 2002; WICHMANN ET AL., 2009) ein Modell, mit dem sowohl für Sturzprozesse als auch für Hang- und Talmuren Anrisse, Prozessbereiche und Reichweiten simuliert werden können. Als Grundlage dient das von HEINIMANN ET AL. (1998) veröffentlichte Modell, welches er modifiziert und für das Open-source-GIS-Programm SAGA anwendbar macht. Dabei kann das Modell nicht nur zwischen Hang- und Talmuren (vgl. ZIMMERMANN ET AL. 1997) unterscheiden, es werden auch in jeweils einzeln nachvollziehbaren Schritten sowohl die Anrisspunkte, Reichweite und Ausbreitung als auch Erosions- und Akkumulationsgebiete modelliert. WICHMANN (2006) eicht das Modell an Muren in zwei Untersuchungsgebieten im Raum Garmisch-Partenkirchen/Oberbayern.

Als Grundlage der Modellierung dient ein Höhenmodell auf der Basis eines Fünf-Meter-Grids. Daraus wird das Gerinnenetz abgeleitet. Zur Berechnung des Gerinnenetzes werden lediglich die lokale Einzugsgebietsgröße und die Horizontalwölbung benötigt, die beide aus dem Höhenmodell abgeleitet werden können.

Um den Prozessraum eines Murgangs darzustellen, ist das Modell in zwei Teilmodelle aufgeteilt. Im ersten Teil des Modells werden die möglichen Startpunkte von Talmuren berechnet (DF DispoChannel). Dabei werden als Eingangsdaten ebenfalls nur Parameter verwendet, die aus dem Höhenmodell abzuleiten sind. Die berechneten Startpunkte werden als Input für den

zweiten Teil des Modells verwendet. Dieser weist den möglichen Prozessbereich (DF HazardZonation) aus, d. h. den Bereich, der bei einem möglichen Murgang betroffen sein könnte. Auch hier werden die Input-Parameter weitgehend aus dem Geländemodell abgeleitet. Zur Gewichtung einzelner Teilflächen wird zusätzlich noch die Vegetation mit in die Berechnung mit einbezogen. Diese wird in lediglich zwei Klassen eingeteilt (vegetationsbedeckt/vegetationsfrei) und lässt sich gut den aktuellen Luftbildern entnehmen.

Als Ergebnis wurden sowohl die Prozessbereiche der von Wichmann (2006) aufgenommenen Hang- und Talmuren als auch deren Erosions- und Akkumulationsgebiete gut abgebildet. Durch die Ausweisung potenziell gefährlicher Bereiche sowie der leicht zu erhebenden Eingangsparmeter ließe sich das Modell zur Ausweisung von Gefahrenzonen nutzen. Das Modell bringt in den untersuchten Gebieten gute Ergebnisse. Außerhalb der Untersuchungsgebiete wurde es bisher nicht getestet, sodass die Frage der Übertragbarkeit geklärt werden muss. Dabei soll das Modell auch in Gebieten unterschiedlicher naturräumlicher Ausstattung getestet werden. Mögliche Unterschiede der Ausstattung zu den von Wichmann (2006) untersuchten Gebieten können u. a. bei Neigung, Gestein, Niederschlag, Vegetationsbedeckung und Höhenverteilung gefunden werden. Wichmann (2006) verwendet bei seiner Modellierung ein Fünf-Meter-Raster, das er aus unregelmäßigen Höhendaten ableitet. Anschließend wurde das entstandene Höhenmodell auf Fehler (z. B. Senken) hin überprüft. Somit stellt sich die zweite zu klärende Frage, ob das Modell mit einem gröberen, aber dafür bei den Vermessungsämtern verfügbaren 25-Meter-Raster ähnlich gute Ergebnisse bringt. Ist dies nicht der Fall, können die verschiedenen Einstellungen des Modells überprüft und gegebenenfalls auf das gröbere Raster angepasst werden. Die dritte Frage, die es zu klären gilt, lautet, ob es möglich ist, das anstehende Gestein mit in die Modellierung einzubeziehen. Schon des Öfteren wurde versucht, Frequenz, Magnitude und/oder Reichweite mit dem anstehenden Gestein zu korrelieren (siehe Kap. 2), es ist aber bis jetzt nicht befriedigend gelungen. Ein Versuch bietet sich im Rahmen der vorliegenden Abhandlung an und wurde durchgeführt.

## **3.2 *Methodisches Vorgehen***

### **3.2.1 Kartierung**

Um das Simulationsmodell zu validieren, werden in den Bayrischen und Österreichischen Alpen möglichst frische Ablagerungen von Talmuren aufgenommen werden, um deren Lage mit den Modellierungen zu vergleichen.

Die Alpen sind im untersuchten Bereich von einem dichten Netz an Forst- und Almwegen durchzogen. Dies birgt den Vorteil, dass man über die Mitarbeiter der Forstämter, der Wasserwirtschaft oder von lokalen Waldbesitzern zahlreiche Informationen über murfähige Bäche und deren Aktivitäten erhält. Im Falle eines Murgangs kann das betroffene Gebiet relativ rasch erreicht und die Talmure gut kartiert werden. Dieser Vorteil kann sich aber auch in einen Nachteil verkehren.

Bei fast jedem Murgang werden ebenfalls Brücken und Wege zerstört oder durch Ablagerungen unpassierbar. Aufgrund dieser Zerstörung kann sich eine Gefährdung für Touristen und Einheimische ergeben (vgl. Abb. 3.1); höher gelegene Gebiete oder Almen sind nach einem Murgang häufig nicht mehr erreichbar. Die verursachten Schäden werden deshalb von den zuständigen Stellen möglichst schnell und häufig ohne entsprechende Dokumentation beseitigt.

Die abtransportierte Materialmenge kann zwar in einigen Fällen bei Fuhrunternehmern nachgefragt werden, Material jedoch, das zur Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands des Bachbetts, der Geländeoberfläche o. Ä. bzw. zum Aufbau eines neuen Damms benötigt wird, wird dabei meist nicht erfasst. Die genaue Lage der Murköpfe, die für den Vergleich mit den Modellierungsergebnissen wichtig ist, ist nach den Aufräumarbeiten kaum noch zu rekonstru-

ieren. Damit wandelt sich der Vorteil der guten Erreichbarkeit und des guten Informationsflusses über Murreignisse zeitweise zu einem Nachteil.



Abb. 3.1: Zerstörter Forstweg nach einem Unwetter mit intensiver Murtätigkeit im Einzugsgebiet des Schwarzenbach/Obb.

Wurden in einem Gebiet Massenbewegungen gefunden oder von einem zuständigen Forstamt gemeldet, wurden die entsprechenden Stellen vom Autor aufgesucht und überprüft. Geschiebeablagerungen, die aufgrund der Oberfläche und Struktur eindeutig als stumme Zeugen (AULITZKY, 1992) für Murablagerungen erkannt werden konnten, wurden kartiert. Neben den bereits häufig beschriebenen Leveés wurde vor allem auf eine unruhige Kegeloberfläche, die Form der Ablagerung (Loben) sowie die Größe der transportierten Steine (vgl. Abb. 3.2 und 3.3) geachtet. Zu diesem Zweck wurde die Ablagerung vermessen und auf ein laminiertes Orthofoto eingetragen. Neben der Aufnahme und Kartierung der Lage sowie der Ausmaße der Ablagerungen wurden diese in Bereiche gleicher Dicke eingeteilt. Multipliziert mit der kartierten Fläche ergibt sich so das ungefähre Volumen des Murgangs. Die Geländekartierung wurde dann in einem geografischen Informationssystem digitalisiert. Aufgenommen wurden sowohl ältere als auch aktuelle Ereignisse.

Immer wieder werden durch die Aufräumarbeiten und die Sicherung der Infrastruktur Formen geschaffen, die denen eines Murgangs ähneln. Auch Bagger hinterlassen unruhige Oberflächen, als Schutz vor weiteren Hochwässern werden oft Wälle aufgeschüttet, die Leveés recht ähnlich sehen können und große Blöcke können auch als Uferbefestigung angeliefert werden. Durch das vom Hochwasser transportierte Wildholz werden Blöcke aus der Uferböschung herausgerissen und können dann als durch Muren transportiertes Material missinterpretiert werden. Trotz der geschilderten Schwierigkeiten sind Murablagerungen mit etwas Erfahrung meist eindeutig zu identifizieren. Neben den bereits erwähnten unruhigen Oberflächen abseits des Bachbetts oder auf einem Kegel finden sich häufig auch Schäden an den Bäumen in diesen Bereichen (Abb. 3.5). Leveés sind bei Talmuren zwar bei Weitem nicht so deutlich ausgeprägt wie bei Hangmuren, aber im Auslaufbereich trotzdem meist zu finden (Abb. 3.4). Eine Unterscheidung der Ablagerungen von Murgängen im Vergleich zu anderen Prozessen ist somit in den meisten Fällen eindeutig.



Abb. 3.2: Junger Laubwald vor alten Nadelbäumen auf einem Murkegel mit unruhiger Oberfläche



Abb. 3.3: Transportierter Felsen als stumme Zeugen

Auch bei der Kartierung von Talmuren, deren Ablagerungen noch nicht anthropogen verändert wurden (vgl. oben), muss bei der Volumenbestimmung mit Schwierigkeiten gerechnet werden. Um einen Murgang in einem Wildbach auszulösen, wird viel Wasser benötigt, das meist durch ein entsprechendes Gewitter bereitgestellt wird. Die Wasserzufuhr in Wildbächen endet jedoch nicht mit dem Anriss der Talmure, sodass das nachfolgende Hochwasser das Gerinne auch nach dem Murereignis weiter formt. Dabei werden die an sich recht eindeutigen Murablagerungen umgelagert oder erodiert. Die Umlagerung der Murablagerung verstärkt sich im Laufe der Zeit durch weitere Hochwasserereignisse. Damit können insbesondere ältere, aber auch frische Ereignisse oftmals nur mit größeren Ungenauigkeiten kartiert werden können. Um dennoch das ungefähre Volumen einer Talmure abzuschätzen, bietet sich die Möglichkeit an, die alte Geländeoberfläche zu rekonstruieren. Dazu muss diese aber bereits vor dem Murgang bekannt sein oder anhand von Geländeaufnahmen einigermaßen sicher nachvollziehbar sein. Da die Geländeoberfläche im Gebirge aber meist stark reliefiert ist, ist das nicht immer möglich. Ist die Umlagerung im Bachbett und an den angrenzenden Hängen durch den Murgang zu groß, kommt man schnell in den Bereich der Spekulation (Abb. 3.6). Eine Volumenbestimmung von Talmuren muss demzufolge in den meisten Fällen eher eine grobe Schätzung, denn eine exakte Messung bleiben.

Sind in einem Gebiet Murkegel am Ausgang eines Tals zu finden, werden diese ebenfalls aufgenommen. Reine Murkegel sind dabei eher die Ausnahme. Meist handelt es sich um Mischformen zwischen Schwemm- und Murkegel. Kegel geben aber zumindest einen Hinweis auf ein wahrscheinliches bzw. – mit dem Kegelende – auf ein sehr großes Ereignis (vgl. GAMMA 2000). Dabei ist aber nicht auszuschließen, dass ein sehr großes Murereignis auch deutlich über die Basis des Kegels hinauslaufen kann und vom Vorfluter abtransportiert wird. Dieses ist mindestens im Bereich des Waxriesgrabens der Fall. Hier endet der Ablagerungsbereich großer Murgänge mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit im Bereich des Saalachsees. Im Buchersulzgraben (Söllbachgebiet) kann dies anhand der Geländeuntersuchungen zumindest vermutet werden (vgl. Kap.4).



Abb. 3.4: Levées im Rumer Langenbach



Abb. 3.5: Durch Murgang gespaltener Baum

Aus der Zusammenschau von Gelände, Luftbildern und digitalem Geländemodell kann so meist die vermutete maximale Ausdehnung des Ablagerungsbereichs bestimmt werden.

Neben den Murköpfen wurde auch das Bachbett selbst kartiert. Dabei wurde hauptsächlich zwischen Erosions- und Akkumulationsbereichen unterschieden.

Ablagerungen von Talmuren zu kartieren, ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden und erfordert einen hohen Aufwand, ist mit etwas Erfahrung jedoch zu bewerkstelligen und bringt meist gute Ergebnisse. Anders ist es bei dem Versuch, Anrissgebiete der Talmuren zu kartieren. Diese sind, im Gegensatz zu Hangmuren nicht eindeutig zu identifizieren (vgl. WICH-

MANN 2006). Jedes Hochwasser hinterlässt eine Vielzahl von Anrissen im Bachbett. Der Geschiebeherd im oder am Bachbett – Rutschungen, Hanganrisse, Bettverflüssigung, o. Ä., der ursächlich Auslöser für die Talmure war, wäre vielleicht durch eine genaue Geländeaufnahme **vor** dem Ereignis festzustellen. Diese gibt es aber im Normalfall nicht. So sind die Kartierungen der vermuteten Anrisse stets mit einem hohen Maß an Unsicherheitsfaktor behaftet.



Abb. 3.6: Völlig zerstörtes Gerinne nach einem Murgang mit altem Bachbett (schwarze Linie)

### 3.2.2 Die Auswahlkriterien

Entscheidend für die Auswahl war, dass die Murablagerungen noch einigermaßen unverfälscht zu kartieren waren, so dass Reichweite und die Menge des transportierten Materials noch zu bestimmen waren. Dabei sollten die Gebiete die unterschiedlichen naturräumlichen Bedingungen des Alpenraums weitestgehend widerspiegeln. Sowohl durch die Ost-West-Verteilung der Gebiete als auch durch die Auswahl von Gebieten sowohl auf der Nordseite der nördlichen Kalkalpen als auch auf deren Südseite (Inntal) ist eine deutliche Variabilität im Jahresniederschlag gegeben. Durch die Verteilung der Gebiete über fast den gesamten bayerischen Alpenraum unterscheiden sie sich auch deutlich im anstehenden Gestein, sodass ein guter geologischer Querschnitt durch die Bayerischen Alpen gegeben ist. Die unterschiedliche Höhenlage der Gebiete mit maximalen Höhen zwischen rund 2500 m ü. d. M. und 1200 m ü. d. M. bedingt einen großen Ausschnitt aus der alpinen Vegetation. Weitere wichtige Auswahlkriterien waren die Erreichbarkeit der Gebiete sowie weitere zur Verfügung stehende sonstige Informationen über die Untersuchungsgebiete.

### 3.2.3 Datenaufbereitung

Die Grundlage der angesprochenen Modellierung bildet das aus den Höhendaten erstellte Geländemodell. Fast alle benötigten Parameter des Modells leiten sich aus diesem digitalen Höhenmodell ab. WICHMANN (2006) dienen als Grundlage seiner Arbeit die vom Vermessungsamt zur Verfügung gestellten räumlich unregelmäßig verteilten Rohdaten. Diese wandelt er in ein regelmäßiges Raster mit Fünf-Meter-Abstand um und eliminiert alle vorhandenen Fehler (Senken u. Ä.).

Die Daten des Bayerischen Landesvermessungsamts bzw. des Österreichischen Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen liegen für den jeweiligen nationalen Alpenraum standardmäßig in einem 25-Meter-Raster vor. Werden diese Daten verwendet, sind die Modellierungsgrundlage und damit das digitale Geländemodell (DGM) zwar deutlich ungenauer als bei WICHMANN (2006); die Verwendung der vorliegenden Daten hat indes den Vorteil, dass diese für den gesamten Alpenraum vorhanden sind. Ein weiteres Bearbeiten der Höhendaten und die Umwandlung unregelmäßiger Punkt- in regelmäßige Rasterdaten entfällt. Da die Daten der Vermessungsämter auch direkt in das verwendete GIS-Programm SAGA eingelesen werden können, wird als Grundlage für die Erstellung des Höhenmodells das 25-Meter-Raster verwendet.

WICHMANN ET. AL. (2008) zeigen, dass Gefahrenbereiche mit genaueren Geländedaten auch präziser ausgewiesen werden können. Erst ab einem Rastern von weniger als 5 m nimmt die Ungenauigkeit wieder zu. Werden die Murablagerungen mit dem verwendeten 25-Meter-Raster gut abgebildet, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auch mit einem genaueren Geländemodell mit der Realität übereinstimmen.

Die zu erwartende zukünftige Verbesserung der digitalen Datengrundlage in den jeweiligen Vermessungsämtern (z. B. durch die Laserscanbefliegungen) und die damit zunehmend bessere Verfügbarkeit höher aufgelöster Daten dürften die Ergebnisse der Modellierung eher verbessern und die Ausweisung von Gefahrenbereichen präzisieren (WICHMANN ET. AL. 2008).

Auch wenn die Verwendung eines 25-Meter-Rasters in den eher kleinteilig strukturierten Alpen recht ungenau erscheint, wurden bereits andere Untersuchungen mit ähnlicher Datengrundlage durchgeführt. Vor dem Problem der zu geringen Auflösung der Grundlagendaten stehen z. B. auch BERTOLO & WIECZOREK (2005, S.993) bei ihrem Vergleich von zwei Simulationsmodellen: „We used the 30m cell size DTM available for the study area, that is probably not accurate enough for a highly detailed analysis, but it can be sufficient for a first screening.“ Trotz des 30-Meter-Rasters bilden beide Modelle [DAN by HUNGR (1995) und FLO-2D] die untersuchten Muren gut ab. Als ein Ergebnis schreiben sie: „The 30m DTM can nevertheless be sufficient for a first screening and a reasonable reproduction and prediction of events.“

Um auszuschließen, dass sich im Geländemodell durch Ungenauigkeiten im verwendeten Datensatz abflusslose Senken befinden, die im Gelände so nicht vorhanden sind und welche die zu berechnenden Fließwege stören, muss das Geländemodell in SAGA noch mit dem Befehl „fill sink“ bearbeitet werden. Dadurch werden die Senken in den berechneten Bachläufen eliminiert und die Bäche erhalten ein durchgehendes Gefälle. Auf dem so vorprozessierten DGM kann das verwendete Murmodell (WICHMANN, 2006) zur Anwendung kommen.

### **Die Berechnung des Gerinnenetzes**

Auf Grundlage des vorprozessierten DGMs muss in einem zweiten Schritt das Gerinnenetz abgeleitet werden. Die Berechnung desselben wird mit dem SAGA-Modul „*Channel Network*“ (CONRAD 2001) durchgeführt. Um zu verhindern, dass das Modul bei jeder noch so kurzen Senke einen Bach modelliert, kann in diesem Modul angegeben werden, welche minimalen Voraussetzungen es geben muss, bevor ein Gerinne modelliert wird. Dazu kann sowohl die minimale Größe des zu berechnenden Einzugsgebiets als auch die minimale Länge des abzubildenden Gerinnes festgelegt werden.

WICHMANN (2006) berechnet das Gerinnenetz in mehreren Schritten. Den ersten bildet die Ausweisung der Einzugsgebiete mit einer minimalen Größe von 10 000 m<sup>2</sup>; die minimale Länge des Gerinnes wird auf 50 m festgesetzt. Der daraus entstehende Datensatz kann aber laut WICHMANN (2006) noch Gerinne ausweisen, die z. B. durch Verkarstung keinen oder nur wenig Abfluss haben. Diese könnte bei der weiteren Modellierung zu Fehlern führen. Um diese Rinnen zu eliminieren, wird der errechnete Gerinnetatsatz mit der Horizontalwölbung (ebenfalls aus dem Höhenmodell abgeleitet) verschnitten. Dabei werden alle Bäche erster Ordnung, die sich nicht in den Hang eingeschnitten haben, gelöscht.

Diese Vorgaben von WICHMANN (2006) werden in dieser Abhandlung überprüft werden. Je nachdem welche Werte für die minimale Größe bzw. Länge gewählt werden, weicht das modellierte Gerinnenetz mehr oder weniger deutlich vom realen ab. Werden dabei in der Realität zusammenhängende Einzugsgebiete in der Modellierung geteilt, kann es zu deutlichen Auswirkungen kommen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die gröbere Auflösung der Geländemodelle zu legen, welche die Unebenheiten des Geländes glättet und das Geländemodell deutlich generalisiert.

### **Modelleinstellungen**

Um ein möglichst wirklichkeitsnahes Abbild der realen Muren in den Untersuchungsgebieten zu erhalten, wurden von WICHMANN (2006) verschiedene Einstellungen des Modells untersucht. Dabei werden sowohl bei der Modellierung der Startpunkte als auch bei den Prozessgebieten Einstellungen und Werte verwendet, die auf Angaben in der Literatur beruhen. Die veröffentlichten Werte liegen zwar alle innerhalb eines gewissen Wertebereichs, es kann jedoch kein definitiv richtiger Wert für alle untersuchten Murgänge gefunden werden. Um die Übertragbarkeit des Modells in andere Gebirgsräume zu gewährleisten, werden die verwendeten Werte überprüft. Dessen ungeachtet wird der Frage nachgegangen, ob sich mit anderen Werten oder Wertekombinationen bessere Ergebnisse für alle oder einzelne Gebiete erzielen lassen. Um dabei eine etwas vergrößerte Datenbasis zu erhalten, werden bei bestimmten Fragen auch Daten aus der Literatur verwendet.

Talmuren werden ausgelöst, wenn ein ausreichend hoher Abfluss auf genügend mobilisierbares Material trifft. Der Abfluss wird von den Niederschlägen sowie den Bedingungen im Einzugsgebiet gesteuert. Die Größe der Einzugsgebiete wird aus dem Höhenmodell abgeleitet und geht als Äquivalent für den Abfluss in das Modell ein. Somit können die Bedingungen im Einzugsgebiet in dieser Modellierung nicht beeinflusst werden. Anders verhält sich dies bei der Menge des verfügbaren Sediments. WICHMANN (2006) nimmt als Maß hierfür die sogenannte Sediment spendende Fläche, also die Fläche des Einzugsgebiets, die potenziell Sediment in das Gerinne liefert und für eine Talmure bereitstellt.

Erst wenn diese Fläche groß genug ist, geht er davon aus, dass ausreichend Material für eine Talmure zur Verfügung steht (siehe Kap. 5). Selbst kleine Flächen unterscheiden sich – in Bezug auf ihre naturräumliche Ausstattung – in den Alpen stark voneinander. Damit ist ihre Fähigkeit, Sediment zu liefern, ebenfalls unterschiedlich. Um die unterschiedlichen Eigenschaften der Flächen darstellen zu können, können die einzelnen Pixel im Modell verschieden gewichtet werden und erhalten auf diese Weise eine unterschiedliche „Fähigkeit“, Sediment zu spenden. Im weiteren Verlauf der Arbeit muss überprüft werden, ob die von WICHMANN (2006) gewählten Einflussfaktoren auf die Sedimentspendefähigkeit ausreichen oder ob weitere hinzukommen müssen. Außerdem muss überprüft werden, ob die gewählte Gewichtung auch in den neuen Untersuchungsgebieten zu guten Ergebnissen führt.

## 4 Die Untersuchungsgebiete

Im Bereich der nördlichen Kalkalpen wurden vom Autor Einzugsgebiete gesucht, in denen im Laufe des vergangenen Jahres Talmuren abgegangen waren. Entscheidend für die Auswahl war, dass die Murablagerungen noch einigermaßen unverfälscht zu kartieren waren, so dass Reichweite und die Menge des transportierten Materials noch zu bestimmen waren. Dabei sollten die Gebiete die unterschiedlichen naturräumlichen Bedingungen des Alpenraums weitestgehend widerspiegeln. Sowohl durch die Ost-West-Verteilung der Gebiete als auch durch die Auswahl von Gebieten sowohl auf der Nordseite der nördlichen Kalkalpen als auch auf deren Südseite (Inntal) ist eine deutliche Variabilität im Jahresniederschlag gegeben. Durch die Verteilung der Gebiete über fast den gesamten bayerischen Alpenraum unterscheiden sie sich auch deutlich im anstehenden Gestein, sodass ein guter geologischer Querschnitt durch die Bayerischen Alpen gegeben ist. Die unterschiedliche Höhenlage der Gebiete mit maximalen Höhen zwischen rund 2500 m ü. d. M. und 1200 m ü. d. M. bedingt einen großen Ausschnitt aus der alpinen Vegetation. Weitere wichtige Auswahlkriterien waren die Erreichbarkeit der Gebiete sowie weitere zur Verfügung stehende sonstige Informationen über die Untersuchungsgebiete. Um die angesprochenen Kriterien zu erfüllen, wurde in den Bayerischen und Österreichischen Alpen nach möglichst frischen Abgängen von Talmuren gesucht.

Abb. 4.1 zeigt eine Übersicht über die Untersuchungsgebiete.

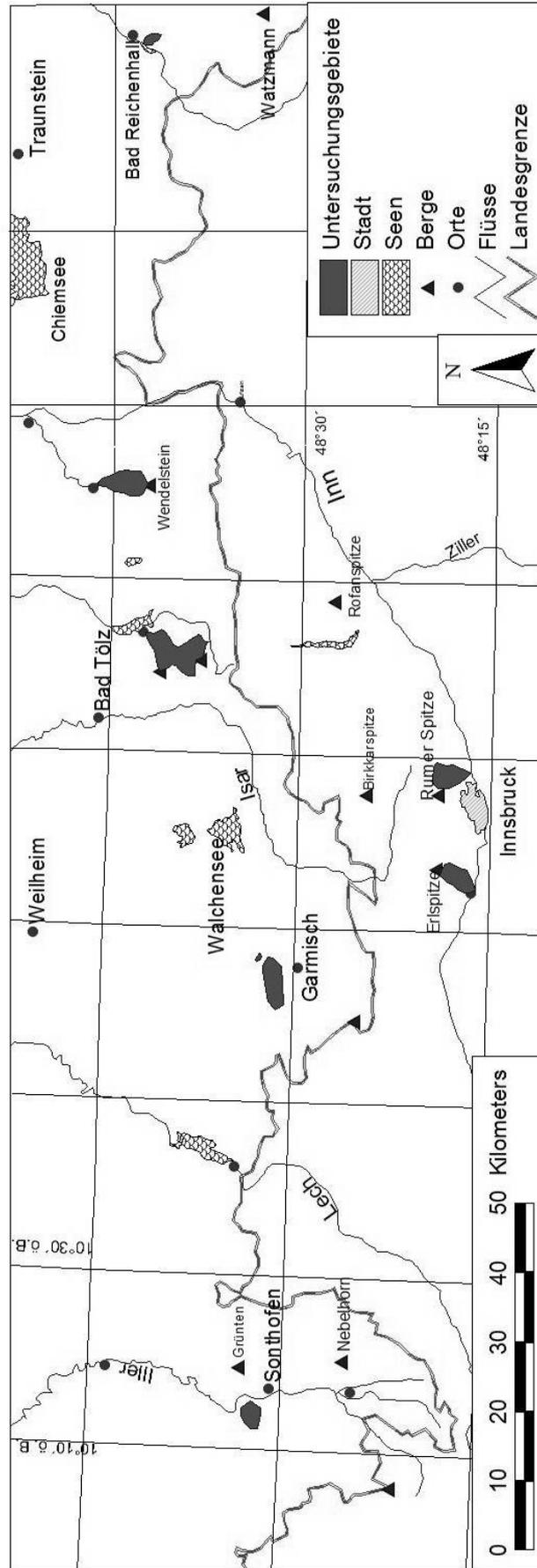


Abb. 4.1: Übersicht über die Untersuchungsgebiete

## **4.1 Allgemeines**

### **4.1.1 Klima**

Bei praktisch allen Forschungsprojekten im Alpenraum erweist sich grundsätzlich als problematisch, dass keine Klimastationen in den untersuchten Gebieten selbst und damit keine exakten Klimadaten existieren. Die angegebenen langjährigen Daten für Temperatur und Niederschlag sind Daten von umliegenden Stationen. Die Temperaturdaten lassen sich meist noch gut interpolieren, da die Messstationen indes meist in Exposition und Höhenlage nicht mit den Untersuchungsgebieten übereinstimmen, sind die angegebenen Niederschlagswerte nur als Näherung zu verstehen. Starkniederschläge (Gewitter), die vor allem im Sommer einen großen Teil der Niederschläge bringen (BAUMGARTNER ET. AL. 1983), sind lokal sehr begrenzt, so dass diese durch die Klimastationen in Nachbartälern häufig nicht erfasst werden. Eine Interpolation ist bei Gewittern daher kaum möglich. Aufgrund der lokalen Begrenzung der Gewitter ist noch nicht einmal sichergestellt, dass Messstationen im Einzugsgebiet selbst den Niederschlag richtig aufzeichnen, wenn sich das Gewitter in einem anderen Teil des Einzugsgebiets entlädt.

### **4.1.2 Böden**

Die im Postglazial entstandenen Böden der Nördlichen Alpen unterscheiden sich je nach Ausgangsgestein, Klima, Relief und Vegetation. Aufgrund des Ausgangssubstrats dominieren in den Nördlichen Kalkalpen Rendzina–Terra fusca- sowie Pararendzina-Parabraunerde- bzw. Ranker-Braunerde-Gesellschaften und Skelettböden (EWALD 1997).

Im Hochgebirge sind die für die Bodenbildung entscheidenden Einflussfaktoren kleinräumig sehr unterschiedlich. Dementsprechend gleichen die anzutreffenden Bodentypen eher einem Mosaik denn einer Fläche. Es lässt sich ohne explizite Untersuchungen kaum eine Aussage treffen, wie die Verteilung der Bodentypen in den untersuchten Gebieten aussieht.

„Bei der Ansprache und Kartierung von Böden ergeben sich Probleme nicht nur durch häufige Typenübergänge, sondern auch durch die Höhe vertikale und laterale Substratvariabilität: Schichtung unterschiedlicher Ausgangsgesteine (infolge Rutschung, Überrollung oder periglazialen Bodenfließens) sind eher die Regel als die Ausnahme, was das Nachvollziehen pedogener Prozesse und folglich das Ausscheiden von Bodentypen kompliziert. [...] Gleichmaßen typisch ist der kleinräumige Wechsel von Bodenmerkmalen in horizontaler Richtung [...]. So werden nicht selten in einer vegetationskundlichen Aufnahme­fläche von 100 m<sup>2</sup> so unterschiedliche Bodentypen wie Terra fusca, Terra fusca-Rendzina, typische Rendzina und Skeletthumusböden mit Moderauflage nebeneinander angetroffen.“ (EWALD 1997; vgl. auch HECKMANN 2006).

## **4.2 Altmummen**

### **4.2.1 Geländebeschreibung**

Die Gemeinde Altmummen liegt südlich von Immenstadt im Allgäu. Der Ortskern wird durch den Schwandner Bach (zeitweise auch Altmummer Bach) geteilt (Abb. 4.2). Der Schwandner Bach entspringt am Mittagsberg auf ca. 1250 m ü. d. M., zieht sich an der nordöstlichen Flanke entlang und mündet nach ca. 2700 m Lauflänge auf 718 m ü. d. M. bei Altmummen in die Iller. Die höchste Erhebung ist der Mittagsberg mit 1451 m ü. d. M. Damit erstreckt sich das Gebiet über eine Höhendifferenz von 733 m bei einer Gesamtfläche von rund 1,1 km<sup>2</sup>.

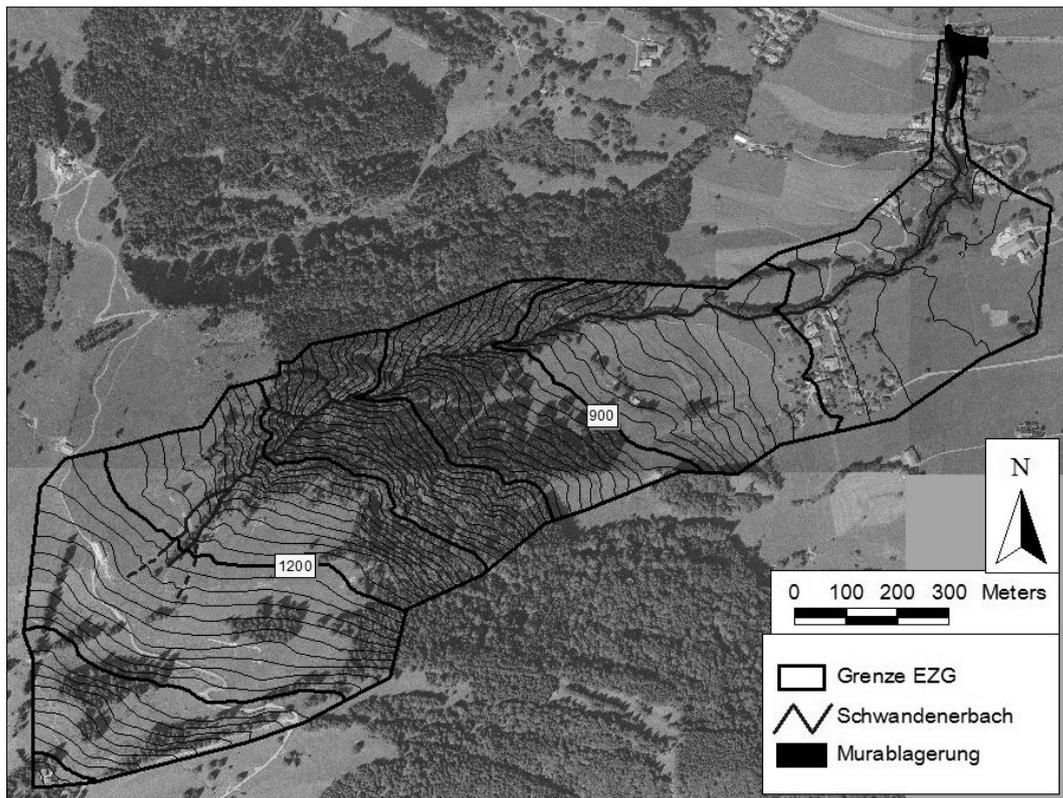


Abb. 4.2: Luftbild des Schwandner Bachs mit Murablagerung

Während der letzten Eiszeit war das Gebiet fast vollständig mit dem Eis des Illergletschers bedeckt, der sich bei Immenstadt zum Großteil nach Norden ausbreitete. Die Molasseberge im Westen blieben dabei allerdings eisfrei. Einzelne Zungen des Gletschers konnten aber von Osten her in das Hochgebiet eindringen, so zum Beispiel in das Konstanzer Tal, das nur wenig nördlich des Untersuchungsgebiets ins Illertal mündet (vgl. SCHOLZ, 1995).

Bei Oberstaufen vereinigte es sich mit dem Weißbach-Lobus des Bergenger-Ach-Gletschers. Heute finden sich keine Gletscher mehr im Einzugsgebiet. Es stehen hauptsächlich Untere Süßwassermolasse, bestehend aus Mergel, Konglomeraten und Sandstein, an (vgl. Abb. 4.3). Überlagert wird diese an vielen Stellen von Muränenmaterial des Illergletschers, die der Schwandner Bach an mehreren Stellen durchquert und angeschnitten hat. Beim Schwandner Bach selbst handelt es sich um einen episodisch fließenden Bach, der im Winter bei Frost und im Sommer aufgrund des hohen Wasserverbrauchs der Vegetation häufig trocken fällt. Während länger dauernder Regenperioden oder bei Starkregenereignissen jedoch springt der Bach schnell an und führt Hochwasser. Hochwasserereignisse mit starker Geschiebeführung und Schäden an Bauwerken und landwirtschaftlichen Nutzflächen sind in einem Abstand von 10-20 Jahren dokumentiert (INFORMATIONSDIENST ALPINE NATURGEFAHREN 2010).

Wände oder ausgedehnte offene Schuttflächen sind im Einzugsgebiet nicht zu finden; vegetationsfreie Flächen finden sich lediglich an den erodierten Flanken entlang des Bachs. Allerdings werden auf der geologischen Karte größere Bereiche als Verwitterungsschutt angesprochen, die an der Oberfläche aufgrund des vollständigen Bewuchses nicht zu erkennen sind. Größere und kleinere Rutschungen sind über das gesamte Gebiet verteilt zu finden. Die größte findet sich am Südufer des Bachs bei ca. 1080 m ü. d. M. in den Mergeln und Sandsteinen der Unteren Süßwassermolasse. Der Anbruchbereich ist ca. 30 m breit. Die Länge der Rutschmasse vom Anbruch bis zum Bach beträgt etwa 70 m und stellt eine große Menge Geschiebe zur Verfügung. Rund 60 % des Gebiets sind Viehweiden und oder Mähwiesen. Das Gebiet hat ein durchschnittliches Gefälle von  $15^\circ$ , das größte Gefälle im Bachbett liegt jedoch bei

rund 52°. Neben knapp 5 % bebauter Fläche finden sich noch ca. 35 % Bergmischwald im Einzugsgebiet.

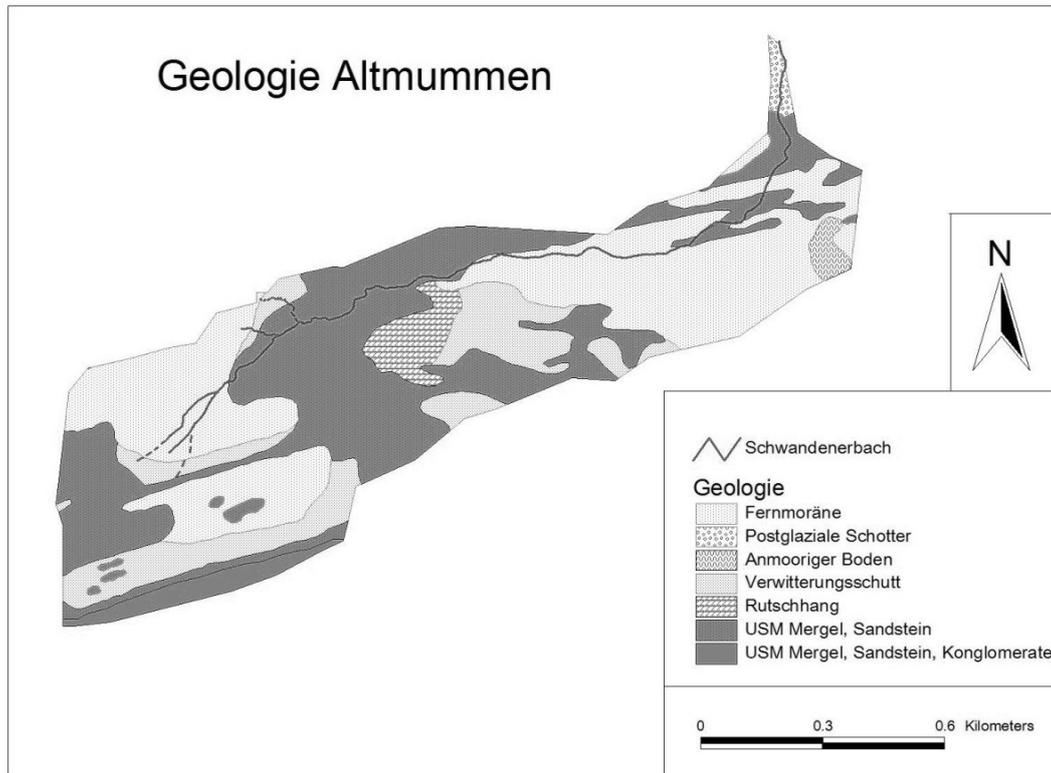


Abb. 4.3: Geologische Übersicht über den Bereich Altmummen

Das Klima des Gebiets ist typisches Bergklima mit überwiegend festen Niederschlägen in Form von Schnee im Winter und Regenniederschlägen im Sommer. Durch die hohe Anzahl von Gewittern im Sommer im Vergleich zum Winter ergibt sich ein deutliches Sommermaximum des Niederschlags. Eine mittlere jährliche Niederschlagssumme für das Gebiet ist aufgrund einer fehlenden Messstation nur ungefähr zu ermitteln. Für die umliegenden Stationen (Sonthofen, Immenstadt) werden durchschnittliche Gesamtniederschlagsmengen von ca. 1900 mm (KLIWA, 2003) bis 2250 mm/Jahr [Deutscher Wetterdienst, Station Immenstadt (Wärterhaus)] angegeben. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei ca. 6,5° C.

#### 4.2.2 Die Mure

Ein Starkregenereignis am 25.8.2002 führte zu größeren Zerstörungen im Bereich des Ortes Altmummen sowie zu Geschiebeablagerungen an der Kreisstraße, die im Norden das Einzugsgebiet begrenzt. Dabei wurde die Uferverbauung des Bachs massiv beschädigt und teilweise mitgerissen. Eine Ortsbegehung und die Aufnahme der Schäden sowie der Ablagerungen konnten erst am nächsten Tag durchgeführt werden. Die Aufräumarbeiten waren zu diesem Zeitpunkt bereits in vollem Gang. Im Auslauf des Bachs war indes ein deutlicher Levée zu finden (Abb. 4.6); hangaufwärts war das Bachbett massiv erodiert (Abb. 4.5). In einer Höhe von rund 1040 m ü. d. M. konnte ein möglicher Anriss der Talmuren kartiert werden (Abb. 4.4).

Die befragten Anwohner berichten von einem heftigen Gewitter, das sich gegen 20 Uhr ereignete. Der Pegel des Bachs sei daraufhin sehr schnell angestiegen, und eine Mischung aus Wasser, Geschiebe und Wildholz sei in einer Welle durch den Ort gelaufen. Zwar hielt das Hochwasser noch einige Zeit an, der Großteil der Zerstörung sei aber bei der ersten Welle passiert. Aufgrund der Ortsbegehung sowie der Berichte der Anwohner wurde die Ablagerung kartiert und der Altmummer Bach in die Untersuchungen mit einbezogen.

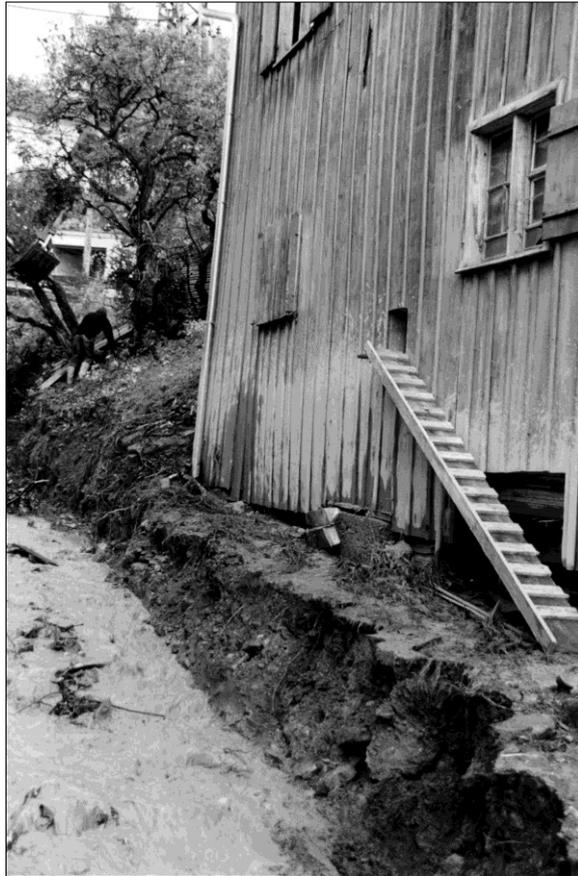


Abb. 4.4: Schäden am Bachbett



Abb. 4.5: Ablagerungen im Mündungsbereich mit Levée -

## 4.3 Ehnbach

### 4.3.1 Geländebeschreibung

Im Inntal nordöstlich der Ortschaft Zirl und somit im Westen des Karwendelgebirges (Innsbrucker Nordkette) liegt das Untersuchungsgebiet Ehnbach (häufig auch Kreuzbach genannt). Das Gebiet hat eine Größe von 14,4 km<sup>2</sup>. Der Ehnbach selbst entspringt an der Südabdachung der Erlspitze und mündet auf etwa 610 m ü. d. M. nach einer Gesamtlauflänge von knapp 7 km vom orografisch linken Ufer in den Inn. Das Untersuchungsgebiet unterscheidet sich vom Gesamteinzugsgebiet. Der Bereich ab der sogenannten Ehnbachklamm abwärts wurde nicht mit in das Untersuchungsgebiet einbezogen, da im Jahr 1960 oberhalb der Klamm in etwa 800 m ü. d. M. eine 25 m hohe Geschiebesperre erbaut wurde, die seit dieser Zeit einen Großteil des Geschiebes auffängt. Seitdem ist es unterhalb zu keinem Mureignis mehr gekommen. Somit ergibt sich für das Untersuchungsgebiet ein Höhenunterschied von 1740 m.

