

Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentspeichern und Sedimentflüssen – Konzeptionelle Ansätze und aktuelle Studien aus den Ostalpen

Jan-Christoph Otto & Lothar Schrott¹

Zusammenfassung

Mit den Komponenten des Sedimenthaushalts (Sedimentflüsse und Sedimentspeicher) kann die rezente, aber auch die vergangene Sedimentationsdynamik quantifiziert, und die Veränderungen der Dynamik als Reaktion auf Klima- und/oder Landnutzungsänderung erfasst werden. Als eine zentrale Herausforderung der Sedimenthaushaltsforschung kristallisiert sich immer mehr die Notwendigkeit heraus, kurze und lange Zeitskalen zu verknüpfen und somit die Information von Sedimentarchiven mit rezenten Messungen zu kombinieren. Dabei spielt die Quantifizierung von Sedimentspeichern und Sedimentflüssen die entscheidende Rolle. Dieser Aufsatz stellt den Forschungsansatz Sedimenthaushalt anhand von bedeutenden Arbeiten, angewandten Methoden und erzielten Erkenntnissen vor und bettet die in diesem Band enthaltenen Arbeiten aus den Ostalpen darin ein. Forschungsbedarf und Zukunftsperspektiven für Sedimenthaushaltsbilanzierungen werden angesprochen, die sich unter anderem aufgrund aktuell verändernder Umweltbedingungen ergeben können.

Einführung

Hochgebirge gehören zu den Räumen der Erde mit den höchsten Erosionsraten und dem größten Sedimentaustrag. Steiles Relief, große Höhenunterschiede und vor allem die Vergletscherungsgeschichte vieler Gebirge machen sie zu hochdynamischen Lebensräumen, die in vielfältiger Weise auf klimatische Einflüsse reagieren. Klimaforscher prognostizieren für Gebirgsräume, wie z.B. die Alpen einen stärkeren Anstieg der Temperatur, die Zunahme von Winterniederschlägen in Form von Regen, sowie eine Zunahme von sommerlichen Starkregenereignissen (BOGATAJ 2007, SEILER 2006). Diese klimatischen Veränderungen werden sich durch verstärkte geomorphologischer Aktivität in Gebirgsräumen bemerkbar machen und zu einer Zunahme von Erosionsprozessen und damit verbundenen Sedimentflüssen führen. Um abschätzen zu können, welche Auswirkungen die Veränderung der Sedimentdynamik auf die Lebensräume haben können, sind Untersuchungen zum alpinen Sedimenthaushalt eine unabdingbare Voraussetzung. Diese beinhalten die Erfassung, Lokalisierung und Quantifizierung von Sedimentquellen, Transportwegen und temporären Sedimentspeichern sowie deren Relationen im Konzept eines Sedimentkaskadensystems. Gerade die genaue Quantifizierung des Sedimentflusses und der Sedimentspeicherung stellt oft eine Herausforderung für Sedimenthaushaltsberechnungen dar (SLAYMAKER & SPENCER 1998). Der vorliegende Band stellt dazu verschiedene aktuelle Studien vor, die zum Verständnis der alpinen Sedimentkaskade beitragen. Mit Einbezug aktueller Erfassungsmethoden der Sedimenthaushaltsforschung (z.B. Laserscanning, geophysikalische Verfahren) werden rezente und postglaziale Erosionsraten ermittelt und Modelle der Landschaftsentwicklung diskutiert. Als eine zentrale Herausforderung der Sedimenthaushaltsforschung kristallisiert sich immer mehr die Notwendigkeit heraus, kurze und lange Zeitskalen zu verknüpfen und somit die Information von Sedimentarchiven mit rezenten Messungen

¹ Dr. Jan-Christoph OTTO (email: jan-christoph.otto@sbg.ac.at), Univ.-Prof. Dr. Lothar SCHROTT (email: lothar.schrott@sbg.ac.at), Fachbereich Geographie & Geologie der Universität Salzburg, Hellbrunnerstrasse 34, A-5020 Salzburg

zu kombinieren (SUMMERFIELD 2005, DIKAU 2006). Gleichzeitig müssen Erkenntnisse aus intensiv untersuchten, kleinräumigen Einzugsgebieten mit großen Räumen und sogar dem globalen Maßstab in Verbindung gebracht werden (Slaymaker et al., 2009). Bei Sedimenthaushaltsuntersuchungen zeigt sich diese raum-zeitlichen Trennung vor allem in der Art der quantifizierten Größen (Abb. 1): Während auf kurzen Zeitskalen ($< 10^1$ a) und in kleinen Untersuchungsgebieten ($< 10^1$ km²) rezente Erosions- und Depositionsraten gemessen werden können, erlaubt eine Vergrößerung der Raumskala häufig nur noch die Quantifizierung von Sedimentaustragsraten (*sediment yield*). Bei einer Vergrößerung der Zeitskala, ist der Einbezug von Sedimentspeichern oder Archiven notwendig. Dagegen ist die Quantifizierung der Sedimentspeicher oft nur auf relativ kleiner Raumskala ($< 10^2$ km²) möglich. Eine gleichzeitige quantitative Aussage über große Raum- und lange Zeitskalen fehlt bisher bzw. beruht häufig auf Schätzungen und qualitativen Erkenntnissen (OTTO et al. 2009).

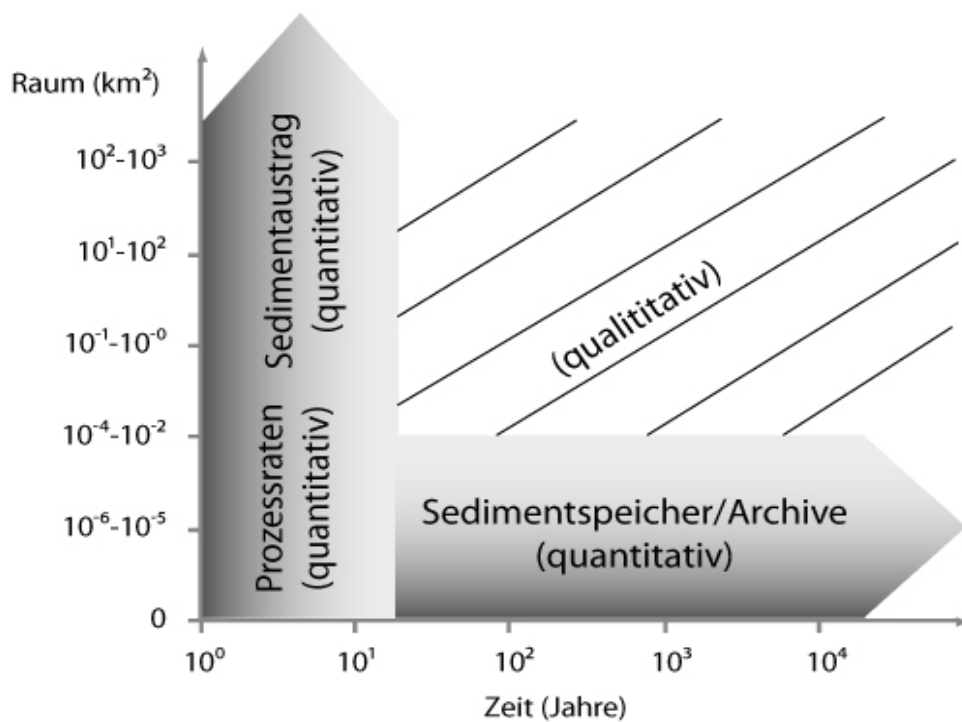


Abbildung 1: Relevante Raum- und Zeitskalen bei Untersuchungen zum Sedimentaustrag bzw. zu Sedimentspeichern

