

BERICHTE ZUR
KLIMAFOLGENFORSCHUNG

2015

NATUR GEFAHR EN

05	C3S-ISLS	Flachgründige Rutschungen werden im Alpenraum meist durch langanhaltende Niederschläge ausgelöst. Aktuell gibt es kein Frühwarnsystem und keine Ausweisung von besonders anfälligen Bereichen. Das Projekt soll das Prozessverständnis erweitern und Empfehlungen ableiten.
11	DEUCALION	Wildbachprozesse stellen ein erhebliches Gefahrenpotenzial in alpinen Regionen dar. Es ist zu erwarten, dass der Klimawandel zu Änderungen in der Häufigkeit und Intensität von Wildbachereignissen führt. Für eine bessere Vorhersage ist es daher wichtig ein Verständnis für Auslösebedingungen zu entwickeln.
17	HighEnd:Extremes	Das Projekt untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf Extremniederschlagsereignisse im Alpenraum. Dazu wird ein Ensemble von regionalen Klimamodellen mit unterschiedlicher Auflösung angewandt.
25	CHC-FloodS	Im Projekt werden Klimamodelle mit hydrologischen Modellen gekoppelt, um Prozesse des Wasserkreislaufs kleinräumig zu erfassen. Das gekoppelte Modell soll die historische Nachbildung von lokalen Hochwässern sowie eine Vorausrechnung in die Zukunft ermöglichen.
33	Risk Adapt	Risk Adapt verfolgt einen dynamischen Ansatz zur Bewertung zukünftiger Hochwasserrisiken, unter Berücksichtigung von Gefährdung und Vulnerabilität. Die Gefährdung durch Hochwasser wird sowohl für den derzeitigen Zustand als auch für zukünftige Klimawandel-Szenarien analysiert.
40	Alle geförderten Projekte im Überblick	

„Österreich hat als Alpenland eine außergewöhnliche Stellung, hier wird der Klimawandel besonders hart zuschlagen. Die Wetterextreme der vergangenen Jahre zeigen, dass wir uns gegen die Auswirkungen des Klimawandels wappnen müssen und gezielt Maßnahmen setzen müssen. Das Austrian Climate Research Programme stellt dafür als Wissensbasis eine wichtige Entscheidungsgrundlage dar.“

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer

Vorwort

Als Alpenland reagiert Österreich besonders sensibel auf den Klimawandel. Das zeichnet sich – verglichen mit Europa – vor allem durch einen durchschnittlich höheren Temperaturanstieg aus. Neben dem Temperaturanstieg erhöht sich auch das Risiko von Naturgefahren wie Hochwässer, Überschwemmungen, Muren oder Lawinen im Hinblick auf das veränderte Klima.

Um unsere Ansprüche an Sicherheit und Lebensqualität weiterhin gewährleisten zu können, sind entsprechende Anpassungsmaßnahmen nötig. Der Erfolg der getroffenen Maßnahmen ist dabei stark an den Erfolg von Anpassungsmaßnahmen in anderen Sektoren, wie beispielsweise der Wasserwirtschaft, gekoppelt.

Die Grundlagen für die notwendigen Maßnahmen werden durch das Förderprogramm *Austrian Climate Research Programme (ACRP)* des Klima- und Energiefonds geschaffen. Seit 2007 wurden 145 Projekte gefördert, die die wissenschaftliche Basis für die nationalen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel liefern. Die Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren stellen ein wichtiges Themenfeld im *Austrian Climate Research Programme* dar. Exemplarisch präsentieren wir Ihnen fünf Projekte, die eine wichtige Grundlage für die notwendigen Schritte zur Klimawandelanpassung bilden.

Eine anregende Lektüre wünscht Ihnen
Ihr Klima- und Energiefonds Team



Projektleitung

Dr. Martin Rutzinger

Universität Innsbruck, Institut für Geographie



Beteiligte Institutionen

- Bundesforschungszentrum für Wald und Naturgefahren (BfW),
Abteilung Gebietswasserhaushalt, Innsbruck
- Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie



Gute Gründe für das Projekt

- Flachgründige Rutschungen werden gegenwärtig im österreichischen Gefahrenzonenplan nur unzureichend berücksichtigt. Während die Gefährdung durch die Prozesse Lawine und Mure sowie Hochwasser parzellenscharf abgegrenzt wird, geht die Hangstabilität und damit die Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen bisher nicht systematisch ein.
- Das Projekt erweitert und vertieft das Prozessverständnis für flachgründige Rutschungen auf verschiedenen Maßstabsebenen. In Detailstudien wurden Infiltrationsprozesse während anhaltender Niederschläge untersucht, während auf der Einzugsgebietsskala Geländecharakteristika analysiert wurden, die die Auslösung flachgründiger Rutschungen begünstigen.
- Aus den Erkenntnissen des Projekts können Empfehlungen für den Umgang mit flachgründigen Rutschungen abgeleitet werden, die sich auf zu erwartende Veränderungen durch den Klimawandel anpassen lassen.

C3S-ISLS

Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility

Extreme Niederschlagsereignisse im Mai 1999 und im August 2005 lösten in vielen Gemeinden Vorarlbergs Rutschungen und Muren aus. Schäden an Siedlungsobjekten und Infrastruktur waren die Folge. Durch den Umstand, dass die meisten Rutschungen beide Male in der Nacht ausgelöst wurden, kamen keine Personen zu Schaden. Bis dato gibt es jedoch kein Frühwarnsystem und keine Ausweisung von besonders anfälligen Bereichen.

Forschungsgegenstand: Flachgründige Rutschung

Flachgründige Rutschungen werden als hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegungen von Lockermaterial (Boden, Schutt) mit einer Mächtigkeit von 1 bis 2 m definiert. In der Regel liegt der Fokus auf Translationsrutschungen, die durch vordefinierte, hangparallele Gleitflächen charakterisiert sind. Als Gleitflächen können etwa das unterliegende Festgestein, aber auch überkonsolidierte Sedimente (z.B. Grundmoräne) oder wasserstauende Schichten innerhalb der Lockermaterialauflage fungieren. Entstehen diese Gleitflächen erst im Moment der Auslösung, spricht man von Rotationsrutschungen. Anders als bei Translationsrutschungen ist dann die Gleitfläche im Profil gekrümmt. Bei ausreichendem Wassergehalt kann die initiale Gleitbewegung in eine Fließbewegung (Hangmure) übergehen. Abb. 1



Abb. 1
Flachgründige Rutschungen mit Übergang zu Hangmuren im Kleinwalsertal. (Foto: BfW 2005)

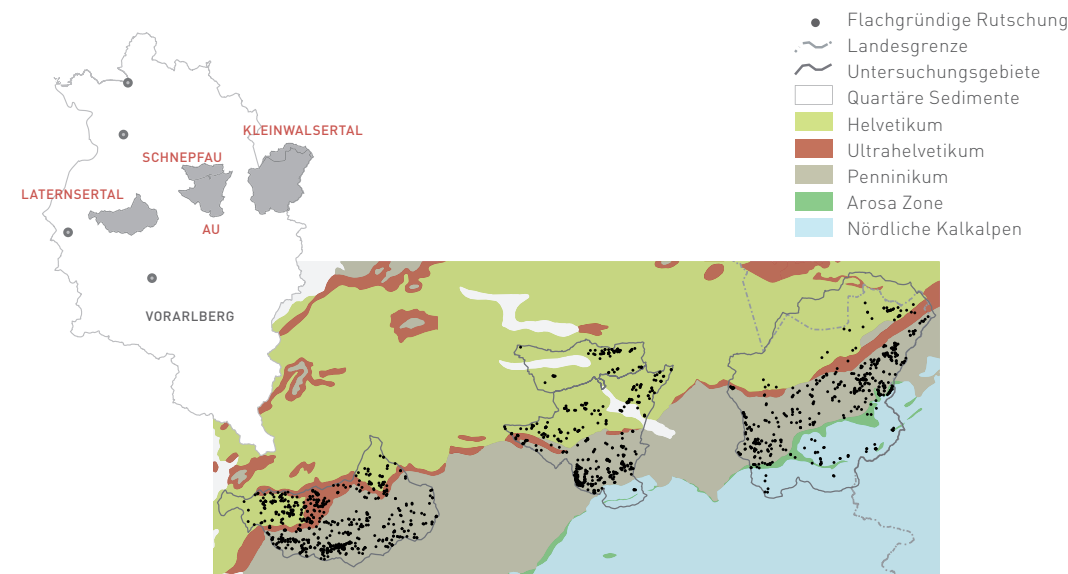


Abb. 2
Kartierte Rutschungen in den Untersuchungsgebieten mit tektonischen Einheiten.

Im Alpenraum werden flachgründige Rutschungen meist durch langanhaltende Niederschläge ausgelöst, die oft in Verbindung mit einer hohen Vorfeuchte des Bodens nach der Schneeschmelze stehen.

Im Zuge der Niederschlagsereignisse im Mai 1999 und im August 2005 wurden jeweils mehr als 250 mm Niederschlag pro m² innerhalb von 24 Stunden erreicht. Das entspricht in etwa einem Siebtel des dort üblichen Jahresniederschlags.

Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiete wurden zwei Einzugsgebiete und zwei Gemeinden Vorarlbergs ausgewählt, die von vorangegangenen Rutschungsereignissen besonders betroffen waren. Zudem lagen bereits Feldkartierungen und Schadensaufnahmen vor.

- **Laternsertal:**
52,1 km², 500-2100 m ü.d.M.
- **Gemeinden Au und Schnepfau:**
61,5 km², 700-2400 m ü.d.M.
- **Kleinwalsertal:**
113,7 km², 900-2500 m ü.d.M.

Teile der Untersuchungsgebiete werden vom *Rhenodanubischen Flysch* des Penninikums aufgebaut – einer geologischen Einheit, die aufgrund ihrer Materialzusammensetzung besonders anfällig für Rutschungen ist. Dies ist vor allem im Kleinwalsertal ersichtlich.

Abb. 2

Rutschungen in der Vergangenheit

Der Schlüssel zur Zukunft liegt in der Vergangenheit – nach diesem Credo wurde in den Untersuchungsgebieten ein umfassendes Inventar mit Fokus auf flachgründige Rutschungen auf Basis von neun Orthophotoserien (hochaufgelösten, entzerrten Luftbildern) seit den 1950er Jahren erstellt.

Verursachte Schäden an landwirtschaftlichen Flächen werden in der Regel rasch wiederbegrünt, auch mit finanzieller Unterstützung durch die öffentliche Hand. Daher ist die Identifizierung in den Orthophotos maßgeblich vom Zeitraum zwischen der Auslösung der Rutschungen und dem Aufnahmezeitpunkt der Luftbilder abhängig.

Abb. 3

Je kürzer dieser Zeitraum ist, desto eher können darin flachgründige Rutschungen identifiziert werden. Felderhebungen, die unmittelbar nach den Rutschungsereignissen aufgenommen wurden, stellten sich als äußerst wertvolle Datenquelle heraus. Insgesamt wurden in den Untersuchungsgebieten über 2300 Rutschungen in den Orthophotos identifiziert und kartiert. Die meisten flachgründigen Rutschungen, bezogen auf die Größe des Einzugsgebietes, wurden im Laternsertal kartiert, gefolgt von den Gemeinden Au, Schnepfau und dem Kleinwalsertal.

