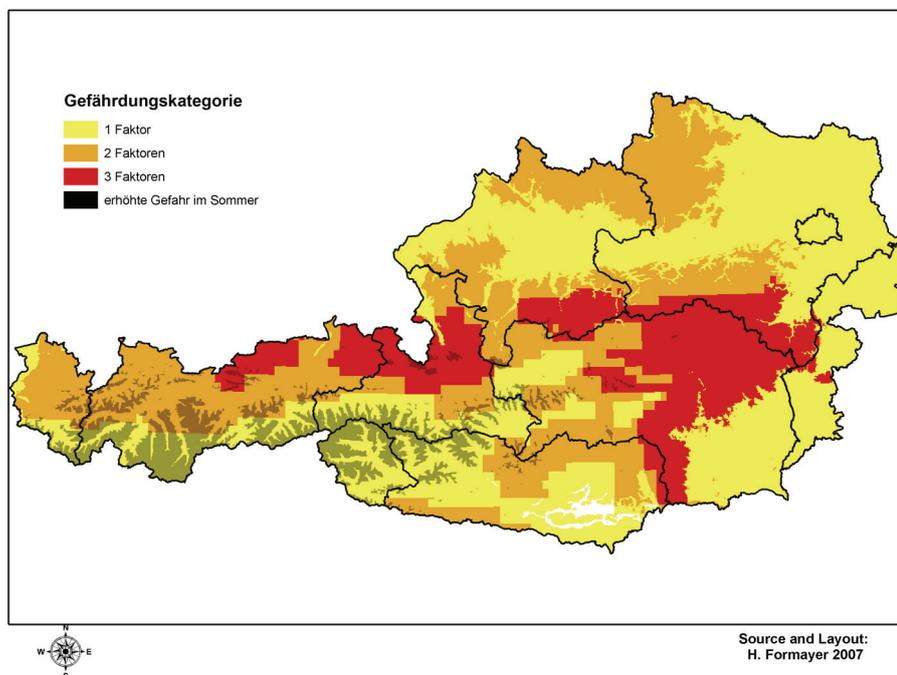


## Hochwasser und Klimawandel

Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse  
in Österreich

Herbert Formayer und Helga Kromp-Kolb



Endbericht  
im Auftrag des World Wide Fund for Nature (WWF)

Institut für Meteorologie (BOKU-Met)  
Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt  
Universität für Bodenkultur Wien

September 2009

ISSN 1994-4179 (Print)  
ISSN 1994-4187 (Online)



**Herbert Formayer und Helga Kromp-Kolb**

## **Hochwasser und Klimawandel**

Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse  
in Österreich

Endbericht  
im Auftrag des World Wide Fund for Nature (WWF)

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Formayer, H., Kromp-Kolb, H. (2009): Hochwasser und Klimawandel. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich (Endbericht WWF 2006).  
*BOKU-Met Report 7*, ISSN 1994-4179 (Print), ISSN 1994-4187 (Online). Verfügbar unter:  
[http://www.boku.ac.at/met/report/BOKU-Met\\_Report\\_07\\_online.pdf](http://www.boku.ac.at/met/report/BOKU-Met_Report_07_online.pdf)

Impressum:

Medieninhaber und Herausgeber:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt  
Institut für Meteorologie, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich

URL: <http://met.boku.ac.at/>



## Hochwasser und Klimawandel

Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich  
Herbert Formayer und Helga Kromp-Kolb

### 1. Einleitung

#### 1.1 Hochwasserszenarien aus Sicht der Forschung Möglichkeiten und Grenzen von Niederschlagsszenarien

Wenn vom globalen Klimawandel und den regionalen Auswirkungen gesprochen wird, wird meist der Temperaturanstieg und seine Folgen gemeint. Dabei ist natürlich eine Veränderung der Niederschlagsmuster wie Menge, Häufigkeit und Intensität zumindest eben so wichtig wie die Temperatur. Bei uns im Alpenraum ist die Vegetation auf eine ausreichende Wasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode angewiesen und Veränderungen der Niederschlagsmenge bzw. -Intensität beeinflussen direkt das Abflussverhalten unserer Flüsse und damit auch das Hochwasserrisiko.

Ursache für die Zurückhaltung bei Aussagen über die mögliche Veränderung des Niederschlagsverhaltens ist die, verglichen mit der Temperatur wesentlich größere Unsicherheit bei der Berechnung von Niederschlagsszenarien. Niederschlag kann durch verschiedene Prozesse produziert werden. Der Großteil des Niederschlags wird durch Frontalsysteme von Tiefdruckgebieten ausgelöst, wobei bei uns im Alpenraum Atlantische Störungen für den Bereich nördlich der Alpen und Mittelmeertiefs für den Raum südlich der Alpen bestimmend sind. Die Alpen selbst beeinflussen das Niederschlagsverhalten durch Aufgleitvorgänge und Stau. Ganz andere Prozesse sind jedoch für sommerliche Gewitter verantwortlich, die gerade in Österreich nicht unwesentlich sind.

Globale Klimamodelle (GCMs) können wegen ihrer groben räumlichen Auflösung von einigen hundert Kilometer wichtige Vorgänge bei der Niederschlagsbildung - wie etwa Wolkenbildung - nicht direkt modellieren und daher müssen diese Prozesse parametrisiert, das heißt indirekt aus berechneten Größen geschätzt werden. Auch sind die Alpen wegen der groben Auflösung nur stark abgeflacht in den GCMs enthalten und daher ist die räumliche Verteilung in und um den Alpenraum nur sehr grob wiedergegeben. Besonders schwierig sind thermische Gewitter mit ihrer räumlichen Größenordnung von einigen Kilometern. Auch diese kommen in den GCMs nur parametrisiert vor.

Globale Betrachtungen des Niederschlags können auch nicht auf die regionalen Veränderungen übertragen werden. Es ist zwar richtig, das durch den Temperaturanstieg und hier vor allem durch dem Anstieg der Meerestemperatur, die Verdunstung global zunehmen wird und diese vermehrte Verdunstung muss natürlich irgendwo wieder als Niederschlag ausfallen, das heißt der hydrologische Zyklus wird beschleunigt. Weiters ist es auch richtig, das einer wär-

mere Atmosphäre mehr Wasserdampf und damit auch mehr Energie zur Verfügung steht. Wo jedoch dieser vermehrte Niederschlag ausfällt, hängt direkt mit der Luftdruck- und Luftmassenverteilung zusammen. Wo und ob sich der höhere Wasserdampf- und Energiegehalt der Atmosphäre durch eine Zunahme der Niederschlagsintensitäten und Extremereignisse auswirkt, hängt ebenfalls von den Luftmassengegensätzen und der Druckverteilung ab.

Die Aussagen der GCMs zu den lokalen Veränderungen des Niederschlags im Alpenraum sind daher wenig aussagekräftig. Um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen wurden in den letzten Jahren vermehrt Regionale Klimamodelle (RCMs) entwickelt. RCMs werden in die GCMs „genestet“, das heißt die Modelle werden nicht für die gesamte Erde, sondern nur für einen Ausschnitt gerechnet (z.B. Europa). An den Rändern werden die Ergebnisse des GCMs verwendet und im inneren wird mit einer höheren Auflösung gerechnet. Die Modelle des EU-Projektes PRUDENCE (Christensen et. al, 2002) wurden mit einer Auflösung von 50 km und 20 km gerechnet. Derzeit gerade laufende Projekte, auch bei uns in Österreich (z.B. RECLIP,2005), rechnen mit 10 km Auflösung. Die Ergebnisse dieser RCMs zeigen wesentlich bessere Niederschlagsresultate sowohl in der räumlichen Verteilung, als auch in den Niederschlagsintensitäten wie GCMs. Die RCMs können also frontale Niederschläge schon sehr realistisch wiedergeben, nur bei den Wärmegewittern reicht die Auflösung noch nicht, um diese explizite zu berücksichtigen. Daher sind die Niederschlagsszenarien der RCMs schon wesentlich plausibler als die der GCMs, jedoch sind die Unterschiede zwischen verschiedenen RCMs deutlich größer als bei der Temperatur. Daher kann man auch diese Ergebnisse nur eher qualitativ als quantitativ interpretieren.