Aus diesen Ausführungen resultiert ein erheblicher Forschungsbedarf, der die Untersuchung von Sedimentspeichern und Sedimentkaskaden, d.h. gekoppelten Subsystemen zum Gegenstand haben sollte. Das Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen einzelnen geomorphologischen Systemkomponenten (Prozessgefüge) ist noch zu lückenhaft, die Verbindung zwischen Prozess und Form in vielen Bereichen unklar. In Anlehnung an SLAYMAKER (1991) wird innerhalb des mesoskaligen Kaskadensystems der Sedimentbudget-Ansatz als ein äußerst vielversprechendes und höchst integratives Mittel in der modernen Prozessgeomorphologie verstanden. Die vorliegenden Untersuchungen folgen diesem Forschungsansatz und sind eine konsequente Weiterentwicklung der innerhalb der IAG (International Association of Geomorphologists) diskutierten Forschungsstrategien und -perspektiven.

Bedeutende Arbeiten zum alpinen Sedimenthaushalt

Erste quantitative Bilanzierungen des Sedimenttransports in alpinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung von Sturz-, Kriech- und Fließprozessen gehen auf Heinrich JÄCKLI und Anders RAPP zurück (JÄCKLI 1957, RAPP 1960). Diese Studien zeigen bedeutende Zusammenhänge zwischen Einzugsgebietsgröße, Geomorphometrie und dominierenden Sedimenttransporttypen. Die frühen Arbeiten von CAINE (1974, 1976) verdeutlichten, dass das alpine Prozessgefüge in Bezug auf den Sedimenttransfer als ein Kaskadensystem mit räumlich und zeitlich variablen Steuerungsfaktoren, Aktivitätszuständen und Reaktionszeiten verstanden werden kann. Darauf aufbauend wurde von BARSCH & CAINE (1984) ein konzeptionelles Modell zur Differenzierung von Hochgebirgssystemen vorgestellt, das eine erste Vergleichbarkeit der Studien von JÄCKLI (1957), RAPP (1960) und CAINE (1976) anhand der vertikalen Sedimenttransporte zulässt. Die entscheidende Weiterentwicklung ist die Verwendung von bestimmten Sedimentsystemtypen (z.B. Grobsedimentsystem, geochemisches System), geomorphologischen Reliefeinheiten (z.B. Schwemmfächer, Talböden) und einheitlichen Maßeinheiten für Massentransportraten ($t/km^2/a$ bzw. $J/km^2/a$).

Die Disparität zwischen den vorherrschenden Reliefformen und gegenwärtig wirkenden Prozessen wird in alpinen Geosystemen besonders deutlich. Bei der Betrachtung des episodischen Verlaufes von Sedimentflüssen ist die Auswahl eines geeigneten „Zeitfensters“ ein zentrales Problem. Obwohl Daten kurzfristiger Messreihen nicht auf längere Zeiträume extrapoliert werden können, sind Speichervolumen und Verweilzeiten von Sedimenten bisher kaum untersucht worden (DIETRICH & DUNNE 1978, SCHROTT et al. 2003, OTTO et al. 2009).

Neben der zeitlichen Variabilität von Sedimenttransporten in alpinen Systemen bedarf es der Untersuchung räumlicher Variabilität. Die Untersuchungen von CAINE & SWANSON (1989) oder die Arbeiten im Rahmen des SEDAG Projektes (Sedimentkaskaden in alpinen Geosystemen) in nahezu gleichgroßen, jedoch unterschiedlich ausgestatteten Einzugsgebieten greifen diesen Aspekt auf und belegen die möglichen Differenzen von geomorphologischer Aktivität und deren Bedeutung in Bezug auf die Landschaftsentwicklung (HAAS submitted, HECKMANN et al. 2002).

Insbesondere in den Arbeiten von TRIMBLE (1981, 1999) wird die Bedeutung der Pufferkapazität eines Systems durch Sedimentspeicher deutlich. Mit Hilfe des Sedimentaustragsverhältnisses (*Sediment-Delivery-Ratio*), das sich als Quotient von Sedimentaustrag des Einzugsgebietes und Sedimentanlieferung zum Vorfluter berechnet, kann die Wirksamkeit interner Speicher und Umlagerungsprozesse quantitativ ausgedrückt werden (WALLING 1983, MARUTANI et al. 1999, WALLING 1999).

Eine immer noch offene Frage ist, inwieweit die Sedimentfrachten oberer Einzugsgebiete durch natürliche Prozesse, wie z.B. Erosion von wenig verfestigten glazigenen Sedimenten, oder durch verstärkte menschliche Aktivitäten (Rodung, Bau von Staudämmen) beeinflusst werden (SLAYMAKER & SPENCER 1998).

Gegenwärtig existieren nur wenige neuere Forschungsansätze, die die Geomorphodynamik gekoppelter alpiner Sedimenttransportsysteme zum Thema haben (CAINE & SWANSON 1989, JORDAN & SLAYMAKER 1991, SLAYMAKER et al. 2003, HECKMANN et al. 2007, CROSSART 2008, CROSSART & FORT 2008). HAEBERLI (1996) betont daher die notwendige Weiterentwicklung von quantitativen Modellen, mit deren Hilfe Subsysteme simuliert und die vorhandenen Messreihen zur Validierung herangezogen werden können. Die Entwicklung von Modellen, die heutige Prozesse mit Formen vergangener Prozesse verknüpfen, muss deshalb als eine Herausforderung für das 21. Jahrhundert angesehen werden (BARSCH 1993).

Die bisherigen Arbeiten zu alpinen Sedimenttransportsystemen belegen eindrücklich das Problem der Übertragbarkeit von Ergebnissen (u.a. JÄCKLI 1957, RAPP 1960, VORNDRAN 1977, DIETRICH & DUNNE 1978, CAINE 1986, CLARK 1987, CAINE & SWANSON 1989, JORDAN & SLAYMAKER 1991, SLAYMAKER 1993, TRUSTRUM et al. 2000).