Prozessverständnis

Das Auftreten flachgründiger Rutschungen wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Dabei werden zeitlich weitgehend unveränderliche Eigenschaften (Grunddis-

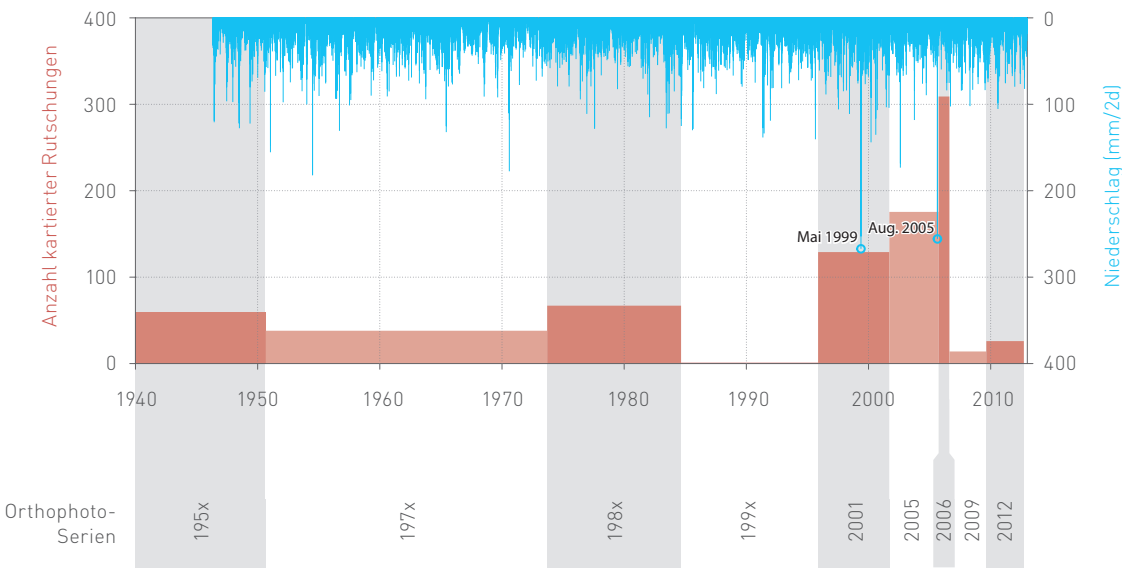


Abb. 3
Anzahl kartierter Rutschungen in den einzelnen Orthophoto-Serien im Laternsertal
verglichen mit der zweitägigen Niederschlagssumme der Station Innerlaterns.
Datenquelle: Hydrographischer Dienst Vorarlberg

position; z.B. Topographie, Materialeigenschaften), veränderliche Faktoren (variable Disposition; z.B. Landnutzung, Hanghydrologie) und auslösende Ereignisse (z.B. anhaltende Niederschläge) unterschieden.

Mithilfe des Rutschungsinventars konnte die Grunddisposition für alle Untersuchungsgebiete statistisch analysiert werden. Demnach treten flachgründige Rutschungen verstärkt an Hängen mit einer Hangneigung zwischen 20° und 40° auf. Zudem sind vor allem Flächen mit negativer Krümmung (Senken, Rinnen) betroffen, die tendenziell eine höhere Durchfeuchtung aufweisen. Die Hangexposition scheint dagegen kaum eine Rolle zu spielen. In Bezug auf den geologischen Untergrund sind Hänge mit Moränenbedeckung sowie Tonmergel und Mergelschiefer des Ultrahelvetikums und die Sandsteine des Penninikums überproportional von flachgründigen Rutschungen betroffen. Die Analysen zeigten jedoch auch, dass jedes Untersuchungsgebiet unterschiedliche Grunddispositionen für das Auftreten flachgründiger Rutschungen aufweist.

In einer Detailstudie wurde das Infiltrationsverhalten eines rutschungsgefährdeten Hanges im Laternsertal mittels Dauerregensimulation untersucht. Ziel war es, die maßgebenden Prozesse (Infiltration und Zwischenabfluss) nachzuvollziehen und Annahmen gängiger Rutschungsmodelle zu verifizieren. Mithilfe eines geophysikalischen Monitorings konnte gezeigt werden, dass die Infiltration bei einer hohen Vorsättigung vertikal dominiert wird und kaum Zwischenabfluss eintritt. Demnach kommt es zu einer kontinuierlichen Aufsättigung des Hanges, bevor bei vollständiger Sättigung das Hangversagen eintritt. Dem Zwischenabfluss kommt in diesem Fall eine geringe Rolle zu.

Diese Ergebnisse lassen sich mit dem verwendeten Modell TRIGRS 2.0 nachvollziehen und bestätigen damit dessen Annahmen.

Rutschungen und Klimawandel

Um durch den Klimawandel bedingte Veränderungen zu simulieren, werden Szenarien erstellt. Diese betreffen in erster Linie die variable Disposition (z.B. Schneeschmelze) sowie die auslösenden Ereignisse (z.B. häufigeres Auftreten anhaltender Niederschläge). In einem weiteren Schritt werden dokumentierte Rutschungsereignisse im Hinblick auf Niederschlags-schwellenwerte untersucht, die zu ihrer Auslösung führten.

Im Vergleich mit bestehenden Niederschlagszeitreihen kann die gegenwärtige Jährlichkeit dieser Prozesse quantifiziert und für zu erwartende klimatische Veränderungen abgeschätzt werden. Zudem wird die Sensitivität eines kalibrierten physikalisch-basierten Modells gegenüber Veränderungen des Niederschlags untersucht. Damit können schlussendlich etwaige Folgeschäden quantifiziert werden.

Martin Rutzinger



Projektleitung

Dr. Roland Kaitna
Universität für Bodenkultur, Institut für alpine Naturgefahren



Beteiligte Institutionen

- Universität Bern, Institut für Geologie - Dendrolab, Schweiz
- Karl-Franzens Universität Graz, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel
- Institut für Wirtschaftsforschung Wien (Wifo)
- Technische Universität Delft, Niederlande



Gute Gründe für das Projekt

- Die meteorologischen, hydrologischen und geomorphologischen Auslösebedingungen von Hochwasser und Muren in Wildbacheinzugsgebieten sind bisher nicht gut verstanden.
- Der Klimawandel kann Auswirkungen auf das Auftreten von Wildbachgefahren haben.
- Naturgefahrenmanagement braucht eine wissenschaftlich basierte Einschätzung der Klimawandelfolgen.

DEUCALION

*Determining and Visualizing Impacts of Greenhouse Climate Rainfall
in Alpine Watersheds on Torrential Disasters*

Wildbachgefahren und Klimawandel

Wildbachprozesse wie Hochwasser, Geschiebe-transport und Muren repräsentieren ein erhebliches Gefahrenpotential in alpinen Regionen.

Abgesehen von der Grunddisposition eines Einzugsgebietes (z.B. Steilheit des Geländes) und variabler Disposition (z.B. aufgrund saisonaler Veränderungen der Sedimentverfügbarkeit) bestimmt der Regeninput – seien es konvektive oder advektive Niederschläge – das Prozessverhalten. Es ist daher zu erwarten, dass der Klimawandel auch zu Änderungen in der Häufigkeit und der Magnitude von Wildbachereignissen führen wird.

Für eine verbesserte Vorhersage von Wildbachgefahren ist es daher wichtig, ein besseres Verständnis der meteorologischen, hydrologischen und geomorphologischen Auslösebedingungen von Muren und Hochwasserereignissen zu entwickeln, die dann mit den Szenarien des Klimawandels verschnitten werden können. Zusätzlich ist es notwendig, die Auswirkungen möglicher Veränderungen für das Naturgefahrenmanagement in Österreich abzuschätzen. Abb. 1

Diesen Herausforderungen stellte sich das Projekt DEUCALION. Es wurden die meteorologischen Auslösebedingungen von vergangenen Mur-Ereignissen in drei Regionen in Österreich (klimatisch Nordwest, Südwest und Nordost) analysiert und mit Szenarien der Änderungen des Niederschlagsverhaltens im Zuge des Klimawandels verschnitten. Zusätzlich wurden die Konsequenzen und Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Gefahren- und Risikoanalyse in der Ingenieurspraxis untersucht und beurteilt.



Abb. 1

Aufräumarbeiten nach einem murartigen Feststofftransport in Pfunds
Tirol, 2005

Das Projekt bestand aus sechs Arbeitspaketen (AP), die von vier Partnern (Universität für Bodenkultur Wien, Karl-Franzens Universität Graz, Wifo und Universität Bern) abgearbeitet wurden. Die Struktur kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

- AP1: Rekonstruktion und Analyse von Wildbachereignissen
- AP2: Klimamodellierung
- AP3: Änderung der meteorologischen Auslösebedingungen
- AP4: Sozio-ökonomische Entwicklung
- AP5: Szenarienbasierte Modellierung
- AP6: Projektmanagement

Die retrospektive Analyse der Wildbachaktivität in den Untersuchungsgebieten basierte auf der Methode der Dendrogeomorphologie und auf Archivdaten. Für die meteorologischen Auslösebedingungen wurden Tagesdaten der nächsten Niederschlagsmessstelle bis maximal sechs Tage vor dem Ereignis untersucht. Im ersten Schritt wurden insgesamt 1017 Bäume auf sieben Schwemmkegel untersucht. Aufgrund von Wachstumsstörungen in den Jahrringen konnten 44 Muren und 17 Lawinen räumlich und zeitlich rekonstruiert werden. Die Dauer der resultierenden Zeitreihen erstreckte sich zwischen 109 und 142 Jahren. Für die regionale Analyse der auslösenden Niederschläge wurden zusätzlich 1907 Muren-Ereignisse aus den Chroniken verwendet (von 1550 bis 2008).

Es zeigte sich, dass 60-90 % der Muren in den Monaten Juni, Juli und August (JJA) zu beobachten waren. Verschnitten mit den Zeitreihen des Tagesniederschlags von 48 Wetterstationen konnten minimale, mittlere und maximale Zusammenhänge Intensität

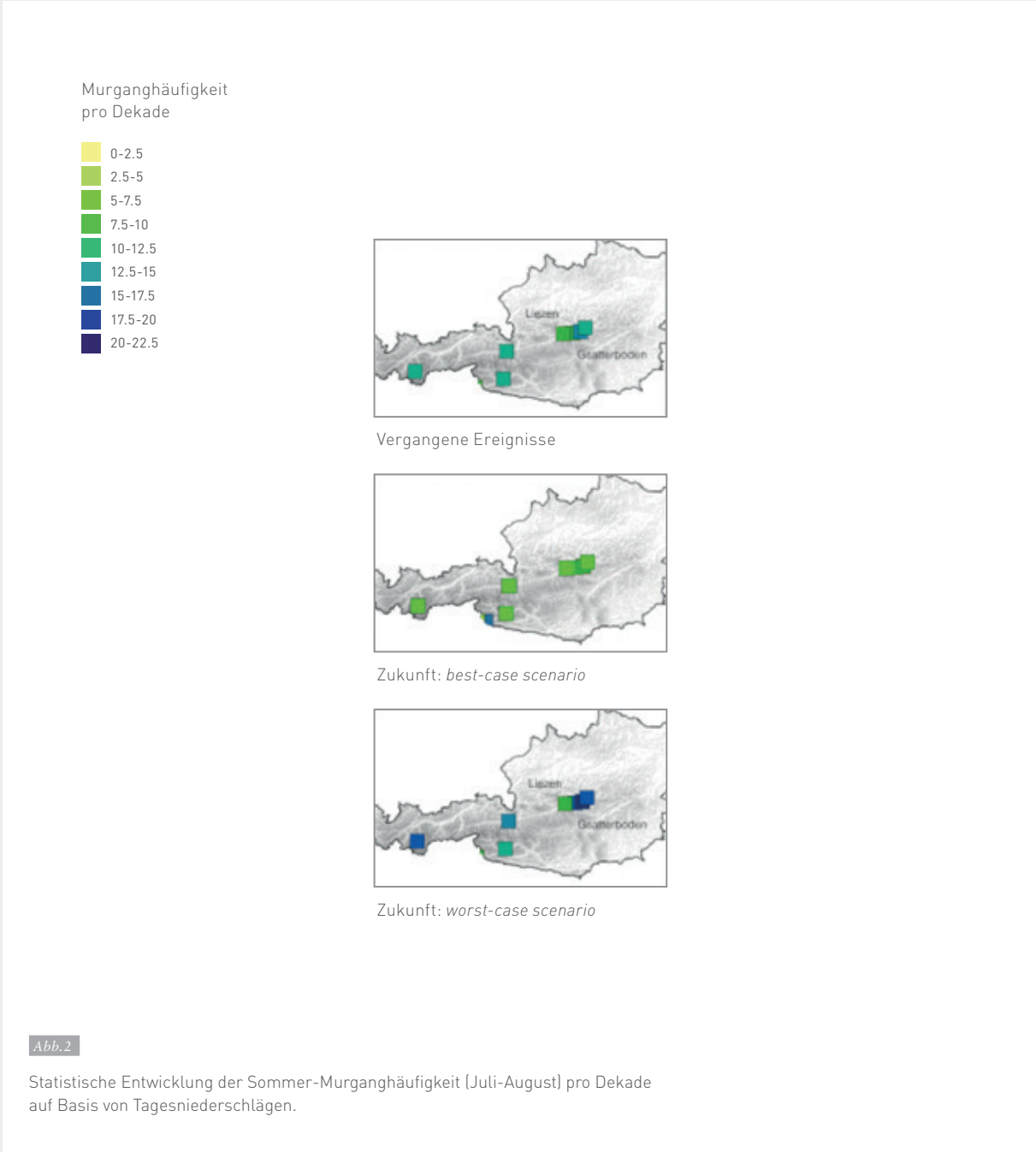
und Dauer der auslösenden Niederschläge, basierend auf dem 15%-, 50%- und 90%-Quantil, bestimmt werden. Für die drei Untersuchungsgebiete variiert der minimale ereignisauslösende Tagesniederschlag zwischen 19 und 35 mm, der mittlere zwischen 32 und 59 mm und der maximale zwischen 70 und 100 mm. Höhere Werte wurden in der südwestlichen Region bestimmt.

