

Untersuchungen zum fluvialen Sedimenttransport in Einzugsgebieten
der nördlichen Kalkalpen (Reintal/Wettersteingebirge und
Lahnenwiesgraben/Ammergauer Alpen)

Dissertation



zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
(Agrar,- Geowissenschaften, Mathematik und Informatik)
der Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg

Institut für Geowissenschaften
Physische Geographie



von **David Morche**

Gutachter: 1. Prof. Dr. Karl-Heinz Schmidt (Institut für Geowissenschaften,
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)
2. PD Dr. Karl-Friedrich Wetzel (Institut für Geographie, Universität
Augsburg)

Tag der Verteidigung: 03.12.2008

urn:nbn:de:gbv:3-000014644

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000014644>]

1 EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG	1
2 DIE UNTERSUCHUNGSGEBIETE.....	4
2.1 Lage und Nutzung	4
2.2 Exkurs zur Geschichte des Reintals.....	5
2.3 Naturräumliche Ausstattung	7
2.3.1 Ergänzungen zur Geologie des Reintals	8
2.3.2 Die Sedimentkaskade Reintal	9
2.3.3 Ergänzungen zur Hydrologie des Reintals.....	10
3 METHODEN	11
3.1 Messstationen.....	11
3.2 Abflussmessungen.....	13
3.4 Bestimmung der Lösungs- und Schwebfracht	14
3.5 Geschiebemessungen	16
3.6 Morphometrie des Grobgeschiebes.....	16
3.7 Granulometrische Analyse.....	17
3.7 Terrestrische Vermessung	20
3.8 Terrestrisches Laserscanning.....	21
4 ERGEBNISSE	22
4.1 Abflusskurven.....	22
4.1.1 Abflusskurven Reintal	22
4.1.1.1 Messstation Partnach-Ursprung	22
4.1.1.2 Messstation „Bockhütte“	23
4.1.1.3 Weitere Messstationen im Reintal	24
4.1.2 Abflusskurven Lahnenwiesgraben (Messstation „Burgrain“)	24
4.2 Das Abflussgeschehen.....	25
4.2.1 Reintal	25
4.2.1.1 Messstation Partnach-Ursprung	25
4.2.1.2 Messstation „Bockhütte“	27
4.2.2 Lahnenwiesgraben (Messstation „Burgrain“).....	29
4.3. Sedimenttransport/- haushalt*	31
4.3.1 Sedimenttransfer vom Hang- zum Gerinnesystem	31
4.3.1.1 Morche, D., Schmidt, K.-H. (2005). Particle size and particle shape analyses of unconsolidated material from sediment sources and sinks in a small Alpine catchment (Reintal, Bavarian Alps, Germany). Z Geomorphol NF Suppl Bd. 138. pp. 67-80. (Abstract)	31
4.3.2 Sedimentausttrag und Bestimmung des effektiven Abfluss	32
4.3.2.1 Morche, D. (2005). Calculating the fluvial sediment output in high mountain catchments. RMZ – Materials & Geoenvironment 52 (1), pp. 99-102. (Abstract)	32

INHALTSVERZEICHNIS

4.3.2.2 Schmidt, K.-H., Morche, D. (2006). Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany. <i>Geomorphology</i> 80, pp. 131-145. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.09.013 (Abstract).....	33
4.3.2.3 Morche, D. (2006). Aktuelle hydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung (Wettersteingebirge). <i>Wasserwirtschaft</i> 96 (1-2), 53-58. (Kurzfassung).....	33
4.3.3 Sedimenttransportgeschehen in Teilabschnitten der Partnach im Reintal	34
4.3.3.1 Morche, D., Katterfeld, C., Fuchs, S., Schmidt, K.-H. (2006). The life-span of a small high mountain lake, the Vordere Blaue Gumpe in Upper Bavaria, Germany. In: Rowan, J., Duck, R. W. & A. Werritty (eds.). <i>Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems</i> . IAHS Publication 306, IAHS Press, Wallingford, pp. 72-81. (Abstract)	34
4.3.3.2 Sass, O., Krautblatter, M., Morche, D. (2007). Rapid lake infill following major rockfall (bergsturz) events revealed by ground-penetrating (GPR) measurements, Reintal, German Alps. <i>The Holocene</i> 17 (7), pp. 965-976. DOI:10.1177/0959683607082412 (Abstract).....	34
4.3.3.3 Morche, D., Witzsche, M., Schmidt, K.-H. (2008). Hydrogeomorphological characteristics and fluvial sediment transport of a high mountain river (Reintal Valley, Bavarian Alps, Germany). <i>Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge</i> 52 Supplementary Issue 1, pp. 51-77. DOI:10.1127/0372-8854/2008/0052S1-0051 (Abstract)	35
4.3.4 Rekonstruktion des Hochwassers vom August 2005 im Reintal und seine geomorphologischen Auswirkungen.....	36
4.3.4.1 Morche, D., Schmidt, K.-H., Heckmann, T., Haas, F. (2007). Hydrology and geomorphic effects of a high magnitude flood in an Alpine river. <i>Geografiska Annaler</i> 89 A (1), pp. 5-19. DOI:10.1111/j.1468-0459.2007.00304.x (Abstract)	36
4.3.4.2 Morche, D., Schmidt, K.-H., Sahling, I., Herkommer, M., Kutschera, J. (in press). Volume changes of Alpine sediment stores in a state of post-event disequilibrium and the implications for downstream hydrology and bed load transport. <i>Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography</i> 62 (Abstract)	36
4.3.4.3 Morche, D., Laute, K. (submitted). Investigating channel response to a dambreak flood event in an Alpine river. <i>Arct Antarct Alp Res</i> (Abstract).....	37
5 ZUSAMMENFASSUNG	38
6 DISKUSSION UND AUSBLICK.....	40
7 SUMMARY.....	42
8 LITERATUR	43
AUFSTELLUNG DER VERWENDETEN KARTEN UND LUFTBILDER	
439	
ANGABEN ZUR PERSON UND ERKLÄRUNGEN	50

* Aus urheberrechtlichen Gründen sind die Originalarbeiten in der online-version der Dissertation nur mit ihrer Kurzfassung (abstract) enthalten.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1. Die Lage der Untersuchungsgebiete im Werdenfelser Land. „Situations Charte über die Churfürstl. Grafschaft WERDENFELS“ aus dem Jahr 1803 (© Bayerisches Hauptstaatsarchiv Plansammlung 5300, Erlaubnis zur Publikation erteilt am 5. März 2007, Az: 2007/01288/Mo). Die Karte ist nicht eingeordnet.	4
Abb. 2.2. Grenzkarte zwischen Werdenfels und Tirol im Wetterstein - und Karwendelgebirge. „Grundlegung deren Tyrol an Germisch und Partenkärch angrenzenden Confinien“. (© Bayerisches Hauptstaatsarchiv Plansammlung 10082, Erlaubnis zur Publikation erteilt am 5. März 2007, Az: 2007/01288/Mo). Das Reintal ist links in der Karte eingezeichnet.	6
Abb. 2.3. Tektonische Skizze des südwestlichen Wettersteingebirges (verändert nach Heller & Nieder 1932)	8
Abb. 2.4. Die Sedimentkaskade des Reintals (verändert nach Schrott et al. 2003).....	9
Abb. 3.1. Messstation „Bockhütte“ mit Hilfspegel von Blöcken am Ufer geschützt und Instrumentierung (Fotos Maik Unbenannt 19.6.2000).....	11
Abb. 3.2. Überblick Messstation „Partnach-Ursprung“ mit Messsteg am Einlass zur Rohrleitung für das Turbinenhäuschen der „Reintalangerhütte“ (links) (Foto Markus Witzsche 5. September 2003), Auslesen der Loggereinheit Orpheus-K (rechts) (Foto David Morche 6. Juni 2006)	12
Abb. 3.3. Abflussmessung (links) und Geschiebemessung mittels Helley-Smith-Sammler (rechts) an der Messstation „Bockhütte“ am 18. Juli 2005 bei $Q = 3,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Fotos Olaf Klammer).....	14
Abb. 3.4. Gesammeltes grobes Geschiebematerial im 3 Inch Helley-Smith-Sammler (Fotos Alexander Nicolay 12. Juli 2007).....	16
Abb. 3.5. Messung des kleinsten Krümmungsradius in der Ebene von A- und B-Achse eines groben Schotterpartikels nach der Methode von Cailleux (1952) (Foto Frank Rothe 27. Juli 2005).....	17
Abb. 3.6. Terrestrische Vermessung des Grieses der Vorderen Blauen Gumpe (Foto Mario Rossberg 16.11.2006).....	20
Abb. 4.1. Der Quelltopf (Partnach-Ursprung) am 16. September 2006 (links) und am 19. März 2007 (Mitte) und die Pegelmessstelle am 19. März 2007 (rechts).....	26
Abb. 4.2. Abflussganglinien der Partnach der Jahre 2002 bis 2006 von der Messstation Partnach-Ursprung. Unterbrechungen der Ganglinien sind auf technische Defekte des Datenloggers zurückzuführen. Achtung: Die 2005er y-Achse weist eine andere Skalierung auf.	26
Abb. 4.3. Abflussganglinien der Partnach der Jahre 2000 bis 2006 von der Messstation Bockhütte. Unterbrechungen der Ganglinien sind auf technische Defekte des Datenloggers zurückzuführen. Der erste Teil der Ganglinie des Jahres 2003 ist eine Rekonstruktion, die auf einzelnen Abflussmessungen basiert. Dieser rekonstruierte Verlauf der Abflussganglinie ist nicht mit in die Berechnung der Hauptwerte des Jahres 2003 eingegangen (Tab. 4.4). Achtung: Die y-Achse von 2006 ist anders skaliert.	28
Abb. 4.4. Abflussganglinien des Lahnenwiesgrabens der Jahre 2000 bis 2006 von der Messstation Burgrain. Unterbrechungen der Ganglinien sind auf technische Defekte des Datenloggers zurückzuführen. Die Ganglinie ab dem 20. August 2005 ist aufgrund einzelner Beobachtungen des Wasserstandes am Pegel rekonstruiert. Einzelne möglicherweise aufgetretene kleinere Ereignisse im Herbst 2005 sind dadurch nicht mit abgebildet.	30

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1. Aktuelle dem Autor bekannte Forschungsprojekte, -kooperationen mit Bezug zu Sedimenttransport (DFG-Deutsche Forschungsgemeinschaft, ESF-European Science Foundation, IAG-International Association of Geomorphologists)	1
Tab. 2.1. Physisch-geographische Eigenschaften beider Untersuchungsgebiete (nach Haas 2008, Keller 2008, Koch 2005, Heckmann 2006, Wichmann 2006). Die vorhandenen Daten über das Zugspitzplatt sind in Klammern denen des Reintals nachgestellt. Rundungsbedingt ergeben die Anteile der Vegetationsklassen mehr als 100%.	7
Tab. 3.1. In Deutschland gebräuchliche Einteilung und Bezeichnung der Korngrößenklassen sowie angewandte Methoden zur Bestimmung der Korngrößen.	18
Tab. 3.2. Zeitraum, Messpunktanzahl und Punktdichten der einzelnen Vermessungen im 17500 m ² großen Griesbereich der Vorderen Blauen Gumpe	21
Tab. 4.1 Abflusskurven Reintal, n = Anzahl der Abflussmessungen der jeweiligen Station im jeweiligen Jahr, $\sum n$ = kumulierte Anzahl der Abflussmessungen einer Messstation, SE = Standardfehler (Standardabweichung der Regressionsresiduen nach Bahrenberg et al. 2003, S. 52), k. A. = keine Angabe	23
Tab. 4.2. Abflusskurven Lahnenwiesgraben (Messstation Burgrain). n = Anzahl der Abflussmessungen im jeweiligen Jahr, $\sum n$ = kumulierte Anzahl der Abflussmessungen, SE = Standardfehler (Standardabweichung der Regressionsresiduen nach Bahrenberg et al. 2003, S. 52), ¹ Datengrundlage Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft München mit Eta = 0,5 (mittlere Abflusskurve), ² ohne die Werte $W < 3$ cm, ³ inkl. Daten $W \leq 49$ cm vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft, k. A. = keine Angabe	25
Tab. 4.3. Hydrologische Kenngrößen der Messstation Partnach-Ursprung. Im Winter fließt an einigen Tagen kein Wasser aus dem Quelltopf, daher beziehen sich alle Werte für den niedrigsten Abfluss (NQ), den mittleren Abfluss (MQ) und den höchsten Abfluss (HQ) auf die gemessenen Abflüsse.....	27
Tab. 4.4. Hydrologische Kenngrößen der Messstation „Bockhütte“	29
Tab. 4.5. Hydrologische Kenngrößen der Messstation „Burgrain“, der HQ von 2005 ist nicht direkt gemessen (siehe Text).	30

DANKSAGUNG

DANKSAGUNG

Die Bearbeitung der vorliegenden Arbeit wäre ohne die Unterstützung meiner Familie, Freunde und Kollegen nicht möglich gewesen.

Zu allererst möchte ich meinem Betreuer Prof. Karl-Heinz Schmidt danken. Er weckte in mir schon zu Zeiten meines Studiums das Interesse an der Geomorphologie, ermöglichte mir die Mit- und Zusammenarbeit im SEDAG-Forschungsprojekt und gewährte mir die zur Bearbeitung des Themas nötigen Freiräume.

Maik Unbenannt und Thomas Vetter leisteten in der ersten Projektphase grundlegende Vorarbeiten, auf denen ich sehr gut aufbauen und sie erweitern konnte.

Meinen Kollegen Ingo Sahling, Olaf Klammer, Bernd Wendt und Thilo Schmalfeld sei für ihren anstrengenden Geländeeinsatz gedankt. Ihnen und Ilka Fabig, Andrea Srugies, Daniel Wurbs, Ekkehardt Ließ und Wolfram König verdanke ich darüber hinaus wichtige Gespräche, Diskussionen und kollegiales Verhalten in den letzten Jahren.

Christian Katterfeld, Eyk Hasselwander, Holger Redlich, Antje Krause, Katja Laute, Markus Witzsche, Sebastian Fuchs, Anika Neubert, Alexander Nicolay, Mario Rossberg und Frank Rothe waren über die Jahre als studentische Mitarbeiter tätig und eine sehr wertvolle Hilfe im Gelände, Labor und/oder bei der Datenaufbereitung.

Den SEDAG-Kollegen Tobias Heckmann, Florian Haas, Volker Wichmann, Michael Becht (alle Eichstätt), Dirk Keller (Erlangen), Michael Krautblatter (Bonn), Thomas Vetter (Greifswald), Florian Koch (Regensburg) sowie Lothar Schrott und Joachim Götz (beide Salzburg) danke ich für die unzähligen gemeinsamen Treffen im Gelände und anderswo, sowie die vielen fruchtbringenden Diskussionen.

Karl-Friedrich Wetzel gab mir während des gemeinsamen Feldaufenthalts im August 2005 die Gelegenheit, wichtige Erkenntnisse zu fluvialgeomorphologischen Prozessen während eines Hochwasserereignisses zu gewinnen und richtig zu interpretieren.

Karin Schulz, Silke Kurze und Michael von Hoff leisteten unter der Ägide von Laborleiter Michael Zierdt wertvolle Arbeit im Labor. Ihnen sei für die stets fehlerfreien Analyseergebnissen der Wasser- und Sedimentproben gedankt.

Für eine Pilotstudie im Reintal zum Einsatz ein terrestrischen Laserscanners stellten die Firmen TopScan GmbH (Michael Fluch) und geo-konzept GmbH (Martin Herkommer und Johannes Kutschera) freundlicherweise das Laserscansystem ILRIS-3D zur Verfügung.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) förderte das Forschungsprojekt (Az. SCHM 472/12-1 bis 3) finanziell. Die Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg unterstützte das Projekt mit Mitteln aus dem Strukturfonds (Titel 51171 und 42769) sowie mit der Bereitstellung von KFZ für die Geländefahrten. Von der Gemeinde Garmisch-Partenkirchen

DANKSAGUNG

und vom Forstbetrieb Oberammergau (Bayerische Staatsforsten AöR) wurden für die Befahrung der nicht öffentlichen Wege zu und in den Untersuchungsgebieten freundlicherweise Fahrgenehmigungen ausgestellt.

Meine Teilnahmen an den internationalen Tagungen „IASWS“ Bled/Slowenien (2005), „IAHS“ Dundee/Schottland (2006), „GeoMed“ Kemer/Türkei (2007) und „IASWS“ Esperance/Australien (2008) wurden durch Reisekostenzuschüsse von der Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg (Titelgruppe 77) sowie vom Deutschen Arbeitskreis für Geomorphologie ermöglicht.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie. Sie unterstützte mich über all die Jahre, obwohl sie oft meine wochenlange Abwesenheit erdulden musste.

VORWORT

Ein Berg kann zerfallen und vergehen und ein Fels von seiner Stätte weichen, Wasser wäscht Steine weg, und seine Fluten schwemmen die Erde weg: so machst du die Hoffnung des Menschen zunichte.

(Das Buch Hiob 14; 18,19)

Denn das Ende eines Sees vergeht sich im „Landwerden“.

(Doposcheg (o.a. ca. 1938), S. 85)



Die Vordere Blaue Gumpe am 17. August 2005 (eigene Aufnahme)

VORWORT

Die vorliegende kumulative Dissertation entstand aufbauend auf meinen Forschungstätigkeiten im DFG-Projekt „Materialtransfer in alpinen Fließgewässersystemen – Mobilität und funktionale Kopplungen“ (Az. SCHM 472/12-1 bis 3). Dieses Projekt war Teil des übergeordneten DFG-Bündelprojektes „Sedimentkaskaden in alpinen Geosystemen“ (SEDAG).

Die vorliegende Dissertationsschrift umfasst 12 wissenschaftliche Publikationen, die in anerkannten nationalen und internationalen Zeitschriften publiziert oder im Druck bzw. eingereicht sind. Die Originalarbeiten basieren auf eigenen, gemeinschaftlich mit oder ergänzend zu den Koautoren durchgeführten Geländeuntersuchungen, Datenanalysen und Diskussionen. Bis auf zwei haben alle Originalarbeiten ein „peer-review“-Verfahren durchlaufen. Der zentrale Teil der Ergebnisse, die Quantifizierung des fluvialen Sedimenttransports/-haushalts in Hochgebirgseinzugsgebieten, zieht sich wie ein verknüpfender roter Faden durch alle Publikationen.

EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG

1 EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG

Die spätholozänen Klimaveränderungen sind vorwiegend auf anthropogenen Einfluss zurückzuführen (IPCC 2007). Doch der fluviale Sedimenttransport vom Festland zum Ozean wird wesentlich von geomorphologischen bzw. tektonischen Parametern, weniger von klimatischen Faktoren oder menschlichem Einfluss, bestimmt (Syvitski & Milliman 2007). Gleichzeitig spielen kleine Gebirgsfließgewässersysteme und -einzugsgebiete als Lieferant von Sediment im Kontext des globalen Sedimentflusses eine bedeutende Rolle (Milliman & Syvitski 1992).

In Gebieten, die durch hohe Sedimentflüsse gekennzeichnet sind und in denen gleichzeitig der Nutzungsanspruch des Menschen wächst, steht die Bedeutung außer Frage, genaue Kenntnisse der vorherrschenden geomorphologischen Prozesse zu haben, sei es zur Planung von Infrastruktur für Tourismus und Verkehr aber auch zur Naturgefahrenabwehr. Solche Gebiete sind in Mitteleuropa vorwiegend in den Alpen zu finden.

Empirische prozessorientierte geomorphologische Feldstudien können bedeutende Erkenntnisse zur Reliefgenese in der jüngeren geologischen Vergangenheit (Pleistozän/Holozän) des Gebirgsgeosystems der Alpen sowie über die Reaktion des Gesamtsystems bzw. seiner Teilkompartimente in Bezug auf Klimaänderungen liefern. In diesem Kontext spielen quantifizierende Untersuchungen zur rezenten Reliefentwicklung in den Gebirgen und Gebieten der hohen Breiten eine immer stärkere Rolle. Die zunehmende Bedeutung dieser Forschungsrichtung schlägt sich auch in verstärkter Förderung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten und Wissenschaftskooperationen in der jüngeren Vergangenheit und Gegenwart nieder (Tab. 1.1).