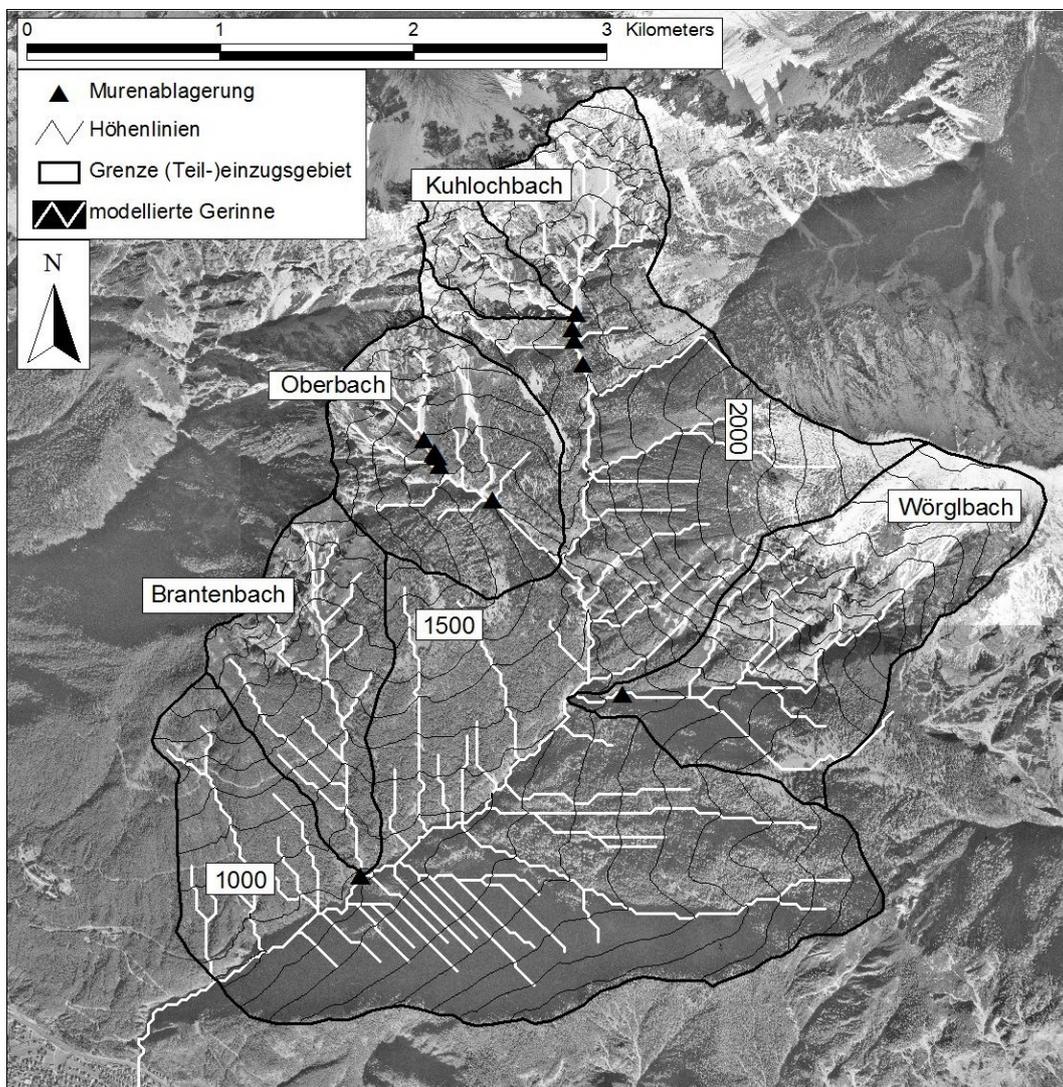


Abb. 4.6: Übersicht Ehnbach und seine Teileinzugsgebiete (mit Ortschaft Zirl in der SW-Ecke)

Das Untersuchungsgebiet ist in vier Teilgebiete unterteilt (Abb. 4.7). Es sind dies das Gerinne von der Kuhlochspitze (im Folgenden als Kuhlochbach bezeichnet) mit einem Einzugsgebiet von 30 ha, der Oberbach mit rund 1,3 km<sup>2</sup>, der Wörglbach mit einer Größe von ca. 2,0 km<sup>2</sup> und der Brantenbach mit ca. 1,1 km<sup>2</sup>. Es ist allerdings nicht vollkommen auszuschließen, dass einige der Murablagerungen, die dem Kuhlochbach zugeordnet wurden, tatsächlich in dem

Gerinne entstanden sind, das sich von der Erlspitze herabzieht und sich mithin ein weiteres Teileinzugsgebiet ergibt.

Tektonisch befindet man sich im Gebiet der Inntaldecke, die im Bereich des Hochkarwendels über die Lechtaldecke geschoben wurde (AMPERER & HAMMER, 1898; SOMMERHOFF, 1971). Wie im größten Teil des Karwendelgebirges handelt es sich um Gesteinsfolgen der Trias. Etwa die Hälfte des Einzugsgebiets ist aus Hauptdolomit aufgebaut, er nimmt fast den gesamten orografisch rechten Talhang und die Berge der Seefelder Gruppe ein. Auf etwa 2 km<sup>2</sup> tritt er als nackter Fels zutage, in weiten Bereichen ist er aber von Verwitterungsschutt überdeckt (FWL, 1995). Über dem Hauptdolomit liegen die Raibler Schichten, die sich aus Dolomiten, Sandsteinen, Mergeln und Kalken zusammensetzen. Teile der Talflanken des Ehnbachs und des Wörglbachs sowie der Bereich des Solsteins werden vom im Vergleich zum Hauptdolomit wesentlich widerstandsfähigeren Wettersteindolomit eingenommen (Abb. 4.8). In geringerem Umfang sind außerdem noch Rauhwanke/Breccie und Moränen vertreten.

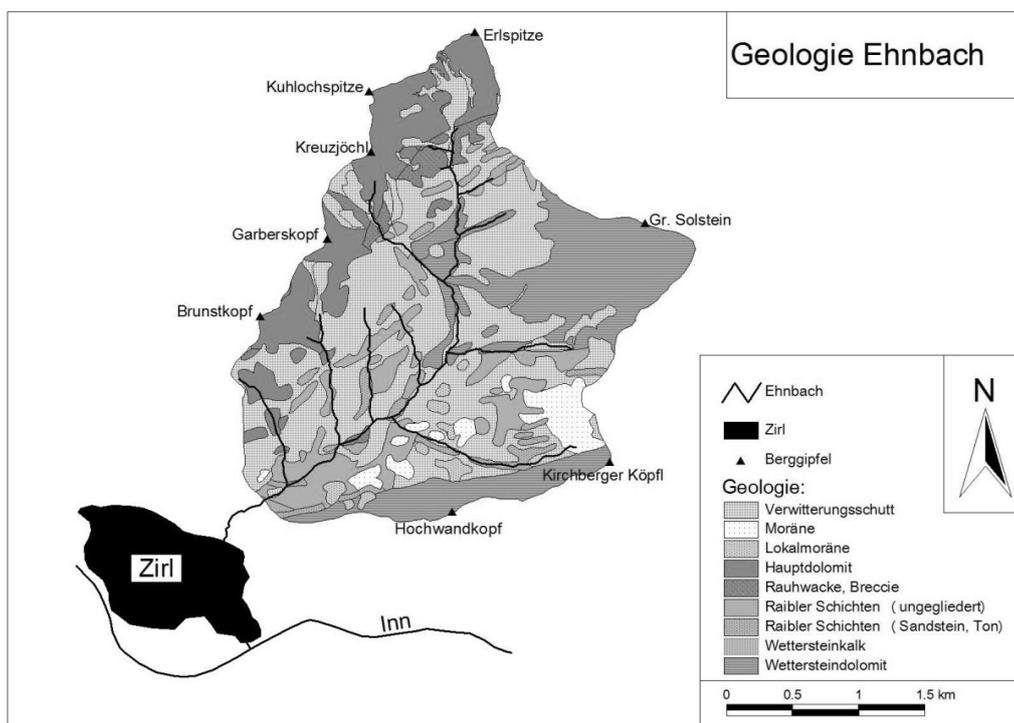


Abb. 4.7: Geologie des Untersuchungsgebiets Ehnbach

Da im Untersuchungsgebiet selbst keine Messstationen existieren, muss der Niederschlag aus den umliegenden Stationen abgeleitet werden. FLIRI (1975) gibt für die am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets liegende Station Hochzirl (1002 m ü. d. M.) einen Wert von 1012 mm an. Während Inzing (660 m ü. d. M.) auf dem gegenüberliegenden Innufer mit 823 mm deutlich geringere Werte aufweist, zeigen die Jahresmittelwerte von Seefeld (bei vergleichbarer Höhe) mit 1150 mm eine gewisse Übereinstimmung mit dem von FLIRI (1975) angegebenen Wert für Hochzirl. Für Höhen über 1200 m ü.d.M. fehlen Werte aus Regenschreibern.

Die Totalisatoren von Seegrube (ca. 1900 m ü. d. M.) und Bettelwurf (ca. 2700 m ü. d. M.) östlich des Untersuchungsgebiets weisen Jahressummen um 2300 mm bzw. 1800 mm auf (Werte freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Herrn DR. GATTERMEIER vom Hydrographischen Dienst Tirol) (LUNGHAMMER, 2000). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge dürfte somit in den unteren Teilen des Untersuchungsgebiets zwischen 1000 und 1200 mm liegen und in den höheren Bereichen auf Werte von bis zu 2000 mm zunehmen. Charakteris-

tisch für das Untersuchungsgebiet sind die hohen Niederschlagsmengen im Sommer, die hauptsächlich in Form von Gewitterniederschlägen mit hoher Intensität fallen.

Knapp die Hälfte nimmt Nadelwald mit geringer Laubholzbeimischung ein. Während um Hochzirl vor allem Kiefern dominieren, ist in den meisten Bereichen besonders die Tanne von Bedeutung. Über 1500 m ü. d. M. bestimmen mehr und mehr Krummholzbestände (fast ausschließlich Latschen) das Bild, im Übergangsbereich finden sich vor allem auf der rechten Bachseite lichte Wälder mit Fichte und Lärche. Die mit Latschen bedeckte Fläche umfasst etwa ein Viertel des Untersuchungsgebiets, der Grasanteil (einschließlich Almfläche) ist ziemlich gering. In den Gipfelbereichen überwiegen vegetationslose Flächen (LUNGHAMMER 2000).

### 4.3.2 Die Muren

Im Rahmen einer Diplomarbeit (LUNGHAMMER, 2000) wurden im Einzugsgebiet des Ehnbachs insgesamt 14 Talmuren kartiert. Die aufgenommenen Ablagerungen konnten vier Teil-einzugsgebieten zugeordnet werden. Lediglich im Einzugsgebiet des Erlbachs und des Gilgenbachs konnten keine eindeutigen Spuren von Talmuren nachgewiesen werden. Die aufgenommenen Talmuren waren bereits mehrere Wochen oder Monate alt und konnten keinem Niederschlagsereignis zugeordnet werden. Spuren älterer, gegebenenfalls bereits bewachsener Talmuren wurden nicht gefunden. Es steht zu vermuten, dass die älteren Murköpfe jeweils von den neueren überdeckt werden (Abb. 4.9).



Abb. 4.8: Murkegel an der Einmündung Kuhlochbach

Sehr unterschiedlich war ebenfalls die Anzahl der gefundenen Murköpfe in den einzelnen Gebieten. Während im Branten- und Wörglbach jeweils nur ein Murkopf sicher nachgewiesen werden konnte, waren in den Einzugsgebieten des Kuhloch- und Oberbachs bis zu sieben Einzelereignisse zu finden. Branten- und Wörglbach sind fast vollständig bewaldet. Die beiden letztgenannten Gebiete liegen höher, der Anteil der bewaldeten Fläche ist deutlich geringer. Die vegetationslose Fläche liegt in beiden Gebieten über 35 %. Die Fläche, auf der unbewachsenes Lockermaterial zu finden ist, macht mehr als 1/8 der Gesamtfläche aus. Dass die Muraktivität im Bereich von Kuhloch- und Oberbach höher ist, kann also nicht überraschen.

## 4.4 Heugraben

### 4.4.1 Geländebeschreibung

Das Gebiet liegt im südöstlichen Teil des Ammergebirges im Landkreis Garmisch-Partenkirchen. Der Heugraben fließt am Hang des Heubergs zwischen Schafkopf und Rabenkopf und mündet über den Ronetsbach zwischen Farchant und Oberau in die Loisach. Die höchste Erhebung ist mit 1130 m ein Ausläufer des Rabenkopfs, der niedrigste Punkt ist mit 660 m ü. d. M. die Mündung in den Ronetsbach; damit erstreckt sich das Gebiet über 470 Höhenmeter und hat eine Gesamtfläche von rund einem Hektar. Hauptdolomit ist das einzige Gestein, das im untersuchten Bereich zu finden ist. Lediglich im Übergang von Hang in die Talau der Loisach ist eine sehr kleiner Schwemmfächer zu finden. Der Hauptdolomit bildet kleinere bis zu 10 m hohe Wände, an deren Fuß sich die für den Hauptdolomit typischen Schuttkegel finden. Diese sind jedoch nicht besonders groß. Vernässungen, Stauhorizonte oder Rutschungen sind dagegen nicht zu finden. Abbildung 4.10 enthält eine Übersicht über das Gebiet.

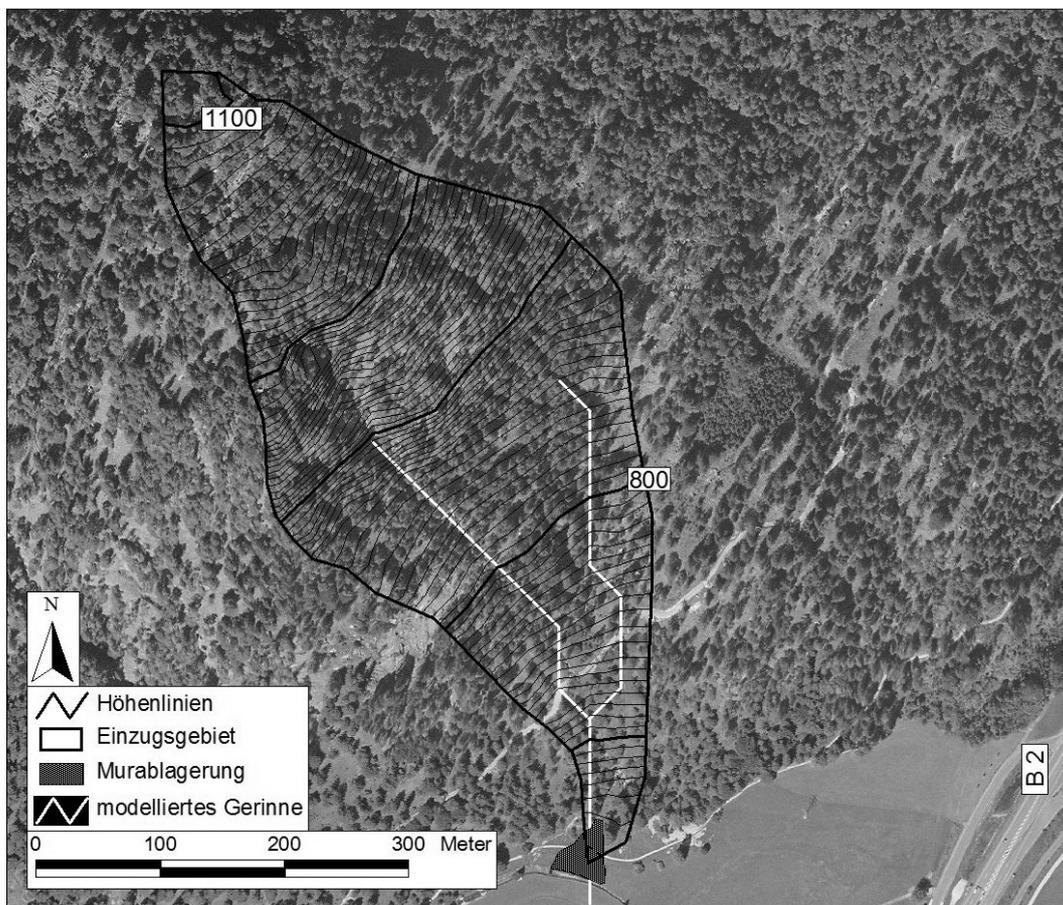


Abb. 4.9: Übersicht über den Heugraben

Das Loisachtal wurde während der letzten Eiszeit durch den Loisachgletscher geformt und übertieft. Fernmoränenreste, die den Eisrand anzeigen finden sich in der Umgegend bis auf eine Höhe von rund 1700 m ü. d. M. Heute gibt es keine sich keine Gletscher mehr im Gebiet. Wie in den meisten anderen Gebieten herrschen Rohböden und Rendzinen vor. Eine genaue Bodenkartierung des Gebiets liegt nicht vor.

Praktisch das gesamte Gebiet ist mit Wald bedeckt. Lediglich rund 0,8 ha Wiesen sind im Einzugsgebiet zu finden. Vegetationslose Bereiche finden sich in den Steilwänden, die im Hauptdolomit ausgebildet sind und eine Höhe von rund 10 m erreichen, sowie auf den darunter liegenden Schuttflächen. Im Vergleich mit der Gesamtfläche sind diese aber so klein, dass sie nicht ins Gewicht fallen.

Das Klima des Gebiets ist charakterisiert durch eher kühle Sommer und schneereiche Winter. Die mittleren jährlichen Niederschläge sinken von rund 2000 mm/a auf den umliegenden Höhenzügen bis auf 1300 mm/a bis 1600 mm/a im Loisachtal (DIEZ 1967). Für Garmisch-Partenkirchen wird ein Wert von 1364 mm/a angegeben (MÜLLER-WESTERMEIER 1996).

Die Murablagerungen wurden von der Straße aus entdeckt. Eine Datierung und damit die Zuordnung zu einem bestimmten Niederschlagsereignis ist nicht möglich.

#### 4.4.2 Die Mure

Die Talmure des Heugraben ist ein eher kleines Murereignis von rund 600 m<sup>3</sup>. Hinweise auf weitere Murereignisse – rezent oder fossil – finden sich nicht. In der geologischen Karte ist am Übergang zur Talaue ein Schwemmkegel ausgewiesen. Das kartierte Murereignis läuft aber deutlich über den ausgewiesenen Kegel hinaus (Abb. 4.11). Der modellierte Bachlauf weicht etwas von dem tatsächlichen ab; damit liegt der auf der geologischen Karte eingezeichnete Schwemmkegel östlich vom modellierten Bachlauf. Gleichwohl ist zu sehen, dass der Murgang weiter in den Talaue vorgedrungen ist als der Schwemmkegel, der in der geologischen Karte ausgewiesen wird.

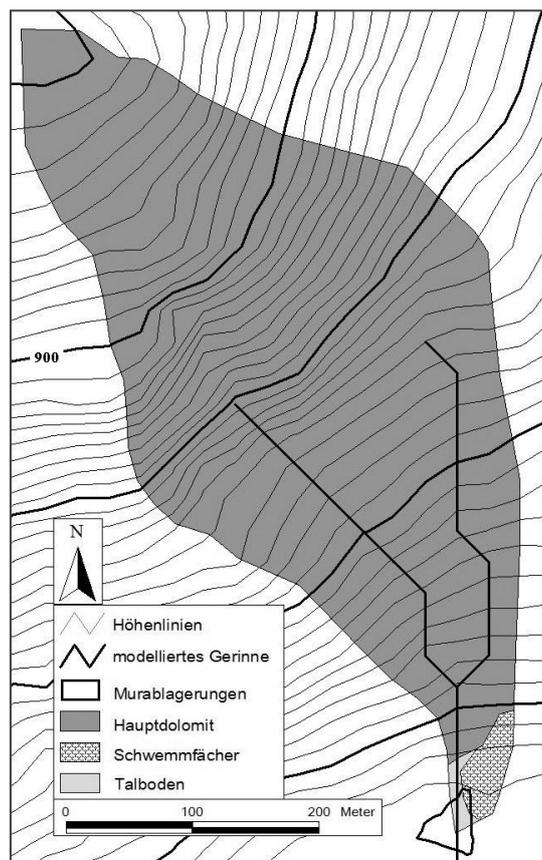


Abb. 4.10: Übersicht über das anstehende Gestein sowie die Lage des Murkegels

Das gesamte Einzugsgebiet ist zwischen 25° und 40° geneigt. Erst bei der Mündung in den Vorfluter sinkt die Neigung schnell bis auf rund 2° ab. Daher ist es auch nicht zu erwarten, dass sich im Bachlauf Zeugen älterer Talmuren finden lassen; diese dürften von „normalen“ Hochwassern oder neueren Muren erodiert werden. Die Talau der Loisach wird in diesem Bereich landwirtschaftlich genutzt. Somit steht zu vermuten, dass der Besitzer die eventuell vorhandenen Spuren einer früheren Talmure beseitigt hat, um die Fläche weiter bearbeiten zu können. Da sich im Übergangsbereich zwischen Einzugsgebiet und Ebene allerdings kaum ein Kegel ausgebildet hat, kann weiter davon ausgegangen werden, dass sowohl die fluviale Erosion sehr gering ist, als auch Murereignisse des Heugrabens selten.

#### 4.5 Das Gebiet „Rumer Mure“

Das Gebiet der Rumer Mure, als Überbegriff für die Einzugsgebiete von Rumer Mure, Rumer Langenbach und Mühlauer Bach, liegt auf der Südabdachung des Karwendels (siehe Abb. 4.12) der so genannten Innsbrucker Nordkette. Die Bäche münden zwischen Innsbruck und Hall i. Tirol von Norden her nahezu parallel in das Unterinntal (RESCH 1989). Alle drei Einzugsgebiete weisen in etwa dieselbe Höhendifferenz auf und liegen auch räumlich sehr dicht beieinander.

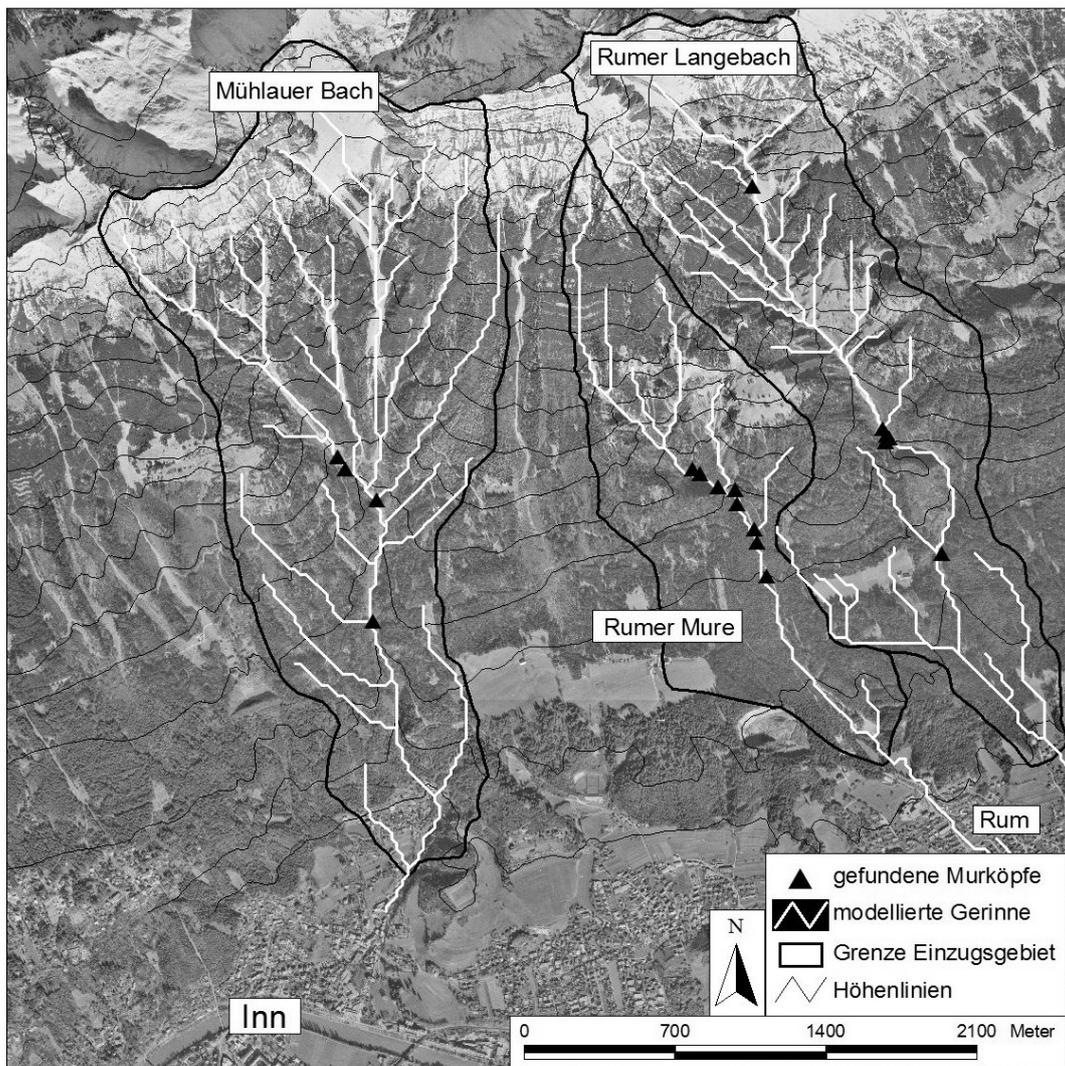


Abb. 4.11: Übersicht über das Gebiet Rumer Mure

Die Gebiete von Rumer Mure und Rumer Langenbach grenzen aneinander, zwischen der Rumer Mure und dem Mühlauer Bach liegt nur rund ein Kilometer. Als Einzugsgebiete werden lediglich die Bereiche oberhalb der Ortschaften bzw. der Geschiebesperren bezeichnet, da nur diese für die Fragestellung interessant sind. Die höchsten Erhebungen in den Gebieten sind die Gleirschspitze mit 2317 m ü. d. M. die Arzeler Scharte mit 2158 m ü. d. M., das Rumer Joch (2345 m ü. d. M.) die Rumer Spitze (2454 m ü. d. M.) und die Thaurer Jochspitze (2306 m ü. d. M.). Die Einzugsgebiete enden alle drei bei ca. 650 m ü. d. M., sodass sie eine Höhendifferenz von rund 1600m-1800m aufweisen. Die Rumer Mure erstreckt sich dabei über ein Gebiet von ca. 1,3 km<sup>2</sup>, der Rumer Langenbach über ca. 3,1 km<sup>2</sup> und der Mühlauer Bach über ein Gebiet von ca. 4,2 km<sup>2</sup>

Alle drei Gebiete befinden sich im Bereich der Inntaldecke und damit im Bereich der nördlichen Kalkalpen (SOMMERHOFF 1971). Es finden sich Muschelkalk, Dolomite, Buntsandstein und glaziale Schotter. Die obersten Bereiche des Gebiets sind geprägt durch die für dieses Gestein typischen Wände sowie ausgedehnte Schuttflächen. Großflächige Vernässungen sind aufgrund der meist gut wasserwegigen Kalke kaum anzutreffen (Abb. 4.13).

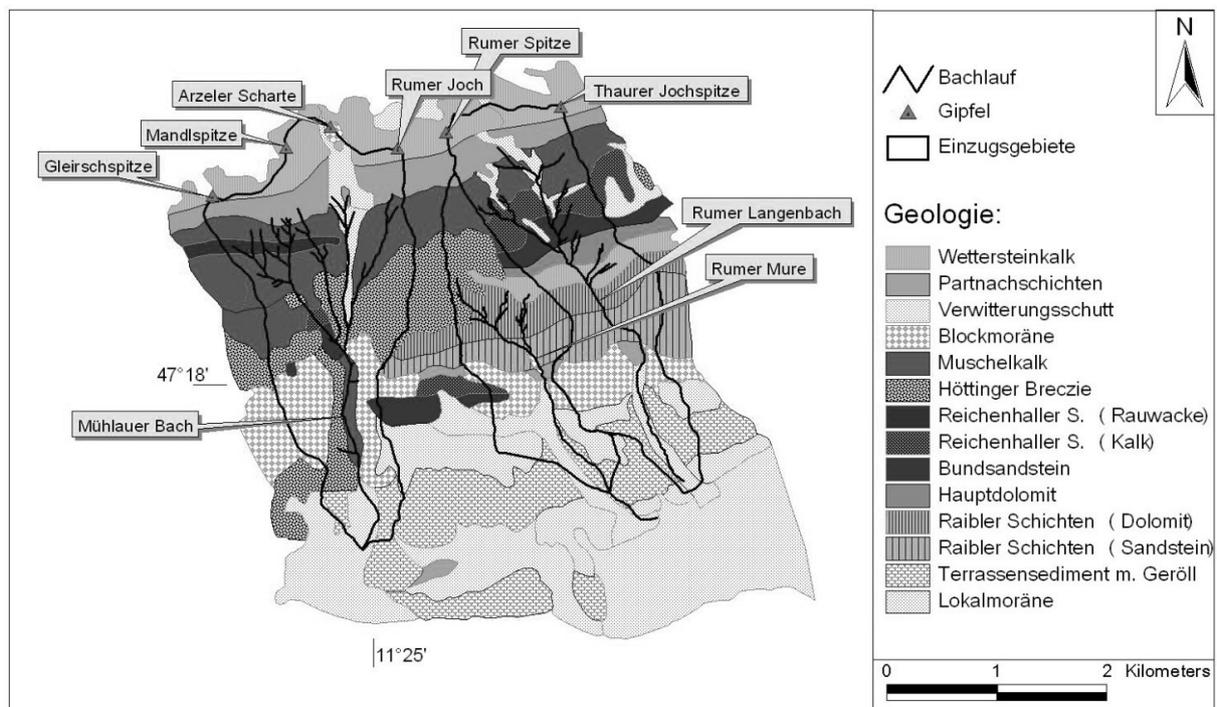


Abb. 4.12: Geologie des Untersuchungsgebiets Rumer Mure

Während der letzten Eiszeit war das gesamte Inntal mit Eis gefüllt. Dabei handelte es sich sowohl um Eis der lokalen Gletscher als auch um Eis aus den Zentralalpen. Heute finden sich keine Gletscher mehr im Gebiet. Allerdings sind in allen drei Einzugsgebieten sowohl Jung- also auch Altmoränen bis auf eine Höhe von rund 1200 m ü. d. M. vorhanden.

Die Gebiete sind gekennzeichnet durch kühle Sommer und schneereiche Winter. Durch die Lage an der Nordseite des Inntals treten in den Gebieten häufig Stau- und Föhnlagen auf. Aufgrund der Südexposition und der daraus resultierenden starken Sonnenstrahlung können häufigere Trockenperioden trotz der an sich ausreichenden Niederschläge nicht ausgeschlossen werden. Die mittleren jährlichen Niederschläge schwanken zwischen 1274 mm/a an der Station St. Martin im Gnadenwald (880 m ü. d. M.) und rund 2000 mm/a an der Station Hafelekar (2269 m ü. d. M.) (HYDR. DIENST ÖSTERR. 1994). Charakteristisch für das Untersuchungsgebiet sind die hohen Niederschlagsmengen im Sommer, die hauptsächlich in Form von Gewitterniederschlägen mit hoher Intensität fallen.

### 4.5.1 Rumer Mure

Im Einzugsgebiet der Rumer Mure wurden zwischen 890 m ü. d. M. und 1060 m ü. d. M. Ablagerungen von acht Murereignissen gefunden. Farbe und Bewuchs sowie die Intensität der Erosion der Ablagerungen unterscheiden sich deutlich, sodass von einem unterschiedlichen Alter der Murköpfe ausgegangen werden kann. Lediglich die beiden Murköpfe bei 1040 m ü. d. M. stammen vermutlich von ein und demselben Murgang. Da sich im Einzugsgebiet keine Siedlung und auch keine Forststraßen befinden, können auch keine sicheren Augenzeugenberichte gefunden werden. Aufgrund der fehlenden Niederschlagsdaten aus dem Gebiet kann hier wie auch in den anderen Gebieten kein auslösendes Niederschlagsereignis zugeordnet werden. Bei den Murköpfen, die unterhalb der Mündung des östlichen Nebenarms liegen, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, in welchem der beiden Armen des Bachs die Talmaure angerissen ist. Da aber oberhalb der Mündung in beiden Armen Murablagerungen zu finden sind, damit also beide Arme sicher murfähig sind, muss hier auch nicht zwingend eine Zuordnung stattfinden. Die Größe der Murköpfe unterscheidet sich deutlich. Während die Murköpfe unterhalb des Zusammenflusses der Seitenarme ein Volumen von über 500 m<sup>3</sup> aufweisen, erreichen die Ablagerungen oberhalb diese Größe bei Weitem nicht. Ihr Volumen schwankt zwischen 50 m<sup>3</sup> und 100 m<sup>3</sup>. Möglich ist, dass hier die Lauflänge eine Rolle spielt. Ein Murgang arbeitet während der Bewegung weiteres Material mit ein und vergrößert demzufolge sein Volumen. Damit sollten die Murgänge, die weiter talwärts laufen, größer sein, als solche, die weiter oben stoppen. Neben den Murablagerungen wurden als weitere Nachweis für Murgänge auch deutliche Levées gefunden (Abb. 4.14).

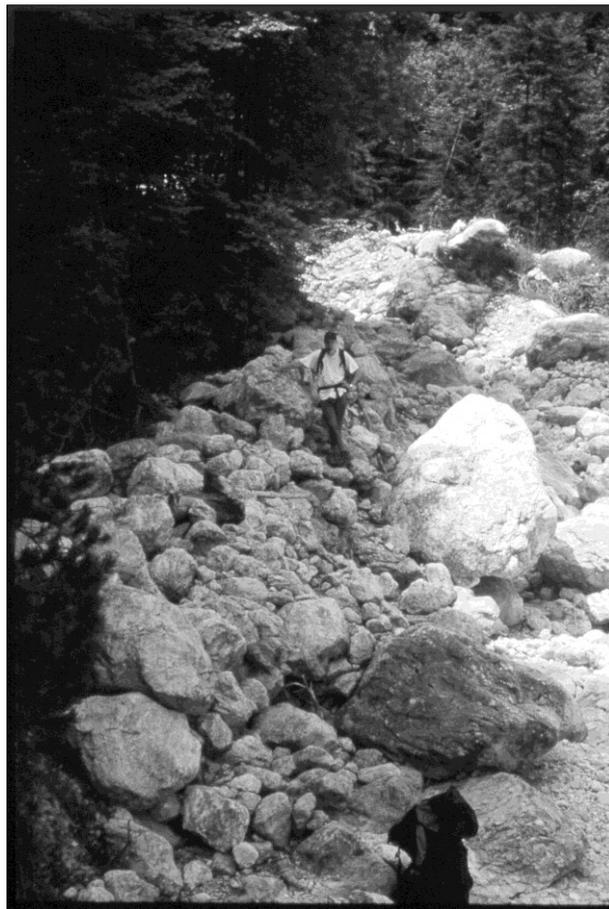


Abb. 4.13: Levée bei rund 1000 m ü. d. M.

#### 4.5.2 Rumer Langenbach

Im Einzugsgebiet des Rumer Langenbach (der auch Langer Graben genannt wird) wurden zwischen 840 m ü. d. M. und 1650 m ü. d. M. Ablagerungen von sechs Murereignissen gefunden. Während die Murköpfe im Gebiet Rumer Mure alle recht nah beieinander liegen, sind sie im Einzugsgebiet des Rumer Langenbachs fast über die gesamte Bachlänge verstreut. Der oberste Murkopf liegt auf 1650 m ü. d. M., vier weitere liegen relativ dicht beieinander zwischen 1000 m und 1020 m ü. d. M., der unterste wieder mit einem deutlichen Abstand bei 830 m ü. d. M. Die kartierten Volumina sind auch hier unterschiedlich. Der untere Murkopf ist mit knapp 500 m<sup>3</sup> der kleinste, die Ablagerung bei 1650 m ü. d. M. mit 1500 m<sup>3</sup> die größte. Die restlichen Ablagerungen liegen mit rund 1000 m<sup>3</sup> dazwischen. Die Häufung der Murköpfe im Bereich um die 1000 m ü. d. M. erklärt sich durch den Kiechlberg, den der Rumer Langenbach mit einem deutlichen Knick umfließt. Dadurch ergibt sich oberhalb des Kiechlbergs eine gering geneigte Fläche, auf der die Talmuren zum Stehen kommen. Auf dieser „Ebene“ waren nicht nur die Ablagerungen der Talmuren zu finden, es haben sich oberhalb auch Levées gebildet, die deutlich auf eine Talmure hinweisen (Abb. 4.15). Zum Untersuchungszeitpunkt wies der Wald des Kiechlbergs deutlich Schäden auf; ein Großteil der Bäume war geknickt oder entwurzelt. Im technischen Bericht des FWL Innsbruck (1995) dient der Rumer Langenbach auch als Lawinenbahn. Die meisten Staub- bzw. Fließlawinen erreichen das Tal jedoch nicht, da sie auf den Kiechlberg auflaufen und abgebremst werden. Die Schäden am Wald können somit vermutlich durch eine größer (Staub-?)Lawine erklärt werden.



Abb. 4.14: Murbahn mit Levées oberhalb des Kiechlbergs

### 4.5.3 Mühlauer Bach

Der Mühlauer Bach (auch Mühlauer Klamm) ist der einzige perennierende Bach der drei Teileinzugsgebiete. Der Quellaustritt liegt bei rund 1200 m ü. d. M. Hier laufen die Schutthalden der Mandl- und Geierschspitze aus, das oberhalb versickerte Wasser kommt hier an die Oberfläche. Unterhalb der Quelle wurde zum Aufnahmezeitpunkt im Bachbett fast nur Anstehendes gefunden. Auch die Ufer wurden weitgehend aus anstehendem Fels gebildet. Im Einzugsgebiet der Mühlauer Bachs wurden zwischen 920 m ü. d. M. und 1170 m ü. d. M. Ablagerungen von vier Murereignissen gefunden. Die beiden Murkegel zwischen 1160 m und 1140 m ü. d. M. wurden vermutlich durch den bei 1150 m ü. d. M. querenden Wanderweg abgebremst und kamen kurz ober- bzw. unterhalb zum Stehen. Die Herkunft der beiden tiefer liegenden Murköpfe ist völlig geklärt. In den Seitenbächen wurden keine eindeutigen Spuren von Talmuren gefunden, insofern kann man davon ausgehen, dass sie im Hauptbach angerissen sind. Da alle gefundenen Ablagerungen aber bereits mehrere Monate alt waren, können mögliche stumme Zeugen der Murabgänge auch schon wieder erodiert worden sein. Insofern ist ein Anreißen in einem der Nebenbäche nicht auszuschließen. Das Volumen der gefundenen Ablagerungen liegt zwischen rund 100 m<sup>3</sup> bei dem Murkopf auf 1140 m ü. d. M. und 1000 m<sup>3</sup> bis 1500 m<sup>3</sup> bei den anderen drei Ablagerungen. Abbildung 4.16 gibt einen Eindruck des Untersuchungsgebiets.



Abb. 4.15: Einzugsgebiet Mühlauer Bach mit Murablagerungen

## 4.6 Söllbachgebiet

### 4.6.1 Geländebeschreibung

Das hier als Söllbachgebiet bezeichnete Gebiet ist in zwei Einzugsgebiete unterteilt - das Gebiet des Schwarzenbachs und Söllbachs. Beide liegen im Mangfallgebirge westlich des Tegernsees und entspringen jeweils im Bereich der Schwarzen Tenn. Der Söllbach entwässert nach Norden direkt in den Tegernsee, während der Schwarzenbach nach Süden in die Weißbach entwässert, die ihrerseits wieder in den Tegernsee mündet. Geteilt wird das während der Eiszeit als Transfluenzpass dienende Gebiet durch die Wasserscheide der Schwarzen Tenn auf 1045 m ü. d. M. Eingegrenzt wird das Gebiet im Westen von Roß- und Buchstein,

Seekarkreuz, Ochsenkamp und Fockenstein sowie im Osten von Kotlahnerkopf, Hirschberg, Filzenkogel, Leonhardstein und Grüneck und erstreckt sich über ein Gebiet von ca. 15 km<sup>2</sup>. Die höchste Erhebung ist der Buchstein mit 1701 m ü. d. M., der niedrigste Punkt ist 730 m ü. d. M. die Einmündung des Söllbachs in den Tegernsee. Damit erstreckt sich das Gebiet über eine Höhendifferenz von 970 m. Der durchschnittliche Niederschlag in diesem Gebiet liegt bei rund 1800 mm/Jahr. Der gesamte Bereich kann in 18 Teileinzugsgebiete gegliedert werden (vgl. Abb. 4.17). Die Größe der Teilgebiete schwankt zwischen 13 ha und 3,3 km<sup>2</sup>. In die Untersuchung aufgenommen werden Ochsengraben 30 ha, Raffelgraben 1,3 km<sup>2</sup>, Rumpelgraben 76 ha, Buchersulzgraben 1 km<sup>2</sup>, Luckengraben 90 ha, Filzengraben 45 ha, Wegerschlaggraben 13 ha, Scheibengraben 1,6 km<sup>2</sup>, Neuhüttengraben 68 ha, Stinkergraben 1 km<sup>2</sup> und Wurzengraben 1,5 km<sup>2</sup>.

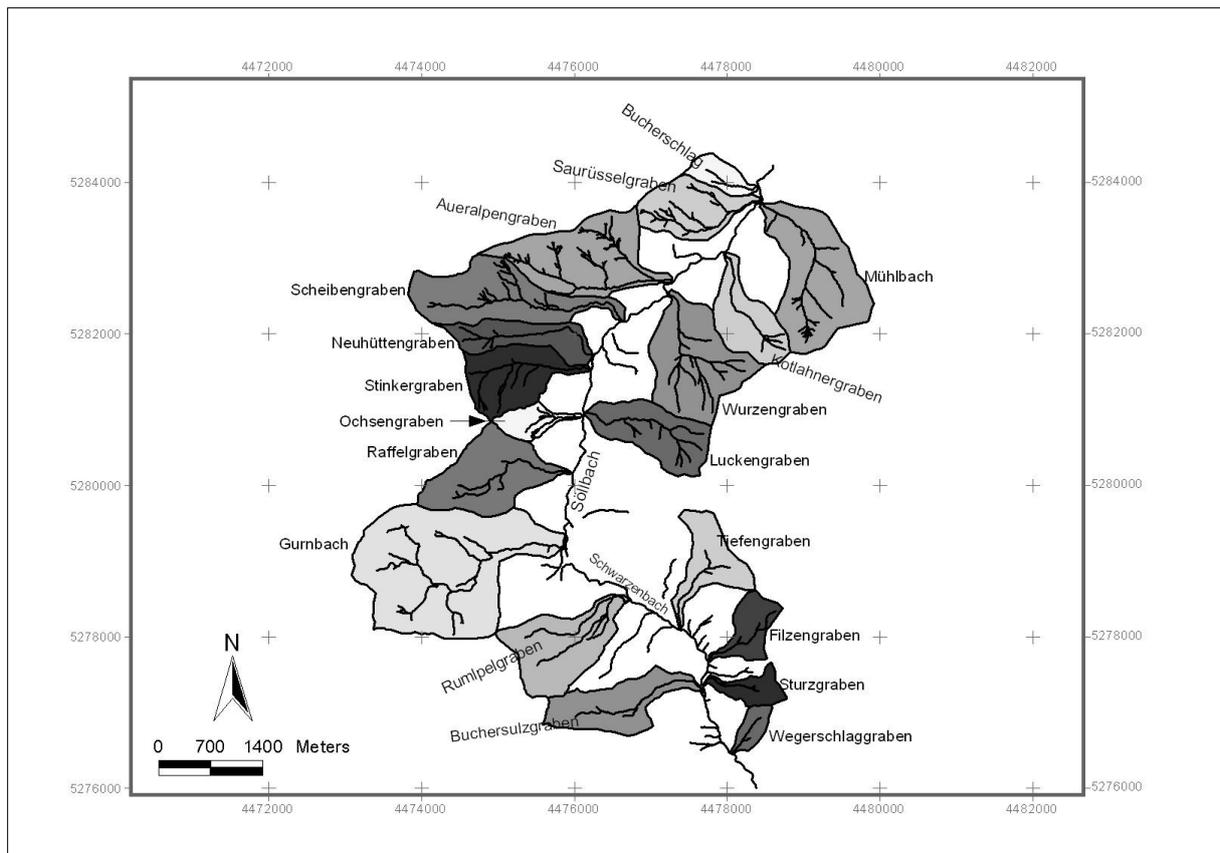


Abb. 4.16: Übersicht über die Teileinzugsgebiete der Gebiets Söll- und Schwarzenbach

Das Gebiet war während der letzten Eiszeit sowohl durch Ferngletscher (Inn) als auch von lokaler Vergletscherung geprägt. Das Eis des Inns kam über den Achenpass sowie über die Täler der Brandenberger Ache und der Rottach in das Tegernseegebiet. Ein Teil des Achenpasseises floss Richtung Isartal weiter. Im Weißachtal teilte sich der eher kleine Tegernseer Gletscher nochmals auf und floss zum einen durch die Weißach in den Tegernsee, zum anderen über Schwarzenbach und Söllbach, um sich dann in das Tegernseebecken zu schieben (vgl. VOIGTLÄNDER, W. 1980). Das relativ große Zungenbecken des Tegernsees erklärt sich durch die zusätzliche starke lokale Vergletscherung.

Am Ende der Eiszeit waren die umliegenden Berge eisfrei, der Abfluss des Söllbachs aber noch durch Ferneis des Tegernseegletschers blockiert. Der Sillberg, der sich an der orografisch rechten Seite des Talausgangs befindet, besteht aus den Resten dieser Seitenmoräne. Das aus dem Söllbachgebiet abfließende Wasser bildete einen See, dessen Stausedimente 60-80m hoch sind und sich ca. 3 km weit talaufwärts verfolgen lassen. In diese Sedimente hat sich der Söllbach tief eingeschnitten (VOIGTLÄNDER, W. 1980).

Kurz vor der Schwarzentenn-Alm queren einige Rückzugsmoränen das Tal. Diese bilden auch die heutige Wasserscheide zwischen Söll- und Schwarzenbach.

Die Gesteine des Gebiets sind sehr unterschiedlich (vgl. Abb. 4.18). Hauptsächlich stehen Hauptdolomit, Allgäuer, Aptychen und Raibler Schichten an. Vor allem der Unterschied zwischen dem harten, Wand bildenden Hauptdolomit und Plattenkalken (z. B. Ochsenkopf, Ross- und Buschstein) mit seinen ausgedehnten Schuttflächen und den eher weichen Gesteinen der Allgäuer, Aptychen und Raibler Schichten mit ihren runden Geländeoberflächen (z. B. Hirschberg) ist im Einzugsgebiet deutlich zu erkennen. Nördlich des Stinkergrabens verläuft dabei die Grenze zwischen der Allgäu- und Lechtaldecke.

Vernässungen und Quellaustritte sind aufgrund der Wechsel des Gesteins und der häufig eingelagerten wasserundurchlässigen Schichten im gesamten Gebiet zu finden. Südlich der Wasserscheide schließt sich eine Vernässungszone rund um die Schwarzentenn-Alm auf ca. 1020 m Höhe an. Hier bildete sich während des Starkregenereignisses 1999 ein ca. 10 cm starker neuer Quellaustritt, der einige Tage nach dem Abklingen der Niederschläge wieder verschwand (freundl. mündl. Mitt. des Wirtes der Schwarzentenn-Alms). Außerdem finden sich in fast allen Nebenbächen, die in den Allgäuer, Aptychen und Raibler Schichten anstehen, aktive Rutschungen, die viel erodierbares Material bereitstellen.

Aufgrund des stark variierenden Ausgangssubstrats im Einzugsgebiet sind auch die Böden kleinräumig sehr unterschiedlich. Bei einer Untersuchung des Einzugsgebiets Scheibengraben wurden alleine 32 Bodentypen gefunden (BY. LANDESAMT F. WASSERWIRTSCHAFT, 1996). Vorherrschend sind im gesamten Gebiet Rohböden, Braunerden und Gleye sowie Auensedimente im Tal.

Das Gebiet ist weitestgehend bewaldet. Dabei findet sich ein durch Forstwirtschaft geprägter Bergmischwald mit einem deutlichen Übergewicht der Fichte. Die oberen Regionen sind meist geprägt durch Latschen und alpine Wiesen, die den Almen als Viehweide dienen. In den Bereichen, in denen Hauptdolomit ansteht, sind auch vegetationsfreie Wände und Schutthalde zu finden.