Für die Klimamodellierung wurden vier regionale Klimasimulationen verwendet, die alle auf einem A1b-Emissionsszenario basieren und mittels einer empirisch-statistischen Methode (*quantile mapping*) von systematischen Fehlern befreit wurden. Dafür wurde die Methode erweitert, um besonders Extremniederschläge korrekt abzubilden.

Generell zeigt sich ein Trend der saisonalen Verschiebung extremer Regenereignisse vom Sommer in das Frühjahr und den Herbst. Verschnitten mit den Grenzwerten der Ereignisauslösung konnten für das „beste“ Klimaszenario und alle Untersuchungsgebiete praktisch keine Veränderungen im Mai und Juni und ein Rückgang der Wahrscheinlichkeiten im Juli und August festgestellt werden. Beim „schlechtesten“ Szenario wurde ein Anstieg der Wahrscheinlichkeit in manchen Zeiträumen in allen Gebieten errechnet.

Abb. 2

In einem weiteren Schritt wurden die Auswirkungen von Veränderungen der Magnitude von Muren mittels numerischer Simulationsprogramme getestet und die Unsicherheiten bestimmt. Diese szenariobasierte Modellierung von Muren zeigte einen relativ moderaten Einfluss der Unsicherheit der Ereignisgröße im Vergleich zur Unsicherheit der Modellparameter für alle drei Untersuchungsgebiete.



Für einen holistischen Ansatz wurde in einem weiteren Schritt die sozio-ökonomische Entwicklung am Beispiel einer Untersuchungsregion abgeschätzt und in einer Risiko- und Lebenszyklus-Analyse mit den Resultaten der vorangegangenen APs verschnitten. Für das Fallbeispiel zeigt sich, dass die Errichtung von Schutzmaßnahmen einen sehr großen Einfluss auf das Risiko haben und zum Teil die Auswirkungen von Systemänderungen abfangen kann. Von besonderer Bedeutung hierfür sind die Erhaltung und die langfristige Betreuung der Maßnahmen.

In dem heuer gestarteten Projekt DEUCALION II* gehen wir einen Schritt weiter und untersuchen die Auslösebedingungen von Wildbachgefahren auf verschiedenen zeitlichen (täglich, stündlich, 15-Minuten-Intervall) und räumlichen Skalen (bundesweit, regional und lokal). Für die Analyse der meteorologischen Auslösebedingungen kann auf eine Datenbank von dokumentierten Wildbachprozessen in Österreich zugegriffen werden, die bis ins 13. Jahrhundert zurückreicht. Projektrelevant sind ca. 4000 datierte Ereignisse der letzten 150 Jahre, da es davor kein dichtes Messstellennetz der Niederschlagsaufzeichnung in Österreich gab. Für ausgewählte rezente Ereignisse werden zusätzlich zeitlich und räumlich hochaufgelöste Niederschlagsverteilungen, die aus Radarmessungen (sog. INCA-Daten) abgeleitet wurden, ausgewertet.

*
Determination of past and future meteorological trigger conditions of torrential processes at different temporal and spatial scales.

Ein weiterer Schwerpunkt im Projekt ist die Untersuchung der hydrologischen Auslösebedingungen von Muren in größeren Untersuchungsregionen (hochalpin, niederalpin). Dafür verwenden wir ein konzeptionelles hydrologisches Modell, welches für zwei Untersuchungsregionen angepasst und anhand von langjährigen Niederschlagsabfluss-Daten kalibriert wird. Der hydrologische Zustand des Einzugsgebiets zum Zeitpunkt des Auftretens von Muren wird anschließend ausgewertet und mit der geomorphologischen Disposition der Teileinzugsgebiete verglichen.

Für die Klimamodellierung werden neue Methoden zur verbesserten Bias-Korrektur regionaler Klimamodelle aus den neuen EURO-CORDEX Datenpool entwickelt.

Durch die hohe Auflösung der neuen regionalen Klimamodelle kann der topographisch komplexe Alpenraum besser abgebildet werden. Auf Grundlage dieser regionalen Klimaszenarien soll anschließend die Bandbreite möglicher Änderungen der meteorologischen und hydrologischen Auslösebedingungen von Hochwasser und Muren in Wildbacheinzugsgebieten aufgrund des Klimawandels abgeschätzt werden.

Der interdisziplinäre Ansatz in unserem Projekt soll das Verständnis des dynamischen Systems „Wildbach“ verbessern und damit verlässliche quantitative Prognosen möglich machen. Die Ergebnisse des Projektes DEUCALION II werden voraussichtlich ein wertvolles Werkzeug für Ingenieure und Entscheidungsträger im Naturgefahrenmanagement in Österreich sein.

Roland Kaitna



Projektleitung

Mag. Dr. **Heimo Truhetz**

Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz



Beteiligte Institutionen

- Climate Service Center Germany, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Deutschland



Gute Gründe für das Projekt

- Das Projekt ist am Puls der Zeit und setzt innovative Modellierungstechniken ein, um Aussagen über die Zukunft von extremen Niederschlagsereignissen im Alpenraum zu gewinnen.
- Die Projektergebnisse (ein Mini-Ensemble an sogenannten „konvektions-erlaubenden“ Klimasimulationen sowie ein Satz nutzerrelevanter Klimaindizes für Extremniederschlag und dessen Klimaänderungen) werden über das Klimadatenzentrum des Climate Change Centre Austria (CCCA) der Klima- und Klimafolgenforschung zur Verfügung gestellt.
- Durch das internationale Projektkonsortium und die aktive Beteiligung an der Initiative EURO-CORDEX des World Climate Research Programme (WCRP) wird die Sichtbarkeit dieser Forschungsaktivität erhöht.

HighEnd:Extremes

Die Zukunft extremer Niederschlagsereignisse im Alpenraum unter starken Klimaänderungsbedingungen.

Basierend auf theoretischen Überlegungen ist mit fortschreitender Erderwärmung auch mit einer Beschleunigung des Wasserkreislaufs zu rechnen.

Aus dem Zusammenhang zwischen Wasseraufnahmevermögen der Atmosphäre und ihrer Temperatur nach Clausius-Clapeyron ergibt sich eine Zuwachsrate von 7% pro °C Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur. Aus Beobachtungsdaten der letzten Jahrzehnte konnte man bisher **in Nordeuropa eine mittlere Zunahme des großskaligen, flächigen Niederschlags (beispielsweise aus Tiefdruckgebieten) um ~7% pro °C feststellen. Extremer Niederschlag hat jedoch eine nahezu doppelt so hohe Zuwachsrate von ~14% pro °C erfahren (Super-Clausius-Clapeyron'scher Effekt).** Neueste Untersuchungen haben gezeigt, dass diese deutlich höhere Zuwachsrate auf eine Verschiebung von großskaligen zu kleinskaligen, konvektiven und extremen (z.B. kurzzeitige Wolkenbrüche oder Gewitter) Niederschlagsformen zurückzuführen ist.

Trotz dieser und weiterer Gefahren, die der Klimawandel mit sich bringt, werden weltweit weiterhin ungebremst treibhauswirksame Substanzen emittiert.

Zwar hat der Europäische Rat bereits 1996 das Ziel formuliert, die globale Erderwärmung auf 2°C zu beschränken und aufgefordert Maßnahmen zu ergreifen, die den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre auf 550 ppm begrenzt halten, doch sieht die Realität anders aus: die mittleren jährlichen Zuwachsraten der globalen CO₂-Konzentration steigen zunehmend (1,9% pro Jahr in der Periode 1995-2004; 2,1% pro Jahr in der Periode 2005-2014), sodass 2014 bereits ein Jahresniveau von 398,55 ppm erreicht wurde. Auch die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger sind seit 2000 um durchschnittlich 2,5% pro Jahr gestiegen und liegen damit am oberen Rand der Emissions-szenarien des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.

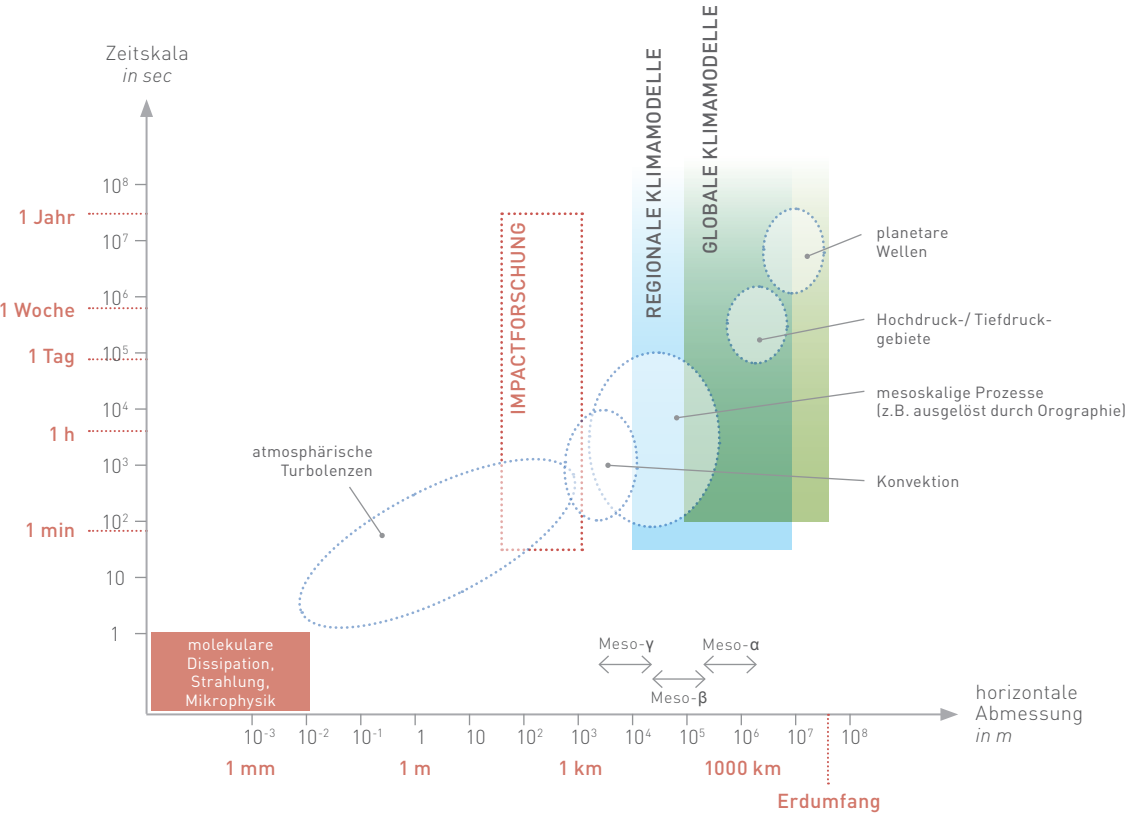


Abb. 1
Atmosphärische Prozesse und deren Einteilung in Skalen.
Die Wirkungsbereiche moderner globaler (grün) und regionaler (blau) Klimamodelle sowie die Anforderungen aus der Klimafolgenforschung (rot) sind schematisch dargestellt.
Adaptiert nach: Deutscher Wetterdienst (DWD).