Eine Quantifizierung von Volumina alpiner Sedimentspeicher basiert meist auf stark vereinfachten Annahmen und Geometrien. SHRODER et al. (1999) berechneten das Volumen (V) von Murkegeln mit Hilfe der Gleichung

$$V = A * h/3 \quad (1)$$

wobei sie die Fläche (A) und die Höhendifferenz (h) des Kegels mittels Luftbilder und digitalen Höhenmodellen bestimmten. Hierbei wurde ein flacher Talboden angenommen, der möglicherweise zu einer Überschätzung führt (Abb. 2 A/B). Auch in den Arbeiten von BALLANTYNE (1995) und CAMPBELL & CHURCH (2003) wurde von einer gleichmäßigen Untergrundstruktur von Sedimentspeichern wie Murkegeln oder Schutthalden ausgegangen. Ein anderer geometrischer Ansatz verwendet Parabelfunktionen zur Beschreibung idealisierte glazialer Trogtäler. Angepasst an die Neigung der Troghänge beschreibt die Parabel einen angenommenen Verlauf des Anstehenden an einem Talquerschnitt (Abb. 2 C). Mittels mehrerer paralleler Querprofile lässt sich im GIS ein Modell der Gesteinsoberfläche interpolieren, aus dem durch Abzug der Landoberfläche die Sedimentfüllung berechnet werden kann (HOFFMANN & Schrott 2003, SCHROTT et al. 2003, JABOYEDOFF & DERRON 2005, Otto et al. 2009). Eine Überprüfung der modellierten Trogoberfläche mittels geophysikalischer Methoden (Seismik, Geoelektrik) im Reintal, Bayrische Alpen, zeigt allerdings, dass dieser geometrische Ansatz das Sedimentvolumen deutlich überschätzen kann (SCHROTT et al. 2003).

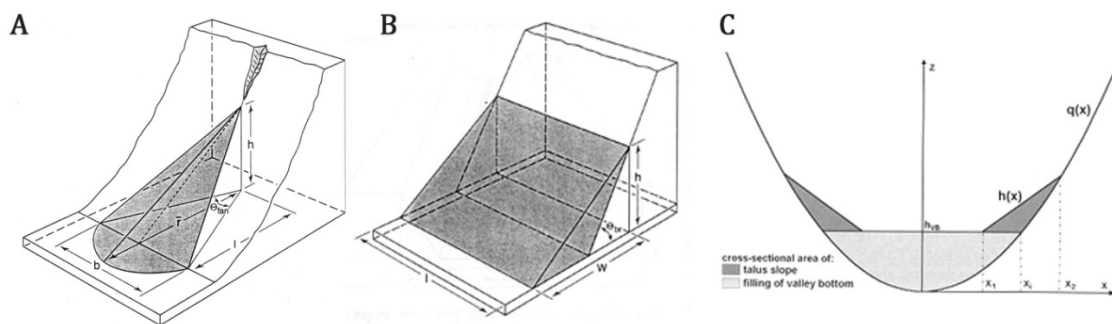


Abbildung 2: Anwendung geometrischer Modelle zur Abschätzung von Sedimentspeichern (verändert nach: Campbell and Church 2003 [A/B] und Hoffmann and Schrott 2003[C])

Geophysikalische Methoden liefern oft die genaueste Information zu Sedimentmächtigkeiten und dem Aufbau von Sedimentspeichern und werden bei der Quantifizierung von Sedimentvolumen besonders im Hochgebirge verstärkt eingesetzt (PFIFFNER et al. 1997, HINDERER 2001, SCHROTT und ADAMS 2002, SCHROTT und HOFFMANN 2002, SASS 2007). Eine Verknüpfung geophysikalischer Methoden mit Interpolationstechniken im GIS ermöglicht es auch in größeren Einzugsgebieten das Sedimentvolumen zu bestimmen. Die Arbeit von OTTO et al. (2009) zeigt dabei, dass vor allem in den Hängetälern große Sedimentvolumen gespeichert sein können, die aufgrund der Topographie des glazialen Reliefs vom Sedimentaustrag des Haupttals entkoppelt sind. Allerdings fehlt es größtenteils noch an Untersuchungen, die Sedimenthaushalt und Sedimentspeicherung im Gebirgsraum auf größerer räumlicher Skala analysieren und quantifizieren. Für einige große Alpentäler gibt es bereits Berechnungen des Sedimentvolumens im glazialen Trog. Diese basieren in der Regel auf geophysikalischen Untersuchungen und Bohrungen (HINDERER 2001). In Kombination mit Sedimentationsabfolgen aus angrenzenden Seen lassen sich daraus auch Denudations- und Austragsraten berechnen und Aussagen über die Sedimentationsdynamik der Trogtäler zwischen und nach den Eiszeiten treffen. Während hierzu in den Schweizer Alpen eine Vielzahl an Daten z.B. aus geophysikalischen Messungen vorliegt, sind in den Ostalpen bisher nur Daten aus dem Inn-Einzugsgebiet, der Tiroler Ache und dem Saalacheinzugsgebiet ermittelt (HINDERER 2001). Bohrungen und Messungen seismischer Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den ostalpinen Tälern

zeigen eine komplexe Stratigraphie an, bei der die spät-würmzeitlichen und postglazialen Sedimente unterlagert werden von älteren, zwischeneiszeitlichen Ablagerungen (HINDERER 2001, BADER 1981).

Zum Verhältnis von mechanischer zu chemischer Denudation in alpinen Einzugsgebieten liegen nur vereinzelt Daten vor. EINSELE & HINDERER (1997) berechneten - basierend auf Sedimentfrachten und Seesedimentation - Verhältnisse von kleiner 1 für die nördlichen Kalkalpen und Verhältniswerte zwischen 2 und 6 für die kristallinen Gebiete. Darin äußert sich der deutliche Einfluss der Lithologie auf chemische Denudationsraten. Im Gegensatz dazu wird die mechanische Denudation stärker von Reliefunterschieden beeinflusst, was sich in einer Zunahme von mechanischen Denudationsraten vom Vorland zum inneralpinen Gebieten ausdrückt (SCHLUNEGGER & HINDERER 2003).

In den Ostalpen gehören die Arbeiten von HÖLLERMANN (1964), VORNDRAN (1973, 1977, 1985), HÖFNER (1985) sowie STINGL & VEIT (1988) und zu den ersten Untersuchungen, in denen Sedimenttransport und Massenbilanzen quantifiziert wurden. Eines der besonders intensiv untersuchten Gebiete in den Ostalpen ist das Reintal im Wettersteingebirge (Bayrische Alpen). Hier wurden sowohl Prozessraten, als auch Massenbilanzen und Speichervolumina ermittelt (u.a. Schrott et al. 2003, SCHROTT et al. 2006, HECKMANN et al. 2008, KRAUTBLATTER & MOSER 2009). Die Untersuchungen zeigen unter anderem, dass der Sedimenttransfer in alpinen Gebieten von großer raum- und zeitlicher Variabilität gekennzeichnet ist und hochaktive Bereiche in unmittelbarer Nachbarschaft zu inaktiven Arealen vorliegen können. Ein Vergleich aktuell gemessener Prozessraten mit Sedimentationsraten berechnet aus Sedimentvolumen zeigt, dass Umlagerungsprozesse und ein Abbau existierender Sedimentspeicher, vor allem von Schutthalden, den Sedimenthaushalt dominieren (SCHROTT et al. 2006).

