

# Die Erdoberfläche

*Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen*



**Beiträge der Geomorphologie zur Erforschung des Globalen Wandels**

Herausgegeben vom  
**Deutschen Arbeitskreis für Geomorphologie**



Schriftleitung: Richard Dikau & Nele Meyer

# Die Erdoberfläche

Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen

## Beiträge der Geomorphologie zur Erforschung des Globalen Wandels

### GEOMORPHOLOGIE - Die Wissenschaft von Formen und Prozessen der Erdoberfläche

*Vorwort*

■ Seite 1 - 2

### KLIMAWANDEL - Bedrohung für die Erdoberfläche

*Dominik Faust, Markus Fuchs, Tobias Heckmann, Klaus-Martin Moldenhauer, Brigitta Schütt & Christoph Zielhofer*

■ Seite 3 - 15

### LANDNUTZUNGSWANDEL - Steuergröße der Geomorphodynamik

*Johannes Ries, Jürgen Wunderlich & Klaus-Martin Moldenhauer*

■ Seite 16 - 28

### NATURGEFAHREN - Gefährliche Erdoberflächenprozesse

*Richard Dikau, Nele Meyer & Jutta Bedehäring*

■ Seite 29 - 46

---

Impressum

Veröffentlicht durch den Deutschen Arbeitskreis für Geomorphologie („Denkschrift 2“)  
<http://www.ak-geomorphologie.de>

Titelfoto: Bruce Perry (Santa Clara River Valley (USA))  
Schriftleitung: Richard Dikau & Nele Meyer

September 2009



*Richard Dikau*

Die Geomorphologie ist die Wissenschaft von den Formen, Prozessen und Materialien der Erdoberfläche, die den Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen bildet. Die Geomorphologie ist daher auf das Engste mit den menschlichen Gesellschaften und ihrer Nutzung der Erdoberfläche verbunden. Diese Nutzung hat tiefgreifende Fingerabdrücke hinterlassen, deren Entschlüsselung eines der Felder der geomorphologischen Wissenschaft ist. Ohne ein Verständnis der vergangenen und gegenwärtigen Veränderungen der Erdoberfläche wird es unmöglich sein, Abschätzungen ihrer zukünftigen Entwicklung geben zu können. Aufgrund der immer stärker werdenden Inanspruchnahme der Oberfläche des Erdkörpers ist dieses Verständnis für die menschlichen Gesellschaften von zentraler Bedeutung.

Die Erdoberfläche wird durch geomorphologische Formen gebildet, die aus Fest- oder Lockergesteinen aufgebaut sind. Ihre Veränderungen treten zum Beispiel als Flusseinschneidung und -ablagerung, Küstenerosion oder Dünenwanderung in Erscheinung. Sie bilden seit Jahrmillionen wirkende Erosions- und Depositionsprozesse. In den Lockergesteinen entwickelten sich Böden, die durch Nährstoffe und Bodenwasser die Nahrungsproduktion des Menschen ermöglichen. Der Oberflächenabfluss trägt zur Wasserführung unserer Flüsse bei und bildet gleichzeitig eine Ursache für die zerstörerische Bodenerosion. Die dabei mobilisierten Sedimente haben die Auen der Flüsse weltweit verändert. Die Geometrie der Erdoberfläche steuert klimatologische und hydrologische Phänomene. Der geomorphologische Charakter der Erdoberfläche ist also mit einer Vielzahl von Phänomenen des Systems Erde gekoppelt. Die geomorphologischen Formen tragen ein erdgeschichtliches Erbe. Wie die Böden, so sind auch diese Formen und die sie aufbauenden Gesteine und Sedimente über unterschiedlich lange Zeiträume entstanden.

Geomorphologische Prozesse, wie die Bodenerosion, Stauseeverfüllungen oder die Ausdehnung der Wüsten werden erst durch den wirkenden Menschen ermöglicht oder beschleunigt. In den letzten Jahrhunderten und Jahrtausenden greift der Mensch immer stärker in die natürlichen

Prozessabläufe ein, sei es indirekt durch die Beeinflussung des Klimasystems oder direkt durch die aktive Umgestaltung der Erdoberfläche. Die natürlichen geomorphologischen Prozesse und die menschlichen Aktivitäten stehen daher in vielseitiger Wechselwirkung. Beispielsweise können nicht angepasste Wirtschaftsweisen in Trockenregionen die Fruchtbarkeit der Böden nachhaltig erschöpfen und so zur Wüstenbildung führen. Langfristig kann dies zu globalen Veränderungen des Klimas beitragen.

Die menschlichen Gesellschaften stehen somit vor der Aufgabe mit den Veränderungen des Erdsystems und ihren Folgen umzugehen und sich an sie anzupassen, um Nahrungs- und Energiequellen zu erhalten und zu sichern. Die nutzbare Erdoberfläche liegt im Spannungsfeld von oftmals unvereinbar erscheinenden Interessen. Sie wird in Zeiten einer wachsenden Weltbevölkerung und einem steigenden Flächenbedarf zunehmend zu einem knappen Gut. Durch die Konzentration von Bevölkerungs- und Wirtschaftszentren in bestimmten Regionen der Erde und die zunehmende Vernetzung durch die globalisierte Ökonomie entsteht ein Ungleichgewicht zwischen jenen Ländern, die Flächenrohstoffe zur Verfügung stellen, und solchen, die diese nutzen wollen. So benötigt Deutschland bereits heute die zweifache Fläche des eigenen Landes um die hohe Nachfrage nach pflanzlichen und tierischen Agrarerzeugnissen sowie den steigenden Verbrauch erneuerbarer Energiequellen zu decken. Dies verdeutlicht, wie stark die Wechselbeziehungen zwischen globalen Faktoren, wie dem Welthandel, und regionalen Faktoren, wie die Verfügbarkeit von Nutzflächen und Ressourcen, entwickelt sind. Um eine nachhaltige Nutzung der Erdoberfläche zu erreichen, ist es gerade in den produzierenden Ländern notwendig, Ressourcen schonende Wirtschaftsweisen zu etablieren.

Im Rahmen dieser Broschüre sollen einer interessierten Öffentlichkeit einige Themenfelder der Geomorphologie vorgestellt und ihre gesellschaftliche Relevanz hervorgehoben werden. Hier ist von Bedeutung, auf die aktuellen Umweltprobleme und -krisen zu verweisen, in deren Kontext die Geomorphologie einen

Beitrag leistet. Die Anpassung der Nutzung der Erdoberfläche an den Globalen Wandel der Zukunft stellt ohne Zweifel eine zentrale Herausforderung für alle Umweltwissenschaften dar. Die Bundesregierung hat auf diese Situation reagiert und durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ein nationales Anpassungsprogramm „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ angeregt. Die Helmholtz-Gesellschaft sieht in der Anpassung an den Klimawandel einen Weg, mit den bevorstehenden Veränderungen umzugehen und stellt für die nächsten vier Jahre gemeinsam mit den kooperierenden Universitäten und außeruniversitären Forschungszentren Finanzmittel für eine Klimainitiative bereit. Die Initiative „Regional Climate Change: From Observations and Modelling to Decision Support for Mitigation“ wird sich neben der Erforschung der regionalen Auswirkungen des globalen Klimawandels mit möglichen Anpassungs- und Handlungsstrategien befassen, die u.a. eine nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung und ein effizientes Wassermanagement ermöglichen sollen. Für die Geomorphologie stellen sich hier Aufgaben der Erforschung der nachhaltigen Nutzung der Erdoberfläche, um die anwachsende Weltbevölkerung in Zeiten einer globalen Erwärmung ernähren zu können. Durch die Erforschung schleichender, durch den Menschen verursachter Degradationsprozesse, wie der Bodenerosion und der Desertifikation, leistet die Geomorphologie einen Beitrag für die Erhaltung der Bodenressource. Doch nicht nur schleichende Erdoberflächenprozesse stellen ein Aufgabengebiet der Disziplin dar. Gerade durch die vermutete Zunahme von Extremereignissen in den nächsten Jahrzehnten werden sich die Naturgefahrenpotenziale geomorphologischer Prozesse, wie Felsstürze oder Küstenerosionen, deutlich erhöhen und zu neuen Risikokartierungen und -abschätzungen in zahlreichen Regionen der Erde führen müssen.

Im Rahmen der vorliegenden Broschüre sollen an Fallbeispielen geomorphologische Beiträge zur Erforschung des Globalen Wandels vorgestellt werden. Im Zentrum steht die Erdoberfläche als Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen sowie ihre Potenziale und ihre Gefährdung. Mit der Erforschung der Erdoberfläche besitzt die Geomorphologie als Disziplin der Geographie eine zentrale Rolle als Erdsystemwissenschaft. Sie kann auf eine über 150jährige Disziplinengeschichte

zurückblicken. Mit der Themenstellung, die Wechselwirkungen zwischen natürlichen und gesellschaftlichen Systemen zu erforschen, ist die Geomorphologie damit einerseits in den Umweltwissenschaften und andererseits an der Schnittstelle zwischen den Umwelt- und Gesellschaftswissenschaften lokalisiert. Vor dem Hintergrund einer wachsenden, sich räumlich konzentrierenden Weltbevölkerung und eines zunehmenden Einflusses der Menschheit auf die natürlichen Grundlagen unserer Lebensräume, ist die Geomorphologie in Forschung, Lehre und Praxis aufgerufen, Konfliktpotenziale zu erkennen, ihre Ursachen zu erforschen und einen Beitrag zur Lösung der Probleme zu leisten.

Foto: N. Meyer



## Quellenverweise

Deutscher Arbeitskreis für Geomorphologie (Hrsg.) (2006): Die Erdoberfläche - Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen. Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Suppl.-Bd., 148.

Vorschlag für ein nationales Forschungsprogramm des Nationalen Komitees für Global Change Forschung (NKGCF) vom 17. Januar 2008. Verfügbar unter: <http://www.uni-kiel.de/nkgcf/downloads/4Vorschlag%20Nationales%20FP.pdf>

Pressemitteilung der Helmholtz-Gemeinschaft vom 08. Juni 2009. Verfügbar unter: [http://www.helmholtz.de/aktuelles/pressemitteilungen/artikel/detail/helmholtz\\_startet\\_klimainitiative/](http://www.helmholtz.de/aktuelles/pressemitteilungen/artikel/detail/helmholtz_startet_klimainitiative/)

Magazin des BMU vom April 2009. Verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/magazin\\_klimawandel\\_in\\_deutschland.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/magazin_klimawandel_in_deutschland.pdf)

## Bedrohung für die Erdoberfläche

*Dominik Faust, Markus Fuchs, Tobias Heckmann, Klaus-Martin Moldenhauer, Brigitta Schütt & Christoph Zielhofer*

Ein Drittel der Erde besteht aus fester Landoberfläche. Diese Landoberfläche mit ihrem oberflächennahen Untergrund ist die Hauptumsatzfläche für die wichtigsten Energie- und Stoffflüsse im Erdsystem. Die Erdoberfläche wird durch Vorgänge der Verwitterung, der Abtragung, des Transportes und der Ablagerung von Gesteinen und Böden geformt. Diese geomorphologischen Prozesse verändern die Oberflächengestalt fortwährend. Der oberflächennahe Untergrund stellt darüber hinaus die wichtigste Lebens- und Gestaltungsgrundlage für den Menschen dar. Auf der Basis dieser natürlichen Ressource sichert der Mensch seine Nahrungsmittelversorgung und bezieht daraus die wichtigsten Rohstoffe. Unsere Wasserversorgung wäre ohne den oberflächennahen Untergrund aus heutiger Sicht nicht zu bewerkstelligen.

Geomorphologische Prozesse werden sowohl direkt (Niederschläge) als auch indirekt (Veränderung der Pflanzendecke) durch das Klima gesteuert. Aus diesem Grunde kommt dem globalen Klimawandel eine Schlüsselfunktion im Hinblick auf den Landschaftswandel und damit auf Veränderungen des geomorphologischen Systems zu. Diese oft irreversiblen Veränderungen können sich z.B. abrupt in Bergstürzen äußern oder sich schleichend vollziehen, wie die Erosion des Bodens. Beide Prozesse können katastrophale Ausmaße annehmen. Es besteht Einvernehmen darüber, dass sich das Klima in Zukunft global wandelt. Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts haben die globalen Temperaturen im Mittel von 13,7°C auf 14,5°C zugenommen. Im gleichen Zeitraum ist der mittlere Meeresspiegel um 20 cm gestiegen. In den letzten 25 Jahren hat die Schneebedeckung auf der nördlichen Hemisphäre bereits um 10% abgenommen. Ein globaler Hitzerekord jagt den anderen. So gehören 11 der letzten 12 Jahre global zu den wärmsten Jahren seit 1850.

Aus verschiedenen Modellansätzen stehen für den globalen Klimawandel unterschiedliche Szenarien zur Verfügung (Abb. 1). Jedoch weisen sämtliche Klimaszenarien auf eine globale Erwärmung hin, die sich regional unterschiedlich auswirken und somit die lokalen geomorphologischen Prozessabläufe stark modifizieren wird. Neben der Veränderung der Windparameter wird sich im Zuge der globalen Erwärmung

auch das Niederschlagsverhalten ändern. Hier kommt es ebenfalls regional zu großen Unterschieden im Hinblick auf die Niederschlagsverteilung, -menge und -intensität. Diese bilden Faktoren, die auf der Erdoberfläche geomorphologisch hochwirksam sind (u.a. für die Bodenerosion und Hangrutschungen). Für die Zukunft ist es deshalb erforderlich, auf Grundlage der regionalen Klimaszenarien Risikoregionen auszuweisen, die auch in Mitteleuropa weit verbreitet sind.

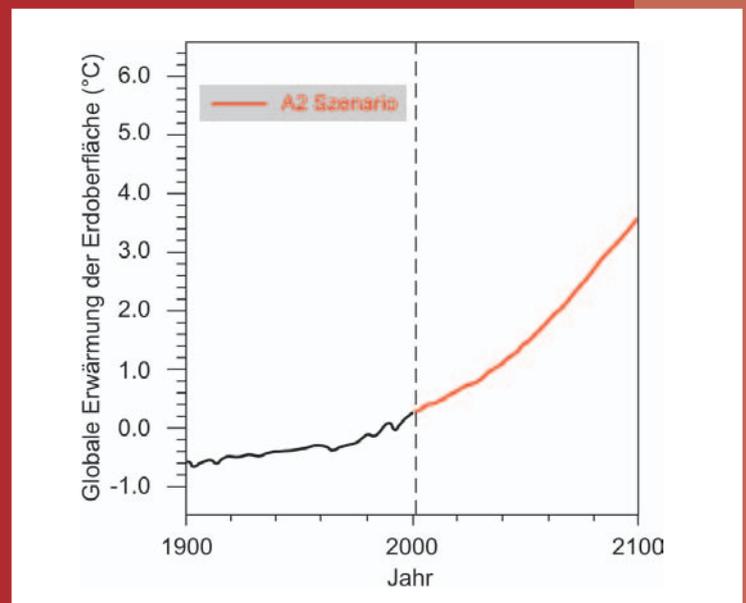


Abbildung 1

Die Graphik zeigt das modellierte A2-Klimaszenario des IPCC (2007). Die Berechnungen gehen von einem globalen Temperaturanstieg von über 3°C bis zum Jahre 2100 aus.

Im Folgenden werden einige „Hot Spots“ vorgestellt, wobei besonders europäische Regionen betrachtet werden. Viele dieser Landschaften reagieren aufgrund ihrer naturräumlichen Fragilität besonders sensibel auf Veränderungen. So sind Küstenregionen sowohl im Norden Deutschlands als auch weltweit zunehmend Klimafolgeprozessen ausgesetzt. Andererseits hat der Temperaturanstieg nicht nur in den Dauerfrostbodenzonen der Polargebiete starke Landschaftsschäden zur Folge, sondern auch in Hochgebirgen wie den nahegelegenen Alpen sind durch den auftauenden Permafrost Menschen und Infrastruktureinrichtungen bedroht. Ein weiterer „Hot Spot“, der von den Auswirkungen des

prognostizieren Klimawandels betroffen sein wird, ist der Mittelmeerraum, der schon in der Vergangenheit mehrfach unter extremen Umweltstress geriet. Auch in dicht besiedelten Flussauenlandschaften werden Klimafolgegeschäden zunehmend das Beziehungsgefüge von Mensch und Umwelt belasten. Ähnliches ist auch in den intensiv agrarisch genutzten Löss- und Mergellandschaften zu erwarten, in denen in Zukunft mit erhöhten Reparationskosten infolge des Klimawandels gerechnet werden muss. Anhand dieser Beispiele kann aufgezeigt werden, dass sich die Erdoberfläche infolge des Klimawandels zukünftig drastisch verändern wird. Eine fundierte Analyse des geomorphologischen Systems kann es ermöglichen, zukünftige Landschaftsschäden zu prognostizieren und präventive Maßnahmen einzuleiten. Dies ist angesichts der zu erwartenden und teilweise bereits spürbaren Umweltveränderungen und den damit verbundenen Kosten unerlässlich.

Der Küstenraum stellt den Übergangsbereich von Meer und Landoberfläche dar. Er nimmt auf unserer Erde eine Länge von mehr als 1 Mio. km ein (Kellett 1999) und in seinem Bereich leben heute fast 50% der globalen Bevölkerung. Damit sind die Küsten sowohl zentraler Lebensraum des Menschen, als auch wichtiger Wirtschafts- und Handelsraum.

Wie andere Geosysteme auch, ist der Küstenraum kein statisches System, sondern einem stetigen Wandel unterworfen. Ein an der Küste zunächst nur schleichend zu registrierender Prozess ergibt sich aus der globalen Erwärmung der Atmosphäre und der damit verbundenen Erhöhung des Meeresspiegels, der sich regional jedoch katastrophal auswirken kann. Der seit Ende des 19. Jahrhunderts zu verzeichnende Meeresspiegelanstieg beträgt nach dem neusten IPCC Bericht ca. 1,7 mm pro Jahr (IPCC 2007). Ein Gesamtanstieg des Meeresspiegels von bis zu 50 cm bis zum Jahr 2100 wird prognostiziert (Abb. 2). Daraus ergeben sich weitreichende ökologische und ökonomische Veränderungen für viele Küstenregionen, die teilweise heute schon deutlich zu spüren sind. Dazu zählen:

- Überflutungen weiter Küstenregionen
- Erosion der Küsten
- Versalzung des Grundwassers und der Böden im Küstenraum
- Überschwemmungen in Deltabereichen und entlang küstennaher Flussläufe durch Rückstauwirkung.

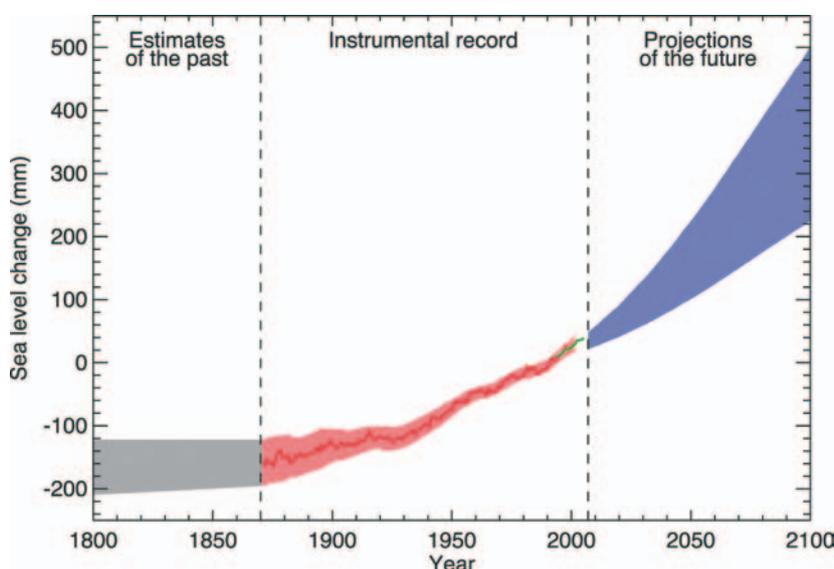


Abbildung 2  
Meeresspiegelanstieg seit dem Jahr 1800. Die blaue Kurve zeigt den Bereich des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs bis zum Jahr 2100 (IPCC 2007).

In Konsequenz muss in Zukunft mit erheblichem Landverlust für die Besiedlung und landwirtschaftliche Nutzung gerechnet werden. In tropischen Regionen sind die Folgen des Klimawandels auf den Küstenraum auch unter dem Aspekt der prognostizierten Intensitätszunahme tropischer Wirbelstürme zu betrachten (Abb. 3). So berechnen Knutson & Tuleya (2001) in Simulationsmodellen eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit um bis zu 12% bei einer Erwärmung der Meeresoberflächentemperaturen um 2,2°C. Im Küstenbereich können die Wirbelstürme ungebremst wirksam werden, denn über den angrenzenden Wasserflächen fehlen Relief und Vegetation um sie zu bremsen. Bereits Emanuel (2005) beobachtet, dass die Intensitäten der Hurrikans in den letzten Jahren durch die Zunahme der Meerestemperaturen ungleich größer waren als in den vorangegangenen Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts. Die geomorphologischen Effekte solcher starker Wirbelstürme äußern sich in einer Erhöhung der Hangrutschgefahr, in einer Verschüttung der küstennahen Korallenriffe und Lagunen durch hohe Sedimentfrachten, in einer völligen Verwüstung der Flussauenlandschaften sowie in einer Zerstörung des unmittelbaren Küstenraums durch Sturmfluten.

Im Bereich tiefliegender und reliefarmer Küstenzonen sind die Auswirkungen auftretender Wirbelstürme besonders drastisch, wie das Beispiel des im Ganges-Brahmaputra-Delta liegenden Bangladesh immer wieder zeigt. Hier treffen die tropischen Wirbelstürme ungehindert und mit ungebremster Energie auf das Festland. In Kombination mit den in diesem Deltabereich rückgestauten Abflüssen kommt es bis weit in das Landesinnere immer wieder zu katastrophalen Überschwemmungen, die großflächig wertvolle landwirtschaftliche Nutzflächen überfluten und in Siedlungsgebieten starke Schäden verursachen. Bei einem prognostizierten Meeresspiegelanstieg um 45 cm ist allein in Bangladesh von einem Flächenverlust von über 15.600 km<sup>2</sup> auszugehen, was ca. 10% der gesamten Landesfläche entspricht (Butzengeiger & Horstmann 2004). Alleine in Bangladesh wären davon 20 Millionen Menschen unmittelbar betroffen.

In den deutschen Küstengebieten werden der globale Klimawandel und der damit verbundene Meeresspiegelanstieg ebenfalls erhebliche Auswirkungen haben. Durch eine Zunahme der Sedimentation muss mit einer zunehmenden Gefährdung der Watt-Ökosysteme gerechnet werden. Um dem Verlust weiterer Küstenregionen durch Überflutungen entgegenzuwirken, sind Deicherhöhungen erforderlich, die einen

Kostenaufwand in Milliardenhöhe bedeuten. Auch sind Sicherungsmaßnahmen gegen Küstenerosion notwendig, die bereits heute schon sehr kostenintensiv sind. So zeigt das Beispiel Sylt wie durch Sandvorspülungen der Küstenerosion entgegen gewirkt wird, was einen jährlichen Kostenaufwand in Millionenhöhe bedeutet (Abb. 4). Im deutschen Küstenraum werden ca. 3,5% der Landesfläche und etwa 2,8% der Bevölkerung bei einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm betroffen sein (Behnen 2000). Mit Sicherungsmaßnahmen von über 17% des deutschen Bruttoinlandsproduktes muss gerechnet werden.

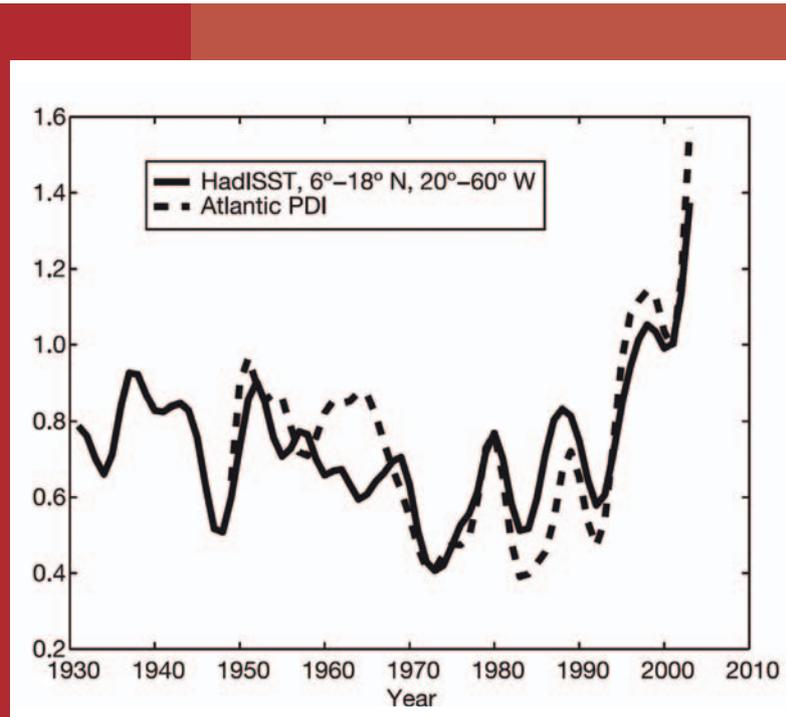


Abbildung 3 Entwicklung der Jahressummen der Energiefreisetzung von tropischen Wirbelstürmen (PDI) im Nordatlantik und der Ozeanoberflächentemperatur im September (Emanuel 2005).

Die verzögerte Reaktion der Ozeane auf die Erwärmung der Atmosphäre bedingt einen zusätzlichen Anstieg des Meeresspiegels infolge der Dichteabnahme auch dann, wenn die Erwärmung der Atmosphäre verlangsamt wird oder gar zum Erliegen kommen sollte. Die geomorphologische Ausstattung der Küstenregion gibt vor, welche Bereiche durch künftige Meeresspiegelanstiege besonders gefährdet sein werden. Auf der Basis von geomorphologischen Analysen lassen sich Szenarien über die zu erwartenden Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs entwickeln. Welche Küstenregionen sind am stärksten von Überflutungen betroffen, wo ist mit Küstenerosion zu rechnen? Um derartige Fragen zu beantworten, verfügt die

Geomorphologie über das notwendige fachliche Wissen und die erforderlichen Methoden. Die geomorphologische Analyse kann zu Karten führen, die entsprechende Gefahrenzonen ausweisen. Sie bilden eine Planungsgrundlage für zu ergreifende Sicherungsmaßnahmen.

## HOT SPOT KALTE GEBIETE

### Der gefrorene Untergrund taut auf

In vielen Gebieten der Erde reicht die sommerliche Temperatur nicht aus, um die tiefgründig gefrorenen Böden sowie Locker- und Festgesteine vollständig aufzutauen. Es kann sich zwar alljährlich eine wenige Dezimeter bis Meter mächtige Auftauschicht („active layer“) bilden, unter dieser jedoch bleibt der Untergrund dauerhaft gefroren. Diese permanente Gefrorenis, bei der Poren und Klüfte auch mit Eis gefüllt sein können, wird als *Permafrost* bezeichnet. In den polaren Breiten der Erde ist der Permafrostboden flächenhaft verbreitet, auf der Nordhalbkugel sind über 20% der gesamten Landoberfläche von Permafrostböden bedeckt (Nordkanada, Alaska und Sibirien, zumeist nördlich des 60. Breitengrades). In niedrigeren Breiten schließen sich die Zonen des lücken- und inselhaften Permafrosts an. Aufgrund der Abhängigkeit der Permafrostverbreitung von niedrigen Jahresdurchschnittstemperaturen ist Permafrost nicht nur in den (sub-)polaren Breiten anzutreffen, sondern auch in den Hochgebirgen der Mittleren Breiten und der Tropen. In den Alpen nehmen die von Permafrostböden eingenommenen Flächen doppelt soviel Fläche ein wie die von Gletschern (Haeberli & Hohmann 2008). Das alpine Verbreitungsgebiet des Permafrostbodens liegt oberhalb von ca. 2500 m.