Tab. 1.1. Aktuelle dem Autor bekannte Forschungsprojekte, -kooperationen mit Bezug zu Sedimenttransport (DFG-Deutsche Forschungsgemeinschaft, ESF-European Science Foundation, IAG-International Association of Geomorphologists)

Projekt	Acronym	Förderung	Laufzeit
Sedimentkaskaden in Alpinen Geosystemen	SEDAG	DFG	2000-2006
Sedimentary source to sink fluxes in cold environments	SEDIFLUX	ESF	2004-2006
Sediment budgets in cold environments	SEDIBUD	IAG	2006-2009
Auswirkungen von Extremereignissen auf die Funktion von Sedimentspeichern und -quellen, auf die Materialmobilität und den fluvialen Sedimenttransfer in einem alpinen Fließgewässersystem		DFG	2008-2011
Konnektivitätsanalyse des geomorphologischen Prozessgefüges in zentralalpinen Geosystemen	SediCouple	DFG	2008-2010
Timescales of sediment dynamics, climate and topographic change in mountain landscapes (TOPO-EUROPE) (submitted)	SedyMONT	ESF	2008-2011

Die Quantifizierung der aktuellen Reliefentwicklung in Gebirgsräumen ist seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zentraler Teil geomorphologischer Forschungsarbeit. Grundlegende Wegbereiter der „quantifizierenden Geomorphologie“ waren Heinrich Jäckli (Schweiz) und Anders Rapp (Schweden). Dies wurde jüngst von Embleton-Hamann & Slaymaker (2006) nochmals herausgestellt. Die in den Arbeiten von Jäckli (1957) und Rapp (1960) verwendeten Konzepte werden bis heute in Untersuchungen zum Sedimenthaushalt benutzt (z.B. Beylich & Sandberg 2005, Schrott et al. 2003). Es werden jedoch meist nur einzelne geomorphologische Prozesse nebeneinander betrachtet und quantifiziert. Eine übergeordnete Betrachtungsweise oder gar Modellierung der Verknüpfungspunkte und -räume des Sedimenttransfers zwischen diversen geomorphologischen Prozessen innerhalb von Hochgebirgseinzugsgebieten stellte ein Forschungsdefizit dar, welches mit dem geowissenschaftlichen Bündelprojekt „Sedimentkaskaden in alpinen Geosystemen“ (SEDAG) behoben werden sollte. Dieses Projekt wurde von 2000 bis 2006 in den bayerischen Alpen durchgeführt. Die Projektpartner, bestehend aus den geowissenschaftlichen Arbeitsgruppen um Prof. Dikau (Bonn), Prof. Schrott (Bonn/Salzburg), Prof. Becht (München/Göttingen/Eichstätt), Prof. Moser (Erlangen), Prof. Strunk (Regensburg) und Prof. Schmidt (Halle), untersuchten jeweils in unterschiedlichen Skalen verschiedene geomorphologische Prozesse und deren Kopplungen innerhalb alpiner Sedimentkaskaden.

Das fluviale Transportband stellt das letzte Bindeglied einer alpiner Sedimentkaskade dar und war daher ein zentrales Forschungsobjekt im haleschen Teilprojekt „Materialtransfer in alpinen Fließgewässersystemen – Mobilität und funktionale Kopplungen“ von SEDAG. Für die Bilanzierung des Gesamtsystems wie auch für die Modellierung der Sedimentkaskade ist die Kenntnis über den Materialexport aus dem System von entscheidender Bedeutung.

Zentrales Anliegen der vorliegenden Arbeit ist die Darstellung empirisch erhobener Erkenntnisse zum fluvialen Sedimenttransfer in zwei kleinen kalkalpinen Einzugsgebieten. Im Vordergrund steht dabei die Quantifizierung des Exports der einzelnen Frachtkomponenten über die Grenzen der Einzugsgebiete hinaus. Die Ermittlung von Abflussklassen, die das Sedimenttransportgeschehen im Untersuchungszeitraum dominieren (effective discharge concept), steht damit in engem Zusammenhang. Darüber hinaus wurde das Feststofftransportgeschehen innerhalb von Teileinzugsgebieten des Untersuchungsgebietes Reintal/Wettersteingebirge in verschiedenen Zeitskalen näher quantifiziert. Dies begründet den räumlichen Schwerpunkt der durchgeführten Geländearbeiten und spiegelt sich in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen der vorliegenden Dissertationsschrift wider.

Folgende Ziele werden in dieser Arbeit verfolgt:

- I) die Erfassung des Abflussgeschehens am Auslass der beiden Hochgebirgseinzugsgebiete Reintal/Wettersteingebirge und Lahnenwiesgraben/Ammergauer Alpen. Hinzu kommt die Erfassung des Abflussgeschehens am Partnachursprung im Reintal,
- II) die Ermittlung des Sedimentaustrages (sowohl gelöste als auch Feststoffe) an den Messstationen „Bockhütte“/Reintal und „Burgrain“/Lahnenwiesgraben und Bestimmung der für den Sedimentaustag effektivsten Abflüsse,
- III) Untersuchungen zum Sedimenttransfer von den Hängen ins Gerinne im Reintal und
- IV) die Quantifizierung des Sedimenttransfers innerhalb von genauer untersuchten Gerinneabschnitten der Partnach/Reintal.

Im Jahr 2005 traten im Alpenraum extreme Hochwasserereignisse auf (Bezzola & Hegg 2007, Holle et al. 2005, Müller & Godina 2005), so auch im Reintal, einem der Untersuchungsgebiete. Dieses Ereignis störte das strukturelle Gleichgewicht des Fließgewässersystems der Partnach erheblich. Seine Auswirkungen waren landschaftsprägend. Glücklicherweise kam es nicht zu größeren materiellen Schäden. Um die Reaktion des betroffenen Fließgewässersystems auf die gravierenden geomorphologischen Störungen zu ermitteln, wurden weitere Geländeuntersuchungen nötig. Als ergänzende Zielstellungen ergeben sich daher:

- V) die Rekonstruktion des Herganges des Hochwassers und seine geomorphologischen Auswirkungen im Reintal und
- VI) die Quantifizierung des Feststofftransportes während des Hochwassers und des darauffolgenden Jahres.

Teile der durchgeführten Arbeiten zu letzteren Zielen dieser Arbeit (V und VI) stellten wesentliche Voruntersuchungen zur Beantragung des DFG-Projektes „Auswirkungen von Extremereignissen auf die Funktion von Sedimentspeichern und -quellen, auf die Materialmobilität und den fluvialen Sedimenttransfer in einem alpinen Fließgewässersystem“ (Az. SCHM 47/15-1) dar. Durch erfolgte Bewilligung des Projektes (Laufzeit 2008-2011) ist es möglich, mittelfristige Auswirkungen des Extremereignisses über mehrere Jahre detailliert zu ermitteln und diese zukünftigen Ergebnisse mit den in dieser Dissertationsschrift vorgestellten Untersuchungen zu vergleichen, um dann Aussagen über den Systemstatus des Fließgewässers machen zu können.

UNTERSUCHUNGSGEBIETE

2 DIE UNTERSUCHUNGSGEBIETE

2.1 Lage und Nutzung

Die Forschungsarbeiten wurden im Reintal (11° 01' - 11° 06' ö. L., 47° 24' - 47° 26' n. B.) und im Lahnenwiesgraben (11° 00' - 11° 06' ö. L., 47° 30' - 47° 33' n. B.) im Werdenfelser Land (Oberbayern) unweit von Garmisch-Partenkirchen durchgeführt (Abb. 2.1).

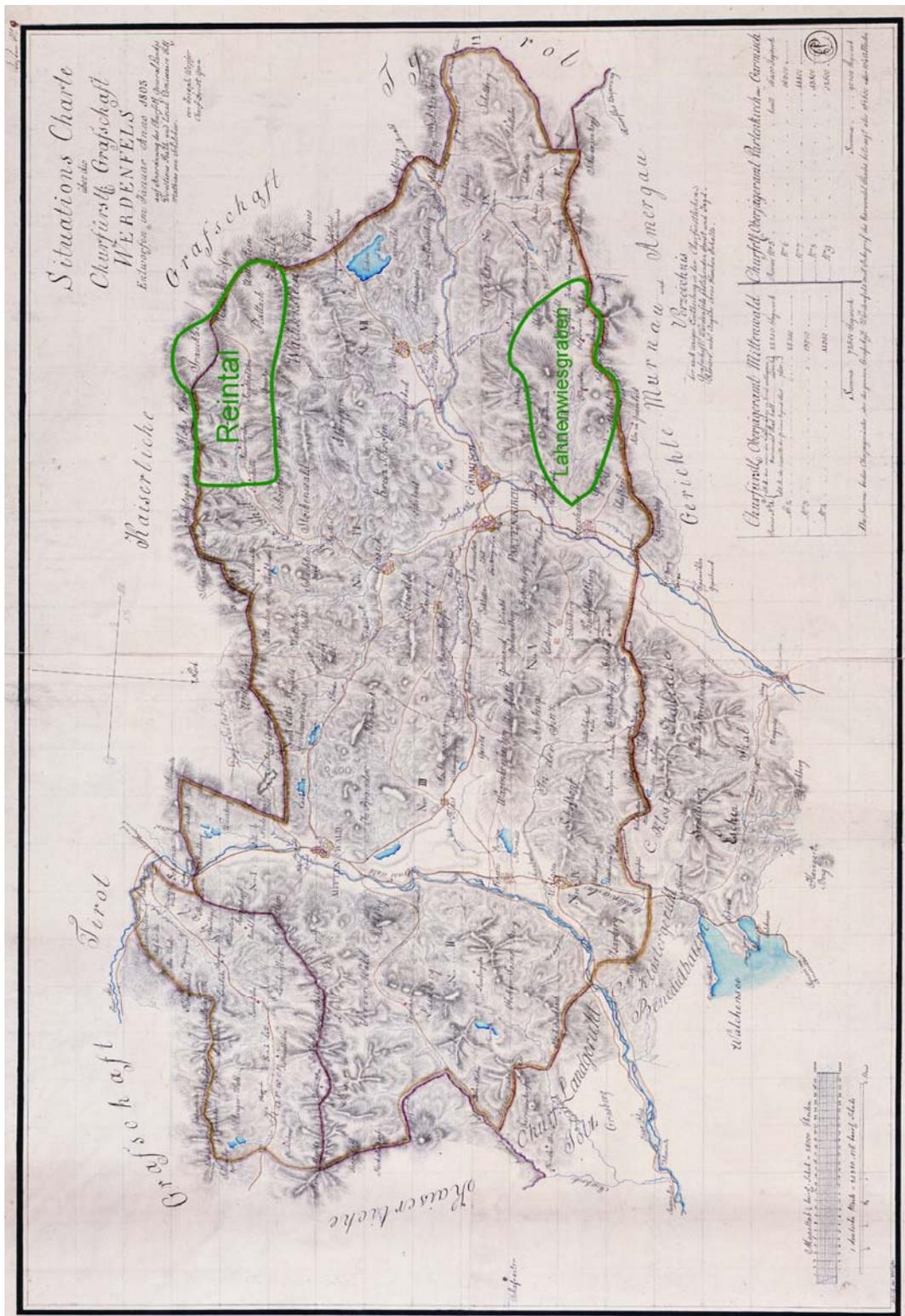


Abb. 2.1. Die Lage der Untersuchungsgebiete im Werdenfelser Land. „Situations Charte über die Churfürstl. Grafschaft WERDENFELS“ aus dem Jahr 1803 (© Bayerisches Hauptstaatsarchiv Plansammlung 5300, Erlaubnis zur Publikation erteilt am 5. März 2007, Az: 2007/01288/Mo). Die Karte ist nicht eingemordet.

UNTERSUCHUNGSGBIETE

Die Darstellung der Lage der Untersuchungsgebiete auf dieser historischen Karte von 1803 ist bewusst gewählt und weist zugleich auf die Bedeutung historischer Quellen (Skizzen, Karten, Aquarelle) bei der Datierung geomorphologischer Großereignisse und Prozesse (z.B. Bergstürze), die auch einen Teil der vorliegenden Studie umfassen (Morche et al. 2006), hin. Beide Untersuchungsgebiete weisen mit ca. 17 km² in etwa die gleiche Größe auf. Sie werden vorwiegend touristisch genutzt. Dabei stehen Wandern und Mountain Biking im Vordergrund. Zusätzlich gibt es in beiden Untersuchungsgebieten extensive Tierhaltung, Kühe im Lahnenwiesgraben und Schafe im Reintal. Des Weiteren werden beide Täler auch zur Jagd und für forstwirtschaftliche Zwecke genutzt.

2.2 Exkurs zur Geschichte des Reintals

Das Reintal hat eine wechselvolle Geschichte hinter sich, welche im Gegensatz zum Lahnenwiesgraben gut dokumentiert ist. Ursprünglich der Grafschaft Werdenfels angehörend und als Almweide sowie Jagdrevier gefragt, geriet das Reintal aufgrund der nicht eindeutigen Grenzziehung zwischen Tirol und der Grafschaft Werdenfels immer wieder in den Blickpunkt von Grenzstreitigkeiten (Albrecht 1955, Brandner 1993). Dieser Tatsache ist es zu verdanken, dass in ruhigeren Zeiten, als um den Status der Zugehörigkeit des Reintals friedlich verhandelt wurde, kartographische Darstellungen der Grenzgebiete angefertigt wurden. Ein Beispiel ist der Atlas Tyrolensis von 1774 oder die 2006 wieder entdeckte historische Zugspitzkarte (Brunner & Horst 2007). Brunner & Horst (2007) geben einen Überblick über die Darstellung des Werdenfeler Landes in historischen Karten. Jedoch fehlt bei ihnen jeglicher Verweis auf die in Abb. 2.1 und Abb. 2.2 gezeigten Karten. Eine der ältesten das südliche Werdenfeler Land zeigende Darstellungen stammt aus der Mitte des 18. Jahrhunderts (Abb. 2.2). Auf der Karte selbst ist kein Erstellungsdatum oder ein Autor sichtbar, so dass nur eine indirekte Datierung möglich ist. Auf der Karte ist südlich von Mittenwald die Festung Scharnitz (Porta Claudia) eingezeichnet. Diese wurde zum Schutze Tirols vor den anrückenden Schweden im Jahr 1632 während des Dreißigjährigen Krieges erbaut. Somit kann die Karte nicht vor 1632 entstanden sein. Das aufgedruckte Datum 1500 deutet auf den Grenzvertrag zwischen Werdenfels und Tirol von 1500 hin. Grenzmarkierungen sind mit einer Signatur eingezeichnet. Weitere Grenzverhandlungen gab es 1656, 1715 und 1730 (Albrecht 1955). Die Grenzen wurden zwischen 1766 und 1768 endgültig festgelegt. Sie entsprechen der heutigen Landesgrenze zwischen Deutschland und Österreich (Albrecht 1955). Höchstwahrscheinlich ist diese Karte also zwischen 1632 und 1766 entstanden. Auch die kartographische Darstellung lässt diese Zeitspanne plausibel erscheinen (T. Schmalfeld, freundliche mündliche Mitteilung 27.2.2007).

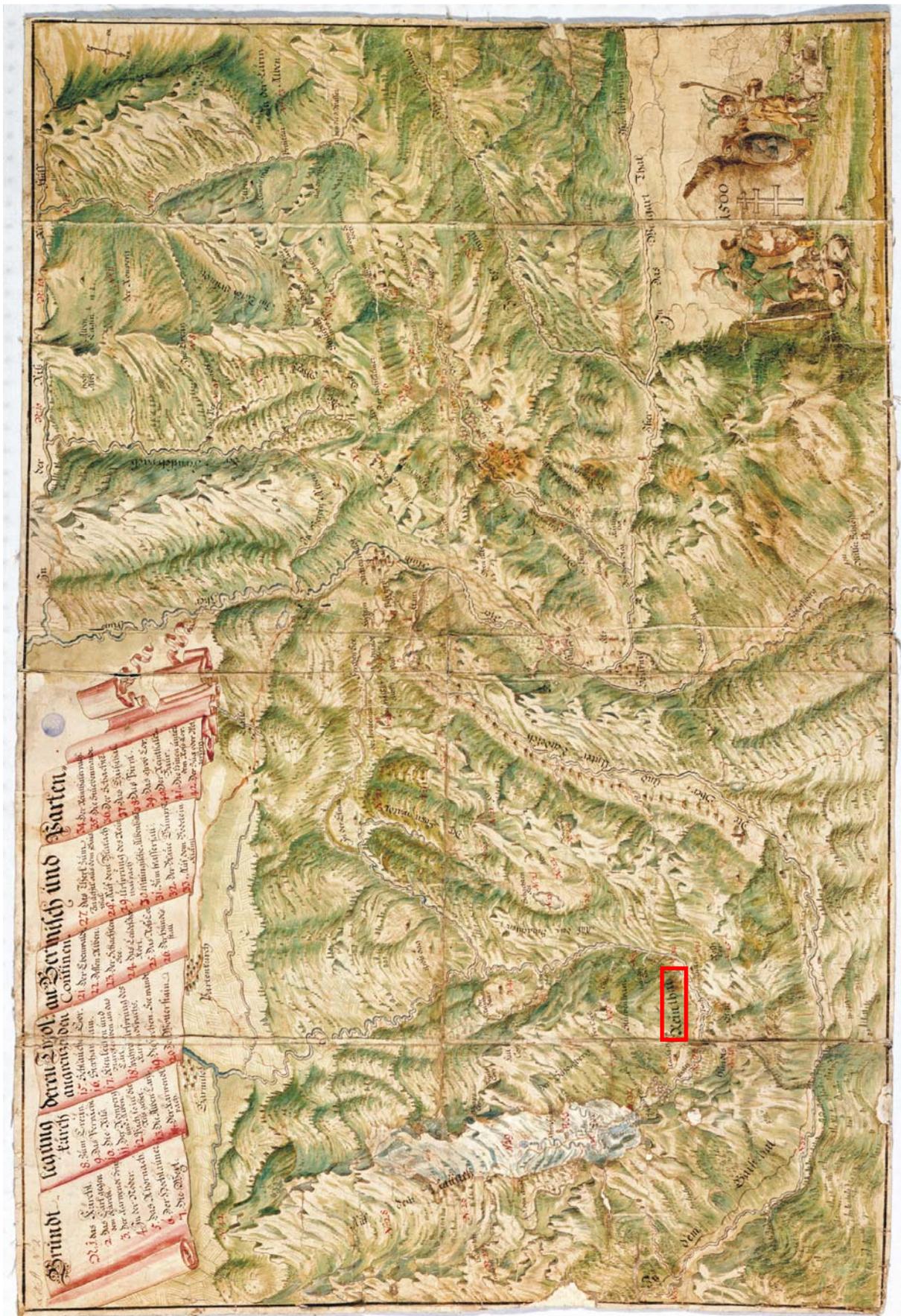


Abb. 2.2. Grenzkarte zwischen Werdenfels und Tirol im Wetterstein - und Karwendelgebirge. „Grundtlegung deren Tyrol an Germisch und Partenkärch angrenzenden Confinien“. (© Bayerisches Hauptstaatsarchiv Plansammlung 10082, Erlaubnis zur Publikation erteilt am 5. März 2007, Az: 2007/01288/Mo). Das Reintal ist links in der Karte eingezeichnet.

UNTERSUCHUNGSGEBIETE

Die Karte an sich ist künstlerisch angehaucht und zeigt das Reintal völlig verzerrt und lageuntreu. So ist das Trogtal bis auf das Platt gezogen. Geomorphologisch interessant ist, dass der Bergsturz „Steingerümpel“ im Reintal bereits eingezeichnet ist.

2.3 Naturräumliche Ausstattung

Beide Untersuchungsgebiete werden hier nur kurz vorgestellt, um unnötige Redundanzen zu vermeiden, da bereits sehr detaillierte Beschreibungen des Naturraumes beider Untersuchungsgebiete in den veröffentlichten eigenen Arbeiten des Autors (im Anhang) und denen der Projektpartner gemacht wurden (Haas 2008, Keller 2008, Koch 2005, Heckmann 2006, Wichmann 2006). Dort wurden alle physisch-geographischen Eigenschaften (Geologie,

Tab. 2.1. Physisch-geographische Eigenschaften beider Untersuchungsgebiete (nach Haas 2008, Keller 2008, Koch 2005, Heckmann 2006, Wichmann 2006). Die vorhandenen Daten über das Zugspitzplatt sind in Klammern denen des Reintals nachgestellt. Rundungsbedingt ergeben die Anteile der Vegetationsklassen mehr als 100%.

