

PROJECT CALL 2007

► KLIMA- UND ENERGIEFONDS

Klima- und Energiefonds des Bundes – managed by Kommunalkredit Public Consulting



„Trendanalyse von hydro-meteorologischen Extremwerten“

Projektnummer A760456

Zusammenfassung

Juli 2010

Projektpartner:

Universität für Bodenkultur, Wien
Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
Projektleitung: DI.Dr. Dr.h.c. o.Univ.Prof. Hans Peter Nachtnebel
Bearbeitung: DI Philipp Stanzel, DI Marianne Büchinger

Universität Wien
Institut für Meteorologie und Geophysik
Projektleitung: Dr. o.Univ.Prof. Reinhold Steinacker
Bearbeitung: Isabella Aschauer, Annemarie Lexer

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.
Bereich Daten Methoden Modelle
Projektleitung: Dr. Ernest Rudel
Bearbeitung: Mag. Thomas Krennert, Mag. Christoph Zingerle



Inhalt

1	Zielsetzung des Vorhabens.....	1
2	Datenbasis und Analysemethodik.....	2
2.1	Klimazonen Österreichs.....	2
2.2	Extremereignisse in hydro-meteorologischen Beobachtungen.....	2
2.2.1	Lufttemperatur.....	2
2.2.2	Niederschlag.....	3
2.2.3	Abfluss.....	3
2.2.4	Trockenwetter.....	4
2.3	Klimadaten.....	4
2.4	Analyse von Wetterlagen und Verknüpfung mit Extremereignissen.....	5
2.4.1	Analysen des Bodendruckfeldes.....	5
2.4.2	Wetterlagenklassifikation WLK733.....	5
3	Ergebnisse.....	6
3.1	Hypothese 1: Bestimmte Wetterlagen lösen hydro-meteorologische Extremereignisse aus.....	6
3.1.1	Hochwasser- und Niederschlagsereignisse.....	6
3.1.2	Niederwasser und Trockenperioden.....	13
3.1.3	Ergebnis Hypothesen 1, 1a und 1b.....	16
3.2	Hypothese 2: Die Wetterlagen bzw. Druckmuster beschreibenden Größen werden von Klimamodellen gut abgebildet.....	17
3.2.1	WLK733.....	17
3.2.2	Bodendruckfelder.....	18
3.2.3	Ergebnis Hypothese 2.....	19
3.3	Hypothese 3: In den Zukunftsszenarien kommt es zu einer Veränderung im Auftreten der Wetterlagen bzw. Druckmuster.....	20
3.3.1	Änderungen bei Hochwasser und Extremniederschläge auslösenden Wetterlagen.....	20
3.3.2	Änderungen bei Extremwerten der Bodendruckfelder.....	21
3.3.3	Ergebnis Hypothese 3.....	23
4	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	23
	Abkürzungen.....	26

1 Zielsetzung des Vorhabens

Ziel dieses Vorhabens ist die Analyse von möglichen Veränderungen in Extremwerten unter geänderten Klimabedingungen. Der Zusammenhang zwischen bestimmten Wetterlagen und hydrologischen Extremereignissen soll ermittelt werden. Prognostizierte Veränderungen im Auftreten von Wetterlagen im Zusammenhang mit dem Klimawandel sollen dann eine Aussage zu Veränderungen der hydrologischen Extreme ermöglichen.

Grundlage von Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen bilden die Ergebnisse von globalen Klimamodellen (*Global Circulation Models*, GCM). Globale Klimamodelle haben allerdings sehr grobe Auflösungen von rund 200 bis 300 km Gitterpunktabstand. Für die Analyse regionaler und lokaler Prozesse, die zu Extremereignissen wie Hochwasser und Niedrwasserperioden führen, sind räumlich detailliertere Daten notwendig. Methoden, die solch höher aufgelöste Daten aus den Ergebnissen globaler Klimamodelle erstellen, werden unter der Bezeichnung „Downscaling“ zusammengefasst. Dabei unterscheidet man zwischen dynamischem und statistischem Downscaling.

Im vorliegenden Projekt werden statistische Downscaling-Verfahren angewendet. Dafür wird einerseits eine Wetterlagenklassifikation verwendet, die für die Domäne des Alpenraumes entwickelt wurde, und andererseits wird die räumliche und zeitliche Entwicklung von Druckfeldern untersucht.

Für den Zusammenhang mit Extremereignissen werden die folgenden zentralen Hypothesen formuliert:

- (1) Bestimmte Wetterlagen lösen hydro-meteorologische Extremereignisse aus.
 - a. Die auslösenden Wetterlagen sind in verschiedenen klimatischen Regionen unterschiedlich.
 - b. Die auslösenden Wetterlagen sind in verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich.

Diese Hypothesen können bestätigt werden, wenn aus den Beobachtungen der Vergangenheit eine statistische Beziehung zwischen dem gleichzeitigen Auftreten von bestimmten Wetterlagen bzw. Druckmustern und Extremereignissen abgeleitet werden kann. In diesem Fall können – unter der Annahme, dass dieser statistische Zusammenhang auch in Zukunft gilt – Aussagen zur zukünftigen Entwicklung getroffen werden. Dafür werden zwei weitere Hypothesen formuliert und überprüft:

- (2) Die Wetterlagen bzw. Druckmuster beschreibenden Größen werden von Klimamodellen gut abgebildet.
- (3) In den Zukunftsszenarien kommt es zu einer Veränderung im Auftreten der Wetterlagen bzw. Druckmuster.

Im Folgenden werden zuerst Datengrundlagen und die Methodik ihrer Auswertung beschrieben. Danach wird die Überprüfung der drei Hypothesen anhand der wesentlichen Ergebnisse dargelegt. Schließlich folgt eine kurze Zusammenfassung und Diskussion.

2 Datenbasis und Analysemethodik

2.1 Klimazonen Österreichs

Abbildung 1 zeigt die subjektiv-empirische Einteilung Österreichs in sieben Klimaregionen, die Messstationen des Hydrographischen Dienstes (Ombrometer und Ombrographen) sowie das dichte Netz an Gitterpunkten von MESOCLIM. Markiert sind jene MESOCLIM-Gitterpunkte, deren Druckdaten für die Berechnungen der großräumigen Druckgradienten und deren Ableitungen verwendet wurden. Die roten Kreise zeigen die Gitterpunkte des Ost-West-Gradienten nördlich des Alpenbogens an, die grün markierten Punkte jene des Nord-Süd-Gradienten.

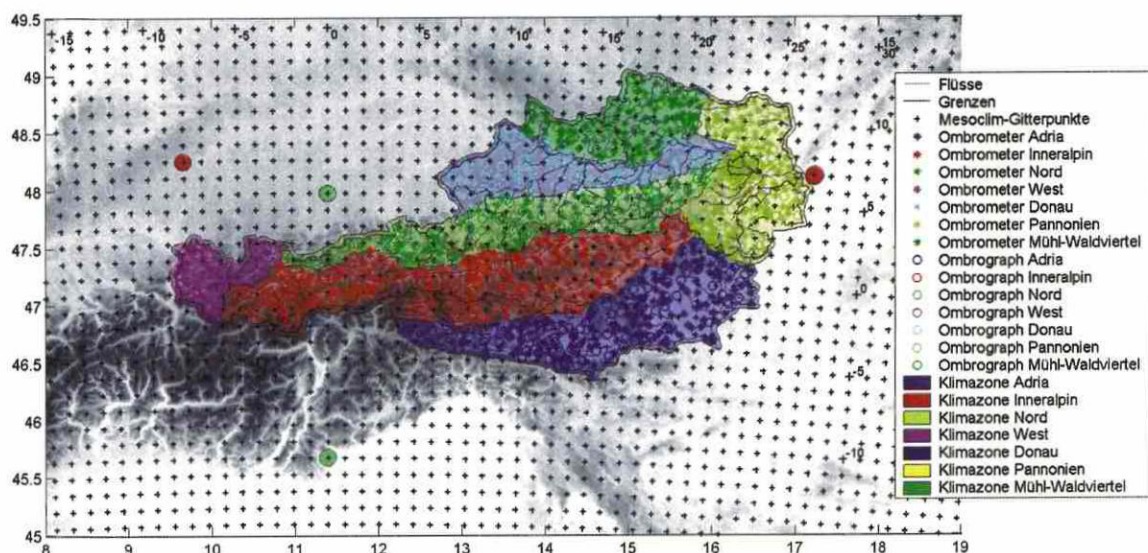


Abbildung 1: Klimaregionen Österreichs mit MESOCLIM-Gitter und Markierung der wichtigsten Gitterpunkte

2.2 Extremereignisse in hydro-meteorologischen Beobachtungen

2.2.1 Lufttemperatur

Aus den Tagesmaxima und -minima aller Stationen wurden tägliche mittlere Regionsextreme errechnet. Mit Hilfe der Perzentile 95, 99, 99.5 wurden dann für jeden Monat die höchsten

Maximalwerte einer Region und mit der Unterschreitung der Perzentile 0,5, 1, 5 die tiefsten Minimaltemperaturen einer Region ermittelt.