Angesichts eines bislang global ungebremsen Ausstoßes von anthropogenen Treibhausgasen und der damit verbundenen forcierten fortschreitenden Erderwärmung, die ihrerseits das Risiko einer überproportionalen Zunahme an Extremniederschlagsereignissen birgt, versucht das Projekt *HighEnd:Extremes* Antworten auf Fragen wie “Wie werden Extremereignisse im Alpenraum in Zukunft aussehen?” zu finden.

Methodik

Im Alpenraum hängen extreme Niederschlagsereignisse von Prozessen auf unterschiedlichen Skalen ab. Auf großen Skalen (charakteristische Länge ca. 1000 km) gibt es bestimmte Wetterlagen (z.B. Tiefdruckgebiet über Norditalien) oder Wetterabläufe (z.B. Tiefdruckgebiet auf Vb-Zugbahn), die das Zustandekommen von Extremniederschlag begünstigen. Auf kleineren Skalen sind es Vorgänge wie labil geschichtete und mit Wasser aus dem Mittelmeer angereicherte Luftströmungen, die auf die Alpen treffen, oder Kaltfronten, die durch Hebungsprozesse schwere Niederschläge oder Gewitter auslösen. Dabei spielt Konvektion (also das Aufsteigen von Luftmassen, das rasch zu gewitterartigen Zuständen führt) in vielen Fällen eine entscheidende Rolle (auf der kleineren Skala mehr als auf der großen).

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu quantifizieren, werden Klimamodelle (physikalisch basierte Modelle des Klimasystems) mit vorgegebenen Treibhausgaskonzentrationen betrieben. Auf diese Weise werden die jeweiligen momentanen Zustände (auch Wetterverhältnisse) des Klimasystems über viele Jahrzehnte (z.B. von präindustrieller Zeit bis zum Ende

des 21. Jahrhunderts) simuliert. Durch Vergleich einer zukünftigen Periode mit einer Periode aus der Vergangenheit können auf diese Weise Effekte der Klimaänderung berechnet werden.

Aufgrund des hohen technischen Aufwandes von Klimaprojektionen, der vor allem von der Auflösung des Modellgitters abhängt, und auch aufgrund der Skalenabhängigkeit der im Klimasystem wirksamen Prozesse, haben sich im Wesentlichen zwei Gruppen von Klimamodellen etabliert: Abb.1

- **Globale Klimamodelle**
engl. global climate models; abgekürzt: GCMs
Sie werden zur Simulation des globalen Klimas eingesetzt und erreichen Auflösungen mit Gitterweiten von ca. 100 km. Sie sind geeignet um Prozesse auf großen Skalen zu erfassen (z.B. Tiefdruckgebiete) und erlauben Aussagen über den Klimawandel auf kontinentaler Ebene.
- **Regionale Klimamodelle**
engl. regional climate models; abgekürzt: RCMs
Sie simulieren das Klimasystem mit wesentlich höheren Auflösungen (Gitterweiten bis unter 20 km) und können daher auch Prozesse auf kleineren Skalen abbilden, bleiben aber aufgrund des technischen Aufwandes auf ein bestimmtes Gebiet (z.B. Europa) begrenzt. Jedes RCM wird von einem GCM angetrieben und unterliegt dadurch den Einflüssen großskaliger Prozesse.

Die Aussagekraft von einzelnen Klimaprojektionen ist im Allgemeinen sehr begrenzt. Das Klimasystem beinhaltet eine chaotische Komponente (interne Variabilität), die eine exakte Vorhersage verhindert. Um

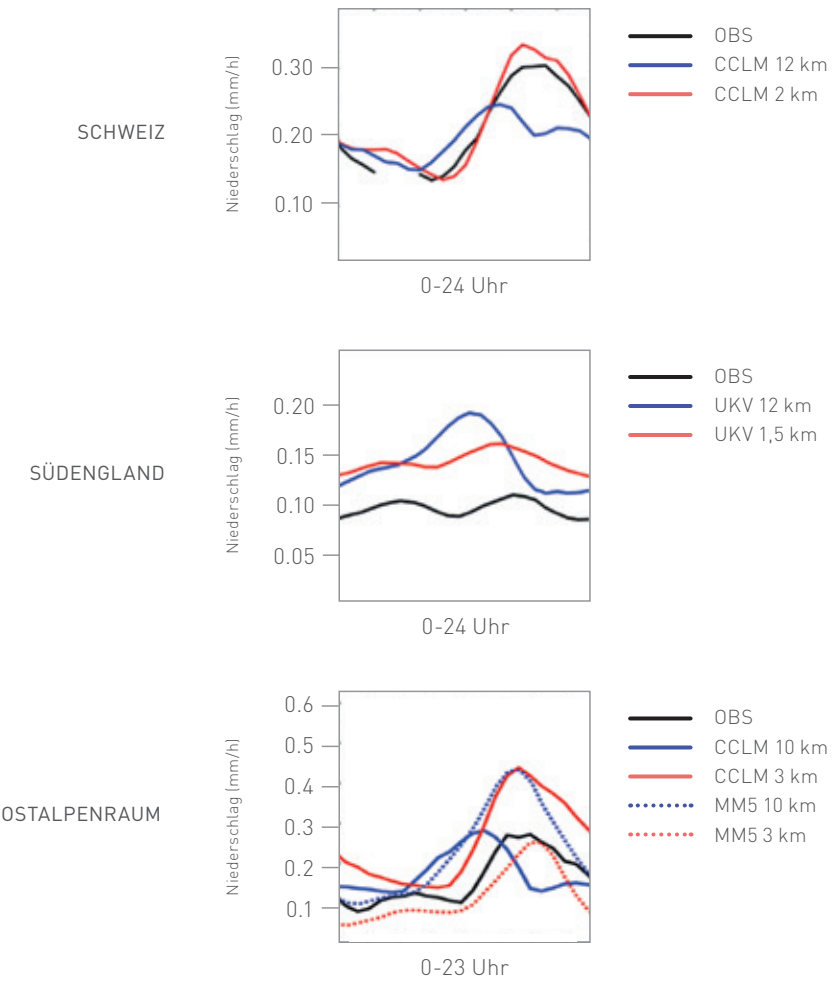


Abb. 2

Mittlerer Tagesgang im Niederschlag
(a) in der Schweiz [Ban et al., 2014 © American Geophysical Union],
(b) in Südengland [Kendon et al., 2012 © American Meteorological Society],
(c) im Ostalpenraum [Prein et al., 2013 © Climate Dynamics].

Die in den Beobachtungsdaten (schwarz) festgestellte Häufung an Niederschlag am Nachmittag wird in den konvektions-erlaubenden Simulationen (rot) in Form und Charakteristik besser erfasst als bei größeren Auflösungen (blau).

diesem Umstand gerecht zu werden und um Bandbreiten möglicher Entwicklungen darzustellen, werden ganze Ensembles an Projektionen durchgeführt.

Dieser Ansatz wurde und wird seit einigen Jahren erfolgreich in der regionalen Klimamodellierung eingesetzt. Ein aktuelles Beispiel ist das *Coordinated Downscaling Experiment* (CORDEX; www.cordex.org) des *World Climate Research Programme* (WCRP). Im Europäischen CORDEX-Zweig, genannt EURO-CORDEX (www.euro-cordex.net), werden insgesamt 12 GCMs und 10 RCMs verwendet, um ein Ensemble von über 100 regionalen Klimaprojektionen für Europa mit den Gitterweiten 50 km und 12,5 km für das 21. Jahrhundert zu erstellen.

Die Erhöhung der Auflösung von 50 km auf 12,5 km Gitterweite bringt bereits große Vorteile bei der Modellierung von Extremniederschlägen, insbesondere in gebirgigen Gebieten wie beispielsweise dem Alpenraum, allerdings werden konvektive Prozesse erst bei Gitterweiten von unter 4 km befriedigend erfasst.

Abb. 1

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Lücke der simulierten Skalen zwischen den Möglichkeiten herkömmlicher RCMs und den Anforderungen der Klimafolgenforschung (Klimaimpactmodellierung) verringert wird. Abb. 2 zeigt exemplarisch die Auswirkungen der konvektionserlaubenden Simulationen auf den mittleren Tagesgang im Niederschlag in verschiedenen Regionen Europas im Vergleich zu größeren Auflösungen.

Allerdings steigt der technische Aufwand zur Durchführung dieser konvektionserlaubenden Simulationen exorbitant an: wird dasselbe Gebiet mit 3 km anstelle

von 12,5 km Gitterweite simuliert, wird etwa die 70-fache Rechenleistung benötigt. Um den Rechenaufwand auf ein beherrschbares Maß zu reduzieren wird daher das Modellgebiet weiter eingegrenzt. In *HighEnd:Extremes* wird die finale Auflösung von 3 km im Modellgebiet (gesamter Alpenraum) durch ein weiteres Anwenden desselben RCMs erreicht. Das Modellgebiet umschließt im ersten Durchgang das EURO-CORDEX Gebiet mit einer Gitterweite von 12,5 km und wird im zweiten Durchgang auf den Alpenraum verkleinert wobei gleichzeitig die Gitterweite auf 3 km reduziert wird. Abb. 3

Aufgrund des hohen Rechenaufwandes bei konvektionserlaubenden Simulationen rückt ein Ensembleansatz, wie er in EURO-CORDEX verfolgt wird, in weite Ferne. In *HighEnd:Extremes* werden konvektionserlaubende Simulationen daher in einem Mini-Ensemble bestehend aus drei RCMs durchgeführt: das Modell COSMO-CLM (hauptsächlich entwickelt vom Deutschen Wetterdienst), das amerikanische Modell WRF und das Modell REMO-nh, das am *Climate Service Centre Germany* entwickelt wird. Um dieses Ensemble zu ermöglichen, werden außerdem die Simulationsperioden auf 30 Jahre in der Zukunft (2071-2100) und 30 Jahre in der Vergangenheit (1971-2000) reduziert. Um den aktuellen Zuwachsraten an CO₂-Konzentrationen gerecht zu werden, kommt das IPCC Szenario des ungebremsten Wachstums (Szenario RCP8.5) zum Einsatz, das vom globalen Modell des Max-Planck-Institutes Hamburg (MPI-ESM-LR) umgesetzt wurde. Um trotz der geringen Anzahl an konvektionserlaubenden Simulationen Aussagen über die Unsicherheiten der Klimaänderungen zu ermöglichen, wird das EURO-CORDEX Ensemble zu Hilfe genommen.