Von der global festzustellenden und prognostizierten Erwärmung der Atmosphäre werden tiefgreifende Folgen für die Permafrostverbreitung befürchtet. Bereits jetzt befindet sich der Permafrost vielerorts am Rande seiner Stabilität und Auftauprozesse haben eingesetzt. Modellberechnungen ergeben einen zu erwartenden Rückgang der Permafrost-Flächen um 90% auf ca. 1 Mio. km<sup>2</sup> bis zum Jahr 2100 (Lawrence & Slater 2005). In den Alpen deuten aktuelle Messdaten (Harris et al. 2003) auf eine deutliche Erwärmung der Permafrosttemperaturen hin. All dies ist auch eine Konsequenz der Tatsache, dass sich die aktuelle Erwärmung sowohl in den Polargebieten als auch im Alpenraum doppelt so schnell vollzieht wie im globalen Mittel (OcCC 2007). In der Schweiz hat sich die Jahresmitteltemperatur im 20. Jahrhundert um mehr als 1°C und global um 0,6°C erhöht.

Für die Schweiz wird bis 2100 eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur um weitere 3,5 bis 7°C erwartet (OcCC 2007), während global die erwartete Zunahme der Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1990-2100 mit 1,1 bis maximal 6°C prognostiziert wird (IPCC 2007). Dies bedeutet, dass ein Durchschnittssommer um das Jahr 2100 dem als

Abbildung 4

Die Kosten für Sicherheitsmaßnahmen gegen Küstenerosion werden im Zuge des Klimawandels erheblich zunehmen. Hier von werden insbesondere die Inseln der Nordsee betroffen sein, wie das Beispiel Sylt zeigt.



Foto: R. Dikau



Abbildung 5  
Schäden an einem Haus in Jakutsk (Sibirien) infolge des Auftauens von Permafrost im Untergrund.

Foto: C. Borowy

„Hitzesommer“ bekannt gewordenen Sommer 2003 entspräche (OcCC 2007). Klimahistorische Untersuchungen im Alpenraum zeigen, dass die Jahre 1994, 2000, 2002 und besonders 2003 die wärmsten Jahre seit dem Jahr 1500 darstellen (Casty et al. 2005). Die atmosphärische Erwärmung vollzieht sich in den Alpen offenkundig schneller als in umliegenden Regionen und äußert sich u.a. im Abschmelzen der Gletscher und des Permafrostbodens.

Das Auftauen der Permafrostböden infolge des allgemeinen Temperaturanstiegs hat gravierende Konsequenzen. Betroffen sind beispielsweise hydrologische (Boden- und Landschaftswasserhaushalt) und ökologische Eigenschaften der Gebiete. So verlieren die Permafrostböden im Bereich der großen Moor- und Waldgebiete in den hohen Breiten ihre Funktion als Kohlenstoff-Senke und entlassen im Zuge des Auftauens Treibhausgase wie  $\text{CO}_2$  und Methan in die Atmosphäre. Vollzieht sich diese  $\text{CO}_2$ -Freisetzung schneller als die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch das mit der atmosphärischen Erwärmung verbesserte Pflanzenwachstum, ist eine Zunahme der Treibhausgaskonzentration zu befürchten – und damit eine Beschleunigung der globalen Erwärmung (Davidson & Janssens 2006).

Besonders einschneidend sind die Folgen des auftauenden Permafrostbodens für die geomorphologischen Prozesse, die die Erdoberfläche durch Erosion, Transport und Ablagerung von Locker- und Festgestein verändern. Generell werden Lockermaterialien, die durch das im Boden enthaltene Eis gleichsam zementiert wurden, infolge der Permafrostschmelze plötzlich mobil. Dies äußert sich beispielsweise an Flussuferern durch verstärkte Ufererosion, ein Ansteigen der Materialfracht der Flüsse und in Hochgebirgen durch eine Zunahme von Massenbewegungen. Zahlreiche dieser Prozesse haben besonders in Hochgebirgen den Charakter von Naturgefahren. In diesem Zusammenhang werden global Schäden in der Größenordnung von hunderten Millionen Euro im jährlichen Mittel geschätzt (Kääb et al. 2005, hier auch eine Übersicht über die beteiligten Prozesse). In den Permafrostgebieten der hohen Breiten zeigt sich besonders deutlich der direkte Einfluss des auftauenden Permafrostbodens auf die Erdoberflächenform. Mit den Auftauprozessen kommt es u. a. zu Absenkungen der Bodenoberfläche. Die auf dem ehemals hartgefrorenen Untergrund gebauten Gebäude, Straßen und Infrastrukturelemente wie z.B. Öl- und Gaspipelines werden hierdurch teilweise

stark beschädigt (Abb. 5). Taut der Permafrost gänzlich auf, werden die bislang angewandten aufwändigen Sicherungsmaßnahmen wie umfangreiche Isolierung und Pfahlfundamente wirkungslos, die Bauwerke brechen auseinander und versinken im Auftauboden. An Stellen, an denen sich größere Mengen Eis im Boden befinden, verursacht das Auftauen des Permafrosts die Entstehung von kraterähnlichen Hohlformen in der Bodenoberfläche (sog. „Thermokarst“), die Erdfällen und Bergsetzungen ähnlich sind.

Die Alpen stellen wie kaum ein anderes Hochgebirge der Erde einen Wirtschaftsraum mit einer hohen Konzentration von Menschen und monetären Werten dar. Diese Region wird das ganze Jahr über intensiv touristisch genutzt. Bereits heute sind viele Orte durch die Wahl ungeeigneter Siedlungsstandorte einem hohen Risiko durch geomorphologische Prozesse ausgesetzt. Dieses Risiko durch technische Maßnahmen zu mindern ist nicht immer möglich und stets kostenintensiv. Zudem erfolgen solche Maßnahmen häufig erst in Reaktion auf bereits entstandene Schäden. Deshalb kommt in Zukunft der Prävention eine besonders wichtige Rolle zu (z.B. im Rahmen der Raumplanung). Im Alpenraum ist mit einer Reihe von Gefahren zu rechnen, die zum Teil direkt durch den globalen Klimawandel ausgelöst werden. Die Ursachen sind unterschiedlich, und die ausgelösten Prozesse vollziehen sich zeitlich wie räumlich in verschiedenen Maßstabsebenen. Die gravierendsten geomorphologischen Folgen des Klimawandels werden ausgelöst durch die häufigeren Hitze- und Trockenheitsextreme bei gleichzeitiger Erhöhung der Starkregen-Wahrscheinlichkeit. Gefährdungen im Alpenraum basieren (1) auf einer Destabilisierung von Locker- und Festgestein durch den auftauenden Permafrostboden und schmelzende Gletscher sowie (2) auf einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit extremer Niederschlagsereignisse, die wiederum Prozesse wie Hochwässer oder Murgänge auslösen können.

Selbst moderate Veränderungen von Klimaparametern, wie die jährliche Niederschlagssumme oder die Jahresmitteltemperatur, können gravierende Zunahmen der Extremereignisse nach sich ziehen, wie z.B. die Tendenz zu häufigeren Hitze- und Trockenheitsextremen bei gleichzeitiger Erhöhung der Wahrscheinlichkeit extremer Starkregen. So führt eine extreme sommerliche Temperatur im Bereich von Felswänden zu tiefgründigem Auftauen des Eises in den Felsspalten und somit zu einer Destabilisierung. Selbst wenn das in diesen Felswänden in Spalten

und Klüften befindliche Wasser nach einem warmen Sommer wieder gefriert, kann dies zu einer verstärkten Steinschlag- und Felssturzaktivität führen. Von der Öffentlichkeit wurden derartige Bergsturzereignisse am Matterhorn 2003 sowie am Eiger 2006 wahrgenommen, jedoch handelt es sich hierbei bei weitem um keine Einzelfälle (Gruber et al. 2004). Darüber hinaus können Starkregenereignisse in Lockergesteinsablagerungen an steilen Hängen und in Wildbächen verbreitet zu Murgängen führen. Durch die mittel- bis langfristige Erhöhung der Mitteltemperaturen ist mit tiefgründigem Verschwinden des Permafrosts zu rechnen. Besonders in gesteins- oder wasserhaushaltsbedingt generell instabilen Gebieten erhöht dies das Potenzial großer Fels- und Bergsturzereignisse (Gruber & Haeberli 2007). Die Kriechbewegung eishaltiger Schuttmassen an Hängen wird durch das Auftauen des Permafrostbodens vielerorts beschleunigt (Kääb et al. 2007) und die Verfügbarkeit von Lockermaterial nimmt zu. In den mächtigen Ablagerungen der ehemaligen und aktuellen Gletschervorfelder, die durch das Schmelzen der Gletscher größer werden (Haeberli & Beniston 1998) kann es zur Mobilisierung großer Mengen an Lockermaterial kommen, die sich talabwärts in Richtung der besiedelten Gebiete bewegen. So wurden bei dem Großereignis von Guttannen (Schweiz) im Jahre 2005 etwa 500.000 m<sup>3</sup> Material von einer Moränenablagerung bis in den Talraum bewegt, wo der Fluss Aare zeitweise abgedämmt wurde (Haeberli & Gruber 2008). Damm & Felderer (im Druck) zeigen, dass die meisten kartierten Muranrisse in einem Südtiroler Untersuchungsgebiet in denjenigen Arealen zu finden sind, in denen der Permafrostboden seit dem Ende der Kleinen Eiszeit (ca. 1850) verschwunden ist (Abb. 6).

Viele der beschriebenen Prozesse laufen im Allgemeinen in großen Höhen ab, bedrohen jedoch auch Gebiete, die weit vom Entstehungsort entfernt liegen können und vielfach besiedelt sind. Murgänge können große Mengen Lockermaterial und Wasser über weite Strecken bis in die besiedelten Täler transportieren. Das gleiche gilt für Eislawinen, die sich aus abbrechenden Gletscherteilen bilden können. Massenbewegungen wie Bergstürze oder Rutschungen können durch temporären Aufstau von Flüssen oder durch Einschlag in Seen neben ihren direkten Folgen auch Flutwellen mit katastrophaler Fernwirkung hervorrufen (z.B. der Bergsturz in den Vaiont-Stausee, Italien 1963). Ähnliche Konsequenzen drohen infolge des plötzlichen Ausbruchs von Seen, die sich im Umfeld von schmelzenden Gletschern

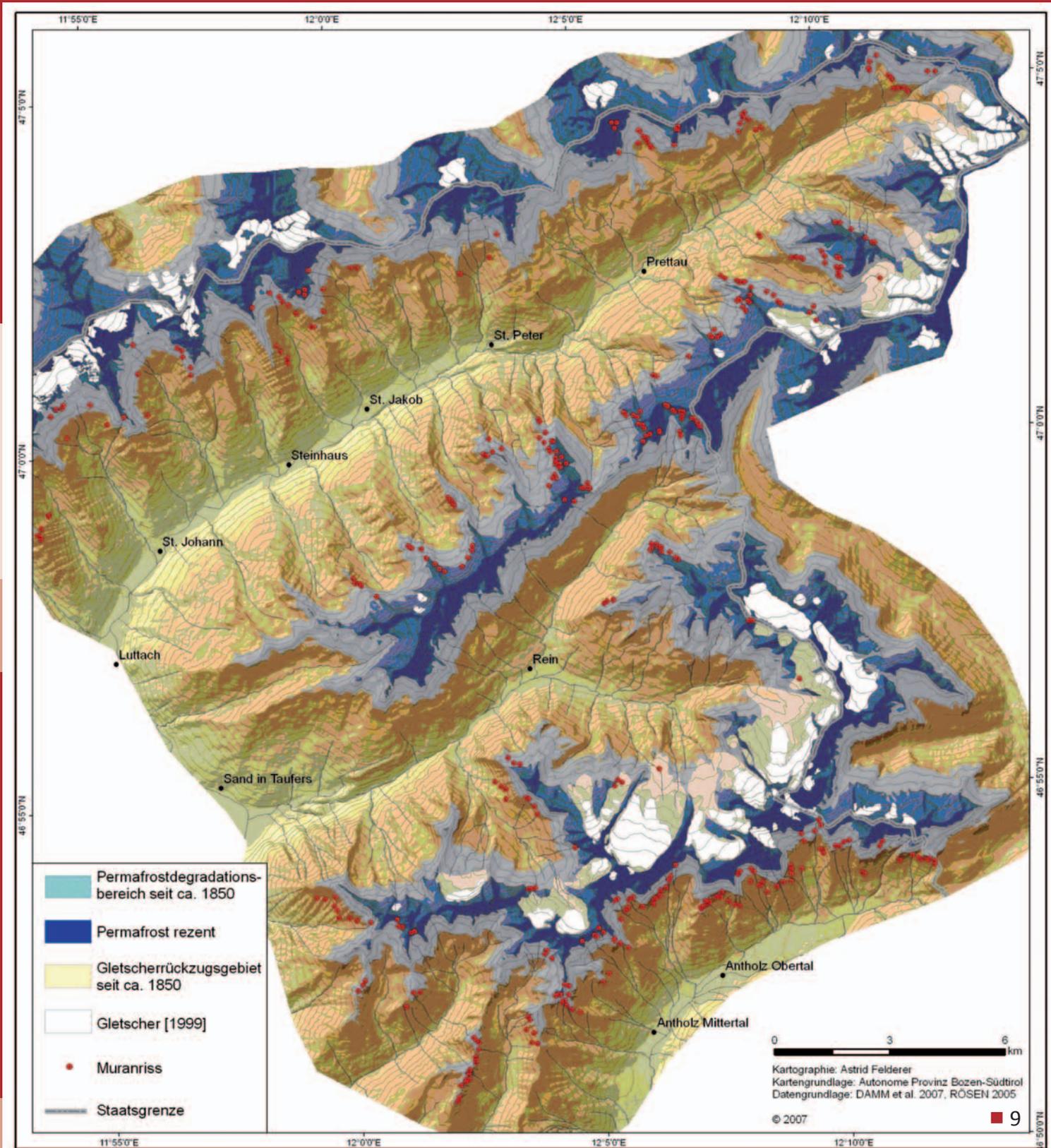
bilden können.

Das direkte und indirekte Gefahrenpotenzial abzuschätzen erfordert ein gründliches Verständnis des natürlichen Systems, der Voraussetzungen und Wechselbeziehungen der verschiedenen geomorphologischen, hydrologischen und klimatologischen Prozesse. In der geomorphologischen Ausbildung und Forschung wird deshalb ein besonderer Wert auf Systemkenntnisse

gelegt. Durch Kartierung und Datierung der Zeugen vergangener Ereignisse, durch Messung und Monitoring aktueller Entwicklungen, durch Analyse und Beurteilung beobachteter Trends und durch die modellgestützte Entwicklung zukünftiger Szenarien leistet die Geomorphologie Beiträge zur Vorbereitung der Gesellschaft auf die zu erwartenden Veränderungen und Gefahren.

Abbildung 6

Die Lage von kartierten Muranrissen in einem Südtiroler Untersuchungsgebiet vor dem Hintergrund des Permafrostrückganges seit dem Ende der Kleinen Eiszeit (ca. 1850 n. Chr.) (Damm & Felderer, im Druck).



Klimatisch ist der Mittelmeerraum durch ausgeprägte sommerliche Trockenheit und winterliche Niederschläge gekennzeichnet. Entsprechend groß sind die Anpassungsmöglichkeiten für die Flora und Fauna, was sich in einer großen Artenvielfalt widerspiegelt. Die unter den wechselfeuchten Klimabedingungen bestehende hohe Sensitivität der Landschaft gegenüber den hochvariablen Witterungsbedingungen wird im Zuge des globalen Klimawandels zunehmend belastet werden. So ist z.B. auf der Iberischen Halbinsel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einer Zunahme der mittleren Jahrestemperatur um bis zu 5°C zu rechnen (Abb. 7). Damit nicht genug ist neben der starken Temperaturzunahme auch mit einem überdurchschnittlichen Rückgang der mittleren Jahresniederschläge zu rechnen. Prognosen, die vor allem für den westlichen Mittelmeerraum gelten, gehen von einem Rückgang der mittleren Jahresniederschläge um bis zu 40% aus (Abb. 8). Die prognostizierten Rückgänge der mittleren Jahresniederschläge werden mit gravierenden landschaftsökologischen und geomorphologischen Konsequenzen verbunden sein. Verminderte Niederschläge führen zu einer Verringerung der

Grundwasserneubildungsrate, zu geringeren jährlichen Abflüssen und zu einer allgemeinen Verknappung der Ressource 'Wasser' (Tab. 1). Gleichzeitig wird die Variabilität der Niederschlagsereignisse zunehmen und damit auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Starkniederschlagsereignissen. Auf die geomorphologischen Prozesse haben die erwarteten Veränderungen des Niederschlags erhebliche Konsequenzen. Eine schütterere Vegetationsdecke als Folge verlängerter sommerlicher Trockenperioden bietet nur unzureichenden Schutz gegenüber dem Bodenabtrag durch plötzlich einsetzende Starkniederschläge. Insgesamt sind verminderte mittlere Jahresniederschlagssummen bei gleichzeitig hohen Intensitäten mit hohen Bodenabtragsleistungen verbunden, welche schließlich zu einem vollkommenen Verlust der Bodendecke führen können (Faust 1995, Ries 2006).

Durch den Einfluss des Menschen ebenso wie durch Blitzeinschläge wird für den Mittelmeerraum auch ein Anstieg der Feuerhäufigkeit erwartet (Benavent-Corai et al. 2007, Abb. 9), der sich durch die prognostizierten längeren sommerlichen Trockenperioden noch verstärken wird (Gomes & Radovanovic 2008). Der Anstieg der Feuerhäufigkeit hat Konsequenzen auf die geomorphologischen Prozessabläufe. Nach neuen geomorphologischen

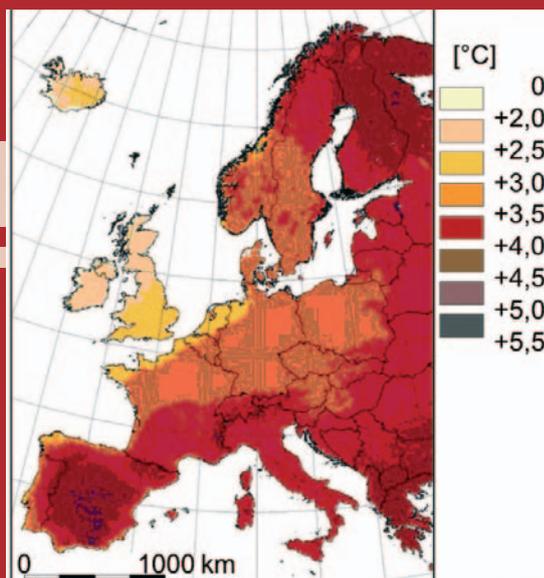


Abbildung 7

Veränderung der mittleren Jahrestemperaturen (links) und der mittleren Jahresniederschläge (rechts) in Europa für die Jahre 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 (verändert nach://peseta.jrc.es/docs/ClimateModel.html).

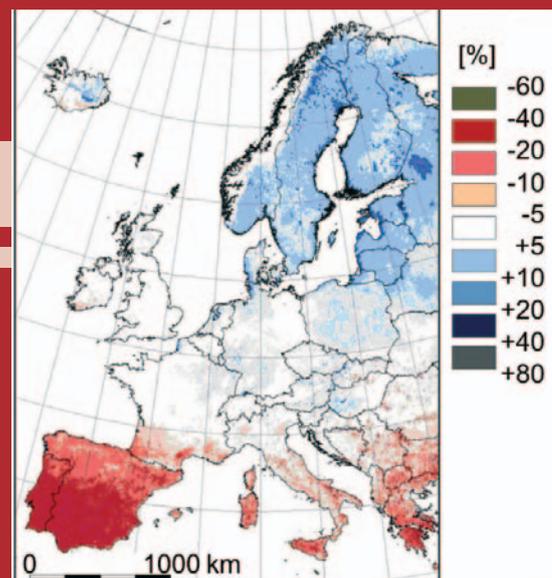


Abbildung 8

Tabelle 1  
 Folgen des Klimawandels in Europa (verändert nach Alcamo et al. 2007).

	Mitteleuropa	Mittelmeerraum
mittlere Temperaturen	Zunahme	sehr starke Zunahme
Winterhochwässer	starke Zunahme	konstant/ Abnahme
Hochwässer	Zunahme	starke Zunahme
mittlerer Abfluss	Konstant	sehr starke Abnahme
Trockenheit & Hitzewellen	Zunahme	sehr starke Zunahme
Waldbrandrisiko	Zunahme	sehr starke Zunahme
Bodenabtrag	starke Zunahme	starke Zunahme

Befunden aus Spanien sind auch mehrere Jahre nach den Brandereignissen um Zehnerpotenzen erhöhte Erosionsraten auf den Brandflächen zu beobachten (Mayor et al. 2007). Es besteht Konsens darüber, dass sich durch die globale Erwärmung die Neigung zu ausgedehnten Waldbränden und Buschfeuern weltweit stark erhöhen wird. Westerling et al. (2006) beobachten eine Versechsfachung der Großfeuer in den letzten Jahren verglichen mit den Jahren 1970 – 1986. Die geomorphologischen Effekte äußern sich in Bodenabspülung, Nährstoffverlust und Hangrutschungen. Aus geomorphologischen Archiven wissen wir, dass in der Vergangenheit bereits moderate Klimavariationen zum Anstieg der natürlichen Feuerhäufigkeit und in Folge davon zu stark erhöhten Sedimentumlagerungen führten (Pierce et al. 2004).

### HOT SPOT AGRARLANDSCHAFTEN

#### Intensiv genutzte Gebiete verlieren Fruchtbarkeit

Durch den Klimawandel werden Landschaften besonders bedroht sein, deren oberflächennaher Untergrund dazu neigt, durch Witterungseinflüsse leicht abgespült zu werden. Dies sind vor allem Lockergesteinslandschaften, deren Untergrund aus Löss und Mergel besteht. Gleichzeitig sind Löss und Mergel jedoch die landwirtschaftlich ertragreichsten Substrate und bilden daher seit Beginn des Ackerbaus bevorzugte Anbaustandorte. In diesen Lockersedimenten entwickelte Landschaften tragen durch ihre intensive Nutzung in besonderem Maße zur Ernährungssicherung der Menschheit bei. Dadurch sind sie für Bodenerosionsvorgänge besonders anfällig, wodurch die ökosystemaren Funktionen des oberflächennahen Untergrundes nachhaltig geschädigt werden, was schließlich die



Abbildung 9  
 Zunehmende Feuerhäufigkeit führt im Mittelmeerraum zu erhöhten Bodenabspülungen, da bei häufigen Starkregenereignissen nach der sommerlichen Trockenperiode die schützende Vegetationsdecke fehlt (Junta de Andalucia 2007).

allgemeine Wirtschaftskraft von ganzen Regionen in umfassender Weise beeinträchtigen kann. Nach Berechnungen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, durchgeführt im Auftrag des Umwelt-Bundesamtes, wird es im Zuge des globalen Klimawandels auch in Deutschland zu signifikanten Veränderungen verschiedener Klimaparameter kommen. So zeigen die Prognosen eine Zunahme der Winterniederschläge ([www.env-it.de/umweltdaten](http://www.env-it.de/umweltdaten)). Das Winterhalbjahr ist die Jahreszeit, in der wegen der geringeren Verdunstung die hydrologischen Speicher aufgefüllt werden (ungesättigte Bodenzone, Grundwasser). Ihre Aufnahmekapazität ist jedoch naturgemäß beschränkt. Bei einem zusätzlichen Niederschlagseintrag muss daher mit steigenden Oberflächenabflüssen gerechnet werden.



Abbildung 10

„Die Fahrt endet hier. Bitte alles aussteigen!“  
am Hauptbahnhof Dresden.

Foto: F. Haubold

Insbesondere auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, die während der Wintermonate nur eine spärliche oder gar keine Vegetationsdecke haben, wird somit der Prozess der Bodenerosion durch Wasser zunehmen. Die bei anhaltender Bodenerosion entstehende Bodendegradierung geht mit einer Beeinträchtigung der ökosystemaren Funktionen des Bodens einher. Hierzu gehört auch die Funktion des Bodens Wasser aufzunehmen und durch Weiterleitung in den Untergrund das Grundwasser zu erneuern. Degradiert der Boden, ist diese Funktion gestört, weniger Niederschlagswasser versickert und die Menge oberflächlich abfließenden Wassers

nimmt zu. Dies führt in Flussniederungen zunehmend zu extremen Überschwemmungen, wie sie in den letzten Jahren an Elbe und Oder in verheerendem Maße auftraten (Abb. 10 & Abb. 11).

Von besonderer Bedeutung sind hierbei der Sedimenttransport und die Pfade, auf denen das Sediment transportiert wird. Geomorphologische Forschungen zeigen auf, wo mit den größten Schäden zu rechnen ist. So ist heute schon absehbar, dass auf den Erosionsflächen selbst, die veranschlagten Reparationskosten bei weitem nicht so hoch ausfallen werden wie in den Bereichen, in denen das transportierte Bodenmaterial zum Absatz kommt. In diesen Bereichen übersteigen die Kosten der Schadensbeseitigung das 12fache der Kosten, die auf den Erosionsflächen selbst entstehen (Görlach 2004). Hierbei ist die Kenntnis des geomorphologischen Gesamtsystems eine unverzichtbare Voraussetzung, um die kostenintensiven Verlandungspositionen topographisch entsprechend lokalisieren zu können. Oft kommt das Sediment in entfernten Positionen zum Absatz und beeinträchtigt dort die Funktion von Infrastruktureinrichtungen (Stauseen, Verkehrswege, Kläranlagen etc.), die nur mit großem Kostenaufwand wieder in Stand gesetzt werden können (Abb. 12). Auch die Fließgewässer werden durch die über die Maßen eingetragenen Sedimente oftmals stark beeinträchtigt. Diese Stoffbelastung steht den Zielen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) entgegen, die eine Verbesserung der ökologischen

Abbildung 11

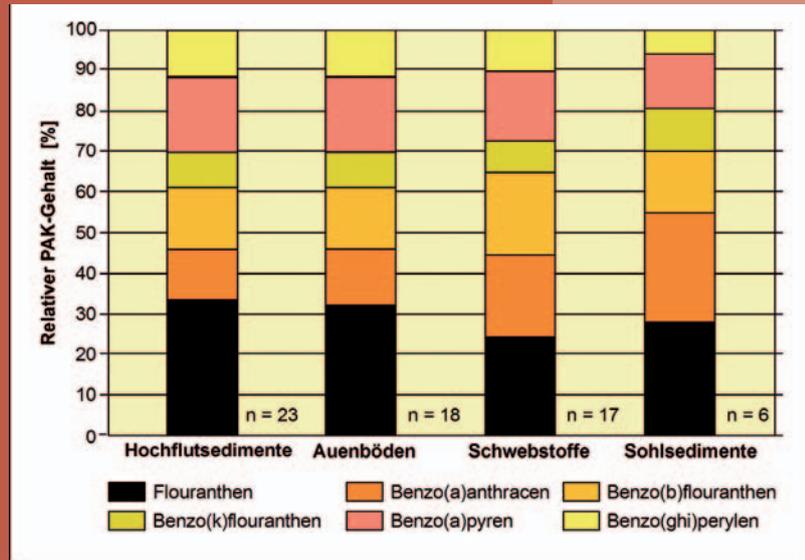
„Ende der Vorstellung“ in Dresden 2002.