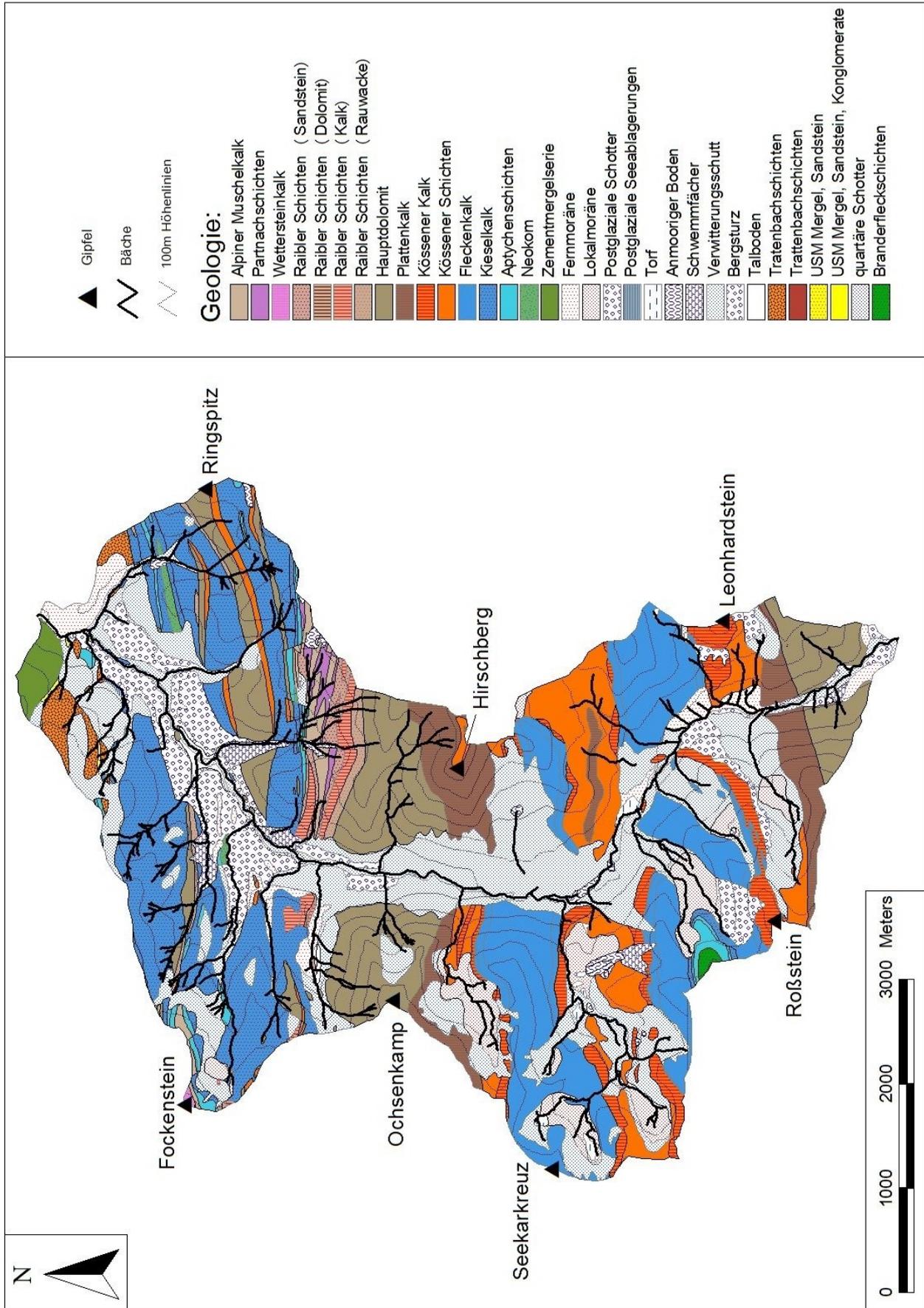


Abb. 4.17: Übersicht über die Gesteine des Söllbachgebiets

#### 4.6.2 Die Muren

Pfingsten 1999 kam es zu einem sogenannten Jahrhunderthochwasser in Südbayern. Im Zeitraum vom 11.5.-17.5. lag ein Tiefdruckgebiet quer über Süddeutschland. Die Niederschläge von über 130 mm in sechs Tagen bedingten eine weitgehende Sättigung der Böden. Am 20.5.1999 (Pfingsten) bildete sich eine Tiefdruckrinne über Ostdeutschland, die feucht-kühle Luft an die Alpen drückte. In der Nacht zum 21.5. brachte ein Tief über Oberitalien feucht-warme Luft, die über die kühle Atlantikluft gehoben wurde. Dadurch entstand ein für zwei bis drei Tage ortsfestes Regenband über Süddeutschland. Dabei wurden in zwei Tagen Niederschlagssummen von über 200 mm (Wetterstein- und Ammergebirge), teilweise sogar 290 mm (Hinterstein-Hindelang) gemessen (LANDESAMT F. WASSERWIRTSCHAFT, 1999).

Aufgrund dieses Starkregenereignisses wurden fast alle Teileinzugsgebiete des Söll- und Schwarzenbachs stark verwüstet. Vor allem durch die lange Dauer des Hochwassers war es in einigen Gebieten unmöglich, die einzelnen Ereignisse voneinander zu trennen und zu rekonstruieren. Bei der Ortsbegehung waren die meisten Bäche fast vollständig ausgeräumt (Abb. 4.19). Eine Unterscheidung von geschiebereichem Hochwasser und Murgängen war in einigen Teileinzugsgebieten nicht möglich. Aufgrund der Geländeaufnahme kann zwar vermutet werden, dass es in praktisch allen Bächen zu Talmuren kam, nachzuweisen war es aber nur in einem Teil der Gebiete anhand von Levées oder der Größe der transportierten Steine (Abb. 4.20); lediglich diese wurden letztendlich in die Untersuchung aufgenommen (siehe oben).



Abb. 4.18: Ausgeräumtes Bachbett im Söllbachgebiet (Wurzengraben)

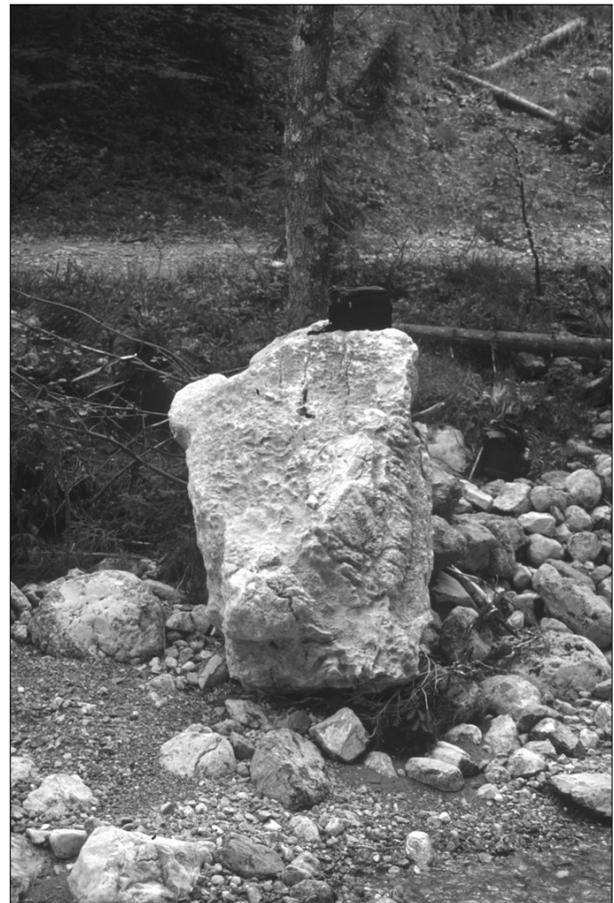


Abb. 4.19: Durch Murgang bewegter Block im Wegerschlaggraben

In den oben genannten Teileinzugsgebieten wurden eindeutige Spuren von Murabgängen gefunden. Teilweise konnten sogar noch Spuren älterer Talmuren gefunden werden. Die Größe der Ablagerungen lag zwischen  $400 \text{ m}^3$  und  $3000 \text{ m}^3$ . Da die Zerstörung der ursprünglichen Bachbetten sowie in den meisten Bächen auch der Ufer sehr groß war, konnte die Größe der Ablagerungen meist nur grob geschätzt werden. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass in den Fällen, in denen sich mehrere Murschübe ereignet haben, lediglich der letzte Murschub festzustellen war (Abb. 4.22). Die Größe der Ablagerungen gehen nicht in das untersuchte Murmodell ein; somit ist das Volumen der kartierten Talmuren zwar interessant, aber für die Untersuchung nicht von entscheidender Bedeutung. In einigen Tälern konnten zwar keine Ablagerungen gefunden werden, dafür waren deutlich Levées zu erkennen (Abb. 4.21). Teilweise wurden auch Blöcke gefunden, die nicht durch ein Hochwasser transportiert werden kann. In Verbindung mit den frischen Schlagspuren an Bäumen sind sie ein deutlicher Hinweis auf einen Murgang (Abb. 4.20).

Als schwierig erwies sich die Abschätzung der Talmuren aus dem Buchersulzgraben. Im Graben selbst sowie an seinem Ausgang wurden Ablagerungen und Levées gefunden. Die Zerstörungen an der Einmündung in den Schwarzenbach sowie im weiteren Verlauf des Schwarzenbachs waren jedoch so groß, dass ein Ende der Talmure nicht festgestellt werden konnte. Vor allem an der Mündung des Schwarzenbachs in die Weißbach kam es zu massiven Schäden an der Infrastruktur.



Abb. 4.20: Levées im Buchersulzgraben



Abb. 4.21: Ablagerung im Luckengraben

Die Bundesstraße B307 wurde praktisch komplett durch das Hochwasser der Weißbach weggespült, sodass die Herkunft der nur noch in Bruchstücken vorhandenen Ablagerungen nicht geklärt werden könnte. Aufgrund der Ablagerungen, die auf den Resten der Bundesstraße zu finden waren, kann zumindest vermutet werden, dass es zum Abgang einer Talmure aus dem Bereich des Schwarzenbachs kam oder dass die Talmure des Buchersulzgrabens bis auf die B 307 weiterlief. Die Verwüstung im Mündungsbereich war allerdings zu groß, um die Talmure bzw. ihre Herkunft eindeutig nachzuweisen (Abb. 4.23 und 4.24).



Abb. 4.22: Zerstörte Bundesstraße B307



Abb. 4.23: Levées auf der Brücke an der Mündung Schwarzenbach / B307

## 4.7 *Waxlriesgraben*

### 4.7.1 Geländebeschreibung

Das Einzugsgebiet des Waxlriesgrabens liegt südlich von Bad Reichenhall/Obb. Es zieht sich vom Südostufer des Saalachsees auf den Predigtstuhl (Abb. 4.25). Das Einzugsgebiet hat eine Größe von ca. 54 ha, eine Länge von ca. 1,5 km (Luftlinie) und eine durchschnittliche Neigung von 30°. Es endet nach der Überquerung der Bundesstraße B21 (Bad Reichenhall/Unterjettenbach) im Saalachsee. Von unten ist nur der Bereich bis zu einer Höhe von ca. 850 m ü. d. M. zugänglich. Weiter Bach aufwärts verengt sich das Tal zu einer Schlucht mit einem Gefälle von bis zu 53°. Der Bereich der Schlucht selbst ist – auch von oben – nicht zu begehen.

Das langjährige Niederschlagsmittel liegt für Bad Reichenhall (473 m ü. d. M.) bei 1660 mm (DWD 2006). Nimmt man die Zunahme des Niederschlags mit der Höhe dazu (z. B. WALENTOWSKY ET.AL. 2001), dürfte der Jahresniederschlag bei über 2000 mm liegen.

Während der letzten Eiszeit strömte das Eis des Salzachgletschers weit ins Vorland. Als Teil des Salzachgletschers flossen die Eismassen des Saalachgletschers aus dem Saalachtal in das Berchtesgadener-Reichenhaller Becken. Nebenströme benutzten während des Eishöchststands die Furche zwischen Gebersberg und Müllner Berg sowie das Tal des Thumsees (GANSS, 1979). Laut geologischer Karte sind im Gelände keine Moränenreste zu finden, was bei der Geländebegehung bestätigt werden konnte.

Im Untersuchungsgebiet stehen nur Ramsadolomit im unteren Teil bis ca. 750 m ü. d. M. und Hauptdolomit bis zu Gipfel des Predigtstuhls an.

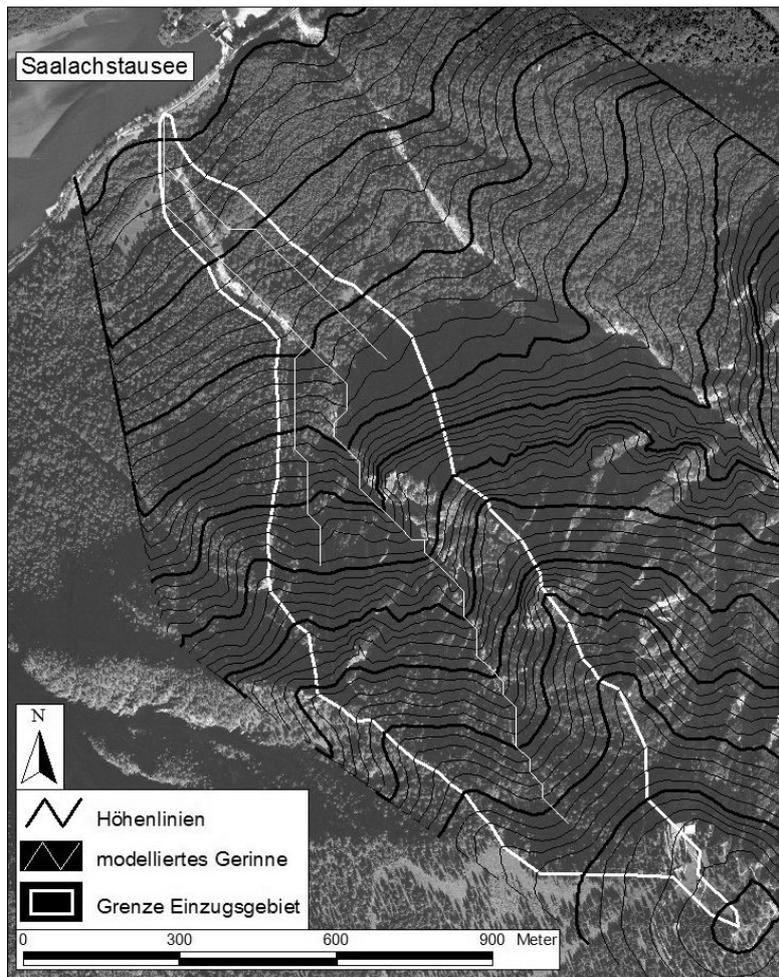


Abb. 4.24: Übersicht über das Einzugsgebiet Waxlries.

#### 4.7.2 Die Mure

Bei 680 m ü. d. M. ist kurz unterhalb der Mündung eines Seitenbachs eine Geschiebesperre. Hier werden sowohl die Talmuren aus dem Haupt- als auch aus dem Nebengerinne gestoppt. Allerdings reißen danach wieder Muren an. Der unterhalb der Sperre liegende Teil des Bachbettes ist dadurch deutlich breiter und stark erodiert. Zu den unterhalb anreißenden gehört auch die kartierte Talmure. Quer durch das Gerinne kreuzt eine Forststraße. Zur Querung des Bachbettes wurde hier keine Brücke gebaut; die Forststraße führt, gestützt durch eine Krainer Wand, durch das Gerinne hindurch. Erstaunlicherweise muss sich der Murgang relativ langsam bergab bewegt haben, sodass die Krainer Wand selbst von der Mure nicht beschädigt wurde (vgl. Bild 4.26) (freundl. mündl. Mitteilung von Herrn Graßl, Forstamt Berchtesgaden). Die Hinterfüllung der Krainer Wand und damit die Forststraße wurde jedoch komplett mit in den Murgang eingearbeitet und floss als Talmure weiter bergab. Die Ablagerungen der aufgenommenen Talmuren lagen rund 20 m oberhalb der Bundesstraße in einen leicht abgeflachten Bereich. Die Ablagerungen haben ein Volumen von rund 4000 m<sup>3</sup>.



Abb. 4.25: Ausgehöhlte Forststraße

## 5 Das Murmodell von Wichmann

Da sich die vorliegende Abhandlung in wesentlichen Teilen auf das von WICHMANN (2006) vorgestellte Modell bezieht, soll dieses zunächst näher erläutert werden. Da das gesamte Modell aus zwei Teilmodellen besteht, werden diese jeweils gesondert erklärt.

### 5.1 Die Berechnung der Startpunkte (DF DispoChannel)

Bei der Startpunktberechnung von **Hangmuren** werden häufig statistische Verfahren angewandt. Dazu werden die naturräumlichen Gegebenheiten der im Gelände gefundenen Anrisspunkte analysiert und nach weiteren Flächen gesucht, die die gleiche oder eine ähnliche naturräumliche Ausstattung aufweisen (WICHMANN 2006, RIEGER 1999). Diese neuen Flächen werden dann als potenzielle Anrisse ausgewiesen.

Bei der Geländeuntersuchung von **Talmuren** ist die Feststellung des Anrisspunktes nur sehr grob oder überhaupt nicht möglich (u.a. TOGNACCA, 2000). Außerdem sind die naturräumlichen Bedingungen, unter denen Muren im Gerinne anreißen, sehr komplex und unterschiedlich, so dass – selbst wenn ein Anriss festzustellen ist - sich kaum eine statistische Häufung dieser Bedingungen feststellen lässt. Daher ist ein statistisches Modell bei der Berechnung von Talmuren praktisch nicht möglich. Ein physikalisch basiertes Modell existiert bisher nicht.

#### 5.1.1 Das regelbasierte Modell

Um den Prozessbereich von Talmuren simulieren zu können, müssen aber Startpunkte ausgewiesen werden, an denen der Prozess der Modellierung startet. Deshalb greift WICHMANN (2006) bei der Modellierung auf ein regelbasiertes Modell zurück, das in der Schweiz entwickelt (ZIMMERMANN ET AL. 1997; HEINIMANN ET AL. 1998) und von ihm – erweitert – als das Teilmodell DF DispoChannel verwendet wird.

Bei diesem Verfahren werden die tatsächlichen naturräumlichen Verhältnisse im Anrissgebiet nicht beachtet. Das Modell basiert auf der Grundannahme, dass drei Bedingungen erfüllt sein müssen, um eine Talmure auszulösen:

- ein genügend hoher Abfluss,
- ausreichend mobilisierbares Sediment
- eine ausreichend hohe Gerinneneigung.

Dabei sind sowohl genügend Abfluss als auch ausreichend mobilisierbares Material nur schwer direkt zu messen. Sowohl ZIMMERMANN ET AL. (1997) als auch HEINIMANN ET AL. (1998) belegen jedoch bei ihren Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen dem Gefälle am Anrisspunkt einer Talmure und der Größe des Einzugsgebiets oberhalb des Anrisses. Die Größe des Einzugsgebiets gilt hierbei als Maß für den Abfluss.

Der gefundene Zusammenhang wird in der Formel

$$J = 0,32 * (a)^{-0,2} \quad (5.1)$$

mit:  $J$  = Kritische Neigung [%]

$a$  = Größe des Einzugsgebiets [ $\text{km}^2$ ]

ausgedrückt. Das heißt, je kleiner das lokale Einzugsgebiet ist, umso steiler muss ein Gerinneabschnitt sein, damit Murgänge entstehen können. WICHMANN (2006) verwendet die in der Schweiz gefundene Beziehung zwischen Neigung und Größe des Einzugsgebiets ebenfalls zur Ausweisung von Startpunkten. Diese Beziehung ist auf der Grundlage eines digitalen Höhenmodells leicht zu ermitteln. Wird im Höhenmodell ein Pixel gefunden, das die oben angegebene Bedingung (5.1) erfüllt, wird im Modell ein Anriss als möglich ausgewiesen. Danach gilt es noch abzuschätzen, ob das Material, das in den entsprechenden Gerinneabschnitten zur Murauslösung zur Verfügung steht, ausreichend ist.

### 5.1.2 Die beitragende Fläche (Sediment Contributing Area, SCA)

Während man im Hochgebirge davon ausgehen kann, dass alle geneigten Flächen ungefähr gleich viel Abfluss bereit stellen (wenn man von Sondersituationen wie starker Verkarstung o.ä. absieht), ist die Situation bei der Betrachtung des Geschiebes deutlich anders. Material, das am Fuß einer Wand liegt, die weit vom nächsten Gerinne entfernt ist, spielt bei der Auslösung von Talmuren sicher eine untergeordnete Rolle; Geschiebe aus einer Rutschung, die im Bachbett selbst zum Stillstand kommt, kann entscheidend sein, auch wenn die Neigung beider Flächen die gleiche ist. Es ist nur sehr schwer zu quantifizieren, welche Flächen im Einzugsgebiet wie viel Lockermaterial zur Verfügung stellen; damit ist auch die Menge des verfügbaren Sediments schwer abzuschätzen. Deshalb wurde von HEINIMANN ET AL. 1998 ein Verfahren entwickelt, die geschieberelevante Fläche (sediment contributing area, SCA) zu berechnen (vgl. auch DÜSTER 1993). Im Prinzip geht dieses Verfahren davon aus, dass nicht das gesamte Lockermaterial, das in einem Einzugsgebiet produziert wird, für einen potentiellen Murgang zu Verfügung steht. Tatsächlich wird nur das Material betrachtet, das in einer gewissen Nähe zu einem Gerinne liegt und im Laufe der Zeit in dasselbe transportiert werden kann. In den Gerinnen wird das Geschiebe dann weitertransportiert und steht zur Auslösung einer möglichen Talmure zu Verfügung. Es werden also nur Flächen betrachtet, die auch Material ins Gerinne liefern. Die Größe der sogenannten „beitragenden Fläche“ (SCA) gilt als Parameter für die zur Verfügung stehende Menge Schutt.

Deshalb wird die obenliegende SCA für jede Zelle des Gerinnenetzes berechnet. Diese Fläche repräsentiert die maximal mögliche Fläche, die diesem Pixel Schutt für eine Mure zur Verfügung stellt. Die Ausdehnung wird hangauf begrenzt durch einen Grenzwert der Neigung und eine maximale Entfernung zum Gerinnenetz. Es werden also nur Flächen mit einer entspre-

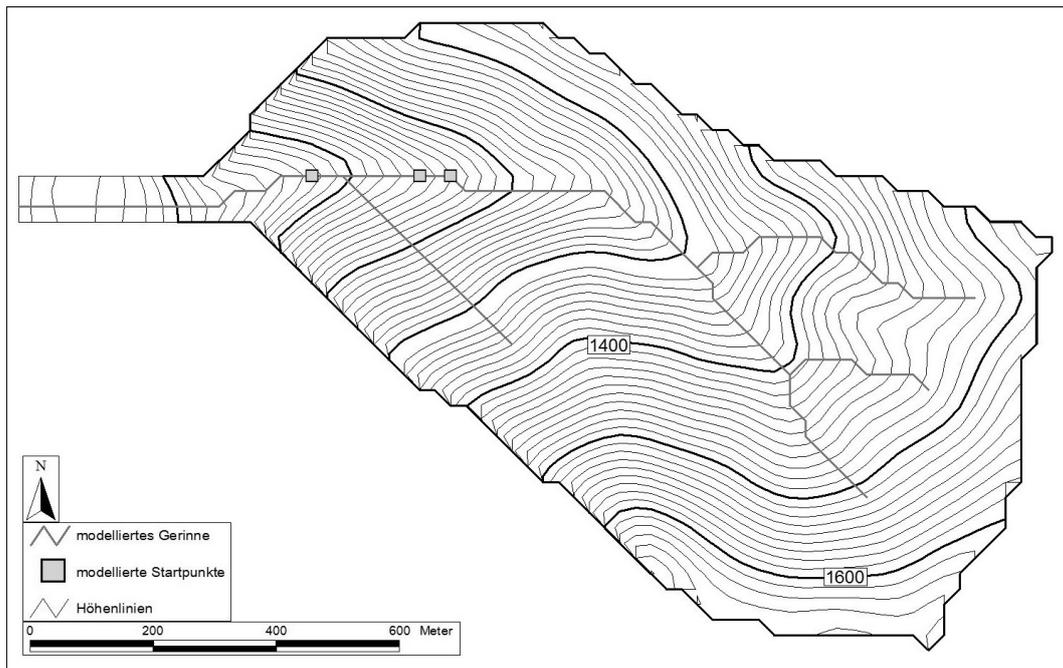
chenden Neigung und einem bestimmten Abstand zum Gerinne in die Berechnung der SCA einbezogen. Die Grenzwerte von Neigung, Entfernung zum Gerinne und Größe der SCA können im Modell individuell angepasst werden.

Als potentielle Anrisse werden Zellen ausgewiesen, bei denen die Relation Gerinneneigung / Größe des Einzugsgebiets hoch genug ist (siehe Gleichung 1) und die eine minimale Größe der SCA hangaufwärts ausweisen.

Grundsätzlich sind zwei Möglichkeiten denkbar, wie die jeweilige Fläche oberhalb des betrachteten Pixels zur SCA summiert wird: HEINIMANN ET AL. (1998) addieren sämtliche Flächen entlang des Gerinnes, die den Bedingungen entsprechen, ohne auf die Gegebenheiten innerhalb des Gerinnes Rücksicht zu nehmen. Sie gehen davon aus, dass der gesamte Schutt, der in der beitragenden Fläche produziert wird, entlang des ganzen unterhalb liegenden Gerinnes zur Verfügung steht. WICHMANN (2006) dagegen verfolgt einen etwas anderen Ansatz. Er betrachtet Flachstücke ( $< 3,5^\circ$  Gefälle) im Gerinne (als Beispiel nennt er längere Griessrecken) als einen Ablagerungsraum, in dem das vom Bach transportierte Geschiebe liegen bleibt. Der Bereich oberhalb dieser sogenannten Sedimentfallen gehört für ihn damit nicht mehr zum sediment spendenden Gebiet der unterhalb liegenden Gerinnepixel, die Addition des SCA muss am Ende der „Ebene“ wieder bei null beginnen. Im SAGA-Modul „Disposition Channel“ kann zwischen beiden Möglichkeiten („*Accumulate downstream*“ oder „*accumulate only contributing stream segments*“) gewählt werden. Je nach dem welche der beiden Einstellungen man wählt, unterscheiden sich die Ergebnisse der Startpunktberechnung deutlich voneinander. Dabei bleibt die Lage der Anrisspunkte weitestgehend gleich, die Menge der Anrisse ist bei der Methode von HEINIMANN ET AL. (1998) aber deutlich höher.

Sowohl die Breite des sedimentliefernden Streifens um das Gerinne, als auch die minimale Neigung, ab der Geschiebe in den Bach geliefert werden kann, kann im Modell angegeben bzw. verändert werden. WICHMANN (2006) übernimmt die von HEINIMANN (1998) verwendeten Werte mit einem maximalen Abstand von 250 m zum Gerinne und einem minimalen Neigungswinkel der Ufer von  $20^\circ$  (siehe Tab. 5.1). Die minimale sediment spendende Fläche, die nötig ist um eine Talmure auszulösen, wird auf  $5000 \text{ m}^2$  festgelegt.

A



B

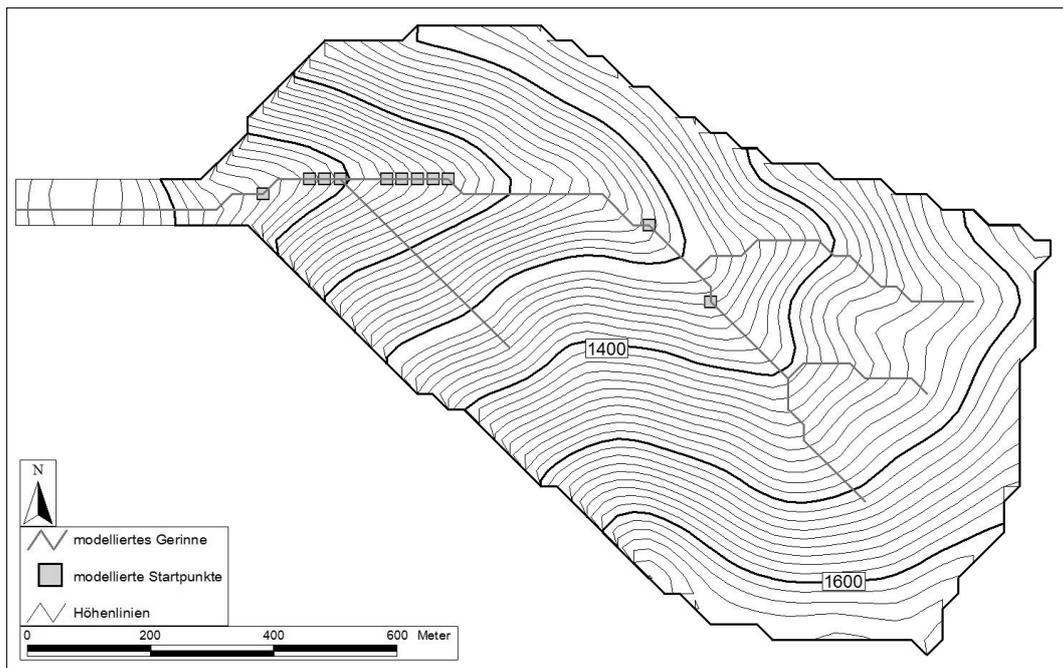


Abb. 5.1: Vergleich der Startpunktmodellierung mit unterschiedlichen Modelleinstellungen: Max Distanz zum Bach: 250m; min Neigung: 20°; Accumulate only contributing stream segments; min Gerinneneigung: 3,5°.

Abb. A: min. SCA: 10 000m<sup>2</sup>; Abb. B: min. SCA: 5000m<sup>2</sup>

Um das Modell überprüfen zu können, werden sowohl die von WICHMANN (2006) gewählten Einstellungen übernommen und in den untersuchten Einzugsgebieten angewendet, als auch alle Parameter variiert und mit den ursprünglichen Einstellungen verglichen. Am Beispiel des Luckengrabens / Söllbachgebiet ist deutlich zu sehen, wie sich die Anzahl der Anrisspunkte ändert, wenn die Größe des sedimentspendenden Gebietes verändert wird (Abb. 5.1). Die Parameter, die zur Berechnung der SCA verwendet werden, reagierten dabei unterschiedlich

sensitiv. Der maximale Abstand zum Gerinne verändert die Anzahl der ausgewiesenen Startpunkte praktisch nicht. Im unten gezeigten Luckengraben ändert sich die Anzahl und Lage der Startpixel nicht, wenn der Wert für den Abstand zu Gerinne von 150 m auf 500 m vergrößert wird. Es zeigt sich aber deutlich, wie die Anzahl der Startpunkte variiert, wenn die minimal benötigte SCA von 5000 m<sup>2</sup> auf 10 000 m<sup>2</sup> vergrößert wird.

Die größten Veränderungen ergaben sich bei den unterschiedlichen Methoden, die SCA aufzusummieren. Die von HEINIMANN (1998) verwendete Methode, die Fläche unabhängig von der jeweiligen Neigung zu addieren („*accumulate downstream*“) ergibt je nach Einzugsgebiet zwei- bis dreimal so viele Anrisspunkte wie die von WICHMANN angewandte Methode, die Aufsummierung an Flachstellen neu starten zu lassen („*Accumulate only contributing stream segments*“). In einigen Gebieten wird bei der Einstellung „*accumulate downstream*“, sogar der gesamte Bachlauf als mögliches Anrisspixel ausgegeben.

Tabelle 5.1 gibt die Einstellungen von HEINIMANN (1998) bzw. WICHMANN (2006) bei der Berechnung der SCA wieder.

Maximaler Abstand zum Gerinne	250m
Minimale Hangneigung	20°
Minimale Gerinneneigung	3,5°
Minimales SCA	5000m <sup>2</sup>

Tab. 5.1: Einstellungen zu Berechnung der sedimentspendenden Fläche

### 5.1.3 Die Gewichtung der sedimentspendenden Flächen

Bei der Betrachtung der Geländesituation in einem Einzugsgebiet ist festzustellen, dass nicht alle Teilflächen die gleichen naturräumlichen Eigenschaften aufweisen. Im Bezug auf die Untersuchung von Talmuren ist neben der Abflussbildung die Fähigkeit einer Fläche, Sediment in das Gerinne zu liefern, entscheidend. Um diesen Unterschieden bei der Sedimentlieferung Rechnung zu tragen, kann es wichtig sein, jede Teilfläche (jedes Pixel des Geländemodells) mit einer individuellen Gewichtung in die Modellierung einzubeziehen. So trägt z. B. eine steile und nahe am Gerinne liegende Fläche sicher mehr zur Sedimentlieferung in das Bachbett bei als eine flache – und müsste daher bei einer Modellierung höher gewichtet werden, als eine Ebene, die sich in einiger Entfernung zum Gerinne befindet. Bei der Betrachtung der Versickerungsraten wäre das aber genau umgekehrt (vgl. DÜSTER 1993; GAMMA 2000; WICHMANN 2006). Im Bezug auf das Modell müssen die potenziellen Lieferraten der einzelnen Pixel in Abhängigkeit vom Substrat, der Vegetationsbedeckung und den materialliefernden Prozessen, die auf den Pixeln ablaufen, betrachtet werden.

Da also nicht alle Flächen entlang des Gerinnes die gleichen Eigenschaften haben, werden sie auch nicht die gleichen Liefereigenschaften und Lieferraten haben. Diesem Unterschied kann durch eine unterschiedliche Gewichtung der Flächen Rechnung getragen werden. So werden zum Beispiel Flächen, die zu flach sind, um Geschiebe in den Bach (weiter) zu transportieren mit Null gewichtet, zählen also nicht zur geschieberelevanten Fläche.

Die durch die oben angegebenen Einstellungen festgelegte sediment spendende Fläche entlang eines Gerinnes wird deshalb nach ihrer jeweiligen Eigenschaft, Sediment zu liefern, gewichtet. WICHMANN (2006) unterscheidet dabei zwischen vegetationsfreien Flächen und vegetationsbedeckten Flächen. Außerdem gewichtet er Steilwände über 40°, Rutschungen und Sturzprozesse (Tab. 5.2).

Geschiebequelle	Gewicht	Datenquelle
vegetationsfreie Fläche	1,0	Vegetationskartierung
vegetationsbedeckte Fläche	0,2	Vegetationskartierung
Steilwände	0,2	Hangneigung > 40°
Rutschungen	0,5	Rutschmodell
Sturzprozesse	0,3	Sturzmodell

Tab. 5.2: Geschiebequellen, Gewicht und Methodik der Ausscheidung  
(WICHMANN 2006, S. 137)

Um den Weitertransport des Geschiebes in den Bach zu berücksichtigen, wird die Fläche entlang des Gerinnes aufsummiert. Dadurch ergibt sich das gewichtete sediment spendende Gebiet (SCA) oberhalb eines jeden Pixels im Gerinne. Jedes Pixel, das ein zu Murauslösung ausreichendes Verhältnis von Neigung und Größe des Einzugsgebiets hat und gleichzeitig eine genügend große gewichtete SCA besitzt, wird als potentieller Anriss ausgewiesen.

Die Einteilung des SCA in die verschiedenen Kategorien erscheint sinnvoll und nachvollziehbar. WICHMANN (2006) hat in seiner Arbeit nur Talmuren untersucht, die dem granularen Typ (vgl. TOGNACCA, 1999) zuzuordnen sind. Für diesen Murtyp ist die Verfügbarkeit von Schutt entscheidend, da bei einem intensiven Niederschlagsereignis in der Regel genügend Wasser im System vorhanden ist. Die Schuttproduktion im Hochgebirge wird vor allem durch Frostsprengung, aber auch andere erosive oder denudative Prozesse gesteuert. Auf vegetationsfreien Flächen treten diese Prozesse stärker auf, als auf den durch Vegetation geschützten. Gleichzeitig erfordert die für die Murgengese wichtige Mobilisierung des Schutts auf bewachsenen Hängen wesentlich mehr Energie. Damit ist eine deutliche Abwertung der Gewichtung bei vegetationsbedeckte Flächen sinnvoll.

Bei feinkörnigen Muren hingegen, die häufig in Gebieten mit rutschanfälligen Gesteinen vorkommen, stellt sich die Frage, ob eine Reduktion der Gewichtung von bewachsenen Flächen ebenfalls sinnvoll ist. WICHMANN übernimmt von HEINIMANN ET AL. (1998) auch die Gewichtung 0,5 für Rutschungen. Vor allem in Gebieten, die feinkörnige Muren hervorbringen, erscheint das dem Autor aber als zu niedrig, da bei den Geländebegehungen festgestellt wurde, dass in allen Gebieten (in rutschanfälligem Gestein) in denen Muren kartiert wurden, auch viele bewachsene Rutschungen im Gerinnebereich anzutreffen waren. Damit ist zwar nicht nachgewiesen, dass die Muren durch die Rutschungen verursacht wurden, aber eine murrehemmende Wirkung (also eine Reduzierung des Flächengewichts von 1,0 (vegetationsfrei) auf 0,5 (Rutschung) oder gar auf 0,2 (bei Vegetationsbedeckung) im Vergleich zu vegetationslosen Bereichen erscheint doch eher fraglich. Da das durch die Rutschung aufgearbeitete Material vermutlich mindestens genauso leicht erodiert werden kann, wie das von einer vegetationsfreien Fläche.

Die Abwertung von Steilhängen in Karen oder anderen offenen Flächen erscheint dem Autor für granulare Talmuren (anders als bei Hangmuren) vertretbar (siehe Kapitel 6).

## 5.2 Theorie Laufwege (DF HazardZonation)

Das zweite Modul des von WICHMANN (2006) auf Basis von PERLA ET AL. (1980) und GAMMA (2000) vorgestellten Modells dient der Simulation des Prozessbereichs; d. h. der Vorhersage von Lauflänge und Ausbreitung potentieller Talmuren. Als Eingangsdaten werden die Startpunkte verwendet, die mit dem Modul DF DispoChannel (siehe oben) berechnet werden. Das durch dieses Modul ausgegebene Grid kann direkt eingelesen und weiter verwendet werden.

### Funktionsweise

Die Berechnung des Prozessweges erfolgt auf Basis eines *random walk*, die Berechnung der Auslaufstrecke durch ein 2-Parameter Reibungsmodell. Der *random walk* wird auf der Basis des Grids durchgeführt und ähnelt dem *dfwalk-modell* von GAMMA (2000). Es basiert darauf, dass grundsätzlich alle Nachbarzellen, die tiefer liegen als die betrachtete Zelle (in einem zu betrachtenden 3x3 Zellen – Fenster) einen möglichen Fließweg darstellen. Die Anzahl der möglichen Nachfolgezellen wird durch zwei Faktoren eingegrenzt: dem Grenzgefälle (der Neigungswinkel, ab dem eine Ausbreitung möglich ist) und dem sogenannten Ausbreitungsexponent. Um ein Nachfolgepixel zu ermitteln, wird in einem ersten Schritt aus dem gewählten Grenzgefälle und der lokalen Neigung des betrachteten Pixels zum Nachbarpixel wird das Relativgefälle ( $\gamma_i$ ) ermittelt.

$$\gamma_i = \frac{\tan \beta_i}{\tan \beta_{\text{Grenz}}}, \dots \beta_i \geq 0, \quad i \in \{1,2,\dots,8\} \quad (5.2)$$

Das steilste Relativgefälle zu den umliegenden Pixeln ( $\gamma_{\text{max}}$ ) wird bestimmt mit:

$$\gamma_{\text{max}} = \max(\gamma_i) \quad (5.3)$$

Ist das größte Relativgefälle ( $\gamma_{\text{max}}$ ) größer als eins, kommt nur das Pixel als Nachfolger in Frage, zu dem die größte Neigung besteht. Ist das nicht der Fall werden alle Pixel in die Menge der möglichen Nachfolgepixel aufgenommen, deren Relativgefälle größer oder gleich ( $\gamma_{\text{max}}$ )<sup>a</sup> ist (wobei a der Ausbreitungsexponent ist und von WICHMANN mit 1,3 angesetzt wird). In steilen Geländeabschnitten folgt der Prozess damit dem größten Gefälle. In flachen Gebieten – unterhalb des im Modell frei wählbaren Grenzgefälles – sind praktisch alle niedrigeren Pixel als Nachfolger möglich; die Tendenz zur Ausbreitung der Mure nimmt damit zu. Da Talmuren tendenziell eher der Falllinie folgen, sollte eine Tendenz bestehen, dem steilsten Gefälle zu folgen. Die Sprungwahrscheinlichkeit (random walk) der möglichen Nachfolgepixel wird deshalb proportional zu ihrem Gefälle  $\beta_i$  berechnet (GAMMA 2000, WICHMANN 2006). Je steiler das Gefälle zum Pixel ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es als Nachfolger ausgewählt wird. Um der Trägheit der Massen Rechnung zu tragen und die Möglichkeit eines abrupten Richtungswechsels eines Murgangs zu reduzieren wird der sogenannte *Persistenzfaktor* eingeführt. Dadurch kann die Fließrichtung des Vorpixels mit in die Berechnung des Weges einbezogen werden. Durch den *Persistenzfaktor* steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel, welches in Fließrichtung liegt, als Nachfolger ausgewählt wird.

Um die Geschwindigkeit der simulierten Mure entlang des Prozesswegs zu berechnen, wird ein 2-Parameter Reibungsmodell verwendet. Es wurde ursprünglich von VOELLMY (1955) eingeführt, um die Reichweite von Lawinen zu modellieren und von PERLA et al. (1980) bzw. KÖRNER (1976, 1980) weiterentwickelt und für die Modellierung von Reichweite und Geschwindigkeit von Lawinen verwendet. PERLA ET AL. (1980) nehmen an, dass die Bewegung hauptsächlich durch den *Gleitreibungskoeffizienten*  $\mu$  sowie das Verhältnis *Masse zu Hemmung* ( $M/D$ ) gesteuert wird. RICKENMANN (1990) und ZIMMERMANN (1997) nutzten das Modell ebenfalls für Murgänge. Bei der Berechnung der Geschwindigkeit geht WICHMANN (2006) anders vor als ZIMMERMANN (1997) und GAMMA (2000). Während die beiden letztge-

nannten den Prozessweg vorab in längere Segmente aufteilen und die Geschwindigkeit für das gesamte Segment berechnen, berechnet WICHMANN (2006) sie, unter Einbeziehung der Geschwindigkeit des Vorpixels, Zelle für Zelle. Sobald der random walk eine neue Zelle des Prozessweges selektiert hat, wird für diese die neue Geschwindigkeit der Talmure berechnet. Der Prozess endet, wenn die Geschwindigkeit den Wert Null erreicht hat.

Bei jedem Durchlauf des Modells ergibt sich jeweils nur ein 1-Pixel-breiter Prozessweg. Da der Prozessweg aber an Hand von Wahrscheinlichkeiten berechnet wird, ergibt sich bei jedem neuen Durchlauf des Modells ein etwas anderer Laufweg. In steilen Gerinneabschnitten bleibt er eher gleich, in flachen weichen die einzelnen Durchläufe voneinander ab. Erst durch eine große Anzahl von Wiederholungen kann der gesamte Prozessraum abgebildet werden. Um den Prozessraum möglichst zur Gänze zu erfassen, werden 1000 Iterationen durchgeführt. In der vom Modell ausgegebenen Karte ist somit nicht nur der potentiell übermurtete Bereich zu sehen, sondern auch, wie oft einzelne Pixel in der Laufbahn der Talmure lagen. Damit kann der betroffene Bereich in Zonen unterschiedlicher Gefährdung eingeteilt werden. Es wird folglich keine Eintrittswahrscheinlichkeit berechnet, sondern eine durch das Modell und das Gelände vorbestimmte Durchgangshäufigkeit. Diese muss – auch politisch – anders als eine Eintrittswahrscheinlichkeit interpretiert werden.

Eine genaue Übersicht über das Modell geben WICHMANN & BECHT (2005) sowie WICHMANN (2006).

### **Mass-to drag und $\mu$**

Das oben angesprochene 2-Parameter Modell wird durch die zwei Koeffizienten  $\mu$  (Gleitreibungskoeffizient) und M/D (**mass-to-drag ratio** – das Verhältnis von Masse zu Hemmung) gesteuert. M/D ist ein Maß für die innere Reibung und beeinflusst hauptsächlich die Maximalgeschwindigkeit in steilen Teilen des Wegs, wohingegen  $\mu$  die Gleitreibung zwischen der sich bewegenden Masse und dem Untergrund beschreibt und die Geschwindigkeit in der Auslaufzone bestimmt.

ZIMMERMANN et al. (1997) stellten fest, dass weder  $\mu$  noch M/D von Anriss oder Gesamtvolumen des Murgangs abhängig sind. Dagegen weisen beide Parameter eine gewisse Abhängigkeit von der Kornverteilung auf. Nach GAMMA (2000) haben grobkörnige Muren eher höhere  $\mu$  und M/D – Werte als feinkörnige. Es kann aber kein exakter Zusammenhang festgestellt werden. Die Ergebnisse von COSTA (1984) weisen in eine ähnliche Richtung. Er stellt fest, dass der Tongehalt in Muren die Entwässerung und somit den Porenwasserdruck beeinflusst. Dadurch führt ein höherer Tongehalt zu einer größeren Reichweite. GAMMA (2000) stellt weiterhin fest, dass es einen Zusammenhang zwischen  $\mu$  und der Einzugsgebietsgröße (gemessen bis zum Kegelhals!) gibt; d.h. es ergeben sich eher niedrige  $\mu$  – Werte für größere Einzugsgebiete (vgl. RICKENMANN, 1991). Da mit der Größe des Einzugsgebiets auch die Abflussmenge steigt, scheint sich eine gewisse Verdünnung der Mure zu ergeben (ZIMMERMANN, 1991). Dadurch verlängert sich der Fließweg des Murgangs. Im 2 – Parameter-Modell hat  $\mu$  eine ähnliche Funktion. Durch die Veränderung von  $\mu$  kann den unterschiedlichen Verhältnissen der einzelnen Einzugsgebiete Rechnung getragen werden.