Einzugsgebiet (EZG)	Reintal (Zugspitzplatt)	Lahnenwiesgraben
Teil der Nördl. Kalkalpen	Wettersteingebirge	Ammergauer Alpen
Fläche (km ²)	17,3 (11,4)	16,7
min. Höhe (m ü. NN)	1050 (1430)	706
max. Höhe (m ü. NN)	2743 Hochwanner (2962 Zugspitze)	1985 (Kramer)
Reliefunterschied (m)	1693 (1532)	1279
mittl. Gefälle (°)	41,3	28,4
max. Gefälle (°)	77,6	72,5
Niederschlag (mm/a)	2000	1600-2000
Schneegrenze (m ü. NN)	2700	2700
Waldgrenze (m ü. NN)	1600-1700	1700
Lithologie	Wettersteinkalk	Hauptdolomit, Plattenkalk, Kössener Schichten
Böden	Rohböden	Rohböden, Rendzinen, Braunerden
Vegetation (% d. EZG)		
Nadelwald	8	27
Mischwald	4	32
Krummholz	16	15
Gräser/Sträucher	10	19
lückenhafte Pioniervegetation	16	5
vegetationsfrei (Locker-, Festgestein)	47	3

UNTERSUCHUNGSGEBIETE

Geomorphologie, Hydrologie, Klima, Böden, Vegetation) beider Untersuchungsgebiete detailliert und nahezu erschöpfend dargestellt (Tab. 2.1), so dass hier nur noch wenige ergänzende Punkte, die sich vorwiegend auf das Schwerpunktgebiet Reintal beziehen, zusammengefasst werden.

2.3.1 Ergänzungen zur Geologie des Reintals

Das Reintal ist nahezu komplett im ca. 220-225 Mio Jahre alten Wettersteinkalk (Ladin) ausgebildet (Leuchs 1926). Dieses Sedimentgestein kann bis zu 1200 m mächtig werden (Miller 1961) und besteht vorwiegend aus Calcium- und Magnesiumkarbonatverbindungen (Rögner et al. 1999, Rögner & König 2003). Das Wettersteingebirge ist von vielen Längs- und Querstörungen durchzogen (Abb. 2.3), die im Wesentlichen neben der morphologischen Härte des Gesteins mit dazu beigetragen haben, das heute in den Gipfelregionen zerklüftete Erscheinungsbild zu formen (Heller & Nieder 1932, Leuchs 1930). An einem der Kreuzungspunkte zweier Störungen entspringt die Partnach aus einem Quelltopf (Wetzel 2004a).

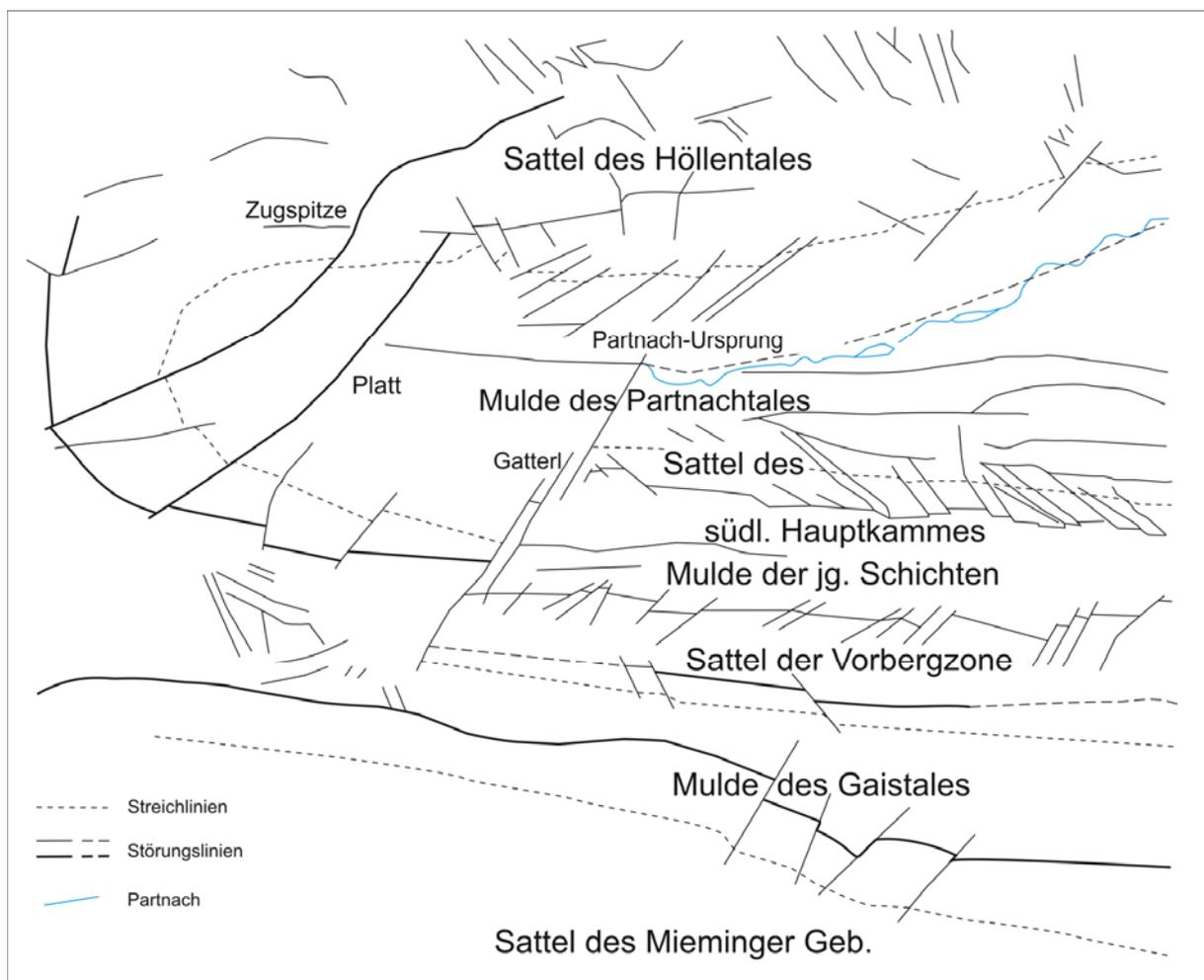


Abb. 2.3. Tektonische Skizze des südwestlichen Wettersteingebirges (verändert nach Heller & Nieder 1932)

2.3.2 Die Sedimentkaskade Reintal

Dem sich in Richtung Osten öffnenden Reintal ist durch seine typische Trogform die glaziale Überprägung während des Pleistozäns deutlich anzusehen. Die Gletscherstände der letzten Vereisung und somit auch die Lage von Endmoränen konnten von Hirtlreiter (1992) rekonstruiert werden. Westlich grenzt das Zugspitzplatt an, welches noch Gletscherreste (Schneeferner, 0,4 ha im Jahr 2003) trägt und stark verkarstet ist (Rögner et al. 1999).

Die typischen geomorphologischen Sedimentspeicher und Prozesse in Hochgebirgseinzugsgebieten können hinsichtlich der raum-zeitlichen Kopplungen des Sedimenttransfers als Kaskadensystem aufgefasst werden (Caine 1974, Chorley & Kennedy 1971, Slaymaker 1991). Dabei wird Masse und Energie an bestimmten Stellen durch einen geomorphologischen Prozess eingetragen, zwischengespeichert und zeitlich verzögert von einem nachfolgenden geomorphologischen Prozess weiterverlagert. Anhand des Reintals lässt sich eine Sedimentkaskade beispielhaft beschreiben (Schrott et al. 2003). Schematisch lassen sich drei Subsysteme abgrenzen (Abb. 2.4). Subsystem 1 umfasst die Felswände und die darin befindlichen Kare. Subsystem 2 besteht aus allen Sedimentspeichern am Hang wie Schutthalden, -kegeln und Bergsturzablagerungen. Das dritte Subsystem ist der gesamte Talboden mit dem Hauptgerinne und angrenzenden Ufern und fluvialen Ablagerungen.

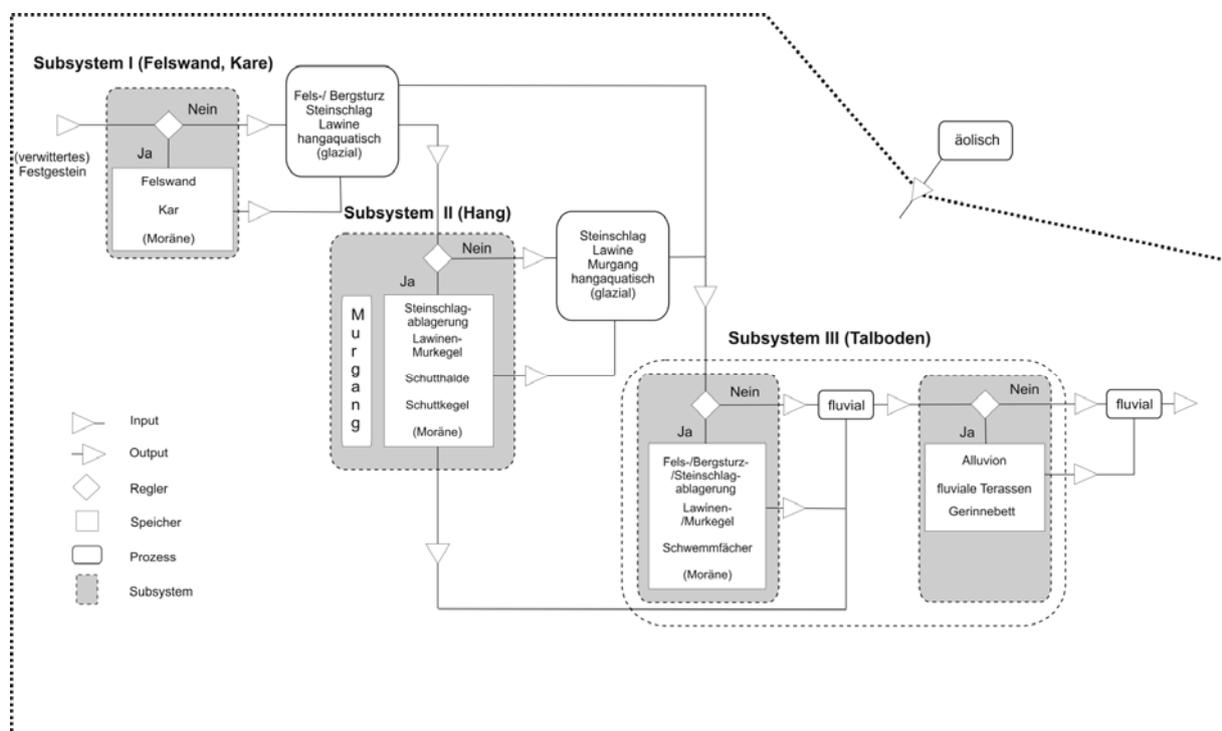


Abb. 2.4. Die Sedimentkaskade des Reintals (verändert nach Schrott et al. 2003)

Ergänzend zu den Überlegungen von Schrott et al. (2003) ist der äolische Eintrag von Sediment zu berücksichtigen. Der mittlere postglaziale Flugstaubeintrag konnte von Küfmann

(2003) für das Gebiet des Zugspitzplatts auf 17 cm quantifiziert werden. Küfmann (2006) begründet Schwankungen der Staubeintragsraten mit klimageographischen Parametern. Demnach ist das Auftreten von Südwindlagen die wesentliche steuernde Größe für den äolischen Feststoffeintrag (Küfmann 2006). Aufgrund der räumlichen Nähe des Zugspitzplatts, kann davon ausgegangen werden, dass ähnliche Mengen an Feststoffen in das Untersuchungsgebiet Reintal eingetragen worden sind.

2.3.3 Ergänzungen zur Hydrologie des Reintals

Das Reintal wird von der Partnach in Richtung Osten entwässert. Die Partnach ist der Loisach tributär. Die wesentlichen Aspekte der qualitativen und quantitativen Hydrologie der Partnach werden im Ergebnisteil dieser Arbeit und den eigenen veröffentlichten Arbeiten des Autors behandelt. Bisher publizierte Aspekte zur Hydrologie der Partnach beleuchten vorwiegend karsthydrologische Phänomene (Heller & Nieder 1932, Uhlig 1954, Wetzel 2004a, Wetzel 2004b, Wilhelm 1956,). Wetzel (2004a) konnte durch geochemische und graphische Separation von Abflussganglinien den Einfluss verschiedener Karstwasserleiter auf das Abflussgeschehen am Partnach-Ursprung feststellen. Die vergleichsweise hohen mittleren Fließgeschwindigkeiten des Karstwassers (400 m h^{-1}) weisen laut Wetzel (2004a) auf ein sehr gut entwickeltes Karstsystem „Zugspitzplatt“ hin. Der Abfluss am Partnach-Ursprung wird im Sommer zu 30% aus der Schneedecke auf dem Zugspitzplatt gespeist. Die Gletscherschmelze kann in den Sommer- und Herbstmonaten in der Abflussganglinie nachgewiesen werden (Wetzel 2004a).

METHODEN

3 METHODEN

In diesem Kapitel wird das verwendete Methodenspektrum erläutert bzw. ergänzt, da teilweise die Beschreibung der jeweils angewandten Methodik in den Originalarbeiten, oft Platz bedingt (Vorgaben der jeweiligen Fachzeitschrift), recht knapp gehalten werden musste.

3.1 Messstationen

Im Jahr 2000 wurde im Lahnenwiesgraben die Messstation „Burgrain“, in einem vom Wasserwirtschaftsamt Weilheim zur Verfügung gestellten ehemaligen Pegelhäuschen, und im Reintal die Messstation „Bockhütte“ in Betrieb genommen.

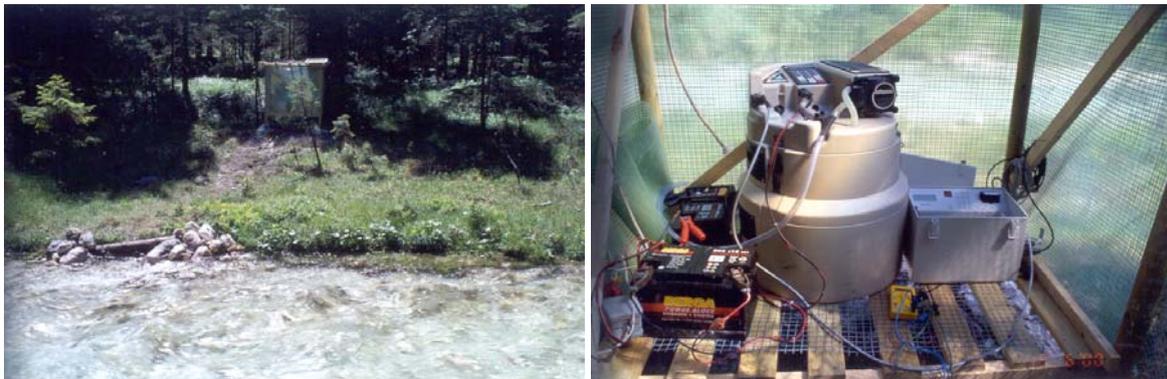


Abb. 3.1. Messstation „Bockhütte“ mit Hilfspegel von Blöcken am Ufer geschützt und Instrumentierung (Fotos Maik Unbenannt 19.6.2000)

Dort wurde am rechten Ufer der Partnach in der Nähe der „Bockhütte“ ein Hilfspegel installiert, daher der Stationsname Messstation „Bockhütte“. Auf der nächst höher gelegenen Terrasse wurde die eigentliche solarbetriebene Messstation aufgebaut (Abb. 3.1).

Die Messstationen „Bockhütte“ im Reintal und „Burgrain“ im Lahnenwiesgraben wurden grundsätzlich mit DL 8.4. Dataloggern der Firma EBRU ausgestattet. Daran wurden Messsensoren für den Wasserstand, die elektrische Leitfähigkeit und die Wassertemperatur angeschlossen. Wasserproben wurden mit automatischen Sigma 900 Sammlern (Hach Company 2004) genommen. Die automatische Probennahme wurde mit dem DL 8.4 Logger ereignisabhängig gesteuert. Ergänzend wurden während der Feldarbeiten manuelle Wasserproben bei verschiedenen Wasserständen, v. a. aber Niedrigwasser, genommen. Bei jeder Probennahme wurden zwischen 750 und 900 ml Wasser in die Flaschen gepumpt. Zusätzlich zu den bereits genannten Sensoren wurde im Lahnenwiesgraben ein mit 220 V zu versorgender Trübungssensor (Model 19800-01, Hach Company 1995) betrieben. Über diesen Sensor wurde bei Überschreiten eines Grenzwertes die Wasserprobennahme ausgelöst. Die Wasserprobennahme an der Messstation „Bockhütte“ wurde durch Änderungen des Wasserstandes, erste bzw. zweite Ableitung (Labor für Geomorphologie und Geoökologie

METHODEN

1994), gesteuert. Mit Ausnahme der Wassertemperatur wurden alle Werte der an die DL 8.4. angeschlossenen Sensoren in Form einer elektrischen Spannung in mV aufgezeichnet. In der Datennachverarbeitung wurden die Werte dann mittels manuell erhobener Daten kalibriert.

Im sehr trockenen Sommer 2003 wurde im Reintal zusätzlich ein Orphimedes, ein Datensammler nach Einperlprinzip (Ott Hydrometrie a o.a.), samt Einperltopf EPS 50 zur Erfassung der Niedrigwasserstände an der Messstation „Bockhütte“ installiert. Der Einperltopf wurde nach Ott Hydrometrie b (o.a.) kurz unterhalb des Messquerprofils mit einem t-förmigen Rohr fest im zentralen Sohlbereich verankert. Der redundante Einsatz beider Wasserstandssensoren ermöglichte die Kalibration der Werte zueinander.

An der Messstation „Partnach-Ursprung“ wird seit Juli 2002 ein Hilfspegel betrieben. Eine Drucksonde „Orpheus-K“ mit Datensammler zur Pegelmessung wurde am Steg, der zur Turbinenstation der „Reintalangerhütte“ gehört, befestigt (Abb. 3.2). Zusätzlich sind in dieser Loggereinheit ein Temperatur- und ein Leitfähigkeitssensor integriert (Ott Hydrometrie c o.a.).



Abb. 3.2. Überblick Messstation „Partnach-Ursprung“ mit Messsteg am Einlass zur Rohrleitung für das Turbinenhäuschen der „Reintalangerhütte“ (links) (Foto Markus Witzsche 5. September 2003), Auslesen der Loggereinheit Orpheus-K (rechts) (Foto David Morche 6. Juni 2006)

Die DL 8.4 Logger der Messstationen „Bockhütte“ im Reintal und „Burgrain“ im Lahnenwiesgraben wurden in den Jahren 2000 bis 2005 vorwiegend in der Sommersaison betrieben und meist spätestens im Dezember eines jeden Jahres wieder abgebaut.

Aufgrund technischer Defekte der DL 8.4 sind die Abflussganglinien immer wieder durch Datenlücken unterbrochen. Einer dieser Datenausfälle beendete gar die Datenaufzeichnung im Jahr 2005 kurz vor dem Augustereignis an der Messstation „Burgrain“. Zwei zusätzlich im Reintal betriebene Messstationen am Einlauf der Vorderen Blauen Gumpe sowie kurz oberhalb der „Quelle bei den Sieben Sprüngen“ wurden jeweils kurz nach der Installation noch im Jahr 2002 (MZ 2002) und 2003 zerstört und lieferten kaum verwertbares Datenmaterial.

3.2 Abflussmessungen

Abflussmessungen wurden an allen Pegelstationen mit einem hydrometrischen Kleinflügel C2, geeichten Schaufeln und Zählgeräten (Z215 und ZE 251) der Firma Ott bei verschiedenen wasserständen nach der Pegelvorschrift Anlage D (LAWA 1991) durchgeführt. Dabei wurde der Ansatz der Punktmessung verfolgt. In jeder Messlotrechten, die regelmäßig, meist in 0,5 m Abständen, sowie zusätzlich an bestimmten Knickpunkten im Messquerschnitt verteilt waren, wurde in der Regel bei Wassertiefen unter 10 cm Einpunktmessungen, bei Wasserständen von mehr als 10 cm Zweipunktmessungen in 20 % und 80 % der gepielten Wassertiefe durchgeführt. Diese Einteilung ist hinreichend genau, wie Fließgeschwindigkeitsmessungen und -berechnungen von Byrd et al. (2000) für raue Gerinne zeigen. Bei den durchgeführten Abflussmessungen galt als oberstes Gebot die Sicherheit des im Bach Stehenden. Um diese zu gewährleisten, durften die Messungen bei hohen Fließgeschwindigkeiten ($>2 \text{ m s}^{-1}$) und Wasserständen ($>50 \text{ cm}$) im Querprofil selbst bei Seilsicherung von außen nicht länger als eine halbe Stunde dauern, da sonst Erschöpfungserscheinungen den Messenden gefährdet hätten. Bei hohen Wasserständen wurde in der Regel in 10 Messlotrechten, bei Niedrigwasser mindestens in 4 Messlotrechten die Fließgeschwindigkeit gemessen.

Die Messquerschnitte aller Stationen lagen wenige Meter oberhalb der installierten Pegel und waren zu allen Messungen in parallelen Bahnen durchströmt. Die Gerinnesohle wies ein geringes Gefälle und ein für Wildbäche relativ stabiles und klar definiertes Profil auf.