Abbildung 12  
Mit Bodenmaterial aus einem Erosionsereignis wurde diese Unterführung mitsamt der Straße verschüttet. Die Straße wurde nachträglich wieder frei geräumt.

Abbildung 14  
Relative Gehalte an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) aus Fluss- und Auensedimenten. Das Substanzmuster zeigt für Flusssedimente (Schwebstoffe und Sohl sedimente) die gleiche Zusammensetzung wie für Überflutungsflächen (Hochflutsedimente und Auenböden), was den Eintrag in die Auen durch Hochwässer belegt (Moldenhauer 1996).



Qualität der Gewässer vorschreibt. Bei extremen Hochwasserereignissen, die im Trend zunehmen werden, werden mithin nicht nur Infrastruktureinrichtungen zerstört (Abb. 13), sondern es kommt zur Ablagerung teilweise mächtiger Sedimentschichten. Geomorphologische Untersuchungen zeigen (Moldenhauer 1996), dass diese Sedimente oftmals mit Schadstoffen belastet sind, die bei

landwirtschaftlicher Nutzung der Auen in die Nahrungskette gelangen. Es muss damit gerechnet werden, dass sich diese Effekte künftig verstärken (Abb. 14).

Die geomorphologische Systemanalyse ist ein unabdingbarer Schritt, Schadensprognosen zu erstellen und Präventionsmaßnahmen einzuleiten. So werden z.B. in den meisten

Foto: F. Haubold

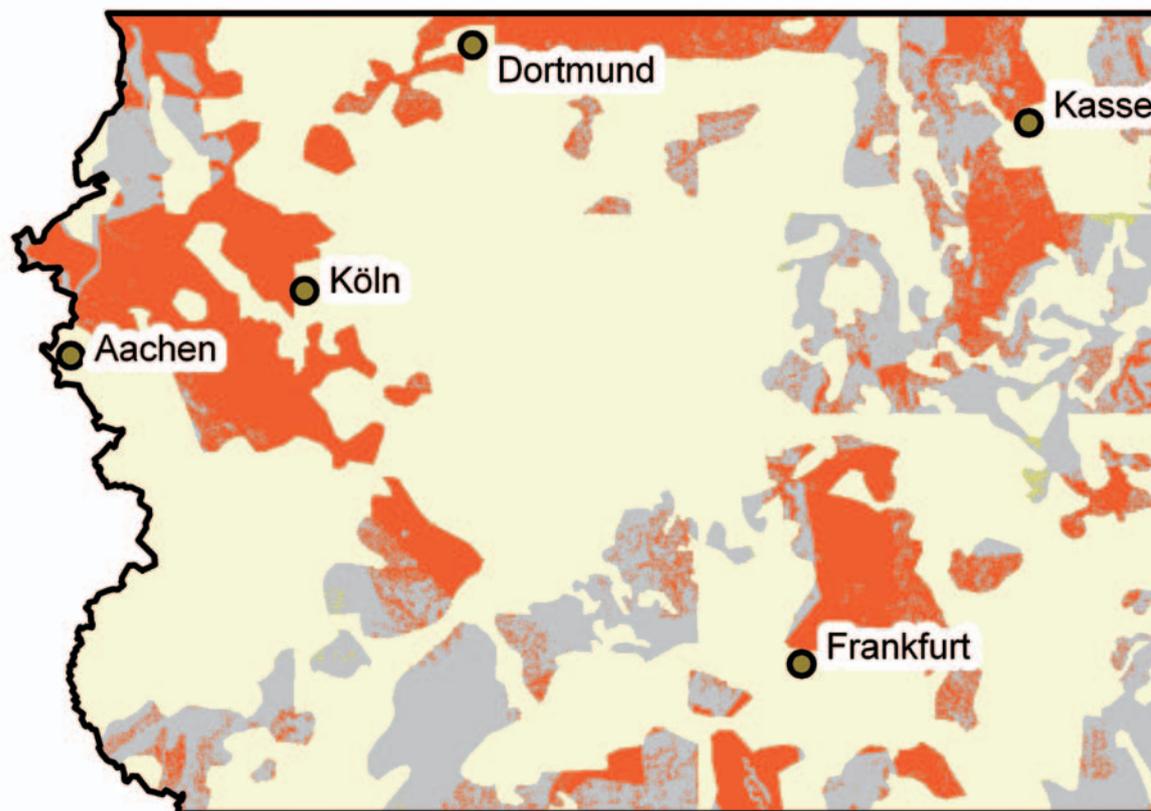
Abbildung 13  
Hochflut in Dresden 2002 mit erheblicher Schädigung städtischer Einrichtungen.



landwirtschaftlich intensiv genutzten Lösslandschaften zwischen Aachen und Görlitz, die heute bereits von starker Bodenerosion betroffen sind, durch die prognostizierte Veränderung der Niederschlagsintensität die jährliche Erosionsleistung schätzungsweise um den Faktor 1,5 zunehmen (Wagner & Faust 2008). Eine geomorphologische Gefahrenanalyse erlaubt es, Regionen zu kennzeichnen, die in Zukunft von solchen Prozessen in besonderer Weise betroffen sein werden. In Abb. 15 sind die Eingangsparameter Hangneigung, Ausgangsgestein und Bodenart sowie die Erosivität der Niederschläge in ihrem Zusammenwirken im Hinblick auf Bodenerosionsvorgänge räumlich erfasst. Der Vergleich des Ist-Zustandes mit den prognostizierten Abtragswerten der Jahre 2071 – 2100 zeigt in roter Signatur die landwirtschaftlich genutzten Regionen mit deutlich erhöhter Gefahr.

## AUSBLICK

Die geomorphologische Forschung wird sich in Zukunft zunehmend mit den starken Veränderungen der Formen und Prozesse an der Erdoberfläche, die durch den Klimawandel und die daraus resultierenden veränderten Landnutzungsmuster hervorgerufen werden, wissenschaftlich auseinandersetzen. Schon heute sind diese Veränderungen auf der Erdoberfläche sichtbar und betreffen vielfach unmittelbar den Lebensraum des Menschen. Katastrophale Ereignisse wie Sturmfluten, Waldbrände und Extremhochwässer werden in der Regel stärker wahrgenommen als schleichende Degradationsprozesse und fließen daher eher in die Schadensbilanzierungen der Rückversicherer ein. Die schleichende Landschaftsdegradation durch den Klimawandel, insbesondere der großflächige Bodenabtrag, ist jedoch in ihren Konsequenzen nicht minder katastrophal und muss in Zukunft stärker Berücksichtigung finden. Geomorphologisches



## Veränderung der Gefährdung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

- Zunahme der Gefährdung
- gleich bleibend
- Abnahme der Gefährdung
- nicht landwirtschaftlich genutzt

Abbildung 15  
Veränderung der Gefährdung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in der mitteleuropäischen Bördenlandschaft. Rot markierte Gebiete werden auf Basis der IPCC Klimaszenarien in Zukunft durch Bodenerosion deutlich stärker betroffen sein. Hellgrüne Flächen sind derzeit unter Waldnutzung und fließen in die Modellierung nicht ein (Wagner & Faust 2008).

Expertenwissen erlaubt es, z.B. auf der Grundlage von Satellitenbildinformationen, Regionen zu identifizieren, die durch geomorphologische Veränderungen betroffen sind und die durch den Klimawandel verstärkt Schadensbilder zeigen werden. Für Regionen mit hohem zukünftigen Schadenspotential müssen in besonderer Weise Strategien entwickelt werden, die folgende Kernbereiche umfassen:

#### Empirische Analyse

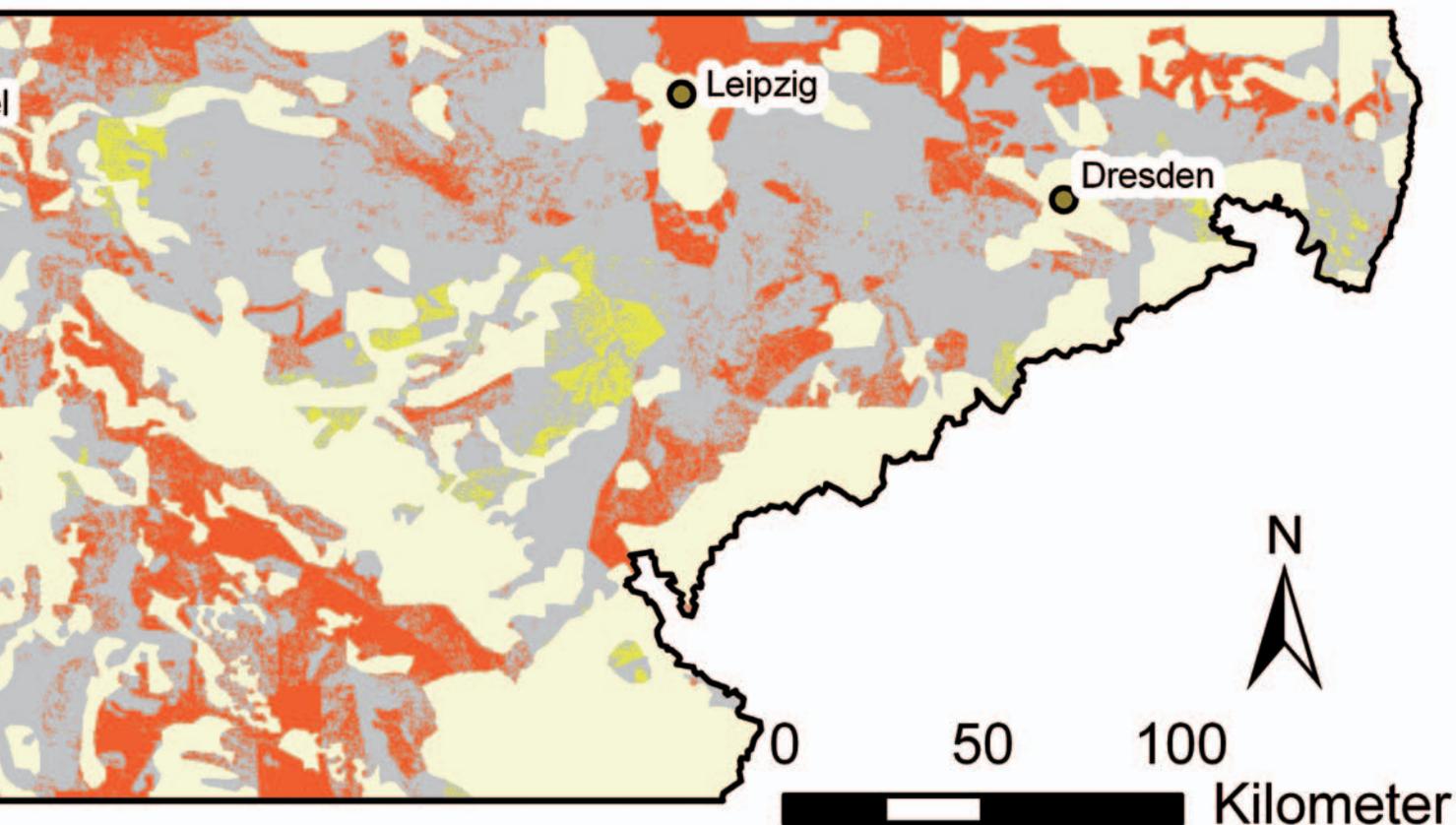
- Rekonstruktion reliefformender Prozesse mit Hilfe von Geoarchiven und historischen Quellen, da die Zeitskalen, in denen aktuelle Prozesse beobachtet werden, zu kurz sind, um eine ausreichende Signifikanz über langfristige Prozessmagnituden und –frequenzen zu gewinnen (Dikau 2004).
- Messen und Bewerten von klimagesteuerten geomorphologischen Prozessen und Prozessfolgen (aktualistischer Ansatz, geomorphologische Gefahrenanalyse).

#### Modellierung

- Prognose von klimagesteuerten, geomorphologischen Prozessen mit Hilfe von numerischen Modellen, um eine belastbare Datengrundlage für Zukunftsszenarien zu liefern.

#### Umsetzung

- Präventives Eingreifen in geomorphologische Prozess-Reaktionssysteme, um Klimafolgeschäden zu minimieren. Die Geomorphologie verfügt hierbei über weitreichende Erfahrungen, um in sämtlichen Landschaftseinheiten mit ihren naturräumlichen Besonderheiten adäquate Maßnahmen ergreifen zu können.



**Landwirtschaftlich genutzten Flächen**

**bleibende Gefährdung**

**Landwirtschaftlich genutzte Fläche**

**— Untersuchungsgebiet**

Die terrestrischen Ökosysteme sind die Basis für die Sicherung der menschlichen Lebensgrundlage. Durch Landnutzung und Landnutzungswandel übt der Mensch nachhaltig Einfluss auf die Ökosysteme aus. Die Analyse der durch den Menschen ausgelösten und beeinflussten reliefbildenden Prozesse sowie die qualitative und quantitative Erfassung ihrer Auswirkungen auf die Landschaft und deren Entwicklung ist eine Aufgabe geomorphologischer Forschung. Das Augenmerk gilt dabei sowohl aktuellen Prozessen als auch jenen, die längerfristig zu Veränderungen führen und meist nicht durch einfache Kausalitäten zu beschreiben, sondern vielmehr durch nichtlineare Wirkungszusammenhänge und Schwellenwerte gekennzeichnet sind. Für deren Verständnis ist die Kenntnis der zeitlich und räumlich stark variierenden Steuergröße Landnutzung eine wesentliche Voraussetzung.

Die ersten gezielten Eingriffe des Menschen in die natürlichen Ökosysteme lassen sich bis in das Neolithikum mit dem Übergang von der primär aneignenden zu einer produzierenden Wirtschaftsweise zurück verfolgen. Durch Rodungen zur Schaffung von Anbauflächen für die Erzeugung von Nahrungsmitteln werden die Umweltbedingungen nachhaltig verändert. Dieser dramatische Umbruch ereignete sich in Mitteleuropa vor etwa 7.500 Jahren, während er in anderen Regionen, beispielsweise im Bereich des fruchtbaren Halbmonds, bereits wesentlich früher einsetzte.

In der Folgezeit erforderte vor allem die wachsende Bevölkerung in Mitteleuropa, die landwirtschaftlichen Erträge zu erhöhen. Produktionssteigerungen wurden nicht nur durch die Erweiterung der Anbaufläche, sondern auch durch innovative Technologien und veränderte Landnutzungsformen ermöglicht. So wurde in der Bronze- und Eisenzeit der Hakenpflug zunehmend vom Wendepflug verdrängt. Im frühen Mittelalter wurde die Dreifelderwirtschaft eingeführt, was Veränderungen der Feldflur zur Folge hatte. Demographische Veränderungen führten zu Verschiebungen in der Freiland-Wald-Verteilungen, indem die landwirtschaftliche Nutzfläche in Zeiten hohen Bevölkerungswachstums auf Marginal-

standorte mit Waldbedeckung ausgeweitet wurde, während bei Bevölkerungsrückgang, beispielsweise durch Kriege, Pest oder Hungersnöte, die Waldfläche zunahm. In der Neuzeit, besonders seit der Industrialisierung, ist einerseits eine weiter zunehmende Intensivierung und Mechanisierung der Landwirtschaft festzustellen, andererseits werden landwirtschaftliche Flächen aus der Produktion genommen und erfüllen andere Funktionen.

Foley et al. (2005) fassen diese nur kurz umrissene Entwicklung in einem konzeptionellen Diagramm (Abb. 16) zusammen. Es zeigt die prozentuale Verteilung unterschiedlich genutzter Flächen in einer zeitlichen Entwicklung. Ausgehend von den natürlichen Umweltbedingungen kommt es zu ersten Rodungen. Es folgen Subsistenzwirtschaft und kleinbäuerliche Betriebe, bevor es zur Intensivierung und zugleich zu einem Rückgang der landwirtschaftlich genutzten Flächen zugunsten von Siedlungen und anderen Nutzungsarten kommt. Nicht alle Regionen der Erde durchlaufen alle Stadien der dargestellten Entwicklungsreihe in gleicher Weise und einige befinden sich heute noch in einem der frühen Stadien, während in anderen Regionen die skizzierte Entwicklung und die damit verbundene Nutzung bzw. Übernutzung der natürlichen Ressourcen ein Ausmaß erreicht hat, das die Regenerationsfähigkeit der Ökosysteme übersteigt.

Veränderungen der Landnutzung mit dem Ziel, die Produktivität der bewirtschafteten Flächen zu steigern und längerfristig die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen für die Nahrungs- und Energiegewinnung zu gewährleisten, haben Auswirkungen auf den Sediment- und Wasserhaushalt sowie die bio-geochemischen Stoffkreisläufe. Letztere betreffen vor allem den Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkreislauf. Ruddiman (2003) sieht in den Rodungen seit dem Neolithikum die Ursache für nachhaltige Veränderungen des CO<sub>2</sub>-Haushalts mit erheblichen Einflüssen auf die Klimaentwicklung. Er bezeichnet daher den gesamten Zeitraum vom Neolithikum bis heute als Anthropozän. Geprägt wurde der Begriff „Anthropozän“ allerdings von Paul Crutzen (Crutzen & Stoermer 2000) für die wesentlich

kürzere Phase seit der Industrialisierung, da die Eingriffe des Menschen in die Umwelt seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 19. Jahrhunderts eine neue Qualität erlangt haben. Diese spiegeln sich nicht nur in dem globalen Klimawandel wider. Die Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche und die Intensivierung der Landwirtschaft zur Steigerung der Nahrungsmittelproduktion und für den Anbau von Nutzpflanzen zur Energiegewinnung haben in Verbindung mit der permanent wachsenden Siedlungsfläche dazu geführt, dass naturnahe Ökosysteme immer weiter zurückgedrängt werden.

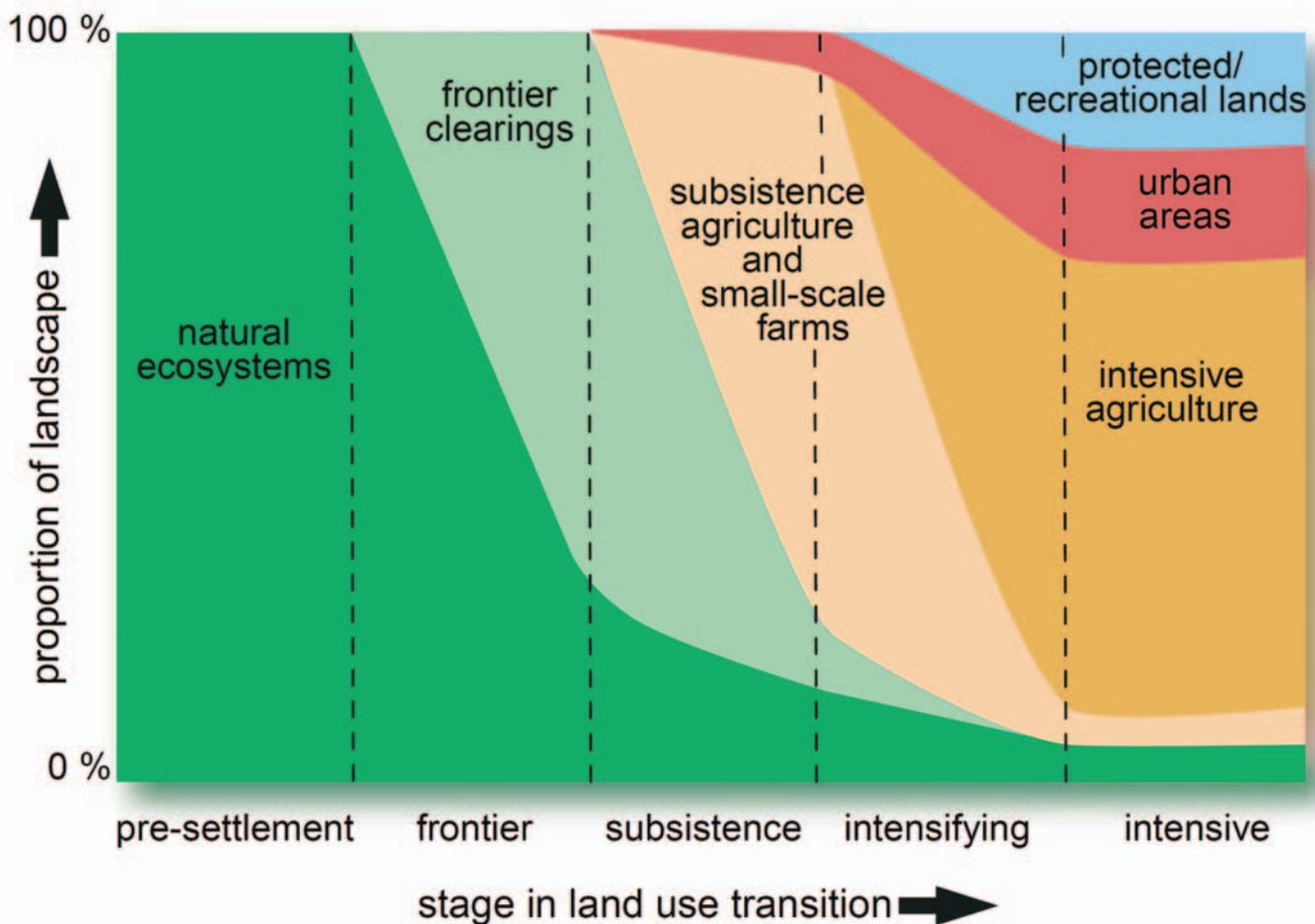
Eine Kernaussage des „Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report“ (MASR 2005) ist, dass die Menschen in den letzten 50 Jahren die Ökosysteme schneller und in weit größerem Maße verändert haben als sie dies in vergleichbaren Zeiträumen zuvor getan haben.

Diese Entwicklung mit einer rasanten Zunahme des Kulturlandes auf Kosten natürlicher bzw. quasi-natürlicher Flächen setzt nach Leemans (1999) etwa um 1850 ein und nimmt bis heute an Intensität stark zu (Abb. 17). Die weltweite Ackerfläche hat sich seither von 6% auf 12% verdoppelt, noch stärker

ist der Anteil der Weideflächen gewachsen. Er stieg von 5% auf 25% und nimmt somit den größten Teil der menschlich beeinflussten Fläche ein. Im gleichen Zeitabschnitt ist der Wald von 42% auf 35% zurückgegangen. Nach Angaben der „Food and Agriculture Organization (FAO 2006) ist davon nur ein gutes Drittel als Primärwald einzustufen, über die Hälfte dagegen wird als bereits modifizierter Naturwald bezeichnet. Der globale Nettoverlust liegt je nach Studie und Walddefinition zwischen 7,3 und 9,4 Mio. ha pro Jahr. Diese globalen Daten zeigen sich auf regionaler Ebene erheblich differenzierter. Lambin et al. (2006), die die Studien HYDE, SAGE, LUC-MA und BIOME 300 auswerten, belegen die rasante Zunahme von Weide und Ackerland während der letzten 20 Jahre in Mittel- und Südamerika und Südostasien, verbunden mit einer extrem hohen Entwaldungsrate. In den gemäßigten und nördlichen Breiten einschließlich Chinas sind hingegen Waldzuwachs durch Aufforstung und natürliche Sukzession zu beobachten. Somit wird klar, dass Acker- und Weideflächen bezüglich der Veränderung der aktuellen Geomorphodynamik und hier besonders der Bodenerosionsprozesse im Vordergrund der Betrachtung stehen.

Abbildung 16

Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Landnutzung seit Beginn der Agrargesellschaften (Foley et al. 2005).



?

Die Beseitigung der natürlichen Vegetation und der Verlust bzw. die räumliche Umverteilung von Nährstoffen finden ihren Ausdruck vor allem in der Degradierung und Erosion der Böden, in Veränderungen des Wasserhaushalts und einem Verlust an Biodiversität. Wir möchten hier nicht die häufig in der Geomorphologie geführte Diskussion über die im Holozän vermehrt klimagesteuerten Abtrags- und Sedimentationsprozesse oder den sogenannten Human Impact vertiefen. Es lassen sich für beide Ansichten gut begründete Regionalbeispiele finden. Trotzdem erscheint es uns wichtig, dass wir nach den Bilanzen von Hooke (2000) davon ausgehen müssen, dass die globale Sedimentproduktion in den letzten 8.000 Jahren von schätzungsweise weniger als 1 Mrd. auf mehr als 100 Mrd. t pro Jahr angestiegen ist, sich also um zwei Größenordnungen erhöht hat. Rund zwei Drittel davon entfallen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen und damit auf das von uns fokussierte Problem der Bodenerosion als Folge nicht angepasster Landnutzung sowie einem Landnutzungswandel von tendenziell naturnäheren zu intensiver genutzten Flächen. Die mit der Bodenerosion verbundenen Nährstoffverluste sowie Veränderungen der Bodenstruktur und des Wasserhaushalts mindern das Ertragspotenzial der betroffenen Flächen. Neben diesen sogenannten On-Site Schäden, also Schäden, die an dem erodierten bzw. degradierten Standort auftreten, lassen sich Auswirkungen der durch eine unangepasste Nutzung ausgelösten Prozesse auch fern der erodierten Standorte

(Off-Site Schäden) feststellen. Das erodierte Bodenmaterial wird mehr oder weniger weit transportiert und schließlich an anderer Stelle temporär oder langfristig abgelagert. Davon können Infrastruktur-Einrichtungen wie Stauseen, Verkehrswege oder Brücken beeinträchtigt werden. Insbesondere in den Trockengebieten, in denen die Wasserversorgung sowohl für die Landwirtschaft als auch für das Trinkwasser im hohen Maße von der Funktionsfähigkeit der Staureservoirs abhängt, ist die Siltation eine ernstzunehmende Bedrohung. Unbeobachtet, weil unter dem Wasserspiegel liegend, sedimentieren Bett- und Suspensionsfracht der einmündenden Gerinne. Dadurch wird immer mehr Stauvolumen vernichtet. Das Problem wird erst in Trockenjahren offensichtlich. Es stellt sich die Frage: Wohin mit den nicht selten schadstoffbelasteten Sedimenten? Das Ausbaggern und Zurückbringen auf die durch Erosion geschädigten Flächen wird aufgrund der Materialmenge und des finanziellen Aufwands selten in Betracht gezogen. Häufig erscheint die Erhöhung der Staumauer und die Übertragung des Problems auf die nächste oder übernächste Generation der leichteste, manchmal auch der einzige Weg. In Gebirgen und entlang von Gerinnen werden so weiterhin Verkehrswege überschüttet, Übergänge und Brücken nicht selten weggerissen. Während im ersten Fall häufig feinkörniges Sediment zur Ablagerung kommt und den Standort nur kurzfristig schädigt, geht die zerstörerische Kraft im zweiten Fall fast immer von größerem Material und Treibgut aus. Verblockung und Durchbruch,

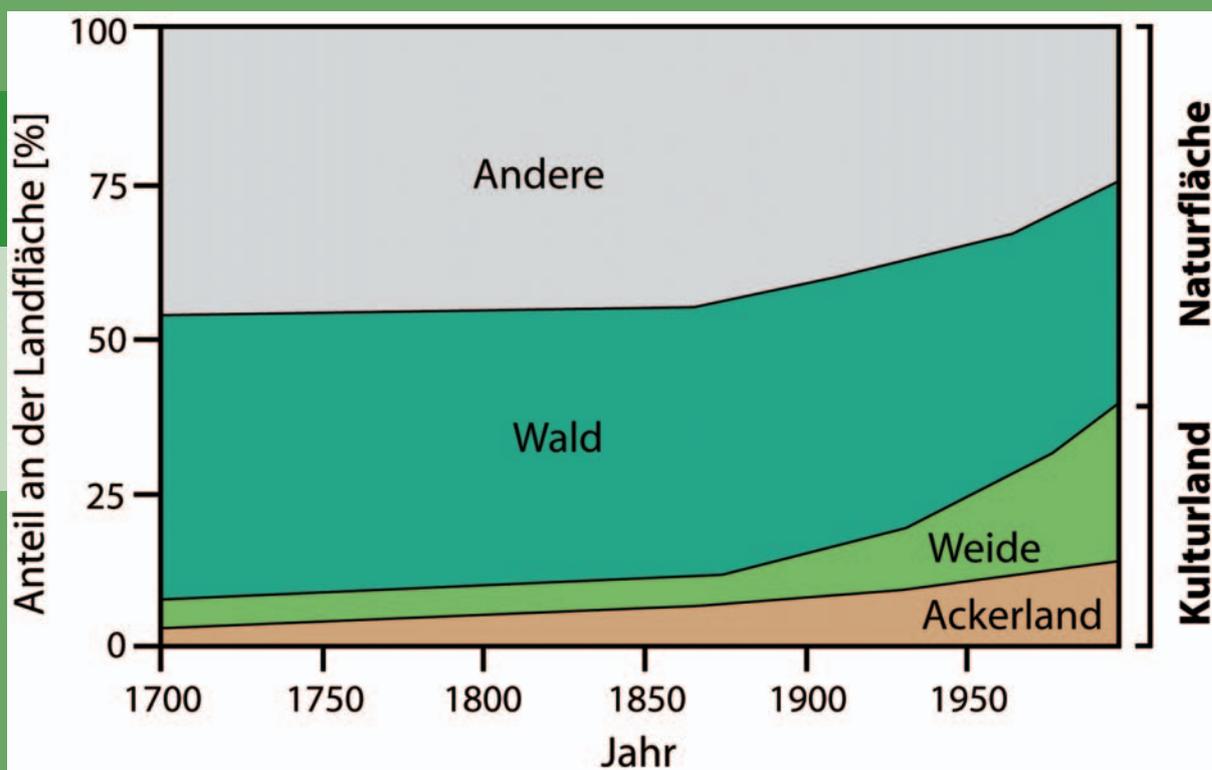


Abbildung 17  
Geschätzte Veränderungen der globalen Landoberfläche 1700-1995 (Anteil an der gesamten Landoberfläche (Leemans 1999)).