Modelle zum paraglazialen Konzept und deren Bedeutung für die Reliefentwicklung

Die Frage der Anpassungszeit von Systemen wurde von CHURCH & SLAYMAKER (1989) beispielhaft anhand eines vergletscherten Einzugsgebietes in Kanada (British Columbia) aufgezeigt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der heutige fluviale Sedimentaustrag immer noch auf Substraten basiert, die durch die pleistozäne Vergletscherung erklärt werden. Sie bestätigen damit den theoretischen Ansatz des "paraglacial sedimentation cycle" (CHURCH & RYDER 1972) und beschreiben "non-glacial processes that are directly conditioned by glaciation" (CHURCH & RYDER 1972, p. 3059). Die ursprüngliche Definition hat im Laufe von drei Jahrzehnten eine wesentlich breitere Anwendung erfahren und ist vom ursprünglichen prozessualen Aspekt auf paraglaziale Landformen sowie paraglaziale Zeiten und Systeme ausgeweitet worden (CHURCH & SLAYMAKER 1989, JORDAN and SLAYMAKER 1991, CRUDEN & HU 1993, HARBOR & WARBURTON 1993, BALLANTYNE 2000, 2002).

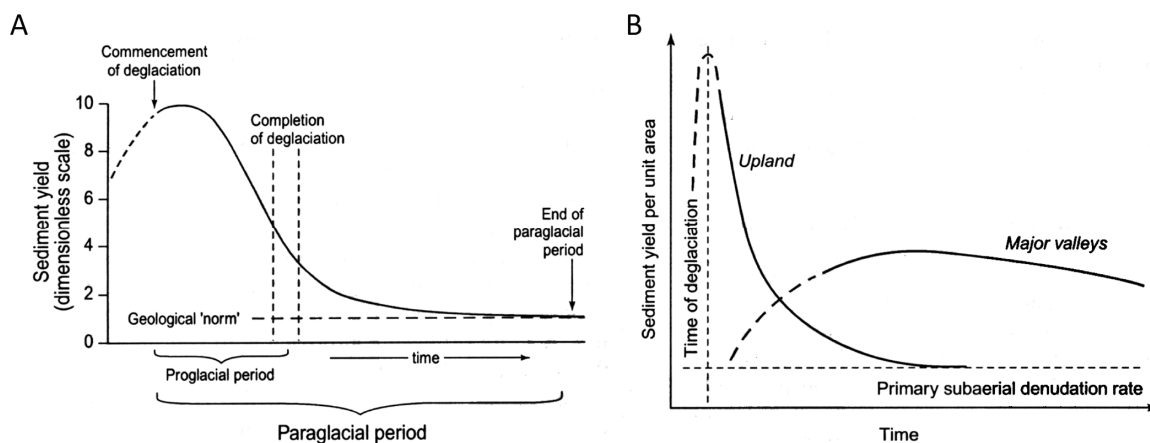


Abbildung 3: Modelle des paraglazialen Sedimentaustrags nach CHURCH & RYDER 1972 (A) und CHURCH & SLAYMAKER 1989 (B)

Das paraglaziale Konzept geht auf die Arbeiten von RYDER (1971a,b) und CHURCH & RYDER (1972) zurück (Abb.3 A). Mit diesem Konzept wurde versucht, die stark abweichenden Resultate der Sedimentfrachten von zwei unterschiedlich ausgestatteten Einzugsgebieten in Kanada in Bezug auf rezente bzw. pleistozäne Vergletscherung in ein Sedimentaustrags-Modell (*paraglacial sediment yield*) zu integrieren. Basierend auf diesen Untersuchungen wurde ein Modell zur paraglazialen Sedimentation während des Spät- und Postglazials (sogenannter paraglazialer Zeitraum) entwickelt, dass in den nachfolgenden drei Jahrzehnten immer wieder zur Erklärung räumlicher und zeitlicher Veränderung von Sedimentfrachten verwendet wurde.

Interessanterweise weicht das originäre Konzept des paraglazialen Sedimentaustrags nach CHURCH & RYDER (1972) in einigen Punkten von dem nachfolgend mehrfach publizierten Modell nach CHURCH & SLAYMAKER (1989) ab (Abb. 3 B). Im ursprünglichen Modell sinkt der Sedimentaustrag um rund 60-70% vom Beginn bis zur Beendigung der Vereisung, wogegen im Konzept von CHURCH & SLAYMAKER (1989) ein Rückgang der Sedimentfracht erst nach Beendigung der Vereisung einsetzt.

Dieser beachtliche Unterschied im zeitlichen Verlauf des Sedimentaustrags nach dem Hochglazial, hat bedeutende Implikationen auf die Interpretation paraglazialer Sedimentation und auf die Modellentwicklung. In der Literatur wurde dieser Unterschied der Modelle bisher nicht diskutiert. Die entscheidende Erweiterung in dem „*paraglacial sedimentation cycle*“ Modell nach CHURCH & SLAYMAKER (1989), wird durch die Kombination von hochgelegenen kleinen Einzugsgebieten und großen Flusssystemen über den Zeitraum des Holozäns deutlich. CHURCH & SLAYMAKER (1989) machten damit auf den anhaltenden paraglazialen (Re-)Sedimentationseffekt bei Flüssen aufmerksam, bei gleichzeitig sehr geringen Sedimentausträgen oberer Flusseinzugsgebiete. Das generalisierte Modell wiederum beruht auf inhomogenen Datensätzen zu Sedimentausträgen einer großen Anzahl von Flüssen in British Columbia/Kanada (CHURCH & SLAYMAKER 1989). Trotz der Unsicherheiten und Fehlergrößen (unterschiedliche Zeiträume, gestörte Einzugsgebiete durch Reservoirs und Dämme etc.) zeigt sich eine Zunahme von Sedimentausträgen bei zunehmender Einzugsgebietsgröße. Dieser Befund widerspricht den Untersuchungen von MILLIMAN & SYVITZKI (1992), die für 7 topographisch differenzierte Flusssystem-Kategorien (u.a. Hochgebirge, Flachland, Küsten) eine positive Korrelation ($r^2 = 0.7-0.89$) zwischen abnehmendem Sedimentaustrag und zunehmender Einzugsgebietsgröße feststellten. Diese Ergebnisse stimmen wiederum mit den Arbeiten von WALLING (1983, 1999) überein, der die Abnahme an Sedimentausträgen bei zunehmender Einzugsgebietesgröße auf die erhöhte Pufferungskapazität zurückführt (WALLING 1999).

Bislang liegen für die Alpen nur sehr vereinzelt Untersuchungen vor, die das paraglaziale Konzept überprüfen (MÜLLER 1999, SURIAN & PELLEGRINI 2000, SCHROTT et al. 2007, COSSART and FORT 2008). Sie deuten jedoch darauf hin, dass die Sedimentationsraten während des Spätglazials um ein bis zwei Magnituden höher waren als im gesamten Holozän. Eine Einordnung und Bewertung des Sedimenttransfers und der Sedimentspeicher in Bezug auf das „paraglaziale Konzept“ erscheint daher sinnvoll, um die regional begrenzten Untersuchungen in einen übergeordneten Kontext zu stellen. Die Beiträge von GÖTZ et al. (2010) und SASS (2010) in diesem Band schließen hier eine wichtige Lücke und können das paraglaziale Modell an Hand der gemessenen rezenten und rekonstruierten postglazialen Prozessraten zum Teil bestätigen.