Die im Gelände aufgenommenen Daten der einzelnen Messungen wurden in eine Datenbank in der Software BIBER V2.1 der KISTERS AG (Schneider 2000) eingetragen. In dieser Software folgen die Auswertelgorithmen strikt der Pegelvorschrift Anlage D (LAWA 1991).

Die Verwendung der Flügelmessmethode zur Bestimmung des Abflusses wurde innerhalb des SEDAG-Projektes kontrovers mit den anderen Bündelpartnern diskutiert. Üblicherweise werden bei hydrologischen Untersuchungen in Gebirgsräumen Tracermethoden zur Mengenbestimmung des Abflusses eingesetzt (u. a. Becht & Wetzel 1994, Rickenmann 1996, Wetzel 2004). Die Genauigkeitsunterschiede beider Methoden (ca. 2 bis 3%) sind bereits von einer Vielzahl von Autoren für unerheblich erklärt worden (u. a. Becht & Wetzel 1994, Carter 1973). Auch gerinnehydraulische Fragestellungen sind für die vorliegende Untersuchung von Interesse. Dazu können die auch bei den Kleinflügelmessauswertungen nötigen Parameter im Messquerschnitt sehr gut verwendet werden.



Abb. 3.3. Abflussmessung (links) und Geschiebemessung mittels Helley-Smith-Sammler (rechts) an der Messstation „Bockhütte“ am 18. Juli 2005 bei $Q = 3,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Fotos Olaf Klammer)

Zusätzlich wurden bei den Abflussmessungen immer auch Geschiebemessungen mit einem tragbaren Geschiebesammler durchgeführt (Abb. 3.3). Diese Gründe gaben den Ausschlag zur Wahl des angewendeten Verfahrens. Dennoch wurden aufgrund der Nichtverfügbarkeit eines Kleinflügels zu verschiedenen Zeitpunkten am Partnach-Ursprung einzelne Abflussmessungen mit der von Allen & Taylor (1923) entwickelten Salzverdünnungsmethode nach dem Integrationsverfahren (Benischke & Harum 1984, Spreafico 1994) durchgeführt. Dabei wurde handelsübliches Kochsalz (NaCl) als Tracer eingesetzt.

3.4 Bestimmung der Lösungs- und Schwebfracht

Die weitere Bearbeitung der automatisch und manuell genommenen Wasserproben erfolgte im institutseigenen Labor nach den grundlegenden Vorgaben der internationalen Fachliteratur (Walling 1984). Nach dem Abfiltrieren der Feststoffe durch Sartorius Filter mit $45 \mu\text{m}$ Maschenweite wurden durch das technische Laborpersonal der Ionengehalt der wichtigsten Kat- und Anionen bestimmt (Ionen Chromatograph Dionex DX 120, Perkin Elmer M 2100 V 9.3 Atom-Absorptions-Spektrometer).

Aufgrund der vorherrschenden Lithologie aus Kalksteinen CaCO_3 und MgCO_3 (Rögner & König 2003) waren das Calcium- und das Magnesiumion von zentraler Bedeutung für die weiteren Berechnungen. Beide Ionen machen zusammen mehr als 90% der Kationen im Reintal und mehr als 70% der Kationen im Lahnenwiesgraben aus. Das Hydrogencarbonation

METHODEN

als wesentliches Anion wurde nicht direkt gemessen, sondern über Stoffmengen- und Massebeziehungen zu den vorherrschenden Calcium- und Magnesiumionen bestimmt (Morche 2006). Die aufsummierten Konzentrationen der einzelnen Ionen ergaben die Gesamtionenkonzentration der jeweiligen Wasserprobe. Multipliziert mit dem Volumen der Wasserprobe ergab sich der komplette ungelöste Rückstand (total dissolved solids, TDS). Unter der Annahme, dass die jeweilige Wasserprobe repräsentativ für die Gesamtwassermenge ist, die zur Zeit der Probenahme den Messquerschnitt durchflossen hat, wurden der Konzentrationswert mit dem Abflusswert multipliziert. Das sich ergebende Produkt ist die Lösungsfracht (Keller 1979a, Schmidt 1984). Da sich die Ionenkonzentration von Wasser direkt in der elektrischen Leitfähigkeit widerspiegelt (Keller 1971, 1973, 1979b), reicht es aus, mit einigen Proben eine genaue Kalibrationskurve (rating curve) zu erstellen (Keller 1979b), ansonsten aber die elektrische Leitfähigkeit aufzuzeichnen. Dieser Ansatz eignet sich insbesondere für schwer zugängliche Gebiete und damit äußerst aufwendig zu wartende hydrologische Messstationen im Hochgebirge. Da im Wesentlichen während der Untersuchungen in 15-minütigem Abstand die gemessenen Parameter aufgezeichnet wurden, musste eine pragmatische Lösung gefunden werden, wie man von den beiden Sekundenwerten auf die dazwischen liegenden 900 s interpolieren kann. Als einzige Möglichkeit bleibt, den Mittelwert auf die gesamte Zeit zu übertragen. Dabei ist zu beachten, dass natürlich in Hochgebirgseinzugsgebieten innerhalb von 15 Minuten sehr viel passieren kann, doch diese Erkenntnisverluste mussten aufgrund des sowieso schon immensen Aufwandes in Kauf genommen werden. Die Summierung aller Sekundenfrachtwerte in einem gewählten Zeitabschnitt ergibt den Gesamtaustrag an Sediment durch die Lösungsfracht (Masse) und somit den chemischen Abtrag des Untersuchungsgebietes (Länge o. Spende = Masse pro Fläche).

Das Filtrat wurde gewogen und, wenn genügend Probenmaterial vorhanden war, auf seine Korngrößenzusammensetzung hin untersucht. Dazu wurde die Methode der Laserdiffraktion verwendet (Rawle 2001). Die Schwebstoffkonzentration wurde ermittelt, indem die Schwebstoffmenge durch das Volumen der Wasserprobe dividiert wurde. Für jeden Schwebstoffkonzentrationswert (SSC) stand der aufgezeichnete Abflusswert (Q) zur Verfügung, so dass Schwebstoff-Abflussbeziehungen (rating curves) aufgestellt werden konnten (Leopold et al. 1964, Müller & Förstner 1968, Schmidt 1984, Syvitski et al. 2000, Walling 1977). Aufgrund der schwierigen Situation der Steuerung der automatischen Wasserprobennahme an der Messstation „Bockhütte“ konnten dort nur 131 Proben genommen werden und zwei Gesamtbeziehungen zwischen SSC und Q musste zur Berechnung verwendet werden (Schmidt & Morche 2006, Morche et al. 2008). Die logistisch

METHODEN

leichter erreichbare Station in Burgrain am Lahnenwiesgraben ließ deutlich mehr automatische Wasserprobennahmen zu. Im Zeitraum 2000 bis 2003 wurden dort insgesamt 737 manuelle und ereignisgesteuert automatische Wasserproben entnommen. Es wurden, wenn möglich, für den ansteigenden und absteigenden Ast eines jeden Hochwassers separate Schwebstoff-Abflussbeziehungen ermittelt. Analog dem Vorgehen zur Ermittlung der Lösungsfracht wurde auch die Schwebfracht berechnet (s. o.).

3.5 Geschiebemessungen

Parallel zu den Abflussmessungen wurden an den Messstationen „Bockhütte“ und „Burgrain“ Geschiebemessungen in Anlehnung Ryan & Troendle (1997) durchgeführt. Zum Einsatz kamen tragbare Helley-Smith Geschiebesammler. Aufgrund der schlechteren Erreichbarkeit der Messstation „Bockhütte“ wurde dort nur der leichtere und kleinere 3 Inch (0,0762 m) Geschiebesammler eingesetzt (Abb. 3.4), während an der Messstation „Burgrain“ auch der größere und schwerere 6 Inch (0,1524 m) Geschiebesammler zum Einsatz kam.



Abb. 3.4 Gesammeltes grobes Geschiebematerial im 3 Inch Helley-Smith-Sammler (Fotos Alexander Nicolay 12. Juli 2007)

Im Messquerschnitt wurde in der Regel je Messlotrechte 2 Minuten lang das Geschiebe gesammelt. Dieses wurde getrocknet, gewogen und im Labor hinsichtlich der granulometrischen und morphometrischen Eigenschaften untersucht.

3.6 Morphometrie des Grobgeschiebes

Zurundungsmessungen von Sohl- und Terrassenschottern wurden im Gelände und von Geschiebematerial im Labor durchgeführt. Dazu wurde eine Rundungsschablone nach Cailleux (1952) eingesetzt (Abb. 3.5). Dabei wurde der kleinste Krümmungsradius (r) der Ebene, die A- und B- Achse aufspannen, gemessen. Zusätzlich wurden die 3 Achsen eines

jeden Partikels mit einer Schublehre oder Zollstock vermessen. Die Form der Schotterpartikel wurde anhand des Formdiagramms nach Sneed & Folk (1958) berechnet.

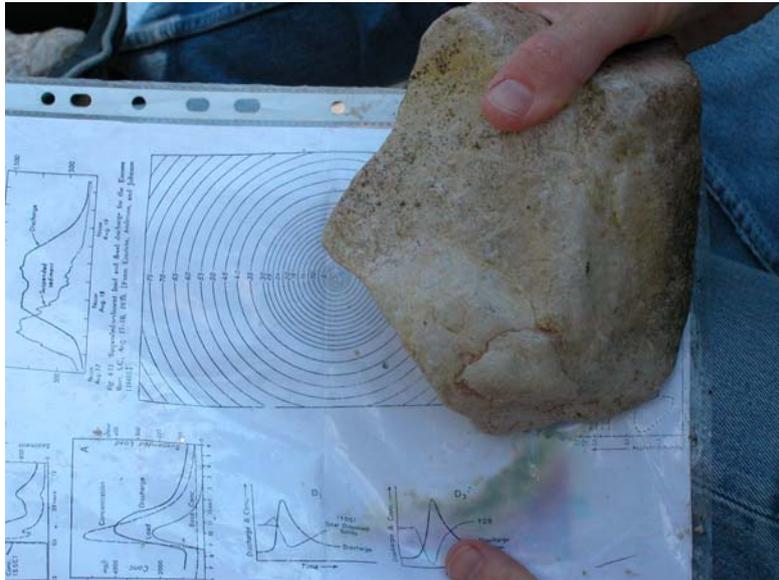


Abb. 3.5. Messung des kleinsten Krümmungsradius in der Ebene von A- und B-Achse eines groben Schotterpartikels nach der Methode von Cailleux (1952) (Foto Frank Rothe 27. Juli 2005)

3.7 Granulometrische Analyse

Bei der granulometrischen Analyse wird die Korngrößenverteilung als „die wichtigste Eigenschaft eines klastischen Sediments“ (Müller 1964, S. 56) ermittelt. Die Korngrößenverteilung spiegelt die verschiedenen Bildungsprozesse des Lockermaterials von Erosion über Transport bis hin zur Ablagerung wider. Aufgrund der großen Spannweite der Korngrößen müssen unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der Korngrößenverteilung (Tab. 3.1) und der daraus ableitbaren statistischen Parameter angewendet werden. Im Großteil der englischsprachigen Publikationen zu Korngrößenverteilungen wird nicht die im deutschen Sprachraum übliche mm-Skala für Korngrößen sondern die sogenannte Φ -Skala (phi) angewendet. Die Korngrößen der einzelnen Skalen lassen sich ineinander umrechnen ((1) und (2)). So ist die Korngröße in Φ -Einheiten der negative Logarithmus zur Basis 2 der Korngröße (D) in mm. Die Umrechnungsformeln lauten also

$$\Phi = -\log_2(D) \quad (1)$$

und umgekehrt

$$D = 2^{-\Phi} \quad (2).$$

Die granulometrische Analyse des Lockermaterials wurde nach der von Füchtbauer (1988, S. 146) empfohlenen Methode von Folk & Ward (1957) durchgeführt. Nachdem die Sedimentproben im Labor getrocknet waren, wurden sie gesiebt. Dabei wurden die in

METHODEN

Deutschland häufig verwendeten Korngrößenfraktionen analog zur DIN 4188 angewendet (Tab. 3.1).

Zur Anwendung kamen Siebe, deren Maschen quadratisch waren. Dabei muss ein Fehler beachtet werden. Dieser ist abhängig von der Form des einzelnen Partikels (Müller 1964, Bunte & Abt 2001). Je platter das Partikel, desto größer ist der Fehler. Für eine gegebene Korngröße kann der Fehler theoretisch um den Faktor $\sqrt{2}$ ($\cong 1,41$) über der Korngröße liegen.

Tab. 3.1. In Deutschland gebräuchliche Einteilung und Bezeichnung der Korngrößenklassen sowie angewandte Methoden zur Bestimmung der Korngrößen.

Korngrößenbezeichnung	Ton	Schluff			Sand			Kies			Steine	Blöcke
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob		
Untergruppe												
Korngrößenklasse in mm	0,002	0,0063	0,02	0,063	0,2	0,63	2	6,3	20	63	200	
Bestimmungsmethoden	Malvern				Siebung			Schablone				

Die Partikel >20 mm wurden per Lochschablone mit Durchmesser 63 mm vermessen, um die Partikel >63 mm auszusondern. Bis zu einer Korngröße von 0,2 mm wurde das Lockermaterial per Hand gesiebt. Der im Siebboden zurückbleibende Rest, wurde, soweit vorhanden, durch die Laserdiffraktion (Rawle 2001) fraktioniert. Die Laserdiffraktion wurde mit einem Laserdiffraktometer der Firma Malvern Instruments im Labor durchgeführt. Da die Laserdiffraktion nur Prozentangaben über das Volumen der einzelnen Kornfraktionen angibt, mussten diese in Massen umgerechnet werden. Da bei der Laserdiffraktion Partikel bis zu einer Korngröße von 2 mm bestimmt werden können, wurden auch Partikel >0,2 mm, die bei der Siebung aufgrund des o. g. Fehlers mit durchfielen, erfasst. Das Gewicht dieser Partikel wurde auf die manuell gesiebte Menge der entsprechenden Korngröße addiert.

Für die Ermittlung der Granulometrie größerer Schotterflächen (Terrassen, trockenengefallenes Bachbett) wurden Fotos gemacht, u. a. mit dem Fesselballonsystem (Morche et al. 2008), und nach der Methode des Photo-Sieving ausgewertet. Diese Methode wurde von Ibbeken & Schleyer (1986) entwickelt und seitdem in der geomorphologischen Forschung angewandt (Lisle et al. 1993, Ibbeken et al. 1998). Das Photo-Sieving Verfahren kann nach Ibbeken & Schleyer (1986) zur granulometrischen Analyse grober unverfestigter Sedimentoberflächen angewendet werden. Dabei spielt die Bildausschnittgröße, welche von der Aufnahmehöhe und Brennweite abhängig ist, keine Rolle. So kann das Korngrößenspektrum von mehreren Metern großen Blöcken bis zu Partikeln mit Mittelkiesgröße erfasst werden. Beim Photo-Sieving werden die auf dem Foto sichtbaren Partikel analog zum manuellen Sieben fraktioniert. Beide Methoden liefern vergleichbare Ergebnisse (Ibbeken & Schleyer 1986). Die marginalen Partikel (vom Rand angeschnittene Partikel) wurden von der Analyse

METHODEN

ausgeschlossen. Die Aufnahmen wurden mit der Software DIANA (Digital Image Analysis) weiterverarbeitet. Der Umriss jedes Partikels, welches 20 mm oder größer war, wurde digitalisiert. DIANA berechnete a- und b-Achse. Die so erhobenen Daten wurden dann in EXCEL weiterverarbeitet. Das Volumen eines Partikels wurde mit der Formel

$$V = \pi/6 \cdot a \cdot b^2 \quad (4)$$

für das Volumen (V) von Rotationsellipsoiden unter der Annahme, dass b – und c-Achse gleich lang sind, ermittelt.

Die Masse eines Partikels berechnet sich aus dem Produkt seines Volumens und seiner Dichte. Da das Gestein im Reintal nur aus Wettersteinkalk besteht, wurde die Dichte von Kalkstein für die Berechnung der Masse (M) herangezogen. Hüttl (1999) und Bunte & Abt (2001) geben 2,7 g/cm³ als Dichte für Kalkstein an. So ergibt sich die folgende Formel zur Massenberechnung

$$M = 2,7 \cdot V \quad (5).$$

Um die Gewichtsprozentage der einzelnen Kornfraktionen zu ermitteln, wurden alle Partikel einer Probe virtuell mit EXCEL gesiebt, die jeweiligen Massen der Partikel in den Kornfraktionen addiert und ins Verhältnis zur Probengesamtmenge gesetzt.

Die Aufgabe der granulometrischen Analyse ist die Ermittlung der Korngrößenverteilung eines Korngemisches. Nach dem Wiegen werden die relativen Häufigkeiten der einzelnen Kornfraktionen ermittelt. So erhält man eine auf Gewichtsprozenten basierende Korngrößenverteilung. Dagegen wird nach einer Partikelzählung die Korngrößenverteilung aufgrund der Anzahl der Partikel in den Kornfraktionen bestimmt. Die Darstellung einer Korngrößenverteilung kann als einfache Zahlentabelle oder graphisch in Form eines Histogramms bzw. als Kornsummenkurve erfolgen. Letztere ist die derzeit übliche Darstellungsform. Die Korngröße wird dabei auf der meist logarithmischen Abszisse und die Häufigkeit der Korngrößenklassen in Gewichtsprozenten auf der Ordinate aufgetragen. Die kumulierten Häufigkeiten der Gewichtsprozentage der einzelnen Korngrößen werden von links, beginnend mit der kleinsten Korngröße, nach rechts aufgetragen. Die kumulierten Häufigkeitswerte der einzelnen Korngrößen werden mit einer Linie verbunden, so dass als Graph die Kornsummenkurve entsteht. Die Verbindungslinie zwischen zwei Messwerten wird durch lineare Interpolation erzeugt. Aus der Kornsummenkurve lassen sich alle wichtigen statistischen Parameter einer Korngrößenverteilung ermitteln. Als bedeutendster ist die Sortierung zu nennen. Diese ist „ein Maß für die Zahl der am Aufbau eines Korngemenges beteiligten Kornklassen“ (Müller 1964, S. 103) und wurde nach dem Verfahren von Folk & Ward (1957) berechnet.

3.7 Terrestrische Vermessung

Die terrestrischen Vermessungsarbeiten konzentrierten sich auf das Teileinzugsgebiet der Vorderen Blauen Gumpe und den unterstrom liegenden Gerinneabschnitt der Partnach im Reintal. Ausgehend von selbst in der ersten Projektphase mittels differentiell GPS eingemessenen und amtlichen Festpunkten im Reintal wurden die Vermessungsarbeiten mit einem Rec Elta RL 300 Tachymeter durchgeführt (Abb. 3.6).

Die mit diesem Gerät erreichbare Genauigkeit liegt im Subzentimeterbereich (ZEISS 1993) und damit unterhalb der an der Oberfläche vorherrschenden Korngrößen (Grobkiese). Becht (1996) ermittelte bei tachymetrischen Vermessungsarbeiten auf der Griesfläche im benachbarten Höllental, welche in Hinsicht der Granulometrie des Substrates der Griesfläche der Vorderen Blauen Gumpe sehr ähnlich ist, mittlere Fehler von 2,8 cm. Für die Ermittlung von Feststoffverlagerungen im Bereich der Vorderen Blauen Gumpe oder auf ausgewählten Schutthaldenbereichen ist diese Genauigkeit v. a. hinsichtlich der Aufwand-Nutzen-Relation als hinreichend anzusehen.

Auf dem Gries der Vorderen Blauen Gumpe wurde der Querprofilansatz angewendet. Mit dieser Methode konnte bereits Becht (1996) plausible Feststoffverlagerungen auf dem Höllentalgries nachweisen. Die einzelnen Messpunkte der Querprofile orientierten sich am Mikrorelief der Oberfläche und wurden mit dem Prisma abgelaufen, so dass alle markanten Profilknicke erfasst werden konnten.



Abb. 3.6. Terrestrische Vermessung des Grieses der Vorderen Blauen Gumpe (Foto Mario Rossberg 16.11.2006)

Die Vermessungsarbeiten wurden seit 2000 alljährlich nach dem spätsommerlichen Trockenfallen der Vorderen Blauen Gumpe durchgeführt, um deren jährliche Verkleinerung und damit die fluviale Feststoffverlagerung durch die Partnach innerhalb dieses Teileinzugsgebietes zu erfassen. Die mittleren Punktdichten der Messraster liegen zwischen 0,02 und 0,04 Punkten pro m^2 (Tab. 3.2) und damit im Bereich von Werten international publizierter fluvialgeomorphologischer Studien (0,05-0,06 Fuller et al. 2005).