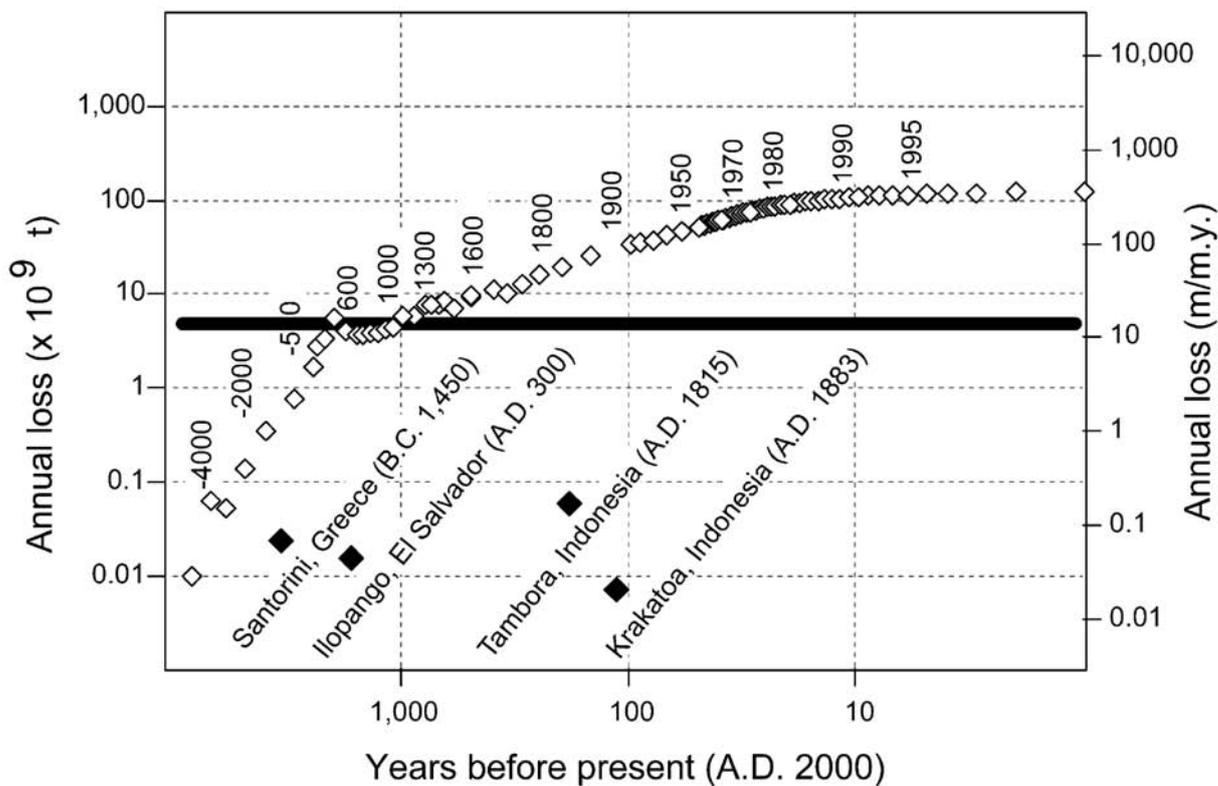


Abbildung 18  
Historische Bodenerosionsraten nach den Daten aus Hooke (2003) (offene Raute). Zum Vergleich sind den Daten einiger großer Vulkaneruptionen (schwarze Raute) dargestellt. Die schwarze Linie repräsentiert die Langzeitdenudationsrate von 24 mm pro 1.000 Jahre (Wilkinson et al. 2005).

Fundamentunterspülung und Auskolkung sind die häufigsten Ursachen für empfindliche Störungen des Personen- und Warentransfers, welcher gerade nach sintflutartigen Niederschlägen in den betroffenen Regionen hoch ist.

Ferner gelangen mit dem Sediment verlagerte Schadstoffe in die Flüsse, was zur Beeinträchtigung der Wasserqualität führt. Überflutungen der Flussauen während Hochwasserereignissen haben dann die Kontamination der Böden und Sedimente zur Folge. Sofern die Schadstoffe bis ins Meer gelangen, können küstennahe Ökosysteme geschädigt werden. Da die Ablagerung der Sedimente an unterschiedlichen Lokalitäten entlang der Transportpfade erfolgt und es durch die Zwischenlagerung in temporären Sedimentspeichern zu Verzögerungen im Transportgeschehen kommen kann, sind bei der Betrachtung von Erosions- und Sedimentationsprozessen und deren Auswirkungen auf den Stoffhaushalt die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen zu berücksichtigen. Zusammen mit dem System innewohnenden Schwellenwerten bedingen sie ein nichtlineares Verhalten der Sedimente entlang der Sedimentkaskade vom Erosionsstandort bis zum Verlassen des Einzugsgebietes, d.h. bis zur Mündung (Dikau 2006).

Anhand von vier Beispielen sollen im Folgenden exemplarisch Probleme aufgezeigt werden, die aus den gegenwärtigen Landnutzungsänderungen und solchen in der Vergangenheit resultieren und mit geomorphologischer Expertise zu bearbeiten sind.

### HOTSPOT LÖSSLANDSCHAFTEN

#### Die fruchtbaren Bodenressourcen Mitteleuropas schwinden durch menschliche Übernutzung

Die Lösslandschaften Mitteleuropas stellen ein einzigartiges Erbe der Eiszeiten dar. Entstanden sind sie infolge gewaltiger Staubstürme, bei denen feinste Gesteinspartikel aus dem Vorland der Gletscher ausgeweht und bis weit in die Mittelgebirge hinein transportiert wurden. Dort, wo dieser Lössstaub in sehr großer Mächtigkeit abgelagert wurde, finden sich heute die als besonders fruchtbar bekannten Gäu- und Bördenlandschaften. Aber auch andernorts führen die kaltzeitlichen Lössbeimengungen im oberflächennahen Untergrund zu einer deutlichen Verbesserung der Standortverhältnisse.

Löss bildet aufgrund seiner guten physikalischen Eigenschaften ein ausgezeichnetes Substrat für die Bodenbildung. Er ist porös, verfügt daher über ein gutes Wasserhaltevermögen und ist andererseits aber auch ausreichend durchlüftet. Böden aus Löss sind meist tiefgründig, gut drainiert, leicht zu bearbeiten und nährstoffreich, weshalb sie gute Ernten ermöglichen. Wird jedoch das Bodengefüge zerstört, neigen die nur mäßig verfestigten Lössablagerungen zur Abspülung und Verschwemmung. Insbesondere auf vegetationsfreien und stärker geneigten Flächen besteht daher immer die Gefahr der Bodenerosion.

Viele geomorphologische und bodenkundliche Untersuchungen, die sich in den letzten Dekaden mit dem Problem der Bodenerosion beschäftigt

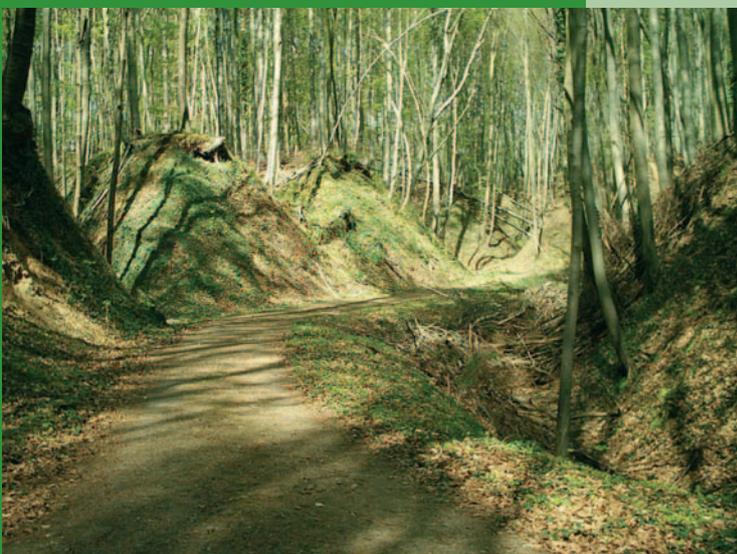


Abbildung 19  
Durch eng gescharte Runsen zerschnittenes  
Lösshügelland im Bergsträsser Odenwald.

haben, zeigen, dass durch die langandauernde und teilweise recht intensive landwirtschaftliche Nutzung faktisch alle Lössgebiete in Mitteleuropa von mehr oder weniger starken Erosionsprozessen betroffen sind. Dabei begünstigt nicht nur der Umstand, dass Ackerflächen zeitweilig brachliegen, die Bodenerosion, sondern auch das notwendige Pflügen der Felder. Vor allem durch diesen wiederholten mechanischen Eingriff werden die günstigen bodenphysikalischen Eigenschaften derart negativ verändert, dass es bei starken Niederschlägen zu Oberflächenabfluss und damit verbunden zu unnatürlich hohen Bodenabtragsraten kommt (Bork et al. 1998).

Hierin offenbart sich ein nur schwer lösbares Dilemma. Einerseits ist der Mensch zwingend auf die Nutzung der Ressource Boden angewiesen, andererseits zerstört er sie durch eben diese Nutzung. So wird die Schaffung immer neuer Ackerflächen notwendig, deren Böden nun ebenfalls Degradationsprozessen unterliegen. Diese negativ rückgekoppelte Kausalkette, die durch den wirtschaftenden Menschen in Gang gebracht wird, mündet schließlich in einer unumkehrbaren Veränderung ganzer Ökosysteme. Sie wird von Bork et al. (1998: 31) deshalb recht treffend als „Mensch-Umwelt-Spirale – Das Bodensyndrom“ bezeichnet. Dieser Ursachenkomplex ist mittlerweile in vielen Details recht gut erforscht und es zeigt sich, dass durch geeignete Schutz- und Gegenmaßnahmen zahlreiche negative Einflüsse auf den Boden ganz oder zumindest teilweise kontrolliert werden können. Das grundlegende Wissen um diese Zusammenhänge ist hingegen nicht neu. Auch in

der Vergangenheit wurde schon mit einfachen Mitteln versucht, die Bodenerosion einzudämmen. So wurden beispielsweise steile Hänge terrassiert oder abgeschwemmtes Bodensediment zurück auf die Felder getragen (vgl. Reutter 1969). Derartige Maßnahmen waren von wechselndem Erfolg gekrönt, wofür ganz verschiedene Ursachen verantwortlich sind.

Unter einem historischen Blickwinkel erweist sich die Bodenerosion in Mitteleuropa als höchst diskontinuierlich verlaufender Prozess, bei dem sich für die letzten Jahrtausende mehrere Phasen verstärkter Erosion identifizieren lassen. Sie können entweder mit klimatischen Schwankungen, geänderten Landnutzungspraktiken oder gesellschaftlichen Umbrüchen in Verbindung gebracht werden. Als Ursachen erscheinen damit einerseits natürliche, vom Menschen nicht zu beeinflussende Ereignisse wie extreme Witterungsverläufe mit katastrophalen Niederschlägen. Andererseits kommen aber auch die Folgen sozialer Veränderungen wie Kriegseinwirkungen oder technologische Neuerungen in Betracht. Die Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen stellen sich schließlich in Abhängigkeit von den naturräumlichen Gegebenheiten recht unterschiedlich dar.

In gering reliefierten Beckenlandschaften wie beispielsweise der Wetterau konnte Houben (2008) belegen, dass infolge der sieben Jahrtausende währenden Pflugtätigkeit Bodenerosion als ein ubiquitäres Phänomen anzusehen ist. Das erodierte Bodenmaterial wurde indes nicht sehr weit transportiert. Damit ist zwar der natürlich Bodenaufbau mit seinen vorteilhaften Eigenschaften unwiederbringlich verloren, aber das lössbürtige Bodensediment befindet sich im Wesentlichen noch an Ort und Stelle, womit eine landwirtschaftliche Nutzung dieser Flächen, allerdings unter Einsatz von Kunstdünger, auch künftig möglich sein wird.

Gänzlich anders gestalten sich die Verhältnisse in den tieferen Lagen der Mittelgebirge, wo der Löss häufig selbst relativ steile Talhänge überkleidet. Seit der römischen Kaiserzeit, spätestens aber seit dem Mittelalter wurde auf vielen dieser vormals bewaldeten und eher schwierig zu bearbeitenden Standorte Ackerbau betrieben. Sofern sie heute nicht als Grünland genutzt werden, sind sie durch forstliche Maßnahmen wiederbewaldet. Vielerorts sind diese Wäldervon auffälligen, manchmal bis über zehn Meter tiefen Schluchten durchzogen. Solche als Runsen oder Gullies bezeichneten Hohlformen

sind eine Leitform der linearen Bodenerosion und weltweit typisch für Lösslandschaften. Durch die Aufforstung konserviert, sind sie heute nicht nur Beleg für die ehemals weite Verbreitung der Bodenerosion im Mittelgebirge, sondern auch für die Schwere der aufgetretenen Schäden (Abb. 19). Die Aufgabe der Flächen zeigt, dass eine Melioration mit den früher verfügbaren Mitteln offenbar unwirtschaftlich oder nicht möglich war (Dotterweich 2008).

Der relative Waldreichtum in den Mittelgebirgsregionen ist damit teilweise eine unmittelbare Folge der exzessiven Bodenerosion in der Vergangenheit. Für eine landwirtschaftliche Nutzung bleiben viele solcher schwer geschädigten Gebiete wohl verloren, aber auch ihre forstwirtschaftliche Inwertsetzung erweist sich unter dem Aspekt gesteigerter Ökonomie zunehmend als problematisch. Aufgrund des schwierigen Geländes und kleinräumig extrem wechselnder Standorteigenschaften ist eine technisierte Forstwirtschaft unrentabel. Daher werden mancherorts sogenannte Naturwaldreservate eingerichtet, in denen sich vom Menschen ungestört ein neuer „Urwald“ entwickeln soll. Unter dem Primat der Nachhaltigkeit darf bezweifelt werden, dass derart stark degradierte Standorte eine tragfähige Voraussetzung für solche Vorhaben darstellen (Moldenhauer et al., submitted).

Die jüngere geomorphologische Forschung ist reich an Detailstudien zum dargelegten Problemkreis. Übereinstimmend lässt sich feststellen, dass der Blick in die Vergangenheit dazu verhilft zukünftige Entwicklungen abzusehen. So lässt sich aus den wissenschaftlichen Untersuchungen ableiten, dass die Gefahr der Bodenerosion in den landwirtschaftlich genutzten Lösslandschaften Mitteleuropas erneut zunehmen wird, wenn sich die mit dem Klimawandel prognostizierten klimatischen Extremereignisse häufen oder die Landnutzung, beispielsweise zu Erzeugung von Biokraftstoffen, ausgeweitet und intensiviert wird. Die einzigartige erdgeschichtliche Konstellation, die für die Entstehung von Lösslandschaften verantwortlich war, erfordert vor dem Hintergrund ihrer großen Bedeutung und ihrer Empfindlichkeit zwingend eine entsprechend starke Aufmerksamkeit bezüglich der Probleme, die sich in Zukunft stellen werden.

## HOT SPOT WEINBERGE

### Veränderungen des Wasser- und Stoffhaushaltes durch Extensivierung

Nachdem der Weinbau im Moselgebiet über 2.000 Jahre existierte, in Krisenzeiten zwar zurückgegangen war, aber bis weit ins 20. Jahrhundert hinein weite Flächen an den Steilhängen der Flusstäler Mosel, Saar und Ruwer eingenommen hat, gehen die Rebflächen seit etwa drei Dekaden dramatisch zurück (Richter 1998). Der von den Römern ererbte Steillagenweinbau mit Trockensteinterrassen und Bruchschiefersteinauflage zum Schutz vor Erosion und zur mikroklimatischen Verbesserung ist aus landschaftsökologischer Sicht eine nachhaltige Sonderkulturnutzung. Die Rebflurbereinigung seit Mitte des letzten Jahrhunderts, welche die weitgehende Mechanisierung erlaubte, erhöhte die Erosionsanfälligkeit und sorgte für zahlreiche kleine und mittlere Hangrutschungen nach Starkregen und bei Schmelzwasserüberschuss. Wie die längste Erosionsmessreihe Europas in den Weinbergen von Mertesdorf bei Trier eindrücklich zeigt und neuere Beobachtungen bestätigen, sind vor allem neu angelegte und hierbei frisch tiefgepflügte (rigolte) Rebflächen erosionsanfällig. Hier kommt es zu extrem hohen Abtragsraten. Aufkommende Vegetationsbedeckung und der Steinmulcheffekt als Ergebnis der Feinmaterialauspülung und der residualen Anreicherung von Steinen an der Oberfläche lassen die Abtragswerte danach sinken (Richter 1991).

Abbildung 20  
Weinbergsflächen im Arbeitsgebiet Waldrach (Ruwertal).

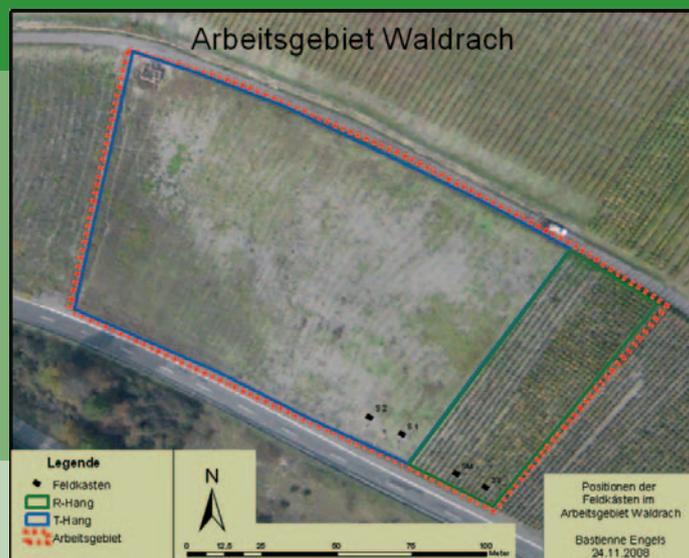




Abbildung 21

Blick auf das Arbeitsgebiet Waldrach: Im Vordergrund die gerodete Freifläche, im Hintergrund der Weinberg. Das Foto zeigt Testplots und Feldkästen zur Messung des Oberflächenabflusses und der Bodenerosion.

Bedingt durch die sozioökonomischen Veränderungen in den Winzerfamilien werden heute, zumeist mit dem Generationswechsel, vermehrt Rebflächen aufgegeben, vor allem diejenige, die zuvor in kleinbäuerlicher Nebenerwerbsrebwirtschaft bei geringem Mechanisierungsgrad in den extremen Steillagen bewirtschaftet wurden. Mittelfristig ist davon auszugehen, dass nur die mechanisiert bearbeitbaren Flächen mit Weinreben erhalten bleiben. Die aufgelassenen Flächen werden aber nicht einer weitgehend natürlichen und unter den herrschenden Klimabedingungen schnellen progressiven Sukzession überlassen, sondern aus Sorge vor Schimmelpilzbefall und Vogelfraß gerodet. Alle Weinstöcke werden mitsamt der Wurzel herausgerissen und von der Fläche entfernt. Dieses Rebbrachen-Management führt entgegen erster Annahmen innerhalb des ersten Jahres zu extrem hohem Oberflächenabfluss und Abtragsraten.

Mit experimentellen Messverfahren, vorrangig Plotmessungen, Feldkästen, Niederschlagsimulationen und Infiltrationsmessungen, werden derzeit Oberflächenabfluss- und Abtragsraten und die gelöste Stofffracht unter den standörtlich kleinräumig variierenden Bedingungen (Regionalklima, Relief, Bodentyp) auf unterschiedlichen Landnutzungen quantifiziert (Abb. 20 & 21). Diese Daten dienen als Grundlage für die physikalisch basierte Bodenerosionsmodellierung zur Erosionsprognose auf unterschiedlichen Maßstabsebenen vom Hang bis zum Kleineinzugsgebiet. Aktuell untersucht eine Forschergruppe in Trier das Oberflächenabflussverhalten und den Bodenabtrag auf einer gerodeten und gefrästen, ehemaligen Weinbergsfläche und dem direkt benachbarten, konventionell bearbeiteten Weinberg (Abb. 22 & 23). Die Datenreihe von vier eingebrachten Feldkästen zeigt von März bis September vergangenen

Jahres sowohl beim Oberflächenabfluss als auch beim Bodenaustrag deutliche Unterschiede. Mit insgesamt 2,87 kg zu etwa 400 g weist die Freifläche im Zeitraum vom 01.03. bis zum 16.09.08 einen 7-mal höheren Bodenaustrag und mit einem Oberflächenabfluss von insgesamt 206 l zu 4,6 l eine 44-mal höhere Abflussmenge auf. Diese Unterschiede der Gesamtraten lassen sich auch für fast alle Einzelzeitschritte erkennen. Beim stärksten Ereignis am 03.07.08 mit 26,7 mm Niederschlag kommen sie mit 4,1 g zu 713,8 g und 0,36 l zu 28,7 l noch deutlicher zum Ausdruck. Bei der erwarteten Zunahme von Starkregen im Zuge des Klimawandels könnten sich solche erosiven Ereignisse häufen.

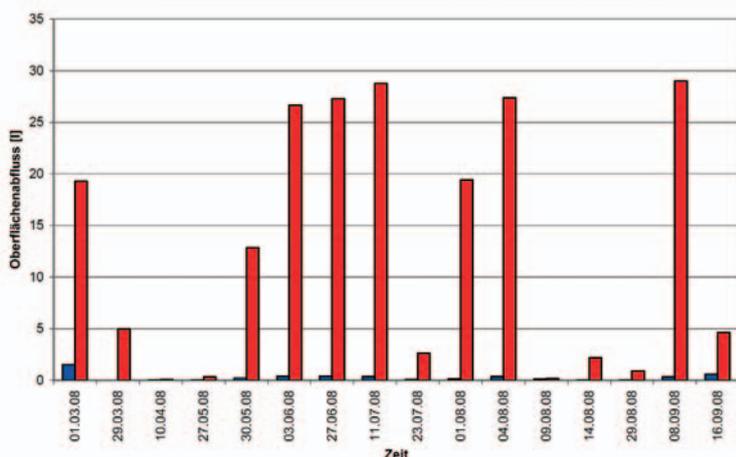
Zu beachten ist, dass die Absolutwerte der Einzelzeitschritte beim Bodenaustrag ab Anfang August zurückgehen. Die aufkommende Vegetation aber auch die Ausbildung von Steinpflastern reduziert die Erosionsanfälligkeit der Freifläche. Die Rodung von Weinbergen, wie sie bei der Verbrachung üblicherweise geschieht, muss daher zumindest im ersten Jahr bezüglich des Bodenabtrages und des Oberflächenabflusses als höchst problematisch beurteilt werden. Derartiger Landnutzungs- und Bearbeitungswandel führt zu gravierenden Veränderungen im Wasser- und Stoffhaushalt, den es auch auf anderen extensivierten Flächen zu untersuchen gilt.

Das dritte Beispiel eines Hot Spots führt aus Mitteleuropa in den mediterranen Raum. Seit rund vier Dekaden entwickelt sich in den Flussniederungen und Küstenhöfen Süd- und Südostspaniens, Süditaliens sowie Griechenlands ein hoch spezialisierter agro-industrieller Anbau von Frühgemüse, Obst und Agrumen, welcher der Nachfrage nach Tomaten, Paprika, Zucchini, Gurken, Erdbeeren, Pfirsichen und Aprikosen nachkommt. Basierend auf der thermischen Gunstlage im Süden Europas und unter dem flächenhaften Einsatz von Gewächshauskulturen kann das Gemüse und in Teilen auch das Obst fast ganzjährig angeboten werden. Nur wenige Wochen im Jahr können die südeuropäischen Produzenten nicht liefern. In dieser Zeitspanne werden die genannten Produkte aus dem Süden Marokkos oder Südafrika importiert. In Südeuropa wird auf künstlichen Sanddünen, zumeist sogar schon auf Bodenersatzstoffen unter dem Einsatz von modernster Bewässerungstechnik, Herbiziden und Pestiziden produziert. Horizontale und vertikale Konzentration im Bereich Verpackung, Transport und Vermarktung prägt die Vertriebsstrukturen. Die landschaftsökologischen Auswirkungen, insbesondere die Kontamination von Böden, Oberflächengewässern und die Verschmutzung der Ramblas und weiter Teile der vorgelagerten Strände mit Plastikabfällen sind seit den Arbeiten von Drescher (1995) bekannt. Während in der Vergangenheit vorrangig die leicht zu bearbeitenden Flächen in den Schwemmebenen bebaut wurden, dehnt sich aufgrund der gesteigerten Nachfrage aus Osteuropa und anhaltend hoher Preise diese

Abbildung 22 &amp; Abbildung 23

Vergleich des Oberflächenabflusses (links) und des Bodenaustrags (rechts) auf der Freifläche und auf dem Weinberg des Arbeitsgebietes Waldrach.