Bei jedem 2-Parameter-Modell besteht das Problem der mathematischen Redundanz. D.h., dass verschiedene Kombinationen von  $\mu$  und M/D zum gleichen Ergebnis führen können. Um diesem Problem aus dem Weg zu gehen, wird der Parameter M/D so festgelegt, dass sinnvolle Ergebnisse bei der Geschwindigkeitsmodellierung entstehen und die erzielte Maximalgeschwindigkeit – die M/D hauptsächlich beeinflusst – mit gemessenen Werten aus der Literatur übereinstimmt. Der so festgelegte Wert für M/D wird dann über den gesamten Prozessweg konstant gehalten. Die in der Literatur angegebenen typischen Geschwindigkeiten erreichen Werte von maximal 20m/s (COSTA 1984) bis 30m/s (RICKENMANN 1991). Um wie oben beschrieben, die Variablenkombinationen in der Modellierung zu verringern, setzt WICHMANN

(2006) M/D konstant auf 75m. Damit liegen die ausgewiesenen Maximalgeschwindigkeiten bei den von ihm untersuchten Talmuren in der Regel unter 20 m/s.

$\mu$  wird darauf hin so kalibriert, dass die beobachteten und die modellierten Reichweiten übereinstimmen. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass sich  $\mu$  während des Murgangs verändert, kann im Modell ein fester aber auch ein räumlich verteilter Wert für  $\mu$  angegeben werden, wobei sich letzterer aus der lokalen Einzugsgebietsgröße ableitet. Dadurch soll die unterschiedliche Rheologie bei höherem Abfluss berücksichtigt werden.

Die im Gelände vom Autor kartierten Ereignisse weisen eine stark unterschiedliche Magnitude auf. Diese kann auf Grund fehlender Niederschlagswerte nur schwer in eine Jährlichkeit eingeordnet werden. Auch wurden sowohl granulare wie auch viskose Talmuren aufgenommen, so dass die Reichweiten selbst bei vergleichbarer Magnitude stark variieren können. Neben dem unterschiedlichen Material unterscheiden sich die untersuchten Murgänge auch in der auslösenden Niederschlagsintensität und der Menge des zur Verfügung stehenden Materials. Aussagen über die Magnitude der Ereignisse oder über die Rekurrenz (kleine Ereignisse treten in der Regel öfters auf als Große) können deshalb nicht gemacht werden.

Es ist aber möglich, die Wiederkehrdauer durch die Reichweite der Murgänge zu ersetzen. Geht man davon aus, dass große Murgänge seltener sind und deutlich weiter laufen als kleine, kann die Magnitude ersetzt werden durch die unterschiedliche Lage der Murköpfe im Ablagerungsraum.

Je nach Endpunkt definiert GAMMA (2000) drei unterschiedliche Ereignisgrößen:

- Kleine Ereignisse, bei denen die Mure bereits am Kegelhals endet.
- Wahrscheinliche Ereignisse, bei denen die Mure eher im unteren Bereich des Kegels endet.
- Maximale Ereignisse, bei denen die Mure frühestens im unteren Kegelbereich, ggf. im Vorfluter endet.

Als Schätzfunktion leitet er folgende Funktionen ab:

Für maximale Ereignisse ( $GAMMA_{max}$ ):

$$\mu_{max} = 0,13 a^{-0,25} \dots\dots\dots (5.4)$$

mit  $0,045 < \mu < 0,3$

Für wahrscheinliche Ereignisse ( $GAMMA_{wahr}$ ):

$$\mu_{wahr} = 0,19 a^{-0,24} \dots\dots\dots (5.5)$$

Für minimale Ereignisse ( $GAMMA_{min}$ ):

$$\mu_{min} = 0,25 a^{-0,21} \dots\dots\dots (5.6)$$

Mit  $a$  = Fläche des Einzugsgebiet in  $km^2$

Da die Auflösung des DGM's eine Modellierung kleiner Muren nicht immer zulässt und deren Haltepunkte wegen der nachfolgenden Zerstörung durch Hochwasser oder weitere Muren nur selten identifiziert werden konnten, führt WICHMANN (2006) nur eine Kalibrierung des Modells an Hand der aufgenommenen und der maximalen Auslaufdistanzen durch (diese wird mit dem Ende des Kegels gleichgesetzt). Dabei stützt er sich sowohl auf eigene Untersuchungen wie auch auf solche aus der Schweiz.

Den Wertebereich von Gleichung (5.2) begrenzt GAMMA (2000) auf  $0,045 < \mu < 0,3$ . WICHMANN (2006) übernimmt die von Gamma gefundene Formel für maximale Ereignisse. Die von ihm untersuchten Muren laufen mit dem unteren Grenzwert aber noch zu weit. Mit einem begrenzten Wertebereich von  $0,15 < \mu < 0,3$  werden realistischere Ergebnisse für maximale Ereignisse erzielt; daraus ergibt sich:

Für maximale Ereignisse ( $\mu_{\text{wichmax}}$ ):

$$\mu_{\text{wichmax}} = 0,13 a^{-0,25} \dots\dots\dots (5.7)$$

mit  $0,15 < \mu < 0,3$

Mit dieser Formel kann Wichmann die im Gelände beobachteten Muren gut nachbilden. Ein ähnlich gutes Ergebnis erreicht er in seinen Untersuchungsgebieten auch mit einem, über die gesamte Laufstrecke einheitlichen Wert. Bei dem für das ganze Einzugsgebiet einheitlichen Wert von

$$\mu = 0,18$$

werden die kartierten Muren im Untersuchungsgebiet ebenfalls recht gut abgebildet.

Im Rahmen der weiteren Untersuchungen werden sowohl die Werte für maximale und wahrscheinliche Ereignisse von GAMMA (2000) als auch die Werte von WICHMANN (2006) für maximale Ereignisse sowie der einheitliche Wert  $\mu = 0,18$  überprüft.

## 6 Überprüfung und Anpassung der Gerinne und der Startpunkte

Zur Überprüfung des Modells werden in der folgenden Untersuchung alle Einzelschritte des Modells so durchgeführt, wie WICHMANN (2006) sie durchgeführt hat und überprüft. Stimmen die Ergebnisse der Einzelschritte mit den Geländebeobachtungen überein, werden die ursprünglichen Einstellungen des Modells als gesichert angesehen und übernommen. Ist dies nicht der Fall, werden die Modelleinstellungen verändert, so dass das jeweilige Ergebnis wieder mit der Geländebefunden übereinstimmt. Auf Grundlage der neuen Einstellungen wird dann weiter modelliert.

### 6.1 Modellierung des Gerinnenetzes

Die Grundlage der Abflussbildung und damit der Murentstehung bildet das Abflusssystem. Das für einen Murgang nötige Material wird im Laufe der Zeit durch die Rinnen und Runsen des Einzugsgebiets in den Vorfluter eingetragen. Damit fungiert das Gerinnesystem als Grundlage für die Entstehung von Talmuren. Eine möglichst naturgetreue Abbildung ist somit wichtig, um die Größe des Gebiets zu ermitteln, das potenziell Sediment für einen Murgang bereitstellt [die sog. Sediment Contributing Area (SCA), vgl. Kapitel 5]. Je nachdem, welche Werte zur Berechnung verwendet werden, unterscheiden sich die modellierten Gerinnenetze erheblich. WICHMANN (2006) verwendet zur Modellierung des Abflusssysteme eine Mindestbachlänge von 50 m sowie eine Mindestgröße des Einzugsgebiets von 10 000 m<sup>2</sup>. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird untersucht, ob diese Werte auch für andere Einzugsgebiete gelten und sich vor allem auch bei der Verwendung einer schlechteren räumlichen Auflösung eignen. Dabei ist die minimale Bachlänge nur schwer von der minimalen Größe des Einzugsgebiets zu trennen. Entscheidend ist, dass das berechnete Gewässernetz mit dem tatsächlichen übereinstimmt.

Zur Berechnung der Einzugsgebiete wurde das SAGA-Modul *Parallel Processing* angewendet, um die Einzugsgebietsgröße oberhalb eines jeden Pixels zu berechnen. Das SAGA-Modul *channel network* wird dann dazu herangezogen, um die Channel Heads (als Grenzwert wird hier die Einzugsgebietsgröße angegeben) auszuweisen. Dabei kann zusätzlich die Mindestbachlänge vorgegeben werden.

Wird der Schwellenwert der Einzugsgebietsgröße zu klein und/oder auch die Mindestbachlänge zu gering gewählt, wird vor allem an gestreckten Hängen eine große Anzahl Gerinne erster Ordnung ausgewiesen, die im Gelände nicht vorkommen (Abb. 6.1).

Um das zu verhindern und ein Ergebnis zu erhalten, das der topographischen Karte einigermaßen entspricht, ist eine Mindesteinzugsgebietsgröße von 10 000 m<sup>2</sup> nötig. Das entspricht dem Wert, der auch von WICHMANN (2006) verwendet wurde.

Bei dieser Größe des Einzugsgebiets ist die Mindestlänge des Gerinnes nicht mehr sehr entscheidend. Eine veränderte Mindestlänge der Gerinne ergibt nur noch marginale Unterschiede in den obersten Bereichen der Gebiete (Abb. 6.2). Meist entstehen bei kürzeren Mindestlängen vor allem in steilen Gebieten noch mehr Nebenbäche, die in der Realität nicht vorhanden sind. Daher wurde eine Mindestbachlänge von 10 Pixeln, also rund 250 m festgelegt.

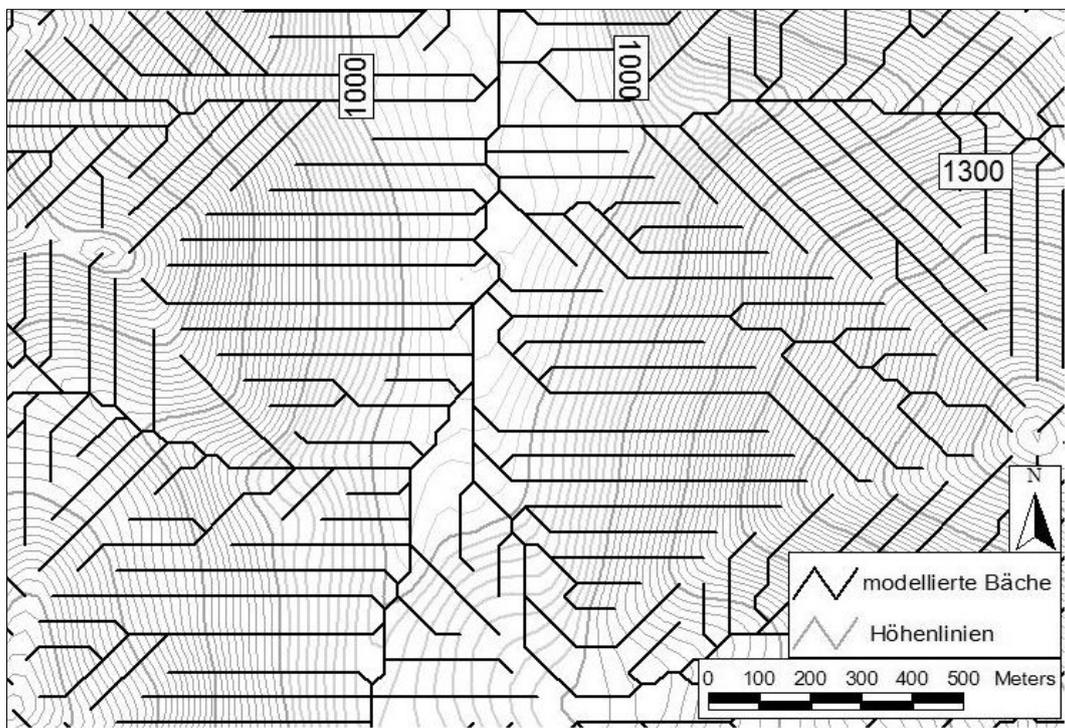


Abb. 6.1: Modellierte Bachläufe bei zu kleinen Schwellenwerten am Bsp. des Söllbachs; min. Bachlänge 250 m, min. Ezg-größe 3125 m<sup>2</sup>

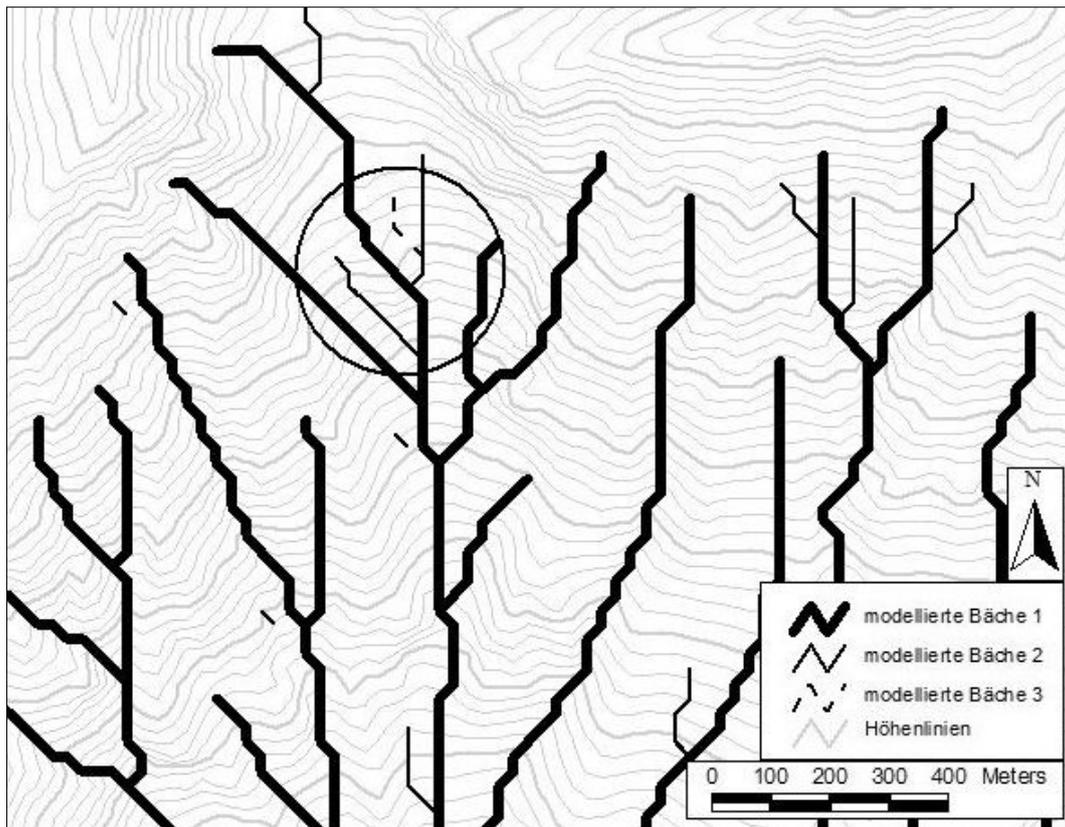


Abb. 6.2: Vergleich der Modellierung mit unterschiedlichen min. Gerinnelängen am Bsp. der Rumer Mure; Bäche 1: 10 Zellen; Bäche 2: 5 Zellen; Bäche 3: 2 Zellen

Dennoch ergeben sich bei der Ausweisung der Gerinne in einzelnen Einzugsgebieten Probleme. Hier werden die Schwierigkeiten mit der groben Auflösung des Geländemodells deutlich. Abbildung 6.3 veranschaulicht eine Situation im Bereich des Waxlriesgrabens. Die beiden Arme des Waxlriesgrabens fließen in der Realität eine gewisse Strecke nebeneinander her und vereinigen sich erst südlich des dazwischen liegenden Höhenrückens. Der angesprochene Höhenrücken wird allerdings durch einen weiteren Zufluss des östlichen Seitenarms angeschnitten. Aufgrund der schlechten räumlichen Auflösung des digitalen Höhenmodells kommt es bei der Ableitung des Gerinnesystems zu einer deutlichen Abweichung von der Realität.

Bei der Modellierung der Gerinne sucht das Programm, ausgehend von einem Höhenpunkt (in diesem Fall der Punkt 840,20 m), immer den der acht umliegenden Höhenpunkte (hier 816,10 m), zu dem das steilste Gefälle besteht. In dem angesprochenen Fall liegen der gewählte Höhenpunkt und somit auch das nächste durchflossene Pixel nicht mehr im westlichen Gerinne, sondern im östlichen. Die beiden Arme des Waxlriesgrabens vereinigen sich im Modell also wesentlich früher als in der Realität. Solche oder ähnliche sich aus dem groben Datenraster ergebende Probleme sind in drei der Untersuchungsgebiete zu finden. Die einzige Lösung besteht darin, die Höhe der Datenpunkte mit der Hand so zu manipulieren, dass sich die modellierte Abflusssituation der realen anpasst.

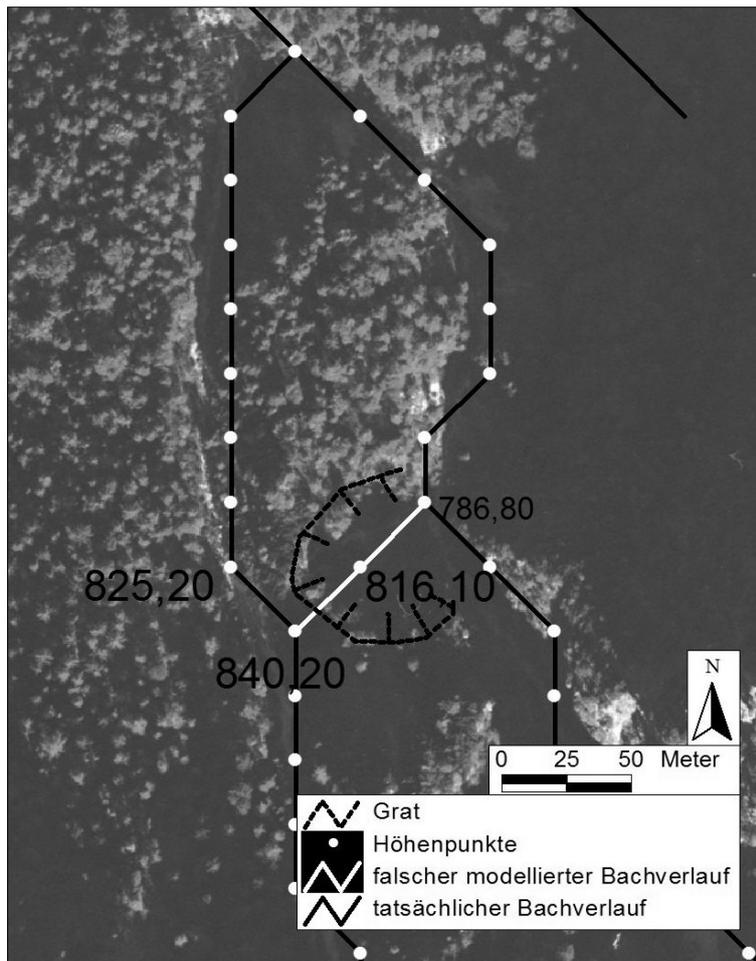


Abb. 6.3: Mögliche Fehler bei der Berechnung des Gerinnenetzes

### Die Horizontalwölbung

Wie bereits erwähnt, ist die korrekte Abbildung des Gerinnenetzes nicht nur für den potenziellen Weg der Muren wichtig, sondern auch für die Ausweisung der Anrisspunkte. Schutt ist eine der Grundvoraussetzungen zur Murgeneese. Anders formuliert: ist nicht ausreichend Schutt bzw. Lockermaterial vorhanden, entsteht ein Hochwasser und keine Mure (was aber im Umkehrschluss nicht bedeuten muss, dass immer eine Mure entsteht, wenn genügend Lockermaterial vorhanden ist). Sowohl das Gerinne selbst als auch dessen angrenzende Hänge sind dabei für die Schuttlieferung verantwortlich. Deshalb ist es entscheidend, nur Gerinne auszuweisen, die auch wirklich durchflossen werden. Auf Basis der ausgewiesenen Einzugsgebiete wird mit dem SAGA-Modul „channel network“ (CONRAD 2001) das Gerinnenetz berechnet. Dabei können im Modell allerdings auch Rinnen hauptsächlich in den oberen Bereichen der Einzugsgebiete ausgewiesen werden, die in der Realität nicht existieren oder sich kaum in den Hang eingeschnitten haben. Diese „Gerinne“ tragen indes nicht zum Input von Lockermaterial in das Abflusssystem bei. Sowohl bei WICHMANN (2006) als auch in der Arbeit von HEINIMANN (1988) werden deshalb Rinnen erster Ordnung, die keine entsprechende Horizontalwölbung aufweisen, eliminiert.

Die Horizontalwölbung (plan curvature) wird mit der Formel von ZEVENBERGEN & THORNE (1987) berechnet. Um einen geeigneten Schwellenwert für die Reklassifizierung der Horizontalwölbung zu finden, wurde mit verschiedenen Werten gerechnet. Bei einem Raster von 25 m und einem Höhenunterschied zwischen Randpixel ( $Z_1$  bzw.  $Z_3$ ) und Mittelpixel ( $Z_2$ ) von fünf Metern ergibt sich ein Wert für  $Z$  von **-0,016** und damit nur noch die Hälfte des von WICHMANN (2006) verwendeten Wertes (Abb. 6.4). Da sich die untersuchten Bäche bei Weitem

nicht immer so tief eingeschnitten haben, wurde auch mit einem Höhenunterschied von Mitte zu Rand von nur einem Meter gerechnet; dabei ergibt sich ein Wert für  $Z = -0,0032$  [also nur noch einem Zehntel des von WICHMANN (2006) verwendeten Wertes].

Der Versuch, das Abflusssystem auf Grundlage der Horizontalwölbung zu filtern, wurde mit den berechneten Wölbungswerten durchgeführt. Allerdings verschlechterte sich das Ergebnis bei allen Gebieten deutlich. Es fielen nicht nur große, mit Sicherheit durchflossene Nebenbäche weg, auch das Hauptgerinne wurde stellenweise unterbrochen (Abb. 6.4).

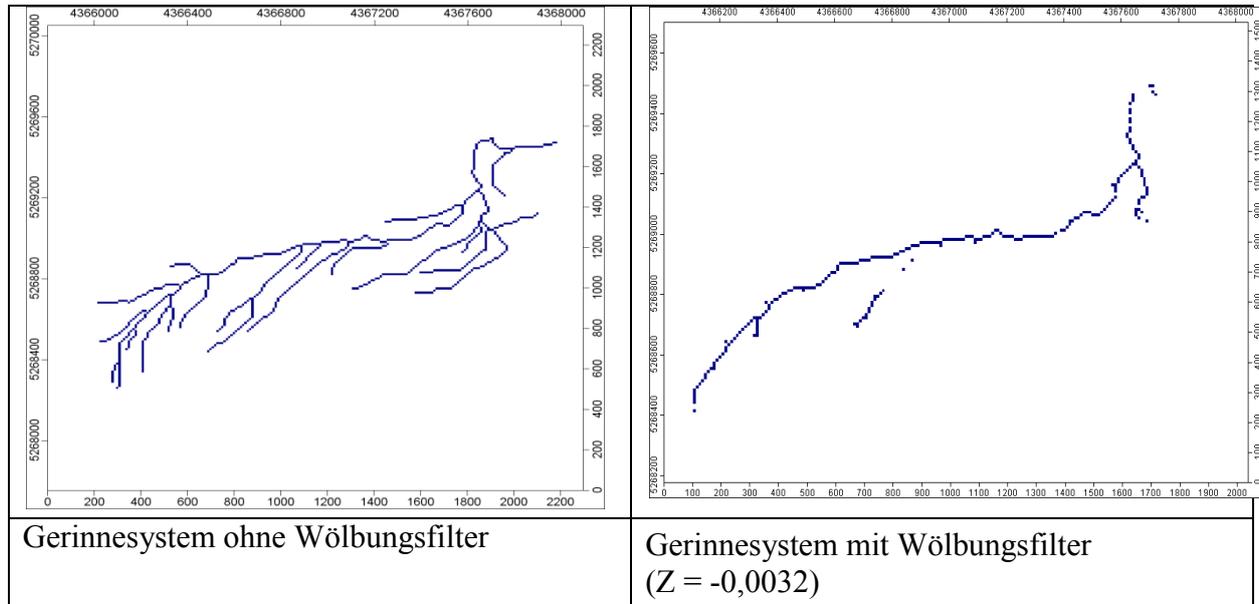


Abb. 6.4: Vergleich des berechneten Abflusssystems im Einzugsgebiet Altmummen ohne und mit Wölbungsfilter

Der Grund hierfür dürfte ebenfalls in der groben Auflösung des Geländemodells liegen. Ein Nebenbach mit einer Breite von 20-25 Metern – mithin der Breite eines Pixels – kommt in den Untersuchungsgebieten eher selten vor. Die Einschneidung des Gerinnes in den Hang wird also nur in den Fällen vom Geländemodell wiedergegeben, in denen sich ein Höhenpunkt genau im Gerinne befindet. Sind die Höhenpunkte des Höhenmodells so angeordnet, dass sie auf den Ufern liegen, wird im Geländemodell keine oder nur eine sehr geringe Horizontalwölbung dargestellt. Damit ergeben sich, je nach Lage der Rasterpunkte, zahlreiche gestreckte Hangbereiche, die beim Filtern herausfallen (Abb. 6.5).

Anhand der im Modell ausgewiesenen Rinnen wird indes die so genannte sedimentpendende Fläche (SCA) und damit indirekt auch die zur Verfügung stehende Menge an Schutt ausgewiesen (siehe Kap. 5). Insofern sollte sichergestellt sein, dass nur Rinnen in die Berechnungen einbezogen werden, die auch wirklich vorhanden sind; umgekehrt dürfen aber auch keine Rinnen wegfallen, die in der Realität vorhanden sind. Um das zu erreichen, wird das Gerinnenetz nicht mit der Horizontalwölbung verschnitten. Stattdessen wurde der Grenzwert der minimalen Länge der Gerinne auf 250 m erhöht. Damit ist davon auszugehen, dass das gesamte ausgewiesene Gerinnenetz auch tatsächlich Lockermaterial liefert. Das Ergebnis wurde in allen Untersuchungsgebieten anhand von Luftbildern qualitativ überprüft. Die modellierten Bäche stimmen bei den gewählten Einstellungen recht gut mit der Realität überein.

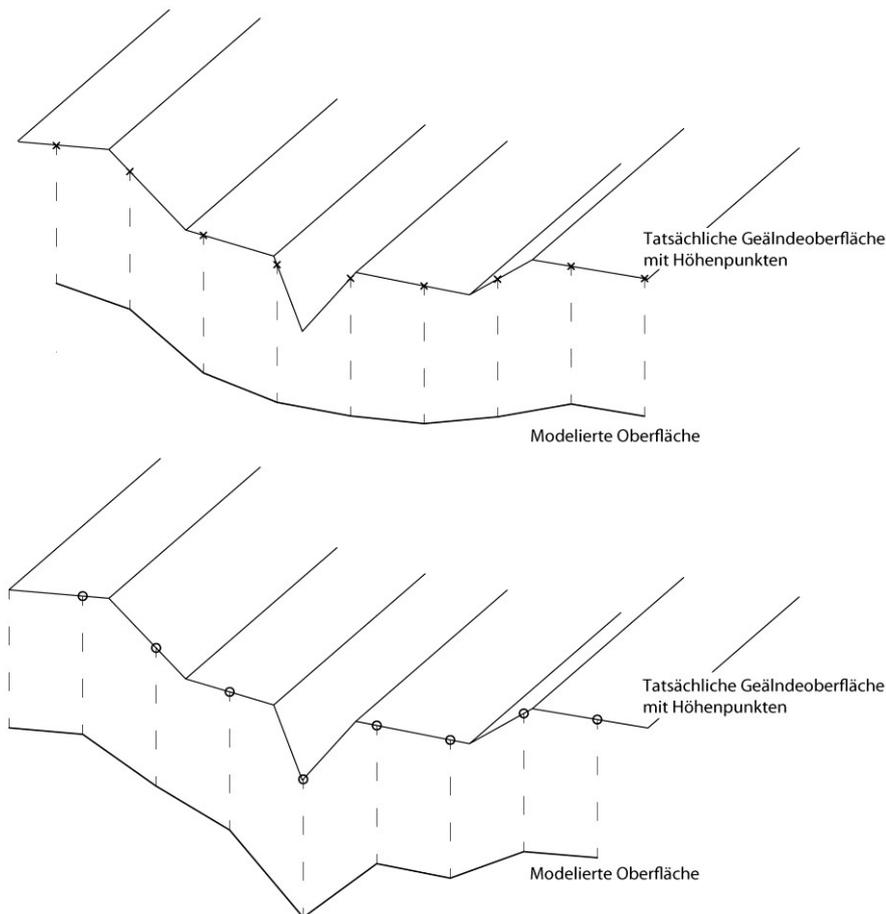


Abb. 6.5: Einfluss der Lage der Höhenpunkte auf das Ergebnis der Geländemodellierung

## 6.2 *DF DispoChannel: Berechnung der Startpunkte von Talmuren*

Um die Güte des Modells zu überprüfen, wird es – wie bereits erwähnt – in den untersuchten Gebieten mit den von WICHMANN (2006) vorgegebenen Einstellungen angewendet. Die Ergebnisse werden mit den vorgenommenen Kartierungen verglichen. Sollte es dabei zu einer größeren Abweichung der modellierten Ergebnisse von den realen – im Gelände kartierten – Murgängen kommen, kann diese durch veränderte Einstellungen des Modells ausgeglichen werden. Des Weiteren wird der Versuch unternommen, die petrogafischen Parameter, die bisher nicht in die Ergebnisse einfließt, mit in die Modellierung einzubeziehen.

Wird das Modul „*DF DispoChannel*“ angewendet, erhält man als Output ein neues Grid, in dem die potenziellen Startpunkte eingetragen sind („Starts“). Dabei werden alle Anrisse mit eins kodiert, alle anderen Pixel werden „noData“ gesetzt. Das ausgegebene Grid kann direkt als Eingangsdatensatz für das zweite Modul „*DF HazardZonation*“ (siehe unten) verwendet werden. Um das Ergebnis besser überprüfen und das Modell leichter kalibrieren zu können, werden von dem Modul noch weitere Datensätze ausgegeben. Das „Flow length“-Grid enthält die berechnete Fließlänge (in Metern) jeder Zelle zum Gerinne. Um die Sediment spendende Fläche auswerten zu können, wird ein Grid („SCA“) erstellt, das die bis zum betrachteten Pixel aufsummierte Fläche (in m<sup>2</sup>) enthält, die Sediment in das Gerinne liefert. In einem weiteren Grid („LDD“ local drainage direction) wird die Abflussrichtung jedes Pixels dargestellt. Dabei ist die Nordrichtung mit 0, NE mit 1, ... und NW mit 7 kodiert.

## 6.2.1 Ergebnisse der ersten Berechnung

Die Entstehung von Talmuren wird beeinflusst durch die Neigung, die Größe des Einzugsgebiets und der Sediment spendenden Fläche [(SCA) als Ersatzgröße für das vorhandene Geschiebe]. Die ersten beiden Faktoren sind durch das DGM sowie den Zusammenhang Neigung/Größe des Einzugsgebiets vorgegeben (vgl. Kap. 5). Das ist bei der SCA anders. Je nach den naturräumlichen Eigenschaften des Pixels ist seine Fähigkeit, Sediment zu liefern, unterschiedlich. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, können die einzelnen Pixel der SCA unterschiedlich gewichtet werden. Um den Einfluss der einzelnen Gewichtungsfaktoren [WICHMANN (2006) verwendet Vegetation und Neigung], die in die Modellierung einfließen, auf die Modellierung abschätzen zu können, wird die Startpunktberechnung sowohl ungewichtet als auch nur mit jeweils einem Faktor gewichtet ausgeführt.

Die Berechnung der Startpunkte mit ungewichteten Pixeln wird mit der Modellierung der vegetationsgewichteten sowie der neigungsgewichteten Flächen verglichen. Die teilweise deutlich unterschiedlichen Ergebnisse werden den im Gelände vermuteten Anrissen gegenübergestellt. In einem weiteren Schritt werden die Gewichtungen von Vegetation und Neigung überlagert und es wird die von WICHMANN (2006) gewählte Gewichtung überprüft. Dazu müssen die Layer von Vegetations- und Neigungsgewichtung verschnitten werden. Dabei stellt sich die Frage, wie mit Pixel umgegangen wird, bei denen sich der Wert der Pixel unterscheidet (z. B. vegetationsfrei = 1,0 und steil = 0,2). Um bei einer Anwendung des Modells am Ende die maximalen Prozessbereiche aufgezeigt zu bekommen, wird bei einer Überschneidung der Gewichtung, ebenso wie bei WICHMANN (2006) (mündl. Mitteilung), bei unterschiedlichen Werten immer der jeweils höchste Wert genommen.

Da die Rutschungen und die Sturzprozesse in der Arbeit von WICHMANN (2006) durch eigene, extra entwickelte Modelle ausgewiesen wurden, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, werden diese nicht weiter verfolgt.

### 6.2.1.1 Ungewichtete Berechnung

Bei der ungewichteten Berechnung der Sediment Contributing Area (SCA) wird jede Zelle mit dem Wert eins, d. h. mit 100 % gewertet, unabhängig von Neigung oder Vegetation. Die Menge des zur Verfügung stehenden Schutts und damit die Anzahl der modellierten Startpunkte ist bei dieser Einstellung des Modells die maximale, also potenziell eher (zu) hoch. Dabei muss noch einmal betont werden, dass die Lagebestimmung der Anrisspunkte nur sehr schwer zu überprüfen ist. Im Gelände selbst ist aufgrund der starken Zerstörungen bei einem Murgang bzw. dem meist nachfolgenden Hochwasser nur sehr selten ein eindeutiger Anrisspunkt auszumachen. Es konnte nur in einem Fall ein exakter Anrisspunkt aufgenommen werden (Abb. 6.6). In den anderen Gebieten können im besten Falle Bereiche kartiert werden, in denen ein Anriss vermutet wird. Bei der Modellierung der Startpunkte kann somit einzig überprüft werden, ob diese in den Bereichen liegen, die mit den vermuteten Anrissbereichen übereinstimmen. Erst durch den Umweg über die Ergebnisse der Modellierung der Prozesswege und der Ablagerungsbereiche können die Startpunkte anhand der Geländeergebnisse endgültig verifiziert werden, da die Ablagerungen im Gelände eindeutig nachgewiesen werden können. Sicher ist aber, dass in jedem Gerinne, in dem Murablagerungen gefunden werden, Anrisspunkte oberhalb der Ablagerungen ausgewiesen sein müssen.



Abb. 6.6: Möglicher Startpunkt einer Talmure bei Sonthofen, Allgäu

Für den Teil der Untersuchungsgebiete, in dem hauptsächlich granulare Talmuren abgehen (die Gebiete, in denen eher grob verwitterndes Gestein und wenig Feinmaterial zu finden ist), also für den Mühlauerbach, den Rumer Langenbach, die Rumer Mure, den Ehnbach und den Waxlriesgraben sowie den südlichen Teil des Gebiets Söllbach mit Ochsengraben, Raffelgraben, Rumpelgraben, Buchersulzgraben und Luckengraben ergibt die Modellierung der Anrisspunkte bei einem Vergleich mit den im Gelände vermuteten Auslösebereichen ein realistisches Bild. In allen Bereichen, in denen Anrisse vermutet werden, sowie oberhalb aller kartierten Murköpfe werden Startpunkte durch die Modellierung ausgewiesen. Bei den ungewichteten Modelldurchläufen werden indes vor allem in den steilen Felsbereichen nahe der oberen Einzugsgebietsgrenze deutlich zu viele Punkte ausgewiesen (Abb. 6.7). Zwar ist eine Murauslösung in diesen Arealen durchaus möglich und auch wahrscheinlich, es dürfte sich dann aber meist um Hangmuren (vgl. ZIMMERMANN ET AL. 1997) und nicht um die hier thematisierten Talmuren handeln. In den Tiefenlinien der Einzugsgebiete selbst finden sich ebenfalls deutlich zu viele Anrisspunkte. Vor allem im Einzugsgebiet des Mühlauerbachs, aber auch in den anderen Gebieten wird stellenweise jedes Pixel des Bachlaufs als potenzieller Anriss ausgewiesen.

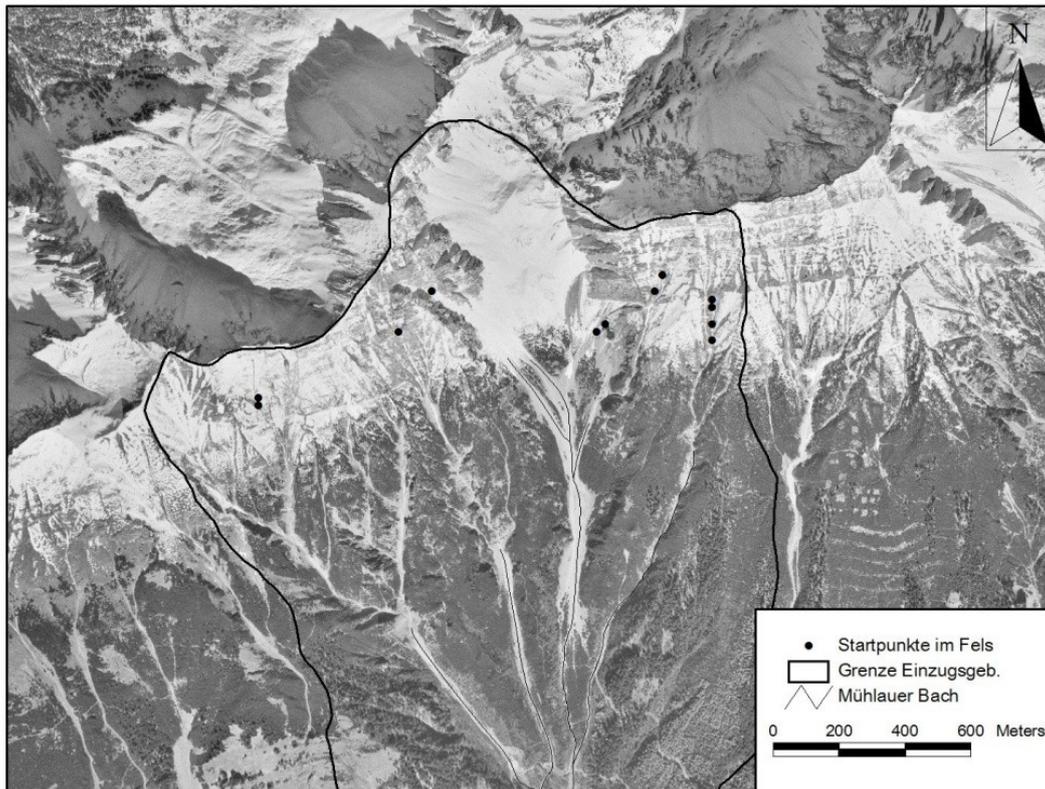


Abb. 6.7: Ausgewiesene Startpunkte im Fels des Mühlauer Bachs bei ungewichteter Modellierung

Im Söllbachgebiet werden mit den ungewichteten Einstellungen von WICHMANN (2006) lediglich teilweise gute Ergebnisse erzielt. In den Bereichen, in denen granulare Murgängen zu finden sind (Ochsen-, Raffel-, Rumpel-, Buchersulz- und Luckengraben), stimmen die modellierten Startpunkte mit den im Gelände vermuteten Bereichen überein (auch wenn sich hier teilweise ebenfalls zu viele Startpunkte ergeben). Ganz anders ist das Bild in Gebieten, in denen viskose Murgänge zu finden waren. Am auffälligsten ist dies im nördlichen Bereich des Söllbachgebiets. Im Aueralp-, Scheiben-, Neuhütten- und Stinkergraben ist kein einziger Anriss ausgewiesen. Das gleiche Bild ergibt sich in den Bächen östlich des Söllbachs (Kotlahnergraben, Wurzengraben).

Die Startpunktmodellierung im Heugraben ergibt im gesamten Gebiet nur einen einzigen Anrisspunkt (Abb. 6.8), was auf den ersten Blick zu wenig erscheint. Der berechnete Punkt entspricht aber den Gegebenheiten im Gelände. Bei dem Murgang im Heugraben handelt es sich um einen relativ kleinen Murgang (vgl. Kap.4). Bei der Geländeaufnahme war weder ein weiterer Anrissbereich noch ein Kegel am Übergang zum Vorfluter zu erkennen. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich im Gebiet ein deutlich größerer Murgang ereignet hat oder dass es zu häufigen Murgängen kommt, ist relativ gering. Dass im Modell lediglich ein Startpunkt ausgewiesen wird, erscheint vor diesem Hintergrund schlüssig.

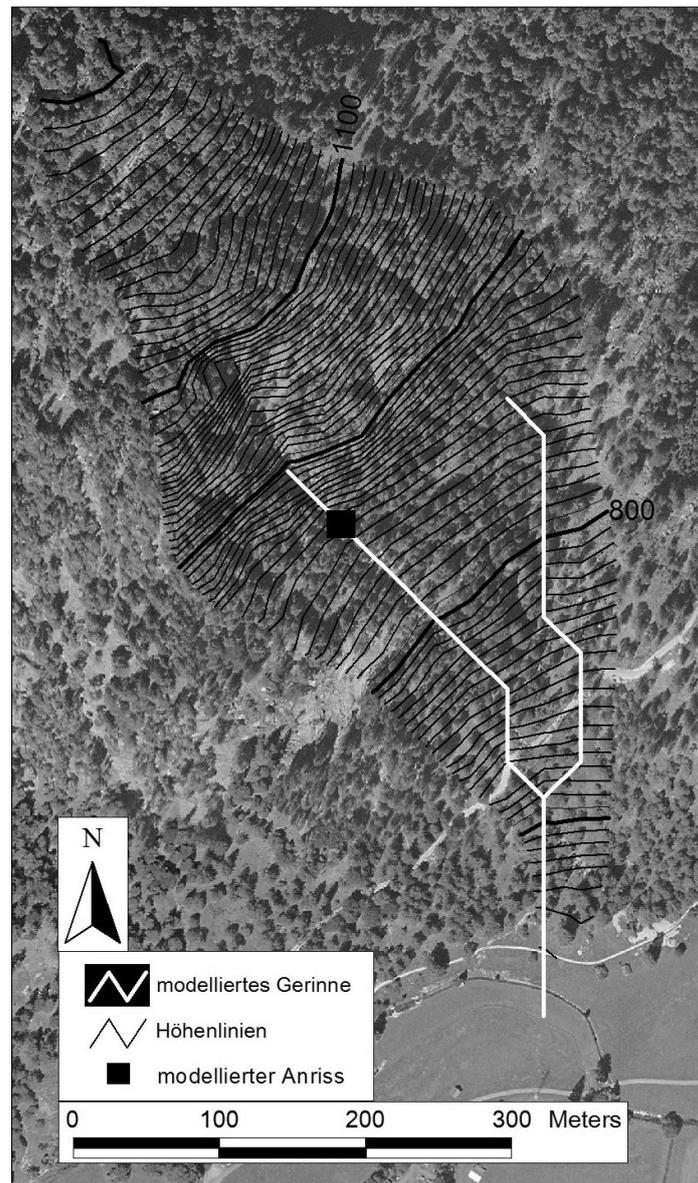


Abb. 6.8: Modellierter Anriss und kartierter Murkegel im Gebiet Heugraben

Das Einzugsgebiet Altmummen ist neben den Gebieten des Söllbachs (siehe oben) das einzige Gebiet, in dem bei der Modellierung kein Startpunkt ausgewiesen wird. Bei der Geländeaufnahme wurden scheinbar eindeutige Zeichen eines Murgangs gefunden. Sowohl die Größe der transportierten Steine als auch das Vorhandensein von Levées sprechen für den Abgang einer Mure (Abb. 6.9). Außerdem wurde im oberen Bereich des Bachs ein deutlicher Anriss gefunden (Abb. 6.6).

Da bei Eintreffen im Untersuchungsgebiet die Aufräumarbeiten bereits im Gange waren, kann es allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass eine Fehlbeurteilung auf Grund umfangreicher Baggararbeiten vorliegt, die zum Aufnahmezeitpunkt aber nicht zu erkennen waren. Die großen Steine könnten aus der zerstörten Uferverbauung stammen, die gefundenen Levées durch Baggar aufgeschüttet worden sein. Da das Modell hier keinen Startpunkt ausweist, wurden weitere Informationen über das Gebiet eingezogen. Der Informationsdienst Alpine Naturgefahren (IAN) des Bayerischen Landesamts für Umwelt bezeichnet das Ereignis als gchiebereiches Hochwasser und nicht als Talmure.

Im Einzugsgebiet des Altmummer Bachs kommt es laut IAN alle 10 bis 20 Jahre zu Hochwässern mit starker Geschiebeführung. Murgänge sind für diesen gut dokumentierten Bach nicht verzeichnet. Es ist also durchaus möglich, dass es sich bei dem kartierten Ereignis nicht um einen Murgang, sondern „nur“ um ein geschiebereiches Hochwasser handelt. Die gefundenen Zeichen für einen Murgang können tatsächlich auch anthropogen entstanden sein.



Abb. 6.9: Bereits geräumte Murablagerungen Altmummen/Allgäu

Anhand dieser offensichtlich falschen Kartierung kann jedoch auch die Güte des Modells gezeigt werden. Obwohl das Gebiet in der Annahme in die Untersuchung aufgenommen wurde, es handle sich um ein Murgebiet, wird von dem Modell auch bei einer Veränderung der Einstellung der Parameter kein Startpunkt ausgewiesen. Das Ergebnis der Startpunktberechnung wird durch die Geländeaufnahme des Bayerischen Landesamts für Umwelt bestätigt.

#### **6.2.1.2 Einfluss der Neigung**

Wird bei Modellierung der Anrisspunkte die SCA lediglich mit der Neigung der Gerinnehänge gewichtet, sind recht unterschiedliche Ergebnisse zu beobachten. In einigen Gebieten verbesserte sich das Ergebnis, in anderen sind kaum Veränderungen festzustellen. In einer dritten Gruppe wird das Ergebnis der Modellierung deutlich schlechter. Deutlich unterscheiden sich die Gebiete mit hauptsächlich rutschungsanfälligen Gesteinen und damit mit überwiegend viskosen Murgängen – bei denen sich das Ergebnis meist verschlechtert – und Gebiete, in denen granulare Murgänge entstehen, in denen die Ergebnisse besser werden. Sowohl im Bereich der Rumer Mure als auch im Ehnbachgebiet (Abb. 6.10), die in die zweite Gruppe gehören, fallen vor allem die Anrisse in den steilen und felsigen Bereichen nahe der oberen Einzugsgebietsgrenze weg (vgl. oben). Aufgrund der Geländesituation (Kare und Wände, die meist in Schuttkegeln enden) sind in diesen Bereichen nur Hangmuren zu finden, die meist schon nach wenigen Hundert Metern wieder zum Stillstand kommen. Zwar fallen auch einige Startpunkte in den Tiefenlinien der Täler weg, der Hauptteil ist aber im steilen Gelände zu finden. Das Modell ergibt für diese Gebiete mit Neigungsgewichtung bessere Ergebnisse.