Aktuelle Beiträge zum Sedimenthaushalt in den Ostalpen

Die Auswahl der Beiträge dieses Bandes konzentriert sich auf das Gebiet der Ostalpen mit besonderem Schwerpunkt in den Österreichischen und Bayerischen Alpen (Abb. 4). Zwei inhaltliche Schwerpunkte in den Arbeiten lassen sich ausmachen: Zum einen werden aktuelle und postglaziale Prozessraten mit unterschiedlichen Methoden ermittelt, zum anderen werden Sedimentspeicher quantifiziert und Sedimentarchive genutzt, um Modelle der Landschaftsentwicklung zu generieren oder zu überprüfen. Archivforschung im Rahmen des alpinen Sedimenthaushalts wird vor allem über die Quantifizierung und Charakterisierung der Sedimentspeicher geleistet. Hierbei spielen

geophysikalische Methoden zur Untersuchung des Untergrundes eine entscheidende Rolle, da aufgrund von erschwelter Zugänglichkeit und teilweise grobklastischer Materialkomposition des Untergrundes Bohrungen im Hochgebirge eher eine Ausnahme sind. Eine zusammenfassende Darstellung über die Verwendung geophysikalischer Techniken zur Untersuchung alpiner Schutthalden gibt der Beitrag von SASS (2010). Weitere wichtige Erkenntnisse zur vergangenen Morphodynamik lassen sich anhand der Analyse und Datierung von fossilen Bodenhorizonten gewinnen. Der Beitrag STINGL et al. (2010) dokumentiert die holozäne Landschaftsentwicklung in der periglazialen Höhenstufe am Beispiel von Solifluktionerscheinungen im Untersuchungsgebiet Glorer Hütte, Hohe Tauern. Fossile organische Bodenhorizonte, die durch die periglaziale Kriechbewegung überfahren wurden und in Form von Solifluktionsloben erhalten sind zeugen von unterschiedlichen Aktivitätsphasen und damit verbundenen holozänen Klimaänderungen im Alpenraum. Auch die Beiträge von SASS (2010) sowie KRAUTBLATTER & MOSER (2010) verknüpfen Sedimentarchive mit Klimainformationen zur Erklärung der Morphodynamik und des Aufbaus von Schutthalden. Basierend auf geophysikalischen Untersuchungen entwirft SASS (2010) ein Modell der zeitlichen Variabilität der Schutthaldenbildung ohne Materialabfuhr seit dem späten Pleistozän. Dargestellt werden Erosions- und Sedimentationsphasen in Abhängigkeit der Temperatur sowie der Verbreitung von Gletschern und Permafrost. Zeiträume verstärkter Umlagerung korrelieren hier mit Wärmeperioden, während Kälteperioden auf Grund verstärkter Frostwechsel und Permafrostbedingungen mit Speicheraufbau in Verbindung gebracht werden. KRAUTBLATTER & MOSER (2010) entwerfen ein qualitatives Modell zur Bildung von stratifizierten Schutthalden am Beispiel einer Halde im Reintal, Bayrische Alpen, Deutschland. Dem Modell liegen sedimentologische Analysen des Schutthaldenkörpers zu Grunde, deren Ergebnisse mit aktuellen Steinschlagmessungen korreliert werden.

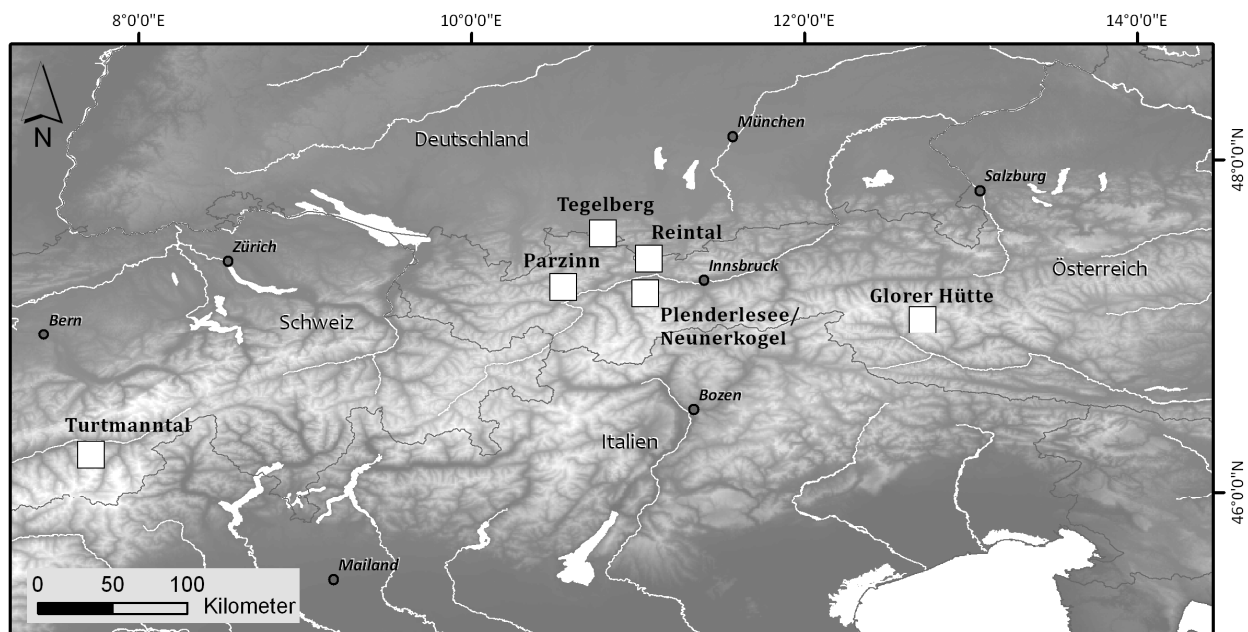


Abbildung 4: Untersuchungsgebiete der Forschungsarbeiten im vorliegenden Band

Kurzfristige Erosionsraten können durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Feldmethoden erhoben werden. Exemplarisch werden hier Quantifizierungsmethoden aus dem gravitativen, fluvialen und periglazialen Prozessbereich vorgestellt. Dazu zählt die tachymetrische Vermessung von Messmarken zur Bestimmung periglazialer Kriechraten (STINGL et al. 2010), die Quantifizierung von Steinschlagereignissen mittels Auffangnetzen (KRAUTBLATTER & MOSER 2010) und die Messung von Lösungsfrachten (MORCHE 2010). Rezente Formveränderungen lassen sich auch mit Hilfe hochauflösender, digitaler Höhenmodelle sowie multitemporalen Orthofotos im GIS quantifizieren. Eine GIS-gestützte Quantifizierung der Erosions- und Depositionsdynamik in einem hochalpinen Tal

präsentiert die Arbeit von GÖTZ et al. (2010). In einem ergänzenden Teil wird in dieser Arbeit auch eine Möglichkeit der Inwertsetzung geomorphologischer Forschung diskutiert.