Generell kann man mit Klimaänderungsszenarien nur die Veränderung der meteorologischen Bedingungen und eventuell indirekte Effekte auf die Vegetation ableiten. Bei Hochwasserereignissen spielen aber auch nichtmeteorologische Faktoren, wie Landnutzungsänderungen die das Abflussverhalten des Einzugsgebietes verändern, oder Raumordnungsregelungen, welche die Bebauung regeln, eine wesentliche Rolle. In den letzten Jahren haben sich die beiden Forschungsprogramme Floodrisk (<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/klima/projekte/floodrisk/>) und StartClim (<http://www.austroclim.at/index.php?id=40>) eingehend mit allen Komponenten von Hochwasserereignissen in Österreich beschäftigt.

## 1.2 Klimawandel und allgemeine Niederschlagstrends

Die Niederschlagsverhältnisse sind in Österreich höchst vielfältig und auch sehr kleinräumig strukturiert. Die Jahresniederschlagssummen reichen von rund 500 mm im Marchfeld und im Weinviertel bis über 2000 mm in den alpinen Stauregionen. Ein wesentlicher Faktor für die Niederschlagsverteilung spielen die Alpen. Durch Luv/Lee Effekte (an der Windzugewandten Bergseite – Luv - wird der Niederschlag erhöht, an der Windabgewandten – Lee - verringert) können kleinräumige Unterschiede entstehen. So sind im Arlberggebiet Jahresniederschläge über 2000 mm keine Seltenheit und in den nicht weit entfernten inneralpinen Trockentälern wie z.B. dem oberen Inntal wiederum kommen lediglich Jahressummen von knapp über 600 mm vor. Die Alpen beeinflussen aber auch das Vorkommen von Gewittern. Die Maxima der Gewitterhäufigkeit kommen in den nördlichen Voralpen und in den Steirischen Randgebirgen vor. Inneralpin nimmt die Gewitterneigung wieder deutlich ab.

Neben dem Einfluss der Alpen zeigt sich in Österreich auch ein West – Ost Gefälle im Niederschlag. Je weiter man nach Osten geht, umso stärker wird der kontinentale Einfluss und umso geringer werden die Niederschläge. In einer Studie von BOKU-Met (Seibert et. al., 2006) wurden diese verschiedenen Einflüsse auf Starkniederschläge untersucht, und es konn-

ten sieben Niederschlagsregionen in Österreich identifiziert werden, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Diesen Regionen können Wetterlagen zugeordnet werden, bei denen Starkniederschläge in den jeweiligen Regionen auftreten.

Durch diese komplexe Niederschlagsverteilung in Österreich, kann man auch keinen einheitlichen Trend beim Niederschlag erwarten. Nur im äußersten Westen Österreichs zeigte sich in den letzten Jahrzehnten eine Niederschlagszunahme und auch eine Zunahme der Niederschlagsintensität. Für den Großteil Österreichs ergibt sich keine Änderung und im Südosten wurde eine leichte Niederschlagsabnahme bei der Jahressumme beobachtet. Im Gegensatz zur Temperatur kann man daher derzeit aus den Beobachtungen noch keine Rückschlüsse auf den Klimawandel ziehen.



BOKU-Met



for a living planet

## Regionen in Österreich, in denen gleichzeitig Starkniederschläge auftreten

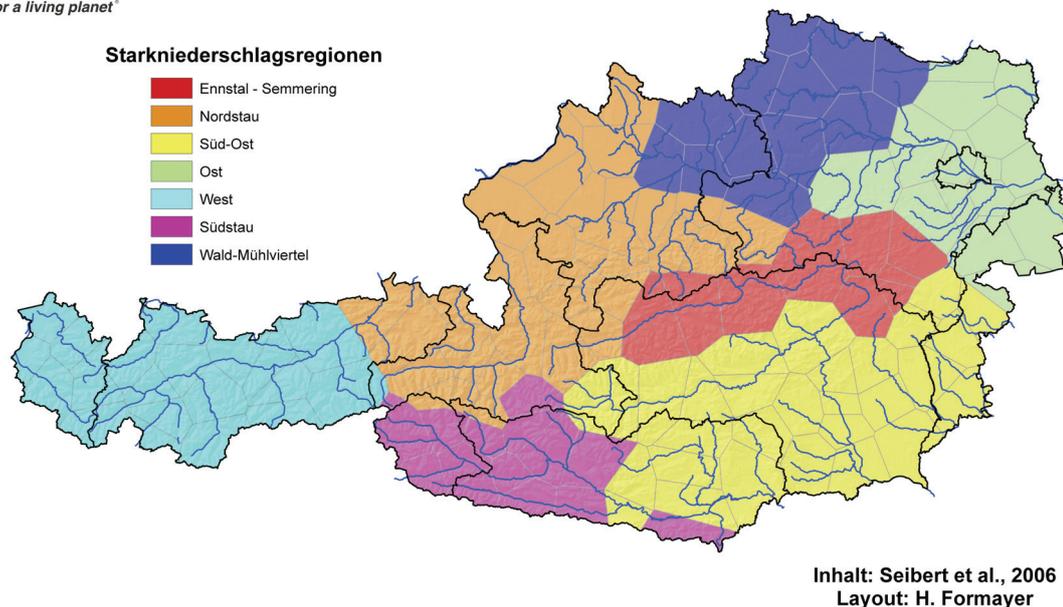


Abb. 1: Regionen Österreichs, in denen gleichzeitig Starkniederschläge auftreten. Modifiziert nach Seibert et. al, 2006.

Untersucht man die jüngsten regionalen Klimaänderungsszenarien wie etwa im EU-Projekt PRUDENCE, so zeichnet sich für Europa und auch für die Alpen ein doch deutlicher Trend für das 21. Jahrhundert ab. Generell zeigt sich für Europa eine Dipolstruktur bei der Niederschlagsentwicklung. Im ganzen Mittelmeerraum und in Westeuropa einschließlich der Britischen Inseln und Frankreich zeigt sich eine Niederschlagsabnahme, die besonders stark im Sommer ausgeprägt ist. Im Nordosten Europas, also Skandinavien, der Ostseeraum und Russland muss man hingegen mit einer Niederschlagszunahme rechnen. Der Alpenraum liegt dabei sozusagen im Übergangsbereich und daher zeigt sich hier bei der Jahressumme kein deutlicher Trend, jedoch eine starke Verschiebung des Niederschlags in den Jahreszeiten.

Bis zum Ende dieses Jahrhunderts muss man im Alpenraum mit einer Niederschlagszunahme in den Wintermonaten von etwa 15 bis 40 Prozent rechnen, wobei die Zunahme im Februar am ausgeprägtesten ist. In den Sommermonaten hingegen muss mit Abnahmen des Niederschlags von 10 bis 50 Prozent rechnen, mit einem Höhepunkt der Abnahme im August. In

den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst wiederum zeigen sich keine klaren Änderungen.