Einzig der Bereich des Heugrabens (Garmisch-Partenkirchen) bildet eine Ausnahme. Die ungewichtete Modellierung der Startpunkte ergibt zwar einen einzigen Anrisspunkt (siehe

oben), dieser entfällt allerdings, sobald das Gebiet mit der Neigung gewichtet wird. Die hier kartierte Mure ist mit knapp  $1500 \text{ m}^2$  sowie einem Volumen von ca.  $500 \text{ m}^3$  relativ klein. Da am Knick zwischen Einzugsgebiet und Talboden des Vorfluters auch kein erkennbarer Kegel ausgebildet ist, liegt die Vermutung nahe, dass sich der Murgang lediglich durch eine optimale Konstellation der Auslösefaktoren ereignen konnte. Eine eindeutige Aussage über die Güte oder den Sinn der Neigungsgewichtung ist aus der Zusammenschau der Ergebnisse nicht zu treffen. Werden allein die Gebiete betrachtet, in denen granulare Talmuren beobachtet wurden, erscheint die von WICHMANN (2006) verwendete Gewichtung der Steilhänge von 0,2 für die Steilhänge über  $40^\circ$  schlüssig und sinnvoll.

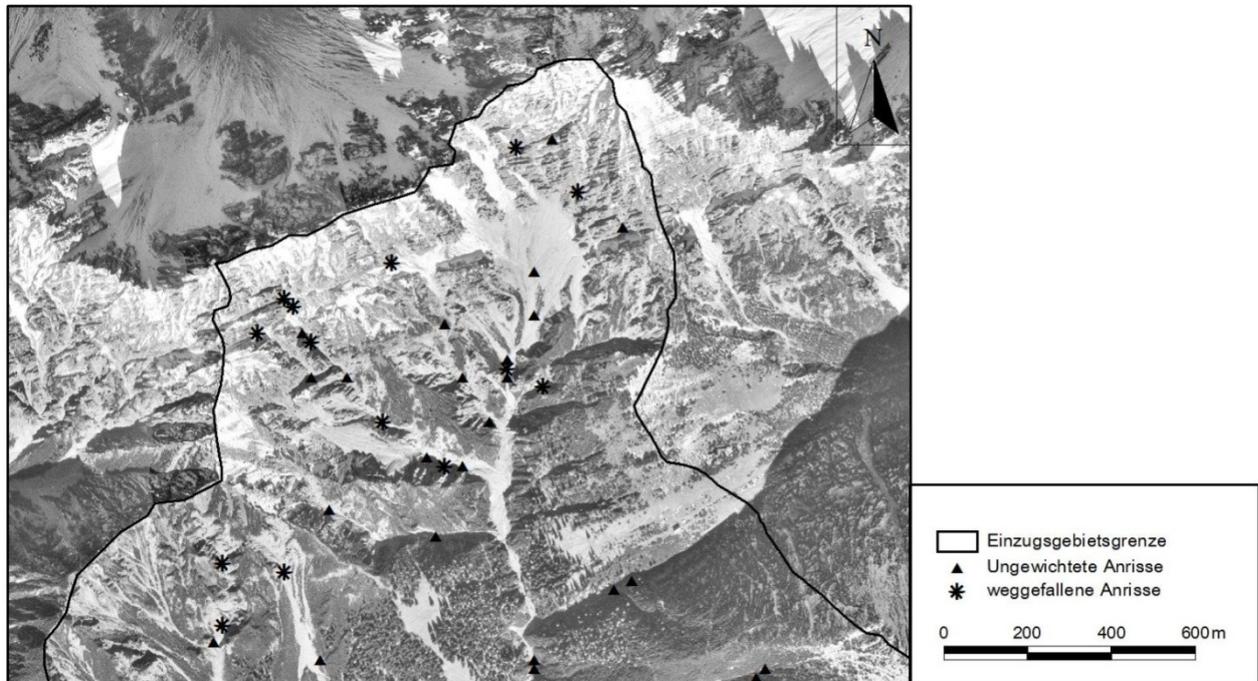


Abb. 6.10: Wegfallende Anrisspunkte nach der Neigungsgewichtung im Ehnbach

In Gebieten mit Gesteinen, die zu Rutschungen neigen, beeinflusst die Gewichtung mit der Neigung die Ausweisung von Startpunkten nicht oder verschlechtert sie sogar. Da in solchen Gebieten normalerweise eher sanfte Landschaftsformen vorkommen, sind nur wenige Flächen zu finden, die steiler als  $40^\circ$  sind; somit sind auch die Auswirkungen der Neigungsgewichtung nicht gravierend. Das zeigt sich in den infrage kommenden Einzugsgebieten des Söllbachbereichs. Zwischen der gewichteten und der ungewichteten Startpunktmodellierung gibt es keinen Unterschied.

Auch die Ergebnisse der Neigungsmodellierung scheinen den Unterschied zu bestätigen, der bereits bei der ungewichteten Startpunktberechnung festgestellt wurde. Um die Anrisspunkte der Talmuren korrekt zu erfassen, erscheint eine Unterscheidung zwischen Talmuren auf rutschungsanfälligem Gestein und nicht rutschungsanfälligem Gestein bzw. zwischen viskosen und granularen Talmuren sinnvoll.

### 6.2.1.3 Einfluss der Vegetation

In einem dritten Schritt wird die Modellierung lediglich mit der Gewichtung für die Vegetation durchgeführt. Dabei verschlechtert sich das Ergebnis in allen Gebieten deutlich. In den tiefer gelegenen und damit meist komplett bewaldeten Gebieten (alle Einzugsgebiete des Söllbachs, Heugraben, Altmmumen) entfallen praktisch alle Anrisspunkte. Die übrig gebliebenen Anrisspunkte entsprechen den Beobachtungen im Gelände nicht mehr. In den höher gelegenen Gebieten (Bereiche Ehnbach bzw. Rumer Mure) fallen vor allem die Anrisspunkte im Bachverlauf weg. Das würde bedeuten, dass Talmuren in diesen Einzugsgebieten nur im

Felsbereich anreißen. Das ist aber eher für Hangmuren typisch. Eine Auslösung von Talmuren durch die Einarbeitung von Geschiebe in ein Hochwasser wäre in diesen Gebieten nicht mehr möglich. Da dies aber eine Entstehungsart von Talmuren ist (z. B. GRIFFITHS ET AL. 1997) erscheint dieses Ergebnis nicht schlüssig. Der sowohl bei der ungewichteten wie der neigungsgewichteten Modellierung festzustellende Unterschied zwischen den Gebieten, die zu Rutschungen neigen, und den nicht rutschanfälligen ist bei der Gewichtung mit der Vegetation nicht mehr zu beobachten.

Das Ergebnis der Modellierung ist gleichmäßig schlecht. Eine Flächengewichtung nur anhand der Vegetation erscheint insofern nicht sinnvoll.

#### **6.2.1.4 Einfluss von Vegetation und Neigung**

Nach der Überprüfung der einzelnen Faktoren wird die Modellierung mit den von HEINIMANN ET AL. (1998) bzw. WICHMANN (2006) vorgeschlagenen Parameterwerten durchgeführt. Bei der Berechnung der Sediment spendenden Fläche werden die Pixel dementsprechend mit Vegetation und Neigung gewichtet. Kommt es bei der Verschneidung der Ebenen zu einer Überlagerung von Flächen mit unterschiedlichen Werten (z. B. Vegetation 0,2 und Neigung 1), wird – wie bereits erwähnt – der jeweils höhere Wert verwendet, um bei einer möglichen Ausweisung von Gefahrenzonen die maximal mögliche Fläche zu erhalten.

Die so erzielten Ergebnisse sind denen der ungewichteten Modellierung sehr ähnlich und bilden die gefundenen Talmuren gut ab (Abb. 6.11). Bei der Gewichtung der Flächen kommt es im Vergleich zu den ungewichteten Flächen zu einer „Abwertung“ der einzelnen Pixel. Wird bei der Verschneidung der einzelnen Layer der jeweils höhere Wert genommen, hebt sich diese Abwertung in großen Bereichen wieder auf. Das Ergebnis ist damit den ungewichteten zwangsläufig ähnlich. Das Ergebnis eines Murmodells sollte aber der möglichst gesamte potenziell gefährdete Raum sein, somit ist es nicht sinnvoll, mit zu geringen Werten zu arbeiten und so einen zu kleinen Prozessraum auszuweisen.

In vollständig bewachsenen Gebieten (die mit „0,2“ gewichtet sind) ist die Hangneigung selten größer als 40°. Damit relativiert sich auch das Problem der bewaldeten Gebiete, in denen bei der Gewichtung nur mit der Vegetation (siehe oben) praktisch alle Anrisse wegfallen würden. Durch die Überlagerung mit der Neigung ergibt sich erneut ein Wert von „1“, so dass auch hier ausreichend Startpixel ausgewiesen werden.

Andererseits treten jetzt in den steilen Felsbereichen auch wieder Startpixel auf, da dieser Bereich aufgrund der fehlenden Vegetation bei einer Verschneidung wieder mit „1“ statt „0,2“ gewichtet wird. In den Steilhängen und Karen oberhalb der Waldgrenze sind Muren zwar häufig, es handelt sich dabei aber meist um Hangmuren, die nicht Gegenstand der Untersuchung sind. Deshalb erscheint es sinnvoll, die Hangneigung im Falle einer Verschneidung als Ausschlusskriterium zu nehmen. Dadurch wird die Abwertung durch die Neigung nicht durch die Vegetationslosigkeit aufgehoben, und die Anrisse in den steilen Felsbereichen fallen weg. Hier stellt sich aber die Frage nach dem Grenzgefälle, ab welchem die Anrisse wegfallen sollen, da es auch in einzelnen Gerinneabschnitten steile Bereiche gibt, die im Gelände als bevorzugte Anrissbereiche erscheinen. Die Bereiche nahe der Einzugsgebietsgrenze, in denen häufig Hangmuren anreißen, sind meist geprägt durch eine Kombination aus Vegetationslosigkeit und Steilheit. Damit könnte eine Kombination der beiden Faktoren als Ausschlusskriterium gelten. Doch die gleiche Faktorenkombination gilt auch für Bereiche im Bachbett, an denen bevorzugt Talmuren anreißen. Ein einfacher Grenzwert oder auch die Kombination aus Neigung und Vegetationslosigkeit scheint somit nicht praktikabel

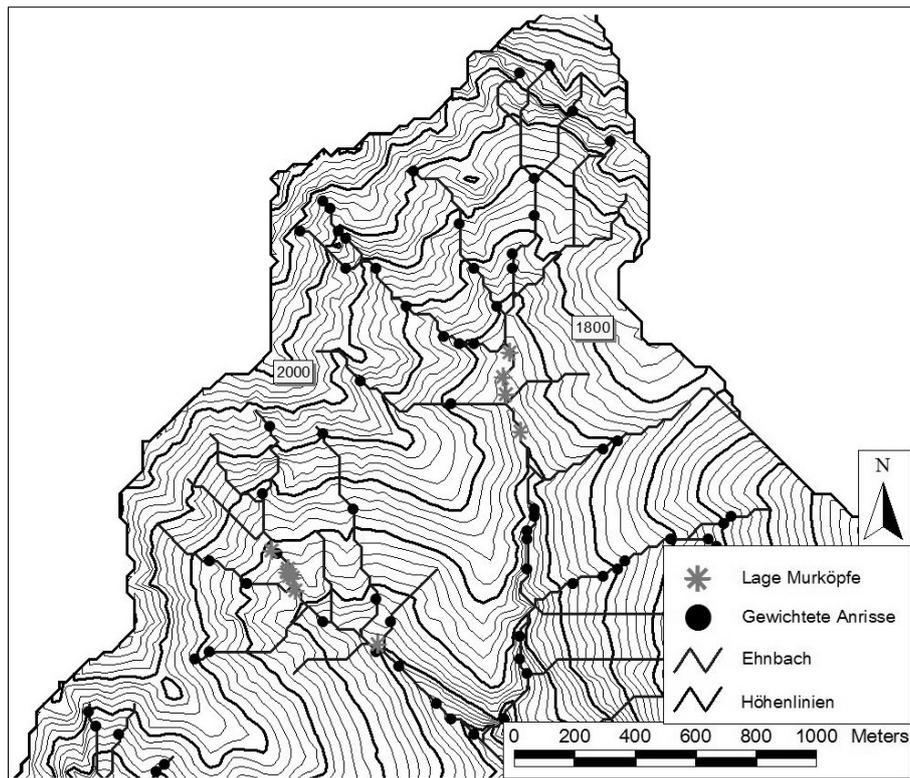


Abb. 6.11: Vergleich von modellierten Anrissen zu beobachteten Murköpfen im nördlichen Ehnbach

Des Weiteren ist festzustellen, dass im Bereich des Ehnbachs und der Rumer Mure ebenso wie im südlichen Teil des Söllbachs einige Pixel als Startpunkte wegfallen, die auch durch Beobachtungen im Gelände als Anrissgebiet sicher auszuschließen sind. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Bereiche, die entweder komplett im Fels oder in etwas flacheren, aber vollständig bewachsenen Flussabschnitten liegen. Die Modellierung mit der gewichteten SCA unterscheidet sich damit von der ungewichteten Modellierung nicht wesentlich, ist aber in einigen Bereichen leicht verbessert. Eine Gewichtung der SCA mit Vegetation und Neigung ist bei der Modellierung der Startpunkte in Gebieten mit granularen Muren also nachvollziehbar und sinnvoll.

Dagegen wird auch bei der Gewichtung mit Neigung und Vegetation deutlich, dass die Ergebnisse im Bereich des nördlichen Söllbachgebiets, in dem rutschanfällige Gesteine vorherrschen, wesentlich schlechter sind als in den übrigen Gebieten. Auch bei der gewichteten Modellierung ist die Startpunktberechnung in diesem Bereich nicht nachvollziehbar. In praktisch keinem Einzugsgebiet werden Anrisspunkte ausgewiesen (Abb. 6.12), auch nicht in den Gebieten, in denen es deutliche Spuren mehrerer Murereignisse gibt (Stinkergraben, Scheiben-graben, Kotlahnergraben).

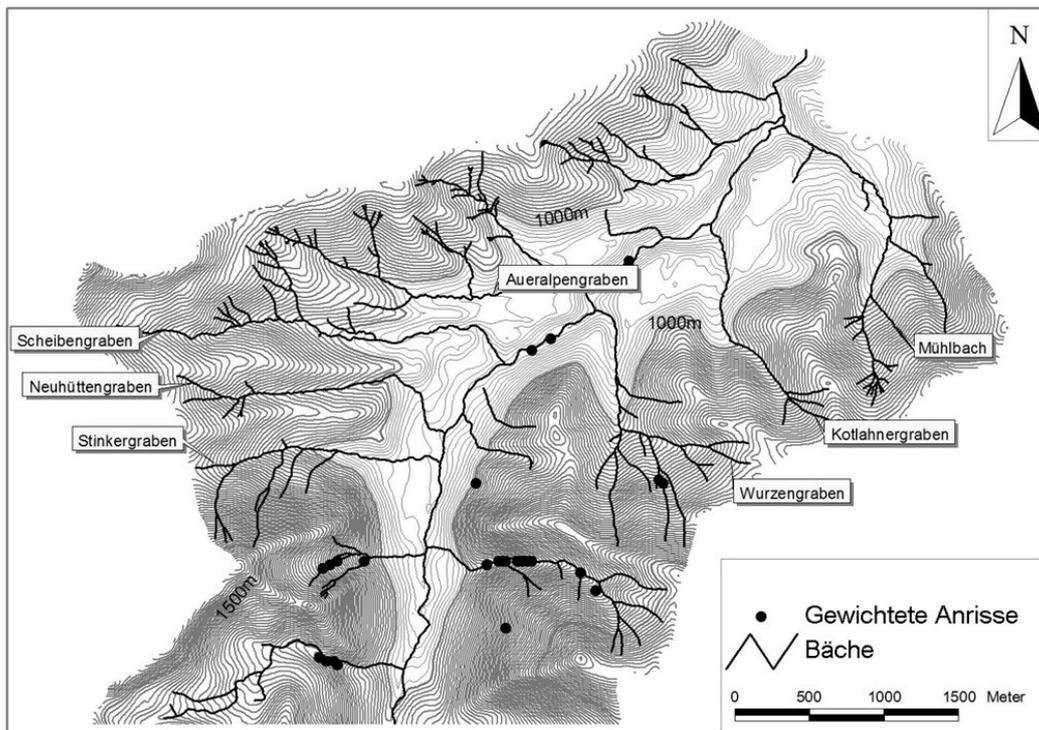


Abb. 6.12: Fehlende Anrisspunkte in den Einzugsgebieten des nördl. Bereichs des Söllbachs

### 6.2.2 Der Einfluss des Gesteins auf die Muranfälligkeit.

WICHMANN (2006) hat in seiner Gewichtung der SCA's keine Gewichtung anhand des Gesteins vorgenommen (eine Ausnahme bildet die Gewichtung der Rutschungen, die auch einen Hinweis auf eine bestimmte Geologie geben kann und mit einem eigenen Modell in die Berechnung einbezogen wird). Doch schon lange bevor der Versuch unternommen wurde, Murgänge bzw. deren Anriss- oder Ablagerungsgebiete zu modellieren, gab es Versuche, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Mure mit der Geologie in Zusammenhang zu bringen.

Einer der Ersten, die eine Korrelation von Geologie und Murgang hergestellt hat, war FRECH (1898, S. 4). Er schreibt: „Als Material für die Murbildung kommt in erster Linie der durch Verwitterung oder Gletscher gebildete Gebirgsschutt in Betracht. Sehr viel weniger häufig entstehen Wildbäche in den durch Seen und Bäche abgelagerten Schotterterrassen oder im anstehenden Gestein. Die Felsarten, welche durch die langsam vorschreitende chemische Zersetzung und Verwitterung in ihrer ganzen Masse aufgelöst und vermorscht werden, sind glücklicherweise im Hochgebirge selten.“

Für FRECH (1898) ist Kalkphyllit oder Kalkglimmerschiefer das muranfällige Gestein in seinem Untersuchungsgebiet, da sich hier der Kalk löst und so die Schuttproduktion stark erhöht ist. Außerdem hält er Schiefer für anfälliger als Dolomit.

Dass das anstehende Gestein ein wichtiger Faktor bei Geschiebelieferung ist – und damit auch dafür, das Murmaterial zur Verfügung zu stellen, verdeutlicht z.B. HEINIMANN (1998, S.124) hundert Jahre später: „Die für die Geschiebelieferung relevanten Rutschgebiete werden wenn möglich aus einer speziellen Rutschsimulation [...] oder aus einer Luftbildkartierung übernommen. Stehen solche Grundlagen nicht zur Verfügung, muss eine grobe Ausscheidung aufgrund der Hangneigung und der geologischen Eigenschaften erfolgen.“

Die Rolle des Gesteins bei der Murentstehung basiert auf der Tatsache, dass Muren neben Wildholz hauptsächlich aus Wasser und Geschiebe bestehen. Unterschiedliches Gestein reagiert sehr verschieden auf die äußeren Einflüsse wie Niederschlag, Frost, Vegetation o. Ä.;

damit ist auch die Bereitstellung der Schuttmenge, die in die Muren eingearbeitet werden kann, sehr verschieden. In einem Bach, der durch Granit läuft, ist die Menge an murfähigem Material, die pro Zeiteinheit zur Verfügung gestellt wird, also eine völlig andere als bei einem Bach, der durch Hauptdolomit oder vulkanische Aschen fließt. Insofern steht zu vermuten, dass das anstehende Gestein eine wichtige Rolle bei der Murfähigkeit von Bächen spielt (RIEGER 1999).

Um die Rolle der Geologie bei der Murgeneese zu untersuchen, muss folglich die Frage geklärt werden, inwieweit das anstehende Gestein Geschiebe für den Murgang bereitstellt. Daraus kann eine Gewichtung der Gesteine abgeleitet werden, die bei der Berechnung des Sediment spendenden Gebiets verwendet werden kann.

Die meisten Autoren betrachten deshalb die Gesteine zum einen nach ihrer Fähigkeit, Schutt zu produzieren, und zum anderen nach der Korngröße des produzierten Schutts. So gewichtet RIEGER (1999) in seiner Modellierung von Hangmuren Hauptdolomite und Plattenkalke deutlich höher als Raibler Schichten oder Granite.

Ähnliche Bewertungen der Gesteine finden sich bei STERLING & SLAYMAKER (2007), die vulkanische und Intrusivgesteine vergleichen, oder bei D'AGOSTINO & MARCHI (2001) bei ihrer Arbeit in den italienischen Alpen. Auch JAKOB & BOVIS (1996) wählen diesen Ansatz.

Solange sich die Murereignisse und deren Modellierung in grobkörnigem Material ereignen, ist die Einteilung vor dem Hintergrund der vorliegenden Modellierung der Startpunkte durchaus schlüssig. Da man – wie schon erwähnt – davon ausgehen kann, dass zur Auslösung von Talmuren zumindest in den Alpen (im Gegensatz zu Trockengebieten) immer wieder genügend Wasser zur Murauslösung vorhanden ist und damit der zur Verfügung stehende Schutt der limitierende Faktor ist, ergeben sich bei der Modellierung der Startpunkte bei granularen Talmuren gute Ergebnisse. Gleichwohl wird eine deutliche Verschlechterung der Startpunktberechnung festgestellt, wenn die Modellierung in Gebieten durchgeführt wird, in denen hauptsächlich rutschanfälliges Gestein ansteht.

#### **6.2.2.1 Einfluss des Gesteins bei der Berechnung der Sediment spendenden Fläche (SCA)**

Für die meisten der oben genannten Arbeiten wird als Grundlage eine geologische Karte verwendet. Das heißt, es wird bei der Flächengewichtung kaum unterschieden, ob es sich bei der kartierten Fläche um das Festgestein in seinem ursprünglichen oder in verwittertem Zustand handelt bzw. wie mächtig die Verwitterungsdecke ist. Eine Ausnahme bilden sicher die kartierten Flächen mit quartärem Schutt. Anhand von Luftbildern und Geländebegehungen können indes vegetationsfreie Flächen gleichen Ausgangsgesteins unterteilt werden in Flächen, auf denen (Jung-)Schutt liegt, und solche, auf denen keiner liegt, also blanker Fels ansteht. Entlang der Gerinne kann an erodierten Uferstellen auch die ungefähre Mächtigkeit der Verwitterungsdecke abgeschätzt werden.

Eine häufige Möglichkeit der Murgeneese besteht darin, dass sich die Feststoffkonzentration im Wasser durch Erosion des Bachbettes bzw. der Ufer ständig erhöht (z. B. GRIFFITHS ET AL. 1997; IVERSON ET AL. 1997). Unter diesem Gesichtspunkt kann die Rolle des Gesteins und damit die Gewichtung bei der Modellierung auch anders bewertet werden. Weder ein geschiebereiches Hochwasser noch ein Murgang dürften in der Lage sein, große Mengen Geschiebe von z. B. unverwittertem Hauptdolomit zu erodieren. Insofern ist eine hohe Gewichtung des Hauptdolomits unlogisch (immer unter der Voraussetzung, dass die Schuttflächen gesondert ausgewiesen sind). Für die Geschiebeaufnahme während eines Hochwassers oder eines Murgangs wäre dann – neben der Menge von bereits vorhandenem Schutt – nicht die Fähigkeit eines Gesteins, Schutt zu produzieren, von entscheidender Bedeutung, sondern der Umstand, wie mächtig die Verwitterungsdecke ist. Darüber existieren allerdings praktisch keine Daten. Eine vollständige Kartierung der Mächtigkeit der Verwitterungsdecke in einem oder gar mehreren Einzugsgebieten ist wegen des Arbeitsaufwands im Rahmen dieser Arbeit

nicht zu leisten. Ersatzweise kann die Mächtigkeit der Verwitterungsdecke über die Eigenschaften der anstehenden Gesteine abgeschätzt werden.

Geht man davon aus, dass vegetationslose Schuttflächen anhand von Luftbildern gesondert ausgewiesen werden können, stellt sich die Frage, wie bewaldete Flächen bewertet werden. Geologische Einheiten, wie die Allgäuer oder die Raibler Schichten müssten dann höher bewertet werden als Hauptdolomit oder Granit. Ein Murgang, der durch diese oder ähnlich rutschanfällige Gesteine fließt, ist sicher in der Lage, mehr Material zu erodieren und einzuarbeiten. Somit müssten diese Gesteine deutlich höher gewichtet werden, als z. B. massige Kalke.

Hinweise in diese Richtung finden auch GRIFFITHS ET AL. (1997) bei ihrer Untersuchung von Murgängen am Colorado.

Aufgrund der vorangegangenen Überlegungen wurde vom Autor in Zusammenarbeit im DR. M. TRAPPE (Geogr. Institut, Uni Eichstätt) für die Geologie eine Rangfolge der Erosivität erstellt. Für die Gewichtung wurden sechs gleichgroße Klassen gebildet. In den Untersuchungsgebieten wird die Geologie wie folgt gewichtet:

<b>Anstehendes Gestein</b>	<b>Gewichtung</b>
Sand-Tonstein – Wechselfolgen, Mergel-Tonstein – Wechselfolgen, Moräne, Hangschutt und anderes Lockergestein	1
Kalkmergelsteine	0,83
Sandsteine, Sand-Kalkstein – Wechsel Kalkmergel–Kalkstein – Wechsellage	0,66
Kalksteine bankig/plattig	0,5
Massige Dolomite	0,33
Massige Kalke	0,17

Tab. 6.1: Gewichtung der Gesteine nach Erodibilität durch Muren

#### **6.2.2.2 Einfluss des Gesteins bei der Gewichtung der SCA**

Wie bereits gezeigt, ist der Gedanke, das Anstehende in die Modellierung mit einzubeziehen, nicht neu. Um den Einfluss der Gewichtung anhand des Gesteins zu überprüfen, erfolgt in einem weiteren Schritt der Versuch, die SCA bei Startpunktberechnung nur mit der oben vorgestellten Einteilung des Gesteins zu gewichten.

Die Ergebnisse in den einzelnen Gebieten fallen sehr unterschiedlich aus, ein eindeutiger Trend ist nicht festzustellen. In einigen Gebieten fallen die entscheidenden Pixel ganz weg, so dass zu einem kartierten Murgang kein Anriss mehr ausgewiesen wird (z. B. Heugraben), in anderen wird die Zahl der ausgewiesenen Anrisspixel so stark reduziert, dass das Ergebnis auch hier als nicht mehr sinnvoll erachtet wird (Abb. 6.13), da zahlreiche Bereiche, die als mögliche Anrissgebiete kartiert wurden, nicht mehr in der Modellierung vorkommen. In einigen Gebieten hat die Gewichtung der SCA mit dem Gestein keine Auswirkungen.

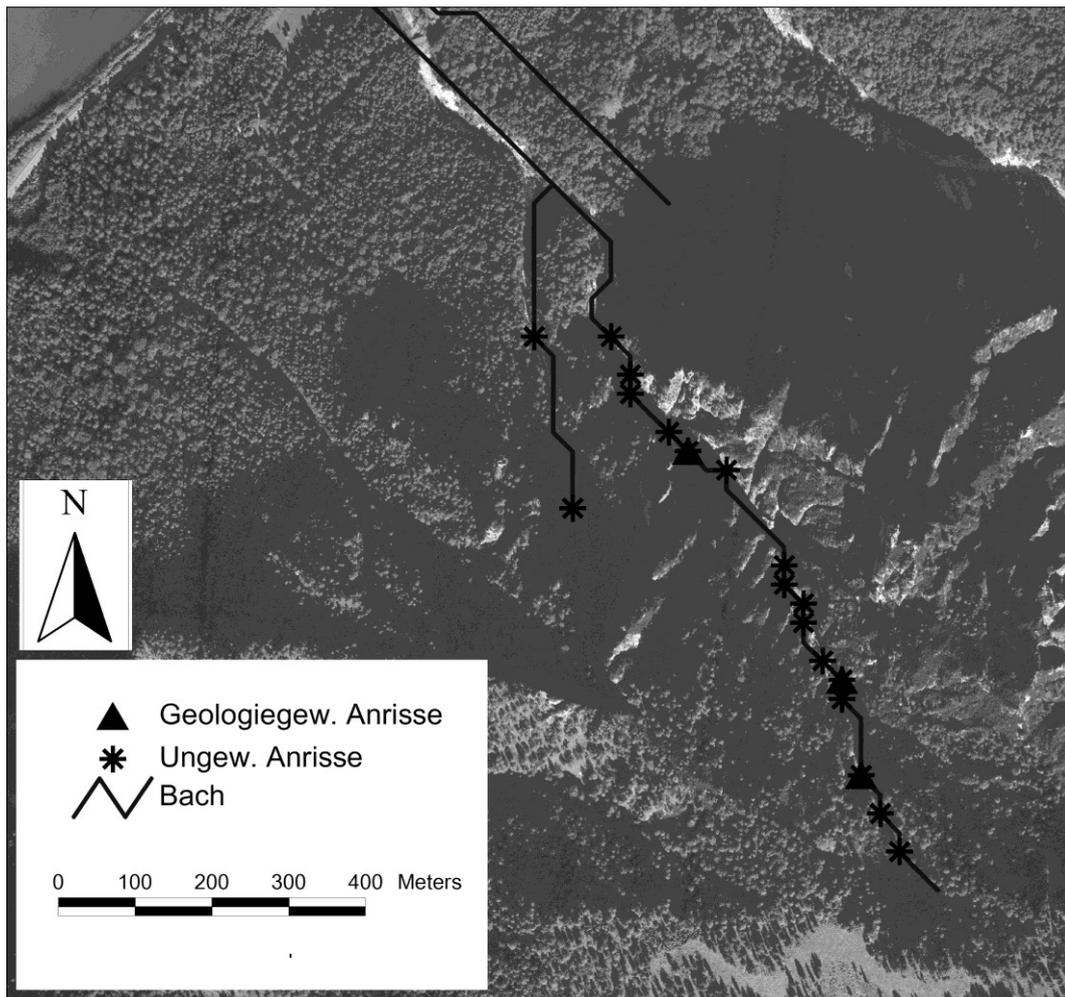


Abb. 6.13: Ausweisung eines Anrisspunktes mit bzw. ohne Gesteinsgewichtung am Bsp. Waxlriesgraben

Die Unterteilung der Gesteine nach ihrer Erosivität spiegelt sich weder in den Ergebnissen von ungewichteter noch in neigungsgewichteter Modellierung wider. Die Gründe für dieses „Nicht-Ergebnis“ können folgende vermutet werden.

- Zum einen spielt das grobe Geländemodell, das bei der gesamten Modellierung immer wieder zu Schwierigkeiten führt, sicher eine Rolle. Das Anstehende ändert sich in den Alpen oftmals kleinräumig, und die Gerinne orientieren sich häufig an Schwächezonen – also zum Beispiel an Stellen, an denen sich das Gestein ändert. Wird die Kartierung des Gesteins, das meist in Papierform oder digital in einem Shape-file vorliegt, in ein Raster-file umgewandelt – noch dazu in ein 25-Meter-Raster, kommt es zwangsläufig zu Ungenauigkeiten, wenn sich der Übergang von einem Gestein zum nächsten nicht mit einer Rasterzellengrenze deckt. Das dürfte jedoch nur sehr selten der Fall sein.
- Um die Rolle der Gesteine genau zu modellieren, müsste die Kartierung derselben sehr genau sein. Da die Geländeaufnahme der Gesteine sehr arbeitsintensiv ist und zudem auf Aufschlüsse im Gelände angewiesen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die geologischen Karten nicht immer pixelgenau sind.

Damit wird das Ergebnis verfälscht, vor allem wenn es in einem Wertebereich liegt, der nahe an der vom Modell geforderten minimalen SCA liegt. Dies gilt mit Sicherheit auch für die sich – im Vergleich zum Anstehenden– schnell verändernden Schutthalde. Über Luftbilder können diese zwar gut kartiert werden, sobald jedoch Vegetation über eine (inaktive) Halde gewachsen ist oder sich diese in einen Wald fortsetzt, wird es auch mit einem Luftbild unmöglich, die genauen Grenzen zu erkennen. Daraus resultieren weitere Ungenauigkeiten des Ergebnisses.

- Ein weiterer Aspekt kann sein, dass geologische Karten das anstehende Gestein abbilden. Spätglaziale Seetone, wie sie zum Beispiel im Söllbachgebiet entstanden sind, als der Inntalgletscher über den Achenpass floss und zusammen mit der Lokalvergletscherung das Zungenbecken des Tegernsees bildete (VOIGTLÄNDER 1980), werden in den Karten nicht ausgewiesen. Diese Seetone sind aber sicher für die vielen Rutschungen im Söllbachgebiet zumindest mit verantwortlich und stellen viel Feinmaterial für eine Talmure zur Verfügung. Auch sind in den geologischen Karten häufig keine Informationen hinsichtlich der Mächtigkeit der glazigenen Sedimente oder der Verwitterungsdecken enthalten.
- Ein weiteres Problem bei der Gewichtung anhand des Anstehenden dürfte sein, dass die Anrisspunkte der Talmuren nicht genau bestimmt werden können. Im Gegensatz zu Hangmuren, bei denen der Übergang von Fels (Einzugsgebiet) zum Schuttkegel (Transportbereich) als Anrisspunkt gilt (RIEGER 1999), sind bei Talmuren der bzw. die exakte(n) Anrisspunkt(e) nicht oder nur ungefähr bekannt. Selbst der Bereich, der durch die Geländeaufnahme eines Murgangs als möglicher Anriss identifiziert wurde, gilt lediglich für die jeweils kartierten und nicht für die Gesamtzahl aller vergangenen oder zukünftigen Muren. Über weitere Anrisspunkte im Bachbett können daher nur Vermutungen angestellt werden. Damit ist auch die Frage, ob sich das Modellierungsergebnis verbessert oder verschlechtert, wenn Anrisspunkte wegfallen oder dazukommen nur eher subjektiv einzuschätzen. Die Kenntnis des Geländes ist dabei sicher eine Hilfe, die sich aber nicht exakt erfassen lässt.

Mit Gewissheit ist eine Verschlechterung des Ergebnisses allein dann zu konstatieren, wenn alle Anrisspunkte oberhalb eines kartierten Murgangs wegfallen. Genau das ist aber in den meisten Untersuchungsgebieten festzustellen. Sobald bei der Modellierung der Anrisse die Sediment spendende Fläche mit dem Gestein gewichtet wird, fallen die Anrisspunkte oberhalb einer kartierten Mure weg. Aufgrund dieser Ergebnisse muss davon ausgegangen werden, dass die gewählte Gewichtung nicht zu einer Verbesserung bei der Ausweisung von Anrisspunkten führt.

### **6.2.2.3 Einfluss von Neigung, Vegetation und Gestein**

Der Versuch, neben Neigung und Vegetation (wie von GAMMA 2000 und WICHMANN 2006 vorgeschlagen) auch die Geologie in die Gebietsgewichtung mit einzubeziehen, erweist sich ebenfalls als nicht Ziel führend. Wie oben erwähnt, zeichnet sich die Geologie bei der Einbeziehung in die Gewichtung nicht durch. Bei dem Versuch, die drei Layer zu überlagern, ergibt sich ein Effekt, der die Einbeziehung der Geologie oder anderer zusätzlicher Gewichtungsfaktoren mehr oder weniger sinnlos macht. Im Normalfall ist es bei der Ausweisung von Gefahrenzonen wichtig, den maximal möglichen Prozessbereich zu ermitteln. Deshalb wird bei der Verschneidung der einzelnen Gewichtungsfaktoren immer der jeweils höhere Wert übernommen. Werden nun mehrere Gewichtungslayer übereinander gelegt und immer der höhere Wert übertragen, werden im resultierenden Layer die Flächen mit sehr hohen Werten (nahe Eins oder Eins) immer größer, sodass zum Schluss nicht mehr von einer Gewichtung gesprochen werden kann, da praktisch nur noch der Wert eins vorhanden ist. Dieser Effekt ist nicht allein auf die Geologie beschränkt, sondern dürfte sich wohl bei den meisten Layern einstellen, die mit in die Gewichtung einbezogen werden.

Dieser Effekt tritt in praktisch allen Gebieten auf, wenn Neigung, Vegetation und Gestein als Gewichtung der SCAs herangezogen werden. Bei der Startpunktmodellierung gibt es in keinem der Untersuchungsgebiete einen nachvollziehbaren Unterschied zwischen der ungewichteten Berechnung und der Gewichtung mit Neigung, Vegetation und Gestein.

Da sich durch die Einbeziehung des Gesteins nicht nur keine Verbesserung in der Modellierung der Startpunkte, sondern im Gegenteil bei einigen Gebieten eine Verschlechterung ergibt, muss zugunsten einer brauchbaren Modellierung auf die Einbeziehung der Geologie verzichtet werden. Es wird deshalb mit den Einstellungen gerechnet, die WICHMANN (2006) vorgibt und die SCA nur mit dem verschnittenen Layer von Vegetation und Neigung berechnet. Über alle Gebiete gesehen, werden hier die realistischsten Ergebnisse erzielt.

### **6.3 Einführung einer neuen Anrissformel**

Wie oben dargestellt, sind die Ergebnisse der durch das Modell ausgewiesenen Startpunkte von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet sehr unterschiedlich.

In einem Großteil der Untersuchungsgebiete stimmen die ausgewiesenen Anrisspunkte sowohl in der Lage als auch in ihrer Anzahl gut mit den im Gelände vermuteten Anrissen überein. In einigen Gebieten jedoch werden deutlich zu wenig oder überhaupt keine Anrisse ausgewiesen. Das betrifft hauptsächlich die Gebiete des Aueralpen-, Scheiben-, Neuhütten- und Stinkergraben (die alle im Bereich des Untersuchungsgebiets Söllbach liegen) sowie das Gebiet Altmummen. Dass es sich hierbei wirklich um eine Schwäche im Modell handelt, lässt sich mit Sicherheit nur in den Gebieten sagen, in denen Murköpfe gefunden wurden, aber kein Anrisspunkt ausgewiesen ist (Aueralp-, Neuhüttengraben und Altmummen). Für den Scheibengraben kann die auffallend niedrige Zahl der Anrisse aufgrund der Geländeaufnahme noch als möglich, wenn auch als wenig wahrscheinlich angenommen werden. Sowohl ZIMMERMANN (1997) als auch WICHMANN (2006) haben das Modell in eher steilerem Gelände entwickelt bzw. geeicht. Die genannten Gebiete sind deutlich flacher als die Untersuchungsgebiete von WICHMANN (2006). Es kann vermutet werden, dass das Modell in Gerinnen mit geringeren Neigungen andere Parametereinstellungen erforderlich macht.

Betrachtet man die Gebiete näher, ist festzustellen, dass die unterschiedliche Neigung zwischen den Gebieten, in denen das Modell ein gutes Ergebnis liefert, und denen mit einem schlechten Ergebnis auch eine Folge des Gesteins sein kann. In den Einzugsgebieten mit zu wenigen oder keinen Anrissen finden sich überwiegend stark rutschanfällige Gesteine [z. B. Raibler Schichten, Seetonlagen (Abb. 6.14)], in den anderen Gebieten stehen meist standfeste Gesteine an, die eher dazu neigen, Wände mit darunterliegenden Schutthalden zu bilden. Die oben angesprochene geringere Hangneigung kann damit auch eher eine Folge (der Gesteine) als Ursache für fehlende Anrisse sein.

In den besagten Gebieten finden sich sehr aktive Rutschungen, die sich teilweise auf einer Breite von bis zu 150 m bis in den Bachlauf erstrecken. Die Bäche sind zusätzlich zumindest in Teilen stark eingeschnitten. Dadurch kommt es zum einen bei Starkniederschlägen mit einer hohen Wasserführung zu einer deutlichen Unterschneidung der Prallhänge und zu einem Nachbrechen von Ufermaterial ins Gerinne. Zum anderen kann das durch die angesprochenen Rutschungen bereits gelockerte Material schnell erodiert und weiter transportiert werden. Dadurch ist der Feinmaterialanteil in den so ausgelösten Murgängen sehr hoch, wie eine Untersuchung der abgelagerten Murköpfe ergab. In den von WICHMANN (2006) untersuchten Tal-muren ist dies nicht der Fall (freundl. mündl. Mitt.). Bei ihm handelt es sich um granulare Muren.



Abb. 6.14: Seetonlage im nördlichen Söllbach

Der Zusammenhang zwischen Größe des Einzugsgebiets und kritischer Neigung bei der Murauslösung, auf dem die Startpunktberechnung des Modells basiert, fußt auf der Arbeit von ZIMMERMANN ET AL. (1997). Zusätzlich zu dem Diagramm über die Beziehung Einzugsgebietsgröße/Neigung wird noch eine Abbildung mit den Materialklassen vorgestellt (Abb. 6.15). Unter der in die Datenpunkte eingepassten Kurve sind noch einige Murgänge eingetragen, die durch Verklausung entstanden und als feinkörnige Muren ausgewiesen sind und nicht durch die Gleichung erfasst werden. Dabei handelt es sich vor allem um Gebiete, die größer als ein Quadratkilometer und durch den Bruch einer Verklausung entstanden sind. Leider werden auch im Text keine Angaben über die Art der Verklausung (Wildholz, Geschiebe, Rutschung o. Ä.) gemacht. Talmuren entstehen häufig durch eine Verflüssigung von Rutschungen, deren Rutschmasse im Gerinne liegt (dieses folglich verklaust) und die meist viel Feinmaterial für den Murgang zur Verfügung stellen. Da die angegebene Formel nicht oder nur eingeschränkt für Talmuren gilt, die durch Verklausungen entstanden sind, kann vermutet werden, dass die angegebene Beziehung auch für Talmuren mit einem hohen Feinmaterialanteil, der aus Rutschungen gespeiste wird, lediglich eingeschränkt gilt.

Einen weiteren Hinweis auf eine möglicherweise nötige Unterscheidung der Einzugsgebiete nach Gesteinen geben HEINIMANN ET AL. (1998, S. 126) in den Erläuterungen zu der von ihnen vorgeschlagenen Formel zur Ermittlung des Grenzgefälles. „Nach heutiger Kenntnis können Murgänge in Gerinnen bei Neigungen zwischen 20 und 80 % anreißen.“ Weiter im Text präzisieren die Autoren die Aussage wie folgt: „In Gerinnen mit einem geringen Feinmaterialanteil beträgt das minimale Grenzgefälle 27 %, vorausgesetzt der notwendige Abfluss ist vorhanden“ (S. 126). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Murgänge mit einem hohen Feinmaterialanteil früher anreißen können als grobkörnige (mindesten zwischen 20 und 27 % Neigung).

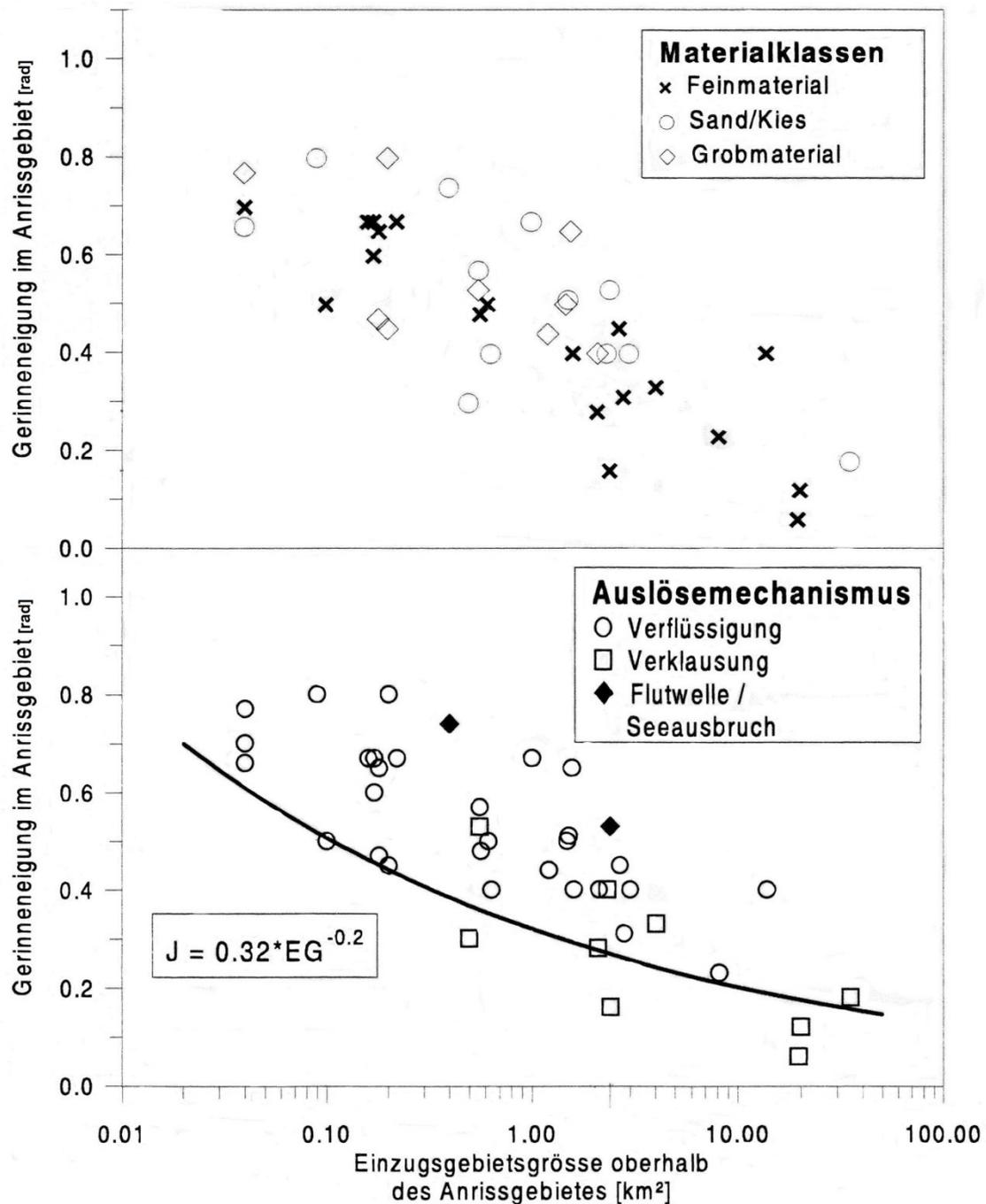


Abb. 6.15: Charakteristik der Muranrisse im Gerinne bezüglich der Materialeigenschaften (oben) und der Art der Auslösemechanismen (unten) (ZIMMERMANN ET AL. 1997, S.52)

Um auch in Gebieten mit rutschenfälligen Gesteinen bzw. hohem Feinmaterialanteil ein gutes Ergebnis (bzw. überhaupt ein Ergebnis) bei der Startpunktmodellierung zu erlangen, wird im folgenden die gesamte Datenbasis von ZIMMERMANN ET AL. (1997) um die kartierten Einzugsgebiete ergänzt. In die Datenpunkte der gesamten Murereignisse wird eine neue Kurve per Hand so eingepasst, dass sowohl die zuvor von Zimmermann nicht berücksichtigten Muren mit einbezogen werden als auch die der eigenen Gebiete, in denen das Ergebnis der Anrissmodellierung ungenügend war.