METHODEN

Tab. 3.2. Zeitraum, Messpunktanzahl und Punktdichten der einzelnen Vermessungen im 17500 m² großen Griesbereich der Vorderen Blauen Gumpe

Jahr	Monat	Anzahl Messpunkte	Messpunkte m ⁻²
2000	September	715	0,041
2001	August	615	0,035
2002	September	674	0,039
2003	August	484	0,028
2004	November	301	0,017
2005	September	702	0,040
2006	November	630	0,036

Aus den Punktwolken wurden mit der Software SURFER (© Goldensoftware) Höhenmodelle berechnet. Über cut-and fill-Analysen konnten die Volumenänderungen der vermessenen Bereiche kalkuliert werden (Morche et al. 2006, Morche et al. 2007). Diese Volumenänderungen entsprechen der transportierten Sedimentmenge. Zur Berechnung der transportierten Masse wurde das Volumen mit Dichtewerten von 1,5 t m⁻³ für die groben Schotter der Vorderen Blauen Gumpe bzw. mit 2 t m⁻³ für die Schutthaldenbereiche und die fluvialen Ablagerungen an der Partnach multipliziert. Detaillierte Untersuchungen des Schutthalden-Muren-Komplexes unterhalb der Vorderen Blauen Gumpe wurden von der AG Eichstätt mit einem Leica Tachymeter durchgeführt (Heckmann et al. 2008).

Für den Gerinneabschnitt unterstrom der Vorderen Blauen Gumpe bis zur Bockhütte wurden 2000, 2002, 2003, 2005 und 2006 Längsprofile eingemessen, im Jahr 2003 zusätzlich Querprofile, wobei v. a. die frischen Hochwasserablagerungen eingemessen wurden. Im Jahr 2005 wurde nach dem Ereignis vom 10./11.7. ein Längsprofil und zusätzliche Querprofile bis unterhalb der „Quelle bei den Sieben Sprüngen“ vermessen. Die Arbeiten wurden Ende Juli bis Mitte August 2005 durchgeführt. Die weitere Längsprofilvermessung bis hin zur Bockhütte wurde durch ein extremes das Gerinne überformendes Hochwasser (Morche et al. 2007) verhindert.

3.8 Terrestrisches Laserscanning

Im Rahmen einer Pilotstudie wurden zu zwei Zeitpunkten (8. Juni und 15. September 2006) ein Schutthaldenanbruch, welcher als aktive Sedimentquelle für den fluvialen Feststofftransport der Partnach im Reintal identifiziert wurde, mit einem terrestrischen Laserscanner (ILRIS-3D) vermessen, um die Oberflächenveränderungen des Anbruchs und damit den Sedimenteintrag in das Gerinne der Partnach bestimmen zu können (Morche et al. in press).

4 ERGEBNISSE

Zu diesem Kapitel gehören sämtliche Originalarbeiten im Anhang. Darüber hinaus werden bisher nicht veröffentlichte Ergebnisse vorgestellt. Dazu zählen vor allen Dingen die Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen, im Vordergrund steht dabei die Bestimmung der Abflussmengen an den einzelnen Messstationen. Auf diesen Abflussdaten baut die Quantifizierung des Sedimentexports aus den Untersuchungsgebieten auf.

4.1 Abflusskurven

Die zu verschiedenen Wasserständen durchgeführten Abflussmessungen ermöglichen die Aufstellung einer Wasserstand-Abfluss-Beziehung. Jahr für Jahr wurden die geltenden Abflusskurven für jede Station durch weitere Abflussmessungen ergänzt und verfeinert. Nach der Pegelvorschrift Anlage D (LAWA 1991) sollten die Werte der Wasserstände auf der Ordinate und die Werte der Abflüsse auf der Abszisse eines rechtwinkligen linearen Koordinatensystems eingetragen werden. Die sich als Regressionsfunktion ergebende Kurve stellt die Abflusskurve dar. Aus pragmatischen Gründen wurden in dieser Untersuchung die Werte umgekehrt aufgetragen, da die Erstellung der Abflusskurve in EXCEL erfolgte. Die Regressionsfunktion $Q = f(W)$ durch die Punktwolke kann in einem EXCEL-Diagramm direkt ausgegeben werden. Als Qualitätsmerkmal der einzelnen Abflusskurven bietet sich die Standardabweichung aller Regressionsresiduen an, denn „Das Regressionsresiduum kennzeichnet die Abweichung eines empirischen y-Wertes von dem vorhergesagten y-Wert“ (Bortz 1999, S. 199). Somit kann die Abweichung der mit der Abflusskurve berechneten Abflusswerte von den gemessenen Abflusswerten bestimmt werden.

4.1.1 Abflusskurven Reintal

4.1.1.1 Messstation Partnach-Ursprung

In den Jahren 2002 bis 2005 wurden an der Messstation Partnach-Ursprung jährlich mindestens 6 Abflussmessungen durchgeführt. Von den insgesamt 30 Messungen wurden bei 29 die Kleinflügel- und bei einer die Salzverdünnungsmethode (Integrationsverfahren) verwendet. Dankenswerterweise stellte Dr. habil K.-F. Wetzel (München/Augsburg) die Ergebnisse einer weiteren Abflussmessung, die im Rahmen seiner Geländearbeit während des fallenden Asts des extremen Hochwassers im August 2005 gemacht wurde, zur Verfügung. Diese Messung verbessert die Abflusskurve v. a. bei hohen Wasserständen erheblich. Insgesamt stehen also 31 Wertepaare für die Aufstellung einer aktuell gültigen Abflusskurve zur Verfügung (Tab. 4.1). Die Abflüsse der einzelnen Messperioden wurden mit den jeweils

ERGEBNISSE

gültigen Abflusskurven und den aufgezeichneten Wasserstandsdaten berechnet. Mit Bestimmtheitsmaßen um 0,9 bei Standardfehlern von 0,21 bis 0,32 ist die Qualität dieser Abflusskurven sehr hoch.

Tab. 4.1 Abflusskurven Reintal, n = Anzahl der Abflussmessungen der jeweiligen Station im jeweiligen Jahr, $\sum n$ = kumulierte Anzahl der Abflussmessungen einer Messstation, SE = Standardfehler (Standardabweichung der Regressionsresiduen nach Bahrenberg et al. 2003, S. 52), k. A. = keine Angabe

Messstation	Gültigkeit	n	$\sum n$	Abflusskurve $Q = f(W)$	R ²	SE
„Bockhütte“/Rein 1	2000	8	8	$y = 1,963e^{0,041x}$	0,92	0,283
	2001	17	25	$y = 2,041e^{0,042x}$	0,93	0,235
	2002	4	29	$y = 2,011e^{0,042x}$	0,94	0,230
	2003	13	42	$y = 1,787e^{0,052x}$	0,91	0,386
	2004	14	56	$y = 1,799e^{0,053x}$	0,91	0,383
	bis 11.7.2005	2	58	$y = 1,799e^{0,053x}$	0,91	0,376
	2005 nach 11.7. bis 23.8.	7	7	$y = 0,31e^{0,082x}$	0,97	0,130
	nach 23.8.2005 bis 15. 9. 2006	6	6	$y = 0,042e^{0,035x}$	0,97	0,405
„Oberhalb Sieben Sprünge“/Rein 2	2002	3	3	$y = 0,01e^{0,118x}$	0,99	k.A.
	2003	5	8	$y = 0,001e^{0,166x}$	0,95	k.A.
„Einlauf Vordere Blaue Gumpe“/Rein 3	2002	2	2	$y = 2 \cdot 10^{-7} e^{0,37x}$	1	k.A.
	2003	3	5	$y = 0,184e^{0,067x}$	0,71	k.A.
„Partnach-Ursprung“/Rein 4	2002	9	9	$y = 0,131e^{0,040x}$	0,91	0,209
	2003	10	19	$y = 0,172e^{0,037x}$	0,85	0,245
	2004	6	25	$y = 0,176e^{0,037x}$	0,88	0,243
	2005	6	31	$y = 0,166e^{0,038x}$	0,89	0,318

4.1.1.2 Messstation „Bockhütte“

Vom Beginn der Geländesaison 2000 bis zum 11. Juli 2005 herrschte im Messquerschnitt an der Messstation Bockhütte Formungsruhe. Die Bachsohle der Partnach war dort stabil. Dies kommt in der sehr hohen Qualität der Abflusskurven für die einzelnen Messperioden zum Ausdruck. Mit Bestimmtheitsmaßen von immer über 0,91 und Standardfehlern von immer unter 0,39 konnten für Naturmessungen exzellente Werte erreicht werden. Die Abflussmessungen decken den Bereich kleiner als $5,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ab. Aufgrund der regelmäßigen Form des Gerinnebetts können mittels der Abflusskurven auch bordvolle Abflüsse berechnet werden. Überbordende Abflussereignisse traten in diesem Messzeitraum nicht auf.

Die Sohle und die Messquerschnitte wurden durch einzelne Hochwasserereignisse im Jahr 2005 gestört. Das Auftreten von sohlverändernden Hochwässern begrenzte die Gültigkeitsdauer der Abflusskurve. Nach diesen Hochwasserereignissen musste für die Station eine neue Abflusskurve ermittelt werden. Zwischen beiden Extremereignissen im Jahr 2005 konnten noch sieben Abflussmessungen durchgeführt werden. Die für den Zwischenereigniszeitraum gültige Abflusskurve ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,97 und Standardfehler (SE) von 0,13 qualitativ die beste im Reintal ermittelte (Tab. 4.1). Die etwas schlechtere Qualität der Abflusskurve ($R^2=0,97$, $SE=0,405$) für die Zeit nach dem Extremhochwasser vom August 2005 muss durch weitere Messungen im Zuge des laufenden DFG-Projektes (SCHM 472/15-1, Laufzeit 2008-2011) verbessert werden (Morche et al. in press).

4.1.1.3 Weitere Messstationen im Reintal

Die an den weiteren Messstationen im Reintal aufgestellten Abflusskurven (Rein 2 - oberhalb der Quelle bei den Sieben Sprüngen und Rein 3 - Partnachaustritt aus dem Steingerümpel) konnten aufgrund der Daten- durch Loggerverluste bzw. -beschädigungen (MZ 2002) nicht zur Ermittlung des Abflussgeschehens innerhalb des Untersuchungsgebietes herangezogen werden, sollen aber der Vollständigkeit halber hier mit erwähnt werden.

4.1.2 Abflusskurven Lahnenwiesgraben (Messstation „Burgrain“)

Zur Messstation „Burgrain“, welche von 1982-1999 vom Wasserwirtschaftsamt Weilheim als Pegel betrieben wurde, lag bereits eine Abflusskurve vor, die aber bei der Bearbeitung der Daten zu den Publikationen Morche (2005) und Schmidt & Morche (2006) nicht zur Verfügung stand, so dass die aktuellen Berechnungen des Abflusses von den bereits publizierten Ergebnissen abweichen können. Die Abflusskurve war vom 01.01.1991 bis zum 24.05.2000 gültig (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft München 2000). Sie kann am besten als polynomische Regressionsfunktion zweiten Grades wiedergegeben werden. Mit dieser Abflusskurve wurden für die Messsaison 2000 die Abflüsse aus den aufgezeichneten Wasserstandsdaten errechnet. In den Folgejahren ist diese Abflusskurve dann durch eigene Messungen ergänzt und aktualisiert worden. Da sich die eigenen Abflussmessungen aus Sicherheitsgründen auf Wasserstände (kleiner gleich 49 cm) beschränkten, konnte die Abflusskurve auch nur für diesen Bereich verbessert werden. Es musste also ein Split der Abflusskurve vorgenommen werden für Wasserstände kleiner gleich 49 cm und >49 cm. Die Abflusskurve >49 cm wurde aus der Abflusstafel des Bayerischen Landesamt für

ERGEBNISSE

Wasserwirtschaft München generiert. Auch hier lässt sich die Wasserstand-Abflussbeziehung durch eine polynomische Regressionsfunktion 2. Grades sehr gut darstellen (Tab. 4.2). Dabei wurde der Eta-Wert mit 0,5 angenommen. Dies entspricht der mittleren Abflusskurve und den Tatsachen, dass im Beobachtungszeitraum keine Verkrautungen oder häufige Änderungen der Gerinnehydraulik an der Messstation „Burgrain“ auftraten, welche eine Korrektur der Abflusskurve mit dem Eta-Verfahren nötig gemacht hätten (LAWA 1991).

Tab. 4.2. Abflusskurven Lahnenwiesgraben (Messstation Burgrain). n = Anzahl der Abflussmessungen im jeweiligen Jahr, $\sum n$ = kumulierte Anzahl der Abflussmessungen, SE = Standardfehler (Standardabweichung der Regressionsresiduen nach Bahrenberg et al. 2003, S. 52), ¹Datengrundlage Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft München mit Eta = 0,5 (mittlere Abflusskurve), ²ohne die Werte $W < 3$ cm, ³inkl. Daten $W \leq 49$ cm vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft, k. A. = keine Angabe

„Burgrain“/LWG	Gültigkeit	n	$\sum n$	Abflusskurve $Q = f(W)$	R ²	SE
$W > 49$ cm	1991-2005	k. A.	k. A.	$y = 0,002x^2 + 0,1x - 6,617$ ¹	0,99	0,12
$W \leq 49$ cm	1991-2000	k. A.	k. A.	$y = 0,0018x^2 - 0,022x + 0,094$ ¹	0,99	0,05 ²
	2001	9	9	$y = 0,0017x^2 - 0,017x + 0,063$ ³	0,99	0,15
	2002	3	12	$y = 0,0017x^2 - 0,017x + 0,061$ ³	0,99	0,14
	2003	10	22	$y = 0,0017x^2 - 0,017x + 0,071$ ³	0,99	0,11
	2004	8	30	$y = 0,0017x^2 - 0,0197x + 0,09$ ³	0,99	0,14
	2005	4	34	$y = 0,0017x^2 - 0,0195x + 0,09$ ³	0,99	0,13

4.2 Das Abflussgeschehen

Aus den aufgezeichneten Wasserstandsdaten wurden mit Hilfe der Abflusskurven Abflussganglinien für jede der Messstationen außer Rein 2 und Rein 3 erstellt.

Die in diesem Unterkapitel zusammengefasst dargestellten Ergebnisse weichen z.T. etwas von den in den Originalarbeiten veröffentlichten vorläufigen Ergebnissen ab, ohne jedoch die dort generell getroffenen Aussagen in Frage zu stellen.

4.2.1 Reintal

4.2.1.1 Messstation Partnach-Ursprung

Das Abflussgeschehen an der Quelle der Partnach, dem Partnach-Ursprung, beginnt mit der Schneeschmelze. Bei Morche (2006) wird noch von einer kontinuierlichen Quellschüttung von mindestens $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ausgegangen. Diese Aussage muss aufgrund einer Geländebegehung des Quellgebietes vom 19. März 2007 revidiert werden. Zu diesem Zeitpunkt stand im Quelltopf lediglich Wasser, Schmelzwasser des oberirdischen Einzugsgebietes des Quelltopfes, es floss aber kein Wasser direkt aus dem Quelltopf aus und auch das Gerinne an der Pegelmessstelle war komplett trocken gefallen (Abb. 4.1).

ERGEBNISSE



Abb. 4.1. Der Quelltopf (Partnach-Ursprung) am 16. September 2006 (links) und am 19. März 2007 (Mitte) und die Pegelmessstelle am 19. März 2007 (rechts)

Während der Basisabfluss vorwiegend auf Schnee- und z. T. auch noch Gletscherschmelzwasser zurückzuführen ist, folgen die Abflussspitzen auf sommerliche Starkregenereignisse.

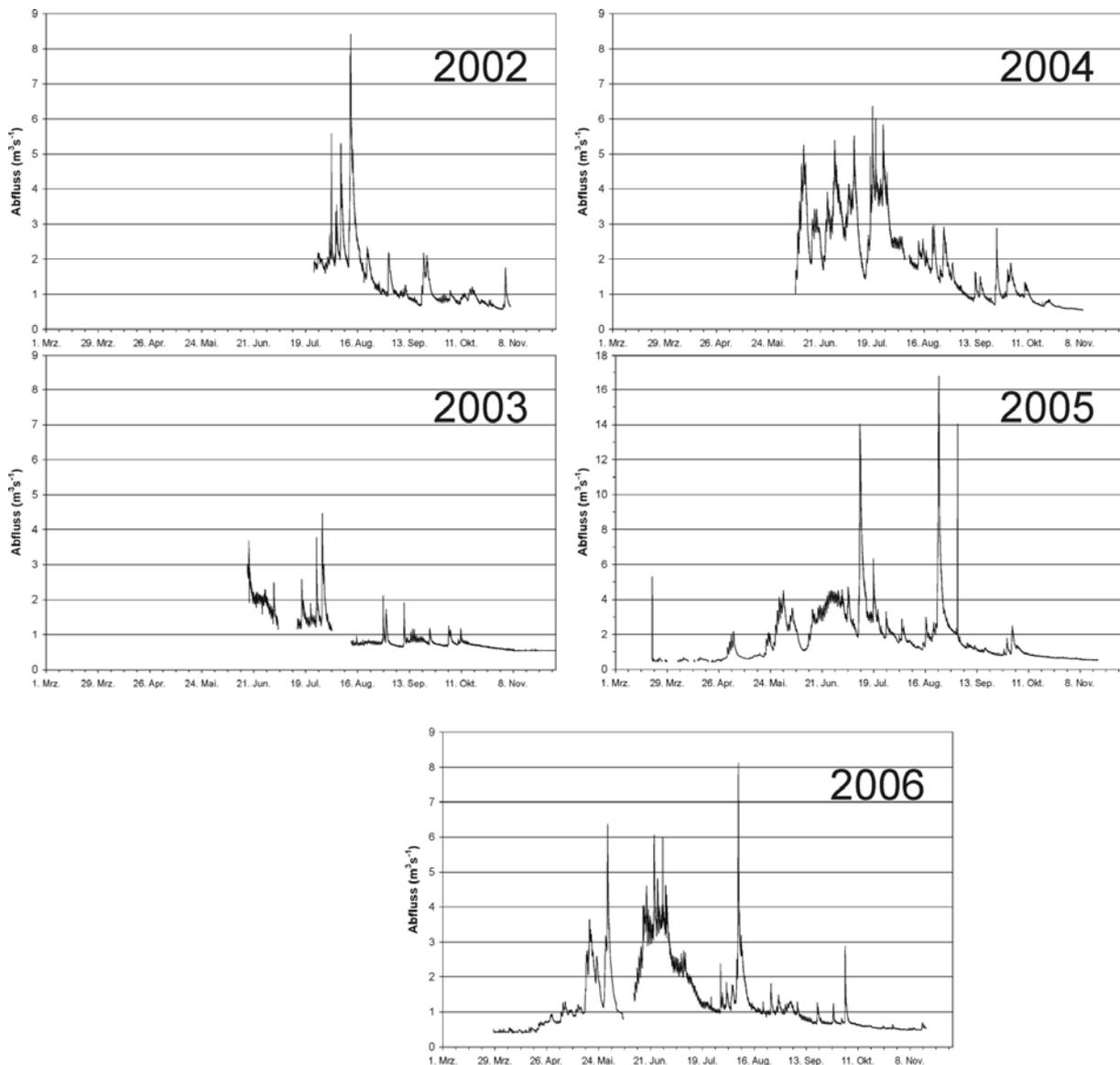


Abb. 4.2. Abflussganglinien der Partnach der Jahre 2002 bis 2006 von der Messstation Partnach-Ursprung. Unterbrechungen der Ganglinien sind auf technische Defekte des Datenloggers zurückzuführen. Achtung: Die 2005er y-Achse weist eine andere Skalierung auf.

ERGEBNISSE

Im Wesentlichen führen die höchsten Abflüsse am Partnach-Ursprung auch zu Hochwasser an der ca. 6 km unterstrom liegenden Messstation Bockhütte. Teilweise werden die Spitzen der Hochwasserereignisse weggepuffert (siehe Kap. 4.2.1.2). Im Untersuchungszeitraum gab es zwei sehr extreme Jahre. Das Jahr 2003 war sehr trocken („Jahrhundertssommer“) und durch sehr niedrige Abflüsse gekennzeichnet. Dagegen gab es im Jahr 2005 die größten bisher gemessenen Abflussspitzen. So traten drei Ereignisse auf, die $14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ erreichten oder überschritten (Abb. 4.2). Der Spitzenabfluss wurde am 23. August 2005 gemessen. Er betrug fast $17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ und wurde durch sehr hohe Niederschläge (200 mm in 24 h) ausgelöst (Morche et al. 2007).

Die wichtigen hydrologischen Kenngrößen sind für die Messstation Partnach-Ursprung in Tab. 4.3 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 4.3. Hydrologische Kenngrößen der Messstation Partnach-Ursprung. Im Winter fließt an einigen Tagen kein Wasser aus dem Quelltopf, daher beziehen sich alle Werte für den niedrigsten Abfluss (NQ), den mittleren Abfluss (MQ) und den höchsten Abfluss (HQ) auf die gemessenen Abflüsse.