Außerdem wurde für jede Station ein mittlerer Jahrgang berechnet und die größten positiven und negativen Abweichungen vom jeweiligen langjährigen Tagesmittel mit Hilfe der Perzentilen für jede Station bestimmt. Die Abweichungen der einzelnen Station wurden wiederum über die gesamte Region gemittelt.

2.2.2 Niederschlag

Insgesamt wurden für ganz Österreich 136 Stationen mit Messungen des Niederschlages und der Temperatur verwendet. Zur Festlegung von Extremereignissen wurden Schwellenwerte oder Perzentile herangezogen. Die Stationswerte in den Klimaregionen wurden mittels zweier unterschiedlicher Ansätzen zusammengefasst.

- 1) Aus allen Stationen einer Region wurde eine mittlere Niederschlagssumme berechnet und jene Tage ermittelt, an denen der Schwellenwert überschritten wird.
- 2) Überschreitung der oberen Perzentile (95, 99, 99,5) bei mindestens einer bestimmten Anzahl an Stationen im Gebiet: mit diesem Ansatz wurde versucht zu berücksichtigen, dass die extremsten Niederschlagsereignisse oft nur Teilbereiche einer Klimaregion betreffen. Zuerst wurden für jede Station die obersten Perzentile bestimmt. In einem zweiten Schritt wurden diejenigen Fälle ausgesucht, bei denen ein bestimmter Teil der Stationen diese Perzentile überschreitet.

2.2.3 Abfluss

Für eine Gesamtzahl von 533 Pegel wurden Hochwasser- und Niederwasserereignisse ermittelt.

Die Auswahl der Hochwasserereignisse wurde mit der Methode der partiellen Reihen durchgeführt. Der resultierende Katalog enthält dabei alle voneinander unabhängigen Hochwasserereignisse, die über einem bestimmten Schwellenwert liegen. Der Schwellenwert wurde so gewählt, dass für jeden Pegel im Mittel vier Ereignissen pro Jahr bestimmt wurden. Ein zweites Datenkollektiv mit extremeren Ereignissen wurde erstellt, indem der Schwellenwert so gewählt wurde, dass im Mittel nur ein Ereignis pro Jahr bestimmt wurde.

Die Auswahl der Niederwasserperioden erfolgte über den Schwellenwert der 5 %-Unterschreitungswahrscheinlichkeit jedes Pegels. Für die Auswertung wurden Niederwasserperioden mit einer minimalen Dauer von 3 Tagen herangezogen. Weiters wurden regionale Niederwasserperioden analysiert, die durch die Anzahl der Pegel mit Niederwasser definiert wurden. Zusätzlich zu den ausschließlich auf Wetterlagen basierenden Analysen wurde versucht, eine Kombination aus den Parametern Wetterlage und Lufttemperatur zur Erklärung von Niederwasserperioden heranzuziehen. Dafür wurden die Häufigkeiten von Niederwassertagen bei verschiedenen Lufttemperaturanomalien untersucht.

2.2.4 Trockenwetter

In dieser Studie wurden Trockenperioden im Sommerhalbjahr gewählt. Zur Definition von Trockenwetterperioden wurden mehrere Annahmen getroffen. Eine Trockenperiode, die für extreme Trockenheit verantwortlich ist, dauert länger als mindestens 10 Tage. Während dieser 10 Tage darf im Mittel über einer Region an einem einzelnen Tag nicht mehr als 2 mm Niederschlag fallen. Das Verhältnis der Stationen mit nassen Verhältnissen (≥ 0.5 mm Niederschlag) zu jenen mit Trockenheit (<0.5 mm) an einem Tag darf 0.3 nicht überschreiten. Zusätzlich zur Trockenheit an über 10 Tagen wurde auch noch die Temperatur in dieser Periode berücksichtigt.

Im Zusammenhang mit der Analyse der Druckfelder wurde davon ausgegangen, dass die Varianz eines Druckgradienten gering ist, wenn keine synoptischen Systeme durchziehen und daher mit wenig Niederschlag gerechnet werden kann. Als aussagekräftige Zeitspanne für die zu ermittelnde Varianz wurden 15 Tage gewählt.

2.3 Klimadaten

Für die Referenzperiode 1961-1990 wurden Auswertungen mit den Reanalysedaten ERA40 sowie MESOCLIM erstellt. ERA40 ist ein Reanalyse-Datensatz des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Es wurden ERA40-Daten mit einer räumlichen Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ verwendet. Für MESOCLIM (Mesoscale Alpine Climatology) wurden vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien mehrere meteorologische Parameter auf einem 16×16 km Gitternetz für Mitteleuropa für den Zeitraum von 1971 bis 2005 analysiert.

Für die Erstellung der Wetterlagenkataloge der Klimaszenarien wurden Simulationsläufe von Klimamodellen benötigt. Daten zweier verschiedener GCM wurden dafür vom CERA Internet-Portal des World Data Center for Climate (WDCC) heruntergeladen: ECHAM5 und HADCM3C. ECHAM5 ist die fünfte Version des globalen Zirkulationsmodells des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg, HADCM3C ist eine Variante des HADCM3-Modells des Hadley Centers der UK MetOffice. Es wurden Daten der Simulationsläufe für das 20. Jahrhundert (1957-2000) und der A1B-Szenarioläufe (2000-2100), für das ECHAM5-Modell auch des B1-Szenariolaufs verwendet. Den verschiedenen Szenarien liegen unterschiedliche Annahmen zu den Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert zugrunde, die wiederum auf den Annahmen zur gesamtgesellschaftlichen Entwicklung in den *storylines* des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) basieren.

2.4 Analyse von Wetterlagen und Verknüpfung mit Extremereignissen

2.4.1 Analysen des Bodendruckfeldes

Für die Auswertungen wurden die Bodendruckfelder der MESOCLIM-Druckdaten (auf Meeresniveau reduzierter Druck PMSL – *Pressure Mean Sea Level*) und der gemittelte Tagesflächenniederschlag einer Klimaregion herangezogen. Die These, auf welche sich diese Arbeit stützt ist, dass Druckfelder von den GCM zufrieden stellend abgebildet sein sollten, sodass Zusammenhänge zwischen Niederschlagsereignissen und diversen Ableitungen der Luftdruckfelder hergeleitet werden können. Es wurden räumliche Druckdifferenzen (Ost-West und Nord-Süd), die zweite zeitliche und die räumlich-zeitliche Ableitung des Drucks betrachtet. Für Trockenperioden wurde die Varianz eines Druckgradienten innerhalb von 15-tägigen Perioden untersucht.

2.4.2 Wetterlagenklassifikation WLK733

Für die Klassifizierung der Wetterlagen wurde die Methode WLK733 verwendet, die im Rahmen des EU-Forschungsprojekts COST733 für die Anwendung im Alpenraum entwickelt wurde. Die Geopotentialhöhen auf 500 hPa und 925 hPa und der Wind auf 700 hPa, jeweils um 12:00 Uhr, dienen als Eingangsdaten und wurden entsprechend ihrer Lage in der Domäne gewichtet (Abbildung 2 rechts).