Ein erster Versuch wurde durchgeführt mit

$$J_{\text{neu1}} = 0,2 * (a)^{(-0,25)} \quad (6.1)$$

mit:  $J$  = Kritische Neigung [%]  
 $a$  = Größe des Einzugsgebiets [ $\text{km}^2$ ]

In Abbildung 6.16 ist zu sehen, dass alle vermuteten Anrisspunkte der eigenen Gebiete – bis auf den Neuhüttengraben – auf oder innerhalb der Kurve liegen. Von den von Zimmermann kartierten Anrissen liegen immerhin drei der fünf vermutlich rutschungsbedingten Anrisse oberhalb der Kurve. Damit wird zumindest einmal die nötige Anrissneigung überschritten, und die Ausweisung eines potenziellen Startpunktes für Talmuren ist möglich.

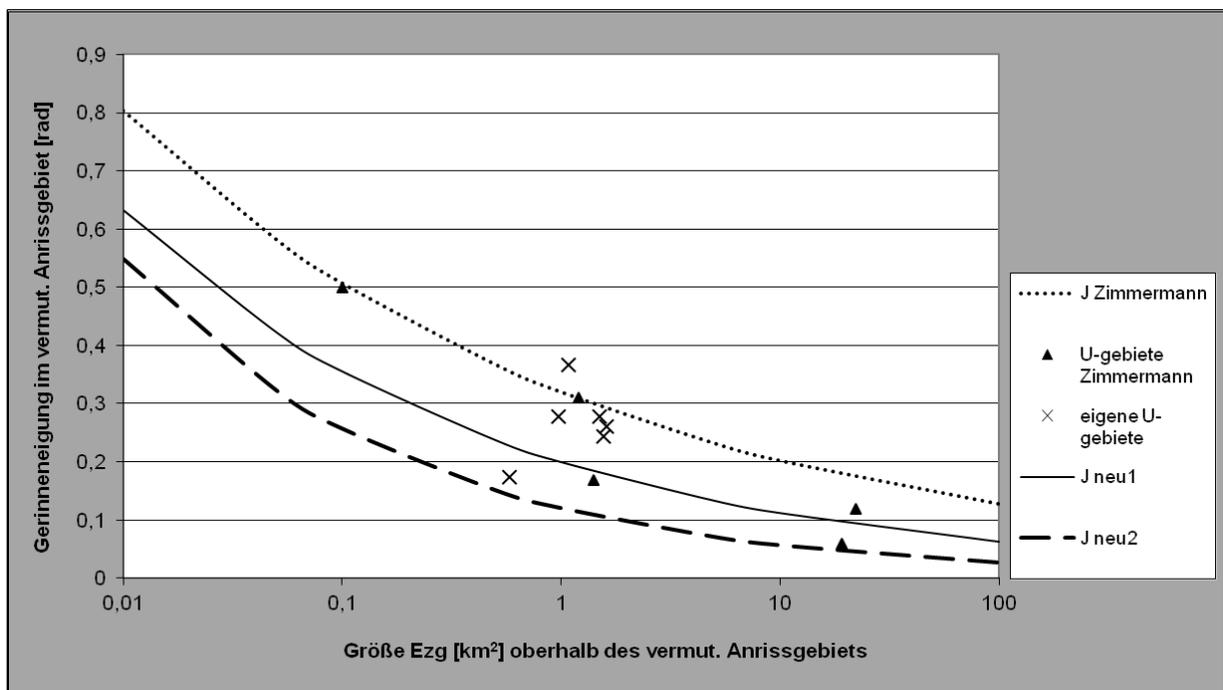


Abb. 6.16: Vergleich der Funktionsgeraden zur Berechnung der Startpunkte

Mittels einer weiteren Änderung in den Parametern der Formel 6.1 erfolgt der Versuch, alle im Diagramm angegebenen Startpunkte einzubeziehen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass in allen Gebieten, in denen Muren kartiert sind, auch mindestens ein Anrisspunkt ausgewiesen wird.

Mit der Formel

$$J_{\text{neu2}} = 0,13 * (a)^{(-0,33)} \quad (6.2)$$

mit:  $J$  = Kritische Neigung [%]  
 $a$  = Größe des Einzugsgebiets [ $\text{km}^2$ ]

wird diese Bedingung erfüllt, ohne dass der Verlauf der Kurve zu stark verändert wird.

Um zu überprüfen, ob die neue Formel sinnvolle Ergebnisse ergibt, werden in den Gebieten des Söllbachs die potenziellen Startpunkte testweise mit den beiden neuen Formeln berechnet und mit den übrigen Ergebnissen verglichen.

## Die Ergebnisse mit angepasster Funktion

Wird bei der Berechnung der Startpunkte im nördlichen Söllbach die neue Formel  $J_{\text{neu1}}$  für die Startpunktberechnung angewendet, ergibt sich ein verändertes Bild, das dem im Gelände beobachteten deutlich näher kommt. Im Aueralp- und Scheibengraben ergibt sich zwar jeweils ein Anrisspunkt, dieser liegt aber jeweils in einem Bereich, der bei der Geländeaufnahme als möglicher Anrissbereich kartiert wurde. Damit wird in allen Gebieten mindestens ein Anriss ausgewiesen. Die Zahl der Anrisse ist in einigen Gräben noch eher gering. Dennoch werden auch im Stinkergraben, in dem die südlichen Nebenbäche deutliche Spuren einer Talmure enthielten, Anrisse ausgewiesen.

Die einzigen Ausnahmen bilden der Neuhüttengraben und das Gebiet Altmummen. Bei der Geländeaufnahme im Neuhüttengraben wurde allerdings festgestellt, dass eine Mure, die im unteren Bachlauf kartiert wurde, durch den Bruch einer Geschiebesperre initiiert wurde. WICHMANN (2006) betont in seiner Arbeit, dass das Modell nicht für diese Fälle geeignet ist. Die fehlenden Anrisse der Murgänge im oberen Bereich des Einzugsgebiets können so aber nicht erklärt werden.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass in den nordöstlichen Gebieten des Söllbachs eine Übereinstimmung von im Gelände vermuteten und modellierten Anrissen festzustellen ist (Abb. 6.17). In allen nordwestlichen Gebieten ist die Anzahl der modellierten Anrisse aber vermutlich noch zu niedrig. Zum einen finden sich deutlich weniger Anrisspunkte, als im Gelände erwartet, zum anderen finden sich in jedem der besagten Gebiete (inkl. des Neuhüttengrabens) Murköpfe auch oberhalb des bzw. der berechneten Anrisse. Die hier aufgefundenen Muren können also mit dem Modell nicht vollständig erklärt werden. Das Ergebnis ist somit noch nicht ganz befriedigend.

Wird dagegen die zweite neue Formel ( $J_{\text{neu2}}$ ) gewählt, die noch niedrigere Werte ausgibt, wird die Anzahl der Startpunkte in den Gebieten östlich des Söllbachs so groß, dass es nicht mehr realistisch erscheint. Mit  $J_{\text{neu2}}$  wird zwar auch im Neuhüttengraben ein Startpunkt ausgewiesen, gleichzeitig verschlechtert sich das Ergebnis in den übrigen Gebieten deutlich. Nicht nur, dass sich offensichtlich zu viele Anrisse ergeben (teilweise gilt jedes Pixel im Bachlauf als Startpunkt), es werden auch in fast allen Gebieten an den Anfängen der Bäche Startpunkte ausgewiesen. Bei der Geländeaufnahme konnten Anrisse an den meisten dieser Stellen aber sicher ausgeschlossen werden. Damit scheidet die Formel  $J_{\text{neu2}}$  bei der Berechnung der potenziellen Anrisspunkte aus. Der möglichen Verbesserung in wenigen Gebieten steht eine deutliche Verschlechterung in vielen gegenüber.

Deutlich wird allerdings, dass in Einzugsgebieten, in denen viskose Talmuren entstehen, eine andere Formel zur Berechnung der potenziellen Startpunkte angewendet werden muss. Die Originalformel von ZIMMERMANN ET AL. (1997) ist für diese Gebiete nicht sensibel genug. Damit werden zu wenige Anrisspunkte ausgewiesen. Erst bei einem kleineren Wert für  $J$  ergibt sich eine ausreichend große Anzahl möglicher Anrisspunkte. Eine Unterscheidung zwischen viskosen und granularen Talmuren bei der Modellierung scheint somit vonnöten.

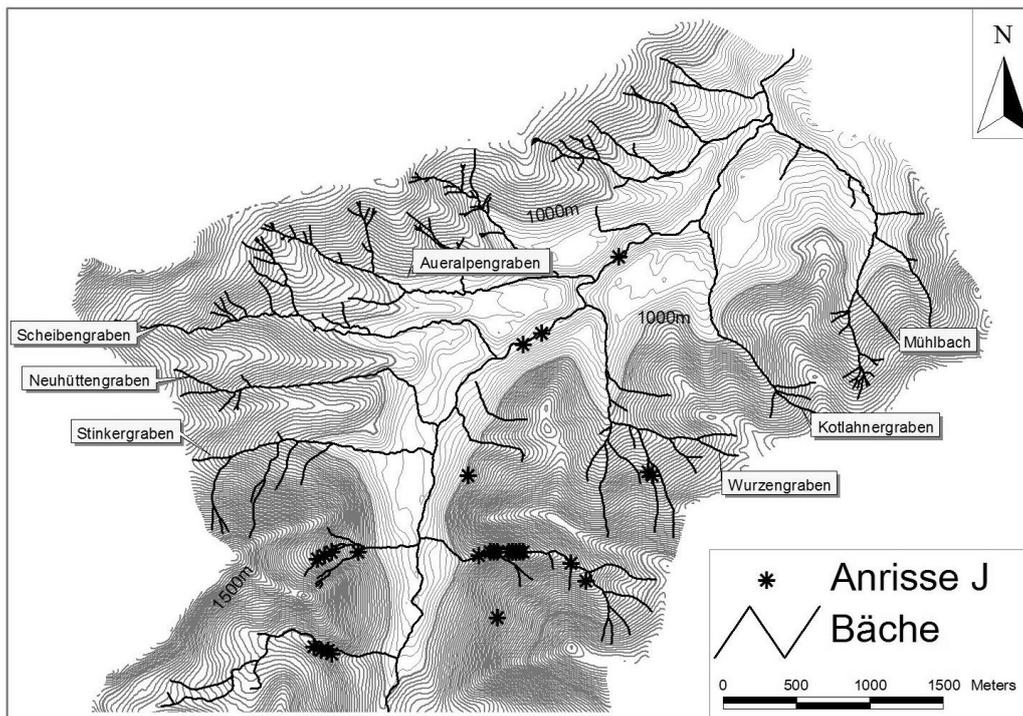
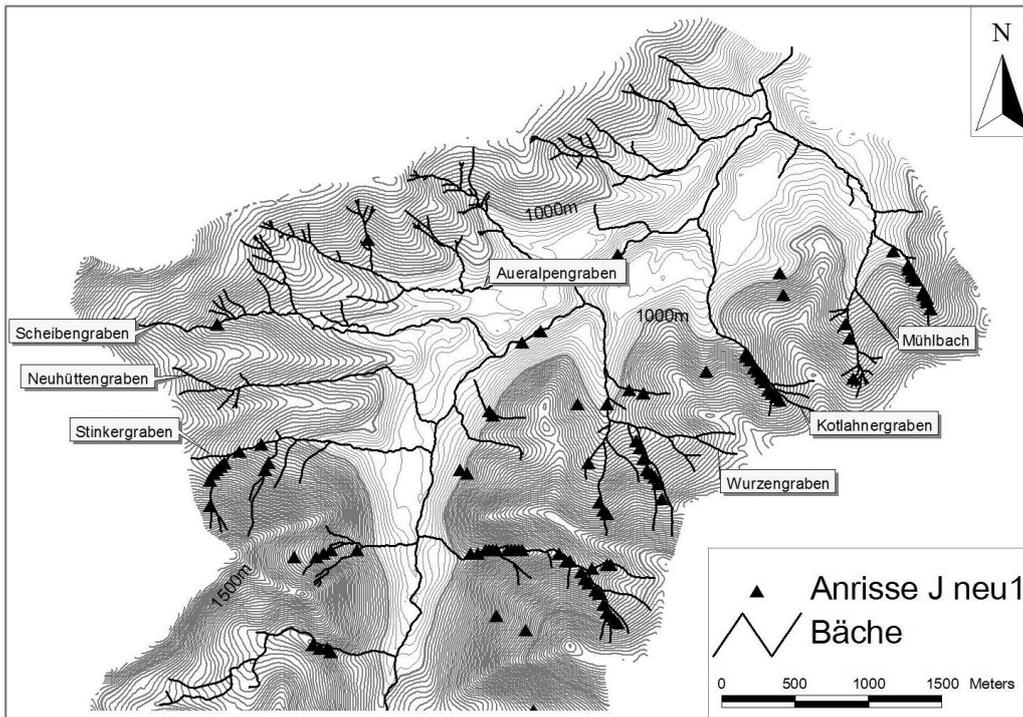


Abb. 6.17: Anrisspunkte im Vergleich der unterschiedlichen Anrissformeln

## 7 Ergebnisse der Modellierung von Reichweite und Prozessraum

Um auch das zweite Teilmodell von WICHMANN (2006) zu überprüfen, wird das „Hazard zonation“-Modul zunächst in allen Untersuchungsgebieten mit den von WICHMANN (2006) verwendeten Werten angewendet (siehe Tab. 7.1). Anschließend werden die vorgegebenen Einstellungen des Modells verändert und die Resultate auf eine mögliche Verbesserung hin überprüft.

Bei allen Modellierungsversuchen mit dem „Hazard zonation“-Modul kann festgestellt werden, dass eine Veränderung der Parameter **Persistenzfaktor** und **Ausbreitungsexponent** kaum ins Gewicht fällt. Der Persistenzfaktor legt fest, wie stark die Richtung eines Murgangs bei der Auswahl des Nachfolgepixels beibehalten wird. Der Ausbreitungsexponent steuert die Ausbreitung der Talmure in die Fläche (siehe Kap. 5). Beim „Hazard zonation“-Modul wird ein Murgang mindestens 1000-mal von demselben Startpixel aus modelliert. Da jedes Pixel des Laufwegs anhand von Wahrscheinlichkeiten ausgewählt wird, kann jeder der 1000 Durchgänge zu einem etwas anderen Verlauf kommen. Somit sollte als Endergebnis die gesamte mögliche betroffene Fläche ausgewiesen werden. Der Persistenzfaktor hat nur untergeordnete Bedeutung. WICHMANN (2006, S. 145) schreibt dazu: „Der Persistenzfaktor hat aufgrund der Berechnung von 1000 Iterationen kaum eine Auswirkung auf das Modellergebnis.“ Durch die starke Einschneidung der Gerinne und die vergleichsweise großen Pixel von 25 m Kantenlänge kann die seitliche Ausbreitung im Bachlauf kaum mehr als zwei Pixel betragen. Selbst eine starke Veränderung sowohl des Persistenzfaktors als auch des Ausbreitungsexponenten führt bei der Modellierung der Untersuchungsgebiete im Extremfall lediglich zu einer Abweichung des Prozessweges um 3 Pixel, was innerhalb der Ungenauigkeit des Modells liegt.

Zusätzlich zum Ausbreitungsexponenten kann im Modell noch das **Grenzgefälle** angegeben werden, ab dem ein Ausbrechen aus dem Gerinne und eine Ausbreitung in die Fläche möglich sind. In den meisten Untersuchungsgebieten wurden die Murablagerungen noch innerhalb der Tiefenlinie gefunden. Wird das Grenzgefälle verändert, bricht die Talmure in fast allen Einzugsgebieten aus dem Bachbett aus. Bei geringeren Winkeln bleiben die Murgänge auch in den Gebieten in der Tiefenlinie, in denen sie in der Realität ausgebrochen sind. Eine Veränderung des Grenzwinkels ist mithin nicht sinnvoll.

Ähnliches ist auch bei der Reichweitenmodellierung zu finden. Die Veränderung des Parameters Masse zu Hemmung ( $M/D$ ) führt erst bei einem – im Vergleich zu den in der Literatur veröffentlichten Werten – sehr unrealistischen Wert zu einer Veränderung der Prozesswege.

Zur weiteren Überprüfung des Modells wurde daher nur  $\mu$  verändert. Neben den oben erwähnten (siehe Kap. 5) von GAMMA (2000) vorgeschlagenen Formeln für kleine, mittlere und große Ereignisse wurde auch der Wert von  $\mu = 0,18$  überprüft. Dieser Wert wurde von WICHMANN (2006) auf seine Untersuchungsgebiete testweise angewendet und führte ebenfalls zu guten Ergebnissen für das Maximalereignis.

Folgende von WICHMANN (2006) verwendete Einstellungen wurden überprüft und für die weitere Modellierung ausgewählt.

Random walk:		
Grenzgefälle:		20°
Persistenzfaktor:		1,5
Ausbreitungsexponent:		1,3
Wiederholungen:		1000
2-Parameter-Modell:		
M/D:		75
$\mu$		veränderlich

Tab. 7.1: Modelleinstellung nach WICHMANN (2006)

Zur Verdeutlichung werden in den einzelnen Einzugsgebieten Abbildungen der Prozessbereiche gezeigt. In den meisten Fällen werden als Anrisspunkte die jeweils obersten der modellierten Startpunkte gezeigt (siehe u. a. Abb. 7.1). Die Modellierung der Prozessbereiche wurde selbstverständlich auch von den tiefer liegenden Startpunkten durchgeführt. Der Prozess bleibt dabei meist an denselben Stellen stehen; nur in den wenigsten Fällen laufen modellierte Talmuren von den tieferen Startpunkten noch etwas weiter.

## 7.1 Ehnbach

Im Ehnbachgebiet werden die kartierten Murköpfe – je nachdem welcher Startpunkt gewählt wird – mit einem  $\mu = 0,18$  gut abgebildet. Im oberen Teil des Kuhloch- (Abb. 7.1) und Kreuzjochlgerinnes sowie des Brantenbachs werden die Murköpfe genau erreicht. Im Oberbach dagegen läuft die modellierte Mure noch deutlich über die kartierten Murköpfe hinaus (Abb. 7.2). Die modellierten Geschwindigkeiten liegen in der Regel unter dem geforderten Grenzwert von 20 m/s. Lediglich bei ca. 7 Pixeln wird die Grenze von 20 m/s überschritten. Der maximale Wert liegt bei rund 23 m/s und damit in dem in der Literatur beschriebenen Bereich. Bei der Kartierung der Murköpfe ist nicht festzustellen, ob alle Mureereignisse von ein und demselben Niederschlag ausgelöst wurden. Bei einem Gebiet dieser Größe ist das eher unwahrscheinlich. Es kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass in allen Teileinzugsgebieten Muren derselben Größenkategorie abgegangen sind. Damit müssen die gefundenen Muren auch nicht alle in dieselbe Kategorie fallen. Dass mit einem Wert alle gefundenen Murköpfe eines Einzugsgebiets gleich gut abgebildet werden können, ist eher nicht zu erwarten.

Bei der Modellierung der Startpunkte wurde festgestellt, dass relativ viele Anrisspunkte entlang des Ehnbachs im Bachbett unterhalb der Einmündung Erlbach ausgewiesen wurden, die im Gelände so nicht erkennbar waren. Bei der Reichweitenmodellierung lief der Prozess von diesen Startpunkten meist nur ein oder zwei Pixel weit. Die modellierten Anrisspunkte müssen daher nicht falsch sein, die möglicherweise entstandenen Muren waren unter Umständen nur entweder nicht mehr zu erkennen oder wurden als einfache Umlagerungen im Bachbett kartiert. Möglich ist ferner, dass Talmuren hier zwar anreißen könnten, das weitere Gefälle aber nicht ausreicht, dass sich die Mure voll entwickelt und erkennbare Spuren hinterlässt.

Wird im Einzugsgebiet Ehnbach mit der Einstellung  $\mu_{\max}$  modelliert, ergeben sich kaum Unterschiede. Die Muren laufen insgesamt zwar etwas weiter als mit einem konstanten  $\mu = 0,18$ , der Unterschied ist aber marginal.

Läuft das Modell mit der Einstellung  $\mu_{\text{wahr}}$ , wird lediglich die Mure im Wörgelbach sehr gut abgebildet, alle anderen modellierten Muren sind im Vergleich mit dem Gelände deutlich zu kurz. Da die kartierten Talmuren von unterschiedlichen Niederschlagsereignissen stammen können, ist dies nicht weiter verwunderlich.

Kein einziger der kartierten Murköpfe wird im Modell erreicht, wenn man die Formel für kleine Ereignisse ( $\mu_{\min}$ ) einsetzt. Dass die Formel für kleine Murgänge sowohl hier also auch in fast allen andern Gebieten kein nachvollziehbares Ergebnis bringt, kann wohl am ehesten damit erklärt werden, dass die Anzeichen kleiner Murgänge, die nach dem Ereignis zu finden wären, durch die nachfolgenden größeren Ereignisse zerstört werden.

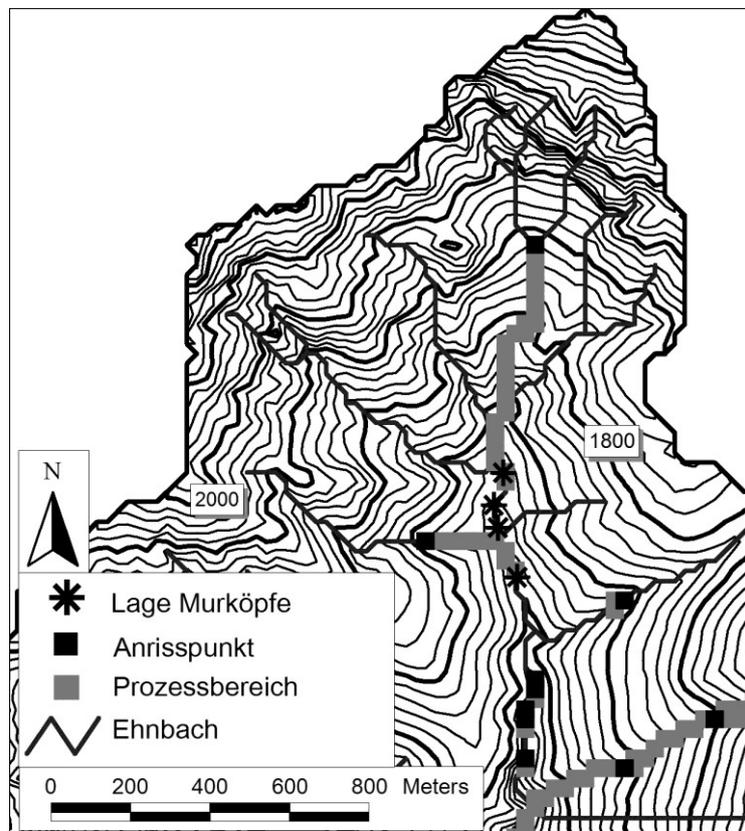


Abb. 7.1: Prozessbereich im Kuhlochgerinne (Nordteil des Ehnbach) mit  $\mu = 0,18$

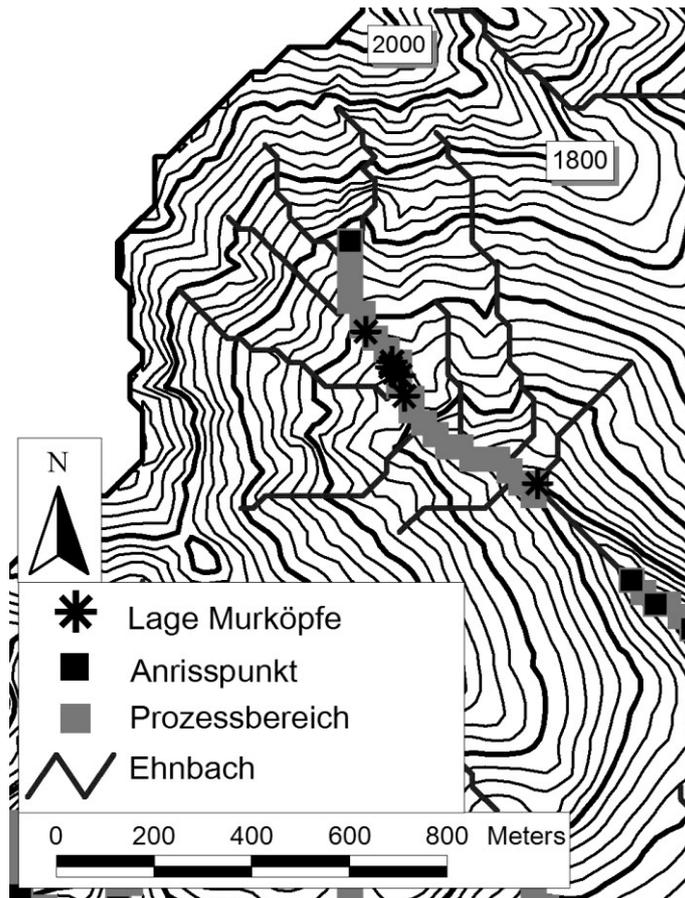


Abb. 7.2: Modellierter Prozessweg im Oberbach (Nordwestteil des Ehnbach) mit  $\mu = 0,18$

## 7.2 Waxriesgraben

Im Waxriesgraben zeigt sich ein anderes Bild. Bei der Einstellung für große Muren ( $\mu_{\max}$ ) bzw. einem  $\mu = 0,18$  laufen die modellierten Muren über die Bundesstraße zwischen Bad Reichenhall und Unterjettenberg in den Saalachsee, der direkt an die Straße grenzt (Abb. 7.3). Damit können keine „stummen Zeugen“ als Nachweis für große Talmuren oder deren Reichweite gefunden werden. Dass große Ereignisse bis in den Saalachsee laufen, ist aufgrund der Geländesituation jedoch gut vorstellbar. Das Geländemodell endet allerdings an der Bundesstraße bzw. am Ufers des Sees, sodass eine Modellierung mit  $\mu_{\max}$  hier kein Ergebnis bringen kann, das in der Natur zu beobachten wäre.

Mit der Einstellung für mittlere Ereignisse ( $\mu_{\text{wahr}}$ ) dagegen ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung von modellierter und kartierter Mure. Da es sich bei dem Mureignis laut Aussage eines Augenzeugen nicht um ein Maximalereignis handelt (freundl. mündl. Mitt. des Revierleiters Hr. Graßl), scheint das Modell auch Muren mittlerer Größe gut abzubilden.

Ein Beleg für die eher kleine bis mittelgroße Talmure kann die Kreiner Wand gelten (Abb. 7.4), die trotz des Murgangs noch über die gesamte Breite des Bachbetts erhalten geblieben ist. Dabei handelt es sich ursprünglich um eine Unterkonstruktion für eine Forststraße, die mit Schutt aufgefüllt war und den Graben querte. Die Talmure ist nach Aussagen des Revierförsters durch die Kreiner Wand hindurchgeflossen und hat dabei das Material eingearbeitet und mitgenommen. Sowohl direkt oberhalb als auch auf einem Teil der ehemaligen Straßenkonstruktion sind Levées zu erkennen.

Die maximale Geschwindigkeit der Mure wird mit 21,9 m/s modelliert und liegt damit leicht über dem Grenzwert von 20 m/s. Der Wert von fast 22 m/s tritt allerdings nur in einem Pixel in der Steilstufe bei ca. 990 m ü. d. M. auf. Alle anderen Werte liegen unter den „geforderten“

20 m/s. Im Bereich der zerstörten Forststraße werden Geschwindigkeiten von rund 10 m/s modelliert. Die hier ausgewiesenen eher mäßigen Geschwindigkeiten passen ebenfalls zu dem Augenzeugenbericht.

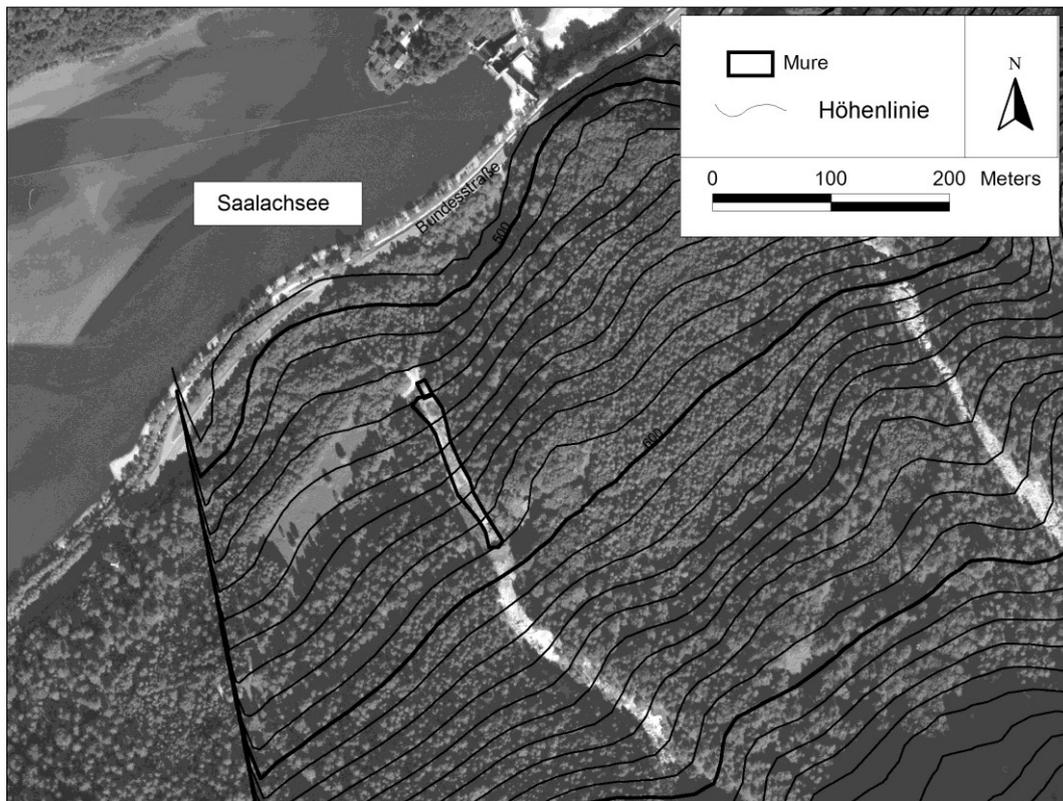


Abb. 7.3: Überblick über das Einzugsgebiet Waxlriesgraben



Abb. 7.4: Ausgespülte Forststraße

### 7.3 Heugraben

Die Modellierung im Heugraben wird mit einem  $\mu = 0,18$  sehr gut abgebildet (Abb. 7.5). Alle Pixel, auf denen die Mure zum Stehen gekommen ist, werden vom Modell als Prozessbereich ausgewiesen. Mit sieben überstrichenen Pixeln ist die modellierte Fläche bei  $\mu = 0,18$  lediglich ein Pixel kleiner als bei der Modellierung mit einem  $\mu_{\max}$ ; Beide Ergebnisse entsprechen damit der Geländeaufnahme. Bei der Begrenzung der Werte mit  $\mu_{\text{wichtmax}}$  werden die gleichen Pixel ausgewiesen wie bei der Modellierung mit  $\mu = 0,18$  (Abb. 7.6), allerdings ist die Gesamtfläche mit vier Pixeln kleiner. Einzig die Versuche mit  $\mu_{\text{wahr}}$  und  $\mu_{\text{min}}$  entsprechen dem kartierten Ereignis nicht; die ausgewiesene Fläche ist zu klein, und der Prozess erreicht den Talboden nicht. Die maximale Geschwindigkeit der Mure wird mit ca. 15 m/s modelliert. Dies liegt deutlich unter den in der Literatur beschriebenen 20 m/s, was jedoch angesichts eines eher geringen Gefälles nicht unwahrscheinlich erscheint.

Die Modellierung mit den Formeln für mittlere und kleine Ereignisse liefert keine Ergebnisse, die mit den kartierten übereinstimmen. Dass diese vorkommen können, soll damit nicht ausgeschlossen werden, im Gelände konnten aber keinerlei Spuren von kleineren Murgängen nachgewiesen werden. Dies kann zum einen daran liegen, dass das kartierte Ereignis sämtliche Spuren von früheren Talmuren erodiert hat. Zum anderen ist im Übergang vom Hang zur Talau des Vorfluters keinerlei Kegel zu finden. Der kartierte Murgang scheint daher ein eher extrem seltenes Ereignis zu sein. Es ist damit auch möglich, dass die Spuren der vorhergegangenen Talmuren im Laufe der Zeit durch die fluviale Erosion beseitigt wurden.

Nicht völlig auszuschließen ist auch ein anthropogener Einfluss. Es kann durchaus sein, dass sich eigentlich ein Kegel ausgebildet hätte, der aber nach jedem Ereignis wieder weggebaggert wird.

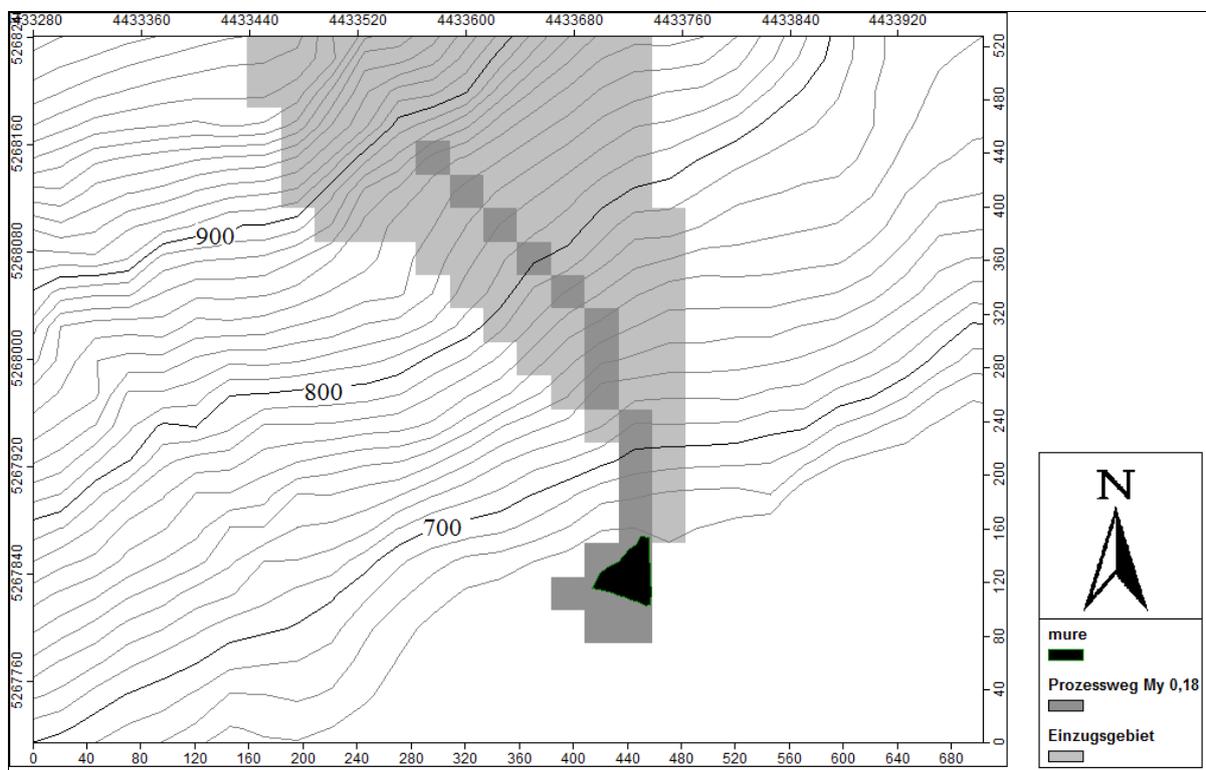


Abb. 7.5: Modellierter Prozessweg der Heugrabenmure mit  $\mu = 0,18$

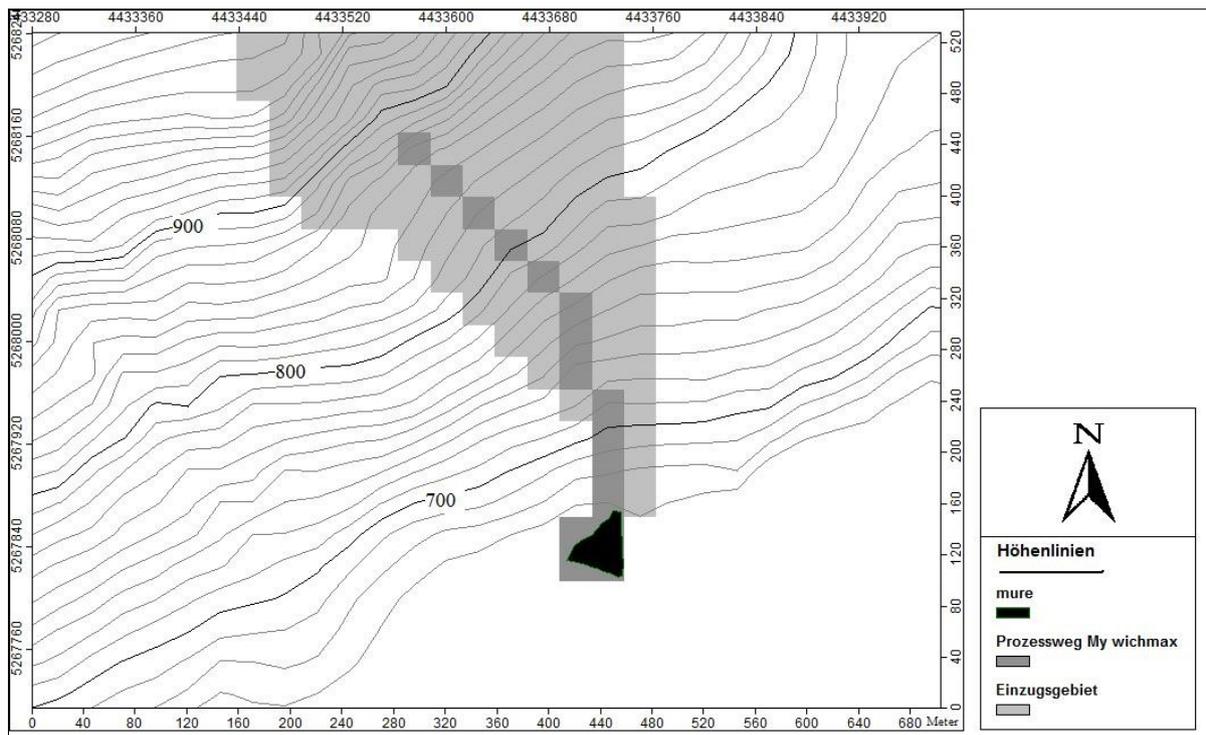


Abb. 7.6: Modellierter Prozessweg der Heugrabenmure mit  $\mu_{\text{wichmax}}$

#### 7.4 Mühlauer Bach

Die Muren im Gebiet des Mühlauer Bachs können mit  $\mu = 0,18$  gut abgebildet werden (Abb. 7.7). Sämtliche modellierten Muren laufen bis ca. 150 m unterhalb der kartierten Ablagerungen bei 1050 m ü. d. M. Die ca. 300 m oberhalb liegenden Murköpfe werden im Modell immer „überfahren“ und können mit dieser Einstellung nicht erklärt werden. Die Modellierung mit  $\mu = 0,18$  kommt der maximalen Reichweite sehr nahe. Da nicht alle kartierten Murköpfe aus einem maximalen Ereignis stammen müssen, spricht dies nicht gegen die Modellierung. Die Geschwindigkeiten liegen mit rund 21 m/s leicht über dem „Grenzwert“. Dabei sind die Reichweiten von allen Startpunkten aus mehr oder weniger gleich. Es ist gleichgültig, ob man unterschiedliche Startpunkte innerhalb eines Gerinnes betrachtet oder ob man die Startpunkte der unterschiedlichen Arme des Mühlauer Bachs vergleicht. Jeder modellierte Murgang endet an derselben Stelle auf rund 1000 m ü. d. M. Der unterste Murkopf (auf ca. 920 m ü. d. M.) wird lediglich von einem Anrisspunkt aus erreicht, der ca. 150 m oberhalb im Bachbett liegt. Ob man bei dieser kurzen Distanz aber wirklich von einem Murgang ausgehen kann, ist zumindest fraglich. Der Anriss im Bachbett konnte im Gelände nicht nachvollzogen werden. Damit ist dieser Murkopf der Einzige, der durch das Modell nicht befriedigend vorhergesagt werden kann.

Bei der Modellierung mit dem Wert für maximale Ereignisse  $\mu_{\text{wichmax}}$  ergibt sich ebenfalls ein Bild, das in weiten Teilen der Kartierung entspricht. Zwar werden die oberen beiden Murköpfe wieder überfahren, der Murkopf bei 1050 m ü. d. M. wird dagegen gut abgebildet. Dabei liegen die Geschwindigkeiten der modellierten Muren wieder um 21 m/s. Der entscheidende Unterschied besteht darin, dass der unterste Murkopf (auf ca. 920 m ü. d. M.) bei dieser Einstellung auch abgebildet wird (die modellierte Mure bleibt nur ca. 100 m vor der kartierten stehen; vgl. Abb. 7.8).

Der Startpunkt der Modellierung, die diesen Murkopf abbildet, liegt allerdings in einem Seitenarm des Mühlauer Bachs, der so im Gelände nicht nachvollzogen werden kann (was aber eher ein Problem der Startpunktmodellierung wäre). Der Anriss kann zwar nicht ausgeschlossen werden, das Tal, in dem die angesprochene Mure modelliert wird, weist keinerlei Anzeichen eines Murgangs auf und ist vollständig bewachsen. Hier zeigt sich erneut das Problem, dass die Startpunkte von Talmuren im Gelände nicht exakt bestimmt werden können. Viele Muren haben allerdings eine sehr lange Wiederkehrdauer, sodass eventuell vorhandene Spuren erodiert und/oder zugewachsen sein können. Der Startpunkt muss daher nicht falsch sein, er konnte lediglich so im Gelände nicht nachvollzogen werden.

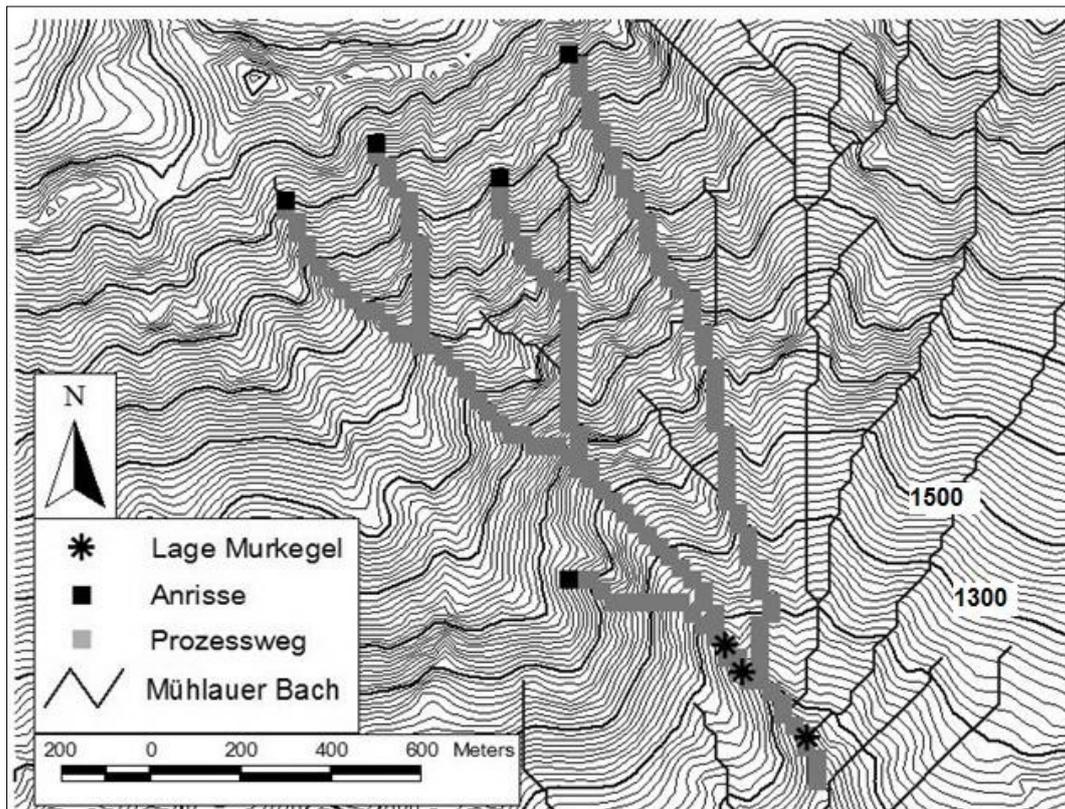


Abb. 7.7: Modellierter Prozessweg im Mühlauer Bach mit  $\mu = 0,18$

Bei der Modellierung mit den Formeln für mittlere  $\mu_{\text{wahr}}$  und  $\mu_{\text{min}}$  für kleine Ereignisse ergibt sich ein fast identisches Bild. Die beiden „oberen“ Muren (siehe Abb. 7.7) werden bei keiner dieser Einstellungen abgebildet. Der Murkopf auf 1050 m ü. d. M. wird jeweils gut abgebildet. Einzig der „untere“ Murkopf wird bei diesen Einstellungen nicht mehr erreicht. Der oben angesprochene Anrisspunkt „produziert“ nur noch eine ca. 50m-100m lange Mure. Das Tal wird nicht mehr durchlaufen. Der Hauptunterschied zur Modellierung für große Ereignisse liegt in der Fließgeschwindigkeit. Diese ist im Durchschnitt um 3 m/s und maximal um 6 m/s geringer.