Jahr	Dauer der Messperiode (Tage)	NQ (m^3s^{-1})	MQ (m^3s^{-1})	HQ (m^3s^{-1})
2002	106	0,56	1,39	8,41
2003	157	0,53	0,94	4,46
2004	153	0,55	1,93	6,36
2005	224	0,43	1,76	16,77
2006	193	0,40	1,29	8,12

4.2.1.2 Messstation „Bockhütte“

Der Abfluss der Partnach wird seit dem Jahr 2000 an der Messstation Bockhütte aufgezeichnet. Die Ganglinien an dieser Station weisen einen ähnlichen Verlauf wie die an der oberstrom liegenden Station Partnach-Ursprung auf. Allerdings sind die fallenden Äste der Hochwasser weniger steil abfallend und haben eine deutlich breitere Basis. Verantwortlich dafür sind zum einen das größere Einzugsgebiet und damit der Einfluss der z.T. sehr variablen Wasserzufuhr der einzelnen episodisch anspringenden tributären Hanggewässer infolge von Niederschlagsereignissen. Auf der anderen Seite wirken die mächtigen Lockergesteinsablagerungen (u.a. Gumpen, Schutthalden) im Talboden wie ein Puffer. Die Schotterablagerungen, Schuttkegel und -halden im Reintal wurden von Schrott et al. (2003) auf ca. $0,07 \text{ km}^3$ quantifiziert. Sie können vermutlich große Mengen an Wasser speichern und geben es verzögert wieder ab. Eine Studie über die genaue Quantifizierung des Einflusses dieser Speicher liegt bislang noch nicht vor und könnte Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten sein.

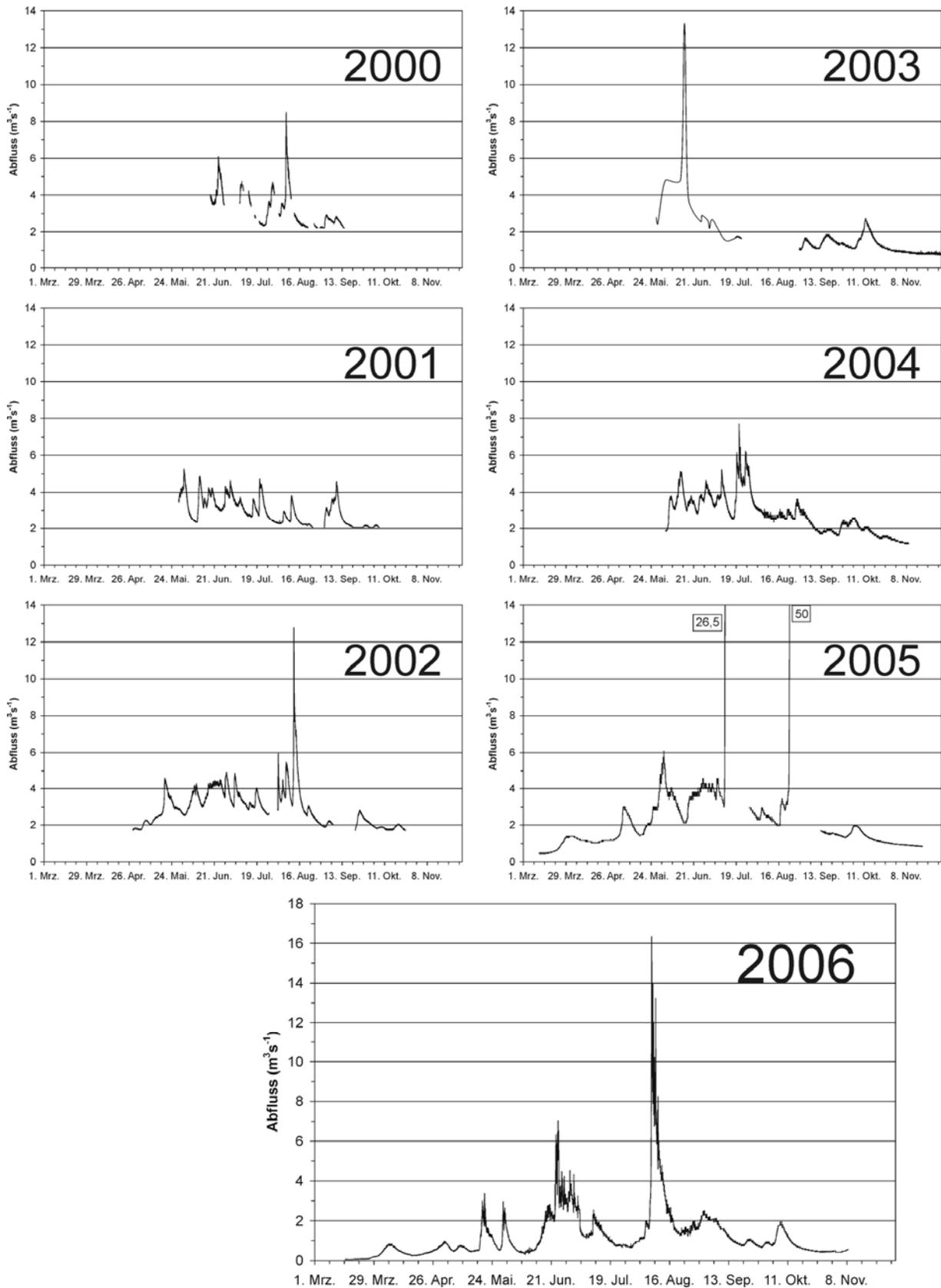


Abb. 4.3. Abflussganglinien der Partnach der Jahre 2000 bis 2006 von der Messstation Bockhütte. Unterbrechungen der Ganglinien sind auf technische Defekte des Datenloggers zurückzuführen. Der erste Teil der Ganglinie des Jahres 2003 ist eine Rekonstruktion, die auf einzelnen Abflussmessungen basiert. Dieser rekonstruierte Verlauf der Abflussganglinie ist nicht in die Berechnung der Hauptwerte des Jahres 2003 eingegangen (Tab. 4.4). Achtung: Die y-Achse von 2006 ist anders skaliert.

ERGEBNISSE

Die Abflussganglinien der Jahre 2000, 2001 und 2004 sind durch keine Extremereignisse gekennzeichnet (Abb. 4.3). Im August 2002 konnte ein erstes größeres Hochwasser aufgezeichnet werden. Die Abflüsse des sehr trockenen Jahres 2003 konnte aufgrund eines Datenloggerdefekts nur teilweise aufgezeichnet werden. Die Abflussspitze ereignete sich bereits am 14. Juni 2003. Der Abfluss dafür konnte durch Kartierungen der Hochwassermarken ermittelt werden (Tab. 4.4). Im Jahr 2005 konnten zwei Extremereignisse aufgezeichnet werden, das mögliche dritte wie am Partnach-Ursprung am 2. September 2005 aufgrund der Zerstörung des Datenloggers aber nicht. Der höchste gemessene Abfluss der Messstation Bockhütte wurde am 23. August 2005 mit ca. $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ erreicht. Dieser Wert ist eine Berechnung/Abschätzung mit der Manningformel, in die Werte von Geländekartierungen und -vermessungen eingegangen sind (Morche et al. 2007). Auch im August des Jahres 2006 trat ein einzelnes Hochwasser mit fast $17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ auf. Der niedrige MQ der beiden letzten Jahre ist vorwiegend auf die deutlich längeren Messperioden zurückzuführen, in denen auch lange Niedrigwasserperioden auftraten (Tab. 4.4). Eine zusammenfassende Darstellung über die wesentlichen hydrologischen Kenngrößen der Messstation Bockhütte ist in Tab. 4.4 zu finden.

Tab. 4.4. Hydrologische Kenngrößen der Messstation „Bockhütte“

Jahr	Dauer der Messperiode (Tage)	NQ (m^3s^{-1})	MQ (m^3s^{-1})	HQ (m^3s^{-1})
2000	59	2,19	3,20	8,50
2001	115	2,06	3,00	5,26
2002	158	1,73	2,94	12,75
2003	108	0,70	1,21	13,3
2004	160	1,15	2,76	7,71
2005	217	0,46	1,99	50
2006	238	0,05	1,22	16,36

4.2.2 Lahnenwiesgraben (Messstation „Burgrain“)

Die Abflussganglinien des Lahnenwiesgrabens in Burgrain wurden für die Jahre 2000 bis 2005 ermittelt (Abb. 4.4). Die Hochwasserganglinien zeigen ein deutlich steileres Ansteigen, aber auch Abfallen als die der Partnach an der Messstation Bockhütte. Im Lahnenwiesgraben ist die Pufferung durch ein gut entwickeltes Karstsystem oder große Schotter- und Schuttspeicher im Talboden nicht gegeben. An einigen Stellen tritt sogar das Ausgangsgestein an der Bachsohle zu tage. Die größten gemessenen Ereignisse traten am 21. Juni 2002 und am 31. Mai 2003 auf (Abb. 4.4 und Tab. 4.5). Das Augusthochwasser von 2005 wurde nicht direkt gemessen.

ERGEBNISSE

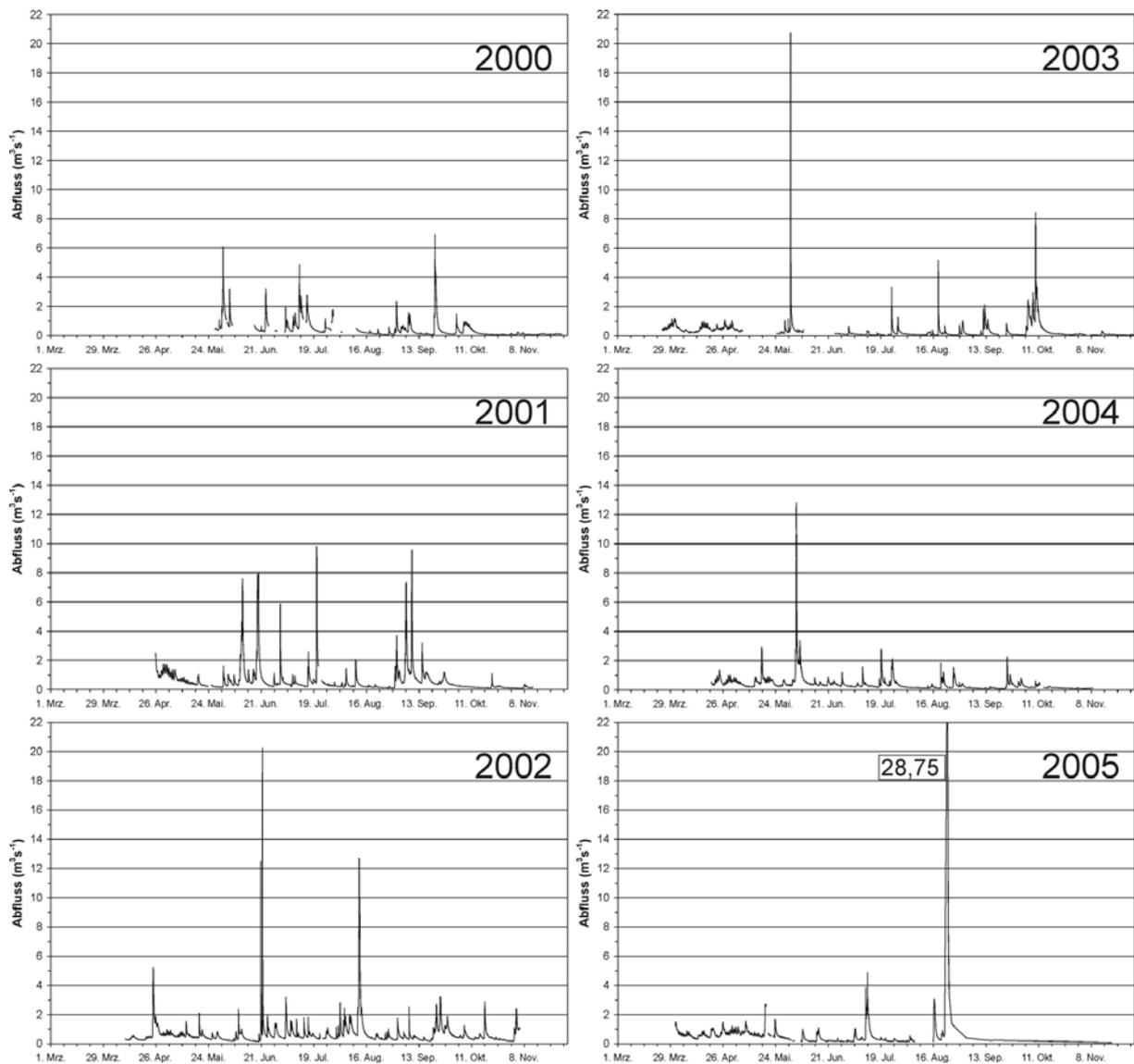


Abb. 4.4. Abflussganglinien des Lahnenwiesgrabens der Jahre 2000 bis 2006 von der Messstation Burgrain. Unterbrechungen der Ganglinien sind auf technische Defekte des Datenloggers zurückzuführen. Die Ganglinie ab dem 20. August 2005 ist aufgrund einzelner Beobachtungen des Wasserstandes am Pegel rekonstruiert. Einzelne möglicherweise aufgetretene kleinere Ereignisse im Herbst 2005 sind dadurch nicht mit abgebildet.

Tab. 4.5. Hydrologische Kenngrößen der Messstation „Burgrain“, der HQ von 2005 ist nicht direkt gemessen (siehe Text).

Jahr	Dauer der Messperiode (Tage)	NQ (m^3s^{-1})	MQ (m^3s^{-1})	HQ (m^3s^{-1})
2000	156	0,04	0,40	6,92
2001	197	0,08	0,59	9,81
2002	207	0,16	0,64	20,13
2003	218	0,03	0,32	20,74
2004	201	0,06	0,38	12,81
2005	215	0,08	0,57	28,75

Es konnte nur aufgrund der Aussagen eines Anwohners, welcher zum Zeitpunkt des wohl höchsten Wasserstandes vor Ort war (mündliche Mitteilung Anonymous vom 24. August 2005), rekonstruiert werden. Demnach ist betrug der Spitzenabfluss etwa $29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

4.3. Sedimenttransport/- haushalt

Zu diesem Unterkapitel gehören sämtliche Originalarbeiten im Anhang. Aus urheberrechtlichen Gründen werden in der online-Version dieser Dissertation nur die Originalkurzfassungen (abstracts) wiedergegeben.

4.3.1 Sedimenttransfer vom Hang- zum Gerinnesystem

- 4.3.1.1 Morche, D., Schmidt, K.-H. (2005). Particle size and particle shape analyses of unconsolidated material from sediment sources and sinks in a small Alpine catchment (Reintal, Bavarian Alps, Germany). *Z Geomorphol NF Suppl Bd.* 138. pp. 67-80. (Abstract)

Analyses of unconsolidated material in a small catchment in the Bavarian limestone Alps (Wettersteingebirge) near Garmisch–Partenkirchen have shown differences in particle size distribution and shape parameters of sediment sources and sinks. Within sedimentary links particle–size and particle rounding increase. The sorting of terrace surfaces gets better with decreasing D_{84} ($r_{\text{Pearson}} = 0,83$). Instream distribution of boulders follows a gamma distribution. There seems to be a relationship between slope and surface material particle size of talus cones.

- 4.3.1.2 Schrott, L., Götz, J., Geilhausen, M., Morche, D. (2006). Spatial and temporal variability of sediment transfer and storage in an Alpine basin (Bavarian Alps, Germany). *Geographica Helvetica* 61 (3), pp. 191-200. (Abstract)

This paper focuses in particular on clastic sediment fluxes on talus slopes. Using orthophoto interpretation, field measurements and GIS-techniques, a quantification of areas and volumes of active sediment transfer related to specific landform units was achieved for different spatial scales. Closer investigation of a single landform complex, more specifically a talus sheet/debris cone-complex, brought to light that remobilisation can overbalance sediment input by a factor of 57. This could be an indication of what may be expected in the whole catchment. At present, approximately 9% of the research area (3 km^2), comprising talus slopes

and valley bottom, is characterised by sediment transfer mainly through gravitational and fluvial processes. A comparison of the vast volumes (117.174 m³) derived from these active areas of recent sediment transfer and the volume of the entire valley fill (0.07 km³) indicates, however, that the largest part must be related to remobilised sediments and cannot be considered as sediment input from the adjacent rockwalls. This conclusion is also supported by direct measurements of sediment input.

4.3.1.3 Heckmann, T., Haas, F., Wichmann, V., Morche, D. (2008). Sediment budget and morphodynamics of an alpine talus cone on different timescales. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge* 52 Supplementary Issue 1, pp. 103-121. DOI:10.1127/0372-8854/2008/0052S1-0103 (Abstract)

The sediment budget and morphodynamics of a single talus sheet-debris cone complex in an Alpine glacial valley of the Northern Calcareous Alps is analysed on three different time scales. The undercutting, truncation and dissection of this sedimentary storage system caused by a high-magnitude event in August 2005 is documented and analysed using multitemporal geodetic surveys. On an intermediate timescale, the erosion or redistribution of sediment by debris flows is analysed by means of multitemporal orthophoto interpretation. Finally, the dissection of the talus sheet by debris flows is estimated to have started in the second half of the 19th century, based on estimations of debris flow magnitude and frequency. It seems to be caused by a change in catchment size rather than by climatic change at the end of the Little Ice Age alone. The most recent persistent change in system behaviour has been initiated by the August 2005 high-magnitude event, the consequences of which will be monitored in the future.

4.3.2 Sedimentaustrag und Bestimmung des effektiven Abflusses

4.3.2.1 Morche, D. (2005). Calculating the fluvial sediment output in high mountain catchments. *RMZ – Materials & Geoenvironment* 52 (1), pp. 99-102. (Abstract)

The fluvial sediment output in two high mountain catchments in the Bavarian Alps was determined for each of the sediment components. Suspended sediment load (SSL) and bed load were calculated using rating curve techniques. Dissolved load (DL) was determined by the close relation between electrical conductivity and the concentration of the total dissolved solids.

4.3.2.2 Schmidt, K.-H., Morche, D. (2006). Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology* 80, pp. 131-145. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.09.013 (Abstract)

Sediment output (solid and dissolved load) from two small Alpine rivers (Partnach and Lahnenwiesgraben in the Bavarian Alps) was measured during three summer field seasons from 2001–2003. There is high spatial variability of sediment output between the catchments and a high temporal variability between observation periods. Sediment transport in the Partnach river (Reintal) is dominated by solute load, whereas the Lahnenwiesgraben river transports a much greater proportion of solid load. This difference can mainly be explained by the different lithologies of the systems. The Reintal catchment is dominated by massive Triassic limestone. In the Lahnenwiesgraben catchment, in addition to limestones, unconsolidated rocks, marls and mudstone layers are significant. Furthermore, large rockslide dams in the Partnach valley isolate large parts of the Reintal catchment from solid load output. The components of fluvial sediment transport were, where possible, calculated by using flow duration curves and rating curve techniques. In the Lahnenwiesgraben event specific rating curves were used to determine suspended load. On the broad database of 55 measured flood events in the Lahnenwiesgraben a good correlation ($r_{\text{Pearson}}=0.9$) between event peak discharge and suspended load of the event was established. Effective discharge was calculated for the different types of sediment load (solid and dissolved) and total load. In the Reintal effective discharge for total load is found in low flow classes close to mean discharge, because sediment output is dominated by dissolved load, which has its maximum efficiency at low and moderate discharges. In the Lahnenwiesgraben most work is done by discharges much higher than mean discharge during extreme individual flood events.

4.3.2.3 Morche, D. (2006). Aktuelle hydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung (Wettersteingebirge). *Wasserwirtschaft* 96 (1-2), 53-58. (Kurzfassung)

Aufbauend auf den bisher vorliegenden Ergebnissen zu hydrologischen Messgrößen des Partnach-Ursprungs wurden Lösungsfracht und -abtragsbeträge für Deutschlands höchst gelegenes Karstplateau berechnet. Den wesentlichen Fortschritt der durchgeführten Arbeiten stellt die permanent ermittelte Wassertemperaturganglinie dar. Der Direktabfluss und der Basisabfluss können aufgrund von Wassertemperaturänderungen während eines

Hochwasserereignisses, vor allem auch im ansteigenden Ast, voneinander separiert werden. Dies ist eine Erweiterung des klassischen Methodenspektrums zur Abflusskomponentenseparation in mitteleuropäischen Karstgebieten. Der Direktabfluss nimmt demnach während Hochwasserereignissen nur maximal 25 % ein.