Forschungsbedarf und Zukunftsperspektiven

Da gesamtalpin durch das starke Abschmelzen der Gletscher seit 1850 eine Fläche von rund 3000km² eisfrei geworden ist, hat sich die Sediment- und Abflussdynamik im Gletschervorfeld stark verändert. Die intensiven Abschmelzvorgänge bewirken zunächst eine Erhöhung der Abflussspitzen mit ausgeprägten Erosions- und Sedimentationsprozessen. Mittelfristig wird es jedoch aufgrund der stark dezimierten Gletscherflächen zu einer Abnahme der Abflussmengen kommen. In flacheren Abschnitten wird dies zu einer vermehrten Sedimentation führen. Im Extremfall werden große Sanderflächen gebildet, wie das Beispiel des Sandersees im Gletschervorfeld der Pasterze belegt. Das Abschmelzen der Gletscher hat die Freilegung von Fels- und Schuttareale zur Folge. Dadurch werden neue Sedimentquellen in den oberen Bereichen der Einzugsgebiete geschaffen. In Abhängigkeit der Untergrundbedingungen, z.B. der Neubildung von Permafrost, oder von Druckentlastungsbewegungen im Fels, ist hier mit stark veränderten Verwitterungs- und Erosionsraten zu rechnen.

Die Bildung von Seen in Gletschervorfeldern und Gletscherzungen ist ein weiteres Phänomen, das im Zuge des Gletscherverlustes in den Alpen beobachtet wird (WERDER et al. 2010). In der historischen Vergangenheit haben sich immer wieder katastrophale Ausbrüche von Gletscherseen ereignet, wie zum Beispiel am Vernagtferner (AT) (NICOLUSSI 1990), Belvederegletscher (I) (KÄÄB et al. 2004) oder Grubengletscher (CH) (HAEBERLI et al. 2001). Solche Ausbrüche stellen neben einer Naturgefahr für die Bergbewohner, extreme Erosions- und Sedimentationsereignisse dar, die große Sedimentmengen aus den Gletschervorfeldern und oberen Einzugsgebieten in die Täler verfrachten können. Die enormen Wassermengen modifizieren zusätzlich betroffene Wildbach- und Gerinneabschnitte und können zu einer Remobilisierung von Sediment und zur Bildung von Murgängen führen.

Mit zunehmenden Temperaturen im Alpenraum verändern sich in den höchsten Bereichen des Gebirges die Permafrostbedingungen mit gravierenden Auswirkungen auf die Fels- und Schuttstabilität. Die Degradation des Permafrostes in Felsbereichen führt zu einer Zunahme von gravitativen Massenbewegungen (Steinschlag/Felssturz), wie sich in den Hitzesommern 2003 und 2005 vielerorts gezeigt hat (GRUBER & HAEBERLI 2007). In hochalpinen Lockersedimenten, wie Schutthalden oder Moränen, führt ein Ausschmelzen des Bodeneises zur Destabilisierung und erhöht die Anfälligkeit für die Entstehung von Murgängen bei Starkniederschlagsereignissen (KNEISEL ET AL. 2007). Aktuelle Klimaprognosen gehen auf Grund von Temperaturzunahme und der damit verbundenen erhöhten Aufnahme von Wasser in die Atmosphäre von einer Zunahme extremer Wetterereignisse (z.B. Starkniederschläge) aus. Somit ist mit einer verstärkten Verlagerung von post- und paraglazialen Sedimenten aus den oberen Einzugsgebieten zu rechnen. Diese Zunahme der Aktivität in den oberen Einzugsgebieten gilt je nach Tempo der Permafrostdegradation und Ausmaß der Permafrostverbreitung für eine begrenzte Zeit, bis entweder die auftauenden Sedimentspeicher geleert sind, oder eine Stabilisierung der Fels- und Schuttbereiche z.B. durch Entlastung der sturzgefährdeten Bereiche oder durch erneute Vegetationsansiedlung erreicht wird.

Forschungsbedarf besteht daher weiterhin bei der genauen Quantifizierung der Permafrostverbreitung, der Analyse und Quantifizierung von Sedimentspeichern und deren interne Systemzustände (Eisgehalt, Erosionsanfälligkeit, Reliefposition). Neben den lokalen Studien einzelner Formkomplexe besteht weiterhin die Herausforderung größere Einzugsgebiete zu untersuchen und mit Sedimenthaushaltsansätzen zu bilanzieren (OTTO ET AL. 2009). Diesem Fragenkomplex widmen sich derzeit mehrere Forschergruppen im TOPOEUROPE Programm der European Science Foundation (ESF).

Literatur

- BADER, K. (1981): Die glazialen Übertiefungen im Saalachgletscher-Gebiet zwischen Inzell und Königssee. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 31,37-52.
- BALLANTYNE, C.K. (1995): Paraglacial debris cone formation on recently deglaciated terrain. *Holocene*, 5, 25-33.
- BALLANTYNE, C.K. (2000): Paraglacial adjustment of rock slopes: causes and consequences. *Indian Journal of Geography and Environment*, 5, 1-22.
- BALLANTYNE, C. K. (2002): A general model of paraglacial landscape response. *Holocene*, 12, 371-376.
- BALLANTYNE, C. K. (2003): Paraglacial landform succession and sediment storage in deglaciated mountain valleys: theory and approaches to calibration. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.132*, 1-18.
- BARSCHE, D. (1993): Periglacial geomorphology in the 21st century. *Geomorphology*, 7, 141-163.
- BARSCHE, D. & N.T. CAINE (1984): The nature of mountain geomorphology. *Mountain Research and Development*, 4 (4), 287-298.
- BOGATAJ, L. K. (2007): How will the Alps respond to climate change? Szenarios for the future of Alpine water. In: PSENNER, R. & R. LACKNER (Eds.): *The Water Balance of the Alps - What do we need to protect the water resources of the Alps?* 28-29 September 2006, Innsbruck University, Innsbruck University Press. 43-51.
- CAINE, N. (1974): The geomorphic processes of the alpine environment. In: IVES, J.D. & R.G. BARRY (Eds.): *Arctic and alpine Environments*. London, Methuen, London, 721-748.
- CAINE, N. (1976): A uniform measure of subaerial erosion. *Geological Soc. Am. Bull.*, 87 (1), 137-140.
- CAINE, N. (1986): Sediment movement and storage on alpine slopes in the Colorado Rocky Mountains. In: ABRAHAMS, A.D. (Ed.): (Eds.): *Hillslope processes*. London, Allan & Unwin. Unwin, 115-137.
- CAINE, N. & F.J. SWANSON (1989): Geomorphic coupling of hillslope and channel systems in two small mountain basins. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 33 (2), 189-203.
- CAMPBELL, D & M. CHURCH (2003): Reconnaissance sediment budgets for Lynn Valley, British Columbia: Holocene and contemporary time scales. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 40 (5), 701-713.
- CHURCH, M. & J.M. RYDER (1972): Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 3059-3071.
- CHURCH, M. & O. SLAYMAKER (1989): Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia. *Nature*, 337, 452-454.
- CLARK, M. J. (1987): The alpine sediment system: a context for glacio-fluvial processes. In: GURNELL, A. M. & M. J. CLARK (Eds.): *Glacio-fluvial sediment transfers - An alpine perspective*. Chichester, New York, John Wiley & Sons Ltd., 9-31.
- COSSART, E., 2008. Landform connectivity and waves of negative feedbacks during the paraglacial period, a case study: the Tabuc subcatchment since the end of the Little Ice Age (massif des Ecrins, France). *Geomorphologie-Relief Processus Environnement* (4): 249-260.

