

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Verzeichnis der Figuren.....	IX
Verzeichnis der Tabellen.....	XI
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen.....	XIII
1 Einführung.....	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Wahl und Lage der Untersuchungsgebiete.....	3
1.3 Bisherige Arbeiten.....	4
1.4 Methodische Konzeption.....	6
1.4.1 Aktivität von Massenbewegungen.....	7
1.4.2 Klimaszenarien.....	7
1.4.3 Kopplung der Einzelmodelle.....	8
2 Aktivität von Massenbewegungen.....	9
2.1 Klimatische Auslösung von Massenbewegungen.....	9
2.1.1 Auslösungsmechanismen.....	9
2.1.2 Vorbereitung - Auslösung.....	11
2.2 Modellierung von Massenbewegungen.....	11
2.2.1 Hydrologische Modelle.....	12
2.2.1.1 Tank-Modelle.....	12
2.2.1.2 Physikalisch-basierte, verteilte Modelle.....	12
2.2.2 Hangstabilitätsmodelle.....	13
2.2.3 Empirisch-statistische Modelle (Schwellenwertmodelle).....	14
3 Allgemeine Zirkulationsmodelle der Atmosphäre.....	15
3.1 Der anthropogen verstärkte Treibhauseffekt.....	15
3.2 Modelllaufbau.....	18
3.3 GCM-Experimententypen.....	20
3.4 Modellbewertung.....	21
4 Methoden.....	23
4.1 Downscaling von GCM-Simulationen.....	23
4.1.1 Physikalischer Hintergrund.....	24
4.1.2 Datengrundlage für Downscaling-Techniken.....	25
4.1.3 Downscaling-Techniken.....	25
4.1.3.1 Dynamische Verfahren.....	25
4.1.3.2 Empirisch-statistische Verfahren.....	26
4.1.4 Auswahl der Downscaling-Technik.....	28
4.2 Downscaling mit linearer Regression (CCA).....	28
4.3 Downscaling mit Analog-Methode.....	32

4.4	Kopplung der Impaktmodelle mit lokalen Klimaszenarien.....	34
4.5	Abschätzung der Unsicherheit.....	38
5	Anwendungsbeispiele	40
5.1	Boisivre, Barcelonnette Becken.....	40
5.1.1	Lage und geomorphologische Situation.....	40
5.1.2	Datengrundlage.....	40
5.1.3	Hydrologisches Modell.....	42
5.1.4	Downscaling-Modell für Monatsniederschlag.....	43
5.1.5	Lokale Klimaszenarien.....	50
5.1.6	Modellkopplung und Impaktszenarien.....	54
5.1.7	Diskussion.....	55
5.2	Niederschlagssimulation mit Analog-Technik.....	60
5.2.1	Downscaling-Modell.....	61
5.2.2	Validierung.....	61
5.2.3	Niederschlagsszenarien.....	63
5.2.4	Temperaturszenarien.....	65
5.2.5	Diskussion.....	65
5.3	Alverà, Cortina d'Ampezzo.....	68
5.3.1	Lage und geomorphologische Situation.....	68
5.3.2	Klima.....	68
5.3.3	Monitoring des Schuttstroms.....	69
5.3.4	Hydrologisches Modell.....	71
5.3.5	Hangstabilitätsmodell.....	72
5.3.6	Downscaling-Modell.....	72
5.3.7	Lokale Klimaszenarien.....	73
5.3.8	Modellkopplung und Impaktszenarien.....	73
5.3.9	Diskussion.....	76
6	Diskussion der Anwendungsbeispiele	80
7	Folgerungen und Ausblick	83
8	Zusammenfassung / Summary	86
9	Literaturverzeichnis	91