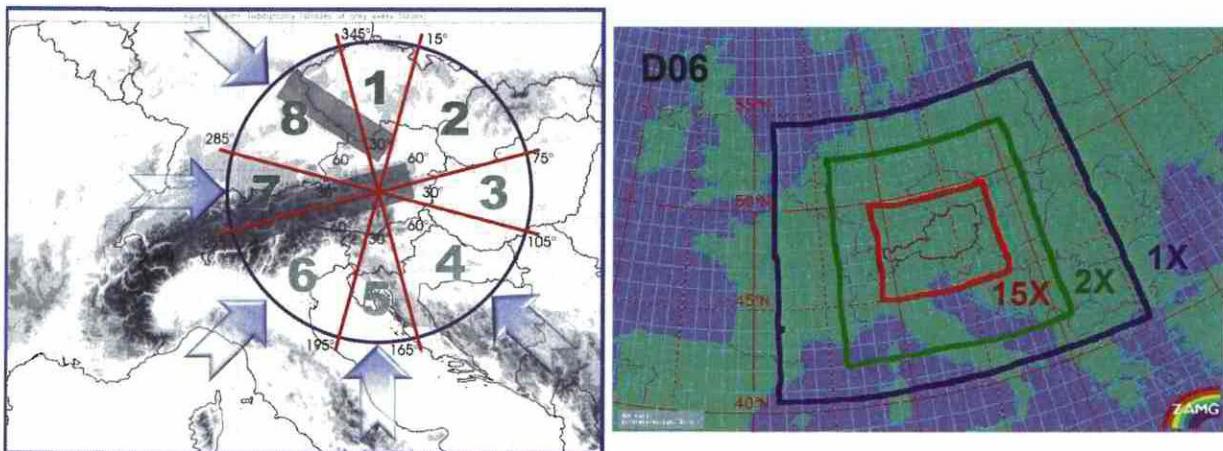


Abbildung 2: Windrichtungsklassen (links, 0 = unbestimmt) und relative Gewichtung innerhalb der Domäne (rechts)

Als Ergebnis wurde jeder Tag einer von 36 Klassen zugeteilt, die durch eine Zahl und 2 Buchstaben beschrieben wird. Die Zahl beschreibt den dominanten Sektor der Windrichtung (siehe Abbildung 2 links), der erste Buchstabe die Zyklonalität auf 500 hPa, der zweite die Zyklonalität auf 900 hPa (Cyclonal oder Anticyklonal). Ein Feuchteparameter, der in der

COST733-Version von WLK733 enthalten ist, wurde hier nicht angewendet, da die dafür benötigte Variable in den Klimamodellen nicht vorkommt.

Aus den ERA40-Reanalysedaten wurde ein historischer Wetterlagenkatalog erstellt. Dieser Katalog diente dazu, den statistischen Zusammenhang zwischen Wetterlagen und Extremereignissen aufzustellen. Für Hochwasserereignisse wurden dafür der Tag des Spitzenabflusses und die zwei Tage davor berücksichtigt. Für Niederschlagsereignisse lag das Hauptaugenmerk auf 3-tägigen Extremereignissen. Für Niederwasserereignisse wurde die Auswertung auf eine Periode bezogen, die 5 Tage vor dem ersten Tag der Unterschreitung des Schwellenwertes beginnt und 3 Tage vor dem erstmaligen Wiederüberschreiten des Schwellenwertes endet. Für Trockenwetter wurden die Wetterlagen der gesamten Trockenwetterperioden berücksichtigt.

3 Ergebnisse

3.1 Hypothese 1: Bestimmte Wetterlagen lösen hydro-meteorologische Extremereignisse aus

1a. Die auslösenden Wetterlagen sind in verschiedenen klimatischen Regionen unterschiedlich.

1b. Die auslösenden Wetterlagen sind in verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich.

Diese drei Hypothesen wurden unter einem Punkt zusammengefaßt, da ihre Untersuchung und Beurteilung mit denselben Methoden und gemeinsam erfolgte.

Zur Überprüfung der Hypothese (1) wurden im Zusammenhang mit dem Wetterlagenkatalog nach WLK733 die relative Häufigkeiten von Extremereignissen bei einer Wetterlage, bezogen auf die gesamte Auftretenshäufigkeit der jeweiligen Wetterlage in der betrachteten Periode, herangezogen.

Zur Überprüfung der Hypothese (1a) wurden die Analysen nach Klimaregionen getrennt durchgeführt.

Zur Überprüfung der Hypothese (1b) wurden in allen Analysen Zusammenhänge für das gesamte Jahr sowie für Halbjahre (Sommer und Winter) und Jahreszeiten (Winter: Dezember - Februar, Frühling: März - Mai, Sommer: Juni - August, Herbst: September - November) ausgewertet.

3.1.1 Hochwasser- und Niederschlagsereignisse

Bei der Ermittlung der relativen Häufigkeit von Hochwasserereignissen bei einer Wetterlage können in den meisten Klimaregionen Wetterlagen festgestellt werden, bei denen deutlich

häufiger Hochwasser auftreten. In der Klimaregion „Adria“ z.B. ist die relative Häufigkeit eines Hochwassers bei der Wetterlage 5CC mehr als doppelt so häufig als bei allen anderen (Abbildung 3 links). In der Region „Donau“ weisen mehrere Wetterlagen eine deutlich höhere Hochwasserhäufigkeit auf (8AA, 1AC, 8AC, Abbildung 3 rechts). Dargestellt sind hier nur die zehn „effektivsten“ Wetterlagen mit der größten Hochwasserhäufigkeit.

Die Auswertung des zweiten Datenkollektivs, dem nur extremere Hochwasserereignisse (im Durchschnitt 1 Hochwasser pro Jahr) angehören, führt im Wesentlichen zu denselben Ergebnissen. In einigen Klimaregionen ändert sich die Rangfolge der Wetterlagen, bei denen am häufigsten Hochwasser auftrat, die relevantesten Wetterlagen bleiben aber dieselben.

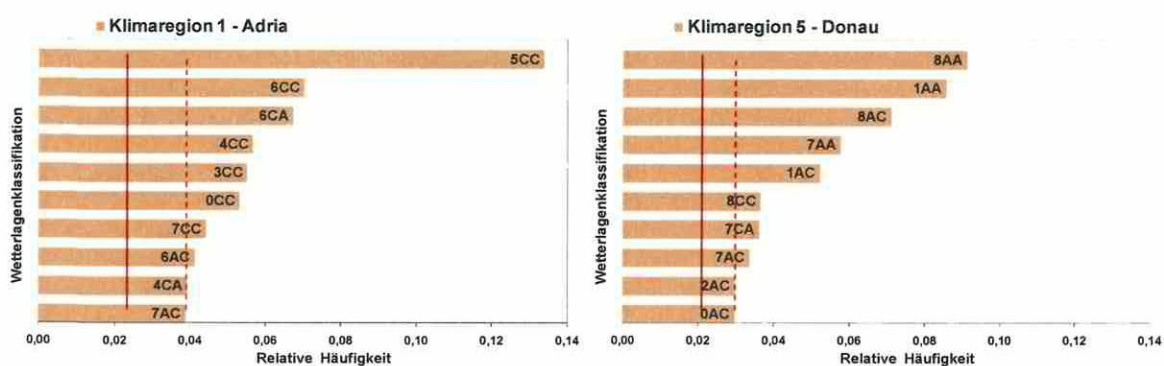


Abbildung 3: Häufigkeit von Hochwasserereignissen bei Wetterlagen, Klimaregionen „Adria“ und „Donau“ (Mittelwerte über alle Pegel der Klimaregion, Auswahl: 10 größte Werte, rote vertikale Linien: dünn – Median, dick – 75%-Quantil aller Wetterlage)

Für Halbjahre und Jahreszeiten ergeben sich deutlich unterschiedliche Ergebnisse (Abbildung 4 und Abbildung 5).

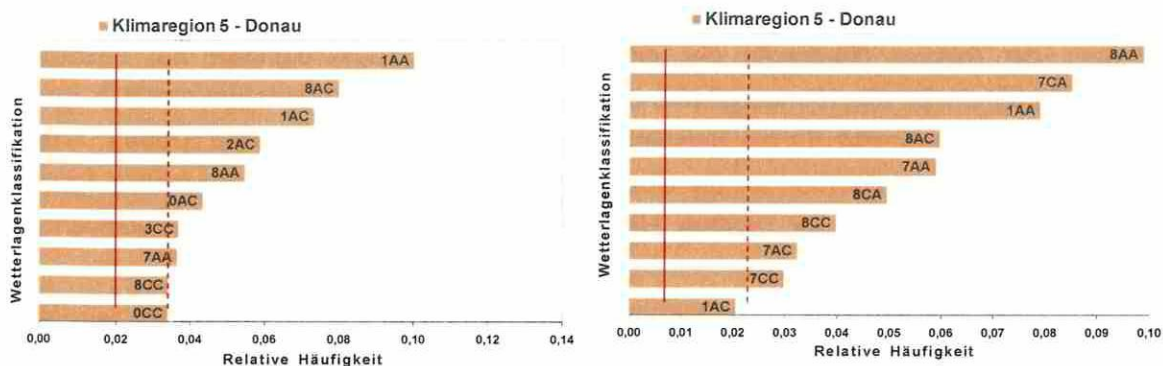


Abbildung 4: Häufigkeit von Hochwasserereignissen bei Wetterlagen im Sommerhalbjahr (links) und im Winterhalbjahr (rechts), Klimaregion „Donau“

In der Klimaregion „Donau“ z.B. ergibt sich die häufigste Hochwasser-Wetterlage des Sommerhalbjahrs, 1AA, aus Ereignissen des Frühlings, wo diese Wetterlage deutlich häufiger bei Hochwasser auftritt. Die häufigste Hochwasser-Wetterlage des Sommers, 2AC, belegt im Sommerhalbjahr sogar nur Rang 4, da die Wetterlagen mit der nächstgrößten Häufigkeit im Sommer, 8AC und 1AC, auch im Frühling und 8AA auch im Herbst relativ häufiger bei Hochwasser auftreten.