- COSSART, E. & M. FORT (2008): Sediment release and storage in early deglaciated areas: Towards an application of the exhaustion model from the case of Massif des Ecrins (French Alps) since the Little Ice Age. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 62, 115-131.
- CRUDEN, D. M. & X.Q. HU (1993): Exhaustion and steady state models for predicting landslide hazards in the Canadian Rocky Mountains. *Geomorphology*, 8, 279-285.
- DIETRICH, W.E. & T. DUNNE (1978): Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.29*, 191-206.
- DIKAU, R. (2006): Oberflächenprozesse - ein altes oder ein neues Thema? *Geographica Helvetica*, 61, 170-180.
- EINSELE, G. & M. HINDERER (1997): Terrestrial sediment yield and the lifetimes of reservoirs, lakes, and larger basins. *Geologische Rundschau*, 86, 288-310.
- GÖTZ, J., GEILHAUSEN, M. & L. SCHROTT (2010): Rezente Sedimentflüsse in einem postglazialen Kontext und innovative Strategien zur Inwertsetzung geomorphologischer Forschungsergebnisse (Reintal, Bayerische Alpen). In: OTTO, J.C. & L. SCHROTT (Hrsg.): Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentflüssen in den Ostalpen. *Salzburger Geographische Arbeiten*. Bd. 46, S. 43-63.
- GRUBER, S. & W. HAEBERLI (2007): Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*. 112, F02S18.
- HAAS, F., HECKMANN, T., WICHMANN, V. & M. BECHT (submitted): Quantification and Modeling of Bedload Discharge from Hillslope Channels in two Alpine Catchments. *Z. f. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd.*
- HAEBERLI, W. (1996): On the morphodynamics of ice/debris-transport systems in cold mountain areas. - *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 50, 3-9.
- HAEBERLI, W., KÄÄB, A., VONDERMÜHLL, D., & P. TEYSSEIRE (2001). Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Grubengletscher, Valais, Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 47(156):111–122.
- HARBOR, J. & J. WARBURTON (1993): Relative Rates of Glacial and Nonglacial Erosion in Alpine Environments. *Arctic and Alpine Research*, 25, 1-7.
- HECKMANN, T., WICHMANN, V. & M. BECHT (2002): Quantifying sediment transport by avalanches in the Bavarian Alps - first results. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.127*, 137-152.
- HECKMANN, T., HAAS, F., WICHMANN, V. & D. MORCHE (2008): Sediment Budget and Morphodynamics of an Alpine Talus Cone on Different Timescales. *Z. f. Geomorph. N. F. Suppl.- Bd.* 52 (1), 103-121.
- HINDERER, M., (2001): Late Quaternary denudation of the Alps, valley and lake fillings and modern river loads. - *Geodinamica Acta*, 14 (4), 231-263.
- HOFFMANN, T. & L. SCHROTT (2003): Determining sediment thickness of talus slopes and valley fill deposits using seismic refraction – a comparison of 2D interpretation tools. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.132*, 71-87.
- HÖFNER, T. (1995): Fluvial Dynamics in the periglacial belt of the Central Austrian Alps *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.100*: 159 – 166.
- HÖFNER, T. (1993): Fluvialer Sedimenttransfer in der periglazialen Höhenstufe der Zentralalpen, südliche Hohe Tauern, Osttirol. *Bamberger Geogr. Schr.* 13, 121 S.

- HÖLLERMANN, P. (1964): Rezente Verwitterung, Abtragung und Formenschatz der Zentralalpen am Beispiel des oberen Suldentales (Ortlergruppe/ Südtirol). *Z. f. Geomorph. N. F. Suppl.- Bd. 4*, 257 S.
- JABOYEDOFF M. & M.H. DERRON (2005): A new method to estimate the infilling of alluvial sediment of glacial valleys using a sloping local base level. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 28, 37-46.
- JÄCKLI, H. (1957): Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes. Beiträge zur Geologie der- *Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie*, 36. 136 S.
- JORDAN, P. & O. SLAYMAKER (1991): Holocene sediment production in Lillooet river basin, British Columbia: a sediment budget approach. *Géographie Physique et Quaternaire*, 45, 45-57.
- KÄÄB, A., HUGGEL, C., BARBERO, S., CHIARLE, M., CORDOLA, M., EPIFANI, F., HAEBERLI, W., MORTARA, G., SEMINO, P., TAMBURINI, A. & G. VIAZZO (2004): Glacier hazards at Belvedere Glacier and the Monte Rosa east face, Italian Alps: processes and mitigation. *Internationales Symposium Interpraevent 2004 - Riva/Trient*, 67-78.
- KNEISEL, C., ROTHENBUHLER, C., KELLER, F. & W. HAEBERLI 2007. Hazard assessment of potential periglacial debris flows based on GIS-based spatial modelling and geophysical field surveys: A case study in the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18: 259-268.
- KRAUTBLATTER, M & M. MOSER (2009): A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 (4), 1425-1432.
- KRAUTBLATTER, M. & M. MOSER (2010): Climate-driven scree stratification in Alpine talus slopes? - A new model developed in the Reintal, German Alps. In: OTTO, J.C, & L. SCHROTT, L. (Hrsg.): Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentflüssen in den Ostalpen. *Salzburger Geographische Arbeiten*. Bd. 46, S. 65-81.
- MARUTANI, T., KASAI, M., REID, L.M. & N. A. TRUSTRUM (1999): Influence of storm-related sediment storage on the sediment delivery from tributary catchments in the upper Waipaoa River, New Zealand. - *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 (10), 881-896.
- MILLIMAN, J.D. & P.M. SYVITSKI (1992): Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean. The importance of small mountainous rivers. - *The Journal of Geology*, 100, 525-544.
- MORCHE, D. (2010): Die fluviale Lösungsfracht und ihr Beitrag zur geomorphologischen Formung in einem kalkalpinen Hochgebirgstal. In: OTTO, J.C, & L. SCHROTT, L. (Hrsg.): Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentflüssen in den Ostalpen. *Salzburger Geographische Arbeiten*. Bd. 46, S. 95-112.
- MÜLLER, B. U. (1999): Paraglacial sedimentation and denudation processes in an Alpine valley of Switzerland. An approach to the quantification of sediment budgets. - *Geodinamica Acta*, 12 (5), 291-301.
- NICOLUSSI, K. (1990): Bilddokumente zur Geschichte des Vernagtferners im 17. Jahrhundert. *Zeitschrift f. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 26(2), 97-119.
- OTTO J.-C., GOETZ, J. & L. SCHROTT (2008): Sediment storage in alpine sedimentary systems – quantification and scaling issues. In: *Sediment Dynamics in Changing Environments* (Proceedings of a symposium held in Christchurch, New Zealand, December 2008). IAHS Publ. 325, 258 - 265.