Vergleich des Oberflächenabflusses im Weinberg und auf der Freifläche



Vergleich des Bodenaustrages auf der Freifläche und im Weinberg

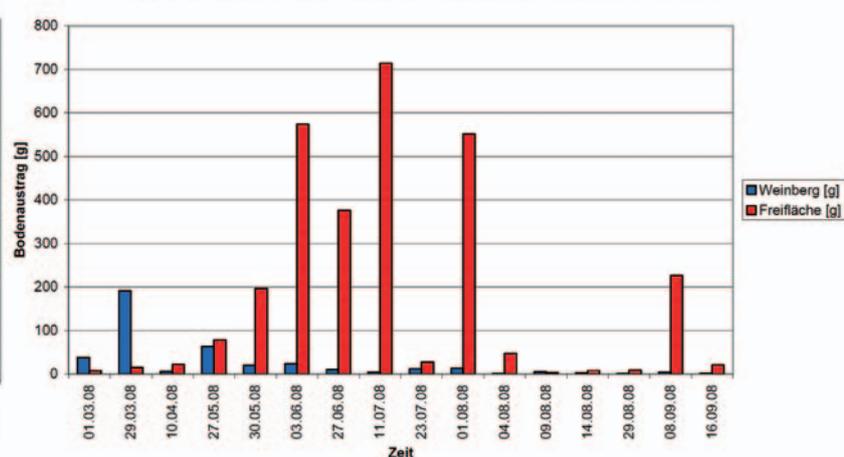




Abbildung 24  
Agroindustrielle Gemüseproduktion unter Plastikgewächshäusern in der Nähe von Adra (Ostandalusien). Im Vordergrund alte aufgelassene Ackerterrassen, im Hintergrund die geschlossen mit Gewächshäusern überbaute Schwemmebene.

Abbildung 25

Plastikgewächshäuser auf Terrassen im Küstengebirge bei Castell de Ferro (Ostandalusien). Die mit offenem Matorral bewachsenen Berghänge werden großflächig und jüngst bis in Höhen von über 400m umgestaltet.



Foto: J. Ries

intensive Anbauform auf die Hangfußbereiche und weiter auf die steil bis sehr steil geneigten Hänge der Küstengebirge aus (Abb. 25 & 26). Hierzu werden mit großen Schubraupen, teils sogar unter Einsatz von Sprengtechnik, ebene bis flach geneigte Terrassenflächen geschaffen. Deren Abraum wird auf der hangwärtigen Seite zur Verbreiterung der Anbaufläche aufgeschüttet. Es entstehen Hänge nahe dem natürlichen Böschungswinkel des Substrates mit Neigungen nicht selten über 45 Grad. Durch diese Eingriffe entstehen künstliche Landschaften mit einem hohen Maß an geomorphologischer Fragilität. Eine Befestigung oder Begrünung findet nicht statt, lediglich das zwischen den Gewächshäusern angesammelte Wasser wird über Betonrinnen abgeführt. Schon wenige Monate nach dem Bau weisen diese Böschungen Rinnengeflechte von hoher Dichte auf (Abb. 26). Auf der rückwärtigen Seite finden sich bis zu mehrere Zehner m hohe, nahezu senkrechte Felswände. Steinschlag und Rutschungen unterschiedlicher Größenordnung sind zu beobachten.

Die aktuell hohe Dynamik mit großen Abflussmengen, vor allem aber Abtragsraten übertreffen die der traditionellen Anbauflächen um ein Vielfaches. Wo die Terrassenflächen mit Innenneigung angelegt sind, ist aufgrund der veränderten boden- bzw. hydrogeologischen Verhältnisse zukünftig von größeren Massenbewegungen auszugehen.

Die Eingriffe in das Relief sind schwerwiegend und flächenhaft an der Küste verbreitet. Es ist zu befürchten, dass angesichts schwindender Wasserressourcen und unter dem prognostizierten Niederschlagsveränderungen bei gleichzeitig



Foto: J. Ries

Abbildung 26

Übersteilte Terrassen für den Invernadero-Bau bei Castell de Foro (Ostandalusien). Im Vordergrund (links unten) sind parallele Erosionsrinnen in einer Aufschüttungsböschung zu erkennen, auf der zweiten Terrasse (neben dem Plastikmüll) Erosionsrinnen im anstehenden Gestein.

steigenden Energiekosten die höchstgelegenen Flächen nicht dauerhaft in Nutzung bleiben werden. Gerade von ihnen geht aber dann die größte Gefährdung aus. Aufgrund des hohen Skelettanteils wird auch nach der Aufgabe des Anbaus mit einer Stabilisierung des Prozessgeschehens und einer natürlichen Sukzession, welche schon auf den traditionellen Anbauflächen mit kleinen Trockensteinterrassen Zeiträume von mindestens vier, weithäufiger sechs Dekaden in Anspruch nimmt, nicht zu rechnen sein.

In den Küstenabschnitten südlich von Valencia und zwischen Alicante und Murcia hat sich während der vergangenen zwei Jahrzehnte der Agrumenanbau über die Hangfußflächen bis in

Foto: A. Cerdá



Abbildung 27

Neuanlage von Orangenplantagen im Hangfußbereich des Valencianischen Küstengebirges.



Fotos: A. Cerdá



Abbildung 28  
Rinnen- und Gullyerosion (links) und Sedimentation (rechts) aus den oberhalb gelegenen Rinnen, ausgelöst durch einen torrentialen Niederschlag in wenige Jahre alten Orangenplantagen.

die Unterhangbereiche verbreitet. Die Anlage der Orangen- und Mandarinenpflanzungen erfolgt der leichteren Bearbeitung wegen oft in Hangrichtung, auf Terrassen wird weitgehend verzichtet. Hierbei wird das Relief großflächig umgestaltet, um maschinell leicht zu bearbeitende Flächen zu schaffen. Die Fruchtbäume werden auf kleinen, ca. 40 cm hohen Dämmen angepflanzt. In der dazwischen liegenden Bearbeitungsspur findet eine Verdichtung durch das Befahren statt (Abb. 27). Diese dient als Leitbahn für den Oberflächenabfluss, welcher sich bei torrentialen Niederschlägen in den Wintermonaten bildet. Es handelt sich um Flächen, die zuvor niedere bis hohe Matoralbestände aufwiesen und zum überwiegenden Teil zumindest während der vergangenen 200 Jahre nicht bzw. nicht mehr ackerbaulich genutzt wurden. Starke Bodenerosionsprozesse mit Rinnen- und Gullyerosion sowie Sedimentation am Feltrand und im Übergang zur Schwemmebene, aber auch Eintrag des Erosionsguts in die tiefer liegenden Be- und Entwässerungskanäle sind die Folge (Abb. 28). Angesichts der hohen Rentabilität des Orangenanbaus und des hohen Mechanisierungsgrades werden die Schäden in Kauf genommen.

#### HOT SPOT TROCKENGEBIETE

##### Landdegradation als Folge äolischer Dynamik

Das vierte Fallbeispiel führt an den südlichen Rand der Sahara, wo Landdegradation in Form der Desertifikation landschaftsprägend stattfindet. Die Prozesse der aktuellen Geomorphodynamik und der Vegetationssukzession unterliegen hier aufgrund der hohen Variabilität der Niederschläge großen jährlichen und saisonalen Schwankungen. Das natürliche Ökosystem der Sahelzone ist an diese Niederschlagsvariabilität weitgehend angepasst. Durch die Eingriffe des Menschen (Beweidung und Feldbau) treten aber während Dürrephasen Vegetationsdegradation und infolge dessen Bodendegradation auf.

Besonders betroffen sind Altdünen und sandige-tonige Glacis (Albert et al. 2004). Breitenkreisparallel verlaufen diese lang gestreckten Dünenzüge und bilden das äolisch geprägte Relief der Region. Die Paläodünen können weit über 100 km lang sein, bei einer Breite von zwei bis max. 10 km und einer maximalen Höhe von 20 bis 40 m über dem umgebenen Glacis bzw. der Rumpffläche (Albert et al. 1997). Sie ziehen sich als 300 bis 400 m breiter Gürtel vom Senegal bis zum Nil. Entstanden als große Längsdünenfelder wären sie im heutigen Dornstrauchsavannen- und

Trockensavannenbereich natürlicherweise fixiert und nicht anfällig für äolische Dynamik. Die Altdünen gehören heute zu den intensiv genutzten Landschaftseinheiten. Im sandigen Substrat ist Hirsehackbau, anders als im tonreichen Glacis, möglich. Aufgrund der hohen Infiltrationskapazität steht hier mehr Bodenfeuchte in der Trockenzeit zur Verfügung. Die Vegetation auf den Dünen stellt für die Viehherden des Sahel die wichtigste Futterquelle in der Trockenzeit dar. Somit sind die Altdünen sowohl mit Hinsicht auf den Feldbau als auch auf die Weidewirtschaft für die hier lebenden Menschen von zentraler Bedeutung. Die Degradationsmuster sind abhängig von der Nutzungsintensität. In siedlungsfernen und damit naturnahen Altdünenbereichen können gehölzartenreiche Gesellschaften Deckungswerte von bis zu 65% erreichen. In Siedlungsnähe unterliegen die Dünenbereiche einem höheren Nutzungsdruck. Die Degradation der Gehölzschicht ist hier weit fortgeschritten. Die Vegetation ist durch extensive Beweidung in ihrer Entwicklung stark eingeschränkt. Sukzessionsprozesse sind verlangsamt und Spülprozesse sind entsprechend stark. Die Bodenerosionsprozesse erzeugen unter den herrschenden Klimabedingungen eine irreversible Verminderung der Bodendecke, welche

Abbildung 29  
Remobilisierter Altdünenkamm mit zahlreichen kleinen sichel-  
förmigen Wanderdünen (Barchanen).

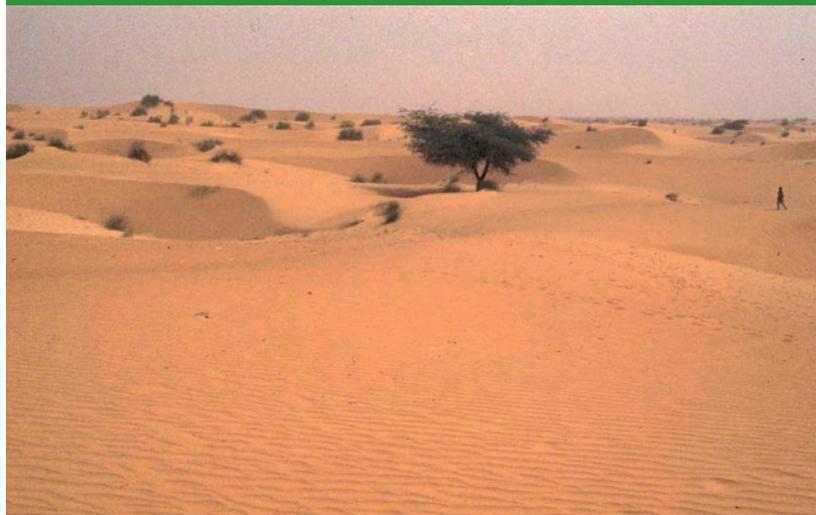


Foto: J. Ries

Schädigungen aller Bodenfunktionen, vor allem der so wichtigen Wasserspeicherfähigkeit nach sich zieht.

In den lockeren Sanden beginnt die rezente äolische Dynamik. Sie nimmt zu, wenn die Bodenkrusten aufgebrochen oder der Sand nicht durch Bodenbildung verfestigt wird. Rasch bilden sich Sekundärdünen und die nur noch lückenhafte

Abbildung 30

Der „Erg von Oursi“: Im Vordergrund aktive Wanderdünen in unmittelbarer Nähe der Siedlung Oursi im Sahel Burkina Fasos, in der Mitte das nahezu vollständig ausgetrocknete Mare de Oursi und im Hintergrund die siedlungsfernere, deutlich weniger degradierte Trockensavannenlandschaft.

Foto: J. Ries



Vegetation kann die äolischen Prozesse nicht aufhalten. Deflationswannen, Sekundärdünen und Sandakkumulation hinter kleinen Büschen sind die untrüglichen Zeichen einer Reaktivierung und Remobilisierung. In einer Region mit bis zu 500 mm Niederschlag ist dies ein eindrückliches Zeichen fortgeschrittener Degradation (Abb. 29). Das bekannteste Beispiel ist der aktive „Erg von Oursi“. Weniger deutlich erkennbar ist die äolische Dynamik auf den feldbaulich genutzten Abschnitten der Altdünen. Die Zerstörung schluffiger Aggregate durch windgetriebene springende Sandkörner oder durch Viehtritt auf den abgeernteten Feldern sind verstärkende Faktoren für die Ausblasung von Ton und Schluff und reduziert sowohl das Wasserhaltepotenzial als auch den Nährstoffgehalt.

Angesichts der aktuellen Bevölkerungsentwicklung mit Wachstumsraten zwischen 2% und 3% pro Jahr ist auch zukünftig von einer Erhöhung des Nutzungsdrucks durch Ausweitung der feldbaulich genutzten Flächen und einer Erhöhung des Beweidungsdrucks auszugehen. Bei reduzierten absoluten Niederschlagsmengen und Erhöhung der Niederschlagsvariabilität wird der Druck auf die Altdünenzüge zunehmen. Neben vereinzelt Gehölzen ist vor allem problematisch, dass die Deckungswerte in der Krautschicht nur noch max. 40% erreichen. Das endgültige Verschwinden mehrjähriger Gräser auf dem Dünenkamm, welche mit ihrem Wurzelgeflecht den lockeren Sand vor Deflation schützen, verstärkt die Prozessaktivität während der trockenen Jahreszeit erheblich. Äolische Reaktivierungen der bislang noch fixierten Altdünen und die erneute Dünenbildung betreffen dann weite Bereiche des Dünenkammes und bedrohen die Hirsefelder. Dies wird die ohnehin schwierigen Lebensbedingungen der Sahelbewohner zusätzlich erschweren. Wie schnell und in welchem Umfang eine solche Entwicklung geschehen kann, wurde am aktiven „Erg von Oursi“ dokumentiert, der zwischen 1955 und 1981 während einer Periode mehrerer Dürren bei insgesamt abnehmenden Niederschlägen von 56 auf 446 ha anwuchs (Lindkrist & Tengberg 1993).

Die angeführten Beispiele mögen einen Eindruck davon vermitteln, welche wichtige Rolle den Prozessen der Erdoberfläche für die Versorgung der wachsenden Bevölkerung zukommt und in welchem Maße der Mensch diese Prozesse durch Landnutzung und Landnutzungsänderungen steuert. Um die langfristige Sicherung der Leistungsfähigkeit der terrestrischen Geoökosysteme für die Nahrungserzeugung und den immer mehr an Bedeutung gewinnenden Anbau von Pflanzen zur Energiegewinnung zu gewährleisten, sind erhebliche Forschungsanstrengungen nötig. Es gilt, die komplizierten Wechselwirkungen innerhalb des Umweltsystems zu verstehen und vor diesem Hintergrund die Auswirkungen anthropogener Beanspruchung der natürlichen Ressourcen abzuschätzen. Dies verlangt nach neuen integrativen Ansätzen, mit denen die Grundlagen für Maßnahmen zur Realisierung einer nachhaltigen, Ressourcen schonenden Landnutzung geschaffen werden. Für die Geomorphologie stellt dies sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch für anwendungsbezogene und praxisrelevante Forschungen eine Herausforderung dar.

Während die geomorphodynamischen Folgen des Klimawandels erst allmählich in den kommenden Dekaden zu beobachten sein werden, stellen die Folgen des Landnutzungswandels aufgrund ihrer historischen Dimension und ihrer aktuellen Dynamik schon heute ein erkennbares, in vielen Regionen ein greifbares Gefährdungspotenzial dar. Der ‚Geomorphological Change‘ hat längst begonnen!

Richard Dikau, Nele Meyer & Jutta Bedehäising

Die Geomorphologie leistet durch ihre Erklärungskompetenz von Prozessen der Erdoberfläche wesentliche Beiträge zur Erforschung von Naturgefahren und -risiken und damit zur Katastrophenvorsorge. Damit eröffnen sich zentrale Herausforderungen für die Anwendungsorientierung der Disziplin. Durch die von Kofi Annan geforderte Veränderung unseres gesamten Umganges mit Naturkatastrophen durch die Abkehr von einer Kultur der Reaktion („culture of reaction“) hin zu einer Kultur der Prävention („culture of prevention“) muss die Katastrophenvorsorge Strategien entwickeln, die in der Lage sind, die negativen Auswirkungen zukünftiger extremer Naturereignisse zu verhindern oder abzumildern. Für die Geomorphologie ergeben sich Betätigungsfelder besonders im Bereich der Beobachtung und Analyse aktueller Prozesse und in der Rekonstruktion von Prozessen der Vergangenheit. Gerade die Kenntnis des Langzeitverhaltens geomorphologischer Systeme (z.B. Spannungsvorgänge in Felswänden) und die aktuelle Prozessauslösung (z.B. durch ein Erdbeben) liefert unerlässliche Grundlagen prognostischer Naturgefahrenkarten. Diese Karten können auf Grundlage von prozessbeschreibenden Parametern entwickelt werden, die durch Transferfunktionen in bewertende Naturgefahrenmodelle zu überführen sind. Durch die Konzentration auf oberflächennahe Prozesse fällt der geomorphologischen Naturgefahrenforschung die Aufgabe zu, „schleichende“ Naturkatastrophen (wie z.B. die Bodendegradation) stärker als bisher in die Aufgabenfelder der Katastrophenvorsorge zu integrieren.

### Welche Naturgefahren kennen wir?

Naturgefahren des Erdsystems entstehen durch verschiedene natürliche Prozesse. Exogene Prozesse wirken auf die Erdoberfläche und können zu Naturgefahren werden, z.B. Stürme, gravitative Massenbewegungen, Extremniederschläge, Blitzschläge, Hitzewellen, Überschwemmungen, Sturmfluten, Schneelawinen, Dürren oder Bodenerosion. Endogene Prozesse, also solche die im Erdinnern ablaufen, können als

Gefahr	
Ein potentiell Schaden verursachendes physikalisches Ereignis bzw. Phänomen oder eine menschliche Aktivität, die bewirken können: Todesopfer oder Verletzungen, Sachverluste, soziale und ökonomische Störungen oder Umweltschäden	
Naturgefahren	
Natürliche Prozesse oder Phänomene, die ein Schaden bringendes Ereignis darstellen können. Naturgefahren können auf Basis ihrer Ursache klassifiziert werden	
Ursache	Phänomen / Beispiel
<b>Meteorologische Naturgefahren</b> Natürliche Prozesse oder Phänomene der Atmosphäre, d.h. der überwiegend gasförmigen Hülle der Erde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tropische Wirbelstürme (Hurrikan, tropischer Zyklon, Taifun), Tornado, Wintersturm</li> <li>- Hagelsturm, Eissturm, Eisregen, Schneesturm, Sandsturm</li> <li>- Extremniederschlag</li> <li>- Blitzschlag, Hitzewelle, Kältewelle</li> <li>- Nebel</li> </ul>
<b>Hydrologisch-glaziologische Naturgefahren</b> Natürliche Prozesse oder Phänomene der Hydrosphäre und Kryosphäre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überschwemmung</li> <li>- Sturmfluten</li> <li>- Sturzfluten</li> <li>- Dürre</li> <li>- Schneelawine</li> <li>- Gletscherabbrüche</li> <li>- Ausbruch von Gletschern</li> <li>- Permafrostschmelze</li> <li>- Frosthub</li> </ul>
<b>Geologisch-geomorphologische Naturgefahren</b> Natürliche Prozesse oder Phänomene der Erdkruste (Lithosphäre) und der Erdoberfläche (Reliefsphäre). Unterschieden werden endogene Ursachen (z.B. Tektonik, Magmatismus) und exogene Ursachen (Hangrutschung oder Bodenerosion durch Niederschlag)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erdbeben</li> <li>- Vulkaneruption</li> <li>- Tsunami</li> <li>- Gravitative Massenbewegung</li> <li>- Bergsenkung</li> <li>- Bodenerosion</li> <li>- Küstenerosion</li> <li>- Flusserosion</li> </ul>
<b>Biologische Naturgefahren</b> Prozesse der Biosphäre im weitesten Sinne mit organischer Ursache sowie jener Vorgänge, die durch biologische Pfade übertragen werden, einschließlich pathogener Mikroorganismen, Gifte und bioaktiver Substanzen. Weiterhin Prozesse der Interaktion biologischer Systeme einschließlich des Menschen mit der Natur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Epidemien</li> <li>- Tier- und Pflanzenkrankheiten</li> <li>- Seuchen</li> <li>- Waldbrände</li> <li>- Heuschreckenschwärme</li> <li>- Insektenplage</li> </ul>
<b>Extraterrestische Naturgefahren</b> Prozesse der Meteoritenbewegung im Weltall	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meteoriteneinschlag</li> </ul>
<b>Technologische Gefahren</b> Gefahren in Verbindung mit technologischen oder industriellen Unfällen, Zusammenbruch der Infrastruktur oder bestimmten menschlichen Aktivitäten mit Todesopfern oder Verletzungen, Sachschäden, soziale und ökonomische Störungen, Umweltzerstörungen. Werden manchmal als anthropogene Gefahren bezeichnet, Beispiele: Verschmutzung durch Industrieanlagen, radioaktive Verseuchung, Giftabfälle, Dammbrech, Industrieunfälle, Flugzeugabsturz, Pipelinebruch, Explosionen, Feuer, Ölverschmutzung, Pipelinebruch, Sabotage, chemische Angriffe, terroristische Angriffe	
<b>Umweltzerstörung</b> Durch menschliches Verhalten oder Aktivitäten verursachte Phänomene, die natürliche Ressourcen zerstören oder natürliche Prozesse oder Ökosysteme negativ verändern. Potentielle Auswirkungen sind unterschiedlich und können zu einer Zunahme der Verwundbarkeit, Frequenz und Intensität von Naturgefahren beitragen. Beispiele: Bodenerosion durch Wasser und Wind, Bodendegradation, Entwaldung, Waldbrand, Verlust von Biodiversität, Boden-, Wasser- und Luftverschmutzung, Klimaveränderung, Meeresspiegelanstieg und Abbau der Ozonschicht	

Abbildung 31

Klassifikation von Gefahr, Naturgefahr, technologischer Gefahr und Umweltzerstörung nach einem Vorschlag der Internationalen Strategie für Katastrophenvorsorge der UN (nach Dikau & Weichselgärtner 2005).

### NATUREREIGNIS

Als Naturereignis bezeichnet man das Auftreten natürlicher Prozesse des Erdsystems, wie Niederschläge, Hangrutschungen, Überschwemmungen, Dünenwanderungen oder Vulkanausbrüche. Naturereignisse können als Ressource (Niederschlag, Flussüberschwemmung) oder als Naturkatastrophe (Extremniederschlag, Hochwasser) auftreten.

### VERWUNDBARKEIT (VULNERABILITÄT)

Mit Verwundbarkeit (auch Verletzbarkeit) bezeichnet man die Anfälligkeit einer Person, Gesellschaft, Infrastruktur oder eines Umweltsystems gegenüber einer spezifischen Naturgefahr mit einer bestimmten Ereignisstärke. Soziale, ökonomische, technische oder natürliche Faktoren bestimmen über den Grad der Verwundbarkeit, der durch entsprechende Maßnahmen reduziert werden kann. Entsprechend kennen wir eine soziale, ökonomische, technische und auf die natürliche Umwelt bezogene Verwundbarkeit. Obwohl der Begriff in der Verwundbarkeitsforschung ursprünglich nur für gesellschaftliche und kulturelle Phänomene genutzt wurde, wird er heute allgemein für alle durch Naturgefahren bedrohte Risikoelemente verwendet.

### NATURKATASTROPHE

Unter einer Naturkatastrophe wird eine schwere Störung und schwerwiegende Veränderung der Tätigkeiten, Aufgaben und Ziele einer Gesellschaft durch den tatsächlichen Eintritt eines extremen natürlichen Prozesses verstanden. Die Auswirkungen führen zu ausgedehnten materiellen, ökonomischen oder das Umweltsystem betreffenden Schäden, die massive soziale Folgen nach sich ziehen. Entscheidend ist, dass bei Naturkatastrophen die Fähigkeit der betroffenen Gesellschaft die Krise zu überwinden mit den eigenen Mitteln nicht mehr möglich und Hilfe von außen erforderlich ist. Eine Naturkatastrophe bzw. das Ausmaß einer Naturkatastrophe ist eine Folge eines nicht ausreichenden Risikomanagements und eine Kombination der Naturgefahr mit der Verwundbarkeit der Menschen und Sachgüter. Entscheidend ist eine ungenügende Fähigkeit oder Maßnahme, die potentiellen negativen Konsequenzen eines vorliegenden Risikos zu reduzieren. In diesem Sinne ist eine Naturkatastrophe gesellschaftlich verursacht worden.

### NATURGEFAHR

Naturgefahren sind Naturereignisse, die vom Menschen als potentielle Bedrohung für Leben und Eigentum betrachtet werden, da Eintrittshäufigkeit oder Ausmaß eine bestimmte Toleranzgrenze überschritten haben. Ein drohendes Naturereignis, wie etwa eine Überschwemmung oder ein Erdbeben in einer unbewohnten Region, wird nicht als Naturgefahr bezeichnet, da weder Menschen noch von ihm geschaffene Güter gefährdet sind. In einer enger gefassten Definition wird unter einer Naturgefahr die Wahrscheinlichkeit eines zukünftig auftretenden, schadenerzeugenden natürlichen Ereignisses in Raum und Zeit verstanden.

### RISIKO

Unter Risiko versteht man die Wahrscheinlichkeit, dass sich durch bestimmte unerwünschte Ereignisse Schäden für den Menschen, Sachgüter und die Natur ergeben. Es existiert eine große Spannweite von Risikoansätzen und -sichten:

- Erdsystemrisiken (z.B. Überschwemmung, Dürre, Tsunami)
- Gesundheitliche Risiken (z.B. Verletzung, Epidemie)
- Gesellschaftliche Risiken (z.B. Krieg, Terrorismus, Kriminalität)
- Wirtschaftliche Risiken (z.B. Wachstumseinbruch, technologische Katastrophe)
- Politische Risiken (z.B. Staatstreich, Versagen von Sozialprogrammen)
- Ökologische Risiken (z.B. Umweltverschmutzung, Atomunfall)
- Technologische Risiken (z.B. Chemieunfall, Freisetzung genmanipulierter Pflanzen).

Der naturwissenschaftlich-versicherungstechnische Risikobegriff basiert auf der Kopplung von Naturgefahr und Verwundbarkeit in der Form „Risiko = Naturgefahr x Verwundbarkeit“. Danach wird mit Risiko die Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der Schäden für den verwundbaren Menschen und sein Eigentum (Todesopfer, Verletzte, Sachschäden, ökonomische Verluste, Umweltschäden) durch ein natürliches Ereignis entstehen können. Eine Erweiterung des Risikobegriffs kann durch die Kategorien der Exponiertheit und des Ausgesetztseins erfolgen. Die Risikoformel beschreibt damit ein Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit der Naturgefahr und der Schadenserwartung an Risikoelementen.

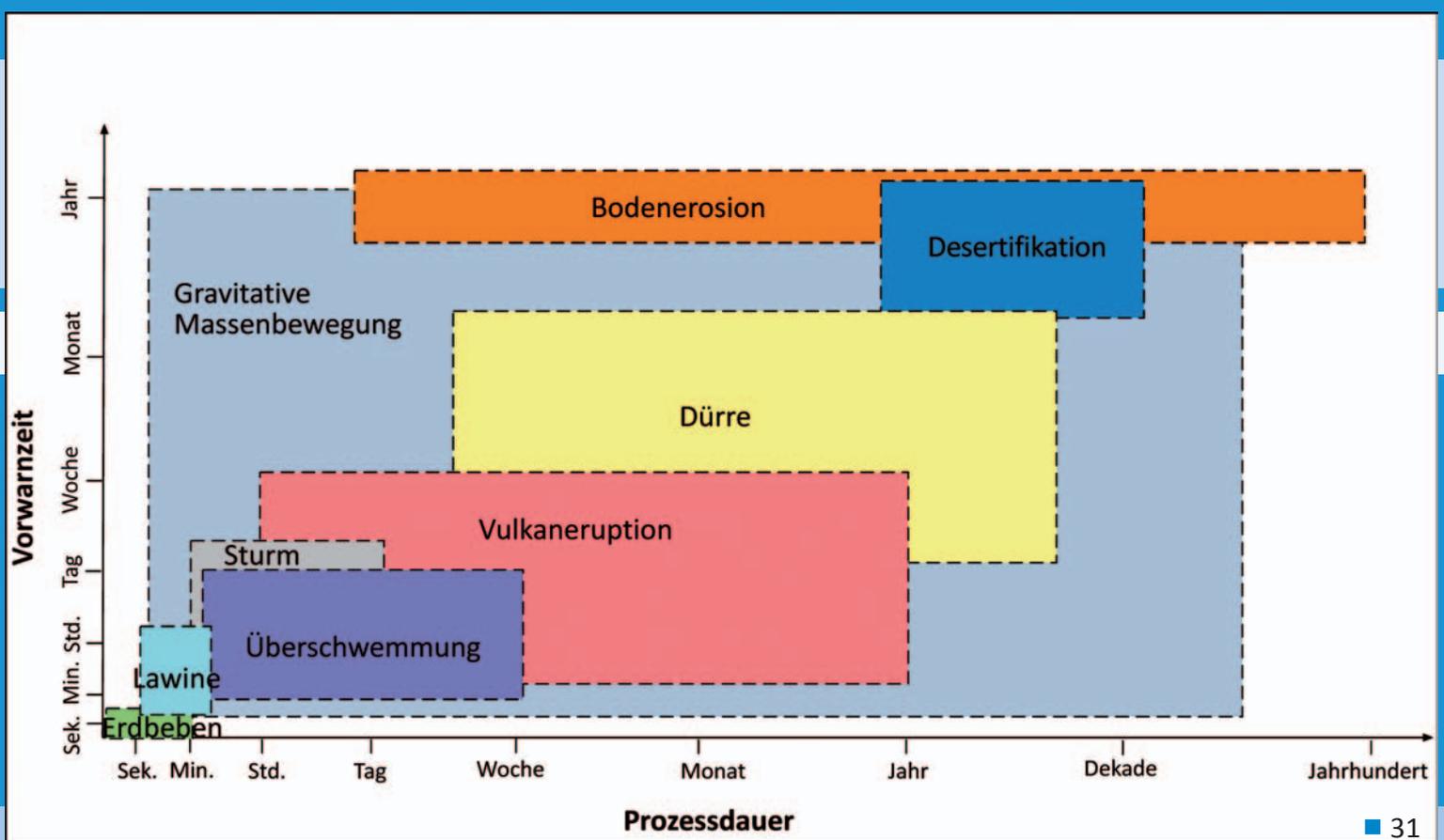
Erdbeben, Tsunamis oder Vulkanausbrüche zu Naturgefahren werden. Neben exogenen und endogenen Naturgefahren existieren biologische Naturgefahren, wie Epidemien, Seuchen und Waldbrände, sowie die extraterrestrische Naturgefahr eines Meteoriteneinschlags. In einer von der Internationalen Strategie für Katastrophenvorsorge (ISDR) vorgenommenen Klassifikation (Abb. 31) wird weiterhin in technologische Naturgefahren, die in Verbindung mit technologischen Entwicklungen und Unfällen stehen, und in Umweltzerstörungen, die durch die Degradation von Ökosystemen durch den Menschen hervorgerufen werden, wie beispielsweise der Abbau der Ozonschicht, unterschieden. Die Prozessgruppen des Umweltsystems werden durch natur- und ingenieurwissenschaftliche Einzeldisziplinen untersucht. So erforscht z.B. die Meteorologie die Entstehung von Hurrikans, die Geologie die Erdbebenentstehung, die Hydrologie die Hochwasservorhersage und die Geomorphologie Bergsturzprozesse oder die Bodenerosion. Diese disziplinäre Forschung ist notwendig, um ein verbessertes Verständnis der Prozesse und der Prozessfolgen zu erhalten. Nur dadurch kann die Entwicklung von naturwissenschaftlich fundierten

Naturgefahrenmodellen oder die Entwicklung und der Einsatz von technischen Frühwarnsystemen vorangetrieben werden.

Aus Sicht der Katastrophenvorsorge müssen jedoch noch weitere Kriterien der gefährlichen Prozesse bekannt sein, die nicht ihre Unterschiede sondern ihre gemeinsamen Eigenschaften betreffen. So beruhen Tornados, Erdbeben und Schneelawinen auf unterschiedlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Ihre Gemeinsamkeit besteht dagegen in einer äußerst kurzen Ereignisdauer und Vorwarnzeit. Andererseits sind nach heutigem Wissensstand Frühwarnzeiten für Dürren oder Vulkanausbrüche von Wochen oder Monaten möglich. Ein Ansatz, der sich an ähnlichen oder gemeinsamen Prozesseigenschaften oder deren Folgen orientiert, bietet somit Vorteile für ein effektives Risikomanagement einschließlich der Entwicklung und Nutzung von Frühwarnsystemen (Abb. 32). Hier ist beispielsweise von Interesse, wie Evakuierungspläne für die Bevölkerung aufgebaut sein müssen, die kurzen Vorwarnzeiten von wenigen Stunden ausgesetzt ist, im Vergleich zu Anpassungsmaßnahmen der Nahrungsmittelbevorratung im Falle der Frühwarnung von Dürren in den Trockengebieten der Erde.

Abbildung 32

Schematische Darstellung der Dauer und Vorwarnzeit gefährlicher Prozesse des Erdsystems.



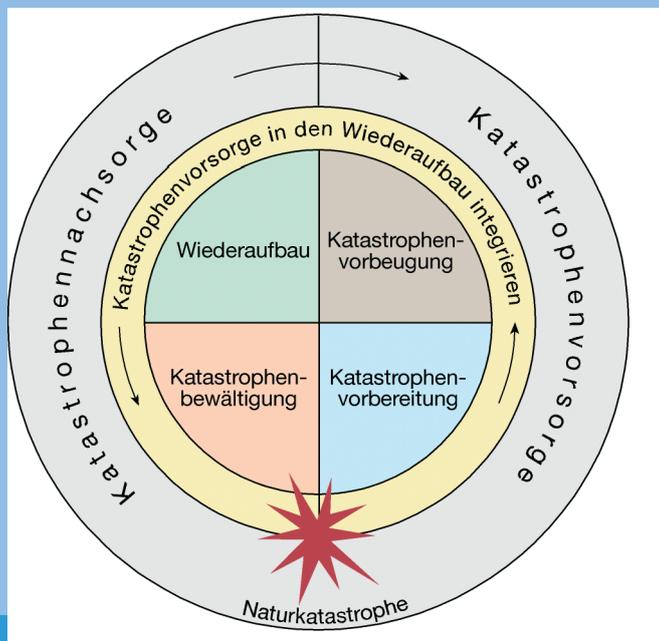


Abbildung 33  
Der Katastrophenkreislauf beschreibt die Naturkatastrophe als Teil eines kontinuierlichen Prozesses (Dikau & Weichselgartner 2005).

### Katastrophenverursacher – Mensch oder Natur?

Naturereignisse hat es schon gegeben bevor der Mensch die Erde besiedelte. Meteoriteneinschläge mit zerstörerischem Charakter konnten von Wissenschaftlern für mehrere Erdzeitalter rekonstruiert werden. Auch Vulkanausbrüche, Überschwemmungen und Bergstürze sind aus früheren Epochen bekannt. Seit die Menschen sesshaft wurden, Siedlungen gründeten, Nahrungsvorräte anlegen mussten und ihr gesellschaftlicher Organisationsgrad zunahm, stieg auch ihre Verwundbarkeit gegenüber Naturereignissen. Anpassungsstrategien wurden erforderlich, die in historischen und prähistorischen Gesellschaften zur mehr oder weniger erfolgreichen Ruinvermeidungen führten. In den modernen Gesellschaften des 20. und 21. Jahrhunderts schließlich ist ein Anstieg der Naturkatastrophen zu verzeichnen. Eine gesellschaftliche Debatte ist entbrannt, ob dieser Anstieg auf eine Zunahme extremer Naturereignisse oder auf die Aktivitäten der Gesellschaften zurückzuführen ist, die in immer stärkerem Maße das System Erde nutzen, d.h. in immer gefährlichere Regionen vorstoßen und die natürlichen Ressourcen in immer stärkerem Maße ausbeuten (Kulke & Popp 2008).

Das letzte Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts wurde von den Vereinten Nationen zur „Internationalen Dekade zur Reduzierung von Naturkatastrophen“

(IDNDR) erklärt. Damit hat die internationale Staatengemeinschaft auf die Zunahme von Naturkatastrophen und der durch sie verursachten Schäden reagiert. Ziel solcher Dekaden ist es, eine bestimmte Thematik in das Zentrum des öffentlichen Interesses zu rücken. Zwischen 1990 und 1999 konnten durch zahlreiche Aktivitäten und Kampagnen wichtige politische, wissenschaftliche und anwendungsbezogene Impulse zur Katastrophenvorsorge gegeben werden. Studien wurden erstellt, vorhandenes Wissen gebündelt sowie Strategien und Aktionspläne entworfen.

Auch die sich seit dem Jahr 2000 an die IDNDR anschließende „International Strategy for Disaster Reduction“ wurde von den Vereinten Nationen zu dem Zweck gegründet, das Problem der zunehmenden Naturkatastrophen zu ergründen und Vorsorgestrategien zu erarbeiten, die in der Lage sind, die negativen Auswirkungen zukünftiger Naturereignisse zu vermindern (ISDR 2004). Auf nationaler Ebene strebt das „Deutsche Komitee Katastrophenvorsorge“ (DKKV) ähnliche Ziele an und fördert einen Austausch von Wissenschaft, Gesellschaft, Wirtschaft, sowie regionalen, nationalen und internationalen Initiativen der Katastrophenvorsorge. Für alle genannten Institutionen ist die von Kofi Annan 1999 geforderte Veränderung unseres gesamten Umganges mit Naturkatastrophen von einer Kultur der Reaktion („culture of reaction“) hin zu einer Kultur der Katastrophenvorsorge („culture of prevention“) von zentraler Bedeutung. Dieser Ansatz erhofft sich durch eine explizite Entwicklung und Stärkung der Vorsorge die Anzahl von Todesopfern und die Summe der Schäden durch gefährliche Prozesse zu reduzieren und soll einer nachhaltigeren Entwicklung dienen, die im Dienste steht, der nachfolgenden Generation keine irreparablen Schäden zu hinterlassen. Dabei wird die Naturkatastrophe als Komponente eines Prozesses verstanden, der als Katastrophenkreislauf bezeichnet wird (Abb. 33).

Gerade der globale Klimawandel nimmt eine Schlüsselstellung für die Naturkatastrophenentwicklung ein. So wird nach dem neuesten IPCC-Bericht die Häufigkeit extremer Wetterereignisse zunehmen und mit ihr das Gefahrenpotential klimatisch beeinflusster Prozesse, wie beispielsweise Hochwasser- und Sturmereignisse, gravitative Massenbewegungen, Dürren, Bodenerosion und Desertifikation. Zerstörerische Naturereignisse sind indes nicht gleichmäßig über die Erde verteilt, sondern stehen in Abhängigkeit zur Klimazone, dem Relief und den Vegetations-

und Landnutzungssystemen.

Nicht nur die Intensität der natürlichen Prozesse bestimmt das Ausmaß einer Katastrophe. Gesellschaftliche Einflussgrößen, wie die Wirtschaftskraft, die soziale Ressourcenausstattung, vorhandene Katastrophenschutzstrukturen und Vorsorgemaßnahmen sowie damit in Zusammenhang stehende Anpassungsstrategien an den Klimawandel (d.h. die Katastrophenanfälligkeit und Verwundbarkeit), haben einen zentralen Anteil daran, welche Auswirkungen Prozesse auf die menschlichen Gesellschaften haben. Während in den Industrieländern der finanzielle Verlust durch Naturkatastrophen am größten ist, kommen in den Entwicklungsländern die meisten Menschen ums Leben. Menschen verschiedener

Einkommensklassen besitzen eine unterschiedliche Verletzbarkeit in Bezug auf Naturkatastrophen. Statistisch betrachtet sterben in den am wenigsten entwickelten Ländern über 1.000 Menschen bei jeder Naturkatastrophe, in den durchschnittlich entwickelten Ländern sind es noch 145 Menschen und in den hoch entwickelten Ländern 23 Menschen. Die weitaus meisten Todesopfer sind in den Bevölkerungsschichten mit niedrigen Einkommen zu beklagen. Dürren, Stürme und Erdbeben bilden hier die häufigste Todesursache. In den Bevölkerungsgruppen mit höheren Einkommen ist die Anzahl der Todesopfer insgesamt sehr viel geringer. Hier bilden Überschwemmungen, Stürme und Erdbeben die häufigste Todesursache (Abb. 34).

Das prognostizierte Wachstum der Weltbevölkerung auf möglicherweise neun Milliarden Menschen bis zum Jahr 2070 bildet neben der Zunahme der Wetterextremereignisse ein zentrales Problem der Katastrophenvorsorge, da sich eine steigende Anzahl von Menschen in zunehmendem Maße in gefährdeten Räumen exponieren wird. So werden zwei Drittel der neun Milliarden Menschen in Städten leben - die meisten davon in Städten mit über 15 Mio. Einwohnern. Einige dieser Metropolen, wie Tokio und Mexiko City, sind durch Naturprozesse hochgradig gefährdet.

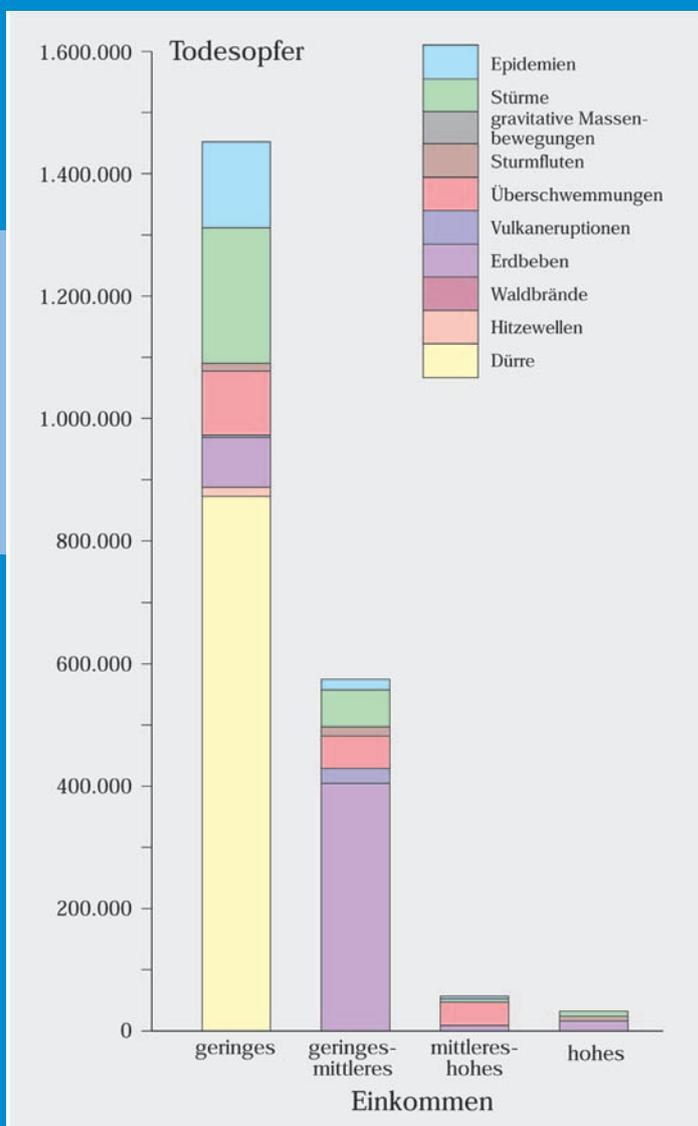


Abbildung 34 Naturkatastrophen bilden eine Kopplung von Prozessen des Erdsystems mit dem sozialen und kulturellen Zustand der menschlichen Gesellschaft. Die armen Bevölkerungsschichten sind gegenüber diesen Prozessen besonders verwundbar und haben die meisten Todesopfer zu beklagen (ISDR 2004, nach Dikau & Weichselgartner 2005).

### Welchen Beitrag kann die Geomorphologie zur Katastrophenvorsorge leisten?

Der Katastrophenvorsorge kommt im Katastrophenkreislauf eine entscheidende Bedeutung zu, auch wenn sie schwerwiegenden wissenschaftlichen, organisatorischen, politischen und ökonomischen Problemen gegenüber steht. Vorsorge bedeutet eine Vermeidung oder Verminderung von Schäden, die erst in Zukunft auftreten können, also noch nicht aufgetreten sind. Die Investition erscheint dabei häufig nicht als zwingend notwendig, gerade wenn das Auftreten von gefährlichen Naturereignissen in den betroffenen Regionen bereits Generationen zurückliegt oder die Auftretenswahrscheinlichkeit der Prozesse gering ist. Die Qualität der Katastrophenvorsorge ist daher nicht nur von der wissenschaftlichen Prozesskenntnis und Prognostizierbarkeit der Ereignisse abhängig, sondern wird auch davon beeinflusst, welche Problemwahrnehmung bei den potenziell Betroffenen und den politischen Entscheidungsträgern vorliegt. Der Aus- und

Weiterbildung kommt daher eine wichtige Rolle zu.

Ein Beitrag der Geomorphologie zur Katastrophenvorsorge ist die Naturgefahrenanalyse (AK Geomorphologie 2006, von Elverfeldt et al. 2008). Dabei werden Eigenschaften von geomorphologischen Prozessen erfasst und zu einer Aussage über die zukünftige Auftretenswahrscheinlichkeit in Raum und Zeit geführt. Die Gefährlichkeit des Prozesses wird dabei in unterschiedlichen Klassen ausgedrückt. Die Rekonstruktion vergangener Ereignisse erfolgt über historische Quellen und Geoarchive, also schriftliche Dokumente, Artefakte (z.B. Scherben, Holzkohle), Sedimentablagerungen oder fossile Böden, die auf frühere Prozesse schließen lassen. Anhand von Zeitreihen lassen sich die Frequenzeigenschaften der potentiell Schaden bringenden Ereignisse ermitteln. Prozesseigenschaften dieser Art dienen also der Einschätzung und Bewertung der Naturgefahr. Eine Naturgefahrenklasse errechnet sich aus mehreren prozessbeschreibenden Parametern (Gares et al. 1994, Dikau 2004):

$$GK = f(F, M, D, rA, G, rV, zV)$$

<b>GK</b>	Naturgefahrenklasse
<b>F</b>	Frequenz (zeitliche Häufigkeit, gering - hoch)
<b>M</b>	Magnitude (Massen- oder Energietransfer, gering - groß)
<b>D</b>	Dauer (kurz - lang)
<b>rA</b>	räumliche Ausdehnung (begrenzt - groß)
<b>G</b>	Geschwindigkeit des Prozessaufbaus (langsam - schnell)
<b>rV</b>	räumliche Verteilung (Verbreitungsmuster, punktuell - diffus)
<b>zV</b>	zeitliche Variation (zyklisch - stochastisch)

Unter der Frequenz eines Ereignisses wird die Häufigkeit des Auftretens in einem bestimmten Zeitraum verstanden. Das Wiederkehrintervall sagt also aus, wie groß der Zeitraum zwischen den Ereignissen ist. Kleine Wiederkehrintervalle können z. B. bei Bodenerosionsprozessen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen nach Niederschlägen erwartet werden. Lange Wiederkehrintervalle von mehreren Jahrtausenden sind bei großen Bergstürzen in Hochgebirgen beobachtet worden. In die Naturgefahrenmodellierung geht die Frequenz des gefährlichen Prozesses als seine Eintrittswahrscheinlichkeit ein. Die Magnitude eines Ereignisses ist die Stärke oder Intensität mit der der gefährliche Prozess auftritt. Sie kann in Form der bewegten Massen

(z.B. Bergsturzvolumen) oder des Energieumsatzes ausgedrückt werden. Die empirische Forschung zeigt bei zahlreichen Prozessen ein umgekehrt proportionales Verhältnis zwischen Frequenz und Magnitude. Während Ereignisse kleinerer Magnitude häufig auftreten (z.B. Bodenabträge), besitzen größere Ereignisse (z.B. Bergstürze oder Vulkanausbrüche) eine geringere Frequenz aber dafür eine weit höhere öffentliche Aufmerksamkeit. Weitere Prozesseigenschaften, die in die Naturgefahrenmodellierung eingehen sind die räumliche Ausdehnung und Verteilung, die Geschwindigkeit, die Dauer und die zeitliche Variation. Die räumlichen Charakteristika von gefährlichen Prozessen können über Proxy-Daten, die Zeugnisse vergangener Prozesse im Relief (z.B. Abrisskanten von Felsstürzen oder Ablagerungen von erodiertem Material) abgeschätzt werden. Die geomorphologische Forschung hält zahlreiche Methoden bereit, um die flächenhafte Ausdehnung, Mächtigkeit oder das Volumen der bewegten Materialien zu ermitteln. Die Frequenz früherer Prozesse kann über absolute (z.B. <sup>14</sup>C-Analysen und Dendrochronologie) und relative Altersdatierungen (z.B. Sedimentstratigraphie) ermittelt werden.

### Welche Naturgefahren liegen im Fokus der Geomorphologie?

Im Fokus der geomorphologischen Naturgefahrenanalyse stehen Erdoberflächenprozesse. Dazu zählen in erster Linie erosive Materialabträge von Hängen (z.B. Bodenerosion, gravitative Massenbewegungen, Küstenerosion, äolische Erosion), Sedimenttransporte (z.B. durch Flüsse, Meeresströmungen und Wind), Sedimentdepositionen (z.B. in Murkegeln, Talauen, Dünen, Wüstenränder) und Sedimentremobilisierungen (z.B. fluviale Ufererosion, periglaziale Murgänge, Moränendurchbrüche). Für die geomorphologische Naturgefahrenforschung stehen damit die formverändernden Oberflächenprozesse und die oberflächennahen Prozesse im Vordergrund, wobei der Bodendegradation als schleichendem Prozess eine besondere Bedeutung zukommt. Unter Anwendung der oben genannten Faktoren lassen sich die Erdoberflächenprozesse in das in Tab. 2 gezeigte Schema einordnen.

Tabelle 2  
Auswahl von gefährlichen Prozessen und ihren Eigenschaften, die im Fokus der Geomorphologie liegen und als Basis einer Naturgefahrenanalyse dienen (Gares et al. 1994 & Dikau 2004).

Parameter	Prozesstypen (erosiv und akkumulativ)					
	Bodenerosion	Gravitative Massenbewegungen	Küstenprozesse	Fluviale Prozesse	Äolische Prozesse	Glaziale und periglaziale Prozesse
Frequenz	mittel - hoch	mittel - hoch	mittel - hoch	mittel - hoch	mittel	mittel
Magnitude	gering - mittel	gering - mittel	gering - mittel	gering - mittel	gering - mittel	gering - mittel
Dauer	mittel - lang	kurz - mittel	mittel - lang	mittel - lang	mittel - lang	kurz - mittel
Räumliche Ausdehnung	mittel - groß	begrenzt - mittel	begrenzt - mittel	begrenzt - mittel	mittel - groß	begrenzt - mittel
Geschwindigkeit des Prozessaufbaus	langsam	mittel - schnell	langsam	langsam	langsam	langsam - schnell
Räumliche Verteilung	linear - diffus	punktuell - diffus	punktuell - linear	linear - diffus	linear - diffus	punktuell - diffus
Zeitliche Variation	zyklisch	episodisch - stochastisch	zyklisch - episodisch	zyklisch - episodisch	zyklisch - episodisch	zyklisch - stochastisch

### HOT SPOT GRAVITATIVE MASSENBEWEGUNGEN

#### Wenn das Erdreich sich bewegt

Gravitative Massenbewegungen werden häufig als „Hangrutschung“ oder „Erdrutsch“ bezeichnet, jedoch beschreibt der Begriff „Rutschung“ nur eine Teilmenge der Phänomene, die unter „gravitativen Massenbewegungen“ zusammengefasst werden. Es werden damit hangabwärts gerichtete, der Schwerkraft folgende Verlagerungen von Fels, Schutt und Feinmaterial verstanden (Felgentreff & Glade 2009). Diese Materialverlagerungen können durch Prozesse des Fallens, Kippens, Gleitens, Driftens und Fließens verursacht werden (Abb. 35 & Abb. 36). Darunter fallen sowohl große und schnelle Bergstürze als auch hangparallele, langsame Rutschungen (Glade & Dikau 2001). Bei gravitativen Massenbewegungen handelt es sich um Prozesse mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Materialvolumina. Sie treten gehäuft in Hochgebirgen, Mittelgebirgen und Küsten auf.

Gravitative Massenbewegungen können sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen auf den Menschen haben. Unter die direkten Auswirkungen fallen die Ereignisse, die auf den unmittelbaren Einfluss der bewegten Masse zurückzuführen sind. Dabei können Menschen verletzt oder getötet, Häuser oder Infrastruktur zerstört und land- und forstwirtschaftliche Flächen unnutzbar werden. Unter indirekten Auswirkungen werden u.a. regionale Störungen der Infrastruktur, wie Stromleitungen und Verkehrswege verstanden.

Es ist möglich, dass ein durch gravitative Massenbewegungen beeinflusster Raum in Zukunft vollkommen anders genutzt werden muss, um weitere Risiken zu vermeiden. Durch abgelagertes Material kann ein Tal blockiert oder ein Fluss aufgestaut werden. In besonders gefährlichen Situationen kann dieser Damm brechen und flussabwärts zu extremen Naturkatastrophen führen (Glade & Dikau 2001).

Ein Bestandteil der Katastrophenvorsorge bei gravitativen Massenbewegungen besteht in der Entwicklung von Naturgefahrenkarten und in der Ermittlung der Verwundbarkeit der Risikoelemente. Daraus können sich Maßnahmen ableiten lassen, die z.B. die gefährdeten Objekte stabilisieren. So werden Stützbauwerke oder Auffangbecken errichtet (Felgentreff & Glade 2009). Auch forstlich-biologische Maßnahmen können Hänge befestigen und stabilisieren. In kritischen Bereichen spielt die Beobachtung der sich bewegenden Masse eine wichtige Rolle. Dabei wird durch kontinuierliche Beobachtung und Überschreiten bestimmter Schwellenwerte eine Frühwarnung möglich, nach der gefährdete Bereiche gesperrt werden.

Als am 18. Juli 2009 der feste Untergrund in Nachterstedt ins Fließen geriet und dabei Häuser, Straßen und Menschen mit sich riss, war die Frage nach den Gründen für diese Naturkatastrophe groß. Hätte sie bei besserer Erkundung des Untergrunds im ehemaligen Tagebaugelände vorhergesagt oder gar verhindert werden können? Experten stellen nun fest, dass ein bekanntes Phänomen zu der Destabilisierung des Untergrunds geführt hat. Die



Abbildung 35  
Flache Translationsrutschungen, die den gesamten Bodenkörper bis auf das Festgestein abtragen können und eine weitere Pflanzennutzung verhindern.

Foto: US Geological Survey

Abbildung 36 (unten)  
Der Murgang ist ein äußerst effektives Transportsystem für große zerstörerische Gesteinsblöcke. Dieser Block wurde bei einer Naturkatastrophe im Jahre 1999 in Carabellada an der Nordküste Venezuelas transportiert, bei der über 20.000 Menschen umkamen.



Foto: US Geological Survey

Flutung des nahe gelegenen Stausees erhöhte die Wassersättigung des künstlich verdichteten Sandes im Uferbereich. In einem derartigen Zustand reichen kleinste Erschütterungen um die Masse in Bewegung zu setzen.

Gravitative Massenbewegungen stehen zwar häufig mit großen Hangneigungen in Zusammenhang, sind jedoch nicht notwendigerweise an sie gebunden. Auch durch andere Faktoren, wie etwa eine hohe Wassersättigung in unverfestigtem Untergrundmaterial können gravitative Massenbewegungen hervorgerufen werden. Weiterhin stellen Tonschichten im Untergrund einen prozessvorbereitenden Faktor dar, weil diese sich unter Druck leicht deformieren und Gleitschichten für die darüber liegenden Gesteinsschichten ausbilden. Der Effekt dieser Gleitflächen verstärkt sich, wenn es stark regnet, da Ton eine geringe Wasserdurchlässigkeit hat. Das versickernde Niederschlagswasser sammelt sich über den Tonlagen, die eine Gleitfläche ausbilden, so dass sich der darüber liegende Gesteinskörper in Bewegung setzen kann. Dieser Mechanismus kann an den Hängen der Schwäbischen Alb häufig beobachtet werden. In den Hanglagen dieser Region sind Häuser und Siedlungen durch gravitative Massenbewegungen gefährdet.

Verschiedene Wissenschaftler setzen sich mit der Hangrutschungsgefährdung in dieser Region

auseinander (Abb. 37). Bell (2007) entwickelte eine Gefahrenkarte für gravitative Massenbewegungen, die ein Kernelement für Katastrophenvorsorgestrategien bildet. Derartige Gefahrenkarten sind das Ergebnis der Naturgefahrenanalyse und basieren auf den oben vorgestellten prozessbeschreibenden Faktoren. Von zentraler Bedeutung ist dabei die räumliche Verbreitung der Prozesse. In der Gefahrenkarte sind den gefährdeten Gebieten bestimmte Klassen zugeordnet, die sich auf Basis von Wahrscheinlichkeitsaussagen eines zukünftig auftretenden Prozesses gründen (Abb. 38). In einem weiteren Schritt lassen sich diese Gefahrenzonierungen mit der Verwundbarkeit der Risikoelemente kombinieren und in Risikoklassen überführen und in verschiedenen Raumeinheiten darstellen. Auf Basis einer derart räumlich differenzierten Information können explizit Maßnahmen zur Risikoreduzierung für bewohnte Gebiete oder die Infrastruktur getroffen werden. Für eine effiziente Reduzierung des Risikos im Rahmen von Katastrophenvorsorgestrategien ist in weitergehenden Schritten die Kommunikation der Risikosituation und -problematik zwischen allen Akteuren notwendig.

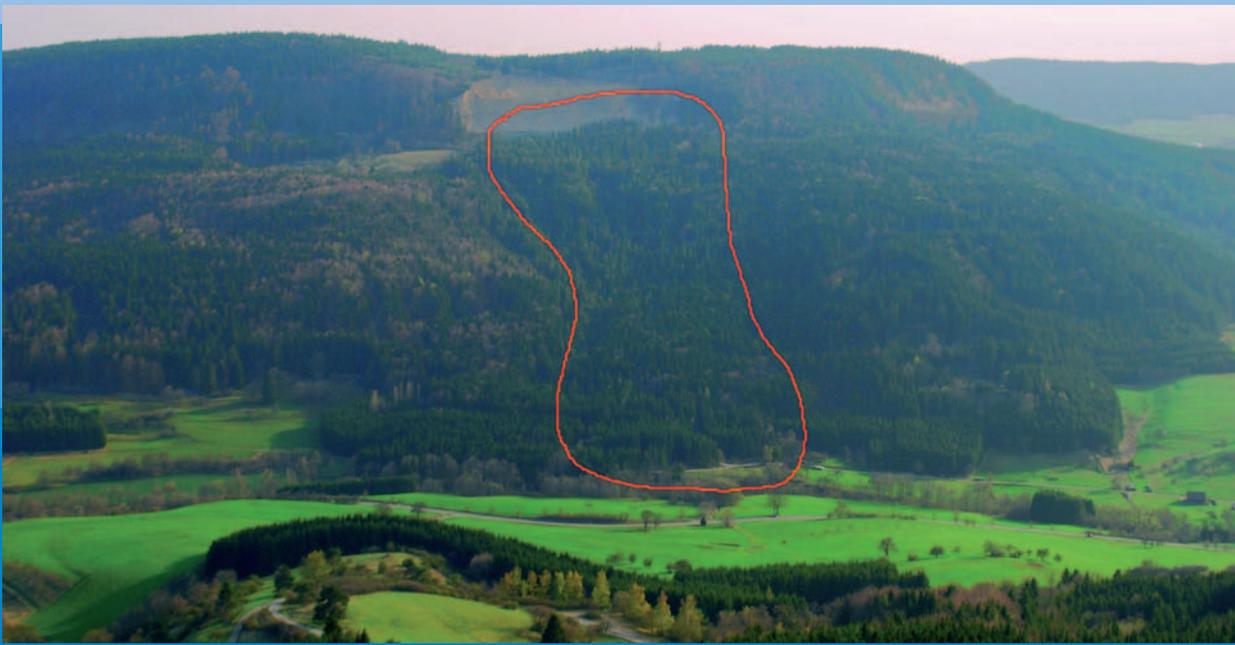
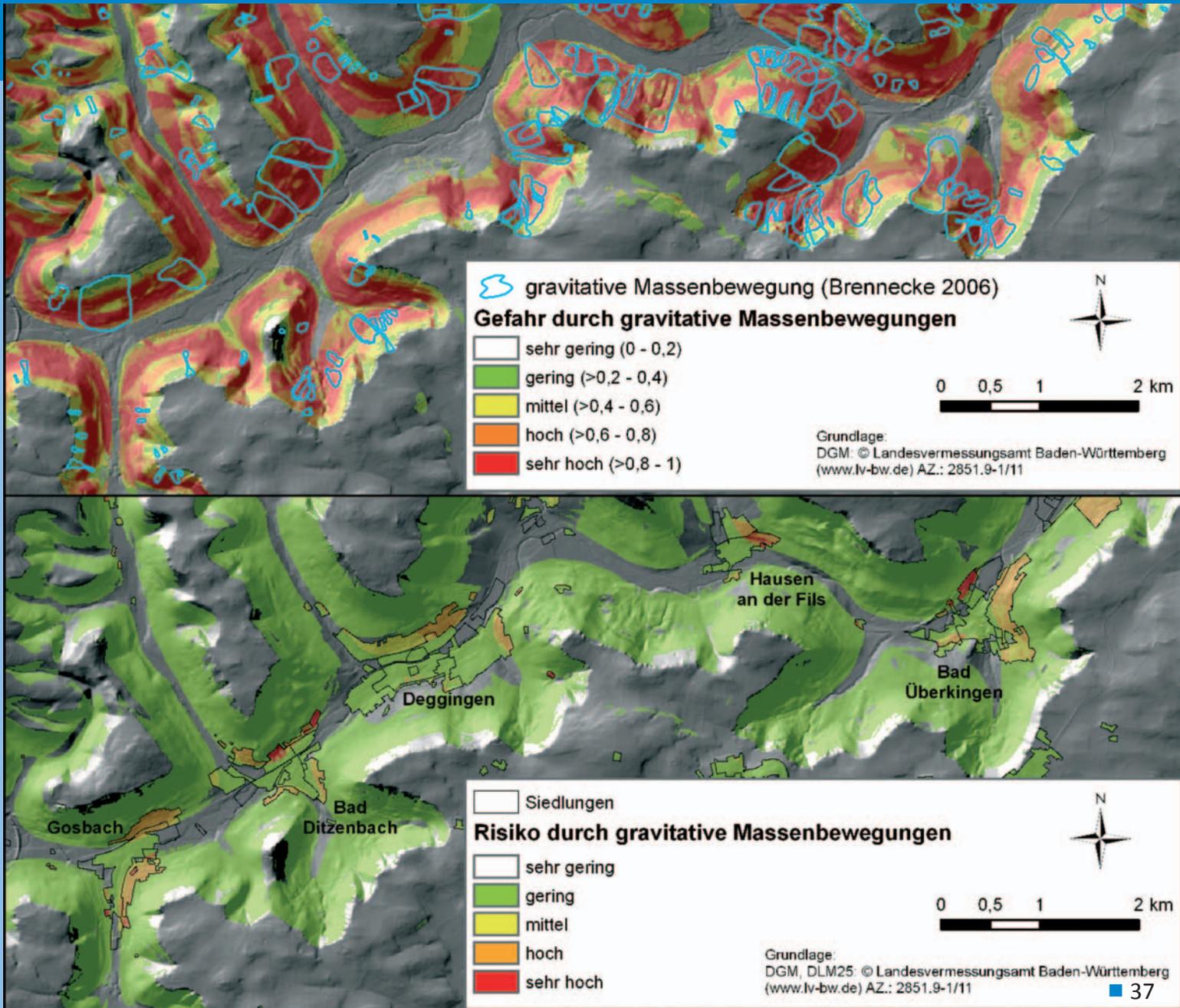


Abbildung 37  
Aktiver Rutschungskörper an den Hängen des Schlichemtals, Schwäbische Alb, Süddeutschland.

Abbildung 38

Gefahren- (oben) und Risikokarte (unten) für das Untersuchungsgebiet „Oberes Filstal“ an der Schwäbischen Alb von Bell (2007). Die Arbeit ist ein Ergebnis des Forschungsprojektes InterRISK der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), in dem Human- und Physiogeographen an Gefahren- und Risikoanalysen in der Schwäbischen Alb arbeiten. Weitere Informationen unter <http://www.giub.uni-bonn.de/sozgeo/interrisk/index.html>



Ein beträchtlicher Teil der alpinen Naturgefahren ist auf die gravitativen Massenbewegungen zurückzuführen (BUWAL 1999). In der Schweiz werden heute über acht Prozent der Landesfläche als aktiver oder latent instabiler Raum betrachtet. Dabei sind mehrere hundert Rutschungsgebiete mit Flächengrößen einiger Quadratkilometer bekannt. Weiter sind Dutzende von Hangrutschungen erfasst worden, die Flächengrößen von über zehn Quadratkilometern aufweisen. In weit geringerer Zahl, jedoch mit sehr viel größeren bewegten Massen treten in den Alpen die großen Bergstürze auf. Darunter versteht man den Absturz einer über eine Mio. m<sup>3</sup> umfassenden vorwiegend trockenen Felsmasse aus einem Hang, die sich mit extrem hoher Geschwindigkeit (bis 400 km/h) in das Tal bewegen kann und dabei lange Auslaufstrecken von mehreren Kilometern überwindet. Man ist sich weitgehend sicher, dass dieser lange Auslauf mit einer aus der Reibung entstehenden Gesteinsschmelze an der Basis der Masse zusammenhängt. Bergstürze können durch Erdbeben ausgelöst werden. Ihre Disposition wurde durch die alpine Vergletscherung der

Eiszeiten mitbestimmt, wodurch die Täler durch die erodierenden Gletscher eingetieft und versteilt worden sind. Nach dem Abschmelzen der Gletscher vor 15.000 bis 11.000 Jahren wurden die Felswände entlastet. Ihre Reaktion darauf kann nun ein zeitlich um Jahrtausende verzögerter Kollaps sein. Bergstürze können Flüsse aufstauen und dadurch gefährliche Fernwirkungen erzeugen, wenn die Staumauer aus Schuttmassen bricht.

Eine zunehmend wichtige Frage ist darin zu sehen, welche zusätzlichen Risiken heute im Hochgebirge durch die anthropogen verursachte Klimaerwärmung zu erwarten sind (Haeberli et al. 2006). Wir beobachten, dass Lockersedimente, z.B. Moränen, im letzten Jahrzehnt teilweise dramatische Veränderungen und bis hin zu ihrem Kollaps erfahren (Abb. 40). Die zentrale Frage ist, ob derartige Destabilisierungen auch in den Festgesteinsregionen der Hochgebirge zu beobachten sind, die im Bereich des Felspermafrostes liegen. Unter Permafrost verstehen wir eine thermische Eigenschaft des Untergrundes. Er wird definiert als Untergrundmaterial, das über die Dauer von zwei aufeinanderfolgenden Jahren Temperaturen von unter 0°C aufweist. Für diese thermische Eigenschaft des Untergrundes sind verschiedene Faktoren verantwortlich (z.B.

Abbildung 39

Aktiver Blockgletscher im Turtmantal, Wallis, Schweiz. Der aktive Blockgletscher gilt als Indikator für den Hochgebirgspermafrost.

Foto: R. Dikau



Korngröße des Lockergesteins, Klüftung des Festgesteins, geothermischer Gradient), jedoch kommt der Lufttemperatur die größte Bedeutung zu. Hat die Permafrostschmelze in Festgestein einen Einfluss auf die mechanische Stabilität von Felswänden und, so die weiterführende Frage, kann diese Schmelze möglicherweise zur Auslösung von Sturzprozessen führen? Dazu gibt es aktuelle Forschungsprojekte an lokalen Felskörpern und –wänden, die mit Bewegungs- und Streckenmessgeräten bestückt werden. So zeigen z.B. empirische Beobachtungen an kleinen Gletscherfeldern der zentralen Schweizer Alpen, dass das Rückschmelzen der Gletscher in den steilen Hochlagen in den letzten Jahren zu Permafrostveränderungen geführt hat. Die Felskörper reagieren zunehmend mit gravitativen Bewegungen auf die erhöhten Lufttemperaturen (Abb. 41) (Krautblatter & Hauck 2007).

Während derartige Untersuchungen an lokalen Objekten vorgenommen werden, versucht die regionale Permafrostbeobachtung und –modellierung zu Verbreitungskarten des Permafrostes für größere Gebiete zu gelangen. Diese Modelle bilden eine notwendige Vorstufe zu Naturgefahrenkarten, die eine Aussage darüber zu treffen haben, welchen Gefährdungsgrad das Permafrostgebiet aufweist. Permafrost-Verbreitungskarten können auf Grundlage der Verbreitung von Blockgletschern entwickelt werden (Nyhenhuis 2006). Unter aktiven Blockgletschern verstehen wir „loben- und zungenförmige Körper

2001

2008

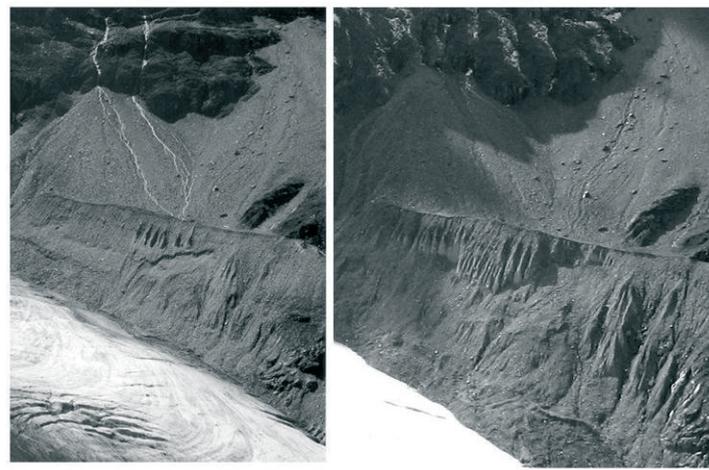


Abbildung 40

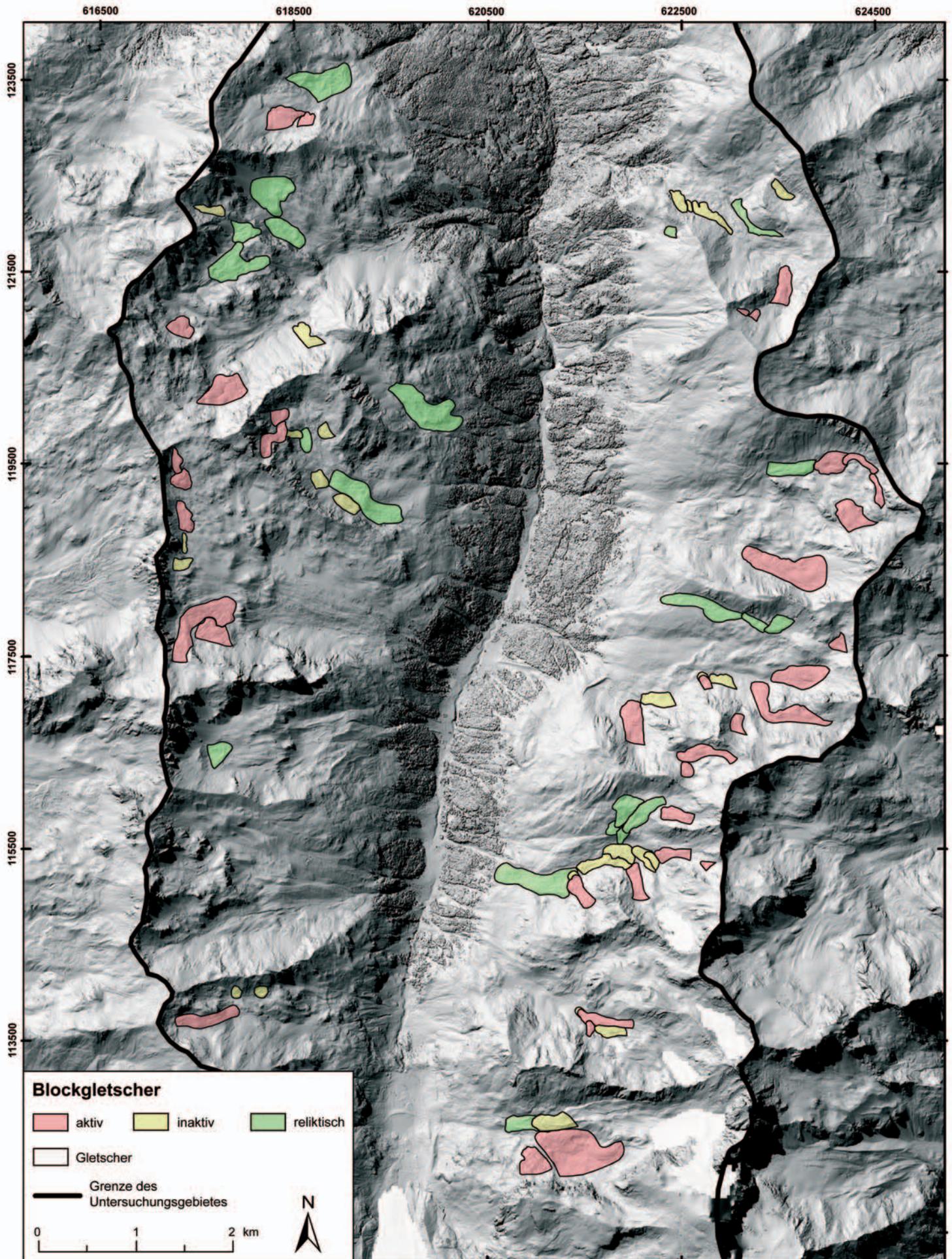
Durch die Zunahme der Lufttemperatur zwischen 2001 und 2008 bewirktes Ausschmelzen des Eiskerns der linken Seitenmoräne des Turtmangletschers, Wallis, Schweiz, auf einer Höhe von etwa 1800 m. Die Seitenmoräne kollabiert durch nachfolgende gravitative und hangaquatische Abtragsprozesse.

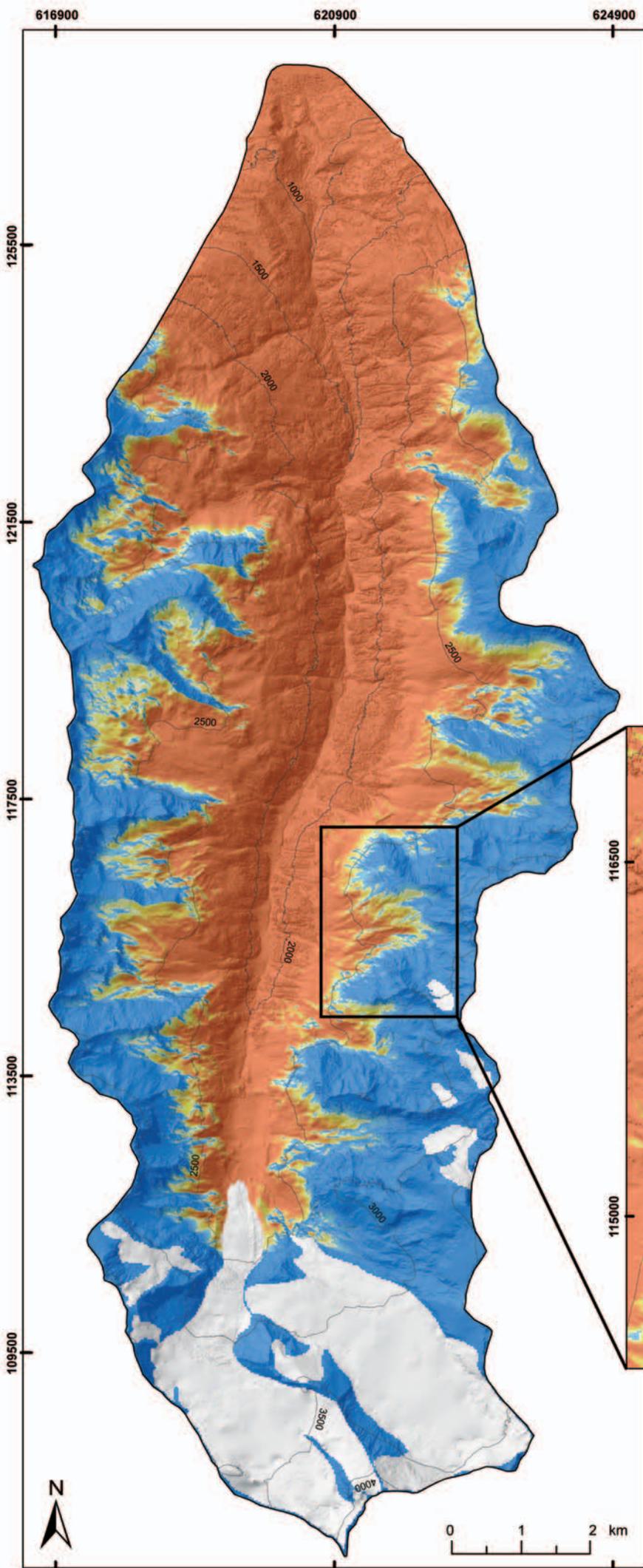
aus ganzjährig gefrorenem, unkonsolidiertem Material, welches mit Poreneis oder Eislinen übersättigt ist. Als Folge der Deformation des in ihnen enthaltenen Eises bewegen sie sich kriechend hang- oder talwärts“ (Barsch 1996) (Abb. 39). Aktive Blockgletscher sind damit ausgezeichnete Indikatoren für den alpinen Permafrost. Die in Abb. 46 dargestellte regionale Permafrostverbreitung für das Turmmanntal, Wallis, Schweiz basiert auf der aktuellen Verbreitung aktiver Blockgletscher, der potentiellen Direktstrahlung und der mittleren jährlichen Lufttemperatur.



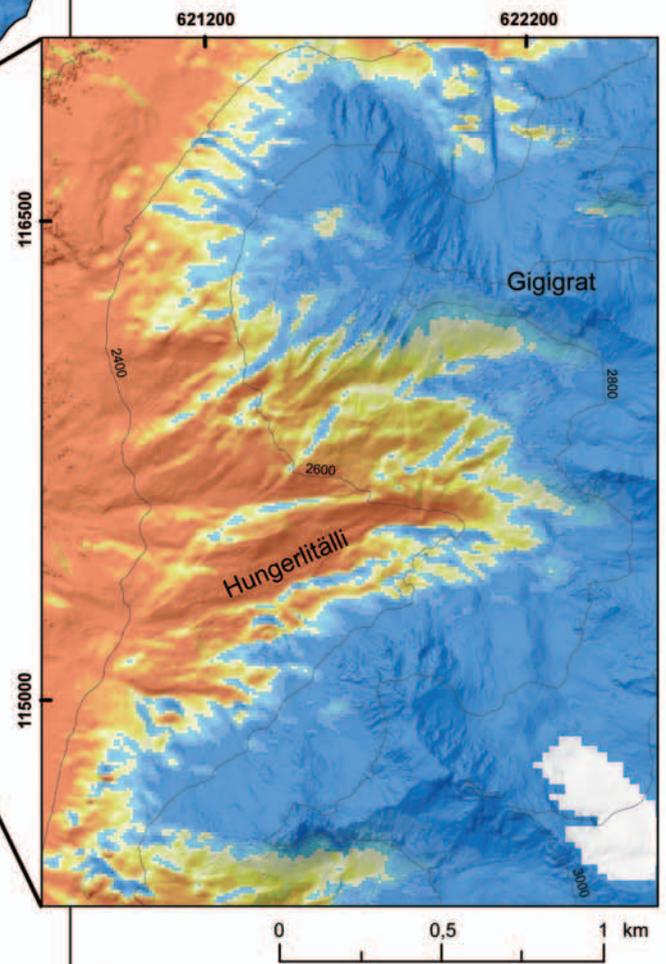
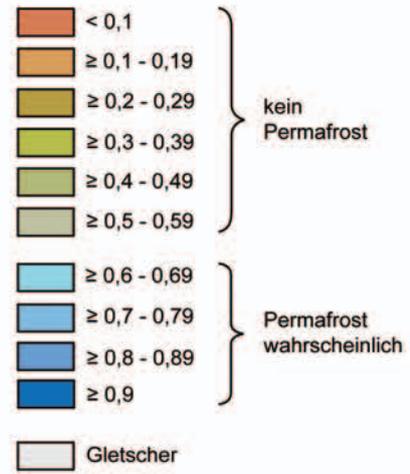
Abbildung 41

Durch Eisschmelze in den letzten Jahren freigelegtes Gletschervorfeld (linkes Bildzentrum) in steiler Hanglage im Steintälli, unterhalb des Rothorns (Walliser Alpen, Schweiz) auf etwa 2800-2900 m Höhe. In den freigelegten Felskörpern des Gletschervorfeldes werden heute deutliche gravitative Bewegungsmuster gemessen (Sackungen). Sie sind auf die veränderte Permafrostdynamik zurückzuführen und bilden möglicherweise eine zunehmende Naturgefahr durch Sturzprozesse (Krautblatter 2009).





### Permafrostwahrscheinlichkeit (PSIM)



## HOT SPOT BODENEROSION

### Eine schleichende Naturgefahr, die zur Katastrophe wird

Die Bodenerosion ist ein weltweites Problem und betrifft sowohl wohlhabende als auch arme Länder. Bereits 15% der Landoberfläche der Erde sind degradiert, größtenteils durch Wasser- und Winderosion. In Europa liegt der Anteil sogar bei 23%. Durch Bodenerosion werden vormals fruchtbare Böden weniger leistungsfähig oder sogar unnutzbar, was gerade für die Nahrungssicherheit einer steigenden Weltbevölkerung zu Problemen führt. Da sie in der Regel eher unspektakulär, schleichend und daher fast unbemerkt verläuft, wird ihre Gefährlichkeit und ihr Risikopotenzial häufig zu spät erkannt. Nicht nur der Boden landwirtschaftlicher Nutzflächen wird geschädigt, sondern auch nachgelagerte Ökosysteme

Abbildung 43

Bodenerosion durch Oberflächenabfluss während eines Niederschlagsereignisses. Die Menge (Magnitude) des flächenhaften Bodenabtrags ist gering und nach Ende des Prozesses kaum erkennbar. Durch die hohe Frequenz derartiger Prozesse summieren sich im Laufe der Jahre hohe Bodenabträge, die zum Kollaps des Bodensystems führen können.



und Wassereinzugsgebiete.

Unter Bodenerosion werden Prozesse der Erosion, des Transports und der Ablagerung von Bodenmaterial verstanden, die durch die Beseitigung der den Boden schützenden Vegetation hervorgerufen und durch den Oberflächenabfluss und den Wind bewirkt werden. Der Mensch spielt dabei durch seine Landnutzungspraxis die zentrale Rolle. In Regionen mit dichter Vegetation findet keine Bodenerosion statt. Ob ein Boden erodiert wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab, die die Eigenschaften des Hanges, die Pflanzenbedeckung, das Untergrundmaterial und die Erosivität der prozessstreibenden Wasser- und Windvorgänge betreffen:

- **Hangeigenschaften:** Wie bei den gravitativen Massenbewegungen spielt die Hanggeometrie eine wesentliche Rolle. Je länger und steiler ein Hang, desto stärker ist in der Regel die Bodenerosion.
- **Pflanzenbedeckung:** Eine dichte Pflanzendecke schützt den Boden. Oberirdische Pflanzenteile reduzieren die Energie von Niederschlag und Wind, Wurzeln stabilisieren den Untergrund. Bei höherer Vegetation kann abtropfendes Wasser von Pflanzenteilen jedoch eine größere Energie aufweisen als der normale Niederschlag und so erosiv wirken. Da die Pflanzenbedeckung je nach Jahreszeit variiert, schwankt auch die Anfälligkeit gegenüber dem Bodenabtrag im Jahresverlauf.
- **Erodierbarkeit:** Die stoffliche Zusammensetzung der Untergrundmaterials und der darin entwickelten Böden bestimmt seine Erodierbarkeit. Schluffe und Feinsande werden am leichtesten erodiert. Wichtig sind auch vorhandene Bodenlebewesen wie Regenwürmer, die die Grobporen und die Versickerung fördern sowie der Gehalt an organischer Substanz.
- **Erosivität:** Grundsätzlich können sowohl Niederschläge als auch Wind Böden erodieren. Ob ein Niederschlag Boden abtragen kann hängt von seiner Stärke, der Dauer, dem bereits vorhandenen Wasseranteil im Boden und von vorherigen Ereignissen ab, die bereits Material entfernt haben könnten. Durch aufprallenden Niederschlag werden Bodenpartikel gelöst und durch den Oberflächenabfluss transportiert. Die Winderosion wird vor allem durch die Windstärke bestimmt.

Bodenerosion kann oberirdisch flächenhaft und linienhaft sowie unterirdisch auftreten. Der flächenhafte Bodenabtrag ist nicht leicht zu erkennen und zu quantifizieren (Abb. 43). Nach einer geringen Fließstrecke konzentriert sich der Abfluss in Erosionsrinnen und -rillen, die durch weitere Niederschläge vertieft werden können. Diese Formen können durch die Bodenbearbeitung wieder zerstört werden. Ihre Quantifizierung erfolgt durch die Vermessung der Rinnenvolumina. Vergrößern sich Rillen, können Gräben (engl. Gullies) entstehen, die sich ab einer gewissen Tiefe nicht mehr durch die Bodenbearbeitung zerstören



Foto: T. Parkner

Abbildung 44

Gullyerosion auf der Nordinsel Neuseelands. Das Gully-System Waiorongomai hat eine Breite von 1,4 km, die Gräben erreichen eine Tiefe von 20 m und zerstören die Nutzfläche des Hanges vollständig (On-site Schäden). Sie haben sich nach der Entwaldung durch europäische Siedler massiv vergrößert. Die nachfolgenden Talauen wurden seit 1950 bis zu 7m tief mit Sediment verfüllt, was zu massiven Off-site Schäden geführt hat.

lassen. Gräben können durch sehr hohe Niederschläge während nur eines Ereignisses gebildet werden und zu außergewöhnlich hohen Magnituden des Abtrags führen. Häufig sind Landnutzungsänderungen für die Grabenbildung verantwortlich. Sie bilden die auffälligsten Formen der Bodenerosion (Abb. 44).

Infiltriert Regen in den Untergrund und fließt unter der Oberfläche hangparallel, meist in Tiergängen, ab, können unterirdische Tunnel mit einem Durchmesser von bis zu 2 m entstehen. Diese Form der Abtragung wird Tunnelerosion genannt. Bricht das Dach dieses Tunnels ein, können daraus Gräben und schließlich große Grabensysteme entstehen.

Schäden, die durch Bodenerosion entstehen, können in On- und Off-Site Schäden unterteilt werden. Als On-Site Schäden werden die Veränderungen bezeichnet, die direkt auf den bewirtschafteten Hängen entstehen. Hier kann es zu einer Verkürzung des Bodenprofils,

einer geringen Wasserspeicherkapazität und zum Verlust von Nährstoffen kommen. Dies führt zu einem geringeren Ernteertrag und ggf. zu einem erhöhten Düngemittelsatz. Bei hohen On-Site Schäden müssen die Flächen aufgegeben werden und fehlen für die Nutzpflanzenproduktion, wie dies bei Grabenbildungen häufig zu beobachten ist (Abb. 44). Hier wird nicht nur die Bodendecke des Hanges zerstört, sondern der geologische Untergrund in den Erosionsprozess einbezogen.

Als Off-Site Schäden gelten alle negative Folgen des Bodenabtrags außerhalb des direkten Hangbereiches. Das Hangmaterial wird an den Hangfuß transportiert und hier abgelagert. Die am Hangfuß deponierten Sedimente werden als Kolluvium bezeichnet (Abb. 45). Durch diese Depositionen können Pflanzen überdeckt werden und es kann zu Staunässe kommen. Bei hohen Magnituden des Hangabtrags werden die abwärts



Foto: R. Dikau

Abbildung 45  
Sedimentdeposition in Form eines Kolluviums, das aus dem Bodenerosionsprozess nach einem Niederschlagsereignis entstanden ist. Derartige Sedimentschichten können zu Schäden führen und werden durch die Bodenbearbeitung wieder zerstört.

gelegenen Flüsse betroffen. Die starke Sedimentation führt zu Schäden an den Nutzflächen der Talauen sowie zu Zerstörung von Straßen und Brücken. Grundsätzlich wird nach Bodenerosionsprozessen in den nachgelagerten Ökosystemen eine Verringerung der Artenvielfalt beobachtet, eine Trübung des Gewässers tritt auf und eine Verschmutzung durch Pestizide und Nährstoffe beeinträchtigt das ökologische Gleichgewicht. Weitere Off-Site Schäden entwickeln sich bei hohen Sedimentfrachten der Flüsse, die zur Verfüllung oder Beeinträchtigung von Hafen- und Wasserrückhaltebecken sowie von Wasserkraftwerken und Trinkwasserreservoirs führen. Sie führen zu Folgeproblemen der Trink- und Brauchwasserversorgung und stellen heute ein globales Problem in zahlreichen Flusssystemen der Erde dar.

Die Bodenerosion kann durch unterschiedliche Schutzmaßnahmen reduziert oder verhindert werden. Da der Prozess häufig sehr langsam abläuft ist es wichtig, diesen früh zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, da es wirtschaftlich erheblich günstiger ist, den Bodenvorsorglich zu schützen als später die Schäden zu finanzieren. Die Wahl der Feldfrüchte und die Fruchtfolge spielt beim Schutz des Bodens gegen die Erosion eine wichtige Rolle. Entscheidend ist die Bodenbedeckung, die bei gering deckenden Arten,

wie dem Mais, durch eine Untersaat erhöht werden kann. Brach liegende Flächen können durch den Anbau von Zwischenfrüchten geschützt werden. Dazu eignen sich beispielsweise Leguminosen, die zusätzlich zum Bodenschutz für eine Nitratdüngung sorgen. Alternativen zur konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug bieten Methoden der konservierenden Bodenbearbeitung wie die Mulchsaat, in der der Boden zwar aufgelockert aber nicht gewendet wird, und die Direktsaat, bei der keine vorherige Bodenbearbeitung erfolgt (Abb. 46). Um den Abfluss in den verdichteten Fahrspuren zu verhindern sollte darauf geachtet werden, dass die Anbaufläche mit möglichst breiten Reifen befahren wird und die Bearbeitung hangparallel erfolgt. In sehr steilen Bereichen ist eine Terrassierung notwendig. Auch die Aufgabe stark gefährdeter Fläche ist in Erwägung zu ziehen, falls dies möglich ist. Ein sinnvoller Schutz vor Winderosion ist die Anlage von Hecken, um die Windgeschwindigkeit zu verringern und Material aufzufangen.

Bodenschutzmaßnahmen können nur im ökonomischen und kulturellen Kontext der Landwirte entwickelt und angewendet werden. Da auf einem erodierten Boden weniger Ertrag erwirtschaftet wird, sinkt das Einkommen der Landwirte und dadurch können Investitionen in den Bodenschutz ggf. nicht getätigt

werden. Die Anbaufläche wird im Gegenteil stärker beansprucht, sodass eine Abwärtsspirale entstehen kann, die zur völligen Zerstörung der Bodenressource und in eine Nahrungsmittelkatastrophe führen kann. Aus einem schleichenden aber gefährlichen Bodenerosionsprozess ist damit im Laufe der Zeit ein tiefreichendes gesellschaftliches Problem erwachsen, das eine krisenhafte Entwicklung nach sich ziehen und zur Destabilisierung der Gesellschaft führen kann (Kulke & Popp 2008).

Abbildung 46

Das Mulchen mit Ernterückständen der Vorfrucht und die Direktsaat gehören zu den effektiven Bodenschutzmaßnahmen, die auch zur Erhöhung der organischen Substanz im Boden beitragen.

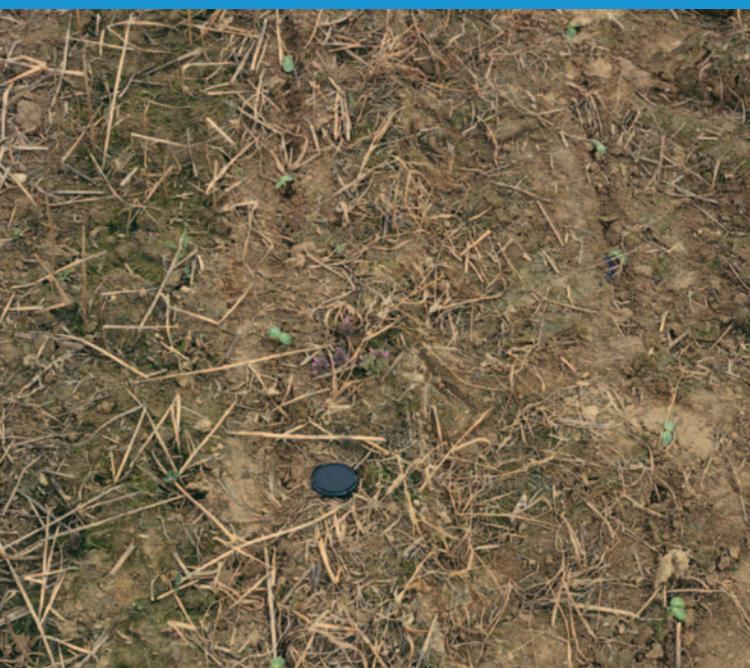


Foto: R. Dikau

## NATURGEFAHREN

### Drohende Prozesse und eine Komponente der Risikoerfassung

Naturgefahren werden durch Prozesse des Erdsystems verursacht. Sie sind potentiell gefährlich und sie bedrohen uns, d.h. dass sie in Zukunft stattfinden können. Wann und wo dies eintreten wird, ist unsicher, weshalb ihr mögliches Auftreten auch als Wahrscheinlichkeits-Aussage formuliert werden muss. Je mehr wir über die gefährlichen Prozesse wissen, desto sicherer kann die Gefahrenaussage werden. Derartige prognostische Aussagen stellen für jede umweltwissenschaftliche Disziplin eine gewaltige Herausforderung dar. Vorhersagen, Prognosen und Szenarien bilden dabei eine Möglichkeit, mit den unterschiedlichen Unsicherheiten und Prozess-Wahrscheinlichkeiten umzugehen. Eine die Naturgefahrenanalyse erschwerende Problemstellung entsteht dadurch, dass das zukünftige Verhalten von Erdsystem-Prozessen nicht mehr nur unter natürlichen Umweltbedingungen ermittelt werden kann. Der Mensch greift auch weiterhin in die Erdoberflächensysteme ein und verändert sie beabsichtigt oder unbeabsichtigt. In vielen Fällen, kann somit das verfügbare Wissen der Vergangenheit und Gegenwart nur mit Einschränkungen auf die Zukunft abgewendet werden, weil der Entwicklungsgang der die Erdoberfläche nutzenden Gesellschaften unbekannt oder unsicher ist. Die naturwissenschaftliche Naturgefahrenanalyse ist also ein äußerst anspruchsvolles Unterfangen, dessen Herausforderungen jedoch ergriffen werden muss und die in die Risikoerfassung zu integrieren ist.

Als Beispiel dieser Problematik soll der Zócalo (Plaza de la Constitución) im Zentrum der 22 Millionen-Metropole Mexiko-Stadt dienen (Abb. 47). Der Platz besitzt für alle Mexikaner eine äußerst hohe Symbolkraft. Die Staatsfahne (deren Schatten im Bild rechts auf dem Mexico El Placio Presidencial zu sehen ist) wird morgendlich ab 5 Uhr in einer feierlichen Prozedur gehisst. Das Foto zeigt belebte Straßen, einen belebten Platz, Touristen und informelle Märkte mit Straßenhändlern im Hintergrund. Droht hier, so die Fragestellung, ein gefährlicher Prozess, sind möglicherweise Menschen, Sachgüter und Staatssymbole betroffen, und, wenn ja, wann und wo wird dieser Prozess auftreten? Welche Schäden sind zu erwarten? Um welche Prozesse handelt es sich? Tropischer Wirbelsturm, Vulkanausbruch,



Foto: R. Zimmermann-Dikau

Abbildung 47

Der Zócalo (Plaza de la Constitución) im Zentrum der 22 Millionen-Metropole Mexiko-Stadt.

Erdbeben, Baugrundabsenkung? Sind die Bewohner und Touristen ausreichend informiert und auf den gefährlichen Prozess und seine Folgen vorbereitet? Wie wird die Bedrohung wahrgenommen? Drohen Gebäude einzustürzen? Gibt es Fluchtwege und Rettungsdienste? Welche Frühwarnsysteme sind installiert und was bedeuten die Warnsignale? Kann die U-Bahn weiter benutzt werden? Wo befindet sich das nächste Krankenhaus? Sie sehen, liebe Leser, vor welchen Problemstellungen das Risikomanagement einer städtischen Metropole steht.

Im größeren Kontext von Risiken und dem gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit bildet die Naturgefahrenerkennung und -analyse eine Komponente der Risikoerfassung. Das zukünftige Auftreten von gefährlichen Prozessen wird in Wahrscheinlichkeits-Aussagen formuliert, die Eingang in die Risikoanalyse und weiterhin in das Risikomanagement finden sollen. In Weiterentwicklung dieser Ansätze hat sich in den letzten Jahren die Konzeption der Risikoregulierung (risk governance) entwickelt (IRGC 2007, Renn et

al. 2007). Sie hat das Ziel, Risiken in menschlichen Gesellschaften zu vermindern und gesellschaftliche Strukturen der Risikoregulierung aufzubauen. Dabei soll das Risikomanagement nicht ausschließlich staatlichen Behörden und privaten Unternehmen überlassen werden, sondern muss die vier zentralen Akteure der Gesellschaft einbeziehen, d.h. Wissenschaften, Ökonomie, Regierungen und Zivilgesellschaft. Die Risiko-Kommunikation verbindet und vernetzt diese Komponenten. Für die geomorphologische Naturgefahrenforschung und -lehre eröffnen sich zahlreiche Möglichkeiten, ihre Expertise in diesen Risikokontext zu stellen und ihre prognostischen Ansätze zu stärken.

- AK Geomorphologie (Hrsg., 2006): Die Erdoberfläche – Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen (Deutscher Arbeitskreis für Geomorphologie). Z. Geomorph., N.F., Suppl.-Bd. 148. Stuttgart.
- Albert, K.-D., Andres W. & Lang, A. (1997): Paleodunes in NE Burkina Faso, pedo- and morphogenesis in a chronological framework provided by luminescence dating. Z. Geomorph., NF 41: 167-182.
- Albert, K.-D., Löhr, D. & Neumann, K. (Hrsg.) (2004): Deutsche Forschungsgemeinschaft. Mensch und Natur in Westafrika, Ergebnisse des Sonderforschungsbereiches 268 "Kulturentwicklung und Sprachgeschichte im Naturraum Westafrikanische Savanne". Weinheim.
- Albert, K.-D., Müller, J., Ries, J. & I. Marzloff (2004): Aktuelle Landdegradation in der Sahelzone Burkina Faso. In: Albert, K.-D., Löhr, D. & K. Neumann (Hrsg.): Deutsche Forschungsgemeinschaft. Mensch und Natur in Westafrika, Ergebnisse des Sonderforschungsbereiches 268 "Kulturentwicklung und Sprachgeschichte im Naturraum Westafrikanische Savanne", 289-330.
- Alcamo, J., Moreno, J.M., Nováky, B., Bindl, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E. & A. Shvidenko (2007): Europe. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & C.E. Hanson (Hrsg.): Climate Change 2007: Impacts, adaption and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- Barsch, D. (1996): Rockglaciers. Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Heidelberg.
- Behnen, T. (2000): Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg und seine sozio-ökonomischen Folgen. Hannoversche Geographische Arbeiten 54. Münster.
- Bell, R. (2007): Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse an der Schwäbischen Alb. Dissertationsschrift an der Math.-Nat. Fakultät der Universität Bonn, Bonn.
- Benavent-Corai, J., Rojo, C., Suárez-Torres, J. & L. Velasco-Garcia (2007): Scaling properties in forest fire sequences: The human role in order of nature. Ecological Modelling, 205: 336-342.
- Bork, H.-R., Bork, H., Dalchow, C., Faust, B., Piorr, H.-P. & T. Schatz (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Gotha, Stuttgart.
- Butzengeiger, S. & B. Horstmann (2004): Meeresspiegelanstieg in Bangladesh und den Niederlanden. Germanwatch, Bonn.
- BUWAL (1999): Risikobewertung bei gravitativen Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Casty, C., Wanner H., Luterbacher J., Esper J. & R. Böhm (2005): Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. International Journal of Climatology 25: 1855-1880.
- Crutzen, P. I. & Stoermer, E. F. (2000): The Anthropocene, IGBP Newsletter 41: 12.
- Damm, B. & A. Felderer (im Druck). Climate Change and natural hazards - debris flows derived from glacier retreat and permafrost degradation in the Eastern Alps. Quaternary Science Journal.
- Davidson, E.A. & I.A. Janssens (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature 440/9: 165-173.
- Dikau, R. (2004): Die Bewertung von Naturgefahren als Aufgabenfeld der Angewandten Geomorphologie. Z. Geomorph., N.F., Suppl.-Bd. 136: 181-193.
- Dikau, R. (2006): Komplexe Systeme in der Geomorphologie. Mitt. Österr. Geogr. Ges., 148: 125-150.
- Dikau, R. & J. Weichselgartner (2005): Der unruhige Planet. Der Mensch und die Naturgewalten. Primus Verlag, Darmstadt.
- Dotterweich, M. (2008): The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment – A review. Geomorphology 101: 192-208.
- Drescher, A. W. (1995): Landnutzungswandel und rezente Geomorphodynamik an der andalusischen Mittelmeerküste. – Geoökodynamik 16, H. 2: 137-152.
- Emanuel, K. (2005): Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature 436: 686 - 688.
- Faust, D. (1995): Bodenerosion in Niederandalusien. Geographische Rundschau 47: 712-720.
- Felgentreff, C. & T. Glade (Hrsg.) (2009): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Heidelberg.
- Foley, J.A., DeFries, R., Gregory, P.A., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. & P.K. Snyder (2005): Global Consequences of Land Use. Science 309: 570-574.
- Gares, P.A., Sherman, D.J. & K.F. Nordstrom (1994): Geomorphology and natural hazards. Geomorphology 10: 1-18.

- Glade, T. & R. Dikau (2001): Gravitative Massenbewegungen: Vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 145 (6): 42-55.
- Gomes, J.F.P. & M. Radovanovic (2008): Solar activity as a possible cause of large forest fires - a case study: Analysis of the Portuguese forest fires. *Science of the Total Environment* 394: 197-205.
- Görlach, B. (2004): Assessing Economic Impacts of Soil Degradation. Präsentation zur Vital Soil conference, Scheveningen, 18/19 November 2004.
- Gruber, S., Hoelzle, M. & W. Haeberli (2004): Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot sommer of 2003. *Geophysical Research Letters* 31.
- Gruber, S. & W. Haeberli (2007): Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research* 112.
- Haeberli, W. & M. Beniston (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio* 27: 258-265.
- Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S. & D. Vonder Mühll (2006): Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 189-214.
- Haeberli, W. & R. Hohmann (2008): Climate, glaciers and permafrost in the Swiss Alps 2050. Scenarios, consequences and recommendations. In: *Proceedings of the 9th international conference on Permafrost, Fairbanks/Alaska*.
- Haeberli, W. & S. Gruber (2008): Research Challenges for Permafrost in Steep and Cold Terrain: An Alpine Perspective. *Proceedings of the 9th international conference on Permafrost, Fairbanks/Alaska*.
- Harris, C., von der Mühll, D., Isaksen, K., Haeberli, W., Sollid, J.L., King, L., Holmlund, P., Dramis, F., Gugliemin, M. & D. Palacios (2003): Warming permafrost in European mountains. In: *Global and Planetary Change* 39: 215-225.
- Hooke, R. L. (2000): On the History of humans as geomorphic agents. *Geology*, Vol .28, No. 9: 843-846.
- Houben, P. (2008): Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany. *Geomorphology* 101: 172-191.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & H.L. Miller (Hrsg.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IRGC (International Risk Governance Council) 2007: An introduction to the IRGC risk governance framework. *Policy Brief*. Genf.
- ISDR (2004): *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. International Strategy for Disaster Reduction, Genf.
- Junta de Andalucía (Hrsg.) (2007): Cambio climático. *Medioambiente* 57: 56.
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., Salzmann, N., Schlaefli, S., Schmutz, K., Schneider, D., Strozzi, T. & Y. Weidmann (2005): Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 527-554.
- Kääb, A., Frauenfelder, R. & I. Roer (2007): On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and planetary change* 56: 172-187.
- Kelletat, D. (1999): *Physische Geographie der Meere und Küsten*. Stuttgart.
- Knutson, T.R., Tuleya, R.E., Shen, W. & I. Ginis (2001): Impact of CO<sub>2</sub>-Induced Warming on Hurricane Intensities as Simulated in a Hurricane Model with Ocean Coupling. *Journal of Climate* 14: 2458-2468.
- Krautblatter, M. (2009): Detection and quantification of permafrost change in alpine rock walls - and implications for rock instability. *Dissertationsschrift an der Math.-Nat. Fakultät der Universität Bonn, Bonn*.
- Krautblatter, M. & C. Hauck (2007): Electrical resistivity tomography monitoring of permafrost in solid rock walls. *Journal of Geophysical Research, Earth – Surface* 112.
- Kulke, E. & H. Popp (Hrsg., 2008): *Umgang mit Risiken: Katastrophen–Destabilisierung–Sicherheit*. Deutsche Gesellschaft für Geographie (DGfG). Bayreuth, Berlin.
- Lambin, E. F. & Geist H. (Hrsg.) (2006): *Land-Use and Land-Cover Change*. Springer.
- Lawrence, D.M. & A.G. Slater (2005): A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. In: *Geophysical Research Letters* 32.
- Leemans, R. (1999): Modeling for Species and habitats: New opportunities for problem solving. *Sci. Total Environment* 240: 51-73.

- Lindkvist, S. & A. Tengberg (1993): New evidence of desertification from case studies in northern Burkina Faso. *Geogr. Ann.*, 75 A (3): 127-135.
- MASR (2005): Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report. Washington DC: Island Press.
- Mayor, A.G., Bautista, S., Llovet, J. & J. Bellot (2007): Post-fire hydrological and erosional responses of the Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. *Catena* 71: 68-75.
- Moldenhauer, K.-M. (1996): Schwermetalle und organische Schadstoffe in Hochwassersedimenten und Böden hessischer Auen. *Geol. Jb. Hessen* 124: 191-213.
- Moldenhauer, K.-M., Heinrich, J. & A. Vater (subm.): Causes, history and ecological consequences of multiple soil erosion processes in the northern Odenwald Mountains. *Die Erde*, Berlin.
- Nyenhuis, M. (2006): Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem. *Bonner Geogr. Abh.* 116. Bonn.
- OcCC – Organ consultative sur les Changements Climatiques (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, Bern.
- Pierce, J.L., Meyer, G.A. & A.J.T. Jull (2004): Fire induced erosion and millennial scale climate change in Northern Ponderosa pine forests. *Nature* 432: 87-90.
- Plate, E. J. & Merz, B. (Hrsg.)(2001): Naturkatastrophen – Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge. Stuttgart.
- Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chhabra, A., DeFries, R. S., Foley, J. A., Geist, H., Houghton, R. A., Klein Goldewijk, K., Lambin, E. F., Millington, A., Rasmussen, K., Reid, R. S. & B. L. Turner (2006): Global Land-Cover-Change: Recent Progress, Remaining Challenges. In: Lambin, E. F., Geist, H. (Hrsg.): *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. Berlin, Heidelberg.
- Renn, O., Schweizer, P.-J., Dreyer, M. und A. Klimke (2007): Risiko – Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. München.
- Reutter, R. (1969): Vom Pflügen und Erdtragen in Finkenbach. – *Der Odenwald*, 16/1: 21-22, Neustadt.
- Richter, G. (1991): Combating Soil Erosion in Vineyards of the Mosel-Region. *Forschungstelle Bodenerosion der Universität Trier Mertesdorf (Ruwertal)*, H. 10.
- Richter, G. (1998). *Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Darmstadt.
- Ries, J.B. (2006): Soil Erosion on Abandoned Fields in Mediterranean Mountains - Monitoring of Processes and Development. *Journal of Mediterranean Ecology* 6: 43-52.
- Ruddiman, W. F. (2003): The anthropocene greenhouse era began thousands of years ago, *Climate Change* 61: 261–293.
- von Elverfeldt, K., Glade, T. & R. Dikau (2008): Naturwissenschaftliche Gefahren- und Risikoanalyse. In: Felgentreff, C. & T. Glade (Hrsg.): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*, 31-46. Heidelberg.
- Wagner, K. & D. Faust (2008): Die Veränderung der Bodenerosion vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels. - Eine Zusammenstellung für den Korridor Aachen -- Görlitz. Posterbeitrag zum Workshop „Fragile Landschaften“, Dresden.
- Westerling, A.L. (2006): Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. *Science Magazine* 313/5789: 940-943.
- Wilkinson, B. H. (2005): Humans as geologic agents: a deep time perspective. *Geology*, Vol 33, No. 3: 161-164.