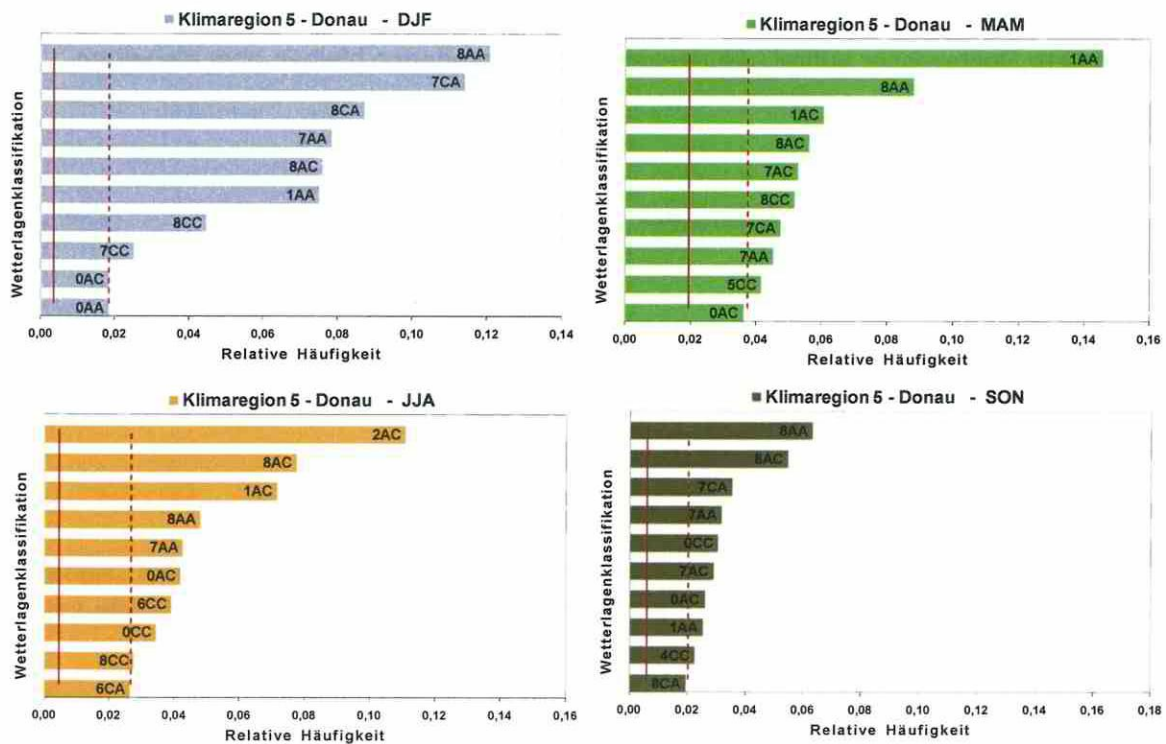


Abbildung 5: Häufigkeit von Hochwasserereignissen bei Wetterlagen im Winter (DJF), Herbst (SON), Frühling (MAM) und Sommer (JJA), Klimaregion „Donau“

Auch über die relative Häufigkeit der extremen Niederschlagsereignisse bei bestimmten Wetterlagen können für alle Klimaregionen besonders „effektive“ Wetterlagen ermittelt werden. In Abbildung 6 sind – wieder für die Beispiele der Klimaregionen „Adria“ und „Donau“ – die 10 „effektivsten“ Wetterlagen sortiert für die Überschreitung der 99. Perzentile dargestellt (grau). In den Abbildungen ist auch die relative Häufigkeit der jeweiligen Wetterlage während der gesamten Periode abgebildet (rot).

Über das Jahr gesehen sind in der Region „Donau“ (ebenso wie in den Regionen „Nord“ und „Inneralpin“) die effektivsten Wetterlagen jeweils Nordlagen. Die Wetterlage 1AC kommt zwar insgesamt nicht sehr häufig vor, verursacht aber, wenn sie vorkommt, relativ häufig 3-tägige

Extremniederschläge. Hingegen ist in der Region „Adria“ besonders die Südlage 5CC deutlich effektiver als andere Lagen, dazu kommen noch weitere Strömungslagen des Südsektors.

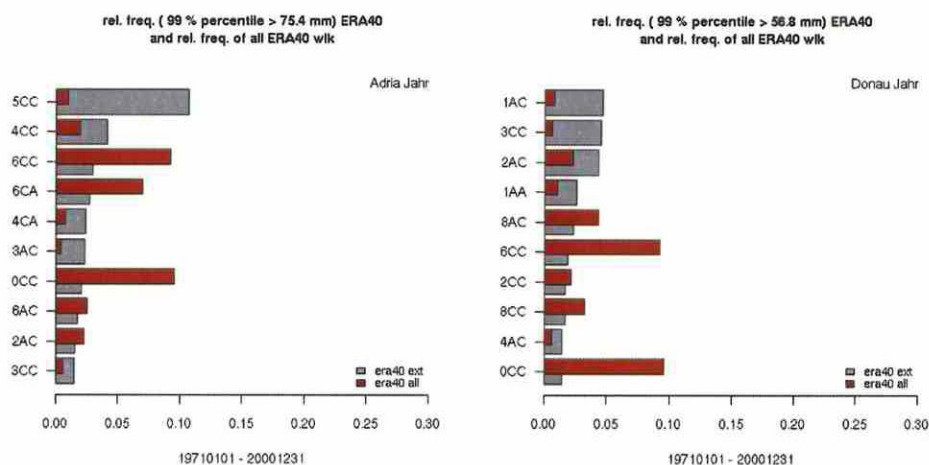


Abbildung 6: Häufigkeit eines Extremereignisses bei einer Wetterlage (grau) in den Regionen „Adria“ (links) und „Donau“ (rechts) sowie die Häufigkeit dieser Wetterlage während der gesamten Untersuchungsperiode 1971 - 2000 (rot).

Auswertungen für die Jahreszeiten werden (wieder beispielhaft für die Region „Donau“) in Abbildung 7 dargestellt. Im Winter verursachen in allen Regionen, außer der Region „Adria“, die Wetterlagen mit nördlichen Strömungsrichtungen extreme Niederschläge (in der Region „Adria“ sind es südliche Anströmungen). Frühjahrsextreme werden in der Region „Donau“ eher durch nördliche, teils nordöstliche bis östliche Wetterlagen verursacht. Im Sommer und Herbst sind Nordströmungen die effektivsten Wetterlagen für Niederschlagsextreme.

Die Abweichungen zwischen den Auswertungen der Hochwasserereignisse und der Niederschlagsereignisse lassen sich auf die im Detail unterschiedlichen Vorgehensweisen zurückführen. Für Hochwasserereignisse wurden die Pegel einzeln betrachtet und es wurde ein Filterkriterium angewendet (mindestens 2 Ereignisse pro Pegel), aus allen Pegeln einer Region wurde dann der Mittelwert gebildet. Für Niederschlagsereignisse wurden über Schwellenwerte der Perzentilüberschreitung an einer bestimmten Anzahl von Stationen regionale Ereignisse bestimmt, ohne Filter.