- OTTO, J. C., SCHROTT, L., JABOYEDOFF, M. & R. DIKAU (2009): Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland). *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1726-1742.
- PIFFNER, O.A., HEITZMANN, P., LEHNER, P., FREI, W., PUGIN, A. & M. FELBER (1997): Incision and backfalling of Alpine valleys. Pliocene, Pleistocene and Holocene processes. In: PFIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, St. & A. STECK (Eds.): (Hrsg.): *Deep structure of the Swiss Alps*. Results of NRP 20, Kap. 21. Basel: Birkhäuser Verlag, 265-288.
- RAPP, A. (1960): Recent development of mountain slopes in Kaerkevagge and surroundings, Northern Scandinavia. - *Geografiska Annaler*, 42 (2-3). 200 S.(2-3), 200pp.
- RYDER, J.M. (1971a): The stratigraphy and morphology of paraglacial alluvial fans in south central British Columbia. - *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 279-298.
- RYDER, J.M. (1971b): Some aspects of the morphometry of paraglacial alluvial fans in Southcentral British Columbia. - *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 1252-1264.
- SCHLUNEGGER, F. & M. HINDERER (2003): Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps. *Terra Nova*, 15, 88-95.
- SASS, O. (2007): Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, 62 (3), 254-269.
- SASS, O. (2010): Geophysikalische Untersuchung von alpinen Hangsedimenten und Rückschlüsse auf Prozessraten. In: OTTO, J.C. & L. SCHROTT (Hrsg.): Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentflüssen in den Ostalpen. *Salzburger Geographische Arbeiten*. Bd. 46. S. 83-94.
- SCHROTT, L. & T. ADAMS (2002): Quantifying sediment storage and denudation in an Alpine basin, Dolomites, Italy. *Z. f. Geomorph.- Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd.* 128, 129-145.
- SCHROTT, L. & T. HOFFMANN (2002): Modelling sediment thickness and rockwall retreat in an Alpine valley using 2D-seismic refraction (Reintal, Bavarian Alps). *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.* 127, 153-173.
- SCHROTT, L., L., HUFSCHEIDT, G., G., HANKAMMER, M., M., HOFFMANN, T. & R. DIKAU (2003): Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an Alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. - *Geomorphology*, 55, 45-63.
- SCHROTT, L., GÖTZ, J., GEILHAUSEN, M. & D. MORCHE (2006): Spatial and temporal variability of sediment transfer and storage in an Alpine basin (Bavarian Alps, Germany). *Geographica Helvetica*, 3, 191-201.
- SCHROTT, L., DIKAU, R., HOUBE, P. & T. HOFFMANN (2007): Der Sedimenthaushalt geomorphologischer Systeme seit Beginn des menschlichen Einflusses. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.* 148, 32-40.
- SEILER, W. (2006): Der Klimawandel im Alpenraum: Trends, Auswirkungen und Herausforderungen. In: *Klimawandel im Alpenraum - Auswirkungen und Herausforderungen*. Wien, Lebensministerium - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 7-20.
- SLAYMAKER, O. (1991): Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programs. - *Catena* 18, 427-437.
- SLAYMAKER, O. (1993): The sediment budget of the Lillooet River Basins, British Columbia. - *Physical Geography*, 14 (3), 304-320.

- SLAYMAKER, O. & T. SPENCER (1998): *Physical Geography and Global and Environmental change*. Essex: Addison Wesley Longman. 292 pp.
- SLAYMAKER, O., SPENCER, T. & S. DADSON (2009): Landscape and landscape-scale processes as unfilled niche in the global environmental change debate: an introduction. In: SLAYMAKER, O., SPENCER, T. & C. EMBLETON-HAMANN (Eds.): *Geomorphology and Global Environmental Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 1-36.
- STINGL, H. & H. VEIT (1988): Fluviale und solifluidale Morphodynamik des Spät- und Postglazials in den Südlichen Hohen Tauern im Raum um Kals/ Osttirol. In: HÜSER, K. & H. STINGL, H. (Hrsg.): *Exkursionsführer Osttirol – Dolomiten*. Dt. AK f. Geomorph., 15. Tagung in Bayreuth 1988. 1988, Exkursionsführer Osttirol – Dolomiten: 5 - 69.
- STINGL, H., GARLEFF, K., HÖFNER, T., HUWE, B., JAESCHE, P., JOHN, B. & H. VEIT (2010): Grundfragen des alpinen Periglazials - Ergebnisse, Probleme und Perspektiven periglazialmorphologischer Untersuchungen im Langzeitprojekt „Glorer Hütte“ in der Südlichen Glockner-/ Nördlichen Schobergruppe (Südliche Hohe Tauern, Osttirol). In: OTTO, J.C. & L. SCHROTT, L. (Hrsg.): Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentflüssen in den Ostalpen. *Salzburger Geographische Arbeiten*. Bd. 46, 15-42.
- SUMMERFIELD, M.A. (2005): A tale of two scales, or the two geomorphologies. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 30, 402-415.
- SURIAN, N. & G.B. PELLEGRINI (2000): Paraglacial sedimentation in the Piave valley (Eastern Alps, Italy): An example of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 23, 87-92.
- TRIMBLE, S.W. (1981): Changes in Sediment Storage in the Croon Creek Basin, Driftless Area, Wisconsin, 1853 to 1975. - *Science*, 214, 181-183.
- TRIMBLE, S.W. (1999): Decreased Rates of Alluvial Sediment Storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975-1993. - *Science*, 285, 1244-1246.
- TRUSTRUM, N.A., GOMEZ, B., PAGE, M.J., REID, L.M. & D.M. HICKS (1999): Sediment production and output: The relative role of large magnitude events in steepland catchments. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.* 115, 71-86.
- VORNDRAN, G. (1973): Abtrag und Sedimentation im Bereich der Hauptwasserscheide am Toblacher Feld (Pustertal). *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München*, 58, 53-68.
- VORNDRAN, G. (1977): Hangabtragsbilanzen. *Z. f. Geomorph. Suppl.-Bd.* 28, 124-133.
- VORNDRAN, G. (1985): Abtrag und Abtragsraten mit Beispielen aus den Alpen und dem Schwäbisch-baierischen Alpenvorland. *Regensburger Geographische Schriften*, 19/20, 93-118.
- WALLING D.E. (1983): The sediment delivery problem. - *Journal of Hydrology*, 65, 209-237.
- WALLING, D.E. (1999): Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. - *Hydrobiologia*, 410, 223-240.
- WERDER, M. A., BAUDER, A., FUNK, M. & H.R. KEUSEN, (2010): Hazard assessment investigations in connection with the formation of a lake on the tongue of Unterer Grindelwaldgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 227-237.