Neben diesen Monatsniederschlagssummen wurden von Schweizer Wissenschaftlern (Frei et al., 2005) auch die Starkniederschläge in diesen Szenarien für den Alpenraum untersucht. Hierbei zeigte sich bei Starkniederschlägen im Winter, die ja meist über mehrere Tage hinweg fallen, eine deutliche Zunahme. Im Sommer wiederum nahm die Wahrscheinlichkeit für Einzeltage mit hohen Niederschlagsmengen zu, und dies obwohl die Monatssummen abnehmen. Speziell im Sommer ist daher auch mit einer Zunahme der Niederschlagsintensität zu rechnen.

Diese Ergebnisse aus dem Projekt PRUDENCE werden durch die neuesten Resultate des unabhängigen GCMs ECHAM5 bestätigt. Auch in diesem Modell zeigt sich die Dipolstruktur über Europa und für den Alpenraum eine Verschiebung des Niederschlages vom Sommer in den Winter.

Neben der direkten Veränderung des Niederschlags durch den Klimawandel, können aber auch indirekte Effekte das Hochwasserrisiko erhöhen. Als wichtigster indirekter Faktor bei uns im Alpenraum ist hier der Temperaturanstieg zu nennen. Durch die Erwärmung wird in Zukunft ein deutlich geringerer Anteil am Gesamtniederschlag als Schnee fallen. Die Kombination - Anstieg der Schneefallgrenze und Niederschlagszunahme im Winter - erhöht zweifach das Hochwasserrisiko im Tiefland und im Alpenvorland in dieser Jahreszeit. In hochalpinen Einzugsgebieten wirkt sich dieser Anstieg der Schneefallgrenze selbst im Sommer noch als risikosteigernd aus.

Ein weiterer hochwasserfördernder Effekt könnte die Auswirkung auf die Vegetation sein. Die PRUDENCE Szenarien gehen von einem Temperaturanstieg im Alpenraum im Winter von etwa 3 bis 4.5 °C und im Sommer von 4 bis 7 °C aus. In den Übergangsjahreszeiten dürfte die Erwärmung etwas geringer ausfallen, aber immer noch über 2 °C liegen. Dieser massive Temperaturanstieg im Sommer, mit gleichzeitiger Niederschlagsverlagerung aus der Vegetationsperiode in den Winter, wird die alpine Vegetation stark beanspruchen und besonders die Wälder werden Anpassungsschwierigkeiten bekommen. Sollte es durch diese kombinierten Effekte zu großräumigen Vegetationsverschiebungen kommen, wird sich auch das Abflussverhalten speziell alpiner Einzugsgebiete verändern. Zusätzlich könnte auch die Erosion, durch veränderte Vegetation und Zunahme der Niederschlagsintensität erhöht werden, was nicht nur die Murenabgänge und den Geschiebeanteil bei Hochwassersituationen erhöht, sondern auch die Wasserspeicherung der Böden nachhaltig reduzieren würde.

Trotz der im Vergleich mit der Temperatur geringeren Robustheit der Niederschlagsszenarien, zeigen sich doch recht deutliche Tendenzen. Diese wiederum erlauben eine qualitative Abschätzung der zu erwartenden Veränderung des Hochwasserrisikos. Durch die zugrunde liegenden Prozesse ist es auch möglich Gebiete auszuweisen, in welchen die jeweiligen Prozesse besonders relevant sind, beziehungsweise wo mehrere Prozesse auftreten können.

## **2. Klimatologische Veränderungen**

### **2.1 Auswirkungen der Schneefallgrenze auf Hochwasserereignisse**

Als Faustformel kann man davon ausgehen, dass eine Temperaturerhöhung von 1 °C die mittleren Schneeverhältnisse um rund 150 m nach oben verschiebt. Für die PRUDENCE Szenario

rien folgt daraus eine mittlere Verschiebung der Schneeverhältnisse um etwa 500 m bis 600 m. Dies ist aber nur ein Näherungswert, der sich sowohl aus Schneedeckenaufbau als auch Abschmelzung zusammensetzt.

Diese Verschiebung der Schneeverhältnisse wird das Abflussverhalten der österreichischen Flüsse stark beeinflussen. Der Winterabfluß wird generell zunehmen und die Abflußspitze der Schneeschmelze wird deutlich früher auftreten. In Kombination mit der Zunahme der Winterniederschläge wird sich das Hochwasserrisiko im Winter und Frühjahr deutlich erhöhen. Besonders davon betroffen sind Höhenlagen zwischen 500 m und 2000 m Seehöhe (siehe Abb. 2). Unter 500 m Seehöhe fallen bereits heute mehr als 50 Prozent der Starkniederschläge im Winter als Regen und daher wirkt sich eine weitere Absenkung des Schneeanteiles nicht so stark aus. Über 2000 m Seehöhe wiederum wird es auch gegen Ende dieses Jahrhunderts noch kalt genug sein, dass der Winterniederschlag großteils als Schnee fällt. Als Beispiele für Flüsse, deren Abfluss im Winter sich stark verändern werden sind etwa die Mühl in Oberösterreich oder die Mur in der Steiermark.

Für das Auftreten von Hochwasser im Winter und Frühjahr ist jedoch nicht nur die Verschiebung der mittleren Verhältnisse relevant. Die Höhe der Schneefallgrenze gehorcht speziell im Gebirge höchst nichtlinearen Gesetzen. Durch das Schmelzen von fallenden Schneeflocken wird die Luft gekühlt. Dies hat zur Folge, dass bei intensiven Niederschlägen durch das Schmelzen die Luft über mehrere hundert Meter Seehöhe auf 0 °C abgekühlt wird und damit die Schneefallgrenze nach unten gezogen wird. Besonders effizient ist dieser Prozess in Alpentälern, da hier das Volumen der Atmosphäre durch die Berghänge reduziert ist und diese Abkühlung rascher erfolgt. Dies hat zur Folge, dass in den Alpentälern die Schneefallgrenze meist tiefer liegt als im Flachland. Damit hängt die aktuelle Schneefallgrenze nicht nur vom allgemeinen Temperaturniveau, sondern auch von der Niederschlagsintensität und der lokalen Topographie ab.

Dieses nichtlineare Verhalten der Schneefallgrenze kann nun im Gebirge besonders dann zu erhöhtem Hochwasserrisiko führen, wenn durch Erwärmung, die Schneefallgrenze während eines intensiven Niederschlags gerade nicht die Seehöhe der Gebirgskämme erreicht. In diesem Fall kann ein Temperaturanstieg von 1 °C die Schneefallgrenze um bis zu 1000 m nach oben verschieben und dadurch die Abflussspitzen während des Niederschlagsereignis deutlich erhöhen. Als Beispiel für derartige Phänomene können die großen Alpentäler wie Salzach oder Inntal dienen.

Jedoch nicht nur die Wasserführung der Flüsse im Winter und Frühjahr wird durch die Schneefallgrenze beeinflusst. In hochalpinen Einzugsgebieten spielt sie auch im Sommer eine wichtige Rolle. Ein Beispiel hierfür sind die Hochwasserereignisse im Mai 1999 (siehe Abb. 3) und im August 2005. Diese beiden Ereignisse brachten fast idente Niederschlagssummen, jedoch befand sich im Mai 1999 die Schneefallgrenze bei etwa 2100 m Seehöhe, im August 2005 hingegen um die 3000 m und dies führte speziell in der Schweiz, Vorarlberg und Tirol zu deutlich höheren Abflussspitzen und Hochwasserschäden.

Die Schneefallgrenze im Sommer spielt nur in Seehöhen über 2000 m eine Rolle. Diese Gebiete Österreichs sind in Abbildung 2 dunkelblau eingefärbt. 2005 waren von diesem Phänomen vor allem der Lech und die Bregenzer Ache mit ihren Zubringern betroffen.



BOKU-Met



WWF for a living planet

## Regionen in Österreich, in denen der Anstieg der Schneefallgrenze relevant ist

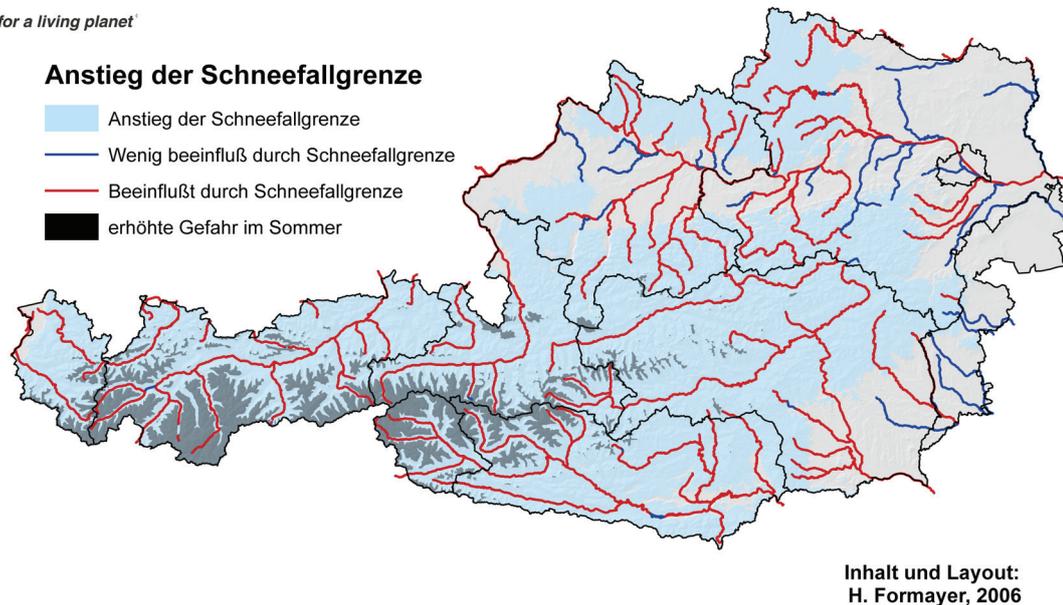


Abb. 2: Regionen, die durch den Anstieg der Schneefallgrenze voraussichtlich am stärksten betroffen sein werden. Die hellblauen Regionen im Winter und Frühjahr, die dunkelblauen Regionen im Sommer.

### 2.2. Veränderungen großflächiger Hochwasserereignisse (Vb-Wetterlagen).

Großflächige Hochwasserereignisse in Österreich sind häufig mit sogenannten Vb-Wetterlagen verbunden. Bei Vb und Vb-ähnlichen Wetterlagen wird durch einen Kaltluftvorstoß in den Golf von Genua eine Tiefdruckentwicklung ausgelöst, wobei der Kern dieses Tiefdruckgebietes mit der Höhenströmung über die nördliche Adria, Slowenien und Ungarn um die Alpen herum nach Polen geführt wird. Bei Vb-ähnlichen Lagen bildet sich ein abgeschlossenes Höhentief über Norditalien und dem Alpenraum, in der Meteorologie auch Kaltlufttropfen genannt. Vb Wetterlagen beregnen im Laufe von 2 bis 3 Tagen ganz Österreich wobei die größten Niederschlagsintensitäten zuerst im Süden und Osten auftreten und gegen Schluss auf der Alpennordseite. Je nach genauer Lage des Kerns des Tiefs liegen die Niederschlagsmaxima an der Alpennordseite weiter westlich bzw. weiter östlich. So war etwa das Niederschlagszentrum beim Hochwasser 2002 in Österreich in Ober- und Niederösterreich, bei den Ereignissen 1999 und 2005 hingegen in Tirol und Vorarlberg (siehe Abb. 3.) Das Oderhochwasser 1997 wurde ebenfalls durch ein Vb Wetterlage ausgelöst, jedoch ging damals der Tiefdruckkern so weit östlich an Österreich vorbei, dass bei uns keine größeren Schäden aufgetreten sind. In Abbildung 4 sind die am meisten durch Vb-Lagen betroffenen Regionen Österreichs zusammengefasst.

Die Aussagen hinsichtlich Vb-Lagen in Klimaänderungsszenarien sind nicht ganz eindeutig. Generell zeigen die Szenarien eine Abnahme der Tiefdruckentwicklung im Mittelmeerraum, was auch zu der starken Niederschlagsabnahme in dieser Region führt. Damit sollte auch die Häufigkeit der Vb-Lagen zurückgehen. Da jedoch bei der Entstehung der Genuatiefs auch die Alpen eine wichtige Rolle spielen und diese in den GCMs nur sehr grob enthalten sind, darf

man diese Aussage nicht überinterpretieren. Sehr wahrscheinlich ist aber eine Intensivierung der Niederschläge bei Vb Wetterlagen, da sich das Mittelmeer deutlich erwärmen wird und dadurch die Verdunstung dort ansteigen wird.

Ein plausibles Zukunftsszenarium bezüglich Vb- und Vb-ähnlichen Lagen ist eine Abnahme der Häufigkeit, derzeit rund 10-15 Ereignisse pro Jahr, aber eine Zunahme der Niederschlagsintensitäten bei diesen Wetterlagen. Damit würde sich aber voraussichtlich das Hochwasserrisiko durch diese Wetterlagen erhöhen. Besonders niederschlagsintensiv sind Vb Lagen im Sommer, da hier feuchtwarme Luftmassen mit enormen Wassermengen zu den Alpen transportiert werden. Die Ereignisse des letzten Jahrzehntes lassen eine Zunahme dieser Vb- Lagen im Sommer befürchten. Sollte sich der Trend des letzten Jahrzehntes mit dem häufigeren Auftreten im Sommer weiter fortsetzen, würde dies das Risiko noch weiter ansteigen lassen.

Prominente Beispiele von Flüssen, die in den letzten Jahren durch derartige Wetterlagen Hochwasser führten sind der Kamp und die Donau (2002) oder der Lech und der Inn (2005).

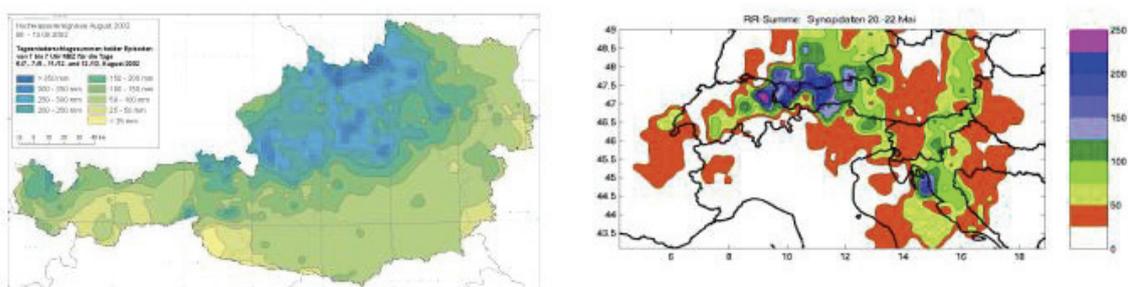


Abb. 3: Niederschlagsverteilung beim Augusthochwasser 2002 (links) und beim Maihochwasser 1999 (rechts). Das Niederschlagsereignis Mai 1999 war fast ident mit dem Ereignis im August 2005. Datenquelle Habersack et al., 2003 und Formayer et al. 2006.



BOKU-Met



for a living planet®

## Regionen die durch Vb - ähnliche Lagen besonders betroffen sind

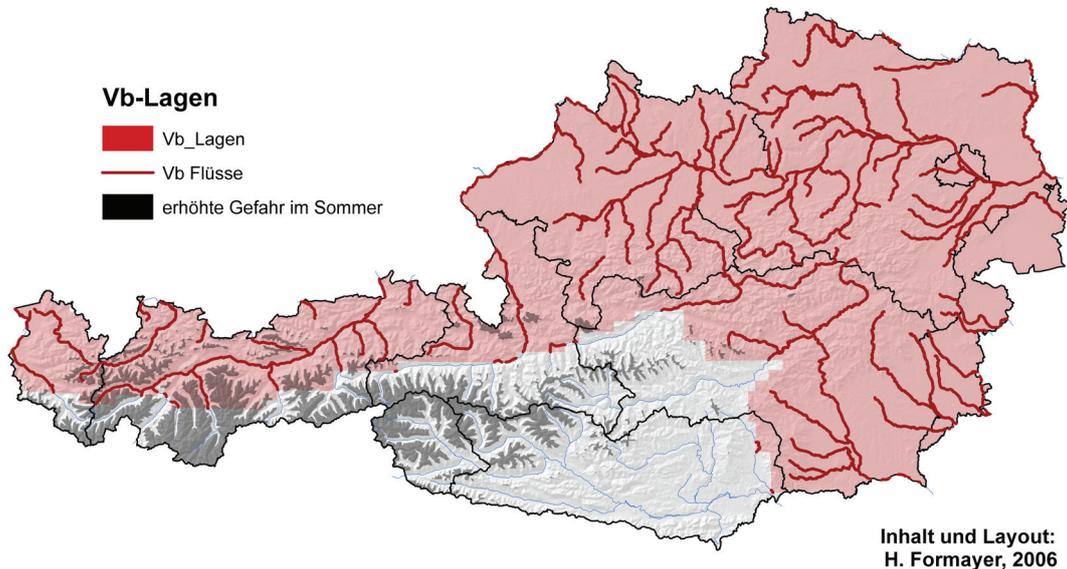


Abb. 4: Regionen, die durch Vb und Vb-ähnliche Wetterlagen besonders betroffen sind.

### 2.4 Kleinräumige Hochwasserereignisse

Hochwasserereignisse in kleinen Einzugsgebieten können nicht nur durch die Niederschlagsfelder großräumiger Tiefdruckgebiete ausgelöst werden, sondern auch durch kurze aber intensive Starkniederschläge aus Gewitter. Die Häufigkeit des Auftretens von Gewittern ist in Österreich sehr stark von den Alpen geprägt. Die größte Wahrscheinlichkeit für Gewitter ist im Alpenvorland gegeben. Die Bergketten des Alpenvorlandes, wie etwa das Steirische Randgebirge, dienen hierbei als „Heizflächen“, an denen im Sommer bei Sonneneinstrahlung die hangnahe Luft stärker erwärmt als die freie Atmosphäre und dadurch aufsteigt. Bei labiler Luftschichtung bilden sich hier die typischen Wärmegewitter aus. Die Flächen, die durch derartige Gewitter beregnet werden sind in der Größenordnung von 10 bis 100 km<sup>2</sup>. Daher sind hier besonders Einzugsgebiete von dieser Größe betroffen, bzw. die Oberläufe von größeren Einzugsgebieten. Als Beispiele können hier die Flüsse der Westteiermark, wie etwa die Kainach mit Zubringer, aber auch die Rax – Schneebergregion bis hinein in den Wienerwald wie etwa die Piesting genannt werden.

In Abbildung 5 sind die Regionen mit besonders hoher Gewittertätigkeit in Österreich gekennzeichnet. Als Basis für diese Karte diente die 10 jährige Blitzklimatologie des österreichischen Blitzordnungssystems ALDIS (<http://www.aldis.at>). Mit diesem Messsystem kann jeder Blitz räumlich auf 1 km<sup>2</sup> genau zugeordnet werden. Die in Abb. 5 gekennzeichneten Regionen weisen eine Blitzdichte von 4 und mehr Blitzen pro km<sup>2</sup> und Jahr auf.

Aus den Klimaänderungsszenarien können keine direkten Informationen über die Entwicklung der Gewittertätigkeit gewonnen werden. Aus physikalischen Überlegungen scheint jedoch eine Zunahme zumindest der Niederschlagsintensität bei Gewittern sehr wahrscheinlich. Die Auswertungen von Frei et al., 2005 der PRUDENCE Szenarien scheinen diese Annahmen

auch zu bestätigen. Eine derartige Zunahme würde sich natürlich in jenen Regionen am stärksten auswirken, an denen bereits heute besonders viele Gewitter vorkommen.

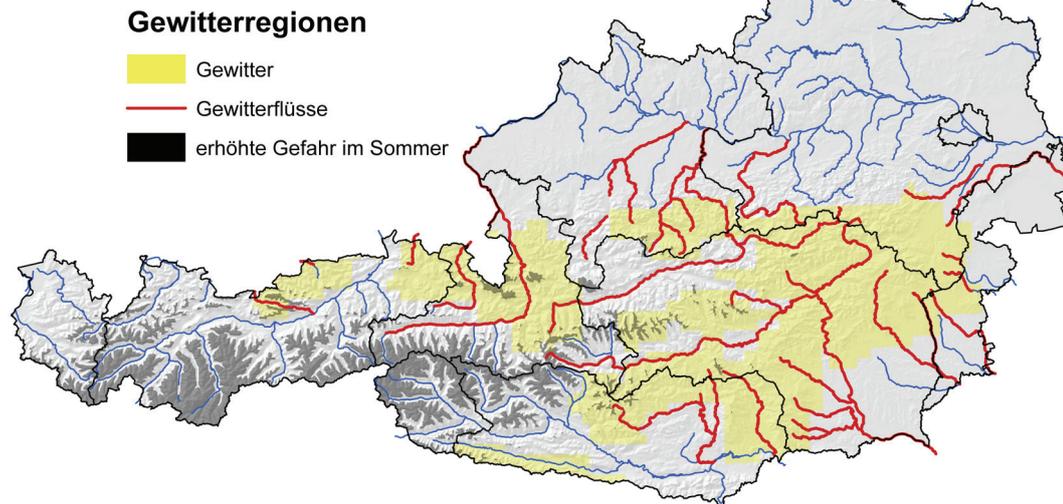


BOKU-Met



WWF for a living planet®

## Besonders gewitterträchtige Regionen in Österreich



Inhalt und Layout:  
H. Formayer, 2006

Abb. 5: Besonders gewitterträchtige Regionen in Österreich. Basis 10 jährige Klimatologie der ALDIS – Blitzordnung.

### 3. Ökosystemare Veränderungen / Rückkoppelungsprozesse

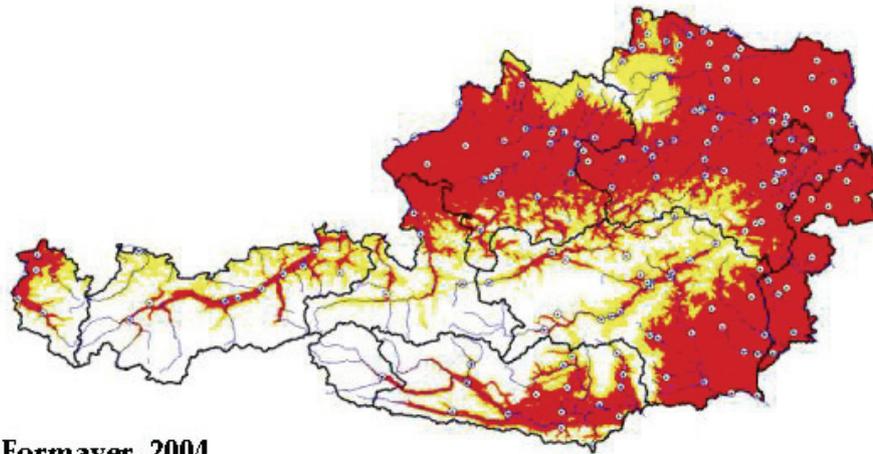
#### 3.1 Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder und die Folgen für Hochwasserereignisse.

Der Klimawandel wird nicht nur die Niederschlagsverhältnisse direkt beeinflussen, sondern es könnte sich auch das Abflussverhalten von Einzugsgebieten verändern, da die Vegetation auf die geänderten Klimabedingungen reagieren wird. Die Vegetation und hier hauptsächlich der Wald tragen in zweierlei Hinsicht zum Hochwasserschutz bei. Einerseits wird durch die Interzeption (Benetzung der Blätter und Stämme) der Niederschlag reduziert und die Einsickerungsrate in den Boden erhöht, andererseits schützt die Vegetation den Boden vor Erosion durch Wind und Niederschlag und erhöht damit das Rückhaltevermögen des Einzugsgebietes.

Besonders verletzlich durch die Klimaänderung sind Wälder, da durch die lange Lebenszeit der Bäume eine Anpassung nur sehr langsam vor sich gehen kann. Am stärksten betroffen hierbei ist die Fichte. Aufgrund der ökonomischen Bedeutung der Fichte wurde diese in den letzten hundert Jahren sehr oft an Standorten gepflanzt, an denen die Klimabedingungen für sie nicht optimal sind. Als Faustformel kann man davon ausgehen, dass an Standorten mit Jahresmitteltemperaturen von mehr als 7 °C und Jahresniederschlagssummen unter 800 mm in besonders trockenen Jahren mit Problemen durch Wassermangel und indirekt durch Borkenkäfer zu rechnen ist. In Abbildung 6 und 7 sind jene Regionen in Österreich ausgewiesen,

an denen dieses Kriterium in der Klimanormalperiode 1961-1990 erreicht wurde (rote Flächen) und zusätzlich die Ausweitung dieser Gebiete durch den Klimawandel innerhalb der nächsten 30 Jahre (gelbe Flächen). In Abbildung 7 erkennt man auch deutlich, dass im Alpenraum durch den Klimawandel nicht mehr nur die Talregionen betroffen sein werden, sondern auch die Hanglagen. Sollte es in Extremjahren zu einem großflächigen Absterben von Fichtenbeständen in Hanglagen kommen, würde dies natürlich auch zu erhöhtem Bodenabtrag durch Erosion führen und damit nachhaltig die Wasserspeicherkapazität des Gebietes reduziert werden.

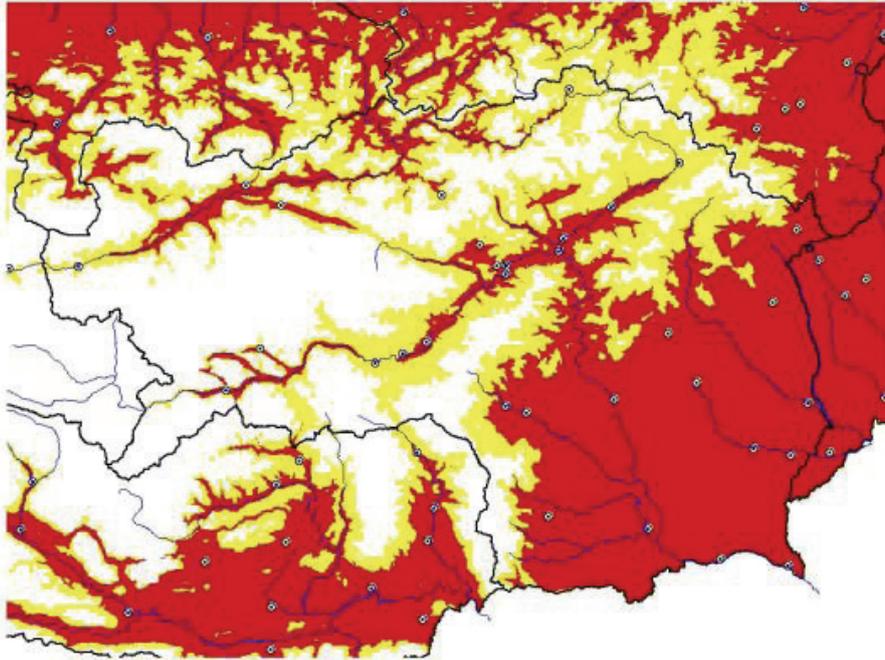
### **Bedrohte Fichtenstandorte 1961-1990 und Szenario 2020-2050 (gelb)**



**Formayer, 2004**

Abb. 6: Durch Temperaturanstieg bedrohte Fichtenstandorte. Die gelben Flächen bezeichnen jene Gebiete, die durch den Klimawandel innerhalb der nächsten Jahrzehnte zusätzlich betroffen sein könnten.

## Bedrohte Fichtenstandorte 1961-1990 und Szenario 2020-2050 (gelb)



Formayer, 2004

Abb.7: Wie Abb. 6 jedoch vergrößert auf die Steiermark.

Nicht nur die Tieflandfichten sind durch den Klimawandel gefährdet. In all jenen Regionen, wo der Jahresniederschlag ähnlich hoch ist, wie die potenzielle Verdunstung, dazu zählen neben dem Flachland im Süden und Osten auch die inneralpinen Trockentäler, ist durch den Anstieg der Verdunstung und der Verschiebung der Niederschläge in den Winter mit Problemen durch Wasserstress zu rechnen.

Aber selbst in einigen Regionen mit anscheinend ausreichenden Niederschlägen sind Probleme bei der Vegetation nicht auszuschließen. Dies hängt mit dem Wasserspeichervermögen verschiedener Böden zusammen. An sehr steilen Hängen zum Beispiel fließt ein Grossteil des Regens oberflächlich ab und an sehr seichten Böden ist die Wasserspeicherfähigkeit allein durch das geringe Volumen reduziert. Besonders gefährdet sind hier Standorte auf Kalk, da diese oft nur eine geringe Bodenmächtigkeit aufweisen und das Grundgestein wasserdurchlässig ist. Dadurch könnte es klimabedingt in einigen Gebieten der nördlichen und südlichen Kalkalpen zur Verkarstung kommen, was das Abflussverhalten dieser Regionen deutlich verschlechtern würde.

### 4. Zusammenfassung / Hochwasserkarten

Faktisch sind alle österreichischen Flüsse durch den einen oder anderen klimasensitiven Prozess betroffen. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Flüsse die von allen Prozessen betroffen sind rot eingezeichnet. Flüsse die durch 2 Prozesse betroffen sind – meist die Überlagerung der Vb-Region mit der Schneegrenzenregion – sind braun eingezeichnet und Flüsse die nur von einem Prozess beeinflusst werden sind gelb eingezeichnet. In Abbil-

dung 9 sind in gleicher Weise die betroffenen Regionen ausgewiesen. In der Tabelle im Anhang sind zusätzlich alle eingezeichneten Flüsse aufgelistet und die Beeinflussung durch die verschiedenen Prozesse angeführt.

Eine Erhöhung der Niederschlagsintensität bei Gewitter würde in erster Linie kleine Einzugsgebiete betreffen. Dies sind die Oberläufe der in Abb. 8 eingezeichneten Flüsse und die nicht eingezeichneten kleinen Zubringer. Auch die Verschiebung der Schneegrenze betrifft eher kleine Einzugsgebiete und im Sommer nur die hochalpinen Regionen. Nur eine Überlagerung der Schneeschmelze mit intensiven Niederschlägen wirkt sich auch auf große Einzugsgebiete aus. Veränderungen der Vb-Wetterlagen hingegen wirken sich großflächig aus und selbst an der Donau kann es dabei zu Hochwasser kommen.



BOKU-Met

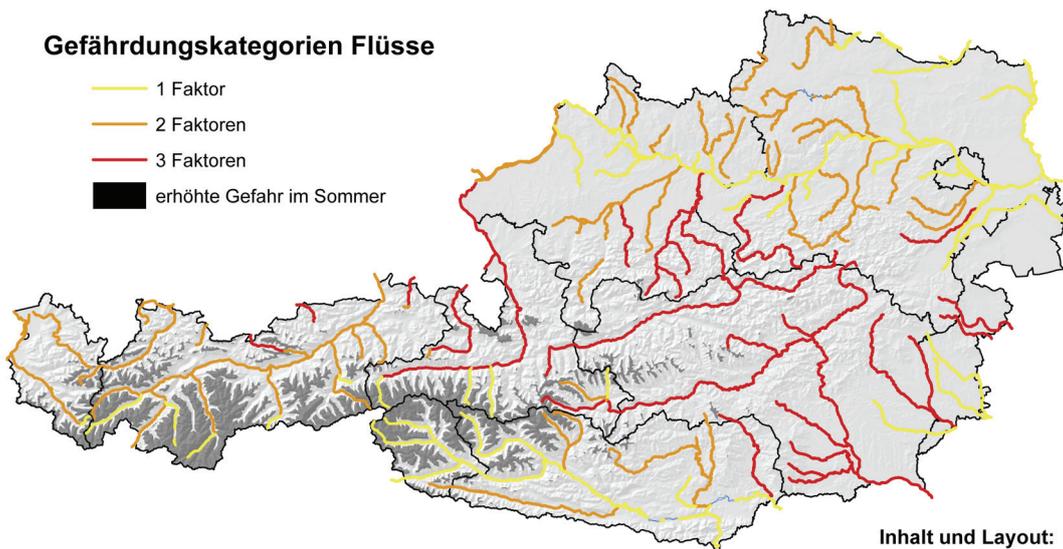
## Szenarien flussbezogener Auswirkungen des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserereignisse in Österreich



WWF for a living planet®

### Gefährdungskategorien Flüsse

- 1 Faktor
- 2 Faktoren
- 3 Faktoren
- erhöhte Gefahr im Sommer



Inhalt und Layout:  
H. Formayer, 2006

Abb. 8: Durch von Klimawandel betroffene Flüsse. Rot sind jene Flüsse, die von allen Prozessen betroffen sind, Braun von jeweils zwei Prozessen und gelb von zumindest einem Prozess.

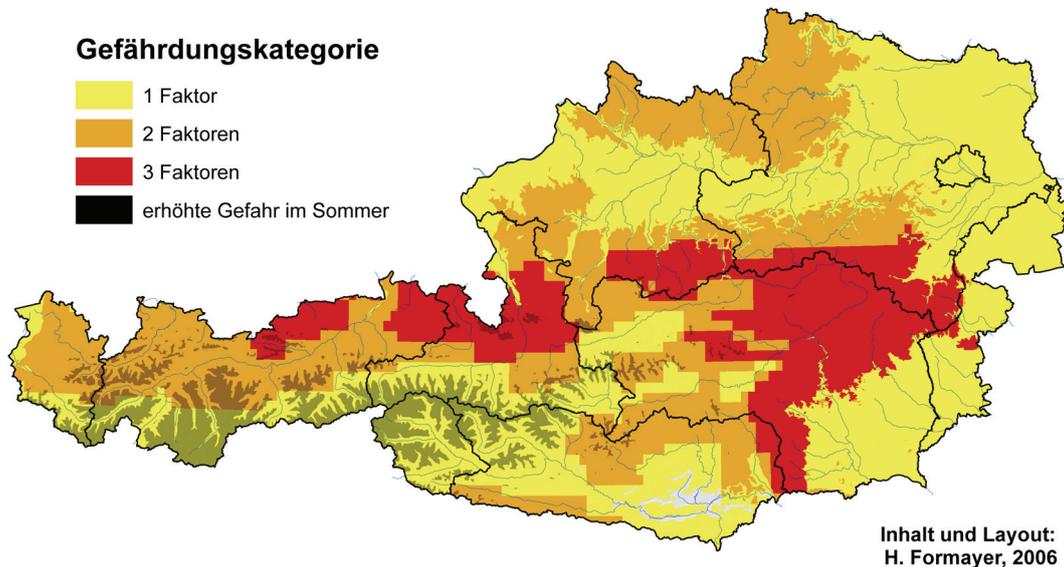


BOKU-Met

## Szenarien regionaler Auswirkungen des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserereignisse in Österreich



for a living planet®



Inhalt und Layout:  
H. Formayer, 2006

Abb. 9: Durch von Klimawandel betroffene Regionen. Rot sind jene Regionen, die von allen Prozessen betroffen sind, Braun von jeweils zwei Prozessen und gelb von zumindest einem Prozess.

Diese Arbeit stellt die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwasserrisiko in Österreich zusammen. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Modellierung des Niederschlages mit Klimamodellen kann dies nur qualitativ erfolgen und es ist nicht möglich für einen speziellen Fluss genau anzugeben, wie sich die Jährlichkeiten von Hochwasser verschieben werden.

Um diesem Ziele näher zu kommen, sind noch vielfältige Forschungsaktivitäten notwendig. Neben der Weiterentwicklung von globalen und regionalen Klimamodellen müssen vor allem die Interaktionen und Rückkoppelungen des Systems Niederschlag-Vegetation-Boden im alpinen Bereich noch besser verstanden werden.

Ob und wie sich letztlich das Gesamtrisiko für Hochwasser in Österreich durch den Klimawandel verändern wird, kann derzeit noch nicht schlüssig beantwortet werden. Generell würde eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter zu einer gleichmäßigeren Niederschlagsverteilung über das Jahr führen. Ob diese Verschiebung die in dieser Arbeit aufgezeigten potenziellen Risikoquellen kompensieren kann ist noch offen. Auf jeden Fall muss mit einer Verschiebung des saisonalen Risikos gerechnet werden und auch regionale Verschiebungen sind möglich.

## 5. Literatur

Christensen, J.H., T.R. Carter, and F. Giorgi, 2002: PRUDENCE Employs New Methods to Assess European Climate Change, EOS, AGU, 83, 147.

Formayer, H. 2006: Analyse der modellierten Niederschläge in den 1999 reclip-Jahresläufen: Reclio:more Workshop Wien 2006.

Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P.L., 2005: Future Change of Precipitation in Europe: An Intercomparison of Scenarios from Regional Climate Models. Eingereicht bei J. Geophys. Res.

Habersack, H., Moser, A. (2003): Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002, Plattform Hochwasser. 1, 184 S; ZENAR, Hrsg.: ZENAR, Universität für Bodenkultur Wien; BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

RECLIP 2005: <http://systemsresearch.arcs.ac.at/projects/climate/>

Seibert, P., Frank, A., Formayer, H., 2006: Synoptic and regional patterns of heavy precipitation in Austria. Theor. Appl. Climatol. 000, 1–15 (2006)

Anhang: Tabelle der in den Graphiken dargestellten Flüsse und die jeweiligen Einflussfaktoren (+ bedeutet betroffen, o bedeutet nicht betroffen).

Flüsse	Schnee	Vb	Gewitter
Ager	+	+	o
Aist	o	+	o
Alm	+	+	+
Aschach	o	+	o
Aschach Arm	o	+	o
Bregenzer Ach/Bregenzerach	+	+	o
Brixentaler Ache	+	+	o
Deutsche Thaya	+	+	o
Donau	+	+	o
Drau	+	o	o
Enns	+	+	+
Erlauf	+	+	o
Fagge	+	+	o
Feistritz/Weisse Feistritz	+	+	+
Feldaist	+	+	o
Ferlacher Stausee	+	o	o
Fischa	o	+	o
Fischbach	+	+	o
Fuscher Ache	+	o	o
Gail	+	o	+
Gerlosbach	+	+	o
Glan	+	o	o
Goelsen	o	+	o
Goertschitz	+	o	+
Gradner Bach	o	+	+
Grosse Krems	+	+	o
Grosse Muehl	+	+	o
Grosse Rodl	+	+	o
Grosse Tulln/Laabebach	o	+	o
Grosse Ysper	+	+	o
Grosser Kamp	+	+	o
Guens	o	+	o
Gurk	+	o	o
Gusen	o	+	o
Hoerfeldbach/Steierbach	+	o	+
Huettwinklache	+	o	o
III	+	+	o

Flüsse	Schnee	Vb	Gewitter
Inn	+	+	o
Innbach	o	+	o
Isar/Lafatscher Bach	+	+	+
Isel	+	o	o
Kainach	+	+	+
Kaisertalbach	+	o	o
Kamp	+	+	o
Katzbach	+	+	+
Kleine Erlauf	+	+	o
Kleine Krems	+	+	o
Kleine Muehl	+	+	o
Kleine Naarn	+	+	o
Kleine Ysper/Angerbach	+	+	o
Kleiner Kamp	+	+	o
Kohlenbach	+	+	+
Krems	+	+	o
Krimmler Ache	+	o	o
Krumme Steyrling/Rumpelmayrbach	+	+	+
Kruppenwasser	o	+	o
Lafnitz	+	+	+
Lahnbach	+	+	+
Lainsitz	+	+	o
Laming	+	+	+
Lantschenfeldbach	+	o	+
Lassing/Lassingbach/Tuernitz	+	+	o
Lavant	+	o	+
Lech	+	+	o
Leiterbach	+	o	o
Leitha	o	+	+
Lesachbach	+	o	o
Lieser	+	o	+
Liesing	+	+	+
Loisach	+	+	o
Maehrische Thaya	+	+	o
Malta	+	o	+
March	o	+	o
Melk	o	+	o
Metnitz	+	o	+
Moell	+	o	o
Muerz	+	+	+

Flüsse	Schnee	Vb	Gewitter
Mur	+	+	o
Myrabach	+	+	+
Naarn	o	+	o
Oetztaler Ache	+	+	o
Ottensteiner Stausee	+	+	o
Perschling	o	+	o
Perschling-Hochwasserkanal	o	+	o
Pielach	+	+	o
Piesting (Kalter Gang)	+	+	+
Pinka	o	+	+
Pram	o	+	o
Pulkau	o	+	o
Raab	o	+	o
Rabnitz	o	+	o
Rauriser Ache	+	o	o
Rettenbach/Lassnitz	+	+	o
Rhein	+	+	o
Rofenache	+	o	o
Rosanna	+	+	o
Saalach	+	+	+
Sallabach	+	+	+
Salza	+	+	+
Salzach	+	+	o
Sanna	o	+	o
Schmida	o	+	o
Schoenebenbach	+	+	+
Schwarzach	+	o	o
Schwarze Aist	+	+	o
Schwarze Sulm	+	+	+
Schwechat/Aubach	+	+	o
Seeache	+	+	+
Seebach	+	o	o
Sill	+	+	o
Spratzbach	+	+	+
Spullerbach	+	+	o
Stangenbach	o	o	+
Steyr	+	+	+
Stierriegelbach	+	+	+
Stille Muerz	o	+	o
Strem	o	+	+

Flüsse	Schnee	Vb	Gewitter
Sulm	+	+	o
Taurach	+	o	+
Teichl/Teichlbach	+	+	+
Thaya	+	+	o
Thurnberger Stausee	o	+	o
Tiroler Ache	+	+	+
Traisen	o	+	o
Trattnach	o	+	o
Traun/Koppentraun	+	+	o
Traunerbach	+	o	o
Triesting	+	+	o
Trisanna	+	o	o
Umbalbach	+	o	o
Url/Kohlenbach	o	+	o
Vellach	+	o	o
Venter Ache	+	o	o
Verbellabach	+	o	o
Vermuntbach	+	o	o
Vils	+	+	o
Voeckla	+	+	o
Voelkermarkter Stausee	+	o	o
Vomper Bach	+	+	o
Walchen	+	+	+
Waldaist	+	+	o
Weisse Sulm	+	+	+
Wien	o	+	o
Wildbach	+	+	+
Wildschoenauer Ache	+	+	o
Windauer Ache	+	+	o
Winklbach	+	o	+
Ybbs	+	+	+
Ysper	o	o	o
Zaya	o	+	o
Ziller	+	+	o
Zoebernbach	o	+	+
Zwettl/Zechbach	+	+	o

## Bisher erschienen in der Reihe BOKU-Met Report:

### Berichte von 2003 – 2008

- 1 Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., Haas, P., Gerersdorfer, T., Kromp-Kolb, H. (2009): **Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees** (Endbericht im Auftrag der Burgenländischen Landesregierung vom 15. Juli 2005).
- 2 Frank, A., Seibert, P. (2009): **Diagnose von Extremereignissen aus großräumigen meteorologischen Feldern** (Endbericht StartClim.4, November 2003).
- 3 Formayer, H., Matulla, C., Haas, P., Groll, N. (2009): **Statistische Downscalingverfahren zur Ableitung von Extremereignissen in Österreich aus GCM-Feldern** (Endbericht StartClim.5, November 2003).
- 4 Schwarzl, I., Haas, W. (2009): **Kommunikation an der Schnittstelle Wissenschaft und Bildung** (Endbericht StartClim.11, November 2003).
- 5 Formayer, H., Haas, P., Matulla, C., Frank, A., Seibert, P. (2009): **Untersuchungen regionaler Klimaänderungsszenarien hinsichtlich Hitze- und Trockenperioden in Österreich** (Endbericht StartClim2004.B, November 2003).
- 6 Schwarzl, I., Lang, E. (2009): **"Hängen Hitze und Leistungsfähigkeit zusammen?"** Ein Projekt an der Schnittstelle Wissenschaft und Bildung (Endbericht StartClim2004.G, Jänner 2005).
- 7 Formayer, H., Kromp-Kolb, H. (2009): **Hochwasser und Klimawandel**. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich (Endbericht WWF 2006).

Alle Berichte sind unter <http://www.boku.ac.at/met/report/> online verfügbar.