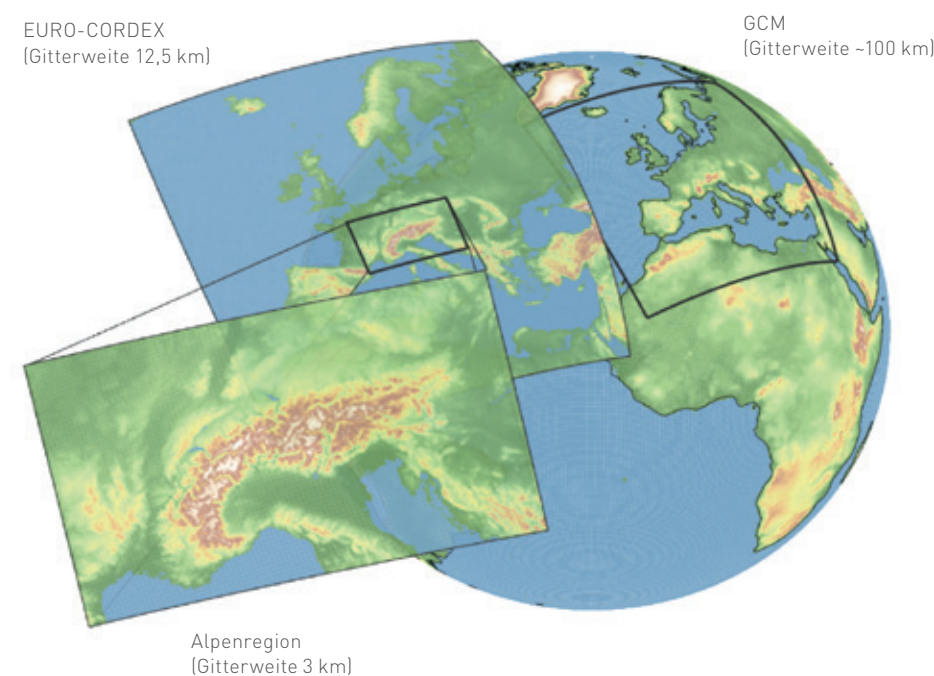


Abb. 3

Modellierungskette in HighEnd:Extremes

Ein globales Klimamodell (GCM) mit einer Gitterweite von ~100 km wird in zwei Stufen auf das Zielgitter von 3 km im Alpenraum gebracht. Dabei umfasst die erste Stufe Europa mit einer Gitterweite von 12,5 km (EURO-CORDEX).

Die Untersuchungen und Auswertungen in *HighEnd:Extremes* unterliegen folgender Strategie: Es wird nach jenen Prozessen und deren Beeinflussung durch den Klimawandel geforscht, die für das Zustandekommen von Extremereignissen im Alpenraum begünstigen.

Ein wichtiges Instrument dazu ist die Implementierung einer geeigneten Wetterlagenklassifizierung, welche prozessorientierte Vergleiche von Extremereignissen aus einem zukünftigen und einem gegenwärtigen Klima ermöglicht. Mithilfe der konvektionserlaubenden Simulationen werden (modellübereinstimmender) Klimaänderungen auf der Prozessebene einzelner Extremereignisse identifiziert, während das EURO-CORDEX Ensemble die Erforschung (modell-übereinstimmender) prozessorientierter Klimaänderungen auf größerer Skala erlaubt. Zusätzlich werden nutzerrelevante Klimaindizes für Extremereignisse im Alpenraum und deren Änderungen abgeleitet.

Erwartete Ergebnisse

Der Einsatz konvektionsauflösender Simulationen (3 km Gitterweite) stellt einen Durchbruch in der Modellierungstechnik dar. Es wird sich zeigen, inwiefern diese Technik zu neuen Erkenntnissen führt. Ein wichtiges Ergebnis in diesem Zusammenhang wird sein, ob konvektionserlaubende Klimasimulationen einen Mehrwert darstellen. Damit unmittelbar verknüpft ist die Frage welche Rolle konvektive Prozesse im Klimawandel spielen.

Die Kombination von Ensembles an Klimaprojektionen mit unterschiedlichen Auflösungen (EURO-CORDEX mit 12,5 km Gitterweite und konvektionserlaubend mit 3 km Gitterweite) und die prozessorientierte Herangehensweise zielen vor allem auf eine Verbesserung (weil modellunabhängig) des Prozessverständnisses für Extremniederschlagsereignisse und deren Änderungen im Alpenraum ab. Zusätzlich werden Änderungen von nutzerrelevanten Klimaindizes (beispielsweise Häufigkeit von Extremereignissen, Auftreten im Jahr, „Saisonalität“, usw.) ermittelt.

Nachdem in EURO-CORDEX mehrere Emissions-szenarien umgesetzt werden, können die Auswirkungen des Klimawandels auf Extremniederschlagsereignisse im Alpenraum auch bei moderatem Anstieg der globalen Treibhausgaskonzentrationen ermittelt werden und jenen bei starkem Anstieg gegenübergestellt werden. Dies erlaubt unter anderem auch den Spielraum anthropogener Einflüsse zu analysieren.

Die Klimasimulationen für den Alpenraum auf konvektionserlaubender Skala werden nicht nur in wissenschaftlichen Kreisen verbreitet sondern auch auf dem Klimadatenzentrum des *Climate Change Centre Austria* (CCCCA) veröffentlicht und damit einem breiten Nutzerkreis aus der Klimafolgenforschung zur Verfügung gestellt. Die in *HighEnd:Extremes* geplanten Klimasimulationen mit größeren Auflösungen entstehen in einem EURO-CORDEX-konformen Rahmen und werden über die Datenserver der *Earth System Grid Federation* (ESGF) veröffentlicht.

Heimo Trubetz



Projektleitung

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Christian Reszler**
Joanneum Research Forschungsges.m.b.H.



Beteiligte Institutionen

- Karl-Franzens-Universität Graz, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel



Gute Gründe für das Projekt

- Der Einfluss des Klimawandels auf die Entstehung lokaler Hochwässer, die immer wieder zu signifikanten Schäden in den Bereichen Landwirtschaft und Infrastruktur führen, ist aus den bestehenden Daten schwierig abzuschätzen.
- Die ständige Verfeinerung von regionalen Klimamodellen legt deren Einsatz und die Ankopplung von hydrologischen Modellen für Klimawandelstudien bezüglich Hochwässer auch in kleinen Einzugsgebieten nahe.
- Der Test eines räumlich und zeitlich hoch aufgelösten, gekoppelten Modells im vorliegenden Projekt steht am Beginn einer Entwicklung der Kombination von Modellen in den verwandten Disziplinen Klimatologie und Hydrologie für kleinräumige Anwendungen, die auch von der ständigen Weiterentwicklung von Computerressourcen getragen wird.

CHC-FloodS

Gekoppelte Klima-Hydrologie Modellierung
von Hochwässern in der Steiermark

Einleitung und Problemstellung

Lokale Hochwässer in der Steiermark sind die Folge von Starkregenfronten und Gewittern, und die mit diesen Hochwässern einhergehenden Überflutungen führen in der Region häufig zu signifikanten Schäden in den Bereichen Landwirtschaft und Infrastruktur.

Abb. 1

Fundierte Aussagen über Änderungen durch den Klimawandel in den letzten Jahrzehnten lässt die Datenlage zurzeit allerdings noch nicht zu. Hohe Niederschlagsintensitäten sind selten und sehr konzentriert und werden daher vom Stationsnetz meist nicht erfasst. **Außerdem ist zur Abschätzung längerfristiger Tendenzen der Zeitraum, in denen in Österreich automatisiert und flächendeckend Aufzeichnungen von hoher zeitlicher Auflösung verfügbar sind, noch zu kurz.** Physikalischen Überlegungen zufolge sollte es durch die Erderwärmung aber auch in unseren Breiten zu einer Verstärkung von lokaler Konvektion kommen, die für die starken Regenfälle und Gewitter mitverantwortlich sind.

In Klimawandelstudien werden mit Klimamodellen Langzeitsimulationen durchgeführt, um über mehrere Jahrzehnte Veränderungen von meteorologischen Größen wie Niederschlag und Lufttemperatur abzuschätzen. **Das Auftreten eines Hochwassers in einem bestimmten Gebiet hängt aber nicht nur vom Niederschlag beim jeweiligen Ereignis ab, sondern auch von der Vorgeschichte, welche die hydrologischen Bedingungen am Beginn des Ereignisses bestimmt.**

Unterschiedliche Bedingungen, z.B. trockene oder nasse Böden oder eine mögliche Überlagerung mit einer gleichzeitig stattfindenden Schneeschmelze, können zu gänzlich unterschiedlichen Hochwasserspitzen führen. **Dies kann berücksichtigt werden, indem ein hydrologisches Modell nachgeschaltet, das heißt mit den Ergebnissen aus dem Klimamodell „angetrieben“ wird.**



Abb. 1

Hochwasser am 13. September 2014 am Saggaubach in Leutschach in der Südweststeiermark
(Foto: Bereichsfeuerwehrverband Leibnitz)

Vom Klimamodell zum hydrologischen Modell: Überbrückung der Skalen

Während gängige Klimamodelle die Prozesse des Wasserkreislaufs in großen Maßstäben (von „global“ bis „regional“) beschreiben, arbeiten hydrologische Modelle auf einem deutlich kleineren Maßstab: Sie simulieren Durchflüsse und Wasserstände auf Fluss- und Nebenflussgebietsbasis mit einer Größe von wenigen Quadratkilometern und können daher auch lokale Hochwässer abbilden. Der Einsatz von immer leistungstärkeren Großrechnern führte zur Entwicklung einer neuen Generation von regionalen Klimamodellen (RCM), die auf konvektionserlaubender Skala (~3 km Gitterweite) arbeiten und prinzipiell in der Lage sind, auch kleinräumige Starkregen oder Gewitter zu erfassen. Für Vorausrechnungen in die Zukunft werden diese regionalen Modelle in ein globales Klimamodell (GCM) eingebettet, was in der Fachsprache als *dynamisches Downscaling* bezeichnet wird. **Abb. 2**

Bevor sie für Prognosen eingesetzt werden, sollten die Modelle aber in einem historischen Zeitraum getestet werden. Dabei werden an den Rändern der regionalen Modelle statt den von den globalen Modellen bereitgestellten Ergebnissen, Daten aus Assimilationssystemen der numerischen Wettervorhersage verwendet, wo meteorologische Modelle mit Beobachtungsdaten (z.B. Satellitendaten, Wetterballonaufstiege, etc.) verschmolzen werden. Die Ergebnisse der regionalen Modelle können dann direkt an historischen Daten von Wetterstationen getestet werden. Dabei zeigt sich oft, dass auch die an den Rändern auf gemessenen Daten basierenden Modelle im Mittel deutliche Abweichungen („BIAS“) von den Stationsdaten aufweisen. Vor

allem der Niederschlag aus den Klimamodellen weist hohe Unsicherheiten auf. In der Regel werden mittels statistischer Methoden diese Abweichungen korrigiert (*statistisches Downscaling*).

Im Projekt CHC-FloodS werden verschiedene Klimamodelle mit verschiedenen Gitterweiten und Korrekturmethode verwendet und mit einem hydrologischen Modell auf Einzugsgebietsebene gekoppelt. Das heißt, es werden Felder von Niederschlag und Lufttemperatur an das hydrologische Modell übergeben, um für einzelne Flüsse in der Südsteiermark die Abflüsse zu berechnen. Es wird ein hydrologisches Modell eingesetzt, das auf einem 1 km Raster arbeitet und an der TU Wien im Zuge der Hochwasserprognose am Kamp entwickelt wurde. **Das Modell ist auch seit kurzem im Einsatz zur Hochwasserwarnung in kleinen Einzugsgebieten der Flüsse Kainach, Lassnitz und Sulm in der Weststeiermark** und wird im Zuge des Projekts auf die Grabenlandbäche in der Südoststeiermark erweitert.

Erwartete Ergebnisse

Anhand der mit dem gekoppelten Modell simulierten Abflüsse wird untersucht, ob in einem historischen Zeitraum (1989-2010) lokale Hochwässer in der Südsteiermark nachgebildet werden können. Vor allem der Einfluss der Verfeinerung der Gitterweite in den regionalen Klimamodellen – von 50 km, auf 12.5 km und weiter auf 3 km – sowie die Auswirkungen der Fehlerkorrekturen auf die Hochwassersimulation sind von Interesse.

Konkret werden die Simulationen auf die realistische Nachbildung der grundsätzlichen Mechanismen zur

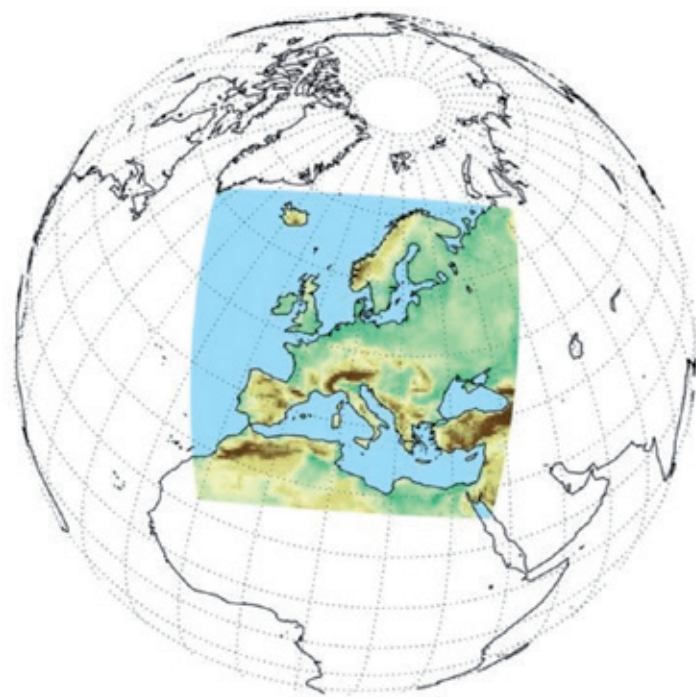


Abb. 2

Prinzip der Einbettung eines regionalen Klimamodells in ein globales Modell
Das regionale Modell wird an dessen Rand vom globalen Modell „angetrieben“. Das Bild zeigt die Ausdehnung der Modelle der EURO-CORDEX Initiative des World Climate Research Programmes (www.euro-cordex.net)

Hochwasserentstehung getestet, die sich durch folgende Indikatoren – quantitativer und qualitativer Natur – zeigen:

- Frequenz des Auftretens
- Zeitpunkt im Jahr („Saisonalität“)
- Typ und zeitlicher Ablauf der signifikanten Hochwasserereignisse, z.B. kurzes Ereignis, lang andauerndes Ereignis oder Doppelereignis, sowie der entsprechende Wetterlagentyp
- weitere Einflussfaktoren wie die zeitliche Dynamik von Schneeschmelze oder Bodenfeuchte über das Jahr

Beispielhaft sei hier die Saisonalität herausgegriffen. Das zeitliche Auftreten der Hochwässer im Jahr gibt Hinweise auf die maßgebenden Mechanismen, die zum jeweiligen Hochwasser geführt haben. Häufige Sommerhochwässer deuten zum Beispiel auf einen Einfluss von Gewittern mit hohen Niederschlagsintensitäten hin, die oft auch bei trockenen Bodenverhältnissen im Sommer hohe Abflüsse entstehen lassen. Die Kleinräumigkeit der Gewitter hat dabei zur Folge, dass oft nur kleine Flusseinzugsgebiete betroffen sind, wie das Beispiel des Einzugsgebietes des Pegels Schwanberg an der Schwarzen Sulm in der Weststeiermark mit einer Größe von rd. 75 km² zeigt. **Abb. 3 oben**
Beim großen Einzugsgebiet des Pegels Leibnitz (rd. 1100 km²) sind die Hochwässer hingegen gleichmäßiger über das Jahr verteilt. **Abb. 3 unten**
Aufgrund der Gebietsgröße mittelt sich die raum-zeitliche Variabilität der Niederschläge und der Zuflüsse der Nebenflüsse oft heraus. Es bedarf einer großräumigen, länger andauernden Überregnung, mit welcher eine großflächige Bodensättigung verbunden ist, sodass alle Zubringer zum Hochwasser im Hauptfluss

beitragen. Eine derartige Überregnung ist im Süden Österreichs vor allem in den Herbstmonaten aufgrund des gehäuftten Auftretens von Tiefdruckgebieten im Mittelmeerraum zu beobachten. Des Weiteren ist aus dem Beispiel herauszulesen, dass im kleinen Gebiet des Pegels Schwanberg in den Wintermonaten keine Hochwässer auftreten. Das Einzugsgebiet besitzt einen hohen Anteil an hoch gelegenen Gebietsteilen auf der Koralpe (bis über 2000m Seehöhe), in denen in dieser Zeit der Niederschlag meist als Schnee gebunden ist. Es wird zu überprüfen sein, ob das gekoppelte Modell unter Verwendung der verschiedenen Klimamodellvarianten die einzelnen Indikatoren entsprechend nachbilden kann. Erst dann kann auf eine realistische Widergabe der atmosphärischen und hydrologischen Situation geschlossen werden.

Neben der historischen Analyse ist in einem zweiten Teil des Projekts mit dem räumlich und zeitlich hoch aufgelösten gekoppelten Modell auch eine Vor-ausrechnung in die Zukunft geplant. Wie erwähnt müssen dabei an den Rändern des regionalen Klimamodells Rechenergebnisse eines globalen Klimamodells angesetzt werden. Dazu stehen verschiedene Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- (1) Die Entwicklung der Menschheit. Diese hat insbesondere durch ihren Eintrag an Treibhausgasen in die Atmosphäre Einfluss auf das Klimasystem der Erde und wird in Form von vorgegebenen Szenarien abgeschätzt. In CHC-FloodS kommt das IPCC Szenario des ungebremsten Wachstums (Szenario RCP8.5) zum Einsatz.
- (2) Die Wahl des GCM und des RCM. In der EURO-CORDEX-Initiative werden insgesamt 12 GCM und 10 RCM verwendet, um ein Ensemble von über 100

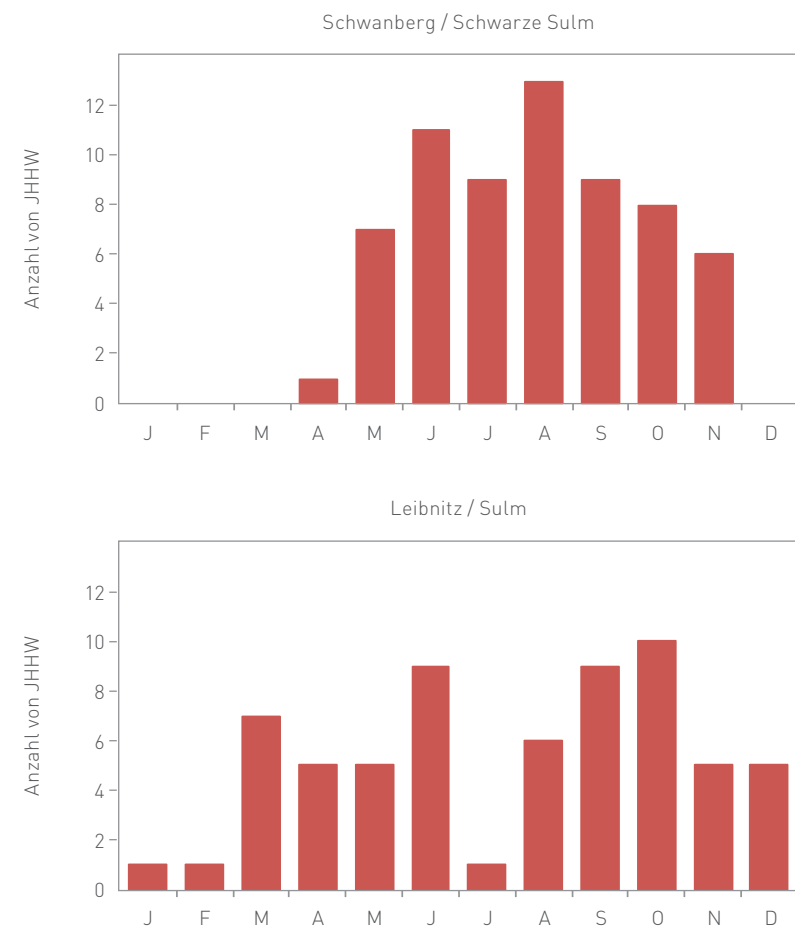


Abb. 3

Unterschiedliche Saisonalität der Jahreshöchsthochwässer (JHHW) von 1951 bis 2014 am Beispiel des kleinen, bis in hohe Lagen der Koralpe reichenden Gebiets des Pegels Schwanberg (oben) und des großen Gebiets des Pegels Leibnitz (unten). Die Schwarze Sulm ist ein Nebenfluss der Sulm.

Klimasimulationen für Europa für das 21. Jahrhundert zu erstellen. In CHC-FloodS wird die neueste Version des regionalen Modells COSMO-CLM, vorwiegend entwickelt vom Deutschen Wetterdienst, verwendet, um EURO-CORDEX um eine Klimasimulation mit 12.5 km Gitterweite zu bereichern. „Angetrieben“ wird es vom globalen Modell des Max-Planck-Institutes Hamburg (MPI-ESM-LR). Diese Simulation wird anschließend mittels COSMO-CLM auf 3 km Gitterweite im Alpenraum gebracht und über das neue Klimadatenzentrum des Climate Change Centre Austria (CCCA) der Klima- und Klimafolgenforschung zur Verfügung gestellt. Damit kann natürlich keine verlässliche Aussage über die Auswirkungen des Klimawandels getroffen werden, dennoch wird ein erster Eindruck über die Leistungsfähigkeit der konvektionserlaubenden Modellierung vermittelt.

(3) Das Verfahren der Fehlerkorrektur. Hier wird ein neuartiger Ansatz implementiert, der in der Lage ist, gewisse Schwächen bekannter Methoden, etwa die Beeinflussung des Klimaänderungssignals durch Anwendung der Fehlerkorrektur selbst, zu minimieren. Dies bietet vor allem bei Extremereignissen Vorteile. Die erwarteten Simulationen stellen einerseits Neuerungen dar, fügen sich aber dennoch in die bestehenden Europäischen und Österreichischen Datenpools ein.

Implikationen für die Hochwasserrisikoabschätzung

Die Zusammenarbeit der Disziplinen Klimatologie und Hydrologie und die Behandlung der grundlegenden Forschungsfragen zur Überbrückung der unterschiedlichen räumlichen Skalen bietet in diesem

Projekt die Möglichkeit, generelle Anforderungen für die Erfassung von lokalen Hochwässern der einen an die andere Disziplin zu formulieren. Das gekoppelte Modell im vorliegenden Projekt steht am Beginn einer Entwicklung der Kombination der beiden Modellfamilien für kleinräumige Modell Anwendungen, die auch von der ständigen Weiterentwicklung von Computerressourcen getragen werden. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, klimabedingte Änderungen im Auftreten von Hochwässern in kleinen Einzugsgebieten abzuschätzen.

Wichtig ist vor allem, dass die Veränderungen in der Häufigkeit verschieden großer Hochwässer quantifizierbar werden. Damit verbunden sind Änderungen in den statistischen Eigenschaften, beispielsweise der höchsten jährlichen Hochwässer, die eine wichtige Grundlage zur Abschätzung von Hochwasserbemessungswerten darstellen (z.B. HQ100). Ein derartiges Modell kann daher als wertvolles Planungsinstrument dienen, um auf mögliche Veränderungen durch Klimawandel frühzeitig reagieren zu können.

Im Projekt wird aber auch eine zweite Richtung verfolgt, die sich aus den großen Unsicherheiten in den Niederschlägen aus den Klimamodellprojektionen ergibt. Qualitativ werden erwartete Veränderungen in den generellen Mechanismen zur lokalen Hochwasserentstehung beschrieben, einschließlich hochwasser auslösender Wetterlagen. Darauf bauend können Szenarienuntersuchungen oder „Was wäre, wenn“-Diskussionen in Zusammenarbeit zwischen Experten der Fachrichtungen Klimatologie, Hydrologie und Wasserwirtschaft initiiert werden.

Christian Reszler



Projektleitung

Prof. Dr. **Karl Hogl**

Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik



Beteiligte Institutionen

- Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik
- Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
- Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Raumplanung und ländliche Neuordnung



Gute Gründe für das Projekt

- Das Projekt RiskAdapt untersucht die Dynamik von Hochwasserrisiken unter Berücksichtigung der beiden Treiber Klimawandel und Siedlungsentwicklung und zeigt die hohe Bedeutung eines vorausschauenden Umgangs mit den zu erwartenden Veränderungen.
- Die Bewertung zukünftiger Hochwasserrisiken erfolgt in interdisziplinärer Abstimmung von Wasserwirtschaft, Raumplanung und Politikwissenschaft.
- Das Projekt verdeutlicht den besonderen Einfluss lokaler Kontextbedingungen auf die zukünftigen Veränderungen des Hochwasserrisikos und zeigt auf, in welchen Bereichen lokale Akteure Anpassungskapazitäten entwickeln können.

RiskAdapt

Vorausschauende Anpassung an zukünftige
Hochwasserrisiken in Österreich

Nach dem „Jahrhunderthochwasser“ im Jahr 2002 und dem Hochwasser 2005 war im Juni 2013 wieder ein großer Teil Österreichs von schweren Überflutungen betroffen. In wenigen Tagen fielen Regenmengen, die normalerweise in einem Zeitraum von ein bis zwei Monaten auftreten. Es war bereits das zweite „Jahrhunderthochwasser“ im 21. Jahrhundert.

Insgesamt haben in den letzten 30 Jahren in rund 20% der Einzugsgebiete in Österreich die Hochwasser zugenommen, besonders in kleinen Einzugsgebieten nördlich des Alpenhauptkamms. Österreichweit haben die Winterhochwasser deutlich stärker zugenommen als die Sommerhochwasser.

Aus dem gehäuftten Auftreten von Hochwasserereignissen können keine statistisch gesicherten Aussagen bezüglich künftiger Trends getroffen werden, es gilt aber als wahrscheinlich, dass aufgrund klimawandelbedingter Veränderungen die Hochwassergefahr zumindest in Teilen Österreichs steigen wird. Neben der Variabilität des Klimas gelten die intensivierte Landnutzung in Überflutungsgebieten und der damit verbundene Verlust an Retentionsräumen als wichtige Ursachen steigender Hochwasserrisiken.

Zukünftiges Hochwasserrisiko österreichischer Gemeinden
Szenario: 2030

Risikoklassen

- sehr hohes Risiko
- hohes Risiko
- mäßiges Risiko
- niedriges Risiko
- marginales Risiko
- keine Ausweisung

- Nicht-Dauersiedlungsraum (Wald, Almen, Gewässer und Ödland)
- Landesgrenze
- Bezirksgrenze
- Seen
- Hauptflüsse

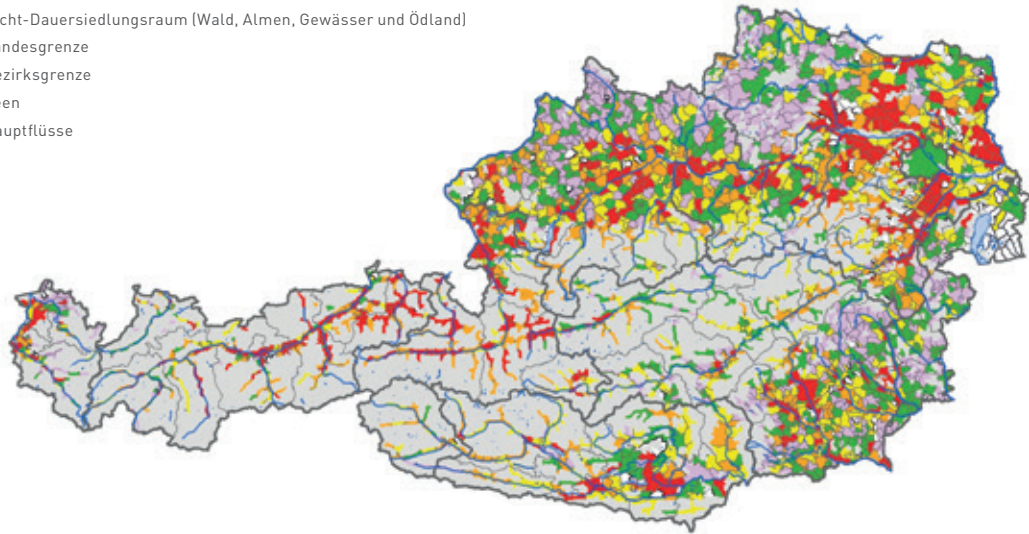


Abb. 1

Hochwasserrisikoklassen als Funktion von möglichen Klimaeinflüssen und der Bevölkerungsentwicklung auf Gemeindeebene

Datengrundlagen: Hochwasser-Risikobewertung nach Gewässerabschnitten (Umweltbundesamt, 2011), Überflutungsflächen HQ200 (HORA), Volkszählung 2001 (Statistik Austria), Kartengrundlagen: Verwaltungsgrenzen (BEV, 2012)

Zur Bewertung zukünftiger Hochwasserrisiken wurde deshalb im Forschungsprojekt RiskAdapt ein dynamischer Ansatz gewählt, der Entwicklungsszenarien beider Komponenten des Risikos – Gefährdung und Vulnerabilität – berücksichtigt.

Die Gefährdung durch Hochwasser wurde sowohl für den derzeitigen Zustand als auch für zukünftige Klimawandelszenarien bis 2030 analysiert. Dafür wurde ein Klimazuschlag zu den aktuell gültigen Abflussbemessungswerten modelliert. Ein spezielles Augenmerk galt der Analyse der Vulnerabilität und deren Entwicklung. Dazu wurde die derzeitige Dichte der baulichen Nutzung in Überflutungsgebieten ermittelt, sowie Szenarien der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung bis 2030 betrachtet. Mithilfe nutzungsspezifischen Schadensfunktionen wurde für verschiedene Jährlichkeiten das Schadenspotenzial ermittelt. Als Teil der Vulnerabilität wurden auch die Anpassungskapazitäten in Politik und Verwaltung sowie die Anpassungsfähigkeit von politischen Entscheidungsstrukturen an dynamische Hochwasserbedingungen untersucht.

Die Untersuchung erfolgte auf zwei Ebenen. Im ersten Schritt erfolgte eine generalisierte Ausweisung des zukünftigen Risikos auf Makroebene für alle Gemeinden Österreichs. Im zweiten Schritt wurde in drei Fallstudiengebieten eine detaillierte Risikountersuchung für verschiedene Entwicklungsszenarien durchgeführt. Gemeinsam mit lokalen und regionalen ExpertInnen und EntscheidungsträgerInnen wurden praxistaugliche Anpassungsoptionen erarbeitet, um Strategien für ein angepasstes, vorausschauendes Hochwasserrisikomanagement abzuleiten und zukünftige Hochwasserschäden minimieren zu können.

Zukünftiges Hochwasserrisiko in Österreich

Die Erfassung des Hochwasserrisikos auf Makroebene stellt eine wesentliche Komponente im Hochwasserrisikomanagement dar. In Österreich wurde im Rahmen der Umsetzung der Europäischen Hochwasserrichtlinie das Risiko auf Makroebene abgeschätzt. Die Definition von Schwerpunktregionen mit hohem Risiko erfolgte durch die Ausweisung von Gebieten mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko. Diese Ausweisung wird zwar in Sechsjahreszyklen wiederholt, es wird jedoch keine vorausschauende Abschätzung des Risikos hinsichtlich Gefährdung und Vulnerabilität durchgeführt.

Eine dynamische Bewertung des Risikos, wie jene im Projekt RiskAdapt, ermöglicht die Identifizierung von Gebieten, in denen mit der Entstehung von neuem Schadenspotentials zu rechnen ist. Die Miteinbeziehung von Indikatoren, welche die zukünftige Entwicklung des Hochwasserrisikos abzuschätzen ermöglichen, hilft eine vorausschauende Risikobewertung unter Einbeziehung möglicher Effekte des Klimawandels bzw. von Siedlungsentwicklungen durchzuführen. Diese Information kann genutzt werden, um durch örtliche bzw. überörtliche Maßnahmen der Zunahme des Hochwasserrisikos entgegenzuwirken.

Die Ergebnisse der vorausschauenden Risikobewertung für Österreich sind in Abb. 1 dargestellt. Die Zunahme des Hochwasserrisikos stellt speziell in alpinen Gemeinden mit hoher Bevölkerungs- und Wirtschaftsdynamik aber auch im Flachland, also dort wo es zu breitflächigen Überflutungen kommen kann, eine Herausforderung dar.

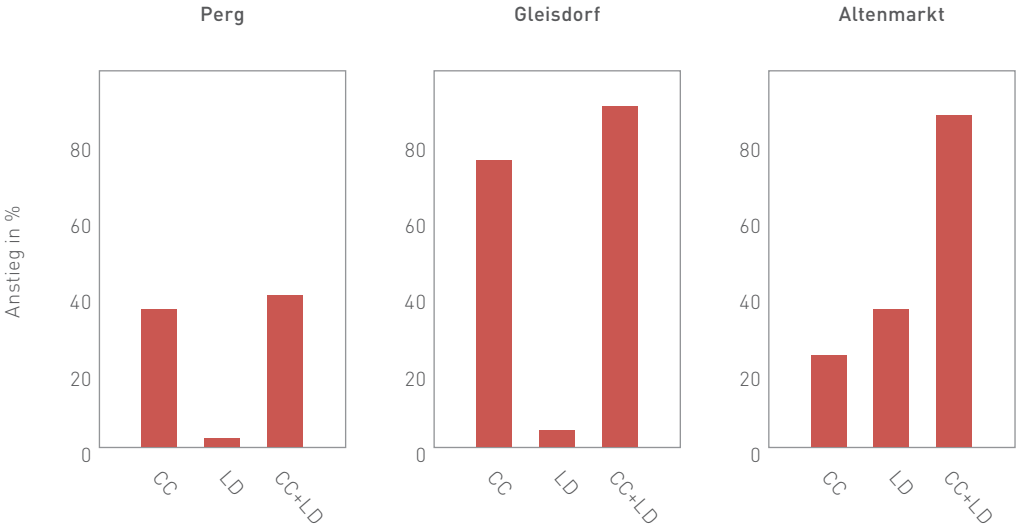


Abb. 2

Änderung der jährlichen Schadenserwartung in den Fallstudiengebieten
Dargestellt sind die Szenarien Klimawandel („CC“), Siedlungstätigkeit („LD“) und das kombinierte Szenario aus Klimawandel und Siedlungstätigkeit („CC+LD“)

Lokale Hochwasserrisikobewertung in drei ausgewählten Gemeinden

Basierend auf den Ergebnissen der gesamtösterreichischen Beurteilung zukünftiger Hochwasserrisiken wurden drei Fallstudiengebiete für eine detaillierte Hochwasserrisikobewertung ausgewählt: Altenmarkt im Pongau (Sbg), Gleisdorf (Stmk) und Perg (OÖ). In den jeweiligen Gemeinden wurde ein Klimawandelzuschlag in Höhe von 10% zu den bestehenden Abflussbemessungswerten von 100- und 300-jährlichen Hochwasserereignissen modelliert, um die damit einhergehende Veränderung der Überflutungsflächen und -tiefen zu simulieren.

Die zukünftige Entwicklung der Hochwasserexposition in den Überflutungsgebieten wurde über Szenarien der Siedlungsentwicklung abgebildet. Hierbei wurde auf Basis von Planungsinstrumenten sowie im Zuge von ExpertInneninterviews mit lokalen EntscheidungsträgerInnen und PlanerInnen eine parzellenscharfe Baulandentwicklung (differenziert nach Bebauungstyp und -fläche) bis zum Referenzjahr 2030 abgeleitet und in einem Geoinformationssystem mit der bestehenden Bebauungsstruktur verknüpft. Durch die Verschneidung mit den jeweiligen Hochwasser-Szenarien wurde die zu erwartende Veränderung der betroffenen Gebäudefläche ermittelt.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Fallstudien wurde die zukünftige Veränderung des Hochwasserrisikos unter Anwendung gebäudebezogener Schadensfunktionen in Form der prozentuellen Zunahme der jährlichen Schadenserwartungen ausgedrückt. Die Anpassungskapazitäten in den jeweiligen Gemeinden wurden schließlich im Zuge von Experteninterviews

erfasst; sie bieten eine qualitative Ergänzung der quantitativen Bewertung der zu erwartenden Hochwasserschäden.

Die lokalen Hochwasserrisikobewertungen zeigen, dass in allen Gemeinden ein Anstieg des Hochwasserrisikos bzw. der hochwasserbezogenen Schäden zu erwarten ist. Allerdings ist der Einfluss klimawandelbedingter Veränderungen bzw. der Einfluss von Baulandentwicklungen in Überflutungsgebieten unterschiedlich stark ausgeprägt. Während etwa in den Gemeinden Perg und Gleisdorf der Klimazuschlag das Hochwasserrisiko in unterschiedlichem Ausmaß, aber dennoch deutlich stärker ansteigen lässt als die zu erwartende Siedlungstätigkeit, ist letztere in der Gemeinde Altenmarkt der signifikantere „Risikotreiber“. [Abb. 2](#)

Die folgenden Faktoren sind für die Unterschiede zwischen den untersuchten Gemeinden entscheidend:

- **Effektivität bestehender Schutzeinrichtungen:**
Die Intensität eines klimawandelbedingten Anstiegs der Hochwassergefahr ist davon abhängig, ob die bestehenden (in der Regel auf 100-jährliche Hochwasser bemessenen) Schutzbauten dem modellierten Klimazuschlag standhalten. So kommt es beispielsweise beim Überspülen oder Versagen eines Schutzdammes zu einer starken Ausweitung des Überflutungsgebietes in vormals geschützte (Siedlungs-)Bereiche mit der Folge einer Aktivierung hoher Schadenspotenziale.
- **Baulandangebot in Überflutungsgebieten:**
Der zukünftige Anstieg von Hochwasserschäden steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem

Angebot an Baulandflächen sowie der Art des in Überflutungsgebieten ausgewiesenen Baulands. Da mit unterschiedlichen Bebauungsformen spezifische Schadensfunktionen verknüpft sind, sind bei gewerblich-industriellen Gebäuden im Allgemeinen höhere Schäden zu erwarten als bei Wohngebäuden, wobei die Überflutungstiefen (d.h. die Lage der Objekte im Überflutungsgebiet) für die Schadenshöhe maßgebend sind.

· **Siedlungsdruck und Baulandnachfrage:**

In Gemeinden mit hoher Bevölkerungs- und Wirtschaftsdynamik und eingeschränktem Flächenpotenzial für Baulandentwicklung (wie etwa in alpinen Talräumen oder dicht besiedelten Gemeinden) herrscht ein hoher Siedlungsdruck auf potentielle Überflutungsflächen. Die stark eingeschränkte Verfügbarkeit hochwassergeschützter Ausweichflächen in diesen Gemeinden erschwert die Freihaltung von Überflutungsflächen.

Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen in lokalen Stakeholder-Workshops

Aufbauend auf den Ergebnissen der lokalen Hochwasserrisikobewertungen sind in den drei ausgewählten Gemeinden mehrstündige integrative Workshops mit für das Hochwasserrisikomanagement relevanten Akteuren (BürgermeisterIn, AmtsleiterInnen, BauamtsleiterIn, Obmann/Obfrau Bauausschuss, FraktionsleiterInnen, VertreterInnen von Behörden und Fachdienststellen, Blaulichtorganisationen und zivilgesellschaftliche Akteure) durchgeführt worden.

Mit den Stakeholder-Workshops wurden primär drei Ziele verfolgt: (1) die Prüfung der Plausibilität wissenschaftlich erarbeiteter Hochwasserrisikoszenerarien unter besonderer Berücksichtigung der beiden Treiber Klimawandel und Siedlungsentwicklung, (2) die Sensibilisierung der Workshop-TeilnehmerInnen für zukünftige Hochwasserrisiken und (3) das gemeinsame Erarbeiten von prioritären Anpassungsmaßnahmen.

In allen drei Workshops konnte eine hohe Beteiligung der relevanten Stakeholder erreicht werden. Die TeilnehmerInnen waren mehrheitlich sehr zufrieden mit dem Ablauf und Inhalt der Workshops. Die vom RiskAdapt-Team präsentierten Gefahren- und Risikokarten wurden überwiegend als glaubwürdig erachtet. Befragt nach den im Workshop erreichten Zielen, war eine überwiegende Mehrheit in allen drei Gemeinden der Meinung, dass eine Sensibilisierung der TeilnehmerInnen für die Notwendigkeit eines vorausschauenden Hochwasserrisikomanagements stattgefunden habe. Die TeilnehmerInnen waren zudem der Ansicht, dass wichtige Grundlagen für die Bearbeitung von Anpassungsmaßnahmen bereitgestellt wurden und dass der Workshop Raum und Zeit für Reflexionen anbot. Darüber hinaus schafften es die Workshops, dass das Wissen in Bezug auf ein Hochwasserrisikomanagement erweitert wurde.

Die vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen unterscheiden sich hingegen deutlich zwischen den drei Gemeinden. Diese Unterscheide werden besonders klar, wenn man die drei höchstgereihten Maßnahmen jeder Gemeinde betrachtet. In Gleisdorf zielen alle drei prioritären Anpassungsmaßnahmen auf die Minderung der Hochwassergefahr ab: durch den Bau

von Rückhaltebecken im Oberliegerbereich, durch Flächenvorsorge für Abflusskorridore und durch die Förderung von privaten Retentionsmaßnahmen zur Stärkung der Eigenverantwortung. Auch in Perg zielen die prioritären Anpassungsmaßnahmen – Geschiebemanagement, Schaffung von Retentionsflächen und die Ausrichtung des örtlichen Entwicklungskonzeptes auf eine abgestufte Gefährdungssituation (von geringer zu hoher Gefährdung) – vor allem auf die Gefahrenminderung ab. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich die priorisierten Anpassungsmaßnahmen in Altenmarkt auf die Reduzierung der Vulnerabilität und des Schadenspotenzials durch die Förderung freiwilliger baulicher Adaptierungen und durch Auflagen im Rahmen des Bauverfahrens in potentiellen Überflutungsbereichen, z.B. durch die Berücksichtigung eines Freibords und Empfehlungen für die Lagerung von gefährlichen Stoffen.

Interessant ist zudem, dass in zwei der drei Gemeinden der aktuelle und nicht der zukünftige Problemdruck die Diskussion um etwaige Anpassungsmaßnahmen bestimmte. Dennoch können die besprochenen baulichen, raumplanerischen, und informatorischen Anpassungsmaßnahmen auch in einer längerfristigen Perspektive das Risiko senken und in diesem Sinne präventiv wirken.

Karl Hogl

Alle geförderten Projekte im Überblick

C3S-ISLS

Projektleitung	Universität Innsbruck, Institut für Geographie
Kontakt	Dr. Martin Rutzinger (martin.rutzinger@uibk.ac.at), Thomas Zieher (thomas.zieher@uibk.ac.at)
Partner	Bundesforschungszentrum für Wald und Naturgefahren, Abt. Gebietswasserhaushalt; Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie
Förderprogramm	Klima- und Energiefonds, Austrian Climate Research Programme, 5. Ausschreibung
Dauer	01.04.2013 – 30.03.2016
Budget	€ 299.980,00
Fördersumme	€ 299.980,00

DEUCALION

Projektleitung	Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren
Kontakt	Dr. Roland Kaitna (roland.kaitna@boku.ac.at)
Partner	Universität Bern, Insitut für Geologie - Dendrolab, Dr. Markus Stoffel; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Dr. Andreas Gobiet, Dr. Douglas Maraun; Insitut für Wirtschaftsforschung Wien (Wifo), Dr. Franz Sinabell; Technische Universität Delft, Dr. Markus Hrachowitz
Förderprogramm	Klima- und Energiefonds, Austrian Climate Research Programme, 2. Ausschreibung
Dauer	01.03.2011 – 28.02.2014
Budget	€ 299.889,00
Fördersumme	€ 299.889,00

HighEnd:Extremes

Projektleitung	Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz
Kontakt	Mag. Dr. Heimo Truhetz (heimo.truhetz@uni-graz.at)
Partner	Climate Service Center Germany, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Förderprogramm	Klima- und Energiefonds, Austrian Climate Research Programme, 6. Ausschreibung
Dauer	01.04.2014 – 31.03.2017
Budget	€ 298.018,00
Fördersumme	€ 298.018,00

CHC-FloodS

Projektleitung	Joanneum Research Forschungsges.m.b.H.,
Kontakt	Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Reszler (christian.reszler@joanneum.at)
Partner	Karl-Franzens-Universität Graz, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Dr. Heimo Truhetz
Förderprogramm	Klima- und Energiefonds, Austrian Climate Research Programme, 6. Ausschreibung
Dauer	01.03.2014 – 31.08.2016
Budget	€ 187.053,00
Fördersumme	€ 187.053,00

RiskAdapt

Projektleitung	Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik
Kontakt	Prof. Dr. Karl Hogl (karl.hogl@boku.ac.at)
Partner	Universität für Bodenkultur Wien - Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik, Prof. Dr. Karl Hogl, Dr. Ralf Nordbeck, Mag. Patrick Scherhauer; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau, Prof. Dr. Hans-Peter Nachtnebel, DI Benjamin Appertl, Dr. Mathew Herrnegger, DI Tobias Senoner; Institut für Raumplanung und ländliche Neuordnung, Ass.Prof. Dr. Walter Seher, Mag. Lukas Löschner
Förderprogramm	Klima- und Energiefonds, Austrian Climate Research Programme, 4. Ausschreibung
Dauer	01.09.12 – 31.08.15
Budget	€ 365.294,00
Fördersumme	€ 294.541,00

Bisherige Ausgaben von „ACRP in essence“

„ACRP in essence“ stellt Ihnen ausgewählte Forschungsberichte vor, die durch ihre wissenschaftlichen Fragestellungen eine Grundlage für die notwendigen Schritte in Richtung Klimawandelanpassung bilden.

www.klimafonds.gv.at/service/broschueren/acrp-in-essence

Bei Interesse an den bisherigen
Themenfeldern, kontaktieren Sie bitte:
bettina.zak@klimafonds.gv.at



Sonderheft: COIN



Landwirtschaft



Forstwirtschaft



Biodiversität



Wirtschaft



Gesundheit



Wasserwirtschaft

Impressum

Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22, 1060 Wien

Tel: +43 1 585 03 90, Fax: +43 1 585 03 90-11

office@klimafonds.gv.at

Für den Inhalt verantwortlich

Die AutorInnen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Broschüre. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider. Weder der Klima- und Energiefonds noch das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Druck

Druckerei Gugler (www.gugler.at)

Bei der mit Ökostrom durchgeführten Produktion wurden die Anforderungen des Österreichischen Umweltzeichens erfüllt. Sämtliche während des Herstellungsprozesses anfallenden Emissionen wurden im Sinne einer klimaneutralen Druckproduktion neutralisiert.

Gestaltung

Studio Deluxe (www.studiodeluxe.at)

Verlags- und Herstellungsort

Wien

Wir haben diese Broschüre mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt und die Daten überprüft. Rundungs-, Satz- oder Druckfehler können wir dennoch nicht ausschließen.

www.klimafonds.gv.at





MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH

AUSTRIAN CLIMATE RESEARCH PROGRAMME

in **ESSENCE**