4.3.3 Sedimenttransportgeschehen in Teilabschnitten der Partnach im Reintal

4.3.3.1 Morche, D., Katterfeld, C., Fuchs, S., Schmidt, K.-H. (2006). The life-span of a small high mountain lake, the Vordere Blaue Gumpe in Upper Bavaria, Germany. In: Rowan, J., Duck, R.W. & A. Werritty (eds.). *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*. IAHS Publication 306, IAHS Press, Wallingford, pp. 72-81. (Abstract)

The Reintal valley in the Wetterstein Mountains in Upper Bavaria has been dammed by large rockslide deposits in some localities. Behind one of the dams a small lake, the Vordere Blaue Gumpe, was still in existence until 23 August 2005. The lake was a natural sediment sink, decoupling an area of about 1.6 km² from fluvial sediment export out of the sediment cascade of the Reintal valley. The bergsturz event occurred about 200 years ago. It was dated by evaluating historical maps, paintings, photographs and sketches. Present research is focused on multi-temporal changes of the alluvial deposits of the delta by analysis of aerial photos and geodetic surveying. Volume loss of the lake is closely related to bed load input during extreme events and shows the geomorphic coupling of hillslope and channel systems. From regression analyses of the annual volumetric change of the lake volume, the life-expectancy of the lake was estimated to be about 15 years, before an extreme high magnitude event in August 2005 filled the lake completely with sediment. Now, after the filling of the lake, with the coupling of the catchment area of the Vordere Blaue Gumpe to downstream fluvial sediment export, higher solid load transport is expected in the lower reaches with possible negative effects on infrastructure.

4.3.3.2 Sass, O., Krautblatter, M., Morche, D. (2007). Rapid lake infill following major rockfall (bergsturz) events revealed by ground-penetrating (GPR) measurements, Reintal, German Alps. *The Holocene* 17 (7), pp. 965-976. DOI:10.1177/0959683607082412 (Abstract)

The capability of GPR (ground-penetrating radar) measurements to decipher the sedimentary history of young alluvial plains is investigated. The sediment basins result from the infill of

two lakes, which were dammed by high-magnitude rockfalls 400–600 and 200 years ago in an Alpine trough valley. The thickness and structure of the dammed sediments was derived from a series of longitudinal and cross profiles. In order to take advantage of both high penetration and high resolution measurements, we applied 25, 50, 100 and 200 MHz antennas. The radargrams allow for a detailed analysis of the history of the alluvial fill. The pre-existing valley bottom is clearly visible under one of the basins. The profiles display the former clayey lake bottom and illustrate several stages of lake infill. Small-scale sedimentary structures, such as topset beds or foreset beds, are discernible and provide proxy information on water level, sediment supply and phases of infill activity. At the second basin, discordant structures in the adjacent sediment cones indicate the abrupt rise of the base level resulting from the rockfall event. Radar-derived information and historical records of lake retreat were used to reconstruct the sediment budget of the 200 year lifespan of the younger alluvial plane. Therefore, it can be concluded that the sedimentation rates of the twentieth century ($489 \pm 87 \text{ m}^3/\text{yr}$) are several times larger than those of the nineteenth century ($103 \pm 7 \text{ m}^3/\text{yr}$). A 130-yr rainstorm record suggests that the overall increase in sediment supply in the twentieth century corresponds to increased rainstorm frequencies during warm periods.

4.3.3.3 Morche, D., Witzsche, M., Schmidt, K.-H. (2008). Hydrogeomorphological characteristics and fluvial sediment transport of a high mountain river (Reintal Valley, Bavarian Alps, Germany). *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge* 52 Supplementary Issue 1, pp. 51-77. DOI:10.1127/0372-8854/2008/0052S1-0051 (Abstract)

Detailed hydromorphological investigations in a 2.1 km channel reach of the Partnach River in the Reintal Valley in the Bavarian Alps were carried out during a pre-event equilibrium state of the river system. Hydraulic parameters were derived from multitemporal surveying of the longitudinal profile and channel cross sections. Grain size analyses were carried out on seven selected sites using the photo sieving approach by Ibbeken & Schleyer (1986). The photographs were taken with a newly developed tethered balloon system. In the Partnach River various strong dependencies between geometrical and hydraulic parameters were determined empirically. The Partnach River showed an increase in channel width and depth with increasing distance downstream. Average velocity, specific stream power and bed shear stress decreased downstream. Furthermore, there are clear relations between bed shear stress, specific stream power, channel gradient and grain size. Downstream fining of the riverbed sediments was obvious, but interrupted by lateral sediment supply by debris flows. In the field

season 2004 the fluvial sediment transport of the Partnach River was dominated by solute load, due to prevailing lithology (limestone) and decoupling of large parts of the catchment in terms of fluvial solid load transport.

4.3.4 Rekonstruktion des Hochwassers vom August 2005 im Reintal und seine geomorphologischen Auswirkungen

4.3.4.1 Morche, D., Schmidt, K.-H., Heckmann, T., Haas, F. (2007). Hydrology and geomorphic effects of a high magnitude flood in an Alpine river. *Geografiska Annaler* 89 A (1), pp. 5-19. DOI:10.1111/j.1468-0459.2007.00304.x (Abstract)

The catchment of the River Partnach, a torrent situated in a glacial valley in the Northern Calcareous Alps of Bavaria/Germany, was affected by a high-magnitude flood on 22nd/23rd August 2005 with a peak discharge of more than 16 m³s⁻¹ at the spring and about 50 m³s⁻¹ at the catchment outlet. This flood was caused by a long period of intense rainfall with a maximum intensity of 230 mm per day. During this event, a landslide dam, which previously held a small lake, failed. The flood wave originating from the dam breach transported a large volume of sediment (more than 50000 m³) derived from bank erosion and the massive undercutting of a talus cone. This caused a fundamental transformation of the downstream channel system including the redistribution of large woody debris and channel switching. Using terrestrial survey and aerial photography, erosional and depositional consequences of the event were mapped, pre- and post-event surfaces were compared and the sediment budget of the event calculated for ten consecutive channel reaches downstream of the former lake. According to the calculations more than 100000 tonnes of sediment were eroded, 75% of which was re-deposited within the channel and the proximal floodplain. A previous large flood which occurred a few weeks prior to the August 2005 event had a significant effect on controlling the impact of this event.

4.3.4.2 Morche, D., Schmidt, K.-H., Sahling, I., Herkommer, M., Kutschera, J. (in press). Volume changes of Alpine sediment stores in a state of post-event disequilibrium and the implications for downstream hydrology and bed load transport. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography* 62 (Abstract)

The cascading system of a catchment in the Bavarian Alps is in a state of disequilibrium after an extreme dambreak flood event. Large parts of talus cones were undercut by fluvial erosion

and act as additional sediment sources for fluvial sediment transport demonstrating the geomorphic coupling between individual subsystems of a sediment cascade. Using terrestrial laser scanning (TLS) high resolution budgeting of sediment input from a talus cone was possible in the post-event field season. Further investigations of changes of the main sediment sources and direct measurements of bed load transport in the river enables us to calculate a preliminary sediment balance. Total bed load flux leaving the catchment in the first post-event field season (year 2006) was about 7900 t (one-third of the mass exported by the dambreak flood). The input from the main sediment sources was about 5061 t. Hence, the sediment balance has become negative; more sediment was exported from the catchment than stored within.

4.3.4.3 Morche, D., Laute, K. (submitted). Investigating channel response to a dambreak flood event in an Alpine river. *Arct Antarct Alp Res* (Abstract)

Since 2000 our field work within the framework of SEDAG (SEDiment cascades in Alpine Geosystems) focussed on hydrology, fluvial sediment transport dynamics and hydrogeomorphological characteristics of the alpine river Partnach (Reintal Valley, Bavarian Alps, Germany). In August 2005 a dambreak flood occurred in the Reintal Valley. Details on hydrology and geomorphic effects of this high magnitude event were reported recently by Morche et al. (2007). The contributing catchment area supplying material for bed load transport at the outlet of the catchment has been enlarged by more than 33 % ($4.3 \text{ km}^2 + 1.6 \text{ km}^2$) due to lake infilling and thus reconnecting formerly disconnected parts of the catchment. Post-dambreak downstream variation of stream power (total and specific), bed shear stress and particle characteristics (size and shape) were determined and are compared with our pre-dambreak findings. As to our knowledge, results of pre- and post-dambreak fluvial geomorphic investigations have not been published so far for an individual river. Results show very high values for total and specific stream power in post-dambreak times, a better sorting of the channel bed material. In addition, general downstream decreasing trends for particle size, stream power and bed shear stress show a certain degree of regularity in a state of disturbance. Nevertheless, further adjustments of the Partnach channel system in response to the dambreak event are expected in the near future.

5 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zum fluvialen Sedimenttransport in zwei Einzugsgebieten in den nördlichen Kalkalpen in Oberbayern vorgestellt. Der Schwerpunkt lag bei der Quantifizierung des Sedimentexports über die Grenzen der Einzugsgebiete hinaus. Dazu wurden seit dem Jahr 2000 Pegelmessstationen betrieben und Messungen und Analysen zu den im Wasser transportierten Feststoffen und gelösten Sedimenten durchgeführt.

Der fluviale Sedimenttransport der Partnach im Reintal im Wettersteingebirge war bis zum August 2005 von der Lösungsfracht dominiert. Dafür verantwortlich war zum einen der in Bezug auf den Feststofftransport entkoppelte Charakter des Tales, und zum anderen das gut entwickelte Karstsystem im Wettersteinkalk. Durch Bergsturzablagerungen wurden große Teile des als Feststoffe transportierten Sediments zurückgehalten, so dass vorwiegend gelöstes Material in der Partnach transportiert wurde. Die geomorphologisch effektiven Abflüsse liegen im Bereich von MQ ($2-4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Dieses Sedimenttransportverhalten wurde durch ein Extremereignis im August 2005, den Dambruch der Vorderen Blauen Gumppe, verändert. Erste Geschiebetransportmessungen (Helley-Smith) nach dem Dambruchereignis belegen einen deutlich erhöhten Feststofftransport auch bei geringeren Abflüssen.

An der Messstation Burgrain am Lahnenwiesgraben (Ammergauer Alpen) dominierte der Feststofftransport gegenüber der Lösungsfracht. Große Teile des Einzugsgebiets sind aus quartären Lockermaterialspeichern aufgebaut, die als laterale Sedimentquellen dienen. Außerdem sind die zum Rückhalt des Grobgeschiebes errichteten Sperren im Bachlauf des Lahnenwiesgrabens mit Sediment gefüllt, so dass über weite Strecken der lückenlose Durchtransport der Feststoffe gewährleistet ist. Einzelne niedrigfrequente Hochwasserereignisse transportierten den Großteil des exportierten Sediments. Im Gegensatz zum Reintal bilden im Lahnenwiesgraben die Abflussklassen $>20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ den effektiven Abfluss.

Weitere hydrogeomorphologische Untersuchungen wurden im Reintal durchgeführt. Einzelne Sedimentspeicher und Gerinneabschnitte der Partnach wurden detailliert geodätisch vermessen, um darüber den Feststofftransfer quantitativ zu ermitteln. Durch die Kopplung verschiedener Methoden (Analyse historischer Quellen, geodätische Vermessungen, geophysikalische Sondierungen - durchgeführt von Oliver Sass und Michael Krautblatter) war es möglich, den Verlauf der Verfüllung des Sees „Vordere Blaue Gumppe“ seit seiner Entstehung um 1800 detailliert und vor allem quantitativ nachzuvollziehen.

Im Gerinneabschnitt zwischen Vorderer Blauer Gumppe und Messstation Bockhütte am Ende des Einzugsgebiets Reintal wurde für einzelne Hochwasserereignisse Sedimentbilanzen

ermittelt. Dafür wurden Quer- und Längsprofilpeilungen und –vermessungen sowie geomorphologische Kartierungen, amtliche Orthophotos und von Fesselballon bzw. Helikopter gestützte Luftbildaufnahmen ausgewertet. Von besonderer (fluvial)geomorphologischer Bedeutung war das extreme Hochwasserereignis vom August 2005. Dabei wurde der kleine Bergsee „Vordere Blaue Gumpe“ komplett mit Sediment gefüllt und die Krone des ihn aufstauenden Bergsturzdammes um 2-3m eingeschnitten. Im weiteren Verlauf des Hochwassers wurde der unterstrom liegende Abschnitt der Partnach im Reintal stark überformt und insgesamt mehr als 100000 t Sediment von den Hängen, Ufern und auch aus dem Gerinnebett mobilisiert. Davon wurden ungefähr 25000 t aus dem Reintal exportiert.

6 DISKUSSION UND AUSBLICK

Der fluviale Feststofftransport ist ein wesentlicher Bestandteil einer Sedimentkaskade (Caine 1974, Chorley & Kennedy 1971, Slaymaker 1991). Die Quantifizierung des Systemaustrags durch fluvialen Feststofftransport ist eine wichtige Größe bei der Bilanzierung des Sedimenthaushalts und wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Einzugsgebiete der Partnach im Reintal und des Lahnenwiesgrabens untersucht. Dies war an den Pegelstationen „Partnachursprung“ (Lösungsabtrag vom Zugspitzplatt) und „Bockhütte“ im Reintal und „Burgrain“ am Lahnenwiesgraben mit der Aufzeichnung der Abflussmengen und der Messung der Sedimentkonzentrationen relativ einfach möglich (Morche 2005, Morche 2006, Schmidt & Morche 2006, Morche et al. 2008, Morche et al. in press). Dagegen konnten die für die Betrachtung des Feststofftransports wichtigen Aspekte wie Zwischenspeicherung, Remobilisierung und Umlagerung von Sediment am und im Gerinne nur an der Partnach und aufgrund der deutlich komplexeren Erfassungsmethodik auch nur an Testabschnitten erfolgreich ermittelt werden (Morche et al. 2006, Morche et al. 2007, Morche et al. 2008). Diese Ergebnisse stellen wichtige Erkenntnisse über den Sedimenttransfer und die geomorphologische Formung im und am Gerinne dar. Allein aus der Betrachtung des Sedimentaustrags am Gebietsauslass sind die im Einzugsgebiet wirkenden Prozesse bzw. Prozessraten nicht erklärbar (Walling 1983, Trimble 1999).

Die ermittelten Sedimentausträge beider Untersuchungsgebiete unterscheiden sich voneinander, so war der Sedimentexport aus dem Reintal durch die Lösungsfracht dominiert, während im Lahnenwiesgraben der Feststofftransport dominierte (Morche 2005, Schmidt & Morche 2006), liegen aber im Bereich anderer alpiner und voralpiner Einzugsgebiete (Becht 1995, Schlesinger 1974, Wetzler 1992). Im Wesentlichen sind für die differierenden Austragsmengen die in den Gebieten vorzufindenden Gesteine wie Hauptdolomit, Plattenkalk, Kössener Schichten, quartäre Lockergesteine im Lahnenwiesgraben (Doposcheg o.a. ca. 1938) und Wettersteinkalk im Reintal (Miller 1961) und die darin ablaufenden geomorphologischen Prozesse verantwortlich (Haas 2008, Heckmann 2006, Koch 2005, Schmidt & Morche 2006, Wichmann 2006). Zusätzlich große Bedeutung hat die Durchgängigkeit der Hauptgerinne in Bezug auf den fluvialen Feststofftransport (Stichwort: geomorphologische Kopplung oder Konnektivität).

Auf die Bedeutung der geomorphologischen Kopplung von einzelnen Speichern oder Teileinzugsgebieten für den fluvialen Feststofftransport und dessen Anteil am Gesamtgebietsaustrag wurde im Rahmen dieser Arbeit hingewiesen (Morche & Schmidt 2006, Schrott et al. 2006). Die Entkopplung durch Bergstürze von Teileinzugsgebieten in

Bezug auf den fluvialen Feststofftransport ist ein weltweit verbreitetes Phänomen in Hochgebirgstälern (Hewitt 2006). Diese Entkopplung kommt einer Störung des betrachteten Geosystems gleich (Hewitt 2006). Die Persistenz der einzelnen (Bergsturz)dämme ist maßgeblich von deren Größe abhängig und kann Jahrtausende andauern (Ermini & Casagli 2003, Hewitt 2006). Im Rahmen seines konzeptionellen Modells (landslide interruption epicycle) weist Hewitt (2006) fünf Phasen der Störung eines Tales durch Bergstürze aus. Dieses Modell lässt sich in hervorragender Weise an die Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet Reintal anpassen (Morche & Laute in press). Der obere Teil des Reintals ist durch den Bergsturz Steingerümpel vom Ausgang des Tales derart abgedämmt, dass nur wenige feine suspendierte Feststoffe ausgetragen werden können und grobes Material oberhalb der Bergsturzmassen abgelagert wird (Phase 2). Der untere Teil des Reintals erlebte im Untersuchungszeitraum den Übergang von Phase 2 zu Phase 3 des Hewitt'schen Phasenmodells. Das Extremereignis vom August 2005 markiert sehr scharf diesen Phasenwechsel durch die Verfüllung des Sees Vordere Blaue Gumpe und die Einschneidung des Damms (vgl. Heckmann et al. 2008, Morche et al. 2006, Morche et al. 2007, Sass et al. 2007). Die durch Extremereignisse wie Damnbrüche verursachten Veränderungen sind von hoher (fluvial)geomorphologischer Relevanz, da sie oft jahre- bis jahrzehntelange Auswirkungen auf das Fließgewässersystem haben (Bathurst & Ashiq 1998, Pitlick 1993).

Glücklicherweise ist es mit den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen möglich einen Datensatz zu präsentieren (für das Reintal), der den Systemzustand vor einem Dambruchereignis dokumentiert. Bisher sind keine ähnlichen Untersuchungsergebnisse bekannt. Nachfolgende Untersuchungen zum fluvialen Sedimenttransportgeschehen, erste Ansätze und vorläufige Ergebnisse wurden in dieser Arbeit vorgestellt (Morche et al. in press und Morche & Laute submitted), können zu Vergleichen der Zustände vor und nach dem Ereignis herangezogen werden. Beide Datensätze (vorher/nachher) sollten dann herangezogen werden, um systemtheoretische Aussagen treffen zu können. So müssen die publizierten Angaben zum effektiven Abfluss der Partnach im Reintal (Schmidt & Morche 2006) höchstwahrscheinlich abgeändert werden. Die Nachfolgeuntersuchungen im Reintal sind Gegenstand des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Auswirkungen von Extremereignissen auf die Funktion von Sedimentspeichern und -quellen, auf die Materialmobilität und den fluvialen Sedimenttransfer in einem alpinen Fließgewässersystem“ (Az. SCHM472/15-1, Laufzeit 2008-2011).

SUMMARY

7 SUMMARY

The study deals with investigations on the fluvial sediment transport in two catchments located in the Northern Calcareous Alps in Upper Bavaria. Main focus of investigation was the quantification of the sediment export beyond the outlets of the catchment.

Since 2000 gauging stations operate at the Partnach River (Wetterstein Mountains) and Lahnenwiesgraben River (Ammergauer Alps). Surveys and analyses of the solid as well as dissolved load were carried out. Dissolved load is the predominant component of the fluvial sediment transport in the Partnach River (Reintal Valley). On the one side this fact can be explained by the decoupled character of the valley in terms of solid load transport. Large landslide deposits dam the valley floor and retain all bed load and large parts of suspended sediments. On the other side, the prevailing lithology is homogenous Triassic limestone and karst system is well developed. The effective discharge is about the mean ($2-4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). This general character of sediment transport was changed by an extreme event in August 2005, the dambreak at Vordere Blaue Gumpe and the subsequent flood. First Helley-Smith bed load measurement show an increase of bed load transport even during lower discharges than in the pre-dambreak state.

Additional hydrogeomorphological investigations were carried out in the Reintal Valley. Individual sediment sources and channel reaches were surveyed for determining the quantity of transported sediment.

The history of sediment infill in the lake „Vordere Blaue Gumpe“ and the quantification of sediment transport was achieved by a combination of different methodological approaches (analyses of historical data, geodetic measurement, geophysical surveys - carried out by Oliver Sass and Michael Krautblatter).

Sediment budgets were established for single flood events in the channel reach between Vordere Blaue Gumpe and gauging station “Bockhütte“ using levelling of cross sections and longitudinal profile surveying, geomorphic mapping and multitemporal analyses of orthophotos as well as air photos taken from a tethered balloon and a helicopter.