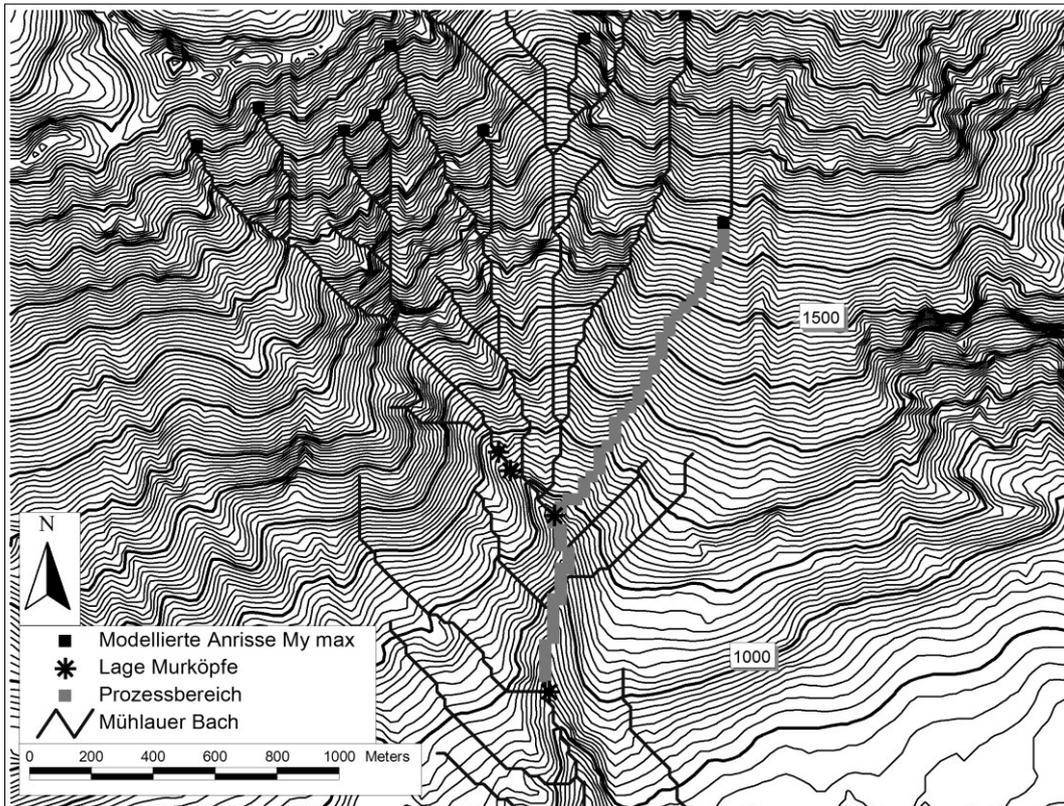


Abb. 7.8: Modellierter Prozessweg Mühlauer Bach mit  $\mu_{\text{wichtmax}}$

### 7.5 Rumer Langenbach

Im Bereich des Rumer Langenbachs zeigt die Modellierung ein gutes Abbild der im Gelände aufgenommenen Muren. Bei der Modellierung mit  $\mu = 0,18$  wird der Bereich der Hauptablagerung zwischen 1000 m und 1020 m ü. d. M. erreicht. Wie im Mühlauer Bach läuft die Modellierung rund 150 m über die Kartierung hinaus. Der obere Murkopf auf 1655 m ü. d. M. wird bei der Modellierung ebenso überfahren wie die beiden bei 1460 m ü. d. M.; dementsprechend können diese Murablagerungen nicht mit der gewählten Einstellung für große bis maximale Ereignisse erklärt werden. Wie bereits im Mühlauer Bach festzustellen war, kann praktisch jeder beliebige Anrisspunkt als Start der Modellierung vorgegeben werden, es gibt keinen Unterschied in der Reichweite. Alle modellierten Prozessbereiche enden kurz unterhalb der kartierten Murköpfe. Der untere Murkopf wird durch die Modellierung nur bedingt erklärt. Der Prozessbereich endet rund 300 m vor dem kartierten Murkopf. Der ausgewiesene Prozessbereich wäre damit zu klein.

Während sich mit  $\mu_{\max}$  keine Verbesserung ergibt, wird das Bild bei der Einstellung  $\mu_{\text{wichmax}}$  etwas besser (Abb. 7.9). Der höchstgelegene Murkopf wird ebenfalls nicht abgebildet. Allerdings nähert sich der modellierte Prozessbereich dem untersten Murkopf auf ca. 50 m an. Die Modellierung des Ablagerungsbereichs bei 1010 m ü. d. M. ist ebenfalls besser. Das Modell stoppt zum Teil vor und zum Teil nach den kartierten Murköpfen und nicht wie bei  $\mu = 0,18$  nur darunter. Die Geschwindigkeiten liegen bei beiden Einstellungen um die 20 m/s und damit im angestrebten Bereich.

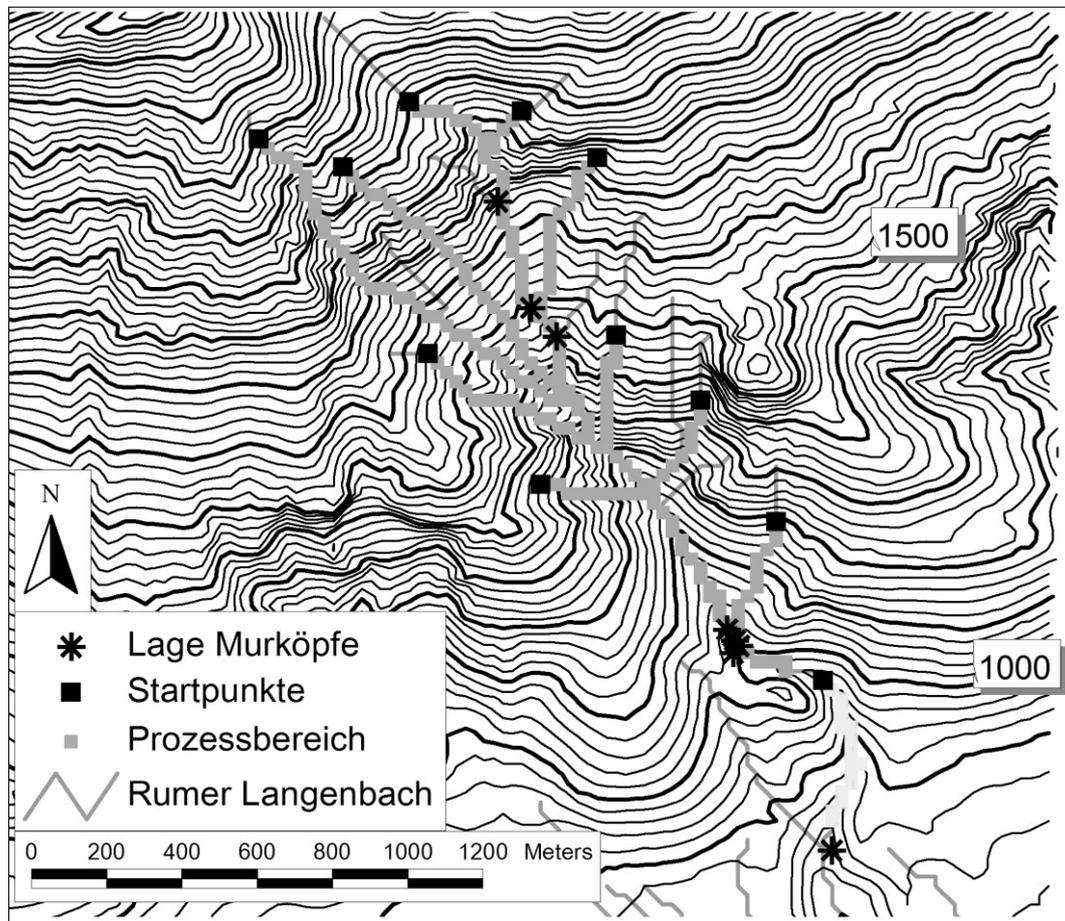


Abb. 7.9: Rumer Langenbach  $\mu_{\text{wichmax}}$

Die Einstellung  $\mu_{\min}$  ergibt ein anderes Bild (Abb. 7.10). Im Bereich des höchstgelegenen Murkopfs bleibt der Prozess zumindest einige Male stehen. Dafür wird der am tiefsten gelegene wieder um rund 150 m verfehlt. Im Bereich des Murkopfs bei 1010 m ü. d. M. ergibt sich das gleiche Bild wie bei der Einstellung  $\mu_{\text{wichmax}}$ .

Somit liegt die Vermutung nahe, dass die kartierten Muren von zumindest zwei verschiedenen Niederschlagsereignissen stammen könnten, der obere Murkopf von einem eher kleinen, die unteren von einem deutlich größeren. Für eine Überprüfung dieser Annahme fehlen aber leider die Aufzeichnungen über die tatsächlich gefallenen Niederschläge und den exakten Zeitpunkt der jeweiligen Murgänge.

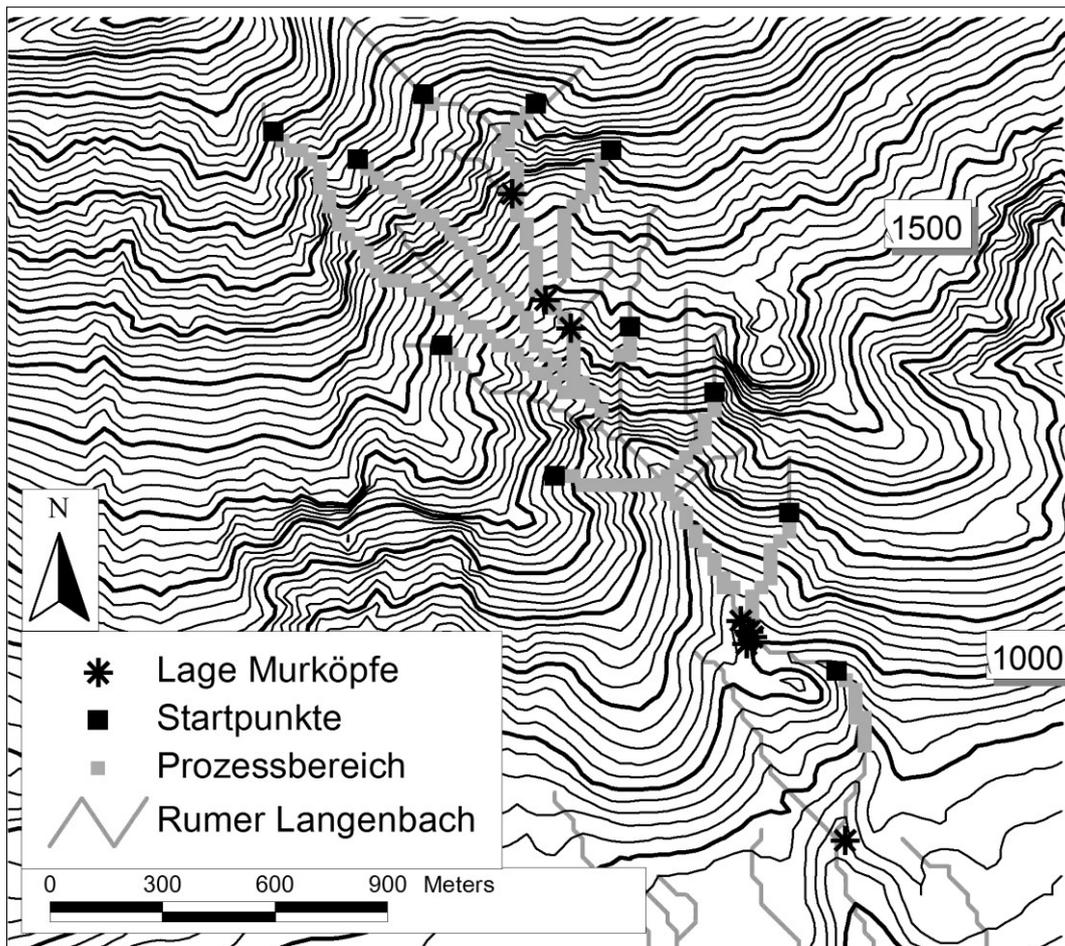


Abb. 7.10: Modellierter Prozessraum im Rumer Langenbach mit  $\mu_{\min}$

## 7.6 Rumer Mure

Bei der Modellierung der Rumer Mure ergibt sich ein erkennbarer Unterschied zwischen dem Versuch mit  $\mu = 0,18$  und dem mit  $\mu_{\max}$ . Bei  $\mu = 0,18$  stoppt die Modellierung kurz vor dem Zusammenschluss der westlichen Nebenbäche mit dem östlichen bei 985 m ü. d. M. und damit im Bereich der hier gelegenen Murköpfe. Die unterhalb gelegenen Murkegel werden nur von dem Prozess aus dem östlichen Seitenarm erreicht (Abb. 7.11). Zwar werden die jeweils oberen Murköpfe von der Modellierung „überrollt“, die unteren jedoch jeweils gut nachgebildet. Da die Einstellung den jeweils größten Prozessbereich darstellen soll, war dies zu erwarten. Einzig der unterste kartierte Murkopf bei 895 m ü. d. M. wird nicht erreicht. Der Wert der Murgeschwindigkeit liegt in der Regel unter den geforderten 20 m/s.

Im Unterschied dazu laufen bei der Einstellung mit  $\mu_{\max}$  und  $\mu_{\text{wichtmax}}$  (zwischen den beiden Einstellungen existiert hier kein Unterschied) die Prozessbereiche aller Seitenarme zusammen. Zwar bleibt ein Teil der Modelldurchläufe im Bereich der Murköpfe stehen, der Großteil läuft aber weiter und bleibt erst unterhalb der Murköpfe, die auf rund 1020 m ü. d. M. liegen, stehen.

Dabei liegt die Geschwindigkeit nur in wenigen Ausnahmen über 20 m/s und maximal bei 22 m/s. Wie bei der Einstellung mit  $\mu = 0,18$  werden die oberen Murköpfe nicht abgebildet, bei allen anderen bleibt zumindest ein Teil der Modelldurchläufe stehen. Auch der unterste Murkopf, der vorher nicht erreicht wurde, wird nun abgebildet; die Modellierung läuft sogar noch etwas über den kartierten Murkopf hinaus (Abb. 7.12).

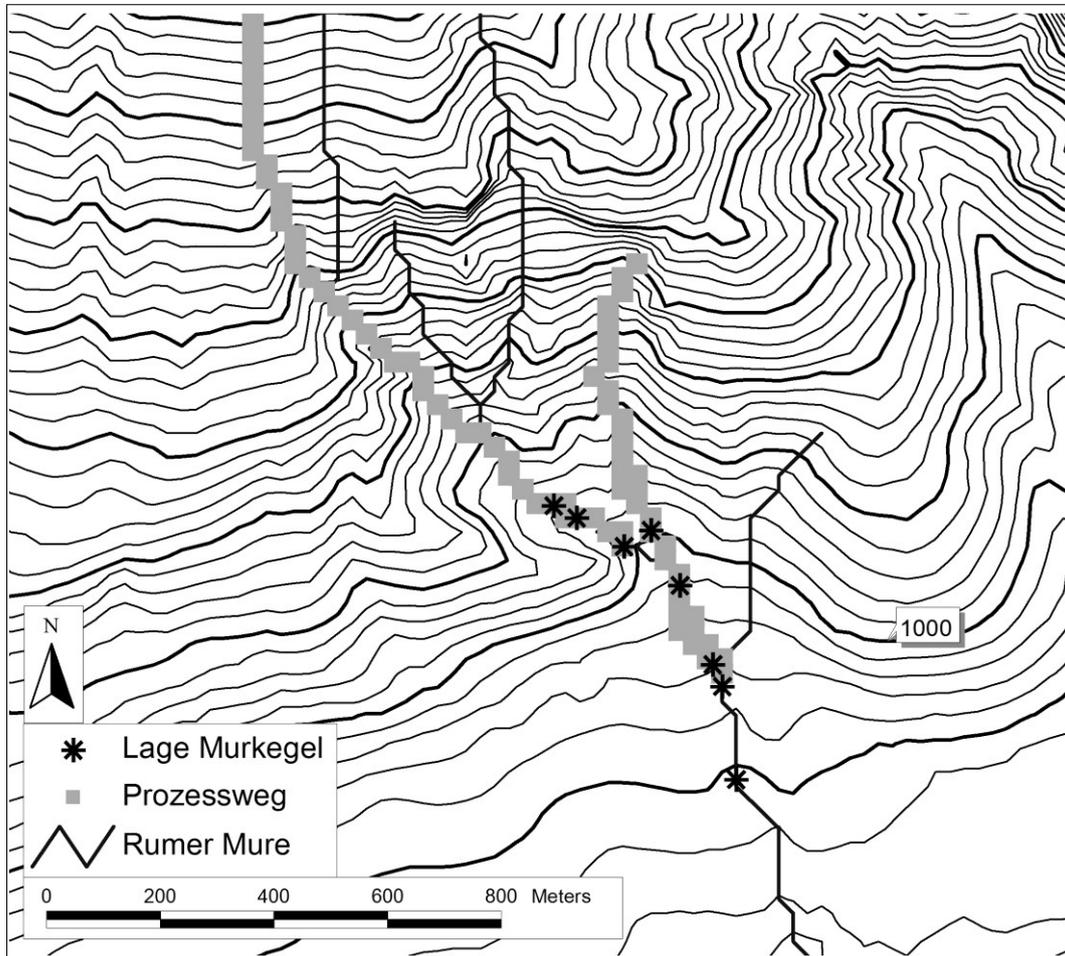


Abb. 7.11: Modellierter Prozessraum der Rumer Mure mit  $\mu = 0,18$

Die mit den bereits erwähnten Einstellungen nicht abgebildeten Muren auf 1030 m bzw. 1050 m ü. d. M. und im östlichen Seitenarm auf 990 m ü. d. M. werden mit  $\mu_{\min}$  dagegen gut abgebildet. Die Modellierung aus einem Nebenbach bleibt genau bei 1040 m ü. d. M. stehen. Der Prozess aus dem westlichsten Arm stoppt dagegen deutlich früher. Von den weiter unterhalb liegenden Murköpfen wird keiner erreicht. Auch hier kann man davon auszugehen, dass es sich bei den kartierten Muren um Muren aus verschiedenen Niederschlagsereignissen handelt. Die kartierten Murköpfe sind aber sowohl durch  $\mu = 0,18$  als auch – etwas besser – durch  $\mu_{\max}$  abgebildet.

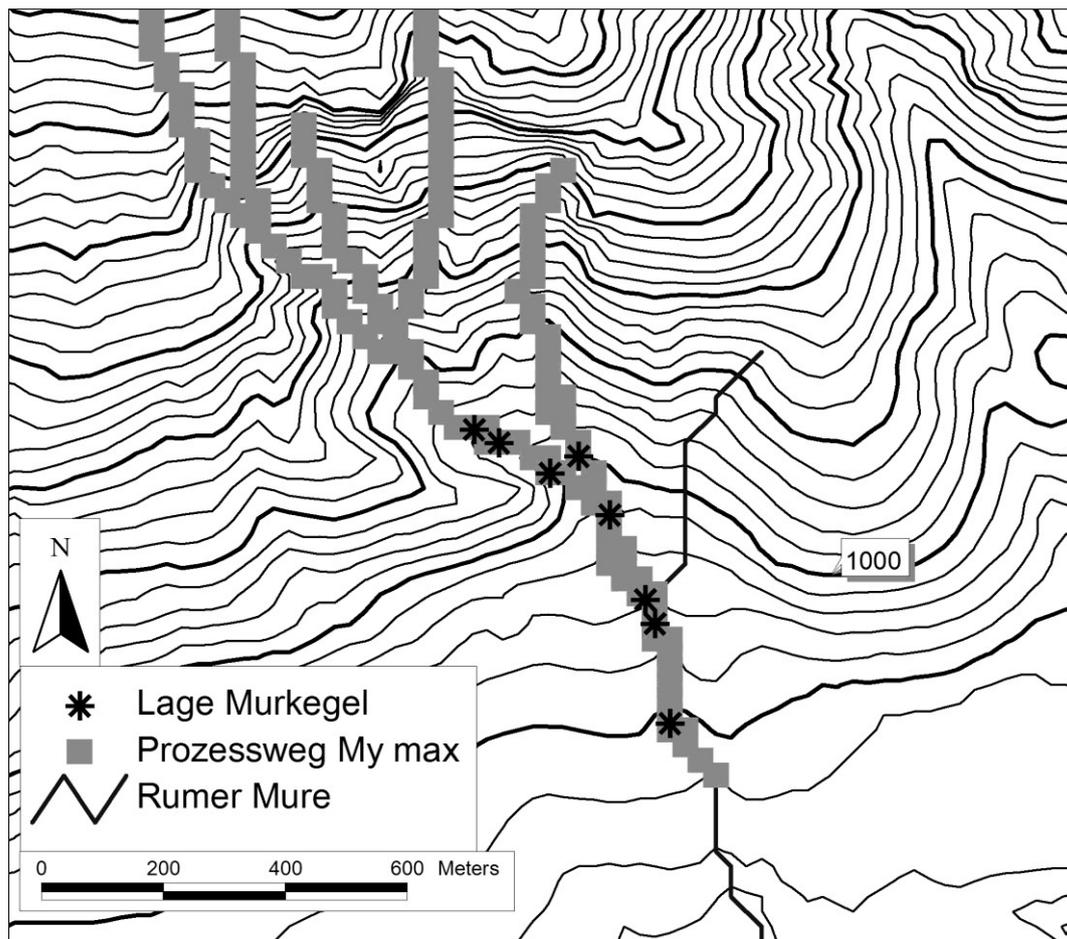


Abb. 7.12: Modellierter Prozessraum der Rumer Mure mit  $\mu_{\max}$

## 7.7 Söllbachgebiet

Aufgrund des ungewöhnlich starken Niederschlagsereignisses im Einzugsgebiet (vgl. Kap. 4) kann davon ausgegangen werden, dass in allen Teileinzugsgebieten maximale Murereignisse zu finden sind. Eine Übereinstimmung von mit  $\mu_{\min}$  modellierten und kartierten Ergebnissen ist deshalb zunächst nicht zu erwarten.

Wie bereits bei der Berechnung der Startpunkte ergeben sich auch bei der Modellierung der Prozessbereiche im Söllbachgebiet die größten Schwierigkeiten. Wegen der vielen verschiedenen Teileinzugsgebiete und der großen naturräumlichen Unterschiede im Gebiet ist auch dies nicht anders zu erwarten.

Unabhängig von der gewählten Einstellung differieren die Ergebnisse von Teileinzugsgebiet zu Teileinzugsgebiet stark. Dabei sind die Ergebnisse im südlichen Teil des Gebiets (Ochsengraben Raffelgraben, Rumpelgraben, Buchersulzgraben, Luckengraben, Filzengraben, Wegerschlaggraben) deutlich besser als im nördlichen Bereich mit Scheiben-, Neuhütten-, Stinker- und Wurzengraben.

Bei einer Modellierung mit  $\mu = 0,18$  ist das Ergebnis im südlichen Bereich recht gut. Hier erreichen die Prozessbereiche meist das Tal und damit die kartierten Ablagerungen. Allein im Rumpelgraben erreicht die Modellierung die Tiefenlinie und damit die kartierten Ablagerungen nicht. Der modellierte Prozess endet da, wo die Ablagerungen im Gelände tatsächlich erst anfangen. Der Unterschied von rund 150 m ist zwar nicht bedeutend, problematisch dagegen ist, dass der vorhandene Kegel nicht mit in den Prozessbereich fällt. In den Einzugsgebieten des Wegerschlag- und Filzengrabens läuft die Modellierung deutlich weiter als die kartierten Murköpfe. In besagten Gebieten konnten allerdings nur kleine Murköpfe aufgenommen wer-

den. Da das Gerinne auch unterhalb vollständig ausgeräumt war, muss davon ausgegangen werden, dass sich vorher ein größerer Murgang ereignet hat. Die Ablagerungen konnten jedoch nicht aufgenommen werden, da der Mündungsbereich in den Schwarzenbach weiter talabwärts bis zur Einmündung in die Weißbach völlig verwüstet war. Im Bereich von Raffel-, Buchersulz- und Ochsengraben sowie dem Luckengraben stimmen die Modellierungsergebnisse mit den kartierten in der Reichweite überein (Abb. 7.13). Die Ausbreitung bei Erreichen der Talsohle ist bei der Modellierung aber nicht so stark wie im Gelände. Das wird vor allem im Ochsengraben deutlich, in dem praktisch keine Ausbreitung modelliert wird, obwohl im Gelände ein deutlicher Kegel zu finden ist. Eine mögliche Ursache ist wiederum das ungenaue Geländemodell. In der Realität vereinigen sich alle drei Arme des Ochsengrabens bei rund 1040 m ü. d. M. Im Geländemodell dagegen wird in dieser Höhe ein weiterer Bach modelliert, der weiter nördlich in den Söllbach mündet und in der Realität nicht vorkommt. Damit „fehlt“ dem modellierten Einzugsgebiet ein Teil. Die Größe des Einzugsgebiets wird aber als Ersatz für die Menge des Abflusses verwendet. Damit „fehlt“ der Mure des Ochsengrabens Wasser, und sie kommt früher zum Stehen. Es gäbe zwar die Möglichkeit, das Ergebnis zu verbessern, indem Persistenzfaktor oder Ausbreitungsexponent verändert werden, damit werden aber die Ergebnisse in den anderen Gebieten deutlich schlechter.

In den Gebieten des Scheiben-, Stinker- und Wurzengrabens erreichen die ausgewiesenen Prozessbereiche bei Weitem nicht die kartierten Murköpfe. Das trifft besonders auf den Wurzengraben zu, der bei der Geländebegehung vollständig ausgeräumt war. Im Gerinne wurden zwar Levées gefunden, die Murablagerungen selbst sind jedoch durch den Vorfluter vollständig erodiert worden

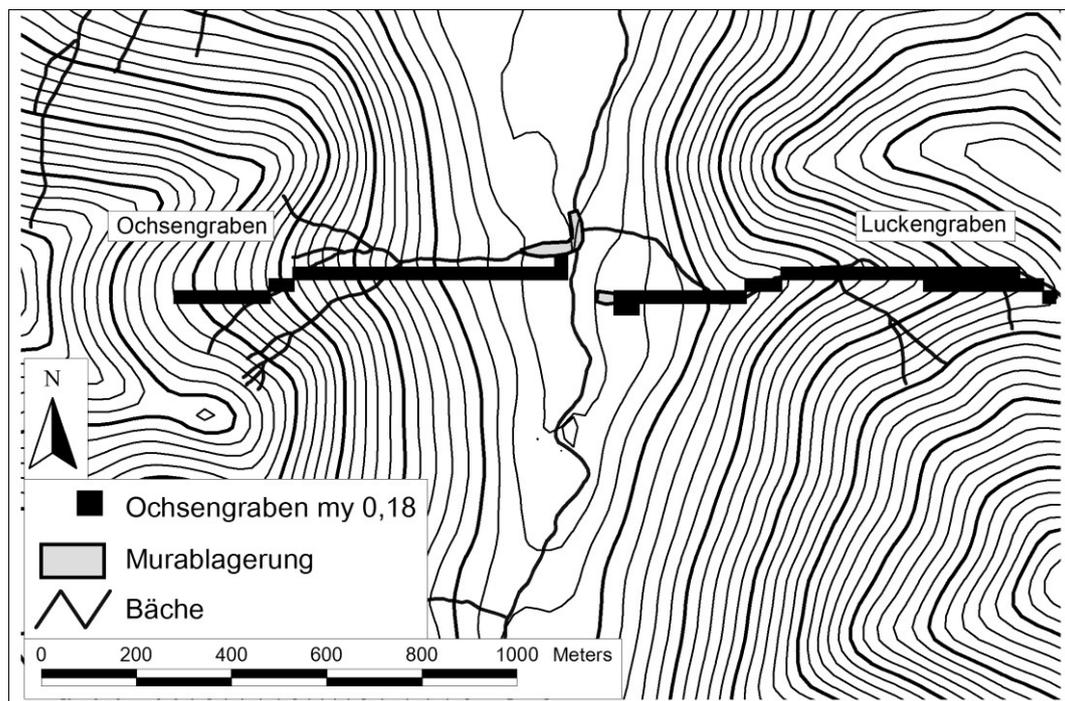


Abb. 7.13: Modellierter Prozessweg im Ochsen- und Luckengraben mit  $\mu = 0,18$

Wird das Gebiet mit der Formel für  $\mu_{\max}$  modelliert, verbessert sich das Ergebnis. In praktisch allen Teileinzugsgebieten werden die Prozesse um einen kleinen Betrag in Richtung Talsohle ausgeweitet. Dadurch nähert sich das Modellergebnis dem kartierten an. Die Talmure des Rumpelgrabens läuft jetzt fast bis zum Ende der aufgenommenen Ablagerung und im Ochsengraben ergibt sich ein größerer Kegel. Die Talmure des Buchersulzgrabens läuft im Modell jetzt bis in den Schwarzengraben, was angesichts der hier vorgefundenen Zerstörung wahrscheinlich ist. Während die Modellierung des Wegerschlaggrabens einen identischen Pro-

zessweg ergibt, wird die Mure des Luckengrabens deutlich länger und läuft über die kartierte Mure hinaus. Die Ausbreitung in den Söllbach konnte im Gelände so nicht nachvollzogen werden. Allerdings bleibt ein Großteil der 1000 Iterationen der Modellierung im Bereich der Ablagerungen stehen; lediglich ein kleiner Teil läuft in den Vorfluter weiter. In den vier nördlichen Bächen dagegen sind die modellierten Muren immer noch deutlich zu kurz.

Mit der Einstellung  $\mu_{\text{wichmax}}$  ergibt sich ein ebenfalls gutes, aber etwas unterschiedliches Bild. Während die simulierte Talmure des Buchersulzgrabens nicht mehr so weit in den Schwarzenbach hineinläuft, sind die Ergebnisse des Wegerschlag- und Filzengrabens identisch mit  $\mu = 0,18$ . Im Rumpelgraben sind  $\mu_{\text{max}}$  und  $\mu_{\text{wichmax}}$  identisch (Abb. 7.14), während die Mure des Luckengrabens mit  $\mu_{\text{wichmax}}$  zwar wieder zu weit in den Vorfluter läuft, aber nicht so weit wie mit  $\mu_{\text{max}}$ . Für den Ochsengraben ergibt sich mit dieser Einstellung das beste Ergebnis. Bei den Einzugsgebieten im nördlichen Bereich dagegen ändert sich nicht viel. Die ausgewiesenen Prozessbereiche bleiben deutlich zu kurz und erreichen die kartierten Ablagerungen noch nicht einmal ansatzweise.

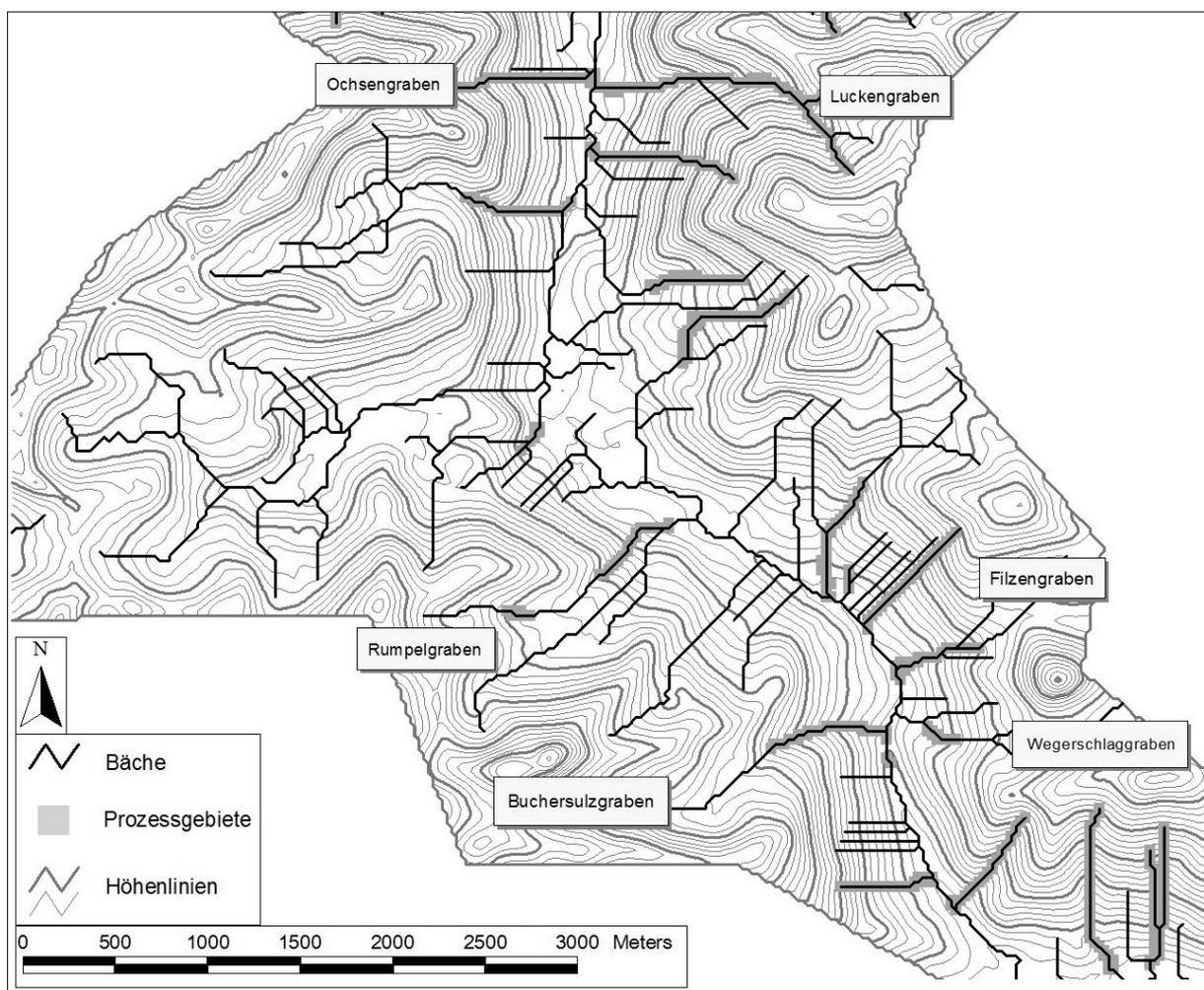


Abb. 7.14: Modellierte Prozesswege im südl. Söllbach mit  $\mu_{\text{wichmax}}$

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl  $\mu = 0,18$  als auch  $\mu_{\text{max}}$  bzw.  $\mu_{\text{wichmax}}$  im Großteil des Söllbachgebiets gute Ergebnisse liefert, wobei die Modellierung mit  $\mu_{\text{max}}$  die Geländesituation insgesamt am besten darstellt. Einzig die Lauflängen der Einzugsgebiete im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind viel zu kurz. Bei den Ergebnissen mit der Formel für wahrscheinliche bzw. kleine Ereignisse werden, wie erwartet, in allen Teilgebieten Prozessbereiche ausgewiesen, die deutlich kleiner sind als die kartierten. Für ein Großereignis

wie das, welches die kartierten Muren im Söllbachgebiet ausgelöst hat, sind diese Einstellungen nicht ausreichend.

Der deutliche Unterschied zwischen den nördlichen und südlichen Einzugsgebieten lässt sich vermutlich durch das unterschiedliche Ausgangsgestein erklären. Talmuren des granularen Typs entstehen meist indem Geschiebe, das im Bachbett lagert, mobilisiert wird. Durch das anschwellende Hochwasser wächst der Porenwasserdruck im Geschiebe, und Talmuren werden ausgelöst. Bei viskosen Talmuren dagegen wird entweder ein Teil des Ufers vom Hochwasser unterschritten und bricht dann in den Bach, oder eine Rutschung zieht ins Gerinne. In beiden Fällen wird die Masse verflüssigt und bewegt sich als Talmure hangabwärts. Dieser Unterschied ist auch bei TOGNACCA (1999, S. 35) zu finden. Er konstatiert: „Es ist interessant zu bemerken, dass der von TAKAHASHI (1991) beschriebene, granulare Murgangtyp andere Gesetzmäßigkeiten bezüglich Auftreten zeigt, als die eher viskosen Murgänge. Bei den ersten scheint die Regenintensität kurz vor dem Ereignis die entscheidende Rolle zu spielen. Bei den anderen dagegen hat der Vorregen und demzufolge der Sättigungsgrad des Bodens einen wesentlichen Einfluss.“ An einer anderen Stelle (S. 189) schreibt er: „[...] in der Schweiz treten neben granularen Murgängen auch andere Murgangtypen auf, bei denen die Feinanteile einen wichtigen Einfluss auf das Fließverhalten ausüben. [...] Wegen der veränderten Materialeigenschaften ist es zu vermuten, dass zwischen den auftretenden Prozessen andere Wechselwirkungen herrschen als in der vorliegenden Arbeit beobachtet. Insbesondere ist ein signifikanter Einfluss der Feinanteile auf die Wasserinfiltration in den Untergrund und auf das Fließen der Murgangwelle zu erwarten.“

Gamma (2000, S.15) führt aus: „Abhängig vom Wassergehalt und von der Korngrößenverteilung des Sedimentgemischs können Murgänge völlig unterschiedliche Fließeigenschaften aufweisen. [...] Bereits bei relativ einfachen rheologischen Modellen sind die Parameter (Scherfestigkeit, Viskosität und Scherrate) nicht konstant sondern variieren in beträchtlichem Ausmass, abhängig von der Festkörperkonzentration, der Korngrößenverteilungskurve und den Eigenschaften des beteiligten Feinmaterials.“

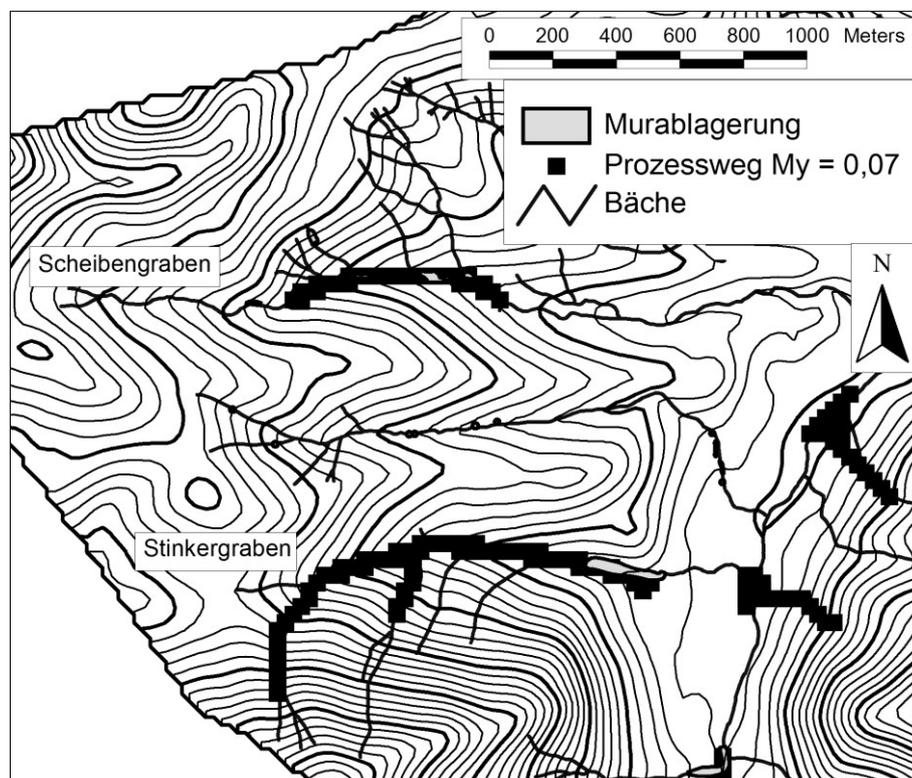
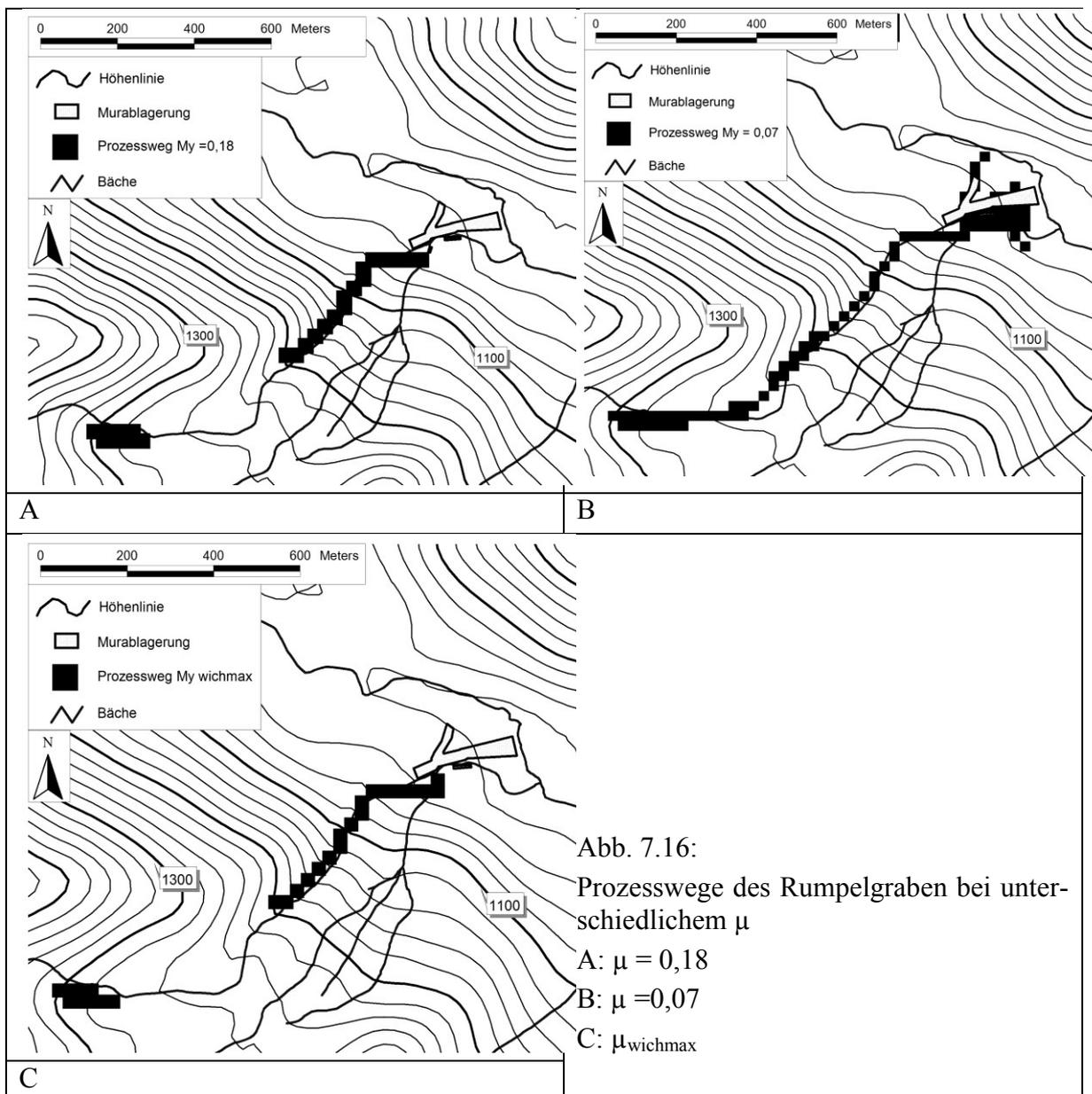


Abb. 7.15: Modellierte Prozesswege im nördl. Söllbach mit  $\mu = 0,07$

Bei granularen Muren ist es häufig zu beobachten (TOGNACCA 1999), dass in der Murfront kein Porenwasserüberdruck herrscht und diese aufgrund der höheren Reibung langsamer ist als der Murkörper. Die Murfront wird vom Murkörper überholt. Dieser Effekt wird bei viskosen Muren nicht beschrieben. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Reibung bei viskosen Muren geringer und damit die Lauflänge größer ist. Die Gleitreibung wird im Modell durch den Faktor  $\mu$  repräsentiert.

In einem weiteren Schritt wird nun versucht,  $\mu$  so zu ändern, dass der Verlauf der modellierten Talmuren in den vier nördlichen Gebieten ein einigermaßen realistisches Bild ergibt. Erst wenn die Modellierung mit  $\mu = 0,07$  durchgeführt wird, werden Stinker- und Scheibengraben sehr gut abgebildet (Abb. 7.15). Eine deutliche Verbesserung ist auch im Rumpelgraben festzustellen; hier wird sogar der eher kleine und geringmächtige Teil der Ablagerung abgebildet, der im nördlich gelegenen Wald zu finden ist (Abb. 7.16). Die Gebiete im südlichen Teil des Söllbachs werden dabei aber so deutlich überschätzt, dass bei dieser Einstellung das gesamte Söllbachgebiet Prozessraum wäre. Damit ist der Wert  $\mu = 0,07$  nur für die Gebiete einsetzbar, in denen rutschgefährdete Gesteine anstehen, bzw. in denen viskose Talmuren produziert werden. Die mit diesem Wert modellierten Prozessbereiche geben die kartierten übermurten Gebiete aber gut wieder.



## 8 Schluss

### 8.1 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

WICHMANN stellte im Jahr 2006 ein Modell vor, das Prozessräume von Talmuren ausweisen kann. Das Ziel der vorliegenden Arbeit (siehe Kap. 3) bestand darin, das von WICHMANN (2006) weiterentwickelte Modell sowie die von ihm vorgenommenen Kalibrierungen in neuen Gebieten zu überprüfen und gegebenenfalls weiter zu verbessern.

Es stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse in den untersuchten Gebieten die tatsächlichen Talmuren genauso gut abbilden wie in den Gebieten, in denen das Modell geeicht wurde. Da ein digitales Geländemodell noch nicht für den gesamten deutschen Alpenraum im Fünf-Meter-Raster vorliegt, wurde ein 25-Meter-Raster als Basis der Modellierung gewählt. Das Geländemodell als Grundlage der Modellierung ist somit deutlich ungenauer. Es wird geklärt, ob die Ergebnisse trotz der schlechteren Datenbasis vergleichbar gut sind. In einem weiteren Schritt wird versucht, das anstehende Gestein mit in die Modellierung einzubeziehen.