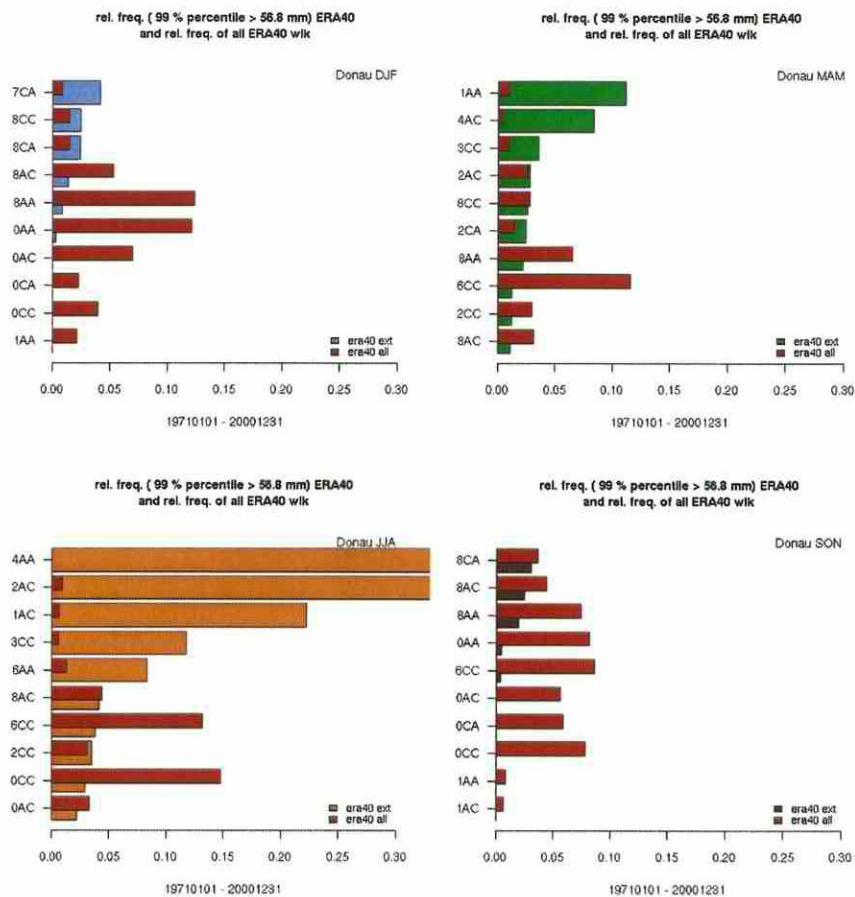


Abbildung 7: Häufigkeit eines Extremereignisses bei einer Wetterlage in der Region „Donau“ sowie die Häufigkeit dieser Wetterlage während der gesamten Untersuchungsperiode 1971 - 2000 (rot) in den 4 Jahreszeiten

Der deutlichste Zusammenhang zwischen Extremniederschlägen und Druckfeldern ergibt sich bei der Betrachtung der gemischten zweiten Ableitung (zeitliche Entwicklung von Druckgradienten als Hinweis auf den Durchzug synoptischer Systeme).

Die Häufung der Starkniederschlagsereignisse im linken oberen Quadranten in Abbildung 8 und Abbildung 9 (gelbe und rote Kreise) zeigt, dass diese vor allem bei negativen Werten der gemischten zweiten Ableitung des Ost-West- und bei positiven Werten des Nord-Süd-Druckgradienten auftreten. Eine negative zeitliche Ableitung beim nördlichen Ost-West-Gradienten ergibt sich z. B. beim Durchzug eines Trogens oder einer Front von West nach Ost.

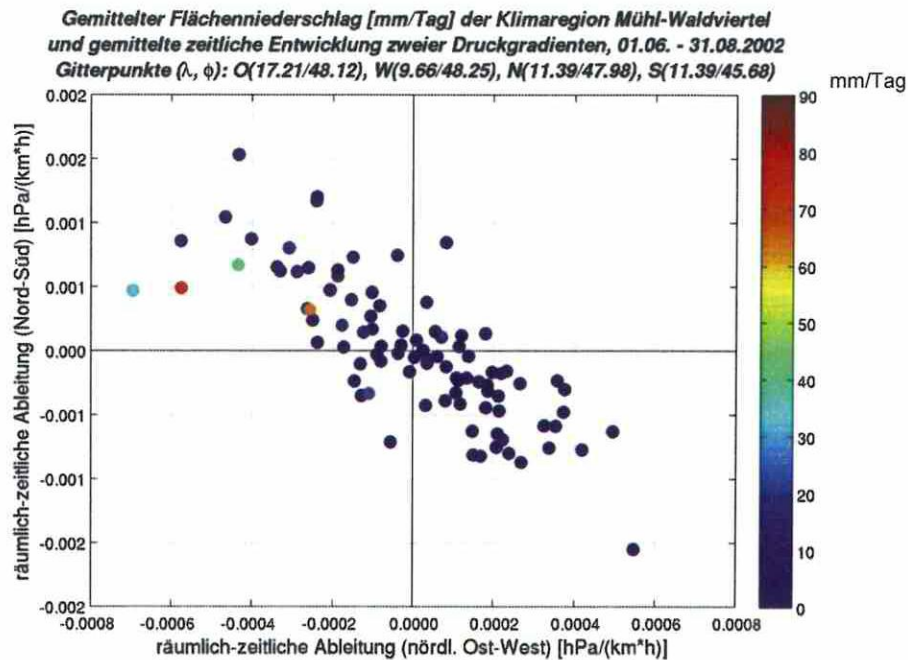


Abbildung 8: Beispiel für den Zusammenhang der zeitlichen Entwicklung zweier Druckgradienten mit dem Niederschlag einer Klimaregion (Zeitraum: 01.06. - 31.08. 2002, feuchter Sommer).

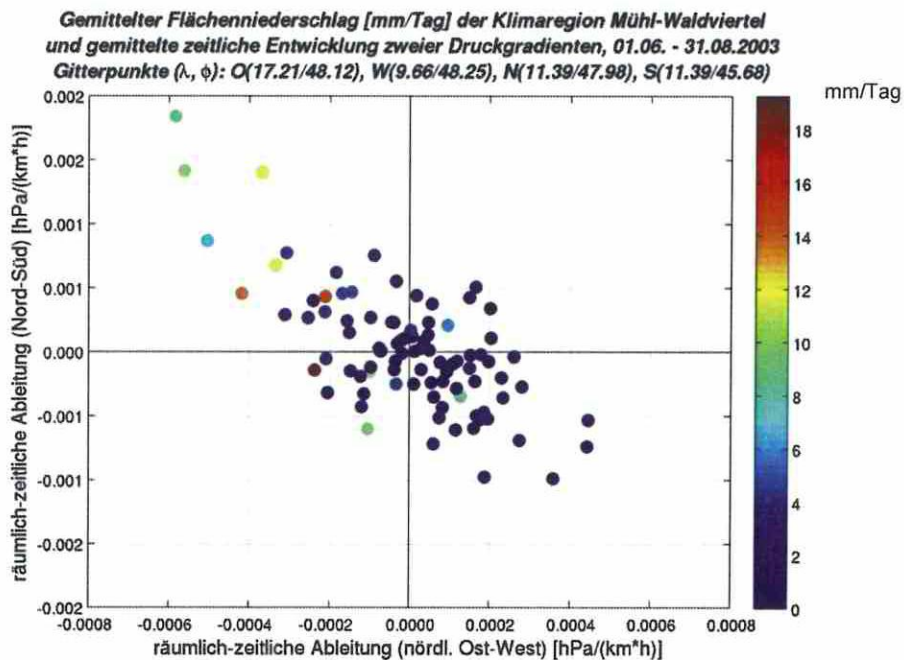


Abbildung 9: Beispiel für den Zusammenhang der zeitlichen Entwicklung zweier Druckgradienten mit dem Niederschlag einer Klimaregion (Zeitraum: 01.06. - 31.08. 2003, trockener Sommer)

Diese Korrelation zwischen zeitlicher Entwicklung eines Druckgradienten und Niederschlag lässt sich auch anhand von Häufigkeitsverteilungen zeigen (Abbildung 10). In dieser Darstellung sind die stärksten negativen Werte der gemischten zweiten Ableitung in der Klasse 1, die stärksten positiven in Klasse 10 eingeteilt, Werte um 0 liegen in den Klassen 5 und 6. Man erkennt deutlich, dass die Niederschlagsereignisse negativ mit der zeitlichen Entwicklung des Ost-West-Druckgradienten korrelieren und sich daher die stärksten Niederschläge bei den stärksten negativen gemischten zweiten Ableitungen des Drucks konzentrieren, wobei dieser Zusammenhang für die Niederschläge größer als das 75 %-Quantil noch stärker ist.

Für die zeitliche Entwicklung des Nord-Süd-Druckgradienten zeigt sich bei dieser Art der Auswertung ein starker Zusammenhang zwischen positiven räumlich-zeitlichen Druckableitungen und Starkniederschlägen.

Diese Art der Untersuchung wurde nicht nur mit Quantilen, sondern auch mit den 95, 99 und 99,5 Perzentilen durchgeführt. Bei den Ergebnissen zeigt sich die Robustheit dieser Methodik.

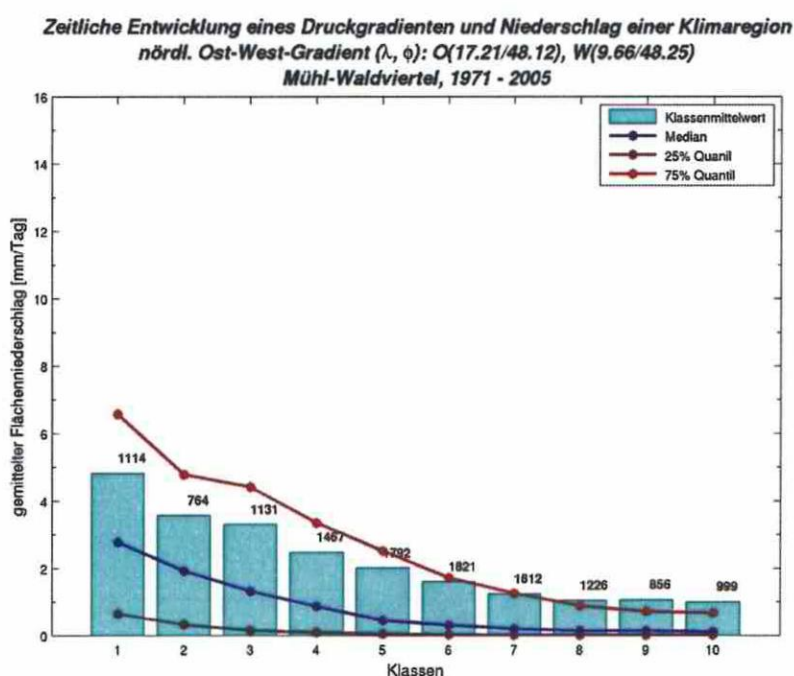


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung des Niederschlags (gemittelter Tagesflächenniederschlag) der Klimaregion „Mühl-Waldviertel“ in Zusammenhang mit der gemischten zweiten Ableitung.

Bei der getrennten Untersuchung von Sommer- und Winterhalbjahr ist zu bemerken, dass in den Monaten April, Mai, Juni, Juli, August, September in jeder Klimaregion mehr Niederschlag fällt als in den Monaten des Winterhalbjahres.

Die saisonalen Auswertungen zeigen, dass der Zusammenhang zwischen zeitlicher Entwicklung eines Druckgradienten und Starkniederschlagsereignissen im Sommer besonders stark ausgeprägt ist. Es zeigt sich in allen Klimaregionen, dass bei negativen Werten der zeitlichen Entwicklung des Ost-West-Druckgradienten nördlich des Alpenbogens (und bei positiven Werten der räumlich-zeitlichen Ableitung des Druckfeldes in Nord-Süd-Richtung) auch im Mittel der größte Flächenniederschlag gemessen wird. Natürlich gibt es in den betrachteten Monaten auch viele kleinräumige konvektive Ereignisse, welche keine kräftigen Signale im großräumigen Druckgradienten hervorrufen. Diese bringen relativ zu synoptischen Systemen im Mittel aber weniger Niederschlag für die gesamte Klimaregion.

Besonders beeindruckend ist, dass für alle Klimaregionen Österreichs dieselbe Aussage getroffen werden kann: Für die Menge des Gesamtniederschlages, welcher in den Sommermonaten fällt, sind synoptische Systeme, welche ein Signal im Druckgradienten hinterlassen, ergiebiger, als konvektive Ereignisse. Sollten in Zukunft weniger Tiefdrucksysteme Österreich, wegen einer Verschiebung der Frontalzone passieren, würde dies verstärkt Trockenperioden zur Folge haben. Eine Zunahme von durchziehenden Zyklonen würde zu mehr Niederschlag und somit zu feuchteren Verhältnissen führen.

Besonders starke Zusammenhänge zwischen der gemischten zweiten Ableitung und Niederschlagsereignissen, welche in der Klimaregion im Mittel den größten Anteil bringen, zeigen sich im Sommerhalbjahr in der Region „Nord“ bei beiden Gradienten. Es sind Staulagen im Nord-Süd-Gradienten abgebildet, welche viel Niederschlag in dieser Region bringen. Auch bei den Regionen „Adria“ und „Donau“ sind die Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Ableitungen sehr gut ausgeprägt.

Auch in den anderen Jahreszeiten zeigt sich, dass im Mittel der meiste Flächenniederschlag bei negativen Werten (nördlicher Ost-West-Gradient), bzw. bei positiven Werten (Nord-Süd-Gradient) fällt. Auch im Winter, in dem vergleichsweise wenig Niederschlag fällt, können kräftige Signale in der gemischten zweiten Ableitung des Druckfeldes mit flächenmäßig ergiebigen Niederschlagsereignissen in Verbindung gebracht werden.

3.1.2 Niederwasser und Trockenperioden

Für die betrachteten Zeitfenster kann keine deutliche Korrelation zwischen dem Auftreten der Wetterlagen bzw. Strömungsrichtungen und dem Auftreten von Niederwasserperioden festgestellt werden. Ein etwas deutlicherer Zusammenhang wird zwischen Wetterlagen und regionalen Niederwasserperioden erkennbar. Der Zusammenhang wird aber nicht als ausreichend deutlich qualifiziert, um die Ergebnisse für eine Untersuchung der möglichen Folgen des Klimawandels heranzuziehen.

Ein Grund dafür kann möglicherweise bei der Betrachtung der Persistenzen gefunden werden. Hier fällt auf, dass länger anhaltende Persistenzen (sowohl der Wetterlagen wie der Strömungsrichtungen) sehr selten auftreten. Das deutet darauf hin, dass bei der verwendeten

Klassifikation großräumig stabile Großwetterlagen nicht wiedergegeben, sondern wegen lokal wechselnder Gegebenheiten als verschiedene Wetterlagen klassifiziert werden.

Ein stärkerer Zusammenhang kann für die Kombination aus Wetterlagen und Lufttemperaturanomalie gezeigt werden. Betrachtet man die Wetterlagen in Kombination mit den Temperaturanomalien (Abbildung 11; positiv, wenn die Temperatur mehr als 2 °C über dem Mittel liegt (LTA>2), negativ, wenn sie mehr als 2 °C geringer ist (LTA<-2)) im Sommer insgesamt und während Niederwasserperioden, wird deutlich, dass einerseits einige Wetterlagen häufiger mit positiven Anomalien (Südwestströmungen, 6), einige häufiger mit negativen Anomalien (West- und Nordwestströmungen 7 und 8) auftreten. Andererseits gibt es Wetterlagen, die generell im Sommer auch bei negativen Lufttemperaturanomalien auftreten, während Niederwasser aber fast nie zusammen mit negativen Anomalien (0CC, 6CC, 8CA) auftritt.

Dieser Zusammenhang zeigt sich auch in den nicht dargestellten Regionen. Bei einem Auftreten von diesen drei Wetterlagen zusammen mit kühleren Temperaturen als im Mittel können Niederwasserperioden also praktisch ausgeschlossen werden. Für den Winter zeigen sich mit umgekehrten Vorzeichen der Temperaturanomalien ähnliche Ergebnisse wie im Sommer, allerdings weniger deutlich.

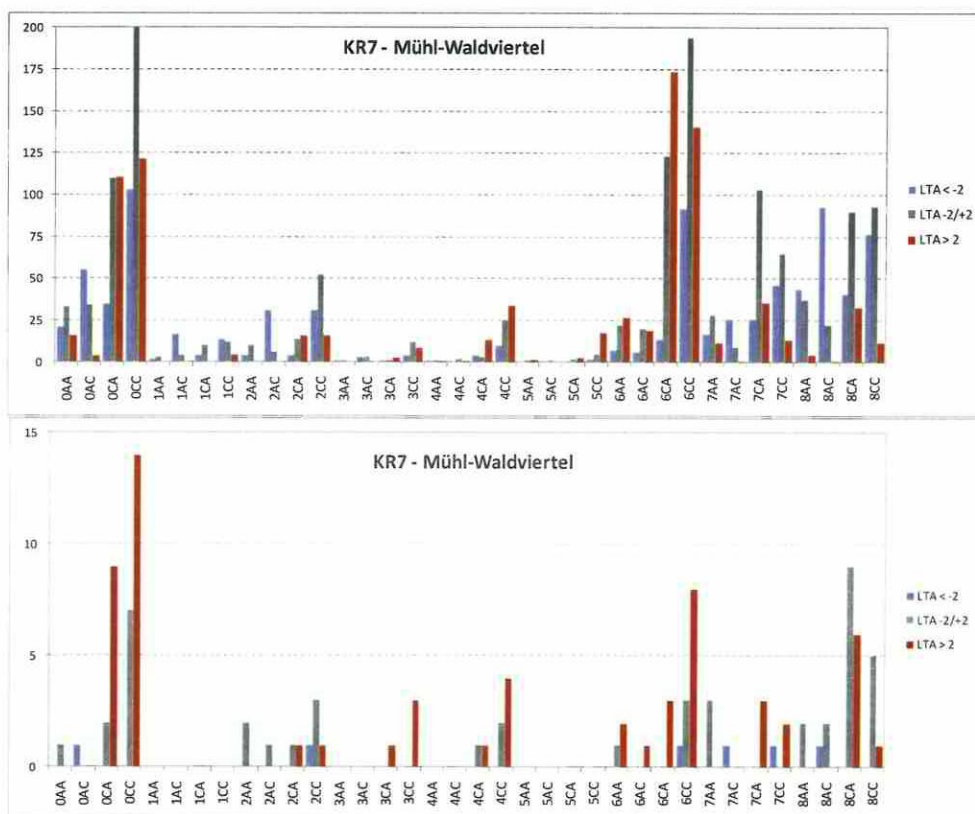


Abbildung 11: Gesamthäufigkeiten der Wetterlagen in den Lufttemperaturanomalie(LTA)-Klassen (oben) und Häufigkeiten an Tagen während regionalen Niederwasserperioden im Sommer (unten), Klimaregion „Mühl-Waldviertel“

Die Effektivität einer Wetterlage, in einer Trockenperiode vorzukommen wird in Abbildung 12 am Beispiel der Region „Donau“ dargestellt (Darstellung der 10 effektivsten Wetterlagen). Es fällt auf, dass die allereffektivsten Wetterlagen – wie auch in den anderen Regionen – antizyklonale Wetterlagen sind. Außerdem verursachen die seltensten Wetterlagen am effektivsten Trockenperioden.

Insgesamt ist die Aussagekraft dieser Auswertung daher eher gering, wenn man bedenkt, dass beispielsweise die extrem seltenen Wetterlagen 3AA oder 4AA, die von ihrer meteorologischen Situation trocken sind, recht wahrscheinlich in einer längeren Trockenphase vorkommen können – ohne eigentlich für diese Situation verantwortlich zu sein.

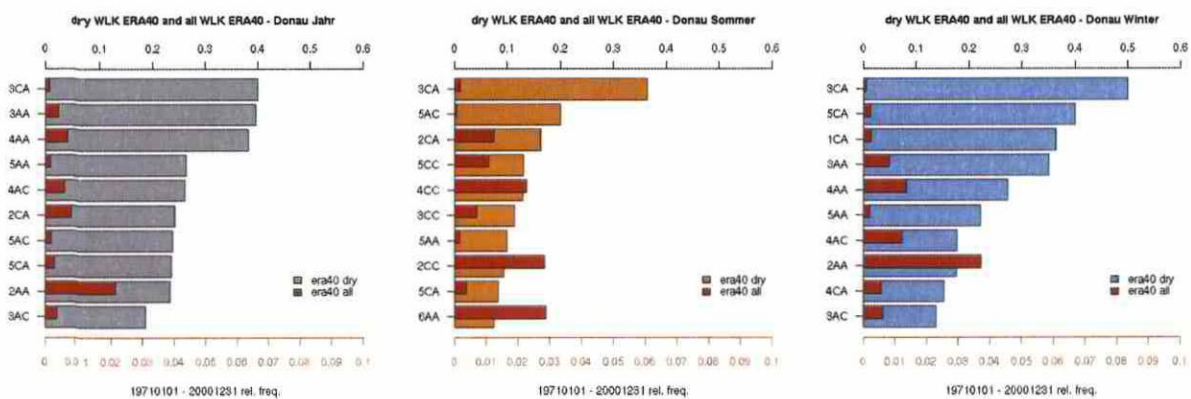


Abbildung 12: Häufigkeit eines Trockenwetertages bei einer Wetterlage in der Region „Donau“ sowie die Häufigkeit dieser Wetterlage während der gesamten Untersuchungsperiode 1971 - 2000 (rot) im Sommer- und Winterhalbjahr

Die Auswertungen der Bodendruckfelder zeigen, dass die 15-Tages-Varianz im Druckgradienten als Maß für niederschlagsarme Perioden anwendbar, jedoch nicht für alle Jahreszeiten und Klimagelbiete gleich aussagekräftig ist. Abbildung 13 zeigt beispielhaft das Ergebnis für die Auswertung für Sommer und die Klimaregion „Donau“. Werte geringer Varianz liegen in Klasse 1, Werte hoher Varianz in Klasse 10; die geringsten Niederschläge fallen mit den geringsten Varianzen zusammen.

Die stärksten Zusammenhänge sind in allen Klimaregionen für Herbst, Winter und Winterhalbjahr zu erkennen, da in diesen Zeiträumen Niederschläge vor allem synoptisch verursacht werden und konvektive Ereignisse eine untergeordnete Rolle spielen. Auch für den Sommer werden in den einzelnen Klimagebieten gute Ergebnisse erzielt. Am wenigsten ausgeprägt ist der Zusammenhang zwischen der Varianz eines Druckgradienten und Trockenperioden im Frühling. In dieser Jahreszeit beginnt die Saison der durch Konvektion verursachten Niederschlagsereignisse, welche nicht zwingend starke Änderungen im Druckgradienten erfordern.

**15-Tages-Varianz eines Druckgradienten und Niederschlag einer Klimaregion
nördl. Ost-West-Gradient (λ, ϕ): O(17.21/48.12), W(9.66/48.25)
Donau, JJA von 1971 - 2005**

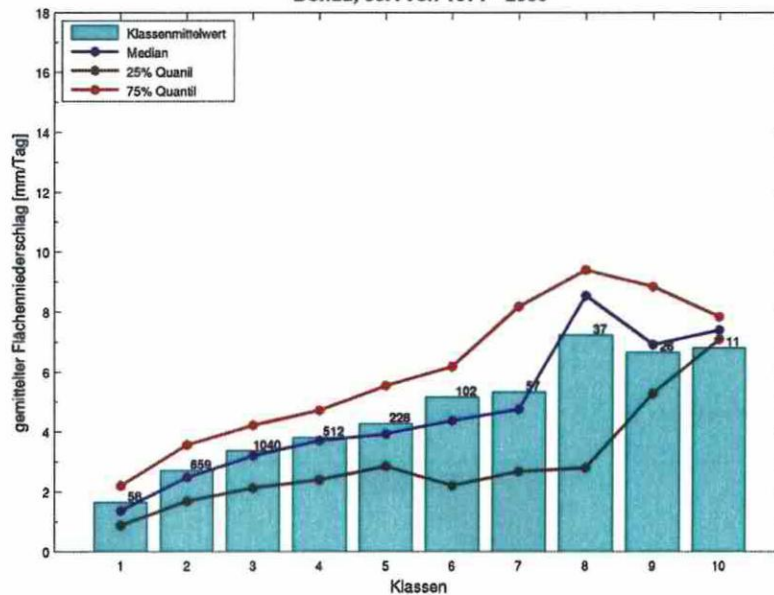


Abbildung 13: Varianz des nördlichen Ost-West-Druckgradienten mit dem Niederschlag der Klimaregion „Donau“ (Sommer)

3.1.3 Ergebnis Hypothesen 1, 1a und 1b

Die Hypothesen 1, 1a und 1b können im Wesentlichen bestätigt werden. Vor allem für Hochwasserereignisse und Starkniederschläge können deutliche Zusammenhänge zwischen bestimmten Wettersituationen und Extremereignissen gezeigt werden. Für Niederwasser- und Trockenperioden sind die Ergebnisse weniger deutlich, weil diese Perioden lange andauern und viele verschiedene Wetterlagen und Druckmuster in diesen Zeiträumen auftreten.

Auslösende Wetterlagen sind deutlich unterschiedlich in den verschiedenen Klimaregionen. Einige Klimaregionen wurden sehr groß gewählt; bei einer kleinräumigeren Aufteilung könnten die regionalen Auswertungen eine größere Trennschärfe erhalten.

Die auslösenden Wetterlagen sind deutlich unterschiedlich in verschiedenen Jahreszeiten. Die großen Unterschiede zeigen auch, dass das Ergebnis der Analyse stark von der Wahl der zeitlichen Unterteilung abhängt. Eine Auswertung nach meteorologischen Jahreszeiten wurde für das Untersuchungsgebiet Österreich als sinnvoll angesehen.

3.2 Hypothese 2: Die Wetterlagen bzw. Druckmuster beschreibenden Größen werden von Klimamodellen gut abgebildet

Um zu beurteilen, wie gut die für die Wetterlagenanalysen relevanten Parameter in den Klimamodellen abgebildet werden, wurden Auswertungen und Klassifizierungen aus den Kontrollläufen der Klimamodelle mit Auswertungen und Klassifizierungen aus Reanalysedaten verglichen.

3.2.1 WLK733

Der Vergleich der Strömungsrichtungsklassen (Abbildung 14) zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Häufigkeiten zwischen Ergebnissen mit den Kontrollläufen der Klimamodelle (farbig dunkel) und mit Reanalysedaten (grau). Für einzelne Wetterlagen ergeben sich hingegen deutliche Abweichungen (Abbildung 15).

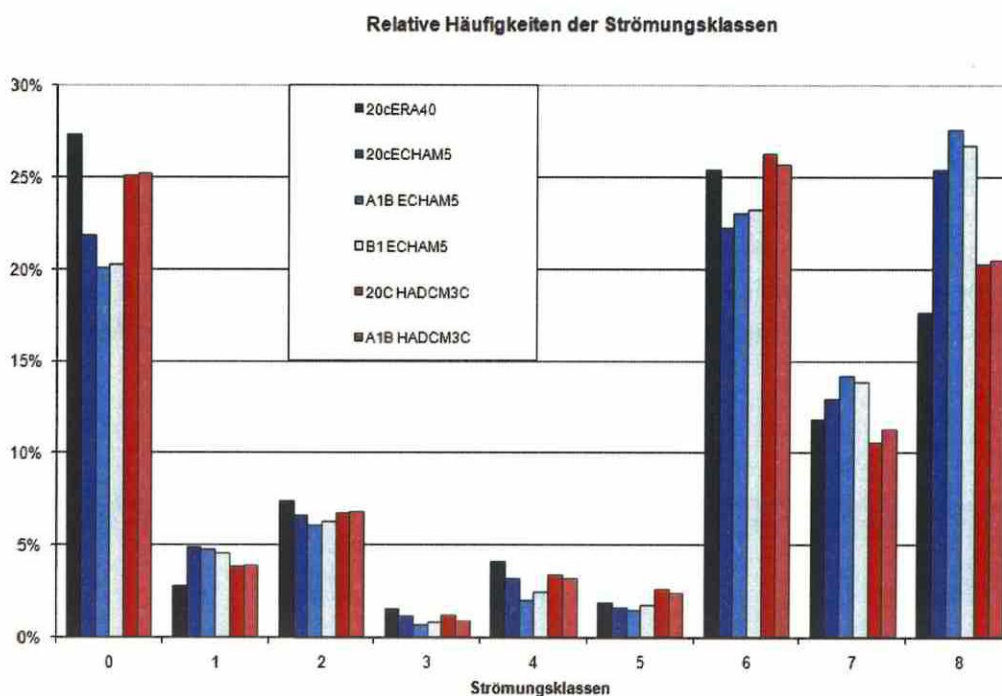


Abbildung 14: Relative Häufigkeiten von dominanten Windrichtungen auf der Basis von Reanalysen (ERA40), GCM-Kontrollläufen und GCM-Szenarien

Die Unterschiede zwischen ERA40 und den Kontrollläufen sind aber in jedem Fall größer als die Änderung zwischen Kontrollläufen und Klimaszenarien (Abbildung 14). Außerdem zeigt die Wetterlagenklassifizierung eine hohe Sensitivität in Bezug auf Gitterpunktlage und -abstände. Aufgrund dieser großen Unsicherheiten wurden rein qualitative Beurteilungen möglicher Veränderungen durchgeführt.

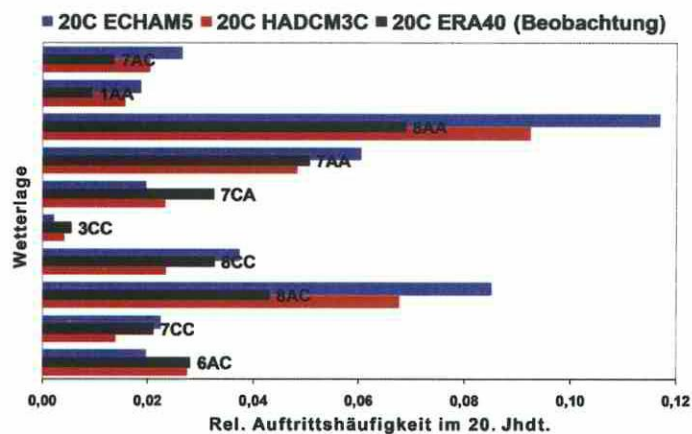


Abbildung 15: Wetterlagenhäufigkeiten auf der Basis von Beobachtungen (ERA40) und GCM-Kontrollläufen für ausgewählte Wetterlagen

3.2.2 Bodendruckfelder

Abbildung 16 zeigt den Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der räumlich-zeitlichen Druckableitung für Reanalysen (ERA40 und MESOCLIM) und Klimamodell-Kontrollläufen. Auffallend ist, dass die Häufigkeitsverteilungen der räumlich-zeitlichen Druckableitung in Ost-West-Richtung einander in dem betrachteten Zeitraum von 35 Jahren stark ähneln, bei der Häufigkeitsverteilung der zeitlichen Entwicklung des Nord-Süd-Druckgradienten die GCMs aber eine deutlich höhere Anzahl an Werten in den Klassen um Null anzeigen als MESOCLIM und ERA40.

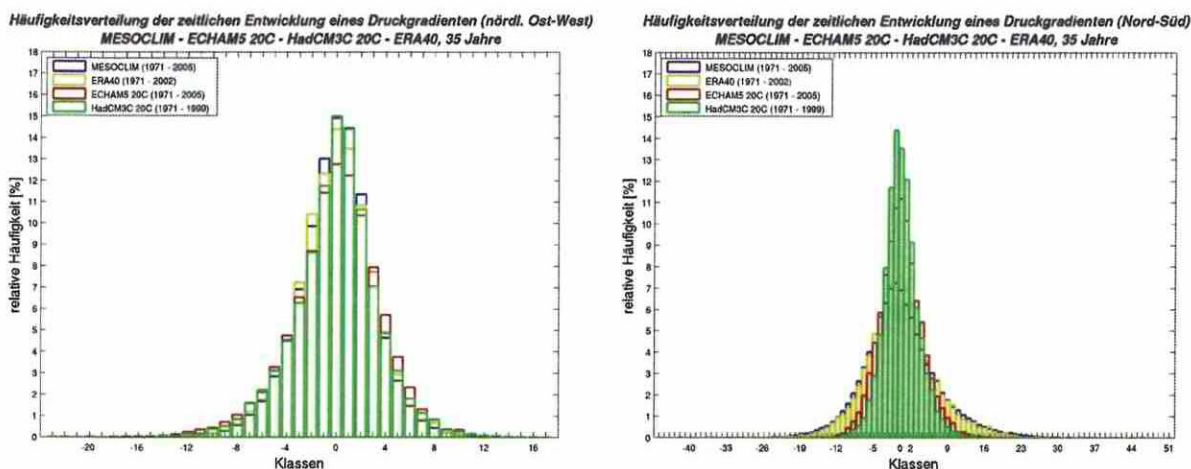


Abbildung 16: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der zeitlichen Entwicklung des nördlichen Ost-West-Druckgradienten (links) und des Nord-Süd-Druckgradienten (MESOCLIM – blau, ERA40 – gelb und 20C-Läufe der GCMs, ECHAM5 – rot, HadCM3C – grün)

Auch bei der 15-Tages-Varianz eines Druckgradienten fallen große Unterschiede zwischen jener des Ost-West- und des Nord-Süd-Gradienten auf (Abbildung 17). Die GCMs zeigen nämlich nur für den Nord-Süd-Druckgradienten eine deutlich höhere Anzahl von Varianzen in den niedrigen Klassen als MESOCLIM oder ERA40. Die Häufigkeit der Ereignisse in den höheren Klassen wird von den GCMs beim nördlichen Ost-West-Druckgradienten überschätzt, während sie beim Nord-Süd-Gