



ZAMG

*Zentralanstalt für
Meteorologie und
Geodynamik*



lebensministerium.at

MACHBARKEITSSTUDIE

VB-ARTIGE WETTERLAGEN ALS URSACHE

EXZESSIVER NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE IM ALPENRAUM

2011



Titelbild:

Oberlauf der Enns bei Hieflau am 28. Juni 2009

© M.Hofstätter

MACHBARKEITSSTUDIE

„Vb-artige Wetterlagen als Ursache exzessiver Niederschlagsereignisse im Alpenraum“

Abschlussbericht
der Fachabteilung Klimavariabilität / Modellierung
in der Abteilung Klimaforschung
vom 30. Juni 2011

Autor: Mag. Michael Hofstätter

Projektleitung: Dr. Reinhard Böhm

Im Auftrag des: Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII – Wasser
1012 Wien, Stubenring 1

Gefördert durch: BMLFUW im Rahmen des Forschungsprogramm PFEIL10
„Programm für Forschung und Entwicklung Im
Lebensministerium 2006-2010“
Abteilung II/1, Forschung und Entwicklung



VORWORT

Nach einigen Kontakten bei Veranstaltungen, die den Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft zum Thema hatten, kam es zu zwei Auftragserteilungen für Studien ganz unterschiedlicher Art durch die Sektion Wasser des Lebensministeriums an die ZAMG-Klimaforschung.

Die erste dieser Studien hatte die Aufgabe, den existierenden Wissensstand zusammen zu tragen, und daraus Empfehlungen abzuleiten, welcher Handlungsbedarf besteht, um auf zehn unterschiedlichen Feldern von Hochwasser, Niedrigwasser über Wassergüte bis hin zur Nutzung der Wasserkraft für Energiezwecke auf künftige eventuelle Herausforderungen reagieren zu können. Diese anwendungsorientierte Studie wurde in Zusammenarbeit mit zwei Instituten der TU Wien durchgeführt. Sie konnte am 9.6.2011 mit der öffentlichen Vorstellung des Studienberichtes wie wir glauben erfolgreich abgeschlossen werden.

Die zweite Studie, deren Endbericht wir hier vorlegen, war am anderen Ende des Bereichs wissenschaftlichen Arbeitens angesiedelt, auf dem der Forschung auf einem Gebiet, auf dem noch größere Unsicherheiten bestehen, auf dem vom Thema her und vor allem methodisch Neuland betreten werden muss. Es geht um ein altbekanntes Thema, für dessen wissenschaftlich korrekte Aufarbeitung jedoch erst heute die notwendigen Voraussetzungen gegeben sind oder in naher Zukunft gegeben sein werden: Die Vb-Tiefs, oder – etwas allgemeiner formuliert, um Strömungslagen, die zu starker Feuchteadvektion aus dem Adria-Mittelmeerraum führen, die sich in den Staugebieten der Ränder der Ostalpen und des Erzgebirges in extremen, länger dauernden und damit hochwasserträchtigen Niederschlagsereignissen entladen können.

Zwar wurde die Existenz und Auswirkung einer derartigen Strömungslage bereits von van Beber zu Ende des 19. Jahrhunderts formuliert, und sie war seither fester Bestandteil des synoptischen Basiswissens der österreichisch, süddeutschen, bis polnischen Meteorologie. Eine saubere klimatologische Bearbeitung war jedoch mit den konventionellen Mitteln und den Datensätzen früherer Zeit kaum möglich. Da in der Zwischenzeit auch die Frage der künftigen Klimaentwicklung und ihrer Auswirkungen an Bedeutung gewonnen hat, haben das sicher auch Einzelfragestellungen wie die dieser Studie.

Wie bei vielen anderen regionalen Fragestellungen im Zusammenhang mit dem künftigen Klima befindet sich die Wissenschaft im Gleichschritt mit der raschen Entwicklung ihres wichtigsten Hilfsmittels, der Computertechnologie gerade jetzt immer mehr in der Lage, Fragestellungen anzugehen, die bisher nicht adäquat und seriös behandelbar waren. Wir haben daher die uns vom Lebensministerium angebotene ansonsten seltene Chance mit Überzeugung ergriffen, in einer Machbarkeitsstudie zu untersuchen, ob und auf welche Art heute oder in naher Zukunft hier neue Ergebnisse möglich sind. Das Resultat unserer Studie hat in zwei Forschungsvorschläge gemündet, von denen einer bereits heute möglich ist, der andere in absehbarer Zukunft gangbar sein wird.

Wir hoffen, dass unsere Ergebnisse hier so überzeugend dargestellt sind, dass die beschriebene neue Vb-Forschung tatsächlich angegangen werden kann.

Kurzfassung aus dem Projektantrag

Das vorliegende Projekt wird als Machbarkeitsstudie durchgeführt. Diese hat zum Inhalt sämtliche Grundlagen zu erarbeiten, die zur Einreichung eines vollwertigen wissenschaftlichen Folgeprojektes mit internationaler und/oder nationaler Beteiligung, notwendig sind. Die Erkenntnisse dieser Studie resultieren in der Formulierung eines Antrags für ein wissenschaftlich vollwertiges Folgeprojekt, welches im Anschluss in Zusammenarbeit mit nationalen und/oder internationalen Kooperationspartnern eingereicht und durchgeführt werden soll. Die gesammelten Grundlagen münden - in Verbindung mit der ausführlichen Literaturrecherche – in eine detaillierte Beschreibung des vorhandenen Wissensstands, beschreiben gelöste und ungelöste Probleme dieser Thematik und zeigen offenes Forschungspotential auf. Auch sollen mögliche wissenschaftlich/methodische Ansätze erarbeitet werden, die zur Lösung der relevanten, offenen Fragestellungen führen können.

Schlagwörter: Starkniederschlag, Klimawandel, Zugbahn „Vb“, Hochwasserrisiko

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	4
Kurzfassung aus dem Projektantrag	5
Inhaltsverzeichnis	6
1 EINLEITUNG	9
1.1 Zielsetzung	9
1.2 Systemüberblick Machbarkeitsstudie.....	10
2 EXECUTIVE SUMMARY	11
2.1 Überblick	11
2.2 Erkenntnisse	12
2.3 Empfehlungen	13
3 FACHLICHE GRUNDLAGEN	16
3.1 Begriffsdefinition.....	16
3.2 Besonderheit der „Vb-Zugbahn“	18
3.3 Räumliche Abgrenzung	23
3.4 Relevanz der Vb-Fragestellung	24
3.5 Warum wird dieses Thema jetzt aufgegriffen.....	25
4 STAND DES WISSENS	28
4.1 Thematische Aufarbeitung des Wissenstandes - Juni 2011.....	28
4.1.1 Arbeiten mit direktem Bezug zur Vb-Zugbahn	28
4.1.2 Ereignisanalysen in Verbindung mit Vb-Zugbahn	31
4.1.3 Globale Klimamodellsimulationen und Zirkulation.....	33
4.1.4 Regionale Klimamodellsimulationen und Niederschlag.....	36
4.1.5 Zirkulationsmuster, Wetterlagentypen und Niederschlag	40
4.1.6 Storm-Tracking Analysen im Bereich der Vb-Zugbahn	45
4.1.7 Ausgewählte, aktuelle Arbeiten zur Zirkulation über Europa (GCMs).....	46
4.1.8 Wetterlagenklassifikationen und Starkniederschläge im Alpenraum	47
4.2 Offene Studien mit Relevanz für die Vb-Fragestellung	50
5 SWOT ANALYSE	52
5.1 Forschungsbedarf	52
5.2 Voraussetzungen und Strategieentwicklung für eine Vb-Untersuchung.....	53
5.3 Analyse der zu Grunde liegenden Datensätze und Modelle	61
5.4 Arbeitshypothesen für eine Vb-Untersuchung	65

6	PROJEKTKONZEPTE zur Untersuchung der Fragestellung	68
	OPTION A - Globale Klimamodelle, statistisch/dynamisch	68
	OPTION B - Regionale Klimamodelle, dynamisch	72
	OPTION C - Voll gekoppelte regionale Klimamodelle, Erweiterung der Fragestellung und Untersuchungsgebiete	74
	OPTION D - Analyse der Vergangenheit, lange Datensätze	76
6.1	Warum sollte diese Fragestellung untersucht werden.....	77
6.2	Warum sollte diese Fragestellung jetzt untersucht werden	78
6.3	Welche Argumente sprechen für einen späteren Zeitpunkt	78
6.4	Möglichkeiten der Finanzierung.....	79
	Anhang A: Abkürzungen und Definitionen.....	81
	Anhang B: Dokumentation Netzwerkaufbau	82
	Anhang C: Meetings und Vortragstätigkeiten im Rahmen der Vb-Initiative.....	83
	Abbildungsverzeichnis	84
	Tabellenverzeichnis	86
	Literaturverzeichnis	87

1 EINLEITUNG

In Österreich kam es in der Vergangenheit immer wieder zu markanten Hochwässern. Beispiele für derartige, volkswirtschaftlich herausragende Ereignisse sind (1) „die Flut von 1899 (13.-15.9.) in Salzburg und Oberösterreich“, (2) „die größte Hochwasserkatastrophe des 20. Jhdt. im bayerisch-österreichischen Donaauraum“ am 7. und 8. Juli 1954, (3) „das Hochwasser von 1991“ bei dem viele Flüsse Nord- und Ostösterreichs Ende Juli und Anfang August über die Ufer traten und einen Gesamtschaden von 1 Milliarde Schilling verursachten, (4) „das Doppelhochwasser Anfang und Mitte Juli 1997“ bei dem in Nord- und Ostösterreich ungewöhnlich großen Regenmengen gemessen wurden, wodurch es neben Überschwemmungen auch zu zahlreichen Murenabgängen kam, (5) „die Hochwässer von März und August 2002“ welche den bisher größten Gesamtschaden von 2,9 Milliarden Euro in Österreich verursachten (Sinabell und Url, 2006).

Aus der synoptischen Beobachtung ist bekannt, dass die großen Niederschlagsereignisse immer wieder mit bestimmten Mustern der atmosphärischen Zirkulation in Zusammenhang stehen. Eine dieser markanten Zirkulationsstrukturen ist eine sogenannte Vb-Zugbahn, bei der ein Tiefdruckgebiet einem bestimmten Weg von Oberitalien in Richtung Polen zieht und dabei mit zum Teil massiven Niederschlagsmengen in Mitteleuropa und speziell im Alpenraum einher geht. So wurde das Hochwasserereignis im August 2002 in Mitteleuropa und auch weiten Teilen Österreichs von einem Tiefdruckgebiet auf der Vb-Zugbahn verursacht.

Aufgrund der Brisanz bestimmter Wetterlagen und Zugbahnen von Tiefdruckgebieten für extreme Niederschlagsereignisse, stellt sich die Frage nach einer möglichen Veränderung des Hochwasserrisikos durch Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation im Klimawandel. Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wird diese Fragestellung aufgegriffen.

1.1 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden alle Grundlagen erarbeitet, um die Problematik von Vb-artigen Wetterlagen und damit verbundenen Starkniederschlägen wissenschaftlich zu untersuchen. Es wird der Stand des Wissens dargelegt und im Anschluss unterschiedliche Projektoptionen samt inhaltlichen Umsetzungsvorschlägen abgeleitet. Der Fokus wurde so gewählt, dass es mit den empfohlenen Analysemethoden und Datensätzen gelingen soll, mögliche Veränderungen im Starkniederschlagsverhalten im sich verändernden Klima zu bestimmen.

Der zweite inhaltliche Schwerpunkt der Machbarkeitsstudie besteht im Aufbau eines Netzwerkes relevanter Stakeholder und potentieller Projektpartnern aus den notwendigen Fachbereichen. Dieser Kooperationsaufbau wird während der gesamten Laufzeit der Studie verfolgt und ausgebaut.

1.2 Systemüberblick Machbarkeitsstudie

Die Initialisierung der Machbarkeitsstudie erfolgte im Frühjahr 2010 von Seite des österreichischen Lebensministeriums – Abteilung für Wasserwirtschaft. Der schriftliche Auftrag zur Durchführung der Studie wurde im Oktober 2010 an die ZAMG Abteilung für Klimaforschung, vertreten durch den Projektleiter Dr. Reinhard Böhm, erteilt. Mit der Durchführung der Studie wurde Mag. Michael Hofstätter durch die Projektleitung beauftragt.

Die Machbarkeitsstudie wird vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft im Rahmen des Forschungsförderungsprogramms PFEIL10 finanziert und läuft vom 20.09.2010 – 16.09.2011. Die Durchführung wird durch das Lebensministerium – Abt. 7 vertreten durch Dipl. Ing. Reinhold Godina begleitet und laufend mit der Projektleitung abgestimmt. Die Studie ist durch die Approbation des vorliegenden Abschlussberichtes durch das Lebensministerium abgeschlossen.

Inhaltliche Ansprechpartner für die Machbarkeitsstudie:

ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Abteilung für Klimaforschung

Mag. Michael Hofstätter und Dr. Reinhard Böhm

m.hofstaetter@zamg.ac.at

+43/(0)1/ 36026-2218

reinhard.boehm@zamg.ac.at

+43/(0)1/ 36026-2203



Für den Auftraggeber:

BMLFUW Lebensministerium

Abteilung VII - Wasserhaushalt

DI. Reinhold Godina

reinhold.godina@lebensministerium.at

+43/(0)1 / 71100 - 6944



2 EXECUTIVE SUMMARY

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Eckpunkte und Erkenntnisse der vorliegenden Machbarkeitsstudie dargelegt und die favorisierte Projektvariante für eine zeitnahe Umsetzung vorgestellt.

2.1 Überblick

Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist es sämtliche Grundlagen zu erarbeiten, die zur Einreichung eines wissenschaftlichen Projektes zur Untersuchung der Fragestellung notwendig sind.

Fragestellung

Dabei soll die Fragestellung von Tiefdrucksystemen, die auf einer Vb-artigen Zugbahn ziehen, unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels untersucht werden.

Anlass

Solche Systeme führten in der Vergangenheit immer wieder zu starken Niederschlägen und verursachten einige der größten Hochwässer in Österreich.

Es besteht die Möglichkeit, dass es im Klimawandel zu einer Veränderung der atmosphärischen Rahmenbedingungen kommt (großräumige Zirkulation, Feuchtegehalt der Luft), die in weiterer Folge zu einem geänderten Starkniederschlagsverhalten und Hochwasserrisiko führen.

Begrifflichkeit

Die Vb-Zugbahn wurde von W.J. van Bebber 1891 als eine von 12 Zugbahnen über die Auswertung von Bodenluftdruckkarten klassifiziert. Tiefdruckgebiete auf Vb-Zugbahn verlagern sich von Oberitalien beginnend über den Alpenostrand hinweg zum Baltikum. Eine Zugbahn wie Vb unterscheidet sich damit per Definition von einer Wetterlage, welche den großräumigen Zustand der Atmosphäre zu einem Zeitpunkt über einem fixen Gebiet charakterisiert.

Relevanz von Vb-Ereignissen

Bei Vb-Ereignissen werden im Allgemeinen beträchtliche Mengen an feuchtwarmer Luft aus dem Mittelmeerraum gegen den Uhrzeigersinn an die Alpen geführt. Dadurch kann es hier zu massiven Niederschlägen kommen. Weitere charakteristische Besonderheiten sind der Stationaritätsaspekt sowie die mögliche Regeneration der Tiefdruckgebiete südlich der Alpen vor Eintritt des Niederschlages.

2.2 Erkenntnisse

Stand des Wissens Juni 2011

- ⇒ Es gibt so bis dato zwei Arbeiten, in denen gezielt Vb-Zugbahnen im Klimawandel untersucht werden. Keine dieser Arbeiten untersucht aber den dazugehörigen Niederschlag.
- ⇒ Es gibt einige Arbeiten bei denen Niederschläge auf Tagesbasis mit Wetterlagenklassifikationen im Zusammenhang betrachtet werden. Die Vb-Problematik wurde dabei jedoch nicht explizit untersucht sondern nur erwähnt.
- ⇒ Es gibt einige wenige Arbeiten in denen das Hochwasserrisiko in Europa mit Hilfe von Zirkulationsmustern untersucht wird. Fast alle dieser Studien arbeiten mit mittleren Monatsfeldern und analysieren darüber hinaus keine Zugbahnen.
- ⇒ Es gibt keine Arbeit in der die Vb-Problematik gesamtheitlich untersucht wird. (Zugbahnaspekt in Zusammenhang mit Niederschlag oder für Niederschlag optimierte Wetterlagenklassifikationen)

Forschungsbedarf und offene Fragen

Die immanente Bedeutung der Fragestellung - von Vb-artigen Zugbahnen und damit verbundenen Starkniederschlägen - ist auch in der Forschung spätestens seit dem Hochwasser im August 2002 hinlänglich bekannt. Es hat sich aber gezeigt dass, die Vb-Fragestellung bis dato nicht ausreichend untersucht wurde und/oder keine Rücksicht auf die Besonderheiten dieses Phänomens genommen wurde.

Viele Fragen sind offen, besonders wenn es um die Untersuchung der Wirkung (Niederschlag, Hochwasserrisiko) geht. Auch ist bis dato nicht bekannt, welche Intensitäten und Dauerstufen im Niederschlag durch Vb-artige Ereignissen verursacht werden (unbekannte Relevanz). Ebenso ist unbekannt mit welchen Veränderungen im Niederschlagsgeschehen in der Klimazukunft, durch Veränderungen der Zugbahnen oder Wetterlagen zu rechnen ist.

Worin bestehen die Schwierigkeiten

Um die Klimazukunft untersuchen zu können müssen Klimamodelle genutzt werden.

- ⇒ Bei Verwendung **globaler Klimamodelle** muss der Niederschlag mit statistischen Methoden auf regionaler Basis abgeleitet werden. Auch sind die Alpen nur unzureichend aufgelöst, die Vb-Zugbahn wird aber durch die Alpen beeinflusst. Andererseits sind Wetterlagenklassifikationen und Zugbahn-Prozeduren für die Auflösung von GCMs entwickelt und optimiert.
- ⇒ Bei Verwendung von **regionalen Klimamodellen** kann der Niederschlag direkt verwendet werden. Allerdings ist auch dieser Niederschlag immer noch mit deutlichen Fehlern behaftet. Methoden zur Zugbahnauswertung wurden nicht für die Auflösung regionaler Klimamodelle entwickelt und müssen dementsprechend adaptiert werden.

Auch ist die Auflösung der derzeit verfügbaren Modelle noch immer relativ grob (15-25km).

2.3 Empfehlungen

Es erscheint aufgrund der zum heutigen Zeitpunkt verfügbaren Methoden und Mittel sehr wichtig ist, sich in einer Untersuchung vorerst ausschließlich Starkniederschlagsereignisse zu fokussieren sowie das Untersuchungsgebiet auf den östlichen Alpenraum einzugrenzen. Nur so können zielgerichtete und fundierte Erkenntnisse zur zirkulationsgesteuerten Starkniederschlagsproblematik erarbeitet werden, die es ermöglichen spezifische Empfehlungen für Entscheidungsträger in den betroffenen Gebieten abzuleiten.

Wie kann die Fragestellung untersucht werden?

Um Zugbahnveränderungen zu untersuchen muss eine generelle Tracking-Analyse durchgeführt werden um sämtliche Zugbahnen zu charakterisieren und klassifizieren. (Zugbahnen-Katalog, Tagesbasis)

Um Aussagen über den damit verbundenen Niederschlag tätigen zu können muss ein flächendeckender Niederschlagsdatensatz auf Tagesbasis, angelehnt an den Zugbahnen-Katalog analysiert werden.

Die Klimazukunft kann nur mit Hilfe von regionalen oder globalen Klimamodellen untersucht werden. Beide Modelle haben spezifische Stärken und Schwächen für die Beantwortung der Vb-Starkniederschlagsproblematik. Für diese Fragestellung kann zum heutigen Zeitpunkt keine dieser beiden Modelltypen als eindeutig überlegen angesehen werden.

Wann und warum sollte die Fragestellung untersucht werden?

Für die Entwicklung von Anpassungsstrategien und die Abschätzung des Handlungsbedarfs durch betroffene Entscheidungsträger ist eine wissenschaftliche Untersuchung dieser Fragestellung unerlässlich. Die Häufung von starken Niederschlagsereignissen in den letzten Jahren und der voranschreitende Klimawandel drängen politische Entscheidungsträger immer stärker über notwendige- oder nicht-notwendige Maßnahmen zu entscheiden. Dazu sind rasch fachlich fundierte Grundlagen notwendig.

Die vorhandenen Methoden bzw. Mittel ermöglichen unter Nutzung des aufgebauten fachlichen Netzwerkes eine erstmalige Beantwortung vieler offener Fragen. Vor allem die Zugbahnaspekte im östlichen Alpenraum, deren beobachtete Veränderung und die Bestimmung der Relevanz von bestimmten Zugbahntypen für Starkniederschlagsereignisse kann ohne Einschränkungen jetzt untersucht werden.

In dieser ersten Stufe können wichtige Erkenntnisse gesammelt und die notwendigen Grundlagen für die Ausweitung der Fragestellung innerhalb eines nachfolgenden EU-Projektes geschaffen werden (nach Verfügbarkeit voll gekoppelter Regionalmodelle).

Empfohlene Umsetzungsvariante für eine zeitnahe Untersuchung:

„Globale Klimamodelle – statistisch/dynamischer Ansatz“ (Projekt A, siehe Seite 68)

Untersuchung der Veränderung der Zirkulation über Mitteleuropa im Klimawandel und der damit verbundenen Änderung von regionalen Starkniederschlägen auf Tagesbasis. Der Fokus liegt dabei besonders besonders auf den Vb-artigen Ereignissen.

Untersuchungsgebiet: Österreich, Süddeutschland und angrenzende Regionen

Untersuchungszeitraum: 1951-2006 sowie 2006-2060

Dauer: 2,5 Jahre (30 Monate Projektdauer, 56PM Arbeitszeit)

Deliverables:

1. *Zugbahnenkatalog für Mitteleuropa mit Van-Bebber'schen Zugbahntypen wie Vb*
2. *Wetterlagenkatalog für Mitteleuropa mit besonderer Relevanz für starke Gebietsniederschläge im Untersuchungsgebiet*
3. *Veränderungen der Zirkulation, der Zugbahnen und Starkniederschläge in Vergangenheit und Zukunft*
4. *Gegitterter Hybrid-Niederschlagsdatensatz für Österreich/Deutschland/Tschechien auf Tagesbasis für 1951-2006*
5. *Katalog mit planungsrelevanten Erkenntnissen und Ergebnissen aus der Untersuchung und daraus abgeleitete Empfehlungen für Planungsmaßnahmen politischer Entscheidungsträger*
6. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachvorträge*
7. *Endbericht*
8. *Abschlussveranstaltung zur Präsentation der Erkenntnisse und Empfehlungen*

Hinweis:

Eine ausführliche Beschreibung dieser Projektvariante ist auf Seite 68 zu finden.

Was sollte später untersucht werden?

Ein deutlicher Mehrwert in der Untersuchung der Vb-Starkniederschlagsproblematik bietet sich mit der Nutzung von voll-gekoppelten regionalen Klimamodellen in hoher räumlicher Auflösung (5-10km). Diese Modelle werden aber erst entwickelt und sind noch nicht voll ausgereift. Die Verfügbarkeit verifizierter Modellläufe ist noch nicht absehbar.

Zu einem späteren Zeitpunkt wird eine Erweiterung und Verallgemeinerung der Fragestellung vorgeschlagen. Dies beinhaltet die Untersuchung von Trocken- und Niederschlagsextremen unter dem Gesichtspunkt der Zirkulationsänderung im Klimawandel in Europa auf Tagesbasis. Dabei soll auch eine hydro-meteorologische Modellierung der Abflüsse für ausgewählte Flusseinzugsgebiete erfolgen, um auch direkte Aussagen für die Veränderungen der Hochwässer in der Klimazukunft tätigen zu können.

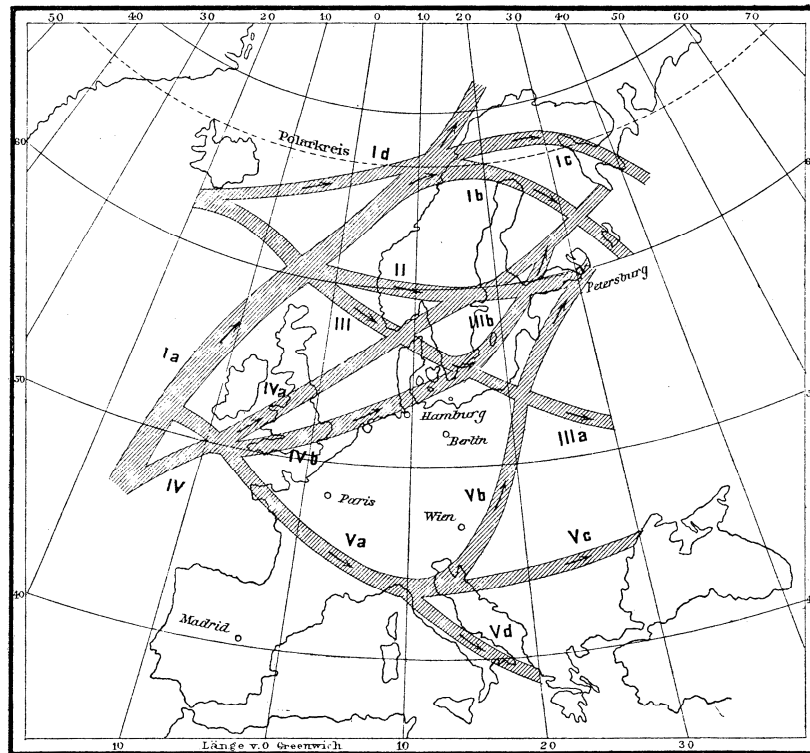
3 FACHLICHE GRUNDLAGEN

Im folgenden Abschnitt wird nach einer gründlichen Begriffsdefinition die Relevanz der Problematik von Vb-artigen Wetterlagen aufgearbeitet und dazu auch versucht eine qualitative räumliche Abgrenzung zu tätigen.

3.1 Begriffsdefinition

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird häufig der Begriff „Vb-Wetterlage“ verwendet, wenn es darum geht eine bestimmte Witterungsphase hinsichtlich ihrer Wetterlage, Zugbahn und Wirkung (Niederschlag) in einem Wort zu beschreiben. Darüber hinaus impliziert selbst in der Fachwelt die Verwendung des Begriffs „Vb-Wetterlage“ bereits ein erhöhtes Potential für Starkniederschläge und daraus resultierenden Hochwässern. An dieser Stelle ist es daher notwendig zunächst einmal Klarheit in die Begrifflichkeiten zu bringen.

Die **Bezeichnung Vb** („fünf B“) bezieht sich auf Arbeiten von W.J. van Bebbber (1891) bzw. W.J. van Bebbber und W. Köppen (1895) in denen die handschriftlichen synoptischen Bodendruckkarten, hinsichtlich der darin enthaltenen Zugbahnen von Hoch- und Tiefdruckgebieten, ausgewertet und systematisiert wurden. Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, verlagern sich die Zentren von Tiefdruckgebieten bei „Vb-Zugbahnen“, von Oberitalien beginnend über den Alpenostrand hinweg zum Baltikum. Relevant ist hierbei die Betrachtung der Luftdruckverteilung am Boden. Beachtlich an der Arbeit von van Bebbber ist das Faktum, dass es ihm gelungen ist die wesentlichen Typen von Zugbahnen über Europa zu bestimmen obwohl nur Daten aus einem sehr kurzen Zeitraum (1876-1880) vorlagen. Es ist zu betonen dass diese Zugbahnen noch keinerlei Informationen über eine bestimmte Wetterwirksamkeit beinhalten. Aufgrund eines bestimmten Zugbahntypus kann a priori nicht bestimmt werden, ob Niederschlag fällt oder nicht, ebenso wie keine Rückschlüsse auf etwaige Mengen oder auf betroffene Gebiete möglich sind.



Zugstraßen der Minima in Europa nach W. J. v. Bebber und W. Köppen.

Abbildung 1: Zugstrassen der barometrischen Minima über Europa nach van Bebber und Köppen (in Umlauf, 1891) mit der Zugbahn Vb ausgehend von Oberitalien hin nach Polen.

Unter **Wetterlage** versteht man ein wiederkehrendes, eindeutiges räumliches Muster des Luftdruck oder anderer meteorologischer Feldgrößen wie z.B. des Geopotential oder der Lufttemperatur. Eine bestimmte Wetterlage ist somit durch die zu einem Zeitpunkt in einem definierten Gebiet vorherrschende räumliche Verteilung einer solchen Größe charakterisierbar. Dieser Zustand wird im Allgemeinen durch ein- oder mehrstündige Mittelwerte dieser Feldverteilung beschrieben, höchstens jedoch als Mittel über einen Tag. Dieser Aspekt der Stationarität unterscheidet eine Wetterlage klar von der Betrachtungsweise der Zugbahnen von Druckgebilden.

Aufgrund der Kenntnis der räumlichen Verteilung und der entsprechenden Absolutwerte der Feldvariablen (z.B. Luftdruck), können im Falle der Wetterlagen Rückschlüsse auf den Niederschlag bestimmt werden – sowohl für den Ort als auch für die Menge, wenn auch nur im statistischen Sinne oder im Einzelfall mit gewissen Unsicherheiten. Möglich ist dies durch den unmittelbaren Zusammenhang, der zwischen den Feldverteilungen und den dynamischen Prozessen die Niederschlag bilden, besteht. Des Weiteren werden bei Wetterlagenklassifikationen zusätzlich zum Luftdruck auch noch andere Größen berücksichtigt, wie z.B. die Geopotentialverteilung in 500hPa oder auch Feuchte- und Temperatur.

Eine „Vb-Wetterlage“ gibt es somit nicht. Zwar wird dieser Begriff gerne verwendet, richtigerweise müssten aber folgende Begrifflichkeiten verwendet werden:

Wetterlage: Tief über Mitteleuropa (z.B.)

Zugbahn: Vb oder Vb-artig

Da hiermit aber noch immer keine Wirkung hinsichtlich des Wettergeschehens beschrieben wird, wäre sogar noch ein Zusatz für einen etwaigen, damit in Verbindung stehendem, Niederschlag notwendig. Nicht jedes Vb-Ereignis führt zwingendermaßen zu relevanten Niederschlagsereignissen. So könnte z.B. die Wetterwirksamkeit mit einer Wahrscheinlichkeit (%) für Niederschlag > 99mm angegeben werden.

Sowohl im Volksmund als auch von vielen Meteorologen selbst wird ein Tiefdruckgebiet mit einer „Vb-Zugbahn“ als „Vb-Wetterlage“ beschrieben, meist wird damit auch noch eine Erwartungshaltung von möglichen massiven Niederschlägen impliziert.

Neben der Charakterisierung der Atmosphäre über Wetterlagen und Zugbahnen existiert auch noch die Klassifizierung nach der über einem Gebiet vorherrschenden **Strömungsrichtung**. So werden beispielsweise im Katalog der Großwetterlagen Europas (Gerstengarbe und Werner, 2010) drei Zirkulationsformen: Zonal, Meridional und Gemischt unterschieden. Im Falle des meridionalen Zirkulationstypus erfolgt der Luftmassenaustausch vorwiegend über die Breitengrade (Süd ↔ Nord), sowie beim zonalen Typus über die Längengrade hinweg (Ost ↔ West). Diese Charakterisierung ist von großer Relevanz für die Analyse der potentiellen Hochwassergefahr in Europa bei Verwendung von sehr langen Zeitreihen. So gibt es Zusammenhänge zwischen einem hohen Hochwasserrisiko in Mitteleuropa und positiven NAO-Zyklen, sowie aber auch zwischen historischen Hochwässern und meridionalen Zirkulationsformen in Zentraleuropa (Jacobeit et.al, 2003).

Sämtliche Ansätze der Charakterisierung beschreiben den Zustand der Atmosphäre über dem gleichen Gebiet und werden zum Teil sogar aus der gleichen meteorologischen Grundgröße bestimmt. Dennoch unterscheiden sich diese klar voneinander, vor allem wenn es um die Untersuchung und Interpretation der damit verbundenen Wirkung geht.

3.2 Besonderheit der „Vb-Zugbahn“

Van Bebber's empirische Klassifizierung der Zugbahnen über Europa ist bereits vor mehr als 120 Jahren durchgeführt worden, dennoch findet - vor allem die Zugbahn Vb – bis heute noch immer Verwendung. Der Grund dafür ist exzessiven Niederschlagsereignisse, die vor allem im Bereich von den Ostalpen bis nach Südwest-Polen zu verheerenden Hochwässern geführt haben und oftmals in Verbindung mit Vb-artigen Zugbahnen auftraten. Diese Ereignisse zählen zu den massivsten die in Mitteleuropa

Die Beschreibung der einzelnen Mechanismen bzw. Prozesse die hintereinander wirken werden in Tabelle 1 beschrieben. Diese Tabelle beschreibt die wichtigsten Merkmale der atmosphärischen Randbedingungen, die bei herausragenden Niederschlagsereignissen und Vb-artiger Zugbahn des dazugehörigen Tiefs zu beobachten sind.

Tabelle 1: Atmosphärische Prozess- und Wirkungskette bei Vb-artigen Starkniederschlagsereignissen.

	Prozess / Mechanismus	Beschreibung	Wirkung	Beschreibung
1a	Abtropfen*	Ausgliederung eines Tiefs aus der allgemeinen Zirkulation	Zuggeschwindigkeit	Niedrige Progressionsgeschwindigkeiten
1b	Dynamische Hebung**	Hebungsprozesse in Verbindung mit eingelagerten Fronten	Niederschlag	Großräumiger Niederschlag - im Allgemeinen mäßige Mengen
1c	Höhenkaltluft	Vertikal potentiell instabile Luftmasse durch eingelagerte Höhenkaltluft	Niederschlag, Lebensdauer des Tiefs	Verstärkung der Niederschlagsintensitäten durch Konvektion
2a	Sekundär-Zyklogenese	Dynamische Regeneration durch Zyklonogenese über dem Mittelmeer bzw. der Adria	Niederschlag, Lebensdauer des Tiefs	Verstärkung der Hebungsprozesse, Dyn. Regeneration erfolgt dazu unmittelbar vor dem eigentlichen Niederschlagsereignis
2a	Meridionaler Feuchtetransport	Feuchteregeneration des Systems und Einbeziehen subtropisch feuchter Luftmassen	Niederschlag	Massive zusätzliche Anfeuchtung der Atmosphäre durch Einbeziehen subtropisch warmer und feuchter Luftmassen.
3	Orographische Hebung***	Zugbahn östlich von Gebirgsketten mit zyklonaler Anströmung führt zu zusätzlicher Hebung	Niederschlagsmengen und -dauer	Durch Staueffekte an Gebirgen kommt es zu einer Erhöhung der Intensitäten als auch der Dauer des Ereignisses.

*...Nicht zwingendes Kriterium. Jedoch waren besonders relevante Ereignisse in der Vergangenheit stets durch abgetropfte Systeme charakterisiert.

**...Ganz allgemeines Kriterium bei Tiefdrucksystemen mit eingelagerten Fronten, kein Spezifikum eines Vb-Ereignisses

***...Nicht nur die direkte Hebung durch Überströmen von Gebirgszügen ist hier wichtig, sondern auch die Verstärkung der Hebung durch eine vertikale Scherung von Windströmungen unterschiedlicher Feuchte und Temperatur, sogenannte Low Level Jets (Rotunno und Ferretti, 2001)

Ob und wie oft ein Tiefdruckgebiet entlang der „Vb-Zugbahn“ zieht wird durch die großräumige und auch globale Zirkulation der Atmosphäre bestimmt. Die Anzahl von Tagen mit einer „Vb-Wetterlage“ beträgt nach einer manuellen Wetterlagenklassifikation (Lauscher, 1972 und Lauscher, 1985) etwa drei Tage pro Jahr. Im Jahresverlauf zeigt sich, dass „Vb-Zugbahnen“ das ganze Jahr über vorkommen, mit einem leichten Maximum im April und November und einem schwach ausgeprägtem Minimum im Jänner und Juli. Das November-Maximum lässt sich teilweise durch die zu diesem Zeitpunkt herrschenden hohen Wassertemperaturen der Adria bzw. des Mittelmeeres erklären. Dadurch kommt es häufiger zu einer Sekundärzyklone, sobald ein Tiefdruckgebiet von Norden nach Süden zieht und diese warmen Wasserflächen erreicht. In einer ersten Sichtung der Klassifikation nach Lauscher hat sich gezeigt, dass einige Fälle nicht so eindeutig sind und auch allgemein bekannte Vb-Fälle nicht als Vb gegeben wurden. Ein Grund könnte die Fokussierung auf den Alpenostrand sein, d.h. sobald ein Vb-Tief den Bereich von Ostösterreich wieder verlässt wird, meist wieder auf andere Klassen zurück gegriffen die allesamt aber eine Wetterlage beschreiben und nicht eine Zugbahn.

Die angeführte manuelle Klassifikation nach Lauscher kann für eine etwaige Untersuchung der Vb-Problematik nicht verwendet werden. Die Gründe dafür sind (1) die große Abhängigkeit in der Festlegung vom jeweiligen Beobachter und der damit verbundenen Gefahr von zeitlichen Inhomogenitäten, (2) eine Vermischung von Wetterlage und Zugbahn, sowie (3) die fehlende Möglichkeit diese Klassifikation auf große Datensätze (Klimamodellsimulationen) mit einer entsprechenden automatisierten Routine anzuwenden.

Was ist unter dem Begriff eines Vb-Ereignis zu verstehen?

Vb-Ereignisse stehen definitionsgemäß in Zusammenhang mit Tiefdruckgebieten die der Vb-Zugbahn folgen. Aus der rein dynamischen Betrachtung ist die Begrifflichkeit somit eindeutig definiert. Aber es gibt denkbare Grenzfälle die die Zuordnung zu einem Zugbahntypen nach Van Bebber erschweren.

Denn Tiefdruckgebiete auf Vb-Zugbahn müssen streng genommen ein erkennbares Drucksignal am Boden aufweisen, da die Bebber'schen Zugbahnen dort definiert ist. Es existieren aus der synoptischen Erfahrung aber auch Fälle bei denen ein Tiefdrucksystem kein- oder nur ein schwaches Bodensignal aufweist (Höhentief ohne Bodensignal) und dennoch Niederschlag mit sich bringt. Dies ist in Mitteleuropa vor allem im Sommer immer wieder der Fall. Auch gibt es Fälle bei denen ein großräumiges Tiefdruckgebiet über Westeuropa liegt und an dessen östlichen Rand kleine sogenannte „Randtiefs“ entlang der Vb-Zugbahn ziehen. Diese sind somit nicht eindeutig über ein abgetropftes Höhentief detektierbar, weisen aber stets ein entsprechendes Bodendrucksignal auf. Randtiefs können aufgrund ihrer Zugbahn somit eindeutig Vb-

Ereignissen zugeordnet werden, ziehen zwar meist wiederholt aber rasch über ein Gebiet hinweg und führen daher nicht zu großen Niederschlagsereignissen. Ein Beispiel für ein solches sekundäres Randtief zeigt Abbildung 3. Das Randtief zieht hier zwar entlang der Vb-Zugbahn ist selbst aber in einem sehr großräumigen, primären Tiefdruckkomplex eingelagert.

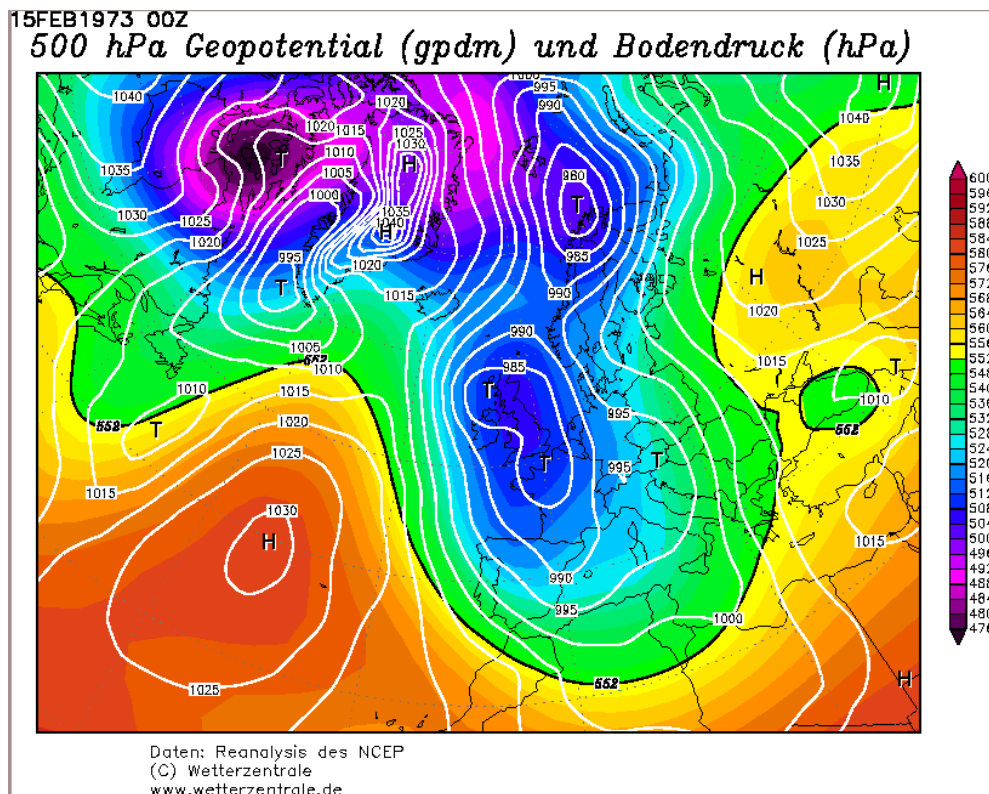


Abbildung 3: Großräumige Wetterlage über Europa zum Zeitpunkt des nach Lauscher-ZAMG als Vb-klassifizierten Tiefdrucksystems im Bereich von Ostösterreich. (Abbildungen aus NCEP-Reanalyse, Quelle: www.wetterzentrale.de)

Auf der anderen Seite gibt es Beispiele für extreme Niederschlagsereignisse bei denen nicht sämtliche Bedingungen erfüllt sein müssen wie sie in Tabelle 1 angeführt sind. Jedoch steigt mit dem Zusammentreffen mehrerer der angeführten Faktoren die Wahrscheinlichkeit für massiven Niederschlag in Mitteleuropa. Zuletzt gibt es auch Fälle in welchen ein Tief zwar viele der beschriebenen Mechanismen aufweist und damit klar Vb-Charakter hat, es aber nicht genau entlang einer der von Van Bebber definierten Zugbahnen wie z.B. Vb folgt.

In Europa existiert bis dato keine systematische und objektive Aufzeichnung von Vb-Ereignissen auf die im Zuge einer zukünftigen Studie zurückgegriffen werden könnte. Die Betonung liegt hier auf objektiven d.h. vergleichbaren Methoden mit denen homogene Datensätze systematisch hinsichtlich der Zugbahncharakteristik ausgewertet

wurden. Eine solche Analyse wäre ein erster wichtiger Schritt in einer Studie die die Vb-Problematik untersucht.

Aus der manuellen Wetterlagenklassifikationen von Lauscher (ZAMG), Hochwasserberichten und synoptischen Fallanalysen zu Starkniederschlagsereignissen aus der Vergangenheit, könnte in einem ersten Schritt eine Art Referenzchronik geschaffen werden in der Ereignisse mit Vb-Zugbahn aufgelistet sind. Auch diese Chronik gibt es bis dato nicht.

3.3 Räumliche Abgrenzung

Welche Gebiete sind von Tiefdruckgebieten betroffen die entlang einer Zugbahn des Typs V ziehen und durch das Einbeziehen von warmfeuchten Luftmassen aus Süden zu massiven Niederschlägen führen?

Grundsätzlich sind dies all jene Regionen nördlich des Mittelmeerraumes bis zur Nordsee (Vb), sowie jene Länder die im Bereich westlich des Schwarzen Meeres liegen (Vc). Nach Westen lässt sich dieser Bereich grob durch die Linie Berlin-Zürich abgrenzen.

Durch die Verknüpfung verschiedener niederschlagsrelevanter Prozesse im Lebenszyklus einer Zyklone wie sie in Tabelle 1 beschrieben werden, sind in Mitteleuropa vor allem Gebiete betroffen die direkt entlang der „Vb-Zugbahn“ liegen (Polen, Slowakei, Slowenien, N-Italien und W-Ungarn). Ganz brisant ist dabei die Situation in Regionen die direkt im Bereich der „Vb-Zugbahn“ liegen und westlich davon Gebirgszüge aufweisen wie dies in Österreich, Deutschland oder Tschechien der Fall ist (siehe Abbildung 2). In diesen Gebieten kann es durch die Anströmung feuchter Luftmassen an die Gebirgszüge zu einer massiven Verstärkung von Niederschlag kommen. Der orographische Aspekt ist daher ein entscheidender Faktor für die Brisanz eines Vb-artigen Niederschlagsereignisses und definiert somit auch jene Gebiete die hinsichtlich der extremsten Niederschläge als Hot-Spots bezeichnet werden können.

Hochwasserereignisse in Rumänien dagegen stehen in den überwiegenden Fällen in Zusammenhang mit sog. abgetropften – das heißt von der allgemeinen planetaren Zirkulation abgelösten – Tiefdruckgebieten. Diese bleiben stationär über viele Tage hinweg stets über dem gleichen Gebiet liegen und führen durch das Einbeziehen von feuchten Luftmassen aus dem Schwarzen Meer zu anhaltenden und massiven Niederschlägen. Diese Art von Ereignissen unterscheiden sich von Vb-Ereignissen in Mitteleuropa in den folgenden Punkten: (1) Vb-Zugbahn steht aufgrund der räumlichen Distanz nicht in kausalem Zusammenhang, möglicherweise existiert hier aber ein anderer dominanter Zugbahntypus wie z.B. Vc, (2) Klare Ausgliederung der Tiefdrucksysteme aus der allgemeinen Zirkulation bzw. der Polarfront, Systeme sind daher besonders lange stationär und (3) Lage am Schwarzen Meer erhöht die Wahrscheinlichkeit für massive Beiträge zum Niederschlag aus dieser Feuchtequelle.

Auch wenn die spezielle Fragestellung der Vb-Zugbahn die Gebiete in Mittel- und Osteuropa räumlich trennt ist zu betonen, dass in einer Untersuchung der Hochwassergefahr aus der Perspektive der atmosphärischen Zirkulation analoge Analysemethoden für beide Gebiete angewendet werden könnten.

Erst bei der Betrachtung der Wirkung (Niederschlag) erscheint es sinnvoll diese Gebiete getrennt voneinander zu untersuchen, da dann die Auswertemethode besser auf die Gegebenheiten der Zielgebiete angepasst werden kann. Gerade bei Vb-Ereignissen im Alpenraum und im Erzgebirge wird der Niederschlag bei Vb-Wetterlagen z.B. stark durch regionale Effekte wie die Orographie oder durch die sekundären Zyklogeneseregionen südlich des Alpenbogens beeinflusst.

Zusammenfassend können die betroffenen Gebiete zwar qualitativ abgegrenzt werden, im Detail hängt diese Trennung aber von der genauen Lage und räumlichen Ausdehnung des Tiefdrucksystems sowie von dessen Niederschlagscharakteristik an einem bestimmten Tag ab. Zum jetzigen Zeitpunkt ist auch völlig unklar ob sich die von Van-Bebber bestimmten Zugbahntypen auch wirklich so klar voneinander trennen lassen und ob diese bestimmten Bahnen ihre Gültigkeit behalten wenn lange Zeiträume von mehreren Dekaden betrachtet werden.

3.4 Relevanz der Vb-Fragestellung

Starkniederschlagsepisoden sind mit einem hohen Risiko von Hochwasserereignissen verbunden und können dadurch einen großen volkswirtschaftlichen Schaden verursachen. Aber auch das menschliche Leben ist durch solche Ereignisse direkt gefährdet.

Viele der massivsten Hochwasser- und/oder Niederschlagsereignisse werden Vb-artigen Ereignissen zugeschrieben wie z.B. das Elbehochwasser im August 2002 (z.B. in Rudolf und Rapp, 2003), das Alpenhochwasser im August 2005 (z.B. in Habersack und Krapesch, 2006) oder etwa das Oderhochwasser im Juli 1997.

Aber auch im Juni 2009 verursachten mehrere Tiefdruckgebiete die im Bereich der Vb-Zugbahn beobachtet wurden – diesem Pfad aber nicht im Detail folgten – extreme Niederschläge (Amt der niederösterreichischen Landesregierung, 2009, Haiden, 2009; ZAMG, 2009a) welche die langjährigen mittleren Monatssummen um bis zu 380% übertrafen (ZAMG, 2009b). Dieses 190-jährige Niederschlagsereignis führte nicht nur zu zahlreichen Überschwemmungen sondern destabilisierte auch viele Hänge mit folgenden Rutschungen und Murenabgängen (Godina und Müller, 2009).

Da in der Vergangenheit immer wieder bestimmte Zirkulationsformen und Zugbahnen von Tiefdruckgebieten - wie jene des Typs Vb - als Auslöser solcher Hochwässer beobachtet wurden, ist die Frage nach der Veränderung der Zirkulation und damit auch der Zugbahnen von hoher Relevanz für die Gesellschaft und politischen Entscheidungsträger, besonders im Angesicht des voranschreitenden, anthropogenen Klimawandels.

3.5 Warum wird dieses Thema jetzt aufgegriffen

Die Menschheit beeinflusst seit etwa 170 Jahren massiv das Klimasystem, wie etwa durch die Emission von strahlungsaktiven Treibhausgasen. Im Angesicht der globalen Erwärmung ist auch in Österreich die bodennahe Lufttemperatur bereits deutlich gestiegen. So liegt die mittlere Temperatur der Niederungen in Österreich im Jahr 2010 bereits um 1.2 °C höher als im Vergleich zum Mittel aus 1900-2001 (ZAMG, 2011). Es stellt sich nun die Frage ob es durch den anthropogenen und/oder natürlichen Klimawandel auch zu Veränderungen im Niederschlag oder im Risiko von Hochwässern gekommen ist oder kommen wird. Solche Veränderungen könnten zum Beispiel durch ein höheres Temperatur- und damit verbundenen Feuchtegehalt der Luft, durch Veränderungen der allgemeinen Zirkulation oder aber auch durch eine geänderte Tiefdrucktätigkeit im Mittelmeerraum (Lee-Zyklogenese im Lee der Alpen, höhere Mittelmeertemperaturen) ausgelöst werden. Veränderungen der Zirkulation könnten z.B. die Häufigkeit oder der Andauer von bestimmten Wetterlagen sowie Zugbahn-Charakteristiken betreffen. Auch wird eine Erhöhung der Meeresoberflächentemperaturen erwartet. Diese hat möglicherweise einen Einfluss auf die Zyklogenese-Prozesse von Tiefdruckgebieten in der oberen Adria oder auch auf die Feuchteadvektionen bei Vb-artigen Wetterlagen in den Alpenraum.

Aktuelle Messwerte an der Station Klagenfurt zeigen, dass der Luftdruck im Winterhalbjahr (Okt-März) seit dem Maximum von 1990 stetig gefallen ist und im letzten Jahr sogar ein neues Rekord-Minimum markiert (Abbildung 4). Dieses Minimum ist nur durch eine mehrjährige bis dekadische Veränderung in der atmosphärischen Zirkulation zu erklären, gleichbedeutend mit einem vermehrten Tiefdruckeinfluss.

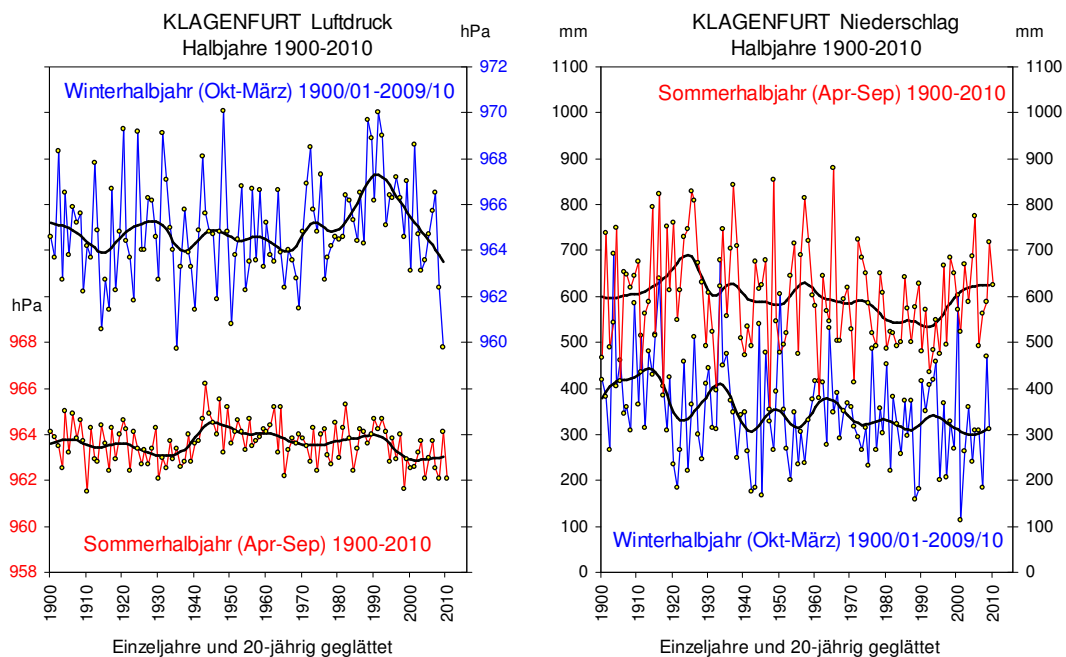


Abbildung 4(a) und 4(b): Langjährige Stationswerte mittlerer Luftdruck (a) und Summe Niederschlag (b) in Klagenfurt. Schwarze glatte Kurve: 20-jähriger Gaus-Tiefpassfilter.

Interessanterweise ist diese negative Drucktendenz zunächst nur im Winterhalbjahr erkennbar. Analysen (ohne Abbildung) zeigen auch, dass nicht nur der Süden Österreichs sondern fast das gesamte Bundesgebiet von diesem Minimum betroffen ist. Allerdings beträgt die räumliche Ausdehnung eines Tiefdruckkomplexes einige hunderte Kilometer und der Einfluss von Tiefdruckgebieten aus dem Ostatlantik an der Alpen-nordseite ist nicht unabhängig von jenen auf der Alpensüdseite – die generelle Abnahme in Österreich muss daher nicht überraschen.

Was hat sich in diesem Zeitraum beim Niederschlag getan? Wie in Abbildung 4b zu sehen ist lässt sich in der jährlichen Niederschlagssumme keine Auffälligkeit in Zusammenhang mit den Luftdruckminima der letzten Jahre erkennen. Nur im Sommerhalbjahr nehmen die Niederschlagsmengen zu, allerdings ohne erkennbare Parallelität zum Luftdrucksignal. Der direkte Vergleich von jährlichen- bzw. halbjährlichen Summe oder Mittelwerten ist allerdings auch nicht zulässig, da sich große Niederschläge auf wenige Ereignisse im Jahr beschränken und diese typischerweise nur wenige Tage andauern. Auch ist niedriger Luftdruck nicht zwingend mit Niederschlag verbunden. Eine fundierte Interpretation und Analyse bedarf einer wissenschaftlichen Untersuchung die eine zeitliche Auflösung auf Tagesbasis im Blickpunkt haben muss.

Untersuchen des Niederschlags von 1901-2000 für Süddeutschland (KLIWA Arbeitskreis, 2006) zeigen eine deutliche Zunahme in der Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen ($\geq 20\text{mm/d}$) vor allem im Winterhalbjahr (Okt-Apr). Die Autoren erklären die Langzeitveränderungen im Starkniederschlagsverhalten mit einer geänderten Häufigkeit bestimmter Wetterlagen und werten dies als Indiz für den voranschreitenden Klimawandel.

Einen weiteren Anlass, über mögliche Veränderungen im zukünftigen Niederschlagsverhalten und der damit verbundenen Gefahr von Hochwässern nachzudenken, geben Studien die die großräumige Zirkulation im Nordatlantik bzw. Europa im Klimawandel untersuchen. In der Zusammenschau diverser Studien von Ulbrich und Co-Autoren (Ulbrich et.al, 2009) wird erklärt, dass sich die Polarfront im Nordatlantik bzw. über Europa in den Jahren 1950-2000 weiter nach Norden hin verlagert hat und das sich in Zukunft die Anzahl von Tiefdruckgebieten mit sehr niedrigem Kerndruck erhöhen wird.

Zusammengefasst gibt es verschiedenartige Hinweise auf eine zukünftige Veränderung in der Häufigkeit von Starkniederschlägen durch (a) Zunahme der atmosphärischen Temperatur und Feuchtigkeit und durch (b) Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation z.B. Wetterlagen, Zugbahnen (Frei et.al, 2000). Diese Hinweise werden durch Beobachtungsdaten aus den letzten Jahrzehnten unterstützt wie z.B. durch Niederschlagsmessungen, Luftdruckmessungen und Starkniederschlagsanalysen. Auch besteht der subjektive Eindruck dass es in den letzten 15 Jahren häufiger zu Vb-artigen Ereignissen und in den Jahren 2000-2010 gehäuft zu markanten Hochwässern durch großflächige Starkniederschläge gekommen ist.

4 STAND DES WISSENS

4.1 Thematische Aufarbeitung des Wissenstandes - Juni 2011

4.1.1 Arbeiten mit direktem Bezug zur Vb-Zugbahn

Muskulus und Jacob, 2005

untersuchten Zugbahncharakteristiken von Tiefdruckgebieten (Bodenluftdruck Minima Tracking) im Mittelmeerraum (Nordrand am Alpenbogen) aus regionalen Klimamodellsimulationen (REMO, 0.5°) im IPCC SRES Szenario B2 für den Zeitraum 1961-2099. Sie schlussfolgern, dass zum ersten Mal in einer Trackinganalyse - neben der bekannten Region im Golf von Genua - eine zweite Zyklonogenese Region in der oberen Adria detektiert werden konnte. Möglich war dies durch die erstmalige Verwendung von Daten mit einer zeitlichen Auflösung von 1-Stunde. In anderen Studien wurde stets mit 6- bis 24-stündigen Mittelwerten gearbeitet. Aus unserer Sicht ist dies neben der zeitlichen-, möglicherweise auch ein Ergebnis der hohen räumlichen Auflösung von 0.5° (ca. 50km).

Die Autoren finden im Winter in der Klimazukunft eine Abnahme von Systemen mit besonders niedrigem Kerndruck im Untersuchungsgebiet und führen dies auf eine Nordverlagerung der Frontalzone zurück. Des Weiteren konnte keine Veränderung der Zugbahncharakteristiken – weder in der Vergangenheit noch in der Zukunft – gefunden werden. Ein interessantes und überraschendes Ergebnis. Ist doch aus anderen Klimaszenarien bekannt, dass sich die großräumige Zirkulation über Europa im Klimawandel verändern wird.

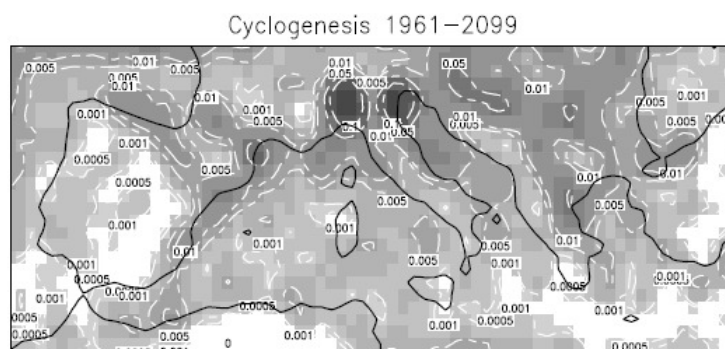


Abbildung 5: Mittlere monatliche Zykloneseanzahl pro Gitterpunkt (aus Muskulus und Jacob, 2005)

Muskulus und Jacob betonen die Option gezielt Vb-Zyklonen mittels vergleichbarer Datensätze aus regionalen Klimamodellsimulationen zu untersuchen, auch hinsichtlich der Genese (Entstehung), Lysis (Auflösung) und deren Lebenszyklus.

Mudelsee und Co-Autoren, 2004

vergleichen in ihrer Arbeit eine rekonstruierte Bodenluftdruckreihe (Luterbacher, et.al 1999) für Europa mit Hochwasserreihen der Elbe und Oder im Zeitraum 1658-1999 (Monatsbasis) um Luftdruckmuster zu finden die in Zusammenhang mit starken Hochwasserereignissen stehen. Die Autoren finden zunächst einen signifikanten Abwärtstrend im Hochwasserrisiko im Winter (Abnahme Eisstöße) und keinen signifikanten Trend im Sommer während des 20.Jhdt. Ein wichtiges Ergebnis ist die Erkenntnis, dass das Hochwasserrisiko während der letzten Jahrhunderte großen Variationen bzw. Schwankungen unterliegt und dabei auch räumliche Unterschiede aufweist.

Die Autoren konnten einen schwachen, aber statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Sommer-Hochwässern und meridionalen Zirkulationsformen zeigen (Abbildung 6). Wieder wird von den Autoren angenommen, dass dieser Zirkulationstypus „kompatibel“ mit der Vb-Zugbahn ist. Sie erklären jedoch dass die abnehmenden Sommertrends keine gesicherte Aussage für Vb-Ereignisse zulassen da (1) ihre Daten eine unzureichende Auflösung aufweisen und (2) Wetterlagen nicht mit Vb-Ereignissen gleichgesetzt werden können.

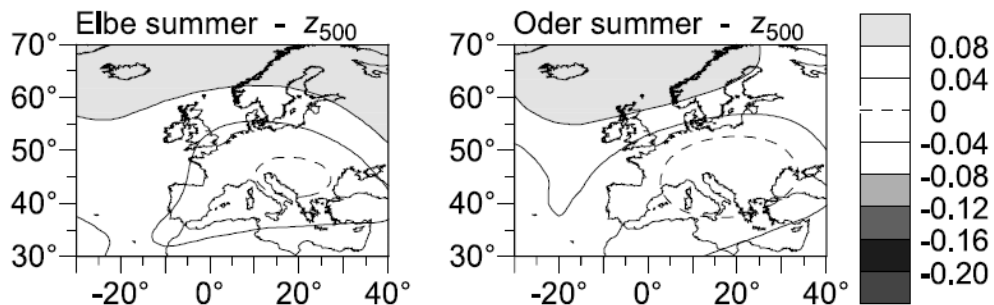


Abbildung 6: Korrelationskarte zwischen Luftdruckmuster und Hochwasserereignissen an Elbe und Oder 1658-1999. (Aus Mudelsee et.al, 2004)

Am Ende der Arbeit geben die Autoren eine Einschätzung wie das Hochwasserrisiko - verursacht durch Starkniederschläge - optimal untersucht werden könnte:

- Klimamodellsimulationen aus globalen Modellen mit verschiedenen Emissionsszenarien als Antrieb für
- Regionale Klimamodellsimulationen im Gebiet über Europa (Abbildung 6)
- wobei diese eine besonders hohe Auflösung über den betroffenen Niederschlagsgebieten aufweisen.
- Regionalmodelle treiben ein hydrologisches Modell an

Forschungsansatz: Die Empfehlung der Autoren ist plausibel, zurzeit gibt es aber noch verschiedenen Beschränkungen einer solchen Simulation. (Geringe räumliche Auflösung oder zu großes Simulationsgebiet, Parametrisierungen von Niederschlag und Boden). Auch müssen die Globalmodelle in Europa zunächst einmal die dekadische Variabilität richtig erfassen können.

Forschungsansatz: Sowohl die Definition von Zugbahnen (Vb) als auch jene der Wetterlagen bzw. Zirkulationsformen haben Vorteile und bieten spezifische Möglichkeiten in der Untersuchung der Problematik. Daher sollte für ein erfolgsversprechendes Projekt auf keines der beiden verzichtet sondern in Kombination die Vorteile beider genutzt werden.

Kundzewicz und Co-Autoren, 2005

untersuchten gezielt Tiefdrucksysteme auf der Vb-Zugbahn aus Klimasimulationen des Globalmodell ECHAM4/OPYC3 unter Verwendung eines Trackingalgorithmus von Murray und Simmonds (1991) für die Sommermonate April-September (Tagesbasis, 1961-2099). Laut ihren Ergebnissen sind im gegenwärtigen Klima etwa 5 Zyklonen pro Jahr über dem Golf von Genua zu beobachten, davon ziehen allerdings nur 1-2 auf der Vb-Zugbahn in Richtung Polen. Für die Klimazukunft zeigt sich eine Reduktion der Häufigkeit von Vb-Ereignissen um 20-30%. Dieses Ergebnis wird laut den Autoren durch die gleichzeitige Abnahme der Großwetterlage TCE (Trough Central Europe) gestützt, da diese Wetterlage die Vb-Ereignisse beinhaltet.

Wenn allerdings nur Tage mit starkem Niederschlag analysiert werden (>90 Perzentil) so zeige sich in beiden Klimamodellen eine Zunahme der Großwetterlage TCE im Hochsommer (Juni-August) in der Klimazukunft. Dies impliziere eine Zunahme der Bedeutung von Wetterlagen die in Zusammenhang mit Vb-Zugbahnen stehen bei Starkniederschlagsereignissen. Sie schlussfolgern des Weiteren, dass Vb-artige Ereignisse zwar in Zukunft abnehmen werden, aber diese vermutlich öfter zu starken Niederschlagsereignissen führen als dies im Klima der Vergangenheit der Fall war.

Am Schluss bleibt anzumerken, dass sowohl die zeitliche als auch die räumliche Auflösung (300km) der untersuchten Modelle unzureichend erscheint um Tiefdrucksysteme auf Vb-Zugbahn ausreichend erfassen zu können.

Wie auch in Fricke und Kaminski (2002) wird a priori ein Zusammenhang zwischen dem stationären Zirkulationsmuster (Wetterlage TCE) und der dynamischen Zugbahn (Vb) gleichgesetzt und dieser nicht hinterfragt.

4.1.2 Ereignisanalysen in Verbindung mit Vb-Zugbahn

Sodemann und Co-Autoren, 2009

analysieren das Hochwasserereignis vom August 2002 (Vb-Tief) hinsichtlich der Quellen der Feuchtigkeit die in den betroffenen Gebieten als Niederschlag gefallen ist. Sie führen dazu eine sogenannte Euler'sche „Tracer-Analyse“ in einer Klimamodellsimulation (Climate High Resolution Model des DWD) durch. Diese Simulation wurde mit den Reanalysedaten ERA40 des ECMWFs angetrieben.

In der Auswertung wurden sechs mögliche Feuchtequellen unterschieden wie sie in Abbildung 7 dargestellt sind.

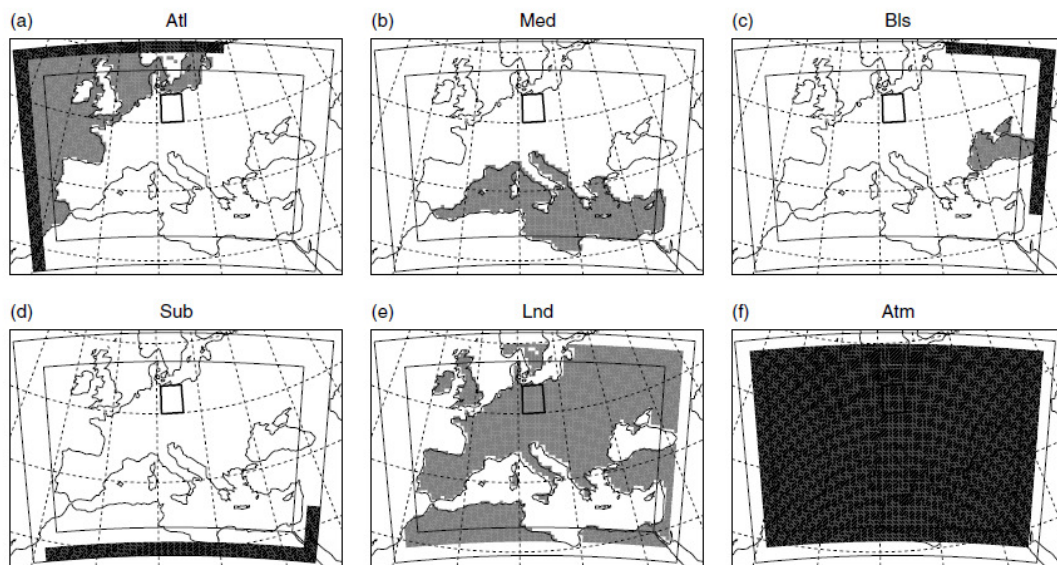


Abbildung 7: Feuchtequellen für das Niederschlagsereignis im August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe (schwarzer Rahmen). Atl...Atlantik, Med..Mittelmeer, Bls...Schwarzes Meer und rechter Rand, Sub...Südlicher Rand, Lnd...Verdunstung Landfläche, Atm...Initialfeuchte Atmosphäre. (aus Sodemann et.al, 2009)

In den Ergebnissen wird erklärt dass keine einzige dieser möglichen Feuchtequellen als Hauptquelle identifiziert werden konnte. Sämtliche tragen gleichermaßen zum Niederschlagsereignis bei. Dieses Ergebnis wird allerdings durch die Arbeit von Stohl et.al (2004) in Frage gestellt. Abschließend ist in Abbildung 8 der zeitliche Verlauf der einzelnen Feuchtebeiträge zum Niederschlag im Einzugsgebiet der Elbe dargestellt.

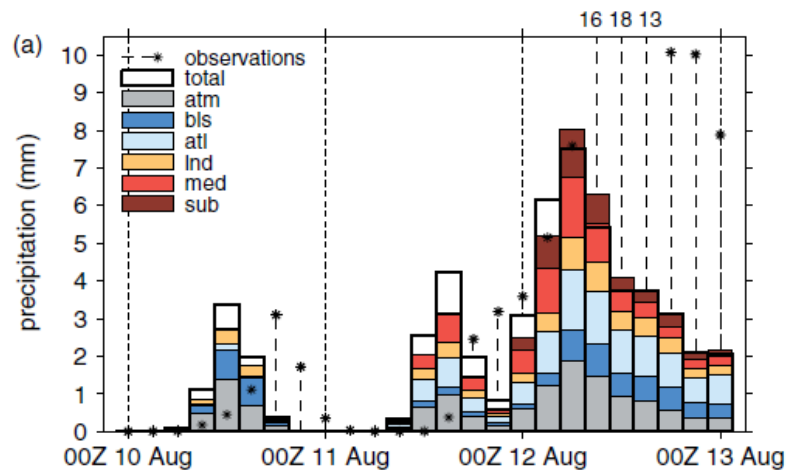


Abbildung 8: Aufschlüsselung der Feuchtequellen für das Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet der Elbe von 10.Aug – 13.Aug 2002. (aus Sodemann et.al, 2009)

Stohl und Co-Autoren, 2004

untersuchten ebenfalls die Feuchtequellen des Niederschlags beim Ereignis im August 2002. Anders als in Sodemann et.al verwendete Stohl et.al direkt die Daten aus den Reanalyse- und Kurzfristvorhersageläufen des Wettervorhersagemodells, welches am ECMWF betrieben wird. Auch wird hier keine Euler'sche sondern eine Lagrange'schen Diagnostik in der Methode verwendet, d.h. die Autoren verfolgten mit Hilfe von Tracking-Analysen repräsentative Feuchtepartikel zurück in der Zeit bis hin zur Quelle. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung

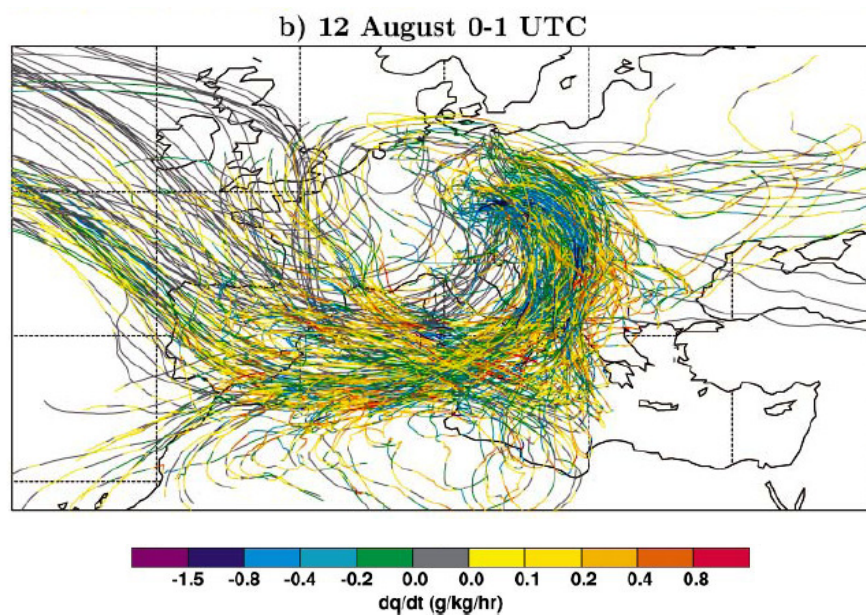


Abbildung 9: Rückwärtstrajektorien der Niederschlagsfeuchte bis zum 12. August 2002. Grün/Blau ist die Feuchtesenke (Niederschlag) und gelb/rot die Anreicherung mit Feuchtigkeit. (aus Stohl et.al, 2004)

Die Autoren kommen zu ganz wichtigen Ergebnissen in ihrer Arbeit. Der Großteil der Feuchtigkeit beim Niederschlagsereignis im August 2002 in Mitteleuropa stammt aus dem Mittelmeer. Dies deckt sich mit den Aussagen einiger anderer Arbeiten, in denen wiederholt meridionale Zirkulationsformen (mit Anströmung aus Süden) in Zusammenhang mit Hochwasser- oder massiven Niederschlagsereignissen gebracht werden konnten.

Ganz neu ist aber die Erkenntnis von Stohl und Co-Autoren dass auch die Verdunstung aus der Landfläche einen wesentlichen Beitrag zum Niederschlag getragen hat. Dies lasse sich aus dem bereits vorgesättigten Böden erklären.

Des Weiteren wird erklärt, dass selbst die hoch aufgelösten Wettervorhersagemodelle diesen Beitrag unterschätzt haben.

Forschungsansatz: Das Mittelmeer und die Bodenfeuchte spielen bei diesem Vb-Ereignis (August 2002) eine tragende Rolle. In zukünftigen Untersuchungen sollten daher bei Verwendung von Regionalen Klimamodellen beide Komponenten möglichst realitätsnah berücksichtigt sein. Dies gilt sowohl für die Parametrisierung des Bodens (Bodenfeuchtehaushalt) als auch für die Option eines gekoppelten Mittelmeeres (Oberflächentemperatur – Verdunstung).

4.1.3 Globale Klimamodellsimulationen und Zirkulation

Raible und Co-Autoren, 2010

haben globale Klimamodellsimulationen (Echam 5) hinsichtlich möglicher Veränderungen (1961-1990, 2071-2100, Winter DJF) der synoptisch-skalierten atmosphärischen Zirkulation im Emissionsszenario A2 für den Mittelmeerraum untersucht. Sie finden eine 10 %-ige Abnahme in der Anzahl der Tiefdruckgebiete im westlichen Mittelmeer sowie keine Änderung im östlichen Mittelmeer und führen dies auf eine großräumige Veränderung der Zirkulation zurück.

So zeigt sich (Abbildung 10) dass der im Winter dominierende Trog über Mittel-/Osteuropa in Zukunft deutlich nach Osten in Richtung des 35° Längengrades verlagert. Gleichzeitig nimmt in Westeuropa der Hochdruckeinfluss zu und bildet ein sogenanntes „Blocking“ für Tiefdruckgebiete die vom Atlantik her in den Mittelmeerraum ziehen.

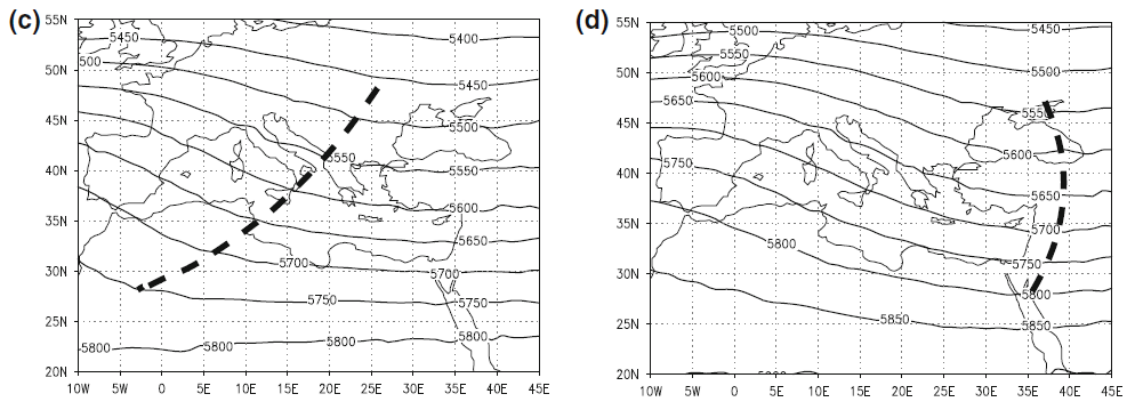


Abbildung 10: Mittlere Verteilung des Geopotentials auf 500hPa im Winter (DJF) für den Kontrolllauf 1961-1990 (c) und das Szenario A2 2071-2100 (d). Die dominante Trogachse ist durch die dicke, strichlierte Linie markiert. (aus Raible et.al, 2010)

Diese mittlere Veränderung der Zirkulation über Europa hätte auch Auswirkungen auf die Lage der Zugbahnen und die Häufigkeiten bestimmter Zugbahntypen wie z.B. jene des Typs Vb. Die Autoren diskutieren auch die interessante Hypothese, dass zwar auch im östlichen Mittelmeerraum die Anzahl der atlantischen Tiefdruckgebiete reduziert wird, diese aber durch eine Zunahme von Tiefdruckgebieten kompensiert wird die sich erst über dem Mittelmeer bilden und dann im östlichen Mittelmeer Niederschlagswirksam werden.

Forschungsansatz: Obwohl diese Untersuchung Eingangsdaten mit einer groben räumlichen Auflösung verwendet (1.25°) zeigt sich bereits eine massive Veränderung der dominanten Druckverteilung über Europa und hier speziell im Mittelmeerraum. Es ist davon auszugehen dass diese Veränderung weitreichende Konsequenzen für Vb-artige Zugbahnen hat, sich diese aber mit der in der Studie verwendeten Datengrundlage nur unzureichend bestimmen lässt (Stichwort: Lee-Zyklogense, Bodenfeuchte Europa, Orographie der Alpen, keine Kopplung des Mittelmeeres im Globalen Klimamodell). Um diese Fragestellung zu beantworten erscheint es sinnvoll regionale Klimamodellsimulationen in diesem Gebiet zu untersuchen.

Ulden und Oldenborgh, 2006

vergleichen 23 unterschiedliche, globale Klimamodelle die im Rahmen des 4.Sachstandberichtes von IPCC (2007) gerechnet wurden hinsichtlich der Fähigkeit die Merkmale der großräumigen Zirkulation über Europa abzubilden.

Diese Arbeit ist für eine mögliche Untersuchung der Vb-Fragestellung relevant (Zirkulationscharakteristik, Wetterlagenhäufigkeit, Zugbahnen, Antrieb Regionalmodell).

Sie analysieren dabei die erklärte Varianz des Bodenluftdrucks und deren Jahresgang, den Jahresgang der Windkomponenten (Strömungsrichtung) oder aber auch Temperatur und Niederschlag.

Aus diesen 23 Modellen konnten acht gefunden werden die die großräumige Zirkulation über Europa gut simulieren können. Nur fünf Modelle konnten darüber hinaus die Druckverteilung im Jahresverlauf wiedergeben, drei davon sogar gut. Diese globalen Zirkulationsmodelle sind:

ECHAM5/MPI-OM (Deutschland), UKMO-HadGEM1 (UK), MIROC3.2(hires) (Japan)

Betreffend das großräumige Niederschlagses zeigen sämtliche Modelle große Fehler von bis zu 50% (Überschätzung). Dieser Niederschlagsfehler lassen sich zu $\pm 30\%$ durch Fehler in der Zirkulation erklären, der Rest bleibt unbestimmt. Aber selbst bei der Temperatur

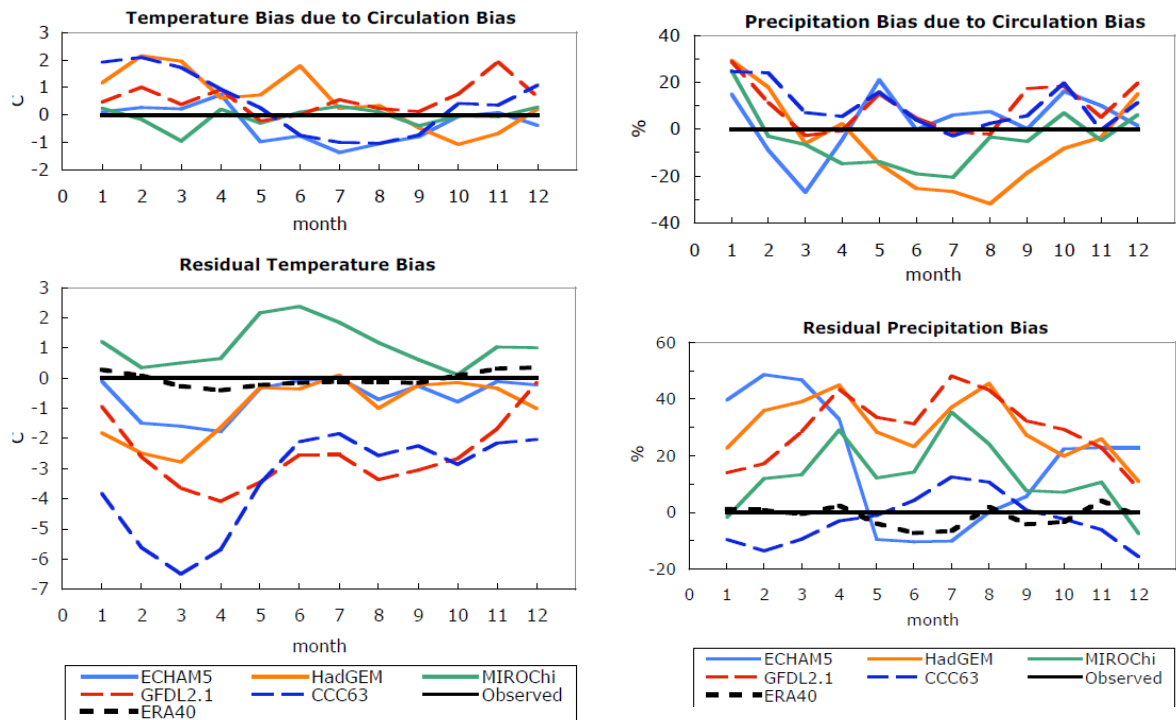


Abbildung 11: Fehler der Temperatur (linke Spalte) und des Niederschlages (rechte Spalte) im Vergleich zu ERA40 1960-2000. (aus Ulden und Oldenborgh, 2006)

Die Autoren erklären in ihrer Zusammenfassung, dass die Klimamodellsimulationen für Europa in der Zukunft große Unterschiede aufweisen, wobei die Niederschlagsänderung hauptsächlich durch Änderungen in der Zirkulation bedingt ist. Diese Unterschiede zwischen den Modellen weisen darauf hin, dass speziell in Europa erhebliche Unsicherheiten in den Szenarien hinsichtlich möglicher zukünftiger Klimaänderungen bei bestimmten Parametern bestehen (z.B. Sommer-Niederschlag).

Forschungsansatz: Bei Untersuchung über zukünftige Änderungen hinsichtlich der Vb-Fragestellung erscheint es essentiell ein globales Klimamodell zu verwenden, welches die Zirkulation (Blocking, Wetterlagen, interannuale und dekadische Variabilität) über Europa möglichst gut abbildet. Entweder wird dazu eines der drei oben angeführten Modelle genutzt oder es bieten sich vielversprechende Alternativen an, die sich im Rahmen der neuen Modellgenerationen aus IPCC 2013 (AR5) ergeben.

4.1.4 Regionale Klimamodellsimulationen und Niederschlag

Hier werden zwei ausgewählte Arbeiten diskutiert, die zwar nicht Vb-artige Wetterlagen im Fokus haben, aber die Fähigkeit beurteilen wie gut regionale Klimamodellsimulationen den Niederschlag im Alpenraum simulieren können.

Eine etwaige Studie über Vb-induzierte Niederschlagsereignisse müsste auf (globale oder) regionale Klimamodellsimulationen zurück greifen um zukünftige Änderungen untersuchen zu können.

Frei und Co-Autoren, 2003

untersuchen Niederschlagsfelder auf Tages- und Monatsbasis aus fünf verschiedenen europäischen regionalen Klimamodellen für die Vergangenheit (1979-1993, Forcing ERA15 Reanalyse) im Alpenraum. Als Vergleichsdatensatz werden die gegitterten, täglichen Beobachtungsfelder von Frei und Schär (1998) verwendet und in einzelnen Fällen mit den Monatswerten der Climate Research Unit CRU (New et al., 1999, 2000) ergänzt.

Zunächst wird erklärt, dass die Beobachtungsdaten mit zunehmender Höhe die tatsächlichen Niederschlagsmengen unzureichend erfassen. Dieser windbedingte Fehler beträgt in Lagen über 1500m im Sommer 12% und im Winter 40%. Ein Faktum welches auch aus der täglichen Niederschlagsmessung bekannt ist.

In der Studie kann kein bestimmtes Modell als das Beste identifiziert werden, jedes Modell hat bestimmte Stärken und deutliche Schwächen in unterschiedlichen Parametern.

Die Unterschiede zwischen den Modellen sind auf Tagesbasis noch größer als sie für saisonale Niederschlagsstatistiken sind. Als Ursache für die Fehler werden drei Faktoren angegeben die je nach Modell unterschiedlich wirksam sind: (1) zu niedrige Niederschlagsraten, (2) eine Unterschätzung der großen und größten Niederschlagsmengen und (3) eine teilweise Unterschätzung der Niederschlagstage. Die Fehler sind im Sommer am Größten, betreffen aber nicht alle Modelle in der gleichen Größenordnung.

Im Vergleich zu früheren Modellsimulationen zeigt sich ein reduzierter Bias auf saisonaler Basis. Dieser kann zum Einen auf die besseren Antriebsdaten (Stichwort Zirkula-

tionsmuster) und zum Zweiten auf eine Verbesserung der Niederschlagsparametrisierung im Modell selbst zurück geführt werden.

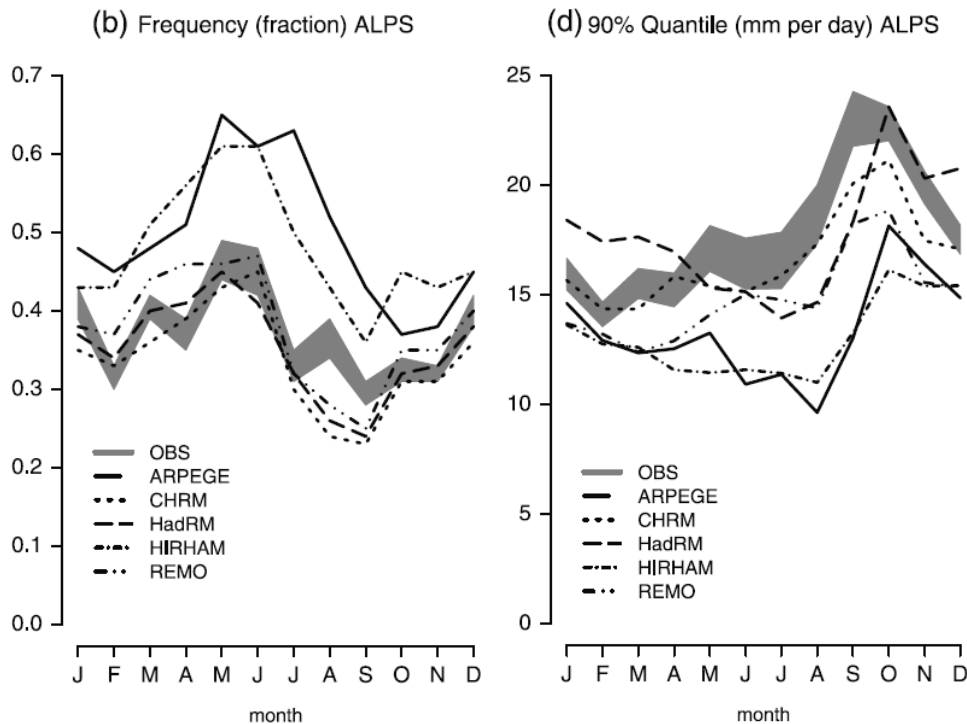


Abbildung 12: Jahresgang ausgewählter Niederschlagskenngrößen im Alpenraum, (b) wet day frequency und (d) 90%-Perzentil an Tagen mit Niederschlag. (aus Frei et.al, 2003)

Ein Anknüpfungspunkt zu Vb-Ereignissen kann die Niederschlagsspitze in den Monaten September-Oktober angeführt werden (Jahresgang der 90-er Perzentile, Abbildung 12 d). Dieser Peak steht nach Meinung der Autoren in Verbindung mit Ereignissen bei denen feuchte, maritime Luftmassen aus dem Mittelmeerraum an die Alpen geführt werden und unter konvektiver Verstärkung abregnen. Alle Modelle können dieses Maximum in den Simulationen wiedergeben, allerdings ist der Zeitpunkt des Auftretens in den Modellen ARPEGE, HIRHAM und HadRM verspätet. Im Sommerhalbjahr unterschätzen alle Modelle die starken Niederschlagsereignisse (90-er Perzentil) hinsichtlich der Menge (-18% bis -46% im JJA). Ein wichtiger Hinweis, traten doch einige der stärksten Hochwasserereignisse (1997, 2002, 2005, 2009) in Österreich und Deutschland gerade in den Sommermonaten auf.

Forschungsansatz:

Die Auswahl eines geeigneten Regionalmodell erscheint essenziell für die erfolgreiche Umsetzung einer Vb-Studie. Dabei muss besondere Rücksicht auf die bestmögliche Simulation der für den Niederschlag relevanten Prozesse geachtet werden (Staueffekte, frontale Prozesse, Niederschlagshäufigkeiten, mehrtägige Ereignisse, Saisonalität der Modellfähigkeiten). Mindestens genauso wichtig er-

scheint die Auswahl des treibenden Globalmodells hinsichtlich der interannualen und dekadischen Variabilität der großräumigen Zirkulation zu sein.

Grundsätzlich erscheinen regionale Klimamodelle in der Lage relevante Niederschlagskenngrößen im Alpenraum gut wiedergeben zu können, vor allem hinsichtlich der Häufigkeit der Ereignisse. Dennoch gibt es bei mehreren Modellen eine Neigung gleichzeitig die Niederschlagsmengen zu unterschätzen.

Bisherige Analysen lassen keine Rückschlüsse auf spezielle mehrtägige Niederschlagsereignisse zu (z.B. Vb-Ereignis im August 2002), entsprechende Fallstudien wären aber von großer Bedeutung für eine Vb-Studie, wenn regionale Klimamodelle verwendet werden sollen (Beurteilung Wetterlagen-/Zirkulationsaspekt sowie Niederschlagsaspekt).

In einer späteren Arbeit von Frei et.al (2006) zeigt sich im Übrigen, dass in den untersuchten regionalen Klimamodelle die Fehler in den hohen Niederschlags-Perzentilen nicht größer sind als jene in den mittleren Perzentilen. Auch resultiert der Niederschlagsfehler extremer Ereignisse vorwiegend aus der Fehleinschätzung der Niederschlagsmenge, das Auftreten des jeweiligen Niederschlagsereignisses wurde jedoch richtig simuliert.

Smiatek und Co-Autoren, 2009

vergleichen vier verschiedene regionale Klimamodelle (REMO, CLM, RegCM, HIRHAM) im Gebiet der „Greater Alpine Region“ und untersuchen ausgewählte Kenngrößen des Niederschlags für den Zeitraum 1961-1990. Als Vergleichsdatensatz wird auf täglicher Basis der ECA Datensatz („European daily high-resolution gridded data set“; Haylock et.al, 2008), sowie auf monatlicher Basis der HISTALP / CRU_ALP-IMP (Auer et.al, 2005a) und jener von Efthymiadis et.al (2006) verwendet.

In der Evaluierung der mittleren Felder zeigt sich eine gute Wiedergabe der räumlichen Muster in allen Modellen, auch der Jahresgang wird gut wiedergegeben. Allerdings überschätzen die Modelle den Niederschlag speziell im Winter entlang des Alpenhauptkamms, die größten Abweichungen simulieren RegCM und COSMO-CLM, auch unter Berücksichtigung der Niederschlagsunterschätzung die in den Beobachtungsdaten zu finden ist.

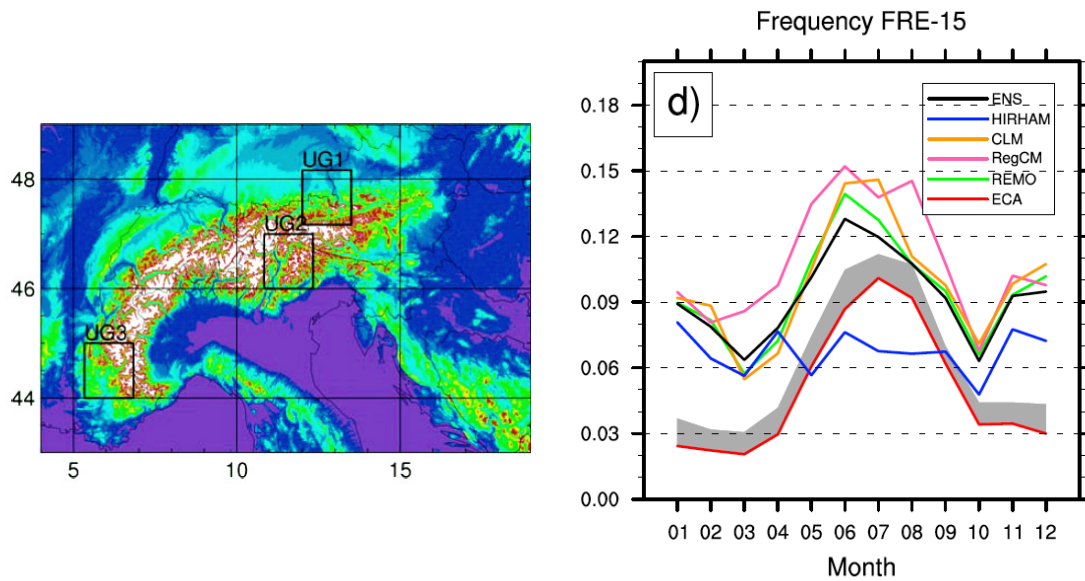


Abbildung 13: Jahresgang der Anzahl der Tage mit Niederschlag >15mm (rechts) in der Region UG1 (links). Schwarz ist das Mittel aus allen Modellen und in grau die Bandbreite der verschiedenen Beobachtungsdaten (aus Smiatek et.al, 2009)

In wird der Jahresgang von FRE-15 (Anzahl der Tage >15mm Niederschlag) gezeigt. HIRHAM zeigt dabei keinen Jahresgang, alle anderen Modelle können diesen zwar simulieren überschätzen aber die Häufigkeit deutlich.

Die Autoren deuten an, dass jene Modelle mit der höheren räumlichen Auflösung bessere Skills in der Simulation des Niederschlags im komplexen Terrain aufweisen und empfehlen eine Auflösung von zumindest 10km. Auch wird darauf hingewiesen, dass die Unterschiede zwischen den extremsten Emissionsszenarien für die Zukunft durch die modellbedingten Unterschiede zweier verschiedener Regionalmodelle gänzlich kompensiert werden kann, die Unsicherheiten sind daher sehr groß.

Forschungsansatz: Smiatek und Co-Autoren empfehlen die Verwendung von nicht-hydrostatischen, hochaufgelösten regionalen Klimamodellsimulationen (zumindest 10km). Des Weiteren sollten die simulierten Felder vor der weiteren Verwendung einer Bias-Korrektur unterzogen werden. Dazu wäre ein qualitativ-hochwertiger und ebenso hoch-aufgelöster, gegitterter Beobachtungsdatensatz notwendig.

Aufgrund der Unterschiede der Ergebnisse der Regionalmodelle wird auch empfohlen für hydrologische Impact-Analysen auf mehrere Modellsimulationen zurück zu greifen um so die Bandbreite der Möglichkeiten abzubilden. (Unsicherheitsabschätzung)

4.1.5 Zirkulationsmuster, Wetterlagentypen und Niederschlag

Fricke und Kaminski, 2002

haben den Großwetterlagenkatalog nach Hess und Brezowsky (Hess und Brezowsky, 1952; Gerstengarbe und Werner, 2010 – Stand 1999) hinsichtlich der Häufigkeiten bestimmter Wetterlagen ausgewertet um zu erkennen ob potentiell niederschlagsreiche Zirkulationsformen zu- oder abgenommen haben (Tagesbasis). Die Arbeit von Fricke und Kaminski wird relativ häufig im Zusammenhang mit Vb-Wetterlagen zitiert, auch wenn sie sich gar nicht explizit mit Vb-artigen Wetterlagen auseinandersetzt da keinerlei Zugbahn-Aspekt berücksichtigt wird.

Fricke und Kaminski zeigen in den Sommermonaten beispielsweise eine Abnahme von West-/Nordwest Wetterlagen und Hochdruckgebieten über Mitteleuropa. Sie erklären dass die Zunahme von Starkniederschlagstagen im Sommer vor allem auf die Zunahme der Wetterlage (i) Trog Mitteleuropa, (ii) Trog Westeuropa und (iii) Hochdruckbrücke Mitteleuropa zurück zu führen ist.

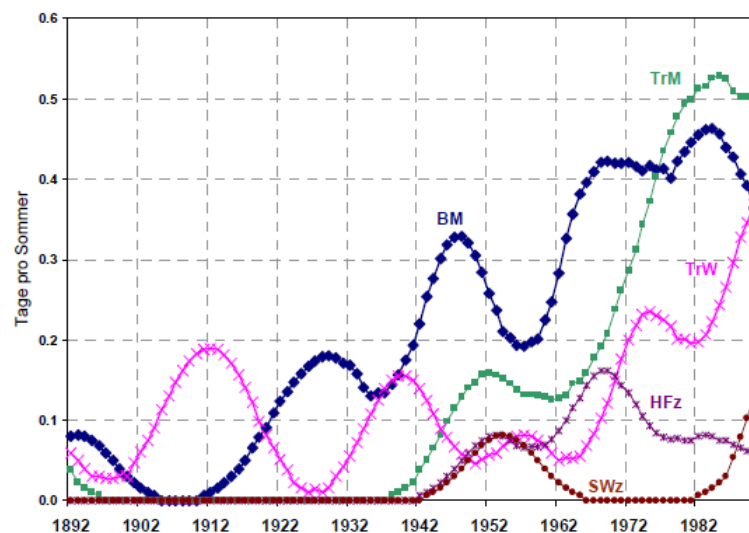


Abbildung 14: Großwetterlagen mit signifikant steigender Anzahl von Tage mit Starkregen ($\geq 30\text{mm}$) im Sommer (Jun-Aug): TrM...Trog Mitteleuropa, BM...Hochbrücke Mitteleuropa, TrW...Trog Westeuropa, SWz...zyklonale Südwestlage, HFz...Hoch Fennoskandien zyklonal. (aus Fricke und Kaminski, 2002)

Des Weiteren erklären sie, dass die Wetterlage Trog über Mitteleuropa TrM auch die Zugbahn Vb von Van Bebber beinhaltet. Fragwürdig ist jedoch ob jede Wetterlage TrM auch tatsächlich ein Tief auf der Vb-Zugbahn beinhaltet und ob alle Tage mit einem Tief auf Vb-Zugbahn alleine durch die Lage TrM erklärt werden können.

Als kritisch muss auch bewertet werden, dass in der Arbeit der Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und bestimmten Wetterlagen nicht explizit gezeigt wird.

Forschungsansatz: Zusammenhang zwischen bestimmten-Zugbahntypen und bestimmten Wetterlagentypen ist noch nicht untersucht worden.

Forschungsansatz: Zusammenhang zwischen Niederschlag (Ort, Zeitpunkt, Menge) und Vb-Tiefs zeigen (Steuergrößen bestimmen).

Jacobeit und Co-Autoren, 2003

vergleichen eine rekonstruierte Bodenluftdruckreihe (Luterbacher, et.al 2002) für Europa mit einer gemeinsamen Hochwasserchronologie aus unterschiedlichen Einzugsgebieten in Mitteleuropa im Zeitraum 1500-1999 für den Hochwinter (Dez-Feb). Dabei zeigt sich dass das Luftdruckmuster „Z-MODE“ das Hauptmuster für die Erklärung der Anzahl von Hochwasser-Ereignissen in Mitteleuropa ist (Abbildung 15). Aber es gibt Zeitperioden multidekadischer Länge in denen das Muster RH-west das Hochwasser-Risiko (Häufigkeit) dominiert. Phasenweise ist aber auch RH-east für regionale und bedeutende HW-Ereignisse relevant, vor allem im Spätwinter.

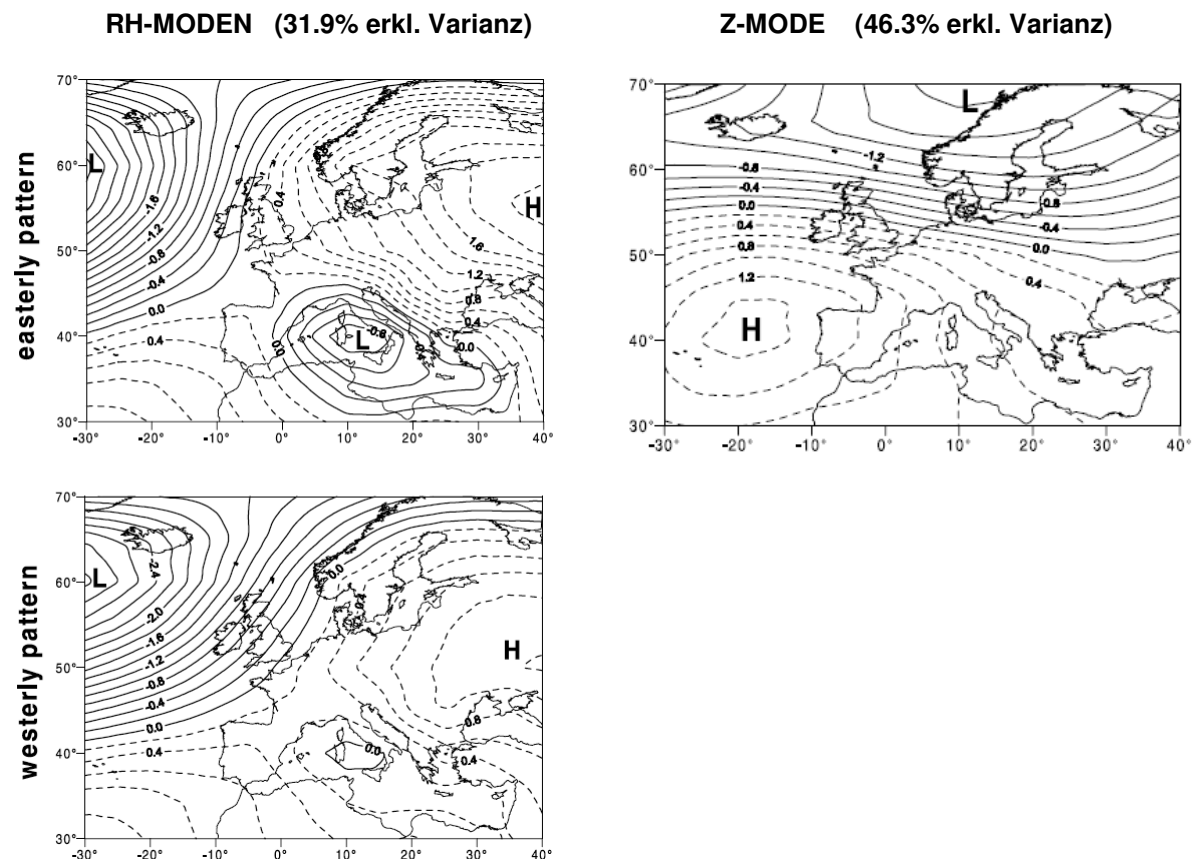


Abbildung 15: Hauptmoden des Bodenluftdrucks im Winter (Dez-Feb) 1500-1999. (aus Jacobeit et.al, 2003)

Eine wichtige Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass zum Einen verschiedene Druckmuster und somit Strömungslagen für Hochwasserereignisse von Bedeutung sind und zum Zweiten sind die dominanten Muster nicht immer gleich wirksam. Im zeitlichen Verlauf gibt es Phasen in denen das eine oder andere Muster die Hochwässer steuert.

Forschungsansatz: Aufgrund dieser dekadischen Variabilität in den atmosphärischen Mustern ist es wichtig ausreichend lange Zeitreihen zu untersuchen (mindestens 50 Jahre).

KLIWA Arbeitskreis, 2006

Im Rahmen des Projektes KLIWA A1.1.3 „Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern“ wurden Starkniederschläge auf Tagesbasis mit den unterschiedlichen Zirkulationstypen aus dem Großwetterlagenkatalog nach Hess und Brezowsky für den Zeitraum 1931-2000 verglichen.

Die Autoren erklären die zunehmenden Starkniederschlagstrends in Süddeutschland im Winterhalbjahr durch eine Zunahme der zonalen Zirkulationsformen („Atlantik-Einfluss“). Im hydrologischen Sommerhalbjahr hingegen nimmt der Anteil der meridionalen Zirkulationsformen an den Tagen mit Starkniederschlägen zu, allerdings lässt sich kein räumlich einheitlicher Trend in den Starkniederschlägen selbst finden.

Parajka und Co-Autoren, 2010

untersuchen langfristige Zusammenhänge von atmosphärischen Zirkulations-Mustern mit Regimen von Extremniederschlägen in Mittel- bzw. Osteuropa. Sie verwenden dazu Niederschlagsmessungen auf Tagesbasis und den Katalog der Großwetterlagen von Gerstengarbe und Werner (2010). Sie finden im Bereich der Vb-Zugbahn zwei Muster (Typ 2 und 8), beide zeigen im Hochsommer das Niederschlagsmaximum aber die Maxima der Hochwässer in diesen Gebieten ist zeitlich verschoben und hängt offenbar von hydrologischen Randbedingungen ab. Typ 2 hat das Hochwassermaximum im Mai-Juni im Alpenvorland sowie im Frühherbst vom Alpenostrand bis in die Slowakei. Bei Typ 8 dagegen liegt ein schwächeres Hochwassermaximum im Frühjahr (März-Mai) und ein zweites starkes Maximum von Juni-Juli. Die zeitliche Verschiebung von Niederschlag und Hochwässern wird durch Faktoren wie Schneeschmelze oder Bodensättigung erklärt und muss nicht daher nicht direkt mit den stärksten Niederschlägen in Zusammenhang stehen.

Für beide Typen konnte allerdings kein dominanter Zirkulationstyp gefunden werden.

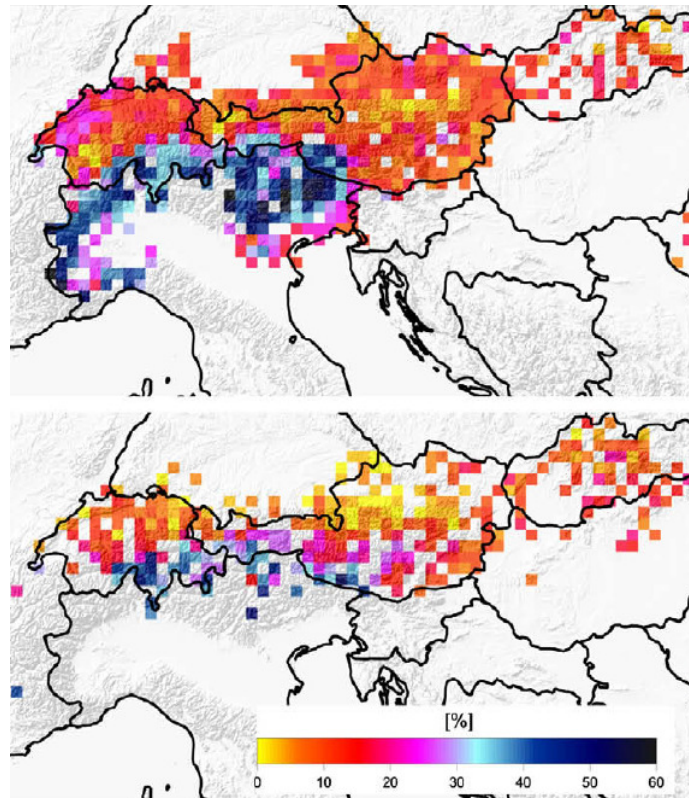


Abbildung 16: Relative Häufigkeit des jährlichen maximalen Niederschlags (oben) und Hochwassers (unten), während der Zirkulationsform Meridional-Südwest und –Süd aus 1961-2000. (aus Parajka et.al, 2010)

In Abbildung 16: Relative Häufigkeit des jährlichen maximalen Niederschlags (oben) und Hochwassers (unten), während der Zirkulationsform Meridional-Südwest und –Süd aus 1961-2000. (aus Parajka et.al, 2010) ist der Anteil der jährlichen maximalen Hochwasser- und Niederschlagsereignisse zu sehen die während einer meridionalen Anströmung aus Süd oder Südwest (Bezugsgebiet Mitteleuropa) zwischen 1961-2000 auftraten. Dabei ist ein starker Zusammenhang dieser Größen in den Gebieten der Südalpen zu erkennen, dieser fehlt jedoch an der Alpennordseite oder am Alpenostrand in Österreich. Hier beträgt der Anteil der stärksten Niederschläge lediglich 10-20%. Offenbar ist der Zusammenhang zwischen relevanten Niederschlägen und bestimmten Wetterlagentypen aus dem Großwetterlagenkatalog nach Hess und Brezowsky nur sehr schwach ausgeprägt oder möglicherweise auch gar nicht systematisch.

Problematisch könnte auch sein, dass nur die jeweils maximalsten Tagesniederschläge pro Jahr berücksichtigt wurden, diese größten Einzelereignisse (zumindest in Österreich) aber vor allem im Sommer durch konvektive Ereignisse wie Gewitter bestimmt werden. Ein typisches Vb-Ereignis unterscheidet sich davon durch die längere Dauer und größere räumliche Ausdehnung des Niederschlages und ist im Allgemeinen mehr von stratiformer (flächiger oder „geschichteter“) Natur auch wenn dabei teils konvektive Einlagerungen existieren. Bei mehrtägigen Niederschlagsdaten sollte auch ein deutlich stärkerer Zusammenhang mit bestimmten Wetterlagen oder Zirkulationstypen gefun-

den werden können, vor allem dann wenn eine entsprechende Wetterlagenklassifikation über dem Untersuchungsgebiet zentriert, abgeleitet wird.

Die Ergebnisse dieser Studie lassen erkennen, dass neben den absoluten Niederschlagsmengen auch die Bodenfeuchte und die Schneedecke eine wichtige Größe in der Häufigkeit und dem jahreszeitlichen Auftreten von bestimmten Hochwasserereignissen darstellt. Wie in zu Abbildung 17 sehen ist, ist aus den genannten hydrologischen Aspekten der Zeitpunkt der größten Hochwässer in der Jahreszeit zum Teil stark verschoben zum Zeitpunkt des Auftretens der größten täglichen Niederschlagssummen.

Auch konnten die Autoren zeigen, dass in manchen Gebieten zwei unterschiedliche Hochwässer-Maxima im Jahresverlauf gefunden werden konnten. Eines dieser Maxima passt oft mit dem Auftreten der stärksten Niederschläge zusammen (z.B. Herbstmaximum im Südstau der Alpen), wobei das zweite – meist schwächere/mittlere Hochwassermaximum – vor allem mit Prozessen der Schneeschmelze oder Bodenfeuchte in Verbindung stehen.

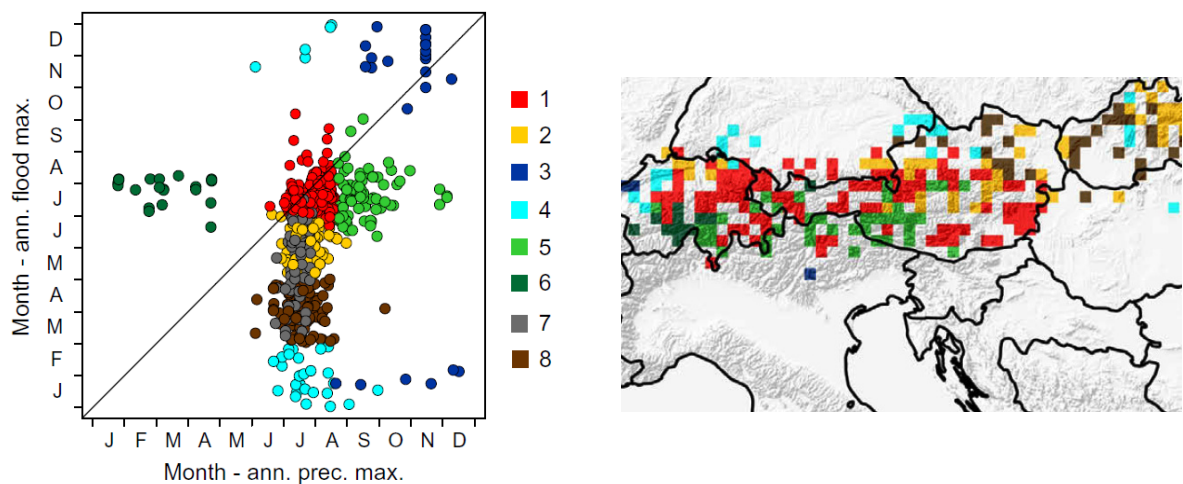


Abbildung 17: Zeitpunkt des Auftretens des jährlichen maximalsten Niederschlages und der Hochwässer im Gebiet der Alpen-Karpaten (links). Die acht Gruppen mit ähnlichen Hochwasser-Charakteristiken sind den Gebieten (rechts) zu zuordnen. (aus Parajka et.al, 2010, modifiziert)

Daraus kann abgeleitet werden, dass bei alleiniger Verwendung von Niederschlagsdaten nicht sämtliche relevante Hochwasserereignisse erfasst werden können. So sind die stärksten Niederschläge zwar stets mit einem großen Hochwasserpotential verbunden, aber umgekehrt werden die beobachteten Hochwässer nicht zwingend durch die stärksten Niederschlagsmaxima verursacht.

Es gilt offensichtlich zwischen unterschiedlichen Ereignistypen von Hochwässern zu unterscheiden, in Hinsicht auf die Jährlichkeit und die relevanten hydrologischen Mechanismen (Abflussverhalten, Bodenvorsättigung, Regen auf Schnee).

Forschungsansatz: Wie sich auch schon in anderen Studien andeutet, ist die Verwendung einer allgemeinen Wetterlagenklassifikation nicht geeignet um regionale Niederschlagsereignisse hinreichend zu untersuchen. Durch den fehlenden, direkten physikalischen Zusammenhang beider Felder kommt es zu Unschärfen und nicht eindeutigen Ergebnissen. Eine Anpassung einer Wetterlagenklassifikation an die konkrete Fragestellung (dahinter stehende Prozesse) und an das Untersuchungsgebiet erscheint essentiell für den Erfolg einer Untersuchung hinsichtlich einer bestimmten Wirkungsgröße.

Forschungsansatz: Achtung – auch die nicht-stärksten Niederschlagsereignisse können für Hochwässer relevant sein. Hydrologische Aspekte die das Abflussverhalten steuern sind dabei bestimmend.

4.1.6 Storm-Tracking Analysen im Bereich der Vb-Zugbahn

Horvath und Co-Autoren, 2008

analysieren die Zugbahnen von Tiefdruckgebieten über dem Mittelmeer (Fokus auf die obere Adria) aus Reanalysedaten des europäischen Wettervorhersagemodells in Reading. Die Auflösung dieser Felder beträgt 6 Stunden bzw. 40km und die Untersuchung wurde für den Zeitraum 2002-2005 durchgeführt und folgt den Tiefdruckgebieten über die Minima des Bodenluftdrucks.

Sie finden Tiefdruckgebiete die entweder über Genua-, über der nördlichen Adria entstehen oder aber aus einem großräumigen (atlantischen) Tiefdruckgebiet stammen. Genua- und Adriatiefs sind nicht dabei räumlich sehr begrenzt (zum Teil 200km) und zeigen ihre größte Häufigkeit im Winter. Sekundäre, atlantische Tiefs haben ihre größte Häufigkeit im Winter und die geringste im Sommer.

In dieser Arbeit wird nicht Bezug auf die Zugbahn-Definition von Van-Bebber genommen und keine Tiefdruckgebiete erwähnt die sich von der Adria nach Norden oder Nordosten bewegen.

Forschungsansatz: Die verwendeten Eingangsdaten sind aufgrund der hohen räumlichen Auflösung vielversprechend, allerdings erscheint aufgrund der Zuggeschwindigkeiten von Tiefdrucksystemen die zeitliche Auflösung von 6 Stunden im Vergleich dazu als zu groß. Sommerliche Tiefdruckgebiete haben zum Teil ein sehr schwaches Luftdrucksignal am Boden, die verwendete Methode könnte solche Systeme (abgetropfte Höhentiefs) unzureichend oder nicht erfassen. Der Analyse-Zeitraum ist mit 4 Jahren sehr kurz da Tiefdrucksysteme auf der Alpensüdseite nicht sehr häufig sind.

4.1.7 Ausgewählte, aktuelle Arbeiten zur Zirkulation über Europa (GCMs)

María Jesús Casado und María Asunción Pastor, 2011

untersuchen im Rahmen der COST733 Aktion ('Harmonization and application of weather types classifications for European regions'; <http://cost733.met.no>; Philip et.al, 2010) 16 globale Zirkulationsmodelle (IPCC AR4 Generation) hinsichtlich der Fähigkeit bestimmte vordefinierte Zirkulationstypen wieder zu geben. Als Vergleichsdatensatz wird das Bodenluftdruckfeld im Hochwinter (DJF) aus ERA40 für den Zeitraum 1980-2000 verwendet. Die acht vordefinierten Druckmuster stammen aus dem Katalog der COST733 Aktion (K-means und SANDRA Klassifikation).

Die Erkenntnisse dieser Analyse sind wichtig für die Auswahl eines globalen Zirkulationsmodells, welches als Antrieb für regionale Modellsimulationen genutzt werden soll. Hier folgt eine Zusammenfassung des Vortrags der im Rahmen der EGU in Wien 2011 präsentiert wurde (Casado und Pastor, 2011):

- UKMO-HadGEM1 (GISS-AOM) zeigt die höchste (niedrigste) räumliche Korrelation.
- Das Muster mit einem Hochdruckgebiet von den Kanaren bis Südwesteuropa und einem Tief über West-Island wird von allen Modellen unterschätzt. Aus anderen Arbeiten ist bekannt dass dieses Muster eine zunehmende Häufigkeit in der simulierten Klimazukunft Europas aufweisen soll.
- In der Summe aus allen statistischen Auswertungen (Ranking) zeigen die Modelle: **UKMO-HadGEM1**, **CGCM3.1(T63)**, **ECHAM5/MPI-OM** und **NCAR-CCSM3** den größten Skill.
- Am Schlechtesten werden die Modelle GISS-AOM und MRI-CGCM2.3.2 bewertet.
- Es zeigen sich allerdings leichte Unterschiede in den Ergebnissen je nach verwendeter Klassifikation.

Belleflamme und Co-Authoren, 2011

analysieren den Skill von 5 ausgewählten globalen Zirkulationsmodellen (IPCC AR4 Generation) die globale Zirkulation (Geopotential 500 hPa) über Europa abbilden zu können. Bei dieser Arbeit wurde auch ein Vergleich der beiden Reanalysedatensätze ERA40 und NCEP1 durchgeführt, der Untersuchungszeitraum beschränkt sich auf 1961-1990. Die verwendete Wetterlagenklassifikation umfasst 12 verschiedene Muster und stammt aus dem COST733 Katalog.

Die Ergebnisse dieser Analyse wurden auf der EGU im Jahre 2011 präsentiert (Belleflamme et.al, 2011) und werden hier zusammengefasst aufgelistet:

- Drei GCMs zeigen erhebliche Unterschiede zu den Reanalysen beim Vergleich der mittleren Geopotentialfeldverteilung über Europa. In BCCR-BCM2.0 und IPSL-CM4 ist die Anströmung zu stark von Südwesten her orientiert, im zweiten Modell ist darüber hinaus der mittlere Gradient über Europa viel zu schwach. **UKMO-HadGEM1** und **CCCma-CGCM3.1(T63)** zeigen hier die geringsten Fehler.
- Bei der Analyse des räumlichen Musters der zeitlichen Variabilität, ist lediglich CCCmaT63 den Reanalysen sehr ähnlich. Auch UKMO-HadGEM1 bildet das räumliche Muster sehr gut ab, allerdings wird die Variabilität in Europa südlich der Alpen zu 10% unterschätzt. (Ein Gebiet das große Teile der Vb-Zugbahn bedeckt!)
- Alle anderen Modell weisen massive Abweichungen in der simulierten Variabilität auf. Besonders die Modelle UKMO-HadCM3, CCCma-CGCM3.1(T47), IPSL-CM4 und BCCR-BCM2.0 unterschätzen die Variabilität über ganz Europa und weisen zu schwach ausgeprägte räumliche Muster auf.
- Das Modell Echam5 wurde nicht evaluiert.

4.1.8 Wetterlagenklassifikationen und Starkniederschläge im Alpenraum

Schiemann und Frei, 2010

verglichen jene 71 Wetterlagenklassifikationen, die im Rahmen der COST733 Aktion (Philip et.al, 2010) zusammengefasst getragen wurden, auf ihre Fähigkeit täglichen Niederschlag im Alpenraum zu erfassen. Der Vergleichszeitraum umfasst die Jahre 1971-1999, zur Analyse werden tägliche Reanalysefeldern aus ERA-40 (Uppala et.al, 2005) sowie mit gegitterte (20km) Beobachtungsdaten des Niederschlages (Frei und Schär, 1998; Frei und Schmidli, 2006) verwendet. Die Bewertung der Vorhersagefähigkeit der einzelnen Klassifikationen erfolgt dabei mit dem sog. "Brier-Skil Score".

In der Untersuchung werden keine Sequenzen in der Wetterlagenklassifikation zugelassen, d.h. die Vorgeschichte in der Wetterlage bleibt unberücksichtigt. Des Weiteren wird lediglich der Bodenluftdruck für die Vorhersage des regionalen 20km-Gebietsniederschlages genutzt.

Die Autoren finden einen höheren Skill (1) bei schwachen bis mittleren Niederschlägen als bei starken Niederschlägen (90 Perzentil), (2) im Winter als im Sommer, (3) in den

atlantisch beeinflussten, nordwestlicheren Alpenregionen, (4) bei Verwendung einer höheren Anzahl von Klassen wie 27 und 18 gegenüber 9.

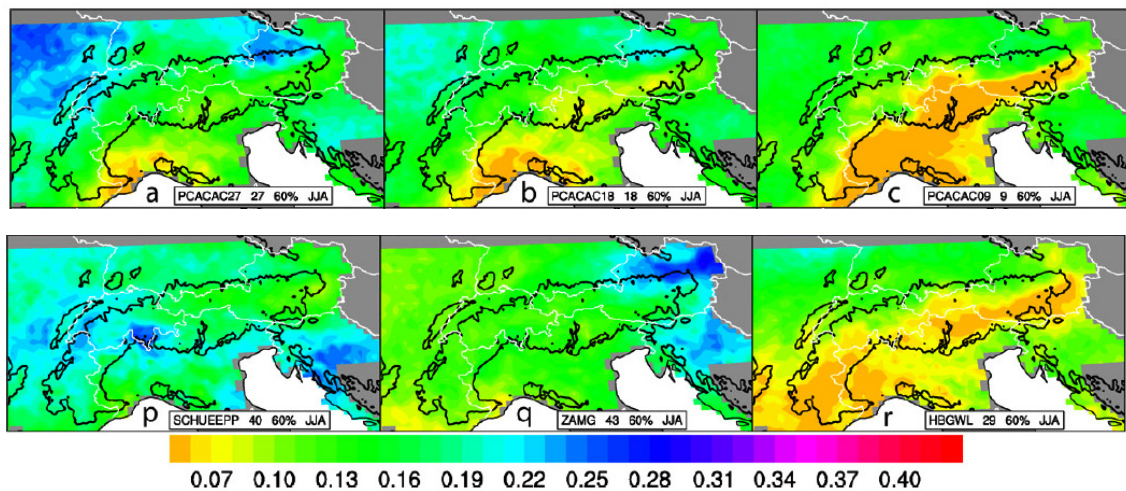


Abbildung 18: Brier Skill Score für das 60-er Perzentil des täglichen Sommerniederschlages. Vergleich einer automatischen (oben) und verschiedener objektiver (unten) Wetterlagenklassifikationen. (aus Schiemann und Frei, 2010, modifiziert)

Es zeigt sich dass bestimmte Klassifikationsschemen höheren Skill aufweisen als andere (PCACAC, SANDRA, CKMEANSC) und dass manche automatische Schemen sogar trotz geringerer Klassenzahl die manuellen (objektiven) Schemen übertreffen. Manuelle Klassifikationsschemen wie ZAMG (Lauscher 1972 und 1985), SCHUEPP (Schuepp, 1957) oder Hess-Brezowskys Großwetterlagen (HBGWL) sind stets im oberen Mittelfeld zu finden, weisen aber in jenem Gebiet für das sie ursprünglich entwickelt wurden eine hohe Güte auf.

Forschungsansatz: Generell ist die Möglichkeit tägliche Starkniederschläge auf dieser räumlichen Auflösung von 20km alleine aus den Bodenluftdruckfeldern vorherzusagen sehr beschränkt (Erklärte Varianz <10%).

Eine deutliche Verbesserung ist möglich wenn weitere großräumige Felder zur Vorhersage verwendet-, Sequenzen zugelassen- und größere Gebietsniederschläge verwendet werden. Auch sollte die Klassifikation über dem Zielgebiet abgeleitet werden, sowie die räumliche Ausdehnung der Wetterlagenklassifikation auf die im Fokus stehenden Niederschlagsereignisse bzw. die dahinter stehenden synoptischen Felder optimiert werden.

Nachtnebel und Co-Autoren, 2011

untersuchen hydro-meteorologische Extremereignisse im Klimawandel mit Hilfe der Wetterlagenklassifikation WLK733 welche speziell für Anwendungen im Alpenraum entwickelt wurde. Die Klassifikation verwendet folgende Felder als Grundlage für die

Klassifikation und Vorhersage: Geopotentielle Höhe 500hPa und 925hPa sowie Wind in 700 hPa. Dabei wurde die Strömungsstruktur in zyklonal/antizyklonal unterschieden bzw. zusätzlich dazu eine Klassifizierung des Windvektors in acht Sektoren über den Anströmwinkel gemacht.

Um Aussagen für die Klimazukunft zu tätigen verwendeten die Autoren neben den ERA40 Reanalysen Klimasimulationen aus den Modellen ECHAM5 und HADCM3C. Die Niederschlagsfelder MESOCLIM der Universität Wien (Institut f. Meteorologie, Steinacker et.al, 2006) liegen in 6-stündiger Auflösung auf einem 16x16km Gitter für Europa im Zeitraum 1971-2005 vor.

In der Bewertung der Veränderung von Wetterlagen die in starkem Zusammenhang mit Hochwässern und Extremniederschlägen stehen, schlussfolgern die Autoren dass keine quantitative Aussage abgeleitet werden kann wie groß die zu erwartenden Veränderungen im Klimawandel sein werden. Prognostizierte Veränderungen verschiedener Klimamodelle und Klimaszenarien weichen zu stark von einander ab.

Es lassen sich lediglich zwei Aussagen für die Zukunft tätigen: (1) Im Nordwesten Österreichs deutet sich ein Anstieg von hochwasserrelevanten West- und Nordwestwetterlagen an. (2) In der Region "Nord", "Inneralpin" und "West" könnte im Winter eine Zunahme von 3-tägigen Niederschlagsextremen über eine Zunahme der dafür relevanten Wetterlagen auftreten. Sonst lasse sich keine Tendenz erkennen.

Schlussfolgerungen aus dieser Studie, die für die Durchführung einer Vb-Untersuchung wichtig erscheinen:

- 1) Bei Untersuchung von Niederwasser über Wetterlagen wird dringend die zusätzliche Verwendung eines Temperaturmaßes empfohlen.
- 2) Für die Erfassung großer Hochwässer (mehrtägig, große Gebiete) darf die Domäne der Klassifikation nicht zu klein sein. So ermöglicht der in der Studie verwendete größere Alpenraum nicht die Abbildung stationärer und meistens großräumiger Wetterlagen (Persistenzen).
- 3) Bei der Wetterlagenklassifikation hat sich gezeigt, dass es Unterschiede zwischen den Reanalysedaten und den Kontrollläufen der GCMs gibt. Hierfür dürfte die unzureichende Abbildung des Bodenluftdruckfeldes über dem Alpenraum in den globalen Klimamodellsimulationen verantwortlich sein. Auch die unterschiedliche intrinsische Auflösung der verwendeten Eingangsdaten trägt einen Teil dazu bei.
- 4) Bei Verwendung des Bodenluftdruckfeldes in der Wetterlagenklassifikation, sind die Unterschiede zwischen der Reanalyse und den GCM-Kontrollläufen größer als die Klimaänderungssignale der GCMs.
- 5) Die Autoren sehen noch viel Potential bei Verwendung optimierter und weiterentwickelter Wetterlagenklassifikationen hinsichtlich der Erfassung der relevanten

Phänomene (Niederschlag, Trockenphasen,..). Dafür werden unter anderem die COST733 Wetterlagenklassifikationsalgorithmen vorgeschlagen.

6) Neue Erkenntnisse erwarten sich die Autoren von der Berücksichtigung der Zugrichtung von Wettersystemen in einer entsprechenden Wetterlagenklassifikation und von einer Nutzung von zeitlich höher aufgelösten Daten (<24 Stunden).

4.2 Offene Studien mit Relevanz für die Vb-Fragestellung

HYMEX: „An experimental project on the Hydrological Cycle in Mediterranean“

Aus dem vorliegenden wissenschaftlichen Projektplan von HYMEX ausgewählte Projektziele, welche einen möglichen Berührungspunkt mit der Vb-Fragestellung haben:

WG3: Heavy precipitation events, flash-floods and floods

Coordinators: G. Delrieu, A. Montanari, E. Richard, R. Romero

- Analyse der Dynamik von synoptischen Wettersystemen – Verständnis des Einflusses von Orographie bei stationären Starkniederschlägen.
- Entwicklung von statistischen und dynamischen Downscalings für Niederschlag im Mittelmeer zur Untersuchung der Veränderung von Starkniederschlägen im Klimawandel.

WG4: Intense sea-atmosphere interactions

Coordinators: K. Béranger, C. Estournel, S. Josey, K. Lagouvardos, B. Ivancan-Picek

- Ableitung von Szenarien über die Entwicklung von Mittelmeerzyklonen im zukünftigen Klima: Analyse der Zugbahnen und Intensitäten von Mittelmeertiefs aus hochaufgelösten Klimamodellsimulationen.

Ansprechpartner für Hymex

Dr. Philippe Drobinski: Philippe.Drobinski@lmd.polytechnique.fr

Dr. Veronique Ducrocq: Veronique.Ducrocq@meteo.fr

Prof. Piero Lionello: piero.lionello@niasalento.it

ACQWA - Assessing Climatic Change and Impacts on the Quantitiyan Quality of Water

Laufzeit 01.09.2008-31.05.2013

Österreichischer Partner: Universität für Bodenkultur, Dr. Herbert Formayer

Ziel des öst. Arbeitspaketes: Untersuchung der Bedeutung von Mittelmeerzyklonen für die Alpine Hydrologie im Klima der Zukunft und Vergangenheit über Nutzung von Simulationen mit dem regionalen Klimamodell MM5. (Ins Deutsche übersetztes Zitat aus der online Projektbeschreibung der Univ. f. Bodenkultur)

Laut vorliegendem Projektantrag liegt dabei der Fokus in der Untersuchung der Fähigkeit des Regionalmodells bestimmte Zugbahncharakteristiken richtig abzubilden sowie den typischen Niederschlagsfehler bei Vb-Ereignissen zu bestimmen.

https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=7195

CESAR – „Charakterisierung des differentiellen Energiegehaltes von Vb-Zyklonen über die Quantifizierung abgestrahlter Schwere- und Infraschallwellen in der Atmosphäre“

„In CESAR wird untersucht, inwiefern es möglich ist, mithilfe der vermessenen Wellensignaturen Aussagen über die Änderung des Energieinhaltes eines Sternsystems, speziell eines Vb-Zyklons, zu gewinnen. Somit kann ein Beitrag zur Verbesserung der Sturmprognose geleistet werden.“ (Originaltext des DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung, online)

Durchführung einer Messkampagne im Mittelmeer im Herbst 2011 zur Auswertung der von Vb-Zyklonen abgestrahlten Wellen.

5 SWOT ANALYSE

5.1 Forschungsbedarf

Im Rahmen der ausgedehnten Literaturrecherche hat sich gezeigt, dass die immanente Bedeutung der Fragestellung von Vb-artigen Zugbahnen und damit verbundenen Starkniederschlägen in der Forschung bekannt ist. Dazu hat offenbar vor allem das verheerende Hochwasser im August 2002 beigetragen. Dennoch gibt es bis dato kaum eine Untersuchung in der diese Fragestellung explizit untersucht wird.

In den wenigen Studien die bisher vorliegen entweder nur die Zugbahnen analysiert oder nur Niederschläge in Zusammenhang mit speziellen Zirkulationsformen (Wetterlagen) untersucht. Bei allen diesen Analysen, fand nie eine Optimierung der Wetterlagentypen hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften von Vb-artigen Starkniederschlagsereignissen statt.

SYNTHESE aus dem Stand des Wissens 2011

- Es existieren einige Arbeiten, in welchen die Relevanz von Vb-Ereignissen für Hochwasserereignisse in Mitteleuropa in der Diskussion oder Einleitung hervorgehoben wird
- Es gibt so bis dato zwei Arbeiten in denen gezielt Vb-Zugbahnen untersucht werden:

Muskulus und Jacob, 2005: Storm-tracking SLP in regionalen Klimamodellsimulationen. Finden keine Veränderung der Zugbahncharakteristik (1961-2099). Erkennen aber sekundäre Zykloneseregion in der nördlichen Adria. Eigener Tracking Algorithmus. Keinerlei Bezug auf den anhängigen Niederschlag.

Kundzewicz und Co-Autoren, 2005: Tracking in ECHAM4 für Sommermonate. Finden 5 Genua-Zyklonen pro Jahr, 1-2 ziehen auf Vb. Klimazukunft Reduktion um 20-30%. Keinerlei Bezug auf den anhängigen Niederschlag. Auflösung der GCMs ca. 300km!

- Es gibt keine Arbeit in der die Vb-Problematik gesamtheitlich untersucht (Wirkung Niederschlag) wird. (Zugbahnaspekt in Zusammenhang mit Niederschlag oder für Niederschlag optimierte Zirkulationsklassifikationen).

- Es gibt einige wenige Arbeiten in denen das Hochwasserrisiko in Europa auf mit Hilfe von mittleren Zirkulationsmustern (Geopotential500hPa oder SLP) untersucht wird. Fast alle dieser Untersuchungen arbeiten mit mittleren Monatsfeldern. Darüber hinaus wird oft argumentiert, dass die Vb-Zugbahnen bzw. Vb-Wetterlagen implizit in einem bestimmten Zirkulationstyp enthalten sind (meridionale Formen) ohne dies zu zeigen.
- Es gibt einige wenige Arbeiten in denen Niederschlagsereignisse auf Tagesbasis gemeinsam mit Wetterlagen untersucht werden. Auch hier wird zum Teil a priori angenommen, dass Ereignisse mit Vb-Zugbahn in einem Wetterlagentypus implizit enthalten sind. Sämtliche Wetterlagen wurden nicht auf Vb-artige Niederschlagsereignisse hin optimiert.
- Es gibt einige Arbeiten bei denen Niederschläge auf Tagesbasis mit Wetterlagenklassifikationen im Zusammenhang betrachtet werden. Die Vb-Problematik wurde dabei jedoch nicht explizit herausgearbeitet.

Es hat sich gezeigt dass, die Vb-Fragestellung bis dato nicht ausreichend untersucht wurde, und/oder keine Rücksicht auf die Besonderheiten dieses Phänomens (Stichwort Prozesskette) genommen wurde. Viele Fragen sind offen, besonders wenn es um die Untersuchung der Wirkung (Niederschlag, Hochwasserrisiko) geht. Die Relevanz von Vb-artigen Wetterlagen bzw. Vb-Zugbahnen für regionale Starkniederschläge ist bis heute nicht untersucht. Ebenso ist unbekannt mit welchen Veränderungen im Niederschlagsgeschehen - durch Vb-artige Wetterlagen und Vb-Zugbahnen - im Klimawandel zu rechnen ist.

5.2 Voraussetzungen und Strategieentwicklung für eine Vb-Untersuchung

Um Niederschlagsereignisse zu untersuchen die durch Tiefdruckgebiete auf Vb-artigen Zugbahnen ausgelöst werden, muss zunächst ein Storm-Tracking durchgeführt werden um sämtliche Zugbahnen von Tiefdruckgebieten zu bestimmen. In diesem **ersten Schritt** können auch gleichzeitig die Charakteristika der einzelnen Zugbahnen (Art, Richtung, Geschwindigkeit und Größe des Tiefs, usw.) abgeleitet werden.

Erst **im zweiten Schritt** ist es möglich all jene Niederschlags-Ereignisse untersucht werden, die in Zusammenhang mit Vb-Zugbahnen stehen. In diesem zweiten Schritt könnten aber auch sehr leicht zunächst sämtliche Zugbahnen klassifiziert werden um ihre Auswirkung bzw. Verknüpfung mit dem regionalen Niederschlag zu untersuchen ohne sich zunächst auf Vb zu beschränken.

Um **im dritten Schritt** eine Aussage für Veränderungen von Zirkulation und Niederschlag im Klimawandel tätigen zu können sind Klimamodellsimulationen mit regionalen oder globalen Modellen notwendig. Der Niederschlag könnte dabei direkt aus den Klimamodellsimulationen verwendet werden – diese Möglichkeit soll aber erst später diskutiert werden. Um aus den Klimamodellsimulationen indirekt auf den Niederschlag schließen zu können müssen Methoden des sog. „statistischen Downscalings“ genutzt werden. Ein statistischer Ansatz wäre dabei einen Zusammenhang zwischen Zugbahnen bzw. Zugbahncharakteristiken und den regionalen Niederschlagsereignissen in der Vergangenheit zu bestimmen, um diesen dann auf die zukünftigen Klimaszenarien anwenden zu können.

Aufgrund der Vielfalt der atmosphärischen Bedingungen die die Charakteristik eines regionalen Niederschlagsereignisses bestimmen, erscheint es aber als sehr schwierig mit statistischen Mitteln direkt aus den Zugbahn-Charakteristiken einen Zusammenhang zum regionalen Niederschlag auf Tagesbasis herzustellen.

Auch wenn es gelingen sollte diesen Zusammenhang für unterschiedliche Niederschlagsgebiete im Alpenraum bzw. in Österreich zu bestimmen, bestehen begründete Zweifel ob ein regionales oder globales Klimamodell überhaupt in der Lage ist mit ausreichender Genauigkeit solche feinen Details in der Zugbahn-Charakteristik hinreichend genau zu simulieren. In der synoptischen Erfahrung ist z.B. bekannt dass bereits eine kleinräumige Verschiebung der Zugbahn um 50-150km zu einer völlig veränderten Niederschlagssituation im Alpenraum führen kann. Die Sensitivität der Niederschlagsmenge und -dauer in den jeweiligen Gebieten könnte hier wesentlich größer sein als die Fähigkeit der regionalen Modelle bestimmte Zugbahnen im Detail abzubilden.

Die Option regionale/globale Klimamodelle für den Zugbahnaspekt zu nutzen und daraus den Niederschlag rein aus der Zugbahn mit statistischen Methoden zu bestimmen erscheint nicht sinnvoll.

Wie kann die Fragestellung beantwortet werden?

WEG 1

Eine Möglichkeit die beschriebene Problematik - des unklaren Zusammenhangs von Zugbahn und Niederschlag - zu umgehen wäre sich gänzlich auf ein bestimmtes, **regionales Klimamodell** zu verlassen. Dies bedeutet, dass sowohl die atmosphärische Zirkulation aus dem Modell verwendet wird um die Zugbahnen zu bestimmen, als auch direkt den Modell-Niederschlag zu nutzen. Ein relativ einfacher, klarer und eleganter Weg, der aber sehr gute Modellsimulationen voraussetzt.

Stärken und Schwächen Weg1

Aus unterschiedlichen Studien (siehe Kapitel 4) ist bekannt, dass die regionalen Klimamodelle den Niederschlag im Alpenraum derzeit noch nicht gut simulieren können. Dies gilt ganz besonders für räumliche Muster und bestimmte Charakteristika hinsichtlich der Saisonalität. Ob darüber hinaus einzelne Ereignisse auf Tagesbasis direkt aus den Regionalmodellen verwendet werden können ist fraglich, eine solche Untersuchung wurde bisher noch nie gemacht.

Andererseits hat sich in einigen Studien gezeigt, dass Regionalmodelle vor allem bei skaligen Niederschlägen von hoher Intensität höheren Skill zeigen als bei konvektiven oder schwachen Ereignissen.

Der Vorteil dieser Variante ist die Verwendung von physikalisch konsistenten Zirkulations- und Niederschlagsdaten aus einem einzigen Modell. Diese Variante ist jene mit dem geringsten Arbeitsaufwand, allerdings gibt es Unsicherheiten und Unzulänglichkeiten im simulierten Niederschlag auf Tagesbasis.

Zur Zeit existieren eine Reihe von regionalen Klimamodellsimulationen (z.B. aus dem Ensembles-Projekt) die allesamt zwar einige Jahre alt sind und auf „alte“ globale Modellsimulationen (IPCC 2011) aufbauen, aber die spezifischen Eigenschaften, Fähigkeiten und Unzulänglichkeiten dieser Modelle sind aus zahlreichen Untersuchungen bekannt.

WEG 1a

Eine klare Innovation wäre ein **regionales Klimamodell** zu wählen, das eine **volle Kopplung**, d.h. komplette Simulation, des Mittelmeeres beinhaltet. Dabei bleiben zwar die modellinternen Schwächen/Unsicherheiten in der Simulation des Niederschlags auf Tagesbasis bestehen, aber es wären gewisse Verbesserungen in der Abbildung der atmosphärischen Zirkulation über dem Mittelmeer zu erwarten.

Stärken und Schwächen Weg 1a

Voll gekoppelten Regionalmodell können Verbesserungen in der Abbildung der für Vb-Ereignisse relevanten Prozesse mit sich bringen, wie zum Beispiel über die Fähigkeit zur Simulation der Lee-Zyklogense über den nördlichen Meeresflächen der Adria bzw. des Mittelmeeres und der damit verbundene Zugbahnsteuerung. Hier erwarten wir einen Mehrwert gegenüber den nicht-gekoppelten Regionalmodellen, speziell für die Fragestellung der Vb-Zyklonen im sich erwärmenden Klima (und Ozean).

Solche voll gekoppelten Modelle gibt es derzeit aber noch nicht, sie werden gerade z.B. in Deutschland und Frankreich entwickelt und getestet. Eine seriöse Abschätzung, wann diese Modelle fertig entwickelt- und entsprechend verifizierte Simulationen verfügbar sind ist schwierig, vermutlich erst frühestens ab 2015.

Bei der Festlegung auf vorhandene (nicht voll gekoppelte-) **regionale Klimamodelle (WEG 1)** bleibt das generelle Problem den regionalen Niederschlag auf Tagesbasis richtig zu simulieren. Um diese Schwäche zu umgehen, kann wie folgt vorgegangen werden:

WEG 2

Die Zugbahnen werden aus dem regionalen Modell direkt bestimmt, aber für den Niederschlag wird - nach einer Niederschlags-Evaluierung für alle Vb-Ereignisse - eine **Bias-Korrektur** angewendet. Bei einer Bias-Korrektur wird für jeden Gitterpunkt aus dem Modell der simulierte Wert mit dem beobachteten Wert verglichen um daraus eine systematische Abweichung zu bestimmen. Diese Korrekturfunktion wird dann auf alle Simulationen angewandt. Diese Korrektur könnte auf bestehende Verfahren aufbauen, müsste aber auf die Gegebenheiten im Alpenraum bzw. in Österreich optimiert werden. Zum Beispiel könnte diese Korrektur in Abhängigkeit von der vorherrschenden Wetterlage für bestimmte klimatologische Niederschlagsregionen entwickelt werden. Eine ähnliche Korrekturmethode wird beispielsweise zur Zeit am DWD (Abteilung f. Hydrometeorologie) für Deutschland entwickelt und getestet.

Ein weiterer, wichtiger Aspekt in der Niederschlagskorrektur ist, dass bei den vorliegenden Korrekturmethode für Niederschlag nicht die dahinter stehenden unterschiedlichen Prozesse berücksichtigt werden, hier besteht also noch Entwicklungspotential.

Stärken und Schwächen Weg 2

Die Anwendung einer Fehlerkorrektur auf die Ergebnisse regionaler Klimamodellsimulationen wird von der Fachwelt sehr unterschiedlich bewertet. So gibt es kritische Stimmen die der Meinung sind, dass die abgeleiteten Zusammenhänge nicht zwingend in Raum und Zeit erhalten bleiben bzw. diese notwendige Voraussetzung gar nicht exakt überprüfbar ist. Auf der anderen Seite bestehen von den globalen Klimamodellsimulationen Unsicherheiten die zum Teil größere Auswirkungen haben als die Korrekturen selbst.

Auf jeden Fall führt die Anwendung einer Bias-Korrektur zur Reduktion des mittleren Fehlers.

Allerdings können für unterschiedliche Niederschlagsprozesse bzw. Niederschlagstypen unterschiedliche Fehler im Modell auftreten und damit spezifischere Korrekturen notwendig sein. Diese Lösung dieser Aufgabe ist aber ein neues und nicht triviales Thema.

Bei Verwendung von „einfacheren“ Korrekturmethode ist diese Variante vom Kosten/Nutzen Aspekt als günstig zu bewerten.

Gemeinsamer Aspekt für Weg 1, 1b und 2 (Regionalmodelle)

Die Verwendung eines Regionalmodells bringt zusätzliche Unsicherheiten mit sich, da dieses Modell zwar am Rand von einem GCM angetrieben wird, aber im inneren Gebiet die Freiheit hat die atmosphärische Zirkulation zu modifizieren. Dabei ist a priori aber nicht klar wie gut ein bestimmtes Regionalmodell die beobachtete Zirkulation überhaupt wiedergeben kann, oder ob hier ein zusätzlicher, modellbedingter Fehler eingebracht wird. Die vorgeschlagene Option 1, 1b und 2 geht daher stets von der Annahme aus, dass die Zirkulation vom Regionalmodell gut simuliert werden kann.

Wetterlagenklassifikationen und Trackingmethoden sind im Allgemeinen nicht für die Auflösung von Regionalmodellen entwickelt worden. Vorhandene Prozeduren müssten für diese hohe Auflösung entwickelt und getestet werden.

WEG 3

Eine dritte - ganz andere - Strategie ist auf regionale Klimamodellsimulationen zu verzichten und direkt Simulationen **globaler Klimamodelle** zu nutzen.

Die derzeitige räumliche Auflösung dieser Modelle (~150km in Mitteleuropa) ist allerdings zu grob bzw. die darin implementierten physikalischen Parametrisierungen zu stark vereinfacht um aus dem Modell direkt Aussagen über Niederschlag auf Tagesbasis zu tätigen.

Die Stärke der Modelle liegt aber in der Simulation der großräumigen Zirkulation und der Zugbahnen, wenn auch hier natürlich noch gewisse Schwächen existieren wie z.B. in der Abbildung von blockierenden Wetterlagen (im Allgemeinen blockierende Hochdruckgebiete). Gerade jetzt werden für den anstehenden IPCC Report 2013 neue globale Klimamodellsimulationen mit einer relativ hohen Auflösung von ca. 80km gerechnet. Diese neuen Simulationen enthalten darüber hinaus auch neue Klimasubsysteme wie z.B. einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf und sind vielversprechende Werkzeuge für Untersuchungen der Zirkulation im Klimawandel. Die Leistungsfähigkeit und der Mehrwert der neuen höher aufgelösten Globalmodelle sind aber noch nicht untersucht. Im Vergleich dazu sind die modellspezifischen Eigenschaften der „alten“ Modellläufe aus zahlreichen Untersuchungen hinlänglich bekannt und es gibt die Möglichkeit die eigenen Ergebnisse mit anderen Untersuchungen in Kontext zu setzen.

Bei Verwendung von globalen Klimamodellsimulationen können die **Zugbahnen und Wetterlagen** direkt aus dem Globalmodell ausgewertet und verwendet werden.

Um die in Punkt 2 und Punkt 3 beschriebene Niederschlagsproblematik zu umgehen, muss ein statistisches Downscaling, d.h. eine statistische Ableitung des Niederschlags aus den Wetterlagen erfolgen. Um hier einen hohen Zusammenhang zu den regionalen Niederschlagsmustern zu erhalten, empfiehlt es sich eine Klassifikation abzuleiten die auf das Untersuchungsgebiet hin optimiert und stark wirkungsorientiert (Gebietsniederschläge) entwickelt wird. Hier kann zum Teil auf bestehende Verfahren aus der COST733-Initiative zurück gegriffen werden, die Optimierung hinsichtlich der Wirkung erfordert aber trotzdem noch einen wesentlichen Arbeitsaufwand.

Sowohl die ZAMG (Beteiligt in COST733) als auch der DWD verfügen über die notwendige fachliche Expertise um ein solches statistisches Downscaling über Wetterlagenklassifikationen durchzuführen.

Stärken und Schwächen (Weg 3)

Der Vorteil dieser Variante liegt in der Minimierung der Unsicherheiten in der Klimamodellkette und in der klaren und nachvollziehbaren Methodik. Darüber hinaus besteht ein günstiges Kosten-Nutzen Verhältnis.

Die Schwäche liegt ganz klar in der Auflösung der globalen Zirkulationsmodelle hinsichtlich der räumlichen Abbildung relevanter Details, die als Randbedingungen für Vb-Ereignisse wichtig sein könnten wie z.B. der Alpenbogen oder das Mittelmeer/Adria. Diese Aussage bezieht sich in erster Linie auf den Zugbahnaspekt im Bereich der Alpen. Aber auch der lokal-skalige Niederschlag müsste mit statistischen Methoden aus diesen groben Feldern abgeleitet werden. Dies bedeutet einen großen Skalensprung.

Die GCM Simulationen aus AR4 sind leicht und rasch verfügbar, die neueren Simulationen für AR5 sind zur Zeit noch nicht vollständig erhältlich, hätten aber eine höhere räumliche Auflösung (~80km).

Vorhandene Wetterlagenklassifikationsalgorithmen und Tracking-Algorithmen sind für die räumliche Auflösung von GCMs entwickelt und optimiert worden.

Für die Untersuchung von zukünftigen Niederschlagsänderungen müssen verschiedene Wetterlagenklassifikationen getestet und die Beste noch an die spezifische Fragestellung angepasst werden – ein nicht unerheblicher Arbeitsaufwand.

Ist die Erweiterung der Fragestellung sinnvoll?

⇒ Erweiterung von Extremniederschlägen durch Vb-artige Wetterlagen auf zirkulationsbedingte Niederschlags- und Trockenextreme.

Im Rahmen einer Arbeitsbesprechung mit potentiellen Projektpartnern entstand die Idee, nicht nur extreme Niederschläge sondern auch Trockenphasen im Klimawandel - unter dem Gesichtspunkt der Zirkulationsänderung zu untersuchen.

Beschränkungen/Vorteile: Bei dieser Variante könnte und müsste der Fokus zwar auf wesentlich größere Gebiete in Mitteleuropa ausgedehnt werden, aber gleichzeitig rückt dabei die spezifische Fragestellung der Vb-Zugbahnen und damit verbundenen Hochwassergefahr zunehmend in den Hintergrund. In diesem Fall müssten globa-

lere (großräumigere) Methoden angewandt werden, die nicht auf die spezifische Vb-Fragestellung hin optimierbar sind bzw. auch nicht für ein bestimmtes Untersuchungsgebiet optimiert werden können.

Des Weiteren kann in der gleichzeitigen Untersuchung von Niederschlags- und Trockenextremen über ein statistisches Downscaling (z.B. Wetterlagenklassifikation) die Methode nicht auf beide Aspekte hin optimiert werden. Prinzipiell wäre es möglich Trockenphasen und Niederschläge unabhängig voneinander zu untersuchen oder innerhalb einer Studie zwei unterschiedlichen Analysemethoden anzuwenden.

Lösung: Eine sinnvoller und innovativer Weg – um die Fragestellung für größere Gebiete in Europa auf Niederschlags- und Trockenextreme zu erweitern - wäre neue Simulationen mit einem voll gekoppeltes regionales Klimamodell zu rechnen. Dabei sollte der Niederschlag möglichst direkt aus dem regionalen Modell verwendet werden. Dies setzt eine zur Zeit noch nicht vorhandene, hohe Güte der Regionalmodelle in der Simulation des Niederschlags auf Tagesbasis voraus.

Aufwand: Diese Variante ist vom Umfang her deutlich höher einzustufen (Faktor 2) als die realisierbaren Optionen 2 und 3. Dazu müssten weitere kompetente Partner aus der regionalen Modellierung für das Projekt gewonnen werden, der Startpunkt für ein solches Projekt würde erst frühestens bei Verfügbarkeit und nach der Verifikation der Leistungsfähigkeit entsprechender gekoppelter Modelle möglich sein (frühestens 2015). Auch müssten klare Verbesserungen in der Simulation des Niederschlages erkennbar sein.

5.3 Analyse der zu Grunde liegenden Datensätze und Modelle

WEG 3**Ansatz über globale Zirkulationsmodelle (IPCC4, 2011)**

- + Modelle sind mehrfach geprüft und Simulationsdaten verifiziert, weniger Überraschungen zu erwarten
 - + Viele Studien und Ergebnisse nutzbar um auf bestehendes Know-How aufzubauen oder um Ergebnisse in Kontext zu setzen
 - + Modellstärken und Schwächen sind aus anderen Studien bekannt, Auswahl der besten Modelle möglich
 - Niederschlag kann aus GCMs für regionale Fragestellungen nicht direkt genutzt werden. Statistisches Downscaling zwingend erforderlich.
 - + Räumliche Auflösung gut geeignet für ein statistisches Downscaling von Gebietsniederschlägen über eine Wetterlagenklassifikation
 - + Beschränkungen in der räumlichen Auflösung sind für generelle Zirkulationsanalysen wenig relevant.
 - Jedoch werden manche relevante Prozesse/Faktoren (Alpen, Lee-Zyklogeneese, Feuchtetransporte) vom Modell nicht ausreichend erfasst. Es kann zu Defiziten in bestimmten Zugbahncharakteristiken im Bereich der Alpen kommen.
 - Es ist bekannt dass z.B. blockierende Wetterlagen unterschätzt werden oder die atmosphärische Feuchte in Mitteleuropa Fehler aufweist.
 - Nicht jedes Globalmodell ist für eine Untersuchung der Zirkulation über Europa gleich geeignet.
 - Globale Zirkulationsmodelle weisen in der Abbildung bestimmter Zirkulationsformen spezifische Stärken und Schwächen auf.
- ! Regionale Klimamodelle werden durch GCMs angetrieben und sind daher von Unzulänglichkeiten der GCMs in der Zirkulation genauso betroffen*

WEG 3**Ansatz über globale Zirkulationsmodelle (IPCC5, 2013)**

- + *Daten haben höhere Auflösung als GCM2011 und berücksichtigen zum Teil neue Klimasubsysteme, Mehrwert unbekannt*
- + *Hoher Innovationsgehalt durch Verwendung neuer Simulationen (IPCC5)*
- + *Statistisches Downscaling ist durch höhere Auflösung schärfer hinsichtlich des regionalen Niederschlages*
- *Statistisches DS ist durch höherer Auflösung komplexer da Wetterlagenklassifikation mit zunehmender Auflösung indifferenter wird (mehr Fälle mit geringerer Differenzierung).*
- *Fähigkeit der Modelle ist derzeit noch unbekannt und Mehrwert zu 2011 ungewiss. Unsicherheit!*
- *Kein Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Arbeiten möglich*
- *Mehrwert der höheren Auflösung gegenüber IPCC4 für die Simulation der Zirkulation unbekannt*

WEG 1,2**Ansatz über regionale Klimamodelle - Allgemeines**

- + *Höhere Auflösung als GCM's, dadurch Mehrwert bei komplexer Topographie (Alpen)*
- + *Mehrwert bezüglich Feuchteadvektion aus dem Mittelmeerraum im Vergleich zu GCMs*
- + *Höhere räumliche Auflösung dadurch bessere Abbildung der Zugbahncharakteristiken*
- + *Explizite Berücksichtigung von Prozessen die bei Vb-Wetterlagen relevant sind*
- *Neue Unsicherheiten durch die Möglichkeit die Zirkulation modellbedingt weiter zu modifizieren*
- *Regionaler Niederschlag im Gegensatz zu GCMs direkt verwendbar, wenn auch mit Fehler behaftet. Anwendung einer Bias-Korrektur möglich.*
- *Durchführung eines indirekten, statistischen Downscalings für Niederschlag ist grundsätzlich möglich. Das Downscaling könnte aber auch gleich direkt auf das GCM angewandt werden, daher hier kaum Mehrwert.*
- *Statistisches DS ist durch höherer Auflösung komplexer da Wetterlagenklassifikation mit zunehmender Auflösung indifferenter wird (mehr Fälle mit geringerer Differenzierung).*
- *Wetterlagenklassifikationen und Tracking-Prozeduren sind nicht für die Auflösung von RCMs konzipiert, vor allem für das Tracking wäre ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig.*

**Regionale Klimamodelle ohne Mittelmeerkopplung
(IPCC4, 2011)****WEG 1**

- + Eine Vielzahl von Modellsimulationen bereits verfügbar
 - + Daten mehrfach geprüft und verifiziert, wenig Überraschungen zu erwarten
 - + Viele Studien und Ergebnisse nutzbar um auf bestehendes Know-How aufzubauen oder um zu vergleichen
 - + Modellstärken und Schwächen sind aus anderen Studien bekannt, Auswahl der besten Modelle möglich
 - +/- Innovationsgehalt durch Antrieb mit GCMs 2011 mittel
 - Mittelmeer nicht voll gekoppelt, Potential gegenüber GCMs in der Vb-Fragestellung wird nicht voll ausgenutzt.
-

**Regionale Klimamodelle ohne Mittelmeerkopplung
(IPCC5, 2013)****WEG 1**

- + Hoher Innovationsgehalt durch Antrieb mit GCM aus IPCC5, 2013
 - + Späte Verfügbarkeit und/oder hoher Aufwand bei Eigenleistung
 - Modellsimulationen nicht verfügbar, müssen erst gerechnet werden
 - Alle Nachteile die auch für GCMs „neu“ gelten (IPCC5). Besonders hinsichtlich der Unsicherheiten über die Güte und Zuverlässigkeit der Modellläufe, da diese erst verifiziert werden müssen
-

Regionale Klimamodelle mit voller Mittelmeerkopplung**WEG 1a**

- + *Verbesserung in der Abbildung der Zirkulation und Zugbahnen über dem Mittelmeer/Adria durch explizite Simulation der Meere zu erwarten.*
- *Derartige Simulationen gibt es aber noch nicht*
- *Entwicklung entsprechender Modelle nicht abgeschlossen, große Unsicherheiten bezüglich der Modellgüte und Verfügbarkeit von entsprechenden Daten.*
- *Vermuteter Mehrwert muss erst bestätigt werden, Gefahr von langen Entwicklungszeiten*
- *Komplexe Berechnung bei voller Kopplung, sehr ressourcenaufwendig, kann nur mit entsprechenden Partnern selbst durchgeführt werden.*

5.4 Arbeitshypothesen für eine Vb-Untersuchung

Eine Untersuchung von Veränderungen im Niederschlag, die durch Modifikationen in der atmosphärischen Zirkulation (Wetterlagen, Zugbahnen) verursacht werden, baut auf folgende Arbeitshypothesen auf. Diese Arbeitshypothesen bilden die Grundlage für den gewählten Forschungsansatz und sind fachlich fundierte Annahmen die so nur bei entsprechender Gültigkeit angewendet werden dürfen.

A: Niederschlag und Wetterlage

Bestimmte Typen von Niederschlagsereignissen werden durch bestimmte, wiederkehrende Muster der atmosphärischen Zirkulation verursacht.

Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation führen so zu Veränderungen im Niederschlag.

Bestimmte Ereignistypen der atmosphärischen Zirkulation wie z.B. Tiefdruckgebiete auf Vb-Zugbahnen, sind systematisch mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich der Dauer und Menge von Niederschlagsereignissen verknüpft.

Für Mitteleuropa ist im Fall von Niederschlagsereignissen – die in Verbindung mit Vb-artigen Zugbahnen stehen - nicht die strikte Einhaltung der Zugbahn das entscheidende Kriterium, sondern die spezielle Lage eines Tiefdruckgebiets östlich einer Gebirgskette. In Erweiterung dazu ist jedoch das Vorhandensein bestimmter charakteristischer

Eigenschaften von Bedeutung, wie sie in Tabelle 1 zusammengefasst sind (z.B. Abtropfen, Advektion feuchtmaritimer Luftmassen aus dem Mittelmeer).

B: Globale Klimamodelle

Das derzeit bestmögliche Mittel um großräumige Veränderungen der Zirkulation im Klimawandel abschätzen zu können sind globale Zirkulationsmodelle.

Es gibt zumindest ein Klimamodell, das die beobachtete atmosphärische Zirkulation über Europa gut wiedergeben kann. Dies gilt besonders in Hinsicht auf die Häufigkeiten bestimmter, relevanter Wetterlagen und Zugbahnen, aber auch für richtige Simulation der interannualen bis dekadischen Variabilität und Blocking-Aktivität.

C: Regionale Klimamodelle

Es gibt zumindest ein regionales Klimamodell, das - aufbauend auf ein globales Zirkulationsmodell - die beobachtete atmosphärische Zirkulation über Europa gut wiedergeben kann. Dieses Regionalmodell kann darüber hinaus auch die räumliche Verteilung und Menge des Niederschlags im Untersuchungsgebiet richtig wiedergeben.

Dieses Regionalmodell kann lokale/regionale Rückkoppelungen wie z.B. Bodenfeuchte/Verdunstung/Niederschlag besser als das GCM erfassen und bringt dadurch einen Mehrwert für die gleichzeitige Untersuchung der Veränderung der Zirkulation und des Niederschlags.

D: Biaskorrektur für den Niederschlag aus regionalen Klimamodellen:

Das regionale Klimamodell kann die atmosphärische Zirkulation richtig wiedergeben, weist aber Fehler in der Simulation des Niederschlages auf. Dieser Fehler ist nicht von der Zirkulation abhängig sondern hängt nur von den lokalen Gegebenheiten ab. Dadurch ist es möglich eine Korrekturfunktion an jedem Punkt abzuleiten, dieser funktionale Zusammenhang ändert sich darüber hinaus nicht in einem verändernden Klima.

E: Regionale, voll gekoppelte Klimamodelle

Ein mit dem Ozean (Mittelmeer) gekoppeltes, regionales Klimamodell erfasst die vollständige Wechselwirkung zwischen dem Mittelmeer bzw. der Adria und der Atmosphäre. Eine Erhöhung der Wassertemperatur im Mittelmeer durch den Klimawandel führt zu einer zusätzlichen Veränderung der Niederschlagsereignisse bei Auftreten bestimmter Zirkulationsformen (z.B. Vb-Wetterlage) und ist ein bedeutender Faktor für einzelne Mechanismen die bei Vb-Wetterlagen zum Tragen kommen (z.B. Lee-Zyklogese, Steuerung der Zugbahn)

F: Fernwirkungsmechanismen

Häufigkeiten von bestimmten Wetterlagen und Charakteristika von Zugbahnen werden durch die großräumige atmosphärische Zirkulation gesteuert. Diese atmosphärischen Fernwirkungsmechanismen sind dadurch für die interannuale bis dekadische Variabilität von Niederschlag und Hochwasserrisiko von Bedeutung.

G: Klimawandel

Im Klimawandel könnte es zu Verschiebungen von bestimmten, relevanten Wetterlagen bzw. Zugbahnen innerhalb eines Jahres kommen. Eine Untersuchung auf saisonaler oder halbjährlicher Basis ist daher abzusehen.

Im Klimawandel könnte es durch Veränderungen im atmosphärischen Wasserdampf zu einer Veränderung des potentiellen Niederschlagswassers kommen. Die ausgewählte bzw. entwickelte Wetterlagenklassifikation kann den Zusammenhang von atmosphärischem Wasserdampf und regionalem Niederschlag abbilden.

Alle aus der Vergangenheit abgeleiteten Zusammenhänge bleiben auch in einem veränderten Klima gültig.

6 PROJEKTKONZEPTE zur Untersuchung der Fragestellung

Im folgenden Abschnitt werden, aufbauend auf die zuvor erarbeiteten Erkenntnisse, unterschiedliche Konzepte für die Umsetzung der wissenschaftlichen Untersuchung der Vb-Problematik in Form von Forschungsprojekten vorgeschlagen. Diese Konzepte sind je nach gesetzter Priorität und Sinnhaftigkeit unterschiedlich stark ausformuliert.

Darüber hinaus werden zwei weitere Varianten angesprochen, die ein großes wissenschaftliches Potential bieten, aber keine Aussagen für die Klimazukunft zulassen. Diese Varianten werden deshalb nur kurz erläutert. Der angegebene Buchstabe in den Varianten gibt auch die Reihung (bzw. subjektive Wertung) - aus der Sicht - der Autoren an.

OPTION A - Globale Klimamodelle, statistisch/dynamisch

⇒ **Empfohlene Variante für eine zeitnahe Umsetzung**

Fragestellung: Was wird untersucht?

Untersuchung der Veränderung der Zirkulation über Mitteleuropa im Klimawandel und der damit verbundenen Änderung der regionalen Starkniederschlagsereignisse auf Tagesbasis. Der Fokus liegt dabei auf den relevanten Vb-artigen Starkniederschlagsereignissen im Bereich der Ostalpen und den angrenzenden Gebieten.

Ziele: Welche Ergebnisse werden angestrebt?

1. Entwicklung eines statistischen Downscalings über eine weiter zu entwickelnde und an die Vb-Problematik angepasste Wetterlagenklassifikation.
2. Bestimmung der Zirkulationsmuster (Wetterlagen), die für starke Gebietsniederschläge von Relevanz sind.
3. Detektieren der Zugbahncharakteristiken über Europa für die Vergangenheit
4. Untersuchung der natürlichen Variabilität und Veränderung Vb-Zugbahnen in der Vergangenheit.

5. Bestimmung der Relevanz von bestimmten Wetterlagen und Zugbahnen am Starkniederschlagsgeschehen in der Vergangenheit.
6. Aussagen über die Unsicherheiten und Bandbreite der für die Zukunft abgeleiteten Ergebnisse.
7. Untersuchung der Veränderung von Zugbahncharakteristiken und niederschlagsrelevanten Wetterlagen im Klimawandel.
8. Analyse und Bewertung des Risikos von starken Gebietsniederschlägen für die Zukunft unter dem Aspekt der Zirkulationsänderung im Klimawandel.

Abgrenzung: Was soll nicht untersucht werden?

1. Es erfolgt keine Modellierung der hydrologischen Abflüsse
Option für zukünftige Zusammenarbeit mit Hydrologen
2. Es werden keine Trockenphasen untersucht (aber in Option B und C)

Gebietsabgrenzung: Für welche Gebiete kann eine Aussage abgeleitet werden?

Das Untersuchungsgebiet für die Zirkulationsänderungen ist Mitteleuropa, der Fokus in der Untersuchung des Niederschlags liegt auf dem östlichen Alpenraum (Süddeutschland, Österreich und angrenzende Bereiche).

Methodik: Mit welchen Mitteln sollen die Ziele erreicht werden?

Aufbauend auf die Simulationen globaler Klimamodelle sollen ein Tracking zur Bestimmung der Zugbahncharakteristika und eine angepasste Wetterlagenklassifikation durchgeführt werden. Über die Wetterlagenklassifikation wird ein statistisches Downscaling für die Ableitung der Gebietsniederschläge der Zukunft gemacht.

Notwendige und zum Teil vorhandene Datengrundlagen:

GCM-Simulationen aus IPCC 2007: UKMO-HadGEM1, CGCM3.1(T63), ECHAM5/MPI-OM, Szenarien A1B/B1/A2 für bestes Modell. (alternativ Modelle aus AR5)

Wetterlagenklassifikationsprozedur aus COST733

Trackingroutine aus dem Tracking-Vergleichsprojekt IMILAST, ohne Modifikationen

Gegitterte (1km) tägliche Niederschlagswerte für Österreich von 1950-2005 (Startclim, Schöner et.al, 2003)

Gegitterte (5km) tägliche Niederschlagswerte für Deutschland und Teile Österreichs 1957-2006 (DWD)

Daten die notwendig-, aber derzeit noch nicht vorhanden sind:

Gegitterte, tägliche Niederschlagsfelder für den östlichen Alpenraum können im Projekt selbst für das gesamte Untersuchungsgebiet – d.h. auch für Österreich und die angrenzenden Gebiete – analog HYRAS/DWD erzeugt werden. Der Aufwand für die Schaffung und Verifizierung eines solchen Datensatz beträgt aber nach Einschätzungen der DWD-Hydrometeorologie 18 bis 24 Monate. Der Aufwand ist damit im Verhältnis zur Gesamtprojektdauer relativ hoch.

Zur Zeit wird im Rahmen des EU-Projektes EURO4M ein täglicher Niederschlagsdatensatz geschaffen (5km Gitterwerte, 1971-2010, Alpenraum). Ab dem Frühjahr 2012 steht eine erste Version dieses Datensatzes zur Verfügung und könnte nach telefonischer Auskunft von Christoph Frei (Meteo-Schweiz, 23.6.2011) für diese Untersuchung genutzt werden. Dieser Datensatz enthält allerdings nur jenen Teil Bayerns südlich der Donau (Höhe Passau) und beginnt erst nach 1971.

Es wird empfohlen aus den beiden Niederschlagsdatensätzen der ZAMG (Startclim) und des DWD (Hyras), einen gemeinsamen Hybrid Datensatz mit 5km Auflösung zu rechnen (4 Monate Arbeitsaufwand), falls das Gebiet des Meteo-Schweiz Datensatzes (EURO4M) zu klein erscheint (siehe folgender Absatz).

Arbeitspakete:

- AP0: Projektmanagement, Berichtswesen (4PM), Abschlusskonferenz (1PM)
- AP1: Schaffung eines verifizierten, täglichen Hybrid-Niederschlagsdatensatz (4PM)
- AP2: Tracking und Klassifizierung der Zugbahnen, Reanalyse + 3xKontrolllauf, Vb/Zugbahnen-Katalog (9PM), Verifikation
- AP3: Weiterentwicklung einer regionalen Wetterlagenklassifikation f. großflächige Starkniederschlagsereignisse aus der Beobachtung (14PM)
- AP4: Gemeinsame Untersuchung der Relevanz von Wetterlagen und Zugbahnen für den Niederschlag, Vb-Relevanz, Analyse Vergangenheit (5PM)
- AP5: Tracking und Klassifizierung Zugbahnen, Zukunft 1 GCM mit 3 Szenarien (3PM)
- AP6: Wetterlagenklassifikation / statistisches Downscaling Niederschlag, Zukunft (4PM)
- AP7: Untersuchung der Veränderung der Zugbahncharakteristika, Zukunft (4PM)
- AP8: Untersuchung der Veränderung niederschlagsrelevanter Wetterlagen und Analyse der damit verbundenen Niederschlagsänderungen, Zukunft (4PM)
- AP9: Endbericht, Vortragstätigkeit, Publikation (4PM)

Untersuchungszeitraum: 1951-2006 sowie 2006-2060

Dauer: 2,4 Jahre (29 Monate Projektdauer, 56PM Arbeitszeit)

Innovationsgehalt: Erstmalige Durchführung einer kombinierten Methodik von dynamischen Zugbahnaspekten und stationären Zirkulationsmustern.

Erstmalige Analyse von niederschlagsrelevanten Wetterlagen unter dem Fokus der besonders relevanten Vb-Ereignisse.

Untersuchung der Relevanz von Starkniederschlagsereignissen aus Zugbahnanalysen.

Bestimmung der Veränderungen von Starkniederschlagsereignissen im Klimawandel.

Schaffung eines grenzübergreifenden, täglichen, Niederschlagsdatensatzes.

Schaffung eines Katalogs von Zugbahnen und Wetterlagen über Mitteleuropa mit dem Fokus auf Starkniederschlagsereignisse.

Projektpartner:

Für die Umsetzung wird eine bilaterale Kooperation des **DWD** (Hydrometeorologie) und der **ZAMG** Klimaforschung (Abteilung Klimamodellierung-Klimavariabilität) vorgeschlagen.

Für die Entwicklung der Wetterlagenklassifikation erscheint eine informelle Kooperation mit der Uni-Augsburg als sinnvoll. Die ZAMG war selbst in der COST733-Initiative (Harmonisierung Wetterlagenklassifikationen) tätig. Der DWD beschäftigt sich selbst ebenfalls seit geraumer Zeit mit Wetterlagenklassifikationen.

Für die Schaffung eines gegitterten, hybriden Beobachtungsdatensatz ist die Expertise des DWD (Abteilung für Hydrometeorologie) von Bedeutung.

Für die Durchführung eines Trackings bestehen seitens der ZAMG gute Kontakte zum Helmholtz-Zentrum-Geesthacht sowie nach Reading.

Deliverables:

1. Zugbahnenkatalog für Mitteleuropa mit Van-Bebber'schen Zugbahntypen wie Vb
2. Wetterlagenkatalog für Mitteleuropa mit besonderer Relevanz für starke Gebietsniederschläge im Untersuchungsgebiet
3. Bestimmung der Veränderungen der Zirkulation, der Zugbahnen sowie der Starkniederschläge in Vergangenheit und Zukunft
4. Gegitterter Hybrid-Niederschlagsdatensatz für Österreich/Deutschland/Tschechien auf Tagesbasis für 1951-2006
5. Katalog mit planungsrelevanten Erkenntnissen und Ergebnissen aus der Untersuchung und daraus abgeleitete Empfehlungen für Planungsmaßnahmen politischer Entscheidungsträger, Unsicherheitenanalyse
6. Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachvorträge
7. Endbericht
8. Abschlussveranstaltung zur Präsentation der Erkenntnisse und Empfehlungen

OPTION B - Regionale Klimamodelle, dynamisch**⇒ Alternative Variante zu A**

Diese Variante ist hinsichtlich der Fragestellung und Zielsetzungen stark an die oben vorgeschlagene Option A angelehnt. Ein grenzübergreifender Niederschlagsdatensatz ist auch hier neu zu entwickeln.

Der große Unterschied zur Option A besteht in der Verwendung von regionalen-, anstelle der globalen Klimamodellsimulationen. Diese Läufe aus dem Ensembles-Projekt liegen bereits jetzt am DWD vor.

In dieser Variante werden keine Wetterlagen ausgewertet und der Niederschlag direkt aus dem regionalen Klimamodellen verwendet. Durch die höhere Modellauflösung von 25km, kann der Fokus besser auf die Vb-Zugbahnen gelegt werden als es in Variante A der Fall wäre. Hier wird aufgrund des Tracking-Aufwands allerdings nur das A1B-Szenario für die Zukunft betrachtet.

Arbeitspakete:

- AP0: Projektmanagement, Berichtswesen (3PM), Abschlusskonferenz (1PM)
- AP1: Schaffung eines verifizierten, täglichen Hybrid-Niederschlagsdatensatz (4PM)
- AP2: Entwicklung/Anpassung Trackingroutine für Regionalmodelle (10PM)
- AP3: Tracking Vergangenheit (Reanalyse/3xKontrolllauf/3xHindcast) (4PM)
- AP4: Klassifizierung Zugbahnen Vergangenheit, Verifikation RCMs, Zugbahnkatalog (5PM)
- AP5: Untersuchung der Relevanz bestimmter Zugbahntypen für den Niederschlag, Vb-Relevanz, Analyse Vergangenheit (5PM)
- AP6: Tracking und Klassifizierung Zugbahnen Zukunft, 3x1 RCM-Szenario (4PM)
- AP7: Untersuchung der Veränderung der Zugbahnen und Analyse der damit verbundenen Niederschlagsänderungen, Zukunft, 3 RCMs (4PM)
- AP8: Endbericht, Vortragstätigkeit, Publikation (3PM)

Untersuchungszeitraum: 1957-2002 sowie 2002-2057

Dauer: 2,5 Jahre (44PM)

Innovationsgehalt: Erstmalige Analyse der Zugbahnen in verschiedenen RCMs für Mitteleuropa. Erstmalige Analyse der Fähigkeit von Regionalmodellen Starkniederschlagsereignisse - die in Zusammenhang mit bestimmten Zugbahntypen stehen - simulieren zu können. (Absicherung der Aussagen für die Zukunft)

Erstmalige gemeinsame Betrachtung von Zugbahntypen und damit verbundenen Starkniederschlagsereignissen in der Klimazukunft.

Untersuchung der Relevanz von bestimmten Zugbahntypen für starke Niederschlagsereignisse.

Bewertung:

Insgesamt sind die **Optionen A und B als gleichwertig einzustufen**, vor allem hinsichtlich der fachlichen Möglichkeiten bzw. Erwartungen. In der Variante A könnte aber wesentlich mehr Zeit für die Auswertung und Interpretation der Fragestellung aufgewendet werden. Hier, in Variante B wird ein großer Teil der Zeit dazu verwendet um eine Tracking-Routine für Regionalmodelle zu entwickeln bzw. eine solche Trackingroutine wiederholt auf verschiedene Läufe der RCMs anzuwenden.

Vorteil gegenüber A: Regionales Klimamodell: Bessere Berücksichtigung der Vb-Zugbahn Aspekte im Bereich der Alpen – allerdings erscheint die Auflösung von 25 km noch immer als relativ grob und das Mittelmeer ist in dieser Modellgeneration nicht voll gekoppelt. Robustere Aussagen für zusammenhängende, mehrtägige Niederschlagsereignisse möglich. Physikalische und zeitliche Kohärenz von Niederschlag und Zugbahn auch in der Betrachtung der Zukunft. Im Projekt A ist dieser Kohärenz nur in der Vergangenheit gegeben (Reanalyse).

Nachteil gegenüber A: Hoher Aufwand für die Entwicklung und Durchführung des Trackings im Projekt! Keine Aussagen über Zirkulationsänderungen (Wetterlagenaspekt) im Klimawandel. Abhängigkeit von den Regionalmodellen beim Niederschlag in der Zukunft.

Empfehlung für B: In absehbarer Zeit (ca. 5-7 Jahre) ist mit der Verfügbarkeit einer neuen regionalen Klimamodellgeneration zu rechnen, die eine vollständige Mittelmeerkopplung enthalten. Erst dadurch kann der Vorteil der regionalen Klimamodelle gegenüber den globalen Modellen in der Vb-Fragestellung voll ausgespielt werden.

Des Weiteren ist nicht klar wie groß der Mehrwert der aktuellen RCMs gegenüber den GCMs wirklich ist. Die großräumige Zirkulation wird schließlich als Antrieb am Rand immer noch vom GCM vorgegeben wird und die Alpen sind im RCM mit 25km Auflösung noch unzureichend abgebildet. Deshalb wird empfohlen mit dieser Variante abzuwarten und eine detaillierte Zugbahn-Analyse aus verschiedenen RCMs erst nach Verfügbarkeit von voll-gekoppelten Modellen durchzuführen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Option A – auch durch den Kosten/Nutzen Faktor – der Option B vorzuziehen.

OPTION C - Voll gekoppelte regionale Klimamodelle, Erweiterung der Fragestellung und Untersuchungsgebiete

⇒ **Umfassende Variante, Erweiterung der Fragestellung auf hydro-meteorologische Extremereignisse, hydrologischer Abflussmodellierung,**

Untersuchung der Zirkulationsänderung und Fernwirkungsmechanismen, Kombination dynamischer und statistischer Ansätze, Ausweitung des Untersuchungsgebietes auf europäische Skala (EU-Variante)

In der letzten Option D wird eine Erweiterung bzw. Verallgemeinerung der Fragestellung vorgeschlagen. Dies beinhaltet die Untersuchung von Trockenextremen und Nie-

derschlagsextremen unter dem Gesichtspunkt der Zirkulationsänderung im Klimawandel in Europa auf Tagesbasis. Dabei soll auch eine hydro-meteorologische Modellierung der Abflüsse für ausgewählte Flusseinzugsgebiete erfolgen, um diese mit Hochwasseraufzeichnung zu vergleichen um dann auch direkte Aussagen für die Veränderungen der Hochwässer in der Klimazukunft zu tätigen.

Als Mittel für die Untersuchung werden regionale Klimamodellsimulationen im Projekt selbst gerechnet, die verwendeten RCMs sind dabei mit dem Mittelmeer voll gekoppelt und sollten bereits so ausgereift sein, dass der Niederschlag auf regionaler Basis direkt verwendet werden kann.

Auf der anderen Seite kann der Zirkulationsaspekt genauer untersucht werden. Dies beinhaltet die Analyse der Zugbahnen und dominanten Wetterlagen aus den Regionalmodellen, sowie sollen die Fernwirkungsmechanismen bestimmt und analysiert werden, welche die zeitliche Variabilität dieser Phänomene steuern.

Untersuchungsgebiet: Europa, Zeitraum: 1900-2100

Zusammenfassend enthält diese Variante **sechs fachliche Schwerpunkte**:

FACHLICHE SCHWERPUNKTE		DATEN
Dynamische Modellierung RCM 1 , voll gekoppelt	Dynamische Modellierung RCM 2 , voll gekoppelt	Aufbauend auf neue AR5 GCM-Simulationen
Untersuchung Zirkulation über Wetterlagen u. Zugbahnanalysen	Untersuchung der natürlichen Variabilität, der Fernwirkungsmechanismen und anthropogenen Beeinflussung	20th Century Reanalysis & NCAR/NCEP Reanalyse
Untersuchung von hydrometeorologischen Extremereignissen : Starkniederschlägen, Trockenphasen	Hydrologische Abflussmodellierung , Analyse Hochwasserreihen Europa	Europäische Niederschlagsdaten gegitert auf Tagesbasis und Abflussdaten (EURO4M, COST901)

Diese Projektvariante ist umfassend und ist vom Aufwand her noch nicht im Detail abschätzbar. Auf jeden Fall müssten mehrere kompetente Partner aus unterschiedlichen Ländern beteiligt werden - das Projekt wäre nur im Rahmen einer **EU-Finanzierung** um zu setzen.

Mögliche fachliche Partnerinstitutionen: ETH Zürich (Schmidli, Frei, Schiemann), Helmholtz-Zentrum Geesthacht (Wagner), Freie Universität Berlin (Ulbrich, Leckebusch), Universität Augsburg (Jacobbeit, Maroun, Sauter), DWD (Fricke, Rudolf, Gratzki, Riediger), ZAMG (Auer, Böhm, Hofstätter), CHMI Tschechien, Physik. Universität Prag (Huth), Meteo-France (AROM-Gruppe), ICTP (Giorgi F, RegCM), Universität Innsbruck (Spötl, Sarnthein), CLM-Community, TU-Wien (Blöschl), Universität Bern (C. Raible), MPI-Hamburg (Jacob), Institute of Hydrology Slovakia (Parajka)

Im Rahmen dieser Variante werden gleichzeitig verschiedene hydrometeorologische Fragestellungen von unterschiedlichen Expertengruppen untersucht. Die unterschiedlichen Fragestellungen sind allesamt über die dahinter liegenden physikalischen Prozesse inhärent miteinander verknüpft. Dadurch ist mit diesem Ansatz nicht nur ein großer Innovationsgehalt gegeben, sondern auch eine immense wissenschaftlichen Leistungsfähigkeit hinsichtlich der zu erwartenden Ergebnisse zu erwarten.

Die **sinnvolle Durchführbarkeit** dieser Variante hängt von der Verfügbarkeit entsprechender voll, gekoppelter Regionalmodelle ab.

OPTION D - Analyse der Vergangenheit, lange Datensätze

D1 (300 Jahre): Verwendung von 300 jährigen Klimasimulationen des Regionalmodells CLM über Europa (GKSS) mit 50km Auflösung (Antrieb mit Echem5, Millennium-Run).

Mit Hilfe dieses Datensatzes kann für einen sehr langen Zeitraum die Veränderung und natürliche Variabilität von Wetterlagen und Vb-Zugbahnen in der Vergangenheit bestimmt werden. Durch Verwendung des regionalen Klimamodells sind darüber hinaus auch einige relevante Randbedingungen für Vb-Zugbahnen (Orographie und Adria- bzw. Mittelmeerabbildung) berücksichtigt.

Mögliche Projektinhalte:

Dynamisches Tracking der Zugbahnen für 1700-2000

Anwendung einer vordefinierten Wetterlagenklassifikation für 1700-2000

Untersuchung der natürlichen Variabilität von Vb-Zugbahnen und Wetterlagen über Europa.

Untersuchung der Veränderungen in den Zugbahnen und Wetterlagen seit Beginn der anthropogenen Beeinflussung (1860).

Bestimmung der großräumigen, atmosphärischen Steuerungsmechanismen.

D2 (140 Jahre): Verwendung der neuen Reanalysedatensätze des NCAR „20th century reanalysis data“ in 220km/6-h Auflösung für den Zeitraum 1871-Gegenwart (Compo et.al, 2006 und 2011, Whitaker et.al, 2004)

Durch Verwendung dieses abgeleiteten Beobachtungsdatensatzes, können sehr ähnliche Fragestellungen wie in D1 untersucht werden. Besonders die Fernwirkungsmechanismen, Zugbahnen und Wetterlagen können hier aber exakter bestimmt werden da es sich hier quasi um Beobachtungsdaten handelt. Des Weiteren kann hier der zugehörige Niederschlag mit berücksichtigt werden (ab 1950) und dadurch die Relevanz von Vb-Ereignissen analysiert werden.

Allerdings ist der Zeitraum wesentlich kürzer als in D1, die Auflösung der Daten ist relativ grob (220km) und auch der menschliche Einfluss seit 1860 gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter kann nicht bestimmt werden.

Beide Varianten D1 und D2 sind gleichwertig, haben aber andere Untersuchungs-Schwerpunkte und spezifische Vor- und Nachteile. Beide beschränken sich auf die Analyse der Vergangenheit.

6.1 Warum sollte diese Fragestellung untersucht werden

Das Niederschlagsverhalten steuert primär die Hochwassergefahr. Aus der Historie ist bekannt, dass viele der großen Hochwässer durch Starkniederschläge verursacht wurden, die in Zusammenhang mit bestimmten Wetterlagen oder Zugbahnen stehen.

Möglichkeit relevanter Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen im Klimawandel durch Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation.

Vb-artige Wetterlagen standen in der Vergangenheit in ursächlichem Zusammenhang mit z.T. großen Hochwässern, diese Wetterlagen bzw. Zugbahn wurde bis dato aber nicht in Zusammenhang mit Niederschlag untersucht.

6.2 Warum sollte diese Fragestellung jetzt untersucht werden

- 1** In den Luftdruckreihen vieler österreichischer Stationen zeigt sich in den letzten 10 Jahren eine signifikante und zum Teil historisch einmalige Veränderung des barometrischen Luftdrucks. Diese Veränderung ist nur auf eine Veränderung in der Häufigkeit von bestimmten Wetterlagen zurück zu führen (Zirkulationsänderung)
- 2** In den letzten 20 Jahren zeigt sich subjektiv eine Zunahme der Häufigkeit von Vb-artigen Zugbahnen, sowie eine Zunahme von meridionalen Zirkulationsformen über dem Alpenraum.
- 3** Auch hat aus der subjektiven Beobachtung und objektiven Messung die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen in bestimmten Jahreszeiten in Mitteleuropa zugenommen.
- 4** Wir befinden uns seit etwa 1980 im Zeitalter des stark anthropogen beeinflussten Klimawandels. Diese 30 Jahre andauernde Episode ermöglicht eine statistisch robuste Untersuchung der Veränderungen durch den Menschen und bildet damit eine gute Basis für die Ableitung von fundierten Aussagen und Empfehlungen für die Zukunft.
- 6** Auch ist in den letzten Jahren eine Reihe von neuen und hochwertigen Datensätzen entstanden, die zur Beantwortung vieler offener Fragen genutzt werden können.
- 7** Aus den erarbeiteten Grundlagen ist zu erkennen, dass die Fragestellung von starkniederschlagsrelevanten Zugbahnen oder Wetterlagen bis dato nicht oder nicht ausreichend untersucht wurde. Viele Fragen sind unbeantwortet, sowohl für die Beobachtungszeit vor 2010 als auch für die Klimazukunft.
- 8** Es besteht ein erheblicher Forschungsbedarf in der kombinierten Untersuchung von hydro-meteorologischen Fragestellungen unter dem Aspekt der Zirkulationsänderung im Klimawandel auf Tagesbasis.
- 9** Das im Rahmen der Machbarkeitsstudie aufgebaute Netzwerk und die erarbeiteten Grundlagen, ermöglichen den raschen Start einer fundierten Untersuchung der Fragestellung, wie sie in der favorisierten Projektvariante A vorgeschlagen wird.

6.3 Welche Argumente sprechen für einen späteren Zeitpunkt

voll gekoppeltes Regionalmodell mit neuen Läufen aus AR5 (frühestens in 5 Jahren)

6.4 Möglichkeiten zur Finanzierung

EU

Eine Finanzierung im Rahmen eines größeren EU-Förderprogramms ist für die Umsetzung der vorgeschlagenen Projektvariante C notwendig und sinnvoll. Umsetzung innerhalb von FP8 möglich.

INTERREG

In nächster Zeit (Herbst 2011) wird es einen Call im Rahmen von INTERREG-Alpine Space geben. Diese Projektschiene erscheint aber nicht geeignet, da zur Beantwortung der Fragestellung ein beträchtlicher Teil an Forschungsarbeit zu leisten ist und diese in der Interreg-Finanzierungsschiene laut Programmformulierung nicht im Mittelpunkt stehen darf.

BILATERAL

Die bilaterale Finanzierung ermöglicht die Konzeption eines auf die Anforderungen der Fragestellung optimal zugeschnittenen Projektes. Auch unterliegt diese Finanzierungsform grundsätzlich keiner Beschränkung etwaiger zu beteiligender Projektpartner und ermöglicht die Auswahl der richtigen fachlichen Kompetenzstellen.

Projektoption A und B erscheinen für diese Form der Finanzierung geeignet.

TRILATERAL

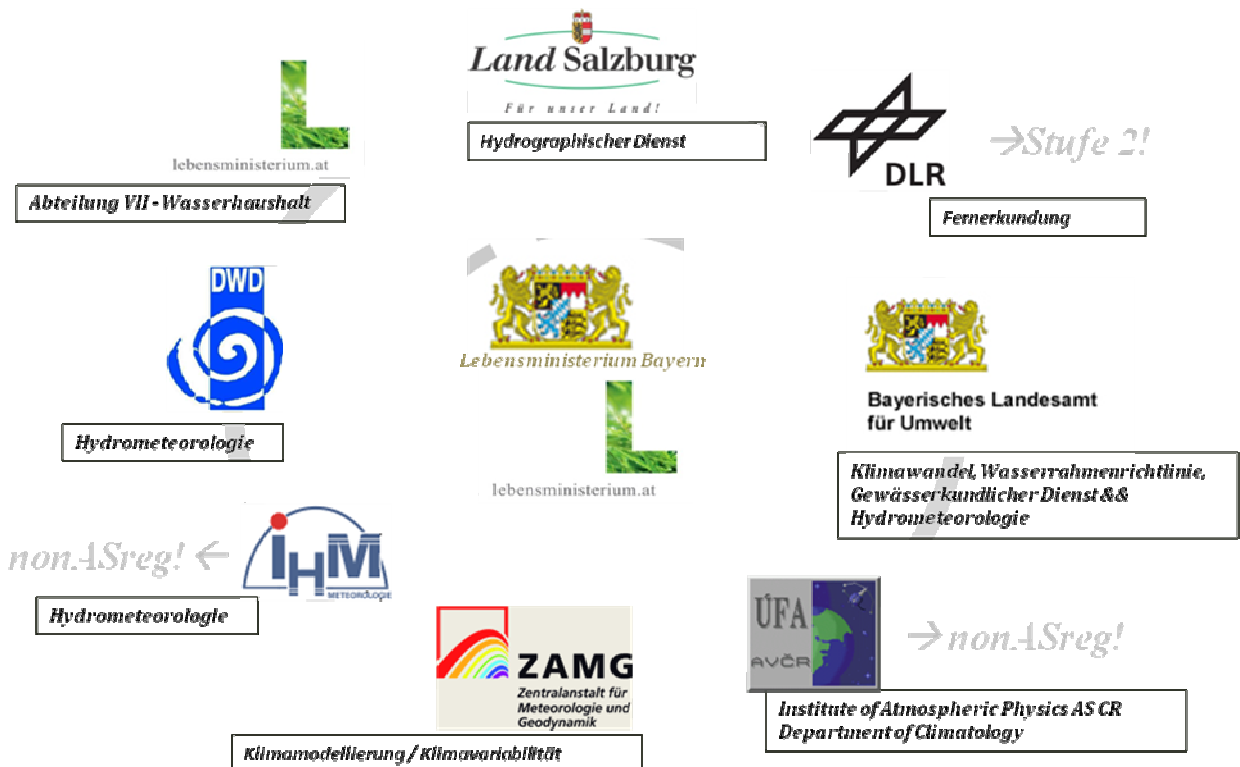
Eine Beteiligung eines weiteren Projektpartners zur Ausdehnung der in den Projektoptionen abgegrenzten Fragestellung (z.B. Hydrologische Aspekte wie Abflussmodellierung) wäre unter Einbringung eigener finanzieller Mittel immer möglich.

Anhang A: Abkürzungen und Definitionen

GCM	„Global Circulation Model“, Kurzbezeichnung für ein Globales Klimamodell
RCM	„Regional Climate Model“, Kurzbezeichnung für Regionales Klimamodell
ERA40	Reanalysedaten: Aus Beobachtungen abgeleiteter, gegitterter Datensatz des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage – ECMWF
NCEP	Reanalysedaten: Aus Beobachtungen abgeleiteter, gegitterter Datensatz des NCAR (National Center for Atmospheric Research Research, USA)
COST901	Internationale Initiative zur Entwicklung von Methoden zur Abschätzung der Wiederkehrswahrscheinlichkeiten von Hochwässern. http://www.cost-floddfreq.eu
COST733	Internationale Initiative bei der ein systematischer Vergleich von bestehenden und neuen Wetterlagenklassifikationen durchgeführt wurde. http://cost733.met.no/index.htm
IPCC	International Panel on Climate Change
AR4	Arbeitsbericht des IPCC aus dem Jahre 2007, Synonym 4. Sachstandsbericht
AR5	Zukünftiger Arbeitsbericht des IPCC 2013/2014, Synonym 5. Sachstandsbericht
WG	Working Group – Arbeitsgruppe eines Projektteams die für die Umsetzung eines Arbeitspaketes verantwortlich ist.
COL	„Cut Off Low“ ist ein Tiefdrucksystem welches aus der allgemeinen Westwinddrift (Polarfront) ausgegliedert ist. Syn: Abgetropftes Höhentief
Zyklone	Bezeichnung für ein Tiefdrucksystem
Tracking	Bezeichnung für die systematische Erfassung der Zugbahncharakteristiken eines Tiefdrucksystems

Anhang B: Dokumentation Netzwerkaufbau

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie ist es gelungen mit Partnern aus den folgenden Institutionen in Kontakt zu treten bzw. ein Netzwerk aufzubauen, welches eine wichtige Grundlage für eine weitere Untersuchung der Fragestellung bildet:



(Anmerkung: nonASreg bedeutet, dass diese Partner nicht innerhalb der Interreg Region Alpine-Space liegen)

Anhang C: Meetings und Vortragstätigkeiten im Rahmen der Vb-Initiative:

15.11.2010 in Salzburg am Hydrografischen Landesdienst (Arbeitstreffen)

14.02.2011 in München am Bayrischen Landesamt für Umwelt (Arbeitstreffen)

12.05.2011 in Oberpfaffenhofen am Deutschen Luft- u. Raumfahrtzentrum
(Seminarvortrag)

30.05.2011 in Salzburg am Hydrografischen Landesdienst (Arbeitstreffen)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zugstrassen der barometrischen Minima über Europa nach van Bebbber und Köppen (in Umlauf, 1891).	17
Abbildung 2: Zugbahn (rot) des Bodentiefs beim Augusthochwasser 2002, aus Rudolf und Rapp (2003) modifiziert.	19
Abbildung 3: Großräumige Wetterlage über Europa zum Zeitpunkt des nach Lauscher-ZAMG als Vb-klassifizierten Tiefdrucksystems im Bereich von Ostösterreich.	22
Abbildung 4(a) und 4(b): Langjährige Stationswerte mittlerer Luftdruck (a) und Summe Niederschlag (b) in Klagenfurt.	25
Abbildung 5: Mittlere monatliche Zyklogeneanzahl pro Gitterpunkt (aus Muskulus und Jacob, 2005).	28
Abbildung 6: Korrelationskarte zwischen Luftdruckmuster und Hochwasserereignissen an Elbe und Oder 1658-1999. (Aus Mudelsee et.al, 2004).....	29
Abbildung 7: Feuchtequellen für das Niederschlagsereigniss im August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe (schwarzer Rahmen). (aus Sodemann et.al, 2009)	31
Abbildung 8: Aufschlüsselung der Feuchtequellen für das Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet der Elbe von 10.Aug – 13.Aug 2002. (aus Sodemann et.al, 2009).....	32
Abbildung 9: Rückwärtstrajektorien der Niederschlagsfeuchte bis zum 12. August 2002. Grün/Blau ist die Feuchtesenke (Niederschlag) und gelb/rot die Anreicherung mit Feuchtigkeit. (aus Stohl et.al, 2004).....	32
Abbildung 10: Mittlere Verteilung des Geopotentials auf 500hPa im Winter (DJF) für den Kontrolllauf 1961-1990 (c) und das Szenario A2 2071-2100 (d). Die dominante Trogachse ist durch die dicke, strichlierte Linie markiert. (aus Raible et.al, 2010)	34
Abbildung 11: Fehler der Temperatur (linke Spalte) und des Niederschlages (rechte Spalte) im Vergleich zu ERA40 1960-2000. (aus Ulden und Oldenborgh, 2006)	35
Abbildung 12: Jahresgang ausgewählter Niederschlagskenngrößen im Alpenraum, (b) wet day frequency und (d) 90%-Perzentil an Tagen mit Niederschlag. (aus Frei et.al, 2003)	37
Abbildung 13: Jahresgang der Anzahl der Tage mit Niederschlag >15mm (rechts) in der Regiona UG1 (links). (aus Smiatek et.al, 2009).....	39
Abbildung 14: Großwetterlagen mit signifikant steigender Anzahl von Tage mit Starkregen (≥30mm) im Sommer (Jun-Aug). (aus Fricke und Kaminski, 2002).....	40
Abbildung 15: Hauptmoden des Bodenluftdrucks im Winter (Dez-Feb) 1500-1999. (aus Jacobeit et.al, 2003)	41
Abbildung 16: Relative Häufigkeit des jährlichen maximalen Niederschlags (oben) und Hochwassers (unten), während der Zirkulationsform Meridional-Südwest und –Süd aus 1961-2000. (aus Parajka et.al, 2010)	43
Abbildung 17: Zeitpunkt des Auftretens des jährlichen maximalsten Niederschlages und der Hochwässer im Gebiet der Alpen-Karpathen (links). (aus Parajka et.al, 2010, modifiziert).....	44
Abbildung 18: Brier Skill Score für das 60-er Perzentil des täglichen Sommerniederschlages. Vergleich einer automatischen (oben) und verschiedener objektiver (unten) Wetterlagenklassifikationen. (aus Schiemann und Frei, 2010, modifiziert)	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Atmosphärische Prozess- und Wirkungskette bei Vb-artigen Starkniederschlagsereignissen.	20
---	----

Literaturverzeichnis

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Abteilung Hydrologie, 2009. Rekordniederschläge 22. - 27. Juni 2009; Bericht im Internet www.noel.gv.at

Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T, 2005a. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. *International Journal of Climatology* 25: 139-166

Bebber, W.J. van, 1891. Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der Deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875-1890. *Meteorologische Zeitschrift* 8, 1891, Seite 361-366; mit 12 Monatskarten.

Bebber, W.J. van und W. Köppen, 1895. Die Isobarentypen des Nordatlantischen Ozeans und Westeuropas, ihre Beziehung zur Lage und Bewegung der barometrischen Maxima und Minima. *Archiv der Deutschen Seewarte* 18, 1895, 27 Seiten, 23 Tafeln.

Belleflamme A., Fettweiss X. and M. Erpicum, 2011. Evaluation of the present and future general circulation over western Europe simulated by the IPCC AR4/CMIP3 GCMs with the help of a circulation type classification. European Geoscience Union - General Assembly (EGU April, 03-08, 2011), *Geophysical Research Abstracts*, abstract#EGU2011-7352

Casado J. M. and M.A. Pastor, 2011. How well do IPCC AR4 models simulate circulation types? European Geoscience Union - General Assembly (EGU April, 03-08, 2011), *Geophysical Research Abstracts*, abstract#EGU2011-1206

Compo, G.P., J.S. Whitaker, P.D. Sardeshmukh, N. Matsui, R.J. Allan, X. Yin, B.E. Gleason, R.S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. Brönnimann, M. Brunet, R.I. Crouthamel, A.N. Grant, P.Y. Groisman, P.D. Jones, M. Kruk, A.C. Kruger, G.J. Marshall, M. Maugeri, H.Y. Mok, Ø. Nordli, T.F. Ross, R.M. Trigo, X.L. Wang, S.D. Woodruff, and S.J. Worley, 2011. *The Twentieth Century Reanalysis Project*. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 1-28. DOI: 10.1002/qj.776 [Free and Open Access](#).

Compo, G.P., J.S. Whitaker, and P.D. Sardeshmukh, 2006. Feasibility of a 100 year reanalysis using only surface pressure data. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 87, 175-190.

Efthymiadis, D., P. D. Jones, K. R. Briffa, I. Auer, R. Böhm, W. Schöner, C. Frei, and J. Schmidli, 2006. Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800–2003, *J. Geophys. Res.*, 110, D01105, doi:10.1029/2005JD006120.

Frei, C., and C. Schär, 1998. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations, *Int. J. Climatol.*, 18, 873 – 900

Frei C, Davies HC, Gurtz J, Schär C, 2000. Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe. *Integrated Assessment*, Vol. 1, No. 4, pp. 281-299. Details, doi:10.1023/A:1018983226334

Frei, C., J. H. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, R. G. Jones, and P. L. Vidale, 2003. Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.*, 108(D3), 4124, doi:10.1029/2002JD002287.

Frei, C., Schmidli, J., 2006. Das Niederschlagsklima der Alpen: Wo sich extreme nahe kommen. *promet, meteorologische Fortbildung (Deutscher Wetterdienst)* 32, 61–67 (in German).

Frei, C., R. Schöll, J. Schmidli, S. Fukutome and P.L. Vidale, 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.

Fricke, W. und U. Kaminiski, 2002. Ist die Zunahme von Starkniederschlägen auf veränderte Wetterlagen zurückzuführen? *Global Atmosphere Watch - Brief des Deutschen Wetterdienstes* Nr. 12, 2 S., Offenbach: Deutscher Wetterdienst.

Gerstengarbe, F.-W. und P.C. Werner, 2010. Katalog der Großwetterlagen Europas (1881 – 2009), nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, 7., verbesserte und ergänzte Auflage. Potsdam : Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK Report **119**, 140 Seiten, (<http://www.pik-potsdam.de>).

Godina, R., und G. Müller, 2009. Das Hochwasser in Österreich von 22. bis 30. Juni 2009. In: *Hydrologie und Wasserwirtschaft*, Jg. 53, Nr. 5, 2009, Seite 342-347, ISSN: 1439-1783

Habersack, H.M. und Krapesch, G. (Editoren), 2006. Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation der Bundeswasserbauverwaltung des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinnenverbauung und des Hydrographischen Dienstes, Synthesebericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 149, Wien

Haiden, Th., 2009. Meteorologische Analyse des Niederschlags von 22.-25. Juni 2009; Bericht im Internet auf www.zamg.ac.at

Haylock M., Cawley G., Harpham C., Wilby R., C. Goodess, 2006. Downscaling heavy precipitation over the united kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios. *Int J Climatol* 26:1397–1416

Hess P. und H. Brezowski 1952. Katalog der Großwetterlagen Europas. Bericht des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone 33, Bad Kissingen, Germany

Horvath, Kristian, Yuh-Lang Lin, Branka Ivančan-Picek, 2008. Classification of Cyclone Tracks over the Apennines and the Adriatic Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 2210–2227.

IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change 2007, WG I, 2007: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacobeit, J., R. Glaser, J. Luterbacher, and H. Wanner, 2003. Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (4), 1172, doi:10.1029/2002GL016433.

KLIWA Arbeitskreis, 2006. Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Projekt A 1.1.3 „Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse“. KLIWA Berichte Heft **8**, 93 S., ISBN 3-88148-412-4.

- Kundzewicz, Z.W., U. Ulbrich, T. Brücher, D. Graczyk, A. Krüger, G.C. Leckebusch, L. Menzel, I. Pinskiwar, M. Radziejewski and M. Szwed, 2005. Summer Floods in Central Europe – Climate Change Track? *Natural Hazards*, Volume 36, Number 1-2, 165–189. DOI:10.1007/s11069-004-4547-6.
- Lauscher, F., 1972. 25 Jahre mit täglicher Klassifikation der Wetterlage in den Ostalpenländern. *Wetter u. Leben* 24.
- Lauscher, F., 1985. Klimatologische Synoptik Österreichs mittels der ostalpinen Wetterlagenklassifikation, *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, Publikation Nr. 302, Heft 64
- Luterbacher, J., C. Schmutz, D. Gyalistras, E. Xoplaki, and H. Wanner, 1999. Reconstruction of monthly NAO and EU indices back to AD 1675, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2745–2748.
- Luterbacher, J., et al., 2002. Reconstruction of sea level pressure fields over the eastern north Atlantic and Europe back to 1500, *Clim. Dyn.*, 18, 545–561
- Murray, R. J. and Simmonds, I., 1991. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme. *Aust. Met. Magazine* 39, 155–166.
- Mudelsee, M., M. Börngen, G. Tetzlaff, and U. Grünewald, 2004. Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway “Zugstrasse Vb”, *J. Geophys. Res.*, 109, D23101, doi:10.1029/2004JD005034
- Musculus M. und D. Jacob, 2005. Tracking cyclones in regional model data: the future of Mediterranean storms. *Adv Geosci* 2:13–19
- Nachtnebel, H.P., E. Rudel, R. Steinacker, P. Stanzel, M. Büchinger, I. Schauer, 2010: Trendanalyse von hydro-meteorologischen Extremereignissen. Studie A7.CP456 des Klima- und Energiefonds, Endbericht, 196 Seiten.
- New, M., M. Hulme, and P. Jones, 1999. Representing twentieth-century spacetime climate variability, part 1, Development of a 1961 – 1990 mean monthly terrestrial climatology, *J. Clim.*, 12, 829–856
- New, M., M. Hulme, and P. Jones, 2000. Representing twentieth-century spacetime climate variability, part 2, Development of 1961 – 1990 monthly grids of terrestrial surface climate, *J. Clim.*, 13, 2217– 2238
- Parajka, J, S. Kohnová, G. Bálint, M. Barbuc, M. Borga, P. Claps, S. Cheval, A. Dumitrescu, E. Gaume, K. Hlavcová, R. Merz, M. Pfaundler, G. Stancalie, J. Szolgay and G. Blöschl, 2010. Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine-Carpathian range. *Journal of Hydrology*, 394 (1-2), 78-89. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.015.
- Philipp A., J. Bartholy, Ch. Beck, M. Ericum, P. Esteban, X. Fettweis, R. Huth, P. James, S. Jourdain, F. Kreienkamp, T. Krennert, S. Lykoudis, S. C. Michalides, K. Pianko-Kluczynska, P. Post, D. R. Alvarez, R. Schiemann, A. Spekat, F. S. Tymvios, 2010. Cost733cat - A database of weather and circulation type classifications, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 35, Issues 9-12, *Classifications of Atmospheric Circulation Patterns - Theory and Applications*, Pages 360-373, ISSN 1474-7065
- Raible, C. C., B. Ziv, H. Saaroni, M. Wild, 2010. Winter synoptic-scale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5, *Climate Dynamics*, 35/2-3, 473-488

- Rotunno, R., Ferretti, R., 2001. Mechanisms of intense alpine rainfall. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 1732-1749
- Rudolf, B. and Rapp, J., 2003. Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte, Klimastatusbericht 2002. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, <http://www.ksb.dwd.de>, Offenbach, pp. 172-187
- Schöner W, Auer I, Böhm R, Thaler S. 2003: Qualitätskontrolle und statistische Eigenschaften ausgewählter Klimaparameter auf Tageswertsbasis im Hinblick auf Extremwertanalysen. Endbericht Projekt 1 im Rahmen von StartClim Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Österreich. 1-39
- Schüepp M. 1957. Klassifikationsschema, Beispiele und Probleme der Alpenwetterstatistik. *La Meteorologie*, **4**, 291-299
- Schiemann, R, and Frei, C, 2010. How to quantify the resolution of surface climate by circulation types: An example for Alpine precipitation, *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 403-410, doi:10.1016/j.pce.2009.09.005
- Sinabell F. und Th. Url, 2006. Versicherungen als effizientes Mittel zur Risikotragung von Naturgefahren. Studie des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung im Auftrag des Verbands der Versicherungsunternehmen Österreichs, http://www.wifo.ac.at/www/jsp/index.jsp?fid=23923&id=28181&typeid=8&display_mode=2
- Smiatek, G., Kunstmann, H., Knoche, R., Marx, A. 2009. Precipitation and temperature statistics in high-resolution regional climate models: Evaluation for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, D19107, doi:10.1029/2008JD011353
- Sodemann H., Wernli H. und C. Schwierz, 2009. Sources of water vapour contributing to the Elbe flood in August 2002 -a tagging study in a mesoscale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **135**: 205–223, 10.1002/qj.374.
- Steinacker, R., M. Ratheiser, B. Bica, B. Chimani, M. Dorninger, W. Gepp, C. Lotteraner, S. Schneider and S. Tschannett, 2006. A mesoscale data analysis and downscaling method over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, No. 10, 2758-2771.
- Stohl, Andreas, Paul James, 2004. A Lagrangian Analysis of the Atmospheric Branch of the Global Water Cycle. Part I: Method Description, Validation, and Demonstration for the August 2002 Flooding in Central Europe. *J. Hydrometeor*, **5**, 656–678.
- Ulbrich, U., Leckebusch, G. C. und J. G. Pinto, 2009. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theoretical and Applied Climatology* **96**:1-2, 117-131
- Ulden, A.P. van and G.J. van Oldenborgh, 2006. Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. *Atm. Chem. Phys.*, 2006, **6**, 863-881, sref:1680-7324/acp/2006-6-863.
- Umlauf, F., 1891: Das Luftmeer: Die Grundzüge der Meteorologie und Klimatologie nach den neuesten Forschungen, A Hartleben's Verlag, Wien 1891. 488 Seiten
- Uppala, S.M., Kållberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., daCostaBechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., vande Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **131**, 2961–3012.

Whitaker, J.S., G.P.Compo, X. Wei, and T.M. Hamill, 2004. Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation. Mon. Wea. Rev., 132, 1190-1200.

ZAMG, 2011. HISTALP Langzeitklimareihen – Österreich: Jahresnewsletter. In: Neues. ZAMG, 4. Feb 2011, abgerufen am 21. März 2011, http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/HISTALP_AT_Jahresnewsletter_2010_endgueltig.pdf

ZAMG, 2009a. HISTALP-Analyse Juni 2009: im Norden und Osten regenreichster Juni seit 190 Jahren; Bericht im Internet auf www.zamg.ac.at

ZAMG, 2009b. Wetterübersicht Juni 2009 - Rekordniederschläge im Norden. In: Klima → Neues. ZAMG, 2. Juli 2009, abgerufen am 21. März 2011, (http://www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=36&artikel=ZAMG_2009-07-02GMT04:35)