In the Lahnenwiesgraben River (Ammergauer Alps) the sediment transport is dominated by solid load. Large parts of the catchment are covered by unconsolidated Quarternary sediments which act as sources for lateral sediment supply to the river. Furthermore, the general character of the Lahnenwiesgraben River is coupled due to the fact that check dams were completely filled with sediments and the sediment flux is not interrupted. Major amount of sediment was transported by single low frequent flood events ($>20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

8 LITERATUR

- Albrecht, D. (1955): Grafschaft Werdenfels (Hochstift Freising). In: Kommission für Bayerische Landesgeschichte (Hrsg.): Historischer Atlas von Bayern – Teil Altbayern. München Heft 9, 34 S.
- Allen, C.M., Taylor, E.A. (1923): The salt velocity method of water measurement. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 45, 285-341
- Bahrenberg, G., Giese, E., Nipper, J. (2003): Statistische Methoden in der Geographie. Band 2 - Multivariate Statistik. Studienbücher der Geographie, Berlin
- Bathurst, J.C., Ashiq, M. (1998): Dambreak flood impact on mountain stream bedload transport after 13 years. Earth Surface Processes and Landforms 23, 643-649
- Becht, M. & Wetzel, K.-F. (1994): Abfluß- und Niederschlagsmessung eines Wildbachsystems (Lainbach/ Oberbayern). In: Barsch, D., Mäusbacher, R., Pörtge, K.-H., Schmidt, K.-H. (Hrsg.): Messungen in fluvialen Systemen. Feld- und Labormethoden zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes. Springer, Berlin, 139-157
- Becht, M. (1995): Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung in alpinen Einzugsgebieten. Münchener Geographische Abhandlungen A 47, München. 147 p.
- Becht, M. (1996): Untersuchungen über Abflussverhalten und Gerinneformung in den Nördlichen Kalkhochalpen (Höllental/Wettersteingebirge). Petermanns Geographische Mitteilungen 140, 23-32
- Benischke, R., Harum, T. (1984): Computergesteuerte Abflussmessung in offenen Gerinnen nach der Tracerverdünnungsmethode (Integrationsverfahren). Steirische Beiträge zur Hydrogeologie 36, 127-139
- Beylich, A.A., Sandberg, O. (2005): Geomorphic effects of the extreme rainfall event of 20-21 July, 2004 in the Latnjavagge catchment, Northern Swedish Lapland. Geografiska Annaler 87A, pp. 409-419, doi: 10.1111/j.0435-3676.2005.00267.x
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (Hrsg.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- Bortz, J. (1999): Statistik für Sozialwissenschaftler. Springer, Berlin
- Brandner, J. (1993): Rund ums Landl. Adam, Garmisch-Partenkirchen
- Brunner, K., Horst, T. (2007): Eine Karte des Zugspitzgebiets (18. Jh) und die Wirrnisse um die Erstbesteigung. Cartographica Helvetica 35, 3-7
- Bunte, K., Abt, S. R. (2001): Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-74. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 428 p.
- Byrd, T.C., Furbish, D.J., Warburton, J. (2000): Estimating depth-averaged velocities in rough channels. Earth Surface Processes and Landforms 25, 167-173
- Cailleux, A. (1952): Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie. Geologische Rundschau 40, 11-19
- Caine, N. (1974): The geomorphic process of the alpine environment. In: Ives, J.D., Barry, R.G. (eds.): Arctic and alpine environments. Methuen and Co Ltd. London, 721-740
- Carter, R. W. (1973): Accuracy of current meter measurements. IAHS Publication 99, IAHS Press, Wallingford, 86-98
- Chorley, R.J., Kennedy, B.A. (1971): Physical Geography. A System Approach. Prentice Hall International Inc., London.
- Embleton-Hamann, C. & Slaymaker, O. (2006): Jäckli, H. 1957: Classics in physical geography revisited: Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes. Ein

- Beitrag zur exogenen Dynamik alpiner Gebirgslandschaften (Exogene dynamics of an Alpine landscape). Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie 36, 136 pp. and 5 maps. Progress in Physical Geography 30, 779-783.
- Emmett, W.W. (1980): A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler. USGS Professional Paper 1139. 44 p.
- Ermini, L., Casagli, N. (2003): Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. Earth Surface Processes and Landforms 28, 31-47. doi: 10.1002/esp.424
- Folk, R.L., Ward, W.C. (1957): Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology 27(1), 3-26
- Füchtbauer H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. Sediment-Petrologie Teil II. Stuttgart
- Fuller, I.C., Large, A.R.G., Heritage, G.L., Milan, D.J., Charlton, M.E. (2005): Derivation of annual reach-scale sediment transfers in the River Coquet, Northumberland, UK. In: Blum, M.D., Marriot, S.B., LeClair, S.F. (eds.): Fluvial Sedimentology VII. Special Publication of the International Association of Sedimentologists 35, pp. 61-74
- Haas, F. (2008): Fluviale Hangprozesse in alpinen Einzugsgebieten der nördlichen Kalkalpen - Quantifizierung und Modellierungsansätze. Eichstätter Geographische Arbeiten 17, 230 S.
- Hach Company (1995): Model 19800-01 – Backwash Turbidimeter – Instruction manual. Loveland, 30 p.
- Hach Company (2004): Sigma 900 standard portable sampler – Instruction manual. Loveland, 91 p.
- 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 14, 312 S.
- Heckmann, T., Haas, F., Wichmann, V., Morche, D. (2008). Sediment budget and morphodynamics of an alpine talus cone on different timescales. Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge 52 Supplementary Issue 1, pp. 103-121. DOI:10.1127/0372-8854/2008/0052S1-0103
- Heller, F., Nieder, R. (1932): Geologisch-geomorphologische Untersuchungen im Partnachtal des Wettersteingebirges. Zeitschrift für Karst- und Höhlenkunde 10, 119-153
- Hewitt, K. (2006): Disturbance regime landscapes: mountain drainage systems interrupted by large rockslides. Progress in Physical Geography 30(3), 365-393, doi: 10.1191/0309133306pp486ra
- Hirtreiter, G. (1992): Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung. Münchener Geographische Abhandlungen. Reihe B 15
- Holle, F.K., Vogelbacher, A., Wilhelm, F. (2005): Hochwasser in Bayern. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49, 278-279
- Hüttl, C. (1999): Steuerungsfaktoren und Quantifizierung der chemischen Verwitterung auf dem Zugspitzplatt (Wettersteingebirge, Deutschland). Münchener Geographische Abhandlungen B 30
- Ibbeken, H., Schleyer, R. (1986): Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse grained, unconsolidated bedding surfaces. Earth Surface Processes and Landforms 11, 59-77
- Ibbeken, H., Warnke, D., Diepenbroek, M. (1998): Granulometric study of the Hanaupah Fan, Death Valley, California. Earth Surface Processes and Landforms 23(6), 481-492.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jäckli, H. (1957): Gegenwartsgeologie des Bündnerischen Rheingebietes. Beiträge zur Geologischen exogenen Dynamik alpiner Gebirgslandschaften. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie 36, 136 S.
- Keller, D. (2008): Analyse und Modellierung gravitativer Massenbewegungen in alpinen Sedimentkaskaden unter besonderer Berücksichtigung von Schutt- und Kriechströmen im Lockergestein. Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Erlangen-Nürnberg (in Bearbeitung)
- Keller, H.M. (1971): Messung und Bedeutung der elektrischen Leitfähigkeit kleiner Gebirgsbäche. Deutsches gewässerkundliches Jahrbuch 35, 415-424
- Keller, H.M. (1973): Measurement and significance of electrical conductivity in small mountain streams. IAHS Publication 99, IAHS Press Wallingford, 588-595
- Keller, H.M. (1979a): Die Berechnung der gelösten Kalzium-Fracht aus einem kleinen Einzugsgebiet. Wissenschaftliche Mitteilungen des Meteorologischen Instituts der Universität München 35, 105-109
- Keller, H.M. (1979b): The estimate of ionic discharge during high flows in small torrent catchments. In: Morel-Seytoux, H.J., Sala, J.D. (eds.): Surface and subsurface hydrology. Proceedings of the International Hydrology Symposium Fort Collins, Water Resources Publication, 703-710
- Koch, F. (2005): Zur raum-zeitlichen Variabilität von Massenbewegungen und pedologische Kartierungen in alpinen Einzugsgebieten - Dendrogeomorphologische Fallstudien und Erläuterungen zu den Bodenkarten Lahnenwiesgraben und Reintal (Bayerische Alpen). Dissertation Philosophische Fakultät III - Geschichte, Gesellschaft, Geographie - der Universität Regensburg
- Küfmann, C. (2003): Erste Ergebnisse zur qualitativen Untersuchung und Quantifizierung rezenter Flugstäube in den Nördlichen Kalkalpen (Wettersteingebirge). Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München 86, 59-84
- Küfmann, C. (2006): Quantifizierung und klimatische Steuerung von rezenten Flugstaubeinträgen auf Schneeoberflächen in den Nördlichen Kalkalpen (Wetterstein-, Karwendelgebirge, Berchtesgadener Alpen, Deutschland). Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge 50, 245-268
- Labor für Geomorphologie und Geoökologie (1994): Datalogger DL 8.4 – Handbuch. Heidelberg, 30 S.
- LAWA (Hrsg.) (1991): Pegelvorschrift – Anlage D – Richtlinien für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. Hamburg
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. (1964): Fluvial processes in geomorphology. W.H. Freeman & Company San Francisco 522 p.
- Leuchs, K. (1921): Die Ursachen des Bergsturzes am Reintalanger (Wettersteingebirge). Geologische Rundschau 12, 189-192
- Leuchs, K. (1926): Sedimentationsverhältnisse im Mesozoikum der nördlichen Kalkalpen. Geologische Rundschau 17, 151-159
- Leuchs, K. (1930): Der Bau der Südrandstörung des Wettersteingebirges. Geologische Rundschau 21, 81-97
- Lisle, T.E., Iseya, F., Ikeda, H. (1993): Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: A flume experiment. Water Resources Research 29(11), 3623-3629
- Miller, H. (1961): Der Bau des westlichen Wettersteingebirges. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 113, 409-425

- Morche, D. (2005). Calculating the fluvial sediment output in high mountain catchments. *RMZ – Materials & Geoenvironment* 52 (1), 99-102.
- Morche, D. (2006). Aktuelle hydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung (Wettersteingebirge). *Wasserwirtschaft* 96 (1-2), 53-58.
- Morche, D., Katterfeld, C., Fuchs, S., Schmidt, K.-H. (2006). The life-span of a small high mountain lake, the Vordere Blaue Gumpe in Upper Bavaria, Germany. In: Rowan, J., Duck, R.W. & A. Werritty (eds.). *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*. IAHS Publication 306, IAHS Press, Wallingford, 72-81.
- Morche, D., Laute, K. (submitted). Investigating channel response to a dambreak flood event in an Alpine river. *Arctic Antarctic and Alpine Research*
- Morche, D., Schmidt, K.-H. (2005). Particle size and particle shape analyses of unconsolidated material from sediment sources and sinks in a small Alpine catchment (Reintal, Bavarian Alps, Germany). *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge Supplement-Band* 138, 67-80.
- Morche, D., Schmidt, K.-H., Heckmann, T., Haas, F. (2007). Hydrology and geomorphic effects of a high magnitude flood in an Alpine river. *Geografiska Annaler* 89 A (1), 5-19. DOI:10.1111/j.1468-0459.2007.00304.x
- Morche, D., Schmidt, K.-H., Sahling, I., Herkommer, M., Kutschera, J. (in press). Volume changes of Alpine sediment stores in a state of post-event disequilibrium and the implications for downstream hydrology and bed load transport. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography* 62
- Morche, D., Witzsche, M., Schmidt, K.-H. (2008). Hydrogeomorphological characteristics and fluvial sediment transport of a high mountain river (Reintal Valley, Bavarian Alps, Germany). *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge* 52 Supplementary Issue 1, 51-77. DOI:10.1127/0372-8854/2008/0052S1-0051
- Müller, G. (1964): *Methoden der Sedimentuntersuchung*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Müller, G., Förstner, U. (1968): general relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenrhein and some other rivers. *Nature* 217(2), 244-245
- Müller, G., Godina, R. (2005): Das Augusthochwasser 2005 in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50, 42-45
- MZ (2002): Schlamm verschüttet Messgerät. *Mitteldeutsche Zeitung* vom 13.08.2002, S. 9.
- Ott Hydrometrie a (o.a.): Datensammler nach dem Einperlprinzip „Orphimedes“ - Betriebsanleitung. Kempten, 24 S.
- Ott Hydrometrie b (o.a.): Einperltopf EPS 50 - Montageanleitung. Kempten, 4 S.
- Ott Hydrometrie c (o.a.): Orpheus-K – Drucksonde mit integriertem Datensammler - Bedienungsanleitung. Kempten, 39 S.
- Pitlick, J. (1993): Response and recovery of a subalpine stream following a catastrophic flood. *Geological Society of America Bulletin* 105, 657-670
- Rapp, A. (1960): Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geografiska Annaler A* 42, 71–200
- Rawle, A. (2001): *Basic Principles of Particle Size Analysis: Technical Paper MRK043*, Malvern Instruments Limited
- Rickenmann, D. (1996): Fließgeschwindigkeit in Gebirgsflüssen und Wildbächen. *Wasser, Energie, Luft* 11-12, 298-304
- Rögner, K., Hüttl, C., Sass, O. (1999): Verwitterung in den Nördlichen Kalkalpen. *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München* 84, 111-148

- Rögner, K., König, B. (2003): Der Einfluss von Flechten auf die Verwitterung von Karbonatgesteinen im Hochgebirge (Zugspitzplatt, Wettersteingebirge, Bayern, Deutschland). *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München* 86, 85-132
- Ryan, S.E., Troendle C.A. (1997): Measuring bedload in coarse-grained mountain channels: procedures, problems, and recommendations. *Water Resources Education, Training, and Practice: Opportunities for the Next century*, American Water Resources Association Conference, June 29-July 3, Keystone, Columbia, 949-958
- Sass, O., Krautblatter, M., Morche, D. (2007). Rapid lake infill following major rockfall (bergsturz) events revealed by ground-penetrating (GPR) measurements, Reintal, German Alps. *The Holocene* 17 (7), 965-976. DOI:10.1177/0959683607082412
- Schlesinger, B. (1974): Über die Schutteinfüllung im Wimbach-gries und ihre Veränderung - Studie zur Schuttlagerung in den östlichen Kalkalpen. *Münchener Geographische Abhandlungen* 14, 74 S.
- Schmidt, K.-H. (1984): Der Fluß und sein Einzugsgebiet. *Hydrogeographische Forschungspraxis. Wissenschaftliche Paperbacks*, Steiner, Wiesbaden.
- Schmidt, K.-H., Morche, D. (2006). Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology* 80, 131-145. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.09.013
- Schneider, U. (2000): BIBER V2.1 – Anwenderhandbuch. KISTERS AG Aachen.
- Schrott, L., Götz, J., Geilhausen, M., Morche, D. (2006). Spatial and temporal variability of sediment transfer and storage in an Alpine basin (Bavarian Alps, Germany). *Geographica Helvetica* 61 (3), 191-200.
- Schrott, L., Hufschmidt, G., Hankammer, M., Hoffmann, T., Dikau, R. (2003): Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology*, 45-63
- Slaymaker, O., 1991: Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programmes. *Catena*, 18: 427-437.
- Sneed, E.D., Folk, R.L. (1958): Pebbles in the lower Colorado River, Texas – A study in particle morphogenesis. *Journal of Geology* 66, 114-150
- Spreafico, M. (1994): Abflussmengenbestimmung mit dem Verdünnungsverfahren. In: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (Hrsg.): *Hydrologie kleiner Einzugsgebiet. Gedenkschrift Hans M. Keller. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* 35, 173-180
- Syvitski, J.P.M., Milliman, J.D. (2007): Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *Journal of Geology* 115, 1-19
- Syvitzki, J.P., Morehead, M.D., Bahr, D.B., Mulder, T. (2000) Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. *Water Resources Research* 36, 2747-2760
- Trimble, S.W. (1999): Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975-93. *Science* 285, 1244-1246
- Uhlig, H. (1954): Die Altformen des Wettersteingebirges mit Vergleichen in den Allgäuer und Lechtaler Alpen. *Forschungen zur Deutschen Landeskunde* 79, 103 S.
- Vericat, D., Church, M., Batalla, R. J. (2006): Bed load bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley-Smith samplers in a gravel bed river. *Water Resources Research* 42, W01402, doi:10.1029/2005WR004025
- Walling., D.E. (1977): Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research* 13, 531-538
- Walling, D.E. (1983): The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* 65, 209-237

- Walling, D.E. (1984): Dissolved loads and their measurement. In: Hadley, R.F., Walling, D.E. (eds): Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modelling. Geo Books, Norwich, 111-177
- Wetzel, K.F. (1992): Abtragsprozess an Hängen und Feststführung der Gewässer - Dargestellt am Beispiel der pleistozänen Lockergesteine des Lainbachgebietes (Benediktbeuern/Obb.). Münchener Geographische Abhandlungen 17B, 176 S.
- Wetzel, K.F. (2004a): On the hydrology of the Partnach area in the Wetterstein Mountains (Bavarian Alps). Erdkunde 58, 172-186
- Wetzel, K.F. (2004b): Hydrology of an alpine karst area - the example of the Partnach spring (Upper Bavaria). Landschaftsökologie und Umweltforschung 47, 429-434
- 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 15, 231 S.
- Wilhelm, F. (1956): Physikalisch-chemische Untersuchungen an Quellen in den bayrischen Alpen und im Alpenvorland. Münchner Geographische Hefte 10, 97 S.
- ZEISS (Hrsg.) (1993): Bedienungsanleitung Rec Elta - Registrierendes elektronisches Tachymeter. Oberkochen

AUFSTELLUNG DER VERWENDETEN KARTEN UND LUFTBILDER

Karten (zeitlich geordnet)

- Anonymus (o.a. ca. frühes 17. Jh.). „Grundlegung deren Tyrol an Germisch und Partenkärc h angrenzenden Confinien“. (© Bayerisches Hauptstaatsarchiv Plansammlung 10082)
- Anonymus (ca. 1730). Karte des Reintals (Historische Zugspitzkarte. (© Deutscher Alpenverein)
- Kinzl, H. (1974): Atlas Tyrolensis von Peter Anich und Blasius Hüber (1774). Faks.-Druck Innsbruck
- Blasius Hüber (1789). „Original-Mappa“. Grenzkarte zwischen Grafschaft Werdenfels und Tirol (Grenzakten 10/1a, lfd. Fasz. 13, © Tiroler Landesarchiv)
- Wepfer, J. (1803): „Situations Charte über die Churfürstl. Grafschaft WERDENFELS“ (© Bayerisches Hauptstaatsarchiv Plansammlung 5300)
- Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (1815): Uraufnahme Bayern SW3516-SW3518
- Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (1826): Positionsblatt 888 „Zugspitz“
- Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (1826): Positionsblatt 889 „Scharnitzspitz“
- Bayerisches Landesvermessungsamt (1990): Topographische Karte – Blatt 8532/8632 „Garmisch-Partenkirchen“ Maßstab 1:25000
- Bayerisches Landesvermessungsamt (1990): Topographische Karte – Blatt 8432 „Oberammergau“ Maßstab 1:25000

Luftbilder

- Bayerisches Landesvermessungsamt (1960). Panchromatische Luftbilder 104-116, 360-374, Maßstab 1:10000
- Bayerisches Landesvermessungsamt (1999). Panchromatische Luftbilder 104-109, Maßstab 1:15000

Orthophotos

- Bayerisches Landesvermessungsamt (1999). Digitale Orthophotos 02916-02918, 03015-03019, 03117, 03118, 03516-03519, 03616-03619
- Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (2003): Digitale Orthophotos 02916-02918, 03015-03019, 03117, 03118, 03416-03418, 03516-03519, 03616-03619, 4421500/5250000, 4421500/5251501, 4421500/5253002, 4423601/5250000, 4423601/5251501, 4423601/5253002, 4425702/5251501, 4425702/5253002
- Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation (2006): Digitale Orthophotos 4420000_5250000, 4420000_5252000, 4420000_5254000, 4422000_5250000, 4422000_5252000, 4422000_5254000, 4424000_5250000, 4424000_5252000, 4424000_5254000, 4426000_5250000, 4426000_5252000, 4426000_5254000, 4428000_5250000, 4428000_5252000, 4428000_5254000, 4430000_5250000, 4430000_5252000, 4430000_5254000, 4432000_5252000

Angaben zur Person

David Morche

geb. 23.11.1976 in Eilenburg

Abitur im Jahr 1995 am Elisabeth-Gymnasium Halle/Saale

Diplom in Geographie im Dezember 2002 mit Schwerpunkten Geomorphologie und Hydrologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geowissenschaften (MLU)

seit 2004 Anfertigung der Dissertation betreut durch Prof. Karl-Heinz Schmidt

Erklärungen

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt zu haben. Die den genutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Hiermit erkläre ich, mich an keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung um die Erlangung des Doktorgrades beworben zu haben.

Halle (Saale), den 1. April 2008



David Morche