**Ergebnis für das Geländemodell:** Grundsätzlich spricht nichts gegen die Verwendung eines gröbereren Geländemodells. Die Ergebnisse der Modellierung der Talmuren sind trotzdem meist gut. Allerdings muss die Ausweisung des Gerinneverlaufs kontrolliert werden. Hier kann es im Vergleich zum Fünf-Meter-Raster zu deutlichen Abweichungen von der Realität kommen. WICHMANN ET AL. (2008) vergleichen die Ergebnisse der Höhenmodellierung bei verschiedener Pixelgröße. Die besten Ergebnisse werden bei Pixelgrößen zwischen 5 m und 25 m erreicht. Sowohl bei höherer als auch bei gröberer Auflösung verschlechtern sich die Ergebnisse. Das Gerinnenetz bildet die Grundlage der weiteren Modellierung. Die betrachteten Gerinne sind aber in den seltensten Fällen 25 m breit. Je nach Platzierung des Höhenpunktes kommt es dadurch zu deutlichen Abweichungen des Höhenmodells von der Realität. Die so entstandenen Fehler bei der Ausweisung von Einzugsgebieten ziehen sich bis in die Ausweisung des Prozessraums der Talmuren durch. Die Erstellung eines guten Höhenmodells sowie die Ableitung eines wirklichkeitsnahen Gewässernetzes bildet die Basis für eine realistische Modellierung der Prozessräume.

**Ergebnis für die Startpunktmodellierung:** Die Methode zur Modellierung der Startpunkte beruht nicht auf physikalischen Zusammenhängen und ist damit durchaus angreifbar. Um aber auf einer physikalischen Basis die Murdisposition einzelner Flächen bestimmen zu können, müssten Anrisspunkte von Talmuren und damit deren naturräumliche Parameter bekannt sein. Zusätzlich wären Informationen über das Niederschlagsgeschehen vor und während des Murgangs nötig. Anrisspunkte sind im Gelände selbst kurz nach einem Murgang meist nicht zu finden, Niederschlagschreiber sind in den Alpen nur in größeren Abständen vorhanden, sodass es über murauslösende Gewitter meist nur ungenaue Aufzeichnungen gibt. Die Erstellung eines Modells, das die physikalischen Zusammenhänge berücksichtigt und für einen größeren Naturraum wie ein Gebirge gültig ist, ist somit nur schwer zu realisieren. Der verwendete Zusammenhang von Gerinneneigung und Einzugsgebietsgröße dagegen hat den Vorteil, dass er leicht aus dem Geländemodell abzuleiten ist. In anderen Arbeiten ist dieser Zusammenhang schon öfter mit Erfolg angewendet worden (ZIMMERMANN ET AL. 1997; GAMMA 2000). Eine genauere Überprüfung, ob die Lage der modellierten Anrisspunkte korrekt ist, ist zwar nicht möglich, da die Anrisse im Gelände normalerweise nicht mehr zu erkennen sind. Entscheidend ist jedoch, dass oberhalb eines jeden kartierten Murkopfs ein Anrisspunkt modelliert wird. Erst durch die anschließende Modellierung der Prozessgebiete kann ein Anrisspunkt tatsächlich als richtig oder falsch ausgewiesen werden.

Die verwendeten Formeln für große, mittlere und kleine Ereignisse liefern sehr gute Ergebnisse, wenn sie in Gebieten angewendet werden, in denen eher granulare Talmuren zu finden sind. Im nördlichen Söllbach hingegen werden keine oder zu wenige Startpunkte ausgewiesen. Viskose Muren werden häufig durch bodenmechanische Instabilitäten (z. B. verflüssigte Rutschungen) ausgelöst. WICHMANN (2006) schreibt dazu: „Bei der Auslösung durch bodenmechanische Instabilität spielen Parameter, die nicht primär von der Größe und Beschaffenheit des Einzugsgebiets abhängig sind (z. B. Bodenart, Bodenaufbau), eine wesentliche Rolle. Dagegen sind hinsichtlich der hydraulischen Belastung auch einzugsgebietsspezifische Parameter wie der Oberflächenabfluss von Bedeutung.“ Somit kann der verwendete Zusammenhang von Neigung und Gebietsgröße die Anrisspunkte in Gebieten mit viskosen Muren nicht korrekt wiedergeben. Erst mit der neuen Formel  $J_{neu2}$ , die an die von ZIMMERMANN ET AL. (1997) vorgestellten angepasst ist, ergeben sich für Gebiete, in denen viskose Muren zu finden sind, realistische Ergebnisse.

Neben Größe und Neigung des Einzugsgebiets wird bei der Berechnung der Anrisspunkte die Sediment spendende Fläche (SCA) ausgewiesen und gewichtet. Hier kann der Einfluss naturräumlicher Faktoren auf die Bereitstellung von Sediment wiedergegeben werden. Je nach Eigenschaft der einzelnen Pixel gehen diese unterschiedlich gewichtet in die Berechnung des SCAs ein. Bei der Verschneidung der einzelnen Gewichtungslayer müssen die Werte der Layer kombiniert werden. WICHMANN (2006) nimmt dabei immer den größten der vorhandenen Werte, um den maximalen gefährdeten Bereich zu ermitteln. Werden zu viele Gewichtungsfaktoren herangezogen und bei der Verschneidung immer mit dem größeren Wert weitergerechnet, werden immer mehr Pixel mit eins bewertet; das Ergebnis wird dem ungewichteten Ergebnis immer ähnlicher. Damit ist die Anzahl der Einflussfaktoren bei dieser Art der Berechnung limitiert.

**Ergebnis für Prozessweg und Reichweite:** Der Prozessweg sowie die seitliche Ausbreitung im Ablagerungsbereich wurden auf Grundlage der Startpunkmodellierung ebenfalls aus dem DGM abgeleitet. Die in den Gebieten kartierten Murköpfe mit nur einer Parameterkombination exakt nachzubilden, ist nicht möglich. Dafür sind die Rahmenbedingungen, die zur Entstehung der aufgenommenen Murgänge geführt haben, vermutlich zu unterschiedlich. Aufgrund der fehlenden Informationen über die Größe der auslösenden Ereignisse können die Geländeergebnisse nicht in Gruppen unterschiedlicher Magnitude aufgeteilt und verschiedenen Modelleinstellungen zugeordnet werden. Werden die Modellierungen in den verschiedenen Gebieten aber mit den unterschiedlichen  $\mu$ -Werten für kleine, wahrscheinliche und große Ereignisse durchgeführt, können praktisch alle kartierten Talmuren erklärt werden. Die von GAMMA (2000) vorgeschlagenen Formeln zu Berechnung von  $\mu$  werden somit bestätigt. Auch mit dem von WICHMANN (2006) testweise eingesetzten fixen  $\mu$  von 0,18 werden recht gute Ergebnisse für den maximalen Prozessbereich erreicht. Ziel der Prozessraummodellierung sollte es aber sein, gefährdete Gebiete auszuweisen. Dafür ist es nicht entscheidend, dass alle aufgenommenen Talmuren exakt abgebildet werden. Viel wichtiger ist es, dass in allen Gebieten, in denen reale Talmuren kartiert wurden, auch bei der Modellierung Talmuren ausgewiesen werden. Da es eher unwahrscheinlich ist, dass bei der Geländearbeit tatsächlich Maximalereignisse kartiert werden (wenn, dann ist das am ehesten im Söllbachgebiet der Fall), sollten die modellierten Prozessbereiche auch weiter talabwärts reichen als die kartierten, um den maximalen möglichen Prozessbereich ausweisen zu können.

Bei der Ausweisung des maximalen Prozessbereichs gibt es kaum einen Unterschied zwischen der Modellierung mit  $\mu_{max}$  oder  $\mu = 0,18$ . Bei einem Teil der Untersuchungsgebiete ist der Prozessbereich mit  $\mu_{max}$  größer, bei dem anderen Teil mit  $\mu = 0,18$ . Die Berechnung mit  $\mu_{max}$  ergibt gute bis sehr gute Abbildungen der realen Murgänge. Dabei ist die Begrenzung der Werte, wie von WICHMANN (2006) vorgeschlagen, auf  $0,15 < \mu < 0,3$  bei den überprüften Gebieten sinnvoll ( $\mu_{maxwch}$ ), wenn die kartierten Talmuren abgebildet werden sollen. Der Unterschied zu dem von GAMMA (2000) vorgeschlagenen Wertebereich ( $0,045 < \mu < 0,3$ ) ist

zwar nicht sehr groß, der modellierte Prozessbereich ist im Allgemeinen aber immer etwas größer als mit dem enger eingegrenzten Wertebereich von WICHMANN (2006).

Bei dem Vergleich der Versuche mit einem  $\mu = 0,18$  und  $\mu_{\text{wichmax}}$  gibt es keinen eindeutigen Trend. Zum Teil werden mit  $\mu = 0,18$  bessere Ergebnisse erzielt, in anderen Fällen bildet  $\mu_{\text{maxwich}}$  die kartierten Talmuren adäquater ab. In fast allen Fällen ergibt die Modellierung mit dem jeweils anderen Wert das zweitbeste Ergebnis. Grundsätzlich reicht der Prozessraum der mit  $\mu_{\text{max}}$  modellierten Talmuren meist weiter ins Tal und ergibt damit einen etwas größeren gefährdeten Bereich. Dabei erscheint keiner der modellierten Prozessräume unrealistisch groß.

Welche der Einstellungen aber ein „realistisches“ maximales Ereignis abbilden, ist aufgrund der Unsicherheit, wie groß das im Gelände aufgenommene Ereignis tatsächlich ist und ob es sich um ein maximales Ereignis handelt oder nicht, nicht mit Bestimmtheit zu sagen. Das Ziel der Modellierungen sollte in der Ausweisung eines potenziell gefährdeten Bereichs bestehen. Da der Schaden, der im Falle einer Talmure mit maximaler Reichweite entsteht, vermutlich größer ist, wenn der Prozessraum zu klein ausgewiesen wurde als im umgekehrten Fall, wird die Modellierung mit der Formel für maximale Ereignisse  $\mu_{\text{max}}$  und damit die Ausweisung eines etwas größeren Prozessraums vorgeschlagen. Damit werden zwar die größten Prozessbereiche ausgewiesen, sie erscheinen jedoch in keinem Fall unrealistisch. In den Fällen, in denen der modellierte Prozess in den Vorfluter einmündete, konnte das auch im Gelände nachgewiesen werden. In allen anderen Fällen blieben die Prozesse entweder an Flachstellen im Gerinne selbst oder auf dem Kegel stehen.

Den vorliegenden Ergebnissen nach zu urteilen, kann das von Wichmann präsentierte Modell zur Modellierung von Talmuren problemlos auf andere unbekannte Gebiete übertragen werden. Dabei gibt es aber eine deutliche Einschränkung: Eine hohe Güte der Ergebnisse der Prozessraummodellierung kann lediglich dann erreicht werden, wenn es sich um überwiegend granulare Muren handelt, die auch die Grundlage von WICHMANN'S Untersuchung bilden. Wird die Modellierung in Gebieten versucht, die hauptsächlich viskose Muren produzieren, werden die Ergebnisse deutlich schlechter bis völlig unbrauchbar. Der Unterschied zwischen granularen und stark viskosen Talmuren ist hauptsächlich im Söllbachgebiet festzustellen. Während die granularen Muren im südlichen Teil des Gebiets mit den Einstellungen  $\mu_{\text{max}}$  und  $\mu = 0,18$  gut abgebildet werden, sind die Talmuren im nördlichen Bereich des Söllbachs mit den bisher verwendeten Werten für  $\mu$  nicht darstellbar. Wie bereits bei den Versuchen zur Einbeziehung des Ausgangsgesteins in die Modellierung erwähnt, sind im nördlichen Bereich des Söllbachs 10 cm bis 20 cm dicke Lagen von Seeton zu finden. Außerdem finden sich fast im gesamten Bereich Rutschungen (BUNZA ET AL., 1996) sowie tiefgreifende Kriech- oder Fließkörper aus überwiegend tonigem Lehm.

Die Tatsache, dass es einen Unterschied zwischen granularen und viskosen Muren geben muss, deutete sich auch bereits in anderen Untersuchungen an. ZIMMERMANN ET AL. (1997) stellten fest, dass weder  $\mu$  noch M/D von Anriss oder Gesamtvolumen des Murgangs abhängig sind. Dagegen weisen beide Parameter eine gewisse Abhängigkeit von der Kornverteilung auf. Nach GAMMA (2000) haben grobkörnige Muren eher höhere  $\mu$  und M/D – Werte als feinkörnige. Es konnte indes bisher kein exakter Zusammenhang festgestellt werden. Die Ergebnisse von COSTA (1984) weisen in eine ähnliche Richtung. Er konstatiert, dass der Tongehalt in Muren die Entwässerung und somit den Porenwasserdruck beeinflusst. Dadurch führe ein höherer Tongehalt zu einer größeren Reichweite. PIERSON & COSTA (1987) können nachweisen, dass granulare Muren bei gleichem Spitzenabfluss ein deutlich kleineres Volumen haben als Muren aus vulkanischem Gestein (Lahare). „The data points [...] indicate two subpopulations of flows: muddy flows of mainly volcanic origin and granular flows derived from granitic-type materials“ (in: JAKOB & BOVIS 1996, S. 15).

Diese Ergebnisse werden hier bestätigt. Um ähnliche Reichweiten zu modellieren, wie sie im Gelände gefunden wurden, und den Prozessbereich in Stinker- und Neuhüttengraben einigermaßen realistisch abzubilden, ist ein Wert von  $\mu = 0,07$  nötig; im Scheibengraben erreicht der modellierte Prozess die kartierten Ablagerungen erst bei einem  $\mu = 0,02$ .  $\mu$  gilt bei der Modellierung als Wert für die innere Reibung. Aufgrund des hohen Feinmaterial- bzw. Tonanteils, der in den Talmuren dieser Gebiete anzunehmen ist, untermauern die Ergebnisse die Aussagen von GAMMA (2000) und COSTA (1984).

Bei weiteren Modellierungen sollte deshalb eine Unterscheidung zwischen viskosen und grobkörnigen Muren gemacht werden.

**Ergebnis für den Faktor Ausgangsgestein:** Der Versuch, das anstehende Gestein in die Modellierung mit einzubeziehen, war nicht erfolgreich. Auch der Ansatz, die Gesteine nach ihrer Erosivität zu gewichten, brachte kein Ergebnis. Die Schwierigkeit dabei war, dass die Gesteinsgewichtung nur bei der Startpunktmodellierung eingebracht werden kann. Die Gewichtung der Layer bei der Bestimmung der Sediment spendenden Fläche bietet den einzigen Ansatzpunkt im Modell, an dem tatsächlich das Gestein und keine „Ersatzfaktoren“, wie zum Beispiel  $\mu$ , eingebaut werden können. Bei der Ausweisung der Startpunkte zeichnen sich die Gesteine aber nicht durch oder werden durch Neigung und Vegetation überlagert (vgl. Kap. 6.2).

Der Versuch, die Erosivität des Gesteins mit in die Startpunktberechnung einzubeziehen, greift eigentlich auch an der falschen Stelle an. Die gewichteten Layer werden zur Berechnung der SCA herangezogen. Die Erosivität der Gesteine wirkt sich aber erst aus, wenn die Talmure bereits angerissen ist, den Untergrund bzw. das Gestein erodiert und weiteres Material in den Murkörper einarbeitet. Erst bei der Ausweisung von Prozessgebieten ergibt sich ein deutlicher Unterschied. Zwar kann noch keine Unterscheidung aufgrund der einzelnen Gesteine getroffen werden, zumindest jedoch kann zwischen grob- und feinkörnigen Talmuren differenziert werden. Dabei werden nicht direkt die Gesteine bzw. ihre Eigenschaften mit in die Berechnungen einbezogen. Der Unterschied wird einzig an den unterschiedlichen Werten für  $\mu$  deutlich.  $\mu$  steht bei der Modellierung für die innere Reibung. Damit repräsentiert  $\mu$  eher den unterschiedlichen Wassergehalt und/oder den Porwasserüberdruck als Folge granularer Unterschiede denn die Eigenschaften des Gesteins selbst.

## 8.2 Ausblick

Die Überprüfung des Modells für Talmuren ist als gelungen anzusehen. Das Modell bietet eine Möglichkeit, Prozessräume von Talmuren weitgehend automatisiert auszuweisen. Bei der Ableitung des Gewässernetzes muss das Ergebnis allerdings noch mit der Realität abgeglichen und gegebenenfalls nachgebessert werden. Für eine ungeprüfte Übernahme der Gerinne ist zumindest das 25-Meter-Raster eindeutig zu grob. Da das Gerinnenetz die Grundlage für die weiteren Berechnungen bildet, ist hier besondere Sorgfalt geboten. Sowohl bei der Ausweisung der Startpunkte als auch bei der Berechnung der Prozessräume ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Gelände.

Lediglich bei Einzugsgebieten, in denen rutschfähiges Gestein ansteht, werden zu wenige Anrisspunkte ausgewiesen, und die ausgewiesenen Prozessräume sind deutlich zu klein. Für die Berechnung der Startpunkte wurde eine neue Formel eingeführt, die auch in Gebieten mit rutschfähigen Gesteinen Startpunkte ausweist. Der Versuch, die einzelnen Gesteine und nicht nur zwei Gruppen mit in die Startpunktberechnung einzubeziehen, ist nicht gelungen. Hier bietet sich aber ein Ansatz, das Modell weiter zu verbessern. Ist es nicht möglich, die einzelnen Gesteine in die Modellierung einfließen zu lassen, müssten in Zukunft auf jeden Fall viskose und granulare Talmuren unterschieden werden. Eine gleichzeitige Modellierung beider Arten führt zu einer deutlichen Unter- bzw. Überschätzung der dazugehörigen Prozessräume.

In dem von WICHMANN (2006) vorgestellten Modell bieten sich ausreichend Möglichkeiten, die Parameter auf den jeweiligen Murtyp einzustellen.

Bei der Berechnung der Prozessgebiete ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Modellierung der Startpunkte. Die Prozessgebiete decken sich gut mit den im Gelände kartierten. Dabei ist es praktisch gleichgültig, welche der untersuchten Formeln angewendet wird (solange es sich um eine für maximale Bereiche handelt), die ausgewiesenen Bereiche unterscheiden sich kaum voneinander. Auch hier gilt aber wieder, dass die vorgeschlagenen Formeln nur für granulare Muren gelten. Die Prozessbereiche der viskosen Muren werden deutlich zu klein ausgewiesen. Teilweise bleiben die Talmuren sogar noch im Gerinne selbst stehen und erreichen den Kegel oder den Vorfluter nicht. Zwar wurde der Prozessbereich mit einem festen Wert für  $\mu$  recht passabel abgebildet, die Formel für eine flächenabhängige Berechnung von  $\mu$  muss indes noch entwickelt werden.

Nachdem das Modell im nördlichen Alpenraum überprüft worden ist, bietet sich als weiterer Schritt an, es in anderen Naturräumen, z. B. mit magmatischen und metamorphen Gesteinen bzw. unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen, zu überprüfen und neu zu kalibrieren, wenn dies erforderlich scheint.

## 9 Zusammenfassung

Murgänge sind in den Alpen ein häufiges Phänomen. Auf Grund ihres unregelmäßigen und meist überraschenden Auftretens sowie ihrer stark variierenden Größe von teilweise über 100 000 m<sup>3</sup> stellen sie für die Bewohner des Alpenraums eine latente Gefahr dar. Muren können in Hang- und Talmuren unterschieden werden. Hangmuren gehen meist in den Schuttkegeln entlang der Talhänge ab und reißen im Kontaktbereich zwischen Fels und Schutt an. Talmuren dagegen reißen im Bachbett an. Sie sind meist größer, haben eine deutlich größere Reichweite und stellen somit eine größere Gefahr für Sachwerte, Tier und Menschen dar. Die Gruppe der Talmuren kann noch weiter unterteilt werden. Bestehen die Muren hauptsächlich aus größerem Schutt, spricht man von granularen Muren, haben sie dagegen einen hohen Anteil Feinmaterial handelt es sich um sogenannte viskose Muren. Um die Gefahr von Murgängen einschätzen und Vorsorge treffen zu können, werden Modelle benötigt, die einerseits potenziell murfähige Bäche von nicht murfähigen Bächen unterscheiden, andererseits die Reichweite der zu erwartenden Talmuren vorhersagen können.

Im Jahr 2006 stellt WICHMANN ein Modell vor, das Startpunkte sowie Prozessräume und Reichweiten von Talmuren vorhersagen kann. Das Modell basiert auf einem Ansatz von ZIMMERMANN ET AL. (1997) und GAMMA (2000) und setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Im ersten Teil des Modells werden anhand von Geländeparametern die Startpunkte berechnet. In die Startpunktberechnung gehen die Neigung des Gerinnes und die Größe des Einzugsgebiets ein. Dabei wird die Einzugsgebietsgröße mit Neigung und Vegetationsbedeckung gewichtet. Die modellierten Startpunkte können direkt in das zweite Teilmodell eingelesen werden, mit dem dann Prozessraum und Reichweite von Talmuren ausgewiesen werden können.

Das präsentierte Modell wurde von WICHMANN in zwei Gebieten im Großraum Garmisch-Partenkirchen entwickelt und kalibriert.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, zu klären, ob die Ergebnisse des Modells in neuen, unbekannt Gebieten die tatsächlichen Talmuren genauso gut abbilden wie in den „Eich-Gebieten“. Dazu wird das Modell deshalb in weiteren 18 Untersuchungsgebieten überprüft. In diesen Gebieten abgegangene Talmuren wurden kartiert und in ein Geographisches Informationssystem (SAGA) übertragen. In den untersuchten Gebieten wurde eine Murmodellierung durchgeführt und die Ergebnisse mit dem Prozessraum und den Reichweiten der realen Muren verglichen.

Da ein digitales Geländemodell noch nicht für den gesamten deutschen Alpenraum im Fünf-Meter-Raster vorliegt, wurde ein bereits vorhandenes 25-Meter-Raster als Basis der Modellierung gewählt. Das Geländemodell als Grundlage der Modellierung ist somit deutlich ungenauer. Ein weiteres Untersuchungsziel ist es damit, festzustellen, ob das gröbere Geländemodell einen Einfluss auf die Modellierung hat. In einem weiteren Schritt wird versucht, die Modellierung mit dem anstehenden Gestein zu gewichten.

Als Grundlage der Modellierung fungieren das Geländemodell und das daraus abgeleitete Gerinnenetz. Daher muss der Ausweisung des Gerinnenetzes und damit der Größe des Einzugsgebiets hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden. Wird aufgrund des Geländemodells das Gerinnenetz und damit auch das Einzugsgebiet falsch abgeleitet, verschlechtern sich die Modellergebnisse deutlich.

Die Modellierung der **Startpunkte** ist nicht immer sicher zu verifizieren, da Anrisspunkte von Talmuren im Gelände nur schwer nachzuvollziehen sind. Entscheidend für die Ergebnisse ist, dass oberhalb eines jeden aufgenommenen Murkopfs auch ein Startpunkt ausgewiesen wird. Dies ist bei dem Teil der Gebiete der Fall, in denen vor allem granulare Talmuren abgehen. Die Modellierung der Startpunkte ist in diesen Gebieten erfolgreich. In Gebieten dagegen, in denen hauptsächlich viskose Talmuren abgehen, werden keine oder deutlich zu wenig Startpunkte ausgewiesen. Eine neue Formel für die Modellierung der Startpunkte für viskose Muren wird vorgeschlagen und mit Erfolg erprobt.

Für die Untersuchungsgebiete liegen kaum Messreihen des Niederschlags vor. Eine Zuordnung der einzelnen realen Talmuren zu einer bestimmten Magnitude ist bei der Modellierung der **Prozessbereiche** bzw. der Reichweite nicht möglich. Die Modellierung des Prozessraums wurde deshalb mit unterschiedlichen Werten für kleine, mittlere und maximale Ereignisse durchgeführt. Gehen in einem Gebiet hauptsächlich granulare Talmuren ab, stimmen die ausgewiesenen und die kartierten Prozessgebiete überein. Das Modell weist die Gefährdungsbereiche gut aus und die Ergebnisse bedürfen kaum einer Korrektur. Praktisch jeder kartierte Murkopf wird durch einen der drei verwendeten Werte abgebildet. Auch die Ausweisung des gesamten Prozessraums bei Großereignissen erscheint bei einem Vergleich mit der Geländeaufnahme korrekt.

In Gebieten dagegen, die sehr rutschanfällig sind und in denen hauptsächlich viskose Muren abgehen, werden nicht nur zu wenige Startpunkte ausgewiesen, auch die Reichweiten und die Größe des Prozessbereichs werden stark unterschätzt. In diesen Gebieten müssen die Modellparameter angepasst werden. Die Anpassung wird vom Autor vorgenommen und in den infrage kommenden Gebieten getestet. Mit den neuen Modellparametern kommt das Modell zu vergleichbar guten Ergebnissen wie bei den Gebieten mit granularen Muren.

Um dem Unterschied zwischen granularen und viskosen Muren Rechnung zu tragen, wird versucht, das anstehende Gestein anhand seiner Erosivität zu klassifizieren und mit in die Gewichtung einzubeziehen. Dieser Versuch gelingt nicht. Die Unterschiede im Gesteine werden im Modell zu stark von den anderen Geländefaktoren überlagert.

Es zeigt sich deutlich, dass das Modell zwar den Gefährdungsbereich aller Talmuren ausweisen kann, dazu aber unterschiedliche Parameterkombinationen benötigt werden. Bei künftigen Modellierungen muss deutlich zwischen Gebieten differenziert werden, in denen granulare, und solchen, in denen viskose Talmuren abgehen. Wird dieser Unterschied beachtet, werden realistische Gefahrenbereiche für jede Art von Talmuren durch das Modell ausgewiesen. Der Versuch, das anstehende Gestein mit in die Modellierung einzubeziehen, bietet einen Ansatz für weitere Forschungsarbeiten.

## Summary

Debris flows are a common phenomenon in the Alps. Due to their irregular and often unexpected occurrence, and their widely varying sizes of sometimes over 100 000 m<sup>3</sup>, they pose a latent danger for the inhabitants of the Alps. Debris flows can be further differentiated between those on slopes and those in valleys. Slopes-type debris flows move mostly alongside the debris cones on the sides of the valley and rip through to contact areas between rocks and rubble. Valley-type debris flows, on the other hand, tear into the stream bed. They are usually larger, have a much greater range, and thus represent a greater threat to property, animals, and humans. Among valley-type debris flows, the group can be even further subdivided. If the debris flow consists mainly of coarse rubble, they are referred to as granular debris flows; if they have a high proportion of fine material, then they are categorized as viscous debris flows. To assess the risk of debris flows and be able to take precautions, models may be needed to distinguish on the one hand the potential debris flow streams from the non-potential debris flow streams, and, on the other hand, to predict the scope of an anticipated debris flow in a valley.

In 2006, WICHMANN introduced a model able to predict the starting points, process areas, and ranges of valley-type debris flows. The model is based on an approach described by HEINIMANN ET AL. (1998) and GAMMA (2000) and consists of two parts. In the first part of the model, the starting points are calculated by means of terrain parameters. The slope of the channel and the size of the catchment is included in the starting point calculation. The catchment area with slope and vegetation cover is also weighted in the calculation. The modeled starting points can be fed directly into the second part of the model, which can then show the process areas and range of valley-type debris flows.

The model presented was developed and calibrated by WICHMANN in two areas of the greater Garmisch-Partenkirchen region.

The aim of this investigation is to determine if the results of the model in new geographic areas reflect the actual valley-type debris flows as well as it has in the "calibration area". For this reason, the model has been tested in another 18 study areas. In these areas, the valley-type debris flows were mapped and transferred to a Geographic Information System (SAGA). Flow modeling was done in the study areas and the results were compared with the process space and the range of real flows.

Because a digital terrain model in a five-meter grid is not yet available for the entire German Alps region, an existing 25-meter grid was chosen as the basis of modeling. The terrain model as the basis of the modeling is therefore significantly less accurate. Another study objective is to determine if the rougher terrain model has an impact on the modeling. In a further step, an attempt was made to weight the model with the bedrock.

The terrain model and the channel network derived from it function as the basis for the modeling. Therefore, the exclusion of the channel network and thus the size of the catchment area must be given particular attention. The model results are significantly less accurate if the channel network and thus the size of the catchment area, derived from the terrain model, have been incorrectly extrapolated.

The modeling of the **starting points** is not always safe to verify because marked points of the valley-type debris flow on the terrain are difficult to reproduce. Crucial for the results is that above each recorded debris flow head a start point is declared. This is the case in the part of the area where primarily granular valley based debris flows move outward. The modeling of the starting points is successful in these areas. In contrast, areas in which mainly viscous valley-type debris flows move outward, none or clearly too few starting points have been shown. A new formula for modeling the starting points for viscous debris flows has been proposed and was tested with success.

For the study areas, few measurements of the deposits are available. A mapping of the actual individual valley-type debris flows to a specific magnitude in the modeling of the **process areas** and/or the range is not possible. The modeling of the process area was therefore determined via different values for small, medium, and maximum events. If primarily granular valley-type debris flows occur in an area, the reported and mapped process areas concur. The model represents the hazard areas well and the results hardly require correction. Virtually every flow head mapped is represented by one of the three types of values. The expulsion of the entire process space for large events also appears correctly when compared with the geological mapping.

In contrast, areas that are very susceptible to slipping and in which primarily viscous debris flows move outward, too few starting points are shown, and the range and size of the process area will be greatly underestimated. In these areas, the model parameters must be adjusted. The adjustment is made by the author and tested in the relevant areas. With the new model parameters, the model produces results that are equally as good as in the areas of granular debris flows.

To reflect the differences between granular and viscous debris flows, attempts have been made to classify the bedrock according to its erosivity and include this in the weighting. This attempt has not succeeded. The differences in the rocks in the model are too heavily overlaid by the other site factors.

This clearly shows that the model can identify the true threat area of all types of valley-type debris flows, but that the use of different combinations of parameters is necessary. For future modeling, areas must be clearly differentiated, between those in which granular flows move outward and those in which viscous flows move outward. When this difference is considered, realistic risk areas for each type of valley debris flow can be identified by the model. The attempt to include the bedrock in the modeling presents an opportunity for further research.

## 10 Literatur

- AMPERER, O. & W. HAMMER (1898): Geologische Beschreibung des südlichen Teiles des Karwendelgebirges.- Jahrbuch der KK. geologischen Reichsanstalt 48/2; Wien.
- AULITZKY, H. (1992): Die Sprache der stummen Zeugen. – Internationales Symposium Interpraevent 1992, Bd 6: 139 – 174; Bern
- BAUMGARTNER, A., REICHEL, E. & G. WEBER (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen.- 343S. u. Kartenteil; München.
- BECHT, M. (1995): Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung in alpinen Einzugsgebieten. – Münchner Geographische Abhandlungen A, Bd. 47; München.
- BENDA & CUNDY (1990): Predicting deposition of debris flows in mountain channels. – Canadian Geotechnical Journal 27: 409 – 417.
- BERTOLO, P. & G. F. WIECZOREK (2005): Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA. – Natural Hazards and Earth System Sciences, Bd. 5: 993–1001.
- BONTE, M., ERGENZINGER, P. & A. RAUEN (2000): Geomorphological, hydrological and sedimentary control of an artificially induced debris flow. – Physics and chemistry of the earth, Vol. 25, No. 9: 745 – 749.
- BONNET-STAUB, I. (1999): Définition d'une typologie des dépôts de laves torrentielles et identification de critères granulométriques et géotechniques concernant les zones sources. – Bulletin of Engineering Geology and the Environment 57: 359–367
- BUNZA, J., JÜRGING, P., LÖHMANNSRÖBEN, R., SCHAUER, T. & R. ZIEGLER (1996): Abfluß- und Abtragungsprozesse im Wildbacheinzugsgebieten. – Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. – Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 27, München.
- CAINE, N. (1980): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. – Geographiska Annaler, Vol. 62A: 22-27.
- CANNON, S.H. (1993): An empirical model for the volume-change behavior of debris flows. – Proceedings of ASCE National Conference on Hydraulic Engineering, San Francisco: 1768 – 1773.
- CONRAD, O. (2001): SAGA Channel Network Modul. – TerrainAnalysisChannels.mbl, <http://134.76.76.30>
- COSTA, J.E.(1984): Physical geomorphology of debris flow. – COSTA, J.E. und FLEISCHER, P.J.[Hrsg.]: Developments and applications of geomorphology: 269-317; Berlin.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2006) : Mittelwerte des Niederschlags für den Zeitraum 1961-1990. – <http://www.dwd.de>.
- DIEZ, T. (1967): Die Böden. – In: BAYER. GEOLOGISCHES LANDESAMT [Hrsg.]:Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt 8432 Oberammergau: 106 – 117; München.
- DUAN, J. & G.E. GRANT (2000): Shallow landslide delineation for steep forest watersheds based on topographic attributes and probability analysis. – In: WILSON, J.P. & J.C. GALLANT [HRSG.]: Terrain analysis. Principles and applications: 311 – 329.
- DÜSTER, H. & R. WEINGARTNER (1993): Prozeßorientierte Gewinnung von Gebietskenngrößen zur hydrologischen Charakterisierung von Einzugsgebieten. – In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Band 37, Heft Nr. 5/6: 122-126.
- ELLEN, S. & R. MARK (1993): Mapping debris flow hazard in Honolulu using a DEM. – Hydraulic Engineering '93, Proceedings 2: 1774 – 1779.
- EWALD, J. (1997): Bergmischwälder der Bayerischen Alpen – Soziologie Standortbindung und Verbreitung. – Dissertationes Botanicae, Bd. 290, 234 S., Stuttgart.
- FLIRI, F. (1975): Das Klima der Alpen im Raume von Tirol.- Monographien zur Landeskunde Tirols / Folge 1; Innsbruck

- FORSTTECHNISCHER DIENST FÜR WILDBACH UND LAWINENVERBAUUNG (FWL) (1995): Gefahrenzonenplan Gemeinde Zirl (unveröff.). Innsbruck
- FRECH, F. (1898): Über Muren. – Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Bd. 29: 1 – 26, München.
- GAMMA, P. (2000): dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. – Geographica Bernensia G66, 144 S.; Bern.
- GANSS, O. (1979): Geologie der Berchtesgadener und Reichenhaller Alpen, Berchtesgaden, 152 S.
- GRIFFITHS, P., WEBB, R. & T. MELIS (1997): Initiation of debris flow in tributaries of the Colorado river in Grand Canyon, Arizona. – In: CHEN, C-L.: Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Proceedings of the first international conference: 12 – 20.
- HAEBERLI, W., RICKENMANN, D. & M. ZIMMERMANN (1990): Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: general concept and geophysical soundings. – Hydrology in Mountainous Regions II – Artificial Reservoirs, Water and Slopes. – IAHS Publications 194: 303 – 310, Wallingsford.
- HAEBERLI, W., RICKENMANN, D. & M. ZIMMERMANN (1991): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Ergebnisse der Untersuchungen. – In: Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bd. 4: 77 – 8; Bern.
- HECKMANN, T. (2006): Untersuchungen zum Sedimenttransport durch Grundlawinen in zwei Einzugsgebieten der Nördlichen Kalkalpen – Quantifizierung, Analyse und Ansätze zur Modellierung der geomorphologischen Aktivität. – Eichstätter geographische Arbeiten Bd. 14, 312 S., München.
- HECKMANN, T., WICHMANN, V. & M. BECHT (2002): Quantifying sediment transport by avalanches in the Bavarian Alps - first results. – Zeitschrift für Geomorphologie, Bd. 46, Heft 127: 137-152.
- HEGG, C. (1996): Zur Erfassung und Modellierung von gefährlichen Prozessen in steilen Wildbacheinzugsgebieten.- Geographica Bernensia G52. 197 S.; Bern.
- HEINIMANN, H.R., HOLLENSTEIN, K., KIENHOLZ, H., KRUMMENACHER, B. & P. MANI (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. – Umweltmaterialien Nr. 85, Naturgefahren; Hrsg: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 248 S.
- HUNGR, O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slide, debris flow, and avalanches. – Canadian Geotechnical Journal, Bd. 32: 610–623.
- HUNGR, O., Mc Dougall, S. & Bovis, M. (2005): Entrainment of material by debris flow. – In: JAKOB, M. & O. HUNGR [Hrsg]: Debris flow hazards and related phenomena; Chichester, 739 S.
- HYDROGRAPHISCHER DIENST IN ÖSTERREICH (1994): Die Niederschläge, Schneeverhältnisse und Lufttemperaturen in Österreich im Zeitraum 1981 - 1990.- Beiträge zur Hydrographie Österreichs 52; Wien
- INFORMATIONSDIENST ALPINE NATURGEFAHREN des Bayerischen Landesamts für Umwelt in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Staatsforstverwaltung. - <http://212.124.44.168/ian/viewer.htm>
- IVERSON, R., REID, M. & R. LAHUSEN (1997): Debris-flow mobilisation from landslides. – Annual Review of earth and Planetary Sciences, Vol. 25: 85 – 138.
- IVERSON, R., DENLINGER, R., LAHUSEN, R. & M. LOGAN (2000): Two-phase debris-flow across 3-D terrain: Model predictions and experimental tests. – In: WIECZOREK & NAESER [Hrsg.]: Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Proceedings of the second international conference: 521 - 529, Rotterdam.

- JAKOB, M. & M.J. BOVIS (1996): Morphometric and geotechnical controls of debris flow activity, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada. – In: Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.Bd. 104, 13 – 26.
- JÖHL, B. (2000): Vergleichende Untersuchungen zur Entstehung und Verbreitung von Talmuren an Beispielen aus dem Bereich der Innsbrucker Nordkette. – Diplomarbeit am Institut für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München (unveröffentlicht).
- JOHNSON, A. (1970): Physical processes in geology. 577 S., San Francisco.
- JOHNSON, A.M. & J.R. RODINE (1984): Debris flow. – In: D. Brunsten & D. Prior [Hrsg.]: Slope instability: 257 – 361.\*
- KLIWA ARBEITSKREIS (2003) [Hrsg.]: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. – KLIWA-Berichte, Bd. 5, 76 S., München.
- KOCH, T. (1998): Testing various constitutive equations for debris flow modelling. – IAHS Publications 248: 249 – 257.
- KUHLE, M. (1984): Hanglabilität durch Rutschungen und Solifluktion im Verhältnis zum Pflanzenkleid in den Alpen, den Abruzzen und im Himalaya. – Entwicklung und ländlicher Raum 3/84, Frankfurt a.M..
- LAATSCH, W. & W. GROTTENTHALER (1972): Typen der Massenverlagerung in den Alpen und ihre Klassifikation. – Forstwissenschaftliches Centralblatt, 91. Jg, H. 6: 309 – 339, Hamburg.
- LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT: Pflingsthochwasser 1999 – ein Jahrhundertereignis an Iller, Ammer und Donau. – <http://www.bayern.de/LFW/hnd/ereignisse.htm>
- LIENER, S. (2000): Zur Feststofflieferung in Wildbächen. – Geographica Bernensia G64, 191S., Bern.
- LORENTE, A., BEGUERÍA, S., C. BATHURST, J. & J. M. GARCÍA-RUIZ (2003): Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. – Natural Hazards and Earth System Sciences; Bd. 3: 683–692.
- LUNGHAMMER, R. (2000): Vergleichende Untersuchungen zur Entstehung und Verbreitung von Talmuren im Ehnbachgebiet / Karwendelgebirge. – Diplomarbeit am Institut für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München (unveröffentlicht).
- MARK R.K. & S.D. ELLEN (1995): Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard. – In: CARRARA, A. & F. GUZZETTI [HRSG.]: Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards: 93 – 106.
- MONTGOMERY D.R. & W.E. DIETRICH (1994): A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. – Water Resources Research 30 (4): 1153 – 1171.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1996): Klimadaten von Deutschland. Zeitraum 1961 – 1990. – Offenbach am Main.
- OKUDA, S., SUWA, H., OKUNISHI, K., YOKOHAMA, K. & M. NAKANO (1980): Observations on the motion of a debris flow and its geomorphological effects. – In: Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd. 35, S. 142 – 163.
- PERLA, R., CHENG, T.T. & D.M. MCCLUNG (1980): A two-parameter model of snow-avalanche motion – Journal of Glaciology, Vol. 26: 197 – 207.
- PRICE, W.E. (1976): A Random-Walk Simulation Model of Alluvial-Fan Deposition. – In: MERRIAM, D.F. [HRSG.]: Random Processes in Geology: 55 – 62.
- RESCH, W. (1989) Die Gebirge im Einzugsgebiet des Tiroler Oberinntals. – In: Heyn, H. (1989): Der Inn, vom Engadin ins Donautal, von der Urzeit bis heute. 392 S., Rosenheim.
- RICKENMANN, D. (1990): Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and fluvial sediment transport. – In: IAHS Publications, 194: 371-378;
- RICKENMANN, D. (1991): Modellierung von Murgängen. – Berichte und Forschungen Geogr. Institut Fribourg 3: 33 – 45, Fribourg.

- RICKENMANN, D. (2005): Runout prediction methods. – In: JAKOB, M. & O. HUNGR [Hrsg]: Debris flow hazards and related phenomena; Chichester, 739 S.
- RICKENMANN, D & T. KOCH (1997): Comparison of debris flow modelling approaches. – In: Chen, C.-I. [Hrsg.]: Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Proceedings of the first International Conference: 576 – 585.
- RIEGER, D. (1999): Bedingungen für die Entstehung von Hangmuren – Münchner Geographische Abhandlungen, Bd. A51.
- SANDERSEN, F., BAKKERHOI, S., HESTNES, E. & K. LIED (1996): The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. – Senneset (Ed.) (1996): Landslides. Rotterdam.
- SASSA, K. (1984): The mechanism to initiate debris flows as undrained shear of loose sediments. – Internationales Symposium Interpraevent 1984, Villach: 73 – 87.
- SCARLATOS, P.D. & V.P. SINGH (1986): Mud flows and sedimentation problems associated with a dam-break event. – Proceedings of Third International Symposium on River Sedimentation, Mississippi, USA: 1063 – 1068.
- SCHOLZ, H. (1995): Bau und Werden der Allgäuer Landschaft. 305 S., Stuttgart.
- SOMMERHOFF, G. (1971): Zum Stand der geomorphologischen Forschung im Karwendel. – In: Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft München Bd. 56: S.152-169; München.
- STERLING, S. & O. SLAYMAKER (2007): Lithologic control of debris torrent occurrence. – Geomorphology, Bd. 86, S. 307–319.
- STINY, J. (1910): Die Muren. Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen. 130 S., Innsbruck
- STRUNK, H. (1991): Frequency Distribution of Debris Flows in the Alps since the “Little Ice Age”. – In: Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd. 83, S. 71 – 81, Berlin.
- STRUNK, H. (1995): Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. – Theorie und Forschung, Bd. 317, Regensburg.
- TAKAHASHI, T. (1981): Estimation of potential debris flow and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. – Journal of Natural Disaster Science, Bd. 3: 57 – 89.
- TAKAHASHI, T. (1991): Debris flow. – IAHR – AIRH monograph series. Rotterdam.
- TAKAHASHI, T. (2007): Debris flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures. 448 S., London.
- TAKAHASHI, T., NAKAGAWA, H. & S. KUANG (1987): Estimation of debris flow hydrograph on varied slope bed. – IAHS Publication 165: 167 – 177.
- TOGNACCA, C. (1999): Beitrag zu Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. – Mitt. der Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bd. 164.
- TOGNACCA, C., BEZZOLA, G.R. & H.-E. MINOR (2000): Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. – In: WIECZOREK & NAESER [Hrsg.]: Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Proceedings of the second international conference: 89 - 97, Rotterdam.
- VARNES, D.J. (1978): Slope movement types and processes. – In: Schuster, R.L. & R.J. Krizek [Hrsg.]: Landslide analysis and control. Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy of Science: 12 – 33. Washington D.C.
- VOELLMY, A. (1955): Über die Zerstörungskraft von Lawinen. – Schweizerische Bauzeitung 73: 159 – 165, 212 – 217, 246 – 249, 280 – 285.
- VOIGTLÄNDER, W. (1980): Tegernseer Tal. - erdgeschichtliche Wanderungen ; eine Einführung in die Erd- und Landschaftsgeschichte. 108 S., Gröbenzell.
- WALENTOWSKY, H., H. - J. GULDER, C. KÖLLING, J. EWALD & W. TÜRK (2001): Die regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns.

- WICHMANN, V. (2004): Bedienungsanleitung zum SAGA DF DispoChannel Modul. – Interner Bericht am Lehrstuhl für Physische Geographie der KU Eichstätt-Ingolstadt.
- WICHMANN, V. (2006): Modellierung geomorphologischer Prozesse in einem alpinen Einzugsgebiet. – Abgrenzung und Klassifizierung der Wirkungsräume von Sturzprozessen und Muren mit einem GIS. – Eichstätter Geographische Arbeiten, Bd. 15, 231 S., München.
- WICHMANN, V. & M. BECHT (2005): Modeling of Geomorphic Processes in an Alpine Catchment. – In: ATKINSON, P.M., FOODY, G.M., DARBY, S.E. & F. WU [Hrsg.]: GeoDynamics: 151-167
- WICHMANN, V., HECKMANN, T., HAAS, F. & M. BECHT (2009): A new modelling approach to delineate the spatial extent of alpine sediment cascades : GIS and SDA applications in geomorphology. Geomorphology. Bd. 111 Heft 1/2: 70-78.
- WICHMANN, V.; MITTELSTEN SCHEID, T. & M. BECHT (2002): Gefahrenpotential durch Muren: Möglichkeiten und Grenzen einer Quantifizierung. – In: Trierer Geographische Studien 25: 131 – 142.
- WICHMANN, V., RUTZINGER, M. & M. VETTER (2008): Digital terrain model generation from Airborn Laser scanning point data and the effect of grid-cell size on the simulation results of a debris flow model. – Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie, Bd. 19: 103 – 113.
- WILSON, R. (1997): Normalizing rainfall/debris-flow thresholds along the U.S. Pazific Coast for long-term variations in precipitation climate. – In: CHEN, C-L. (1997): Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Proceedings of the first international conference: 33 – 43.
- ZEVENBERGEN, L. & C. THORNE (1987): Quantitative analysis of land surface topography. – Earth surface processes and landforms, Vol. 12: 47 – 56.
- ZIMMERMANN, M. (1990): Debris flows 1987 in Switzerland: geomorphological and meteorological aspects. – Hydrology in Mountainous Regions II – Artificial Reservoirs, Water and Slopes. – IAHS Publications 194: 387 – 393; Wallingsford.
- ZIMMERMANN, M. (1991): Periglaziale Murgänge. – Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) 108: 89 – 107, Zürich.
- ZIMMERMANN, M., MANI, P., GAMMA, P., GSTEIGER, P., HEINIGER, O. & G. HUNZIKER (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Projektschlussbericht NFP 31, 161 S.; Zürich.