Verzeichnis der Figuren

- Fig. 1. Lage der Untersuchungsgebiete und Land-Meer-Verteilung in einem Klimamodell der spektralen Auflösung T42. Die graue Fläche wird im GCM als Landoberfläche betrachtet (Details in Kapitel 3). 4
- Fig. 2 Vereinfachte Darstellung des Zusammenspiels von Niederschlag, Temperatur und Landnutzung in Bezug auf die Hangstabilität. Rückkopplungen zwischen Landnutzung, Bodenwasserhaushalt und Klima sind nicht berücksichtigt. Ein möglicher anthropogener Eingriff in die Landnutzung ist angedeutet, die anthropogene Klimaänderung bleibt unberücksichtigt. 10
- Fig. 3. CO₂-Konzentrationen der letzten 1000 Jahre von Eisbohrkernen in der Antarktis und seit 1958 von der Meßstation auf dem Mauna Loa, Hawaii. Die geglättete Kurve ist ein 100jähriges gleitendes Mittel (Quelle: HOUGHTON et al. 1996). 15
- Fig. 4. a) Gesamte anthropogene CO₂-Emissionen der IS92 Emissionsszenarien des IPCC, b) daraus resultierende CO₂-Konzentrationen nach dem „Bern“-Kohlenstoffkreislaufmodell und dem Kohlenstoffhaushalt 1980-1989 (Quelle: HOUGHTON et al. 1996). 16
- Fig. 5. Schätzung des global und über das Jahr gemittelten anthropogenen Strahlungsantriebs (in Wm⁻²), wie er sich durch Konzentrationsänderungen der Treibhausgase und Aerosole von der präindustriellen Zeit bis 1992 und durch natürliche Schwankungen der Solarstrahlung von 1850 bis 1992 ergibt. Die Höhe der Rechtecke gibt eine mittlere Schätzung des Antriebs an, während die Fehlerbalken den geschätzten Unsicherheitsbereich, basierend auf publizierten Daten, markieren (Quelle: SHINE et al. 1996). 17
- Fig. 6. Atmosphärische und ozeanische Komponente eines GCMs des Hadley Centres mit 2.5° (Breite) x 3.75° (Länge) horizontaler Auflösung (global 96x72 Gitterpunkte). Die Atmosphärenkomponente hat 11 und die Ozeankomponente 17 vertikale Schichten (nach VINER & HULME 1994). 18
- Fig. 7. Land-Meer-Konturen im Bereich des Nordatlantik und Europas im neuesten GCM des Hadley Centre mit Gitterabständen von 2.5°x3.75° (Quelle: WWW-Seite des Hadley Centre). Die grauen Flächen stellen die dem GCM bekannte Landoberfläche dar. Eine ähnliche Darstellung für das bei ECHAM4 verwendete spektrale Modell T42 wurde bereits in Fig. 1 vorgestellt. 19
- Fig. 8. Verbindung zwischen GCM und geomorphologischen bzw. hydrologischen Skalenbereichen. Techniken A-C stehen für verschiedene Downscaling-Ansätze für lokalen Niederschlag, die alle auf dem großräumigen Zustand der Atmosphäre beruhen. Niederschlagsdaten von einem oder wenigen Gitterpunkten des GCM sollten nicht direkt lokal angewendet werden. 24
- Fig. 9. Erste 4 EOFs des Bodenluftdrucks (SLP) im Winter (DJF) 1960-1989. Die erklärte Varianz, jeweils unter der Grafik geplottet, beträgt für alle 4 EOFs zusammen 89 % der beobachteten Variabilität. 30
- Fig. 10. Vergleich der Zeitreihe des 1. EOF-Koeffizienten des Bodenluftdrucks über dem Nordatlantik mit dem NAO-Index im Winter (DJF) 1900-1991. Die dicken Linien sind 11jährige gleitende Mittelwerte. (Quelle der NAO-Indexwerte: WWW-Seite von J.W. HURREL). 31
- Fig. 11. Modellkette von Emissionsszenario zum lokalen Aktivitätsszenario von Massenbewegungen. Unter Impaktmodellierung sind kombinierte hydrologisch-bodenmechanische Modelle zu verstehen. * Siehe Erläuterung im Text. 36
- Fig. 12. Schema der Kopplung von Zirkulationsmodellen der Atmosphäre (GCMs) und Hangmodellen (Hydrologie, Stabilität) mit Grad der physikalischen Basierung in Abhängigkeit vom Maßstab. 37
- Fig. 13. Daten- und Informationsfluß bei der Klimaimpaktforschung für klimatisch gesteuerte Massenbewegungen. Validierungsmöglichkeiten sind für unterschiedliche Stadien der Modellkette angedeutet, für die Meßwerte vorliegen sollten. 39
- Fig. 14. Lage der Hangrutschung Boisivre im Barcelonnette-Becken, SE-Frankreich. 40

- Fig. 15. Langjährig gemittelte Werte des Monatsniederschlags 1928-1994 (linke Ordinate), der mittleren Monatstemperatur 1956-1994 (rechte Ordinate) und des effektiven Niederschlags P_{eff} 1961-1994 (linke Ordinate) in Barcelonnette. P_{eff} wird durch Subtraktion der potentiellen Evapotranspiration nach THORNTHWAITE (1948) von den gemessenen Monatssummen berechnet, weshalb auch negative Werte auftreten können. Datenquelle: Météo-France. 41
- Fig. 16. Aufsicht der Hangrutschung Boisivre bei Barcelonnette, SE-Frankreich (nach van ASCH & BUMA 1997). 42
- Fig. 17 (2 Seiten). CCA-Muster des Bodenluftdrucks für Monatsniederschläge in Barcelonnette in hPa. Negative Werte sind gestrichelt. Die zugehörige typische Niederschlagsanomalie in Barcelonnette ist in allen Monaten mit Ausnahme des April negativ. Dies ist physikalisch plausibel, da, außer im April, ein relatives Bodenhoch über den Britischen Inseln vorherrscht, das verstärkte NE Anströmung kontinentaler Luftmassen im Gebiet von Barcelonnette bedeutet. Umgekehrt bedeutet das CCA-Muster im April mit dem relativen Tief über den Britischen Inseln verstärkte Anströmung maritimer Luftmassen aus westlicher Richtung. 46
- Fig. 18. Darstellung der typischen synoptischen Situation im Februar und April durch Addition der CCA-Vektoren aus Fig. 17 zum mittleren Bodenluftdruck im Februar und April, siehe Text. Isobaren in hPa. 47
- Fig. 19. a) Beobachteter und geschätzter Winterniederschlag (Oktober-April) in Barcelonnette, 1928-94. Schätzung mit CCA von monatlichem SLP des NCEP. b) Grundwasserstände in Boisivre 1961-1994 modelliert mit beobachtetem Niederschlag und zum Vergleich mit dem durch CCA geschätzten Niederschlag. 48
- Fig. 20. Niederschlagsszenarien (Summe der 7 Wintermonate wie in Fig. 19a) basierend auf Downscaling von SLP aus drei GCM-Experimenten. Bei den Kurven handelt es sich um 30jährige gleitende Mittel der CCA-Schätzung ohne Varianzkorrektur. 50
- Fig. 21. Wie Fig. 20. Unterschiede in den Niederschlagsszenarien für Barcelonnette bei Verwendung unterschiedlicher Fit-Perioden für die Erstellung der empirischen Regressionsmodelle. 52
- Fig. 22. GCM-Gitterpunkte, über die für die Temperaturszenarien für Barcelonnette interpoliert wurde, sind in grau unterlegt. a) 16 T42-Gitterpunkte von ECHAM4; b) 6 Gitterpunkte von HadCM2 in der Auflösung $2.5^\circ \times 3.75^\circ$. Der Gitterpunkt ist der Mittelpunkt des jeweiligen Rechtecks. Barcelonnette ist durch den schwarzen Kreis gekennzeichnet. 53
- Fig. 23. GCM-basierte mittlere Wintertemperatur (DJF) von 1860 bis 2100 als 30jährige gleitende Mittel für Barcelonnette, Frankreich. Werte wurden für ECHAM4/OPYC3 sowie HadCM2 mit und ohne Sulfataerosole durch Interpolation und eine ortsabhängige Korrektur auf mehreren GCM-Gitterpunkten berechnet. 54
- Fig. 24. Modellkette für die Klimafolgenbewertung der Aktivität von Boisivre. Der aufgezeigte Ablauf wird für je 30jährige Perioden durchgeführt. Ausgabe sind Wiederkehrintervalle der Auslösung innerhalb der betrachteten Periode. *Die Temperatur wird nicht durch CCA, sondern durch Interpolation mehrerer GCM-Gitterpunkte berechnet. 55
- Fig. 25. Wiederkehrintervalle der Rutschungsaktivität von Boisivre berechnet mit EPL-SLIDE, angetrieben mit CCA-Schätzungen des Winterniederschlags und interpolierten Temperaturszenarien, siehe Fig. 24. Resultate basierend auf 3 GCM-Experimenten und Resultate von HCGS mit 3 CCA-Modellen, die auf unterschiedlichen Fit-Perioden beruhen (a). Resultate von ECHAM4/OPYC3 mit Gegenüberstellung der Wiederkehrintervalle beruhend auf sich änderndem Niederschlag und Temperatur und sich änderndem Niederschlag bei gleichbleibender Temperatur (ECHAM4-P) und umgekehrt (ECHAM4-T) (b). 56

- Fig. 26. Gemessener und rekonstruierter Winterniederschlag (DJF) in Cortina d'Ampezzo, 1922-1960. Die Rekonstruktion basiert auf der Analog-Technik mit Fit-Periode Analog1. 63
- Fig. 27. Lage des Schuttstromes Alverà bei Cortina d'Ampezzo in den italienischen Dolomiten. 68
- Fig. 28. Langjähriger Monatsniederschlag (1922-1990) und langjährige Monatsmitteltemperatur (1955-85) in Cortina d'Ampezzo nach Daten des Ufficio Idrografico e Mareografico Venezia. 69
- Fig. 29. Meßeinrichtungen auf dem Schuttstrom Alverà. F1-F8: offene Piezometer mit Druckfühler und Bewegungsmesser. I1-I3: Inklinometer mit Druckfühler und Bewegungsmesser. S5: Inklinometer mit Druckfühler und Bewegungsmesser sowie Temperaturmessung. S5 ist seit Juni 1989 in Betrieb, die anderen Instrumente seit Frühjahr 1995 (Quelle: C.N.R. Padova, Italien). 70
- Fig. 30. Konzept des hydrologischen Modells für den Schuttstrom Alverà basierend auf EPL. Q_1 und Q_2 sind Abfluß aus oberem bzw. unterem Reservoir mit den Abflußkoeffizienten k_1 und k_2 . H ist die Höhe zwischen unterer Begrenzung des Tanks und Grundwasserspiegel und ein Maß für den gesamten Speicherinhalt. H_e ist ein Maß für den maximalen Speicherinhalt des unteren Reservoirs bei konstanter Obergrenze. 72
- Fig. 31. Modellkopplung für Klimaimpaktscenario des Schuttstroms Alverà. * Die Temperatur wird in Kombination mit der Analogtechnik für Niederschlag durch Interpolation mehrerer GCM-Gitterpunkte berechnet. 74
- Fig. 32. Szenarien der Anzahl der Tage mit kritischen Grundwasserständen > -0.5 m des Schuttstroms a) im Frühjahr (MAM) und b) im Sommer (JJA). Szenarien basieren auf lokalen Klimaszenarien mit Expanded Downscaling mit veränderter Temperatur und Niederschlag (T+P), mit konstantem Niederschlag auf dem Niveau 1960-89 und sich ändernder Temperatur (T) sowie umgekehrt (P). 76
- Fig. 33. GCM-basierte mittlere Wintertemperatur (DJF) von 1860 bis 2100 als 30jährige gleitende Mittel für Cortina d'Ampezzo, Italien. Werte wurden für ECHAM4/OPYC3 ohne Sulfataerosole sowie HadCM2 mit und ohne Sulfataerosole durch Interpolation mit Lokaliitätskorrektur aus mehreren GCM-Gitterpunkten berechnet und für ECHAM4/OPYC3 mit Sulfataerosolen mit Expanded Downscaling (EDS) abgeleitet. 78

Verzeichnis der Tabellen

- Tabelle 1. Kurzbeschreibung der untersuchten Massenbewegungen. 1
- Tabelle 2. Entwicklung der Konzentration von CO_2 , CH_4 und N_2O (Daten aus HOUGHTON et al. 1996). 16
- Tabelle 3. Typische horizontale Auflösungen spektraler atmosphärischer Zirkulationsmodelle. Aufgrund der breitenabhängigen Meridiangitterabstände sind die Angaben in Kilometer als Durchschnittswerte zu sehen. 19
- Tabelle 4. Charakteristika der transienten, gekoppelten GCMs HadCM2 und ECHAM4/OPYC3. AGCM steht für die Atmosphären- und OGCM für die Ozeankomponente des gekoppelten Modells. IS92a bzw. die Aktualisierung IS95a ist das wahrscheinlichste Emissionsszenario des IPCC (HOUGHTON et al. 1992) und dem früheren als 'business-as-usual' bekannten Szenario A sehr ähnlich. 21
- Tabelle 5. Charakteristika von vier Downscaling-Ansätzen. CCA= kanonische Korrelationsanalyse nach von STORCH et al. (1993), EDS= Expanded Downscaling nach BÜRGER (1996), ANALOG= Analog-Technik nach ZORITA et al. (1995). 28
- Tabelle 6. Korrelation und erklärte Varianz zwischen beobachteten und geschätzten Niederschlagsreihen des Monatsniederschlags in Barcelonnette. Ergebnisse sind nach Kreuzvalidierung der CCA-Modelle für drei unterschiedliche Fit-Perioden dargestellt. 44

- Tabelle 7. Langjährige Monatsmittelwerte des Niederschlags (mm) in Barcelonnette geschätzt mit CCA von SLP basierend auf der langen Fit-Periode 1928-94. Dargestellt sind drei Perioden der transienten GCM-Experimente. 51
- Tabelle 8. Jahresmitteltemperatur (°C) in Barcelonnette interpoliert aus 3 GCM-Experimenten für zwei Perioden und Betrag des Temperaturanstieges als Differenz beider Perioden. Deutlich sichtbar ist die abkühlende Wirkung der Sulfataerosole in HCGS im Vergleich zu HCGG. 53
- Tabelle 9. Zeitreihenkorrelationen verschiedener Parameter des Niederschlags in Cortina d'Ampezzo, Misurina und San Vito (Dolomiten, Italien). 60
- Tabelle 10. Fit- und Zielperioden der Analog-Technik mit Bodenluftdruck für täglichen Niederschlag in Cortina, Barcelonnette und Sandling Park. 61
- Tabelle 11. Zeitreihenkorrelation der jahreszeitlichen Niederschlagssummen jeweils der Zielperioden zwischen Analog-Schätzung und Beobachtung. 62
- Tabelle 12. Korrelation der intramonatlichen Standardabweichung der Tagesniederschläge gemittelt über Jahreszeiten und Korrelation der Anzahl der Tage mit Niederschlag > 0.2 mm pro Saison zwischen Analog-Schätzung und Beobachtung. 62
- Tabelle 13. Prozentualer Anteil von Niederschlagssummen, intramonatlicher Standardabweichung und Anzahl der Tage > 0.2 mm Niederschlag der GCM-Periode 2070-99 im Vergleich zu 1960-89 (ECHAM4/OPYC3) bzw. 1950-79 (HadCM2 mit Sulfataerosolen) in Cortina. Fettdruck zeigt signifikante Änderungen auf dem 95%-Niveau an. 64
- Tabelle 14. Korrelation der Saisonsummen verschiedener Analogschätzungen der Jahre 1922-44 für Cortina. Berechnung der Zielperiode 1922-44 mit SLP-Anomalien 1922-44 bei Analog1b und Analog3 sowie mit SLP-Anomalien von 1900-1961 bei Analog1. 66
- Tabelle 15. Prozentualer Anteil von Niederschlagssummen der GCM-Periode 2070-99 im Vergleich zu 1960-89 für Barcelonnette bei Downscaling von SLP aus ECHAM4/OPYC3 ohne Sulfataerosole. 67
- Tabelle 16. Prozentualer Anteil der Periode 2070-99 im Vergleich zu 1960-89 für jahreszeitliche Niederschlagssummen, Tage mit > 0.2 mm Niederschlag und intramonatliche Standardabweichung im lokalen Klimaszenario für Cortina, abgeleitet mit Expanded Downscaling basierend auf ECHAM4/OPYC3 mit Sulfataerosolen. Fettdruck zeigt auf dem 95%-Niveau signifikante Änderungen. 73
- Tabelle 17. Anzahl der Tage pro Saison mit Grundwasser > -0.5 m für Schuttstrom Alverà berechnet mit EPL für beobachtete Klimadaten und lokale Klimaszenarien mit Analog-Technik und Expanded Downscaling unter Berücksichtigung von 3 GCM-Experimenten. Angegeben sind die Mittelwerte aus je 30 Jahren. Fettdruckt sind auf dem 95%-Niveau signifikante Änderungen der Periode 2070-99 gegenüber der Kontrollperiode 1960-89 bzw. 1950-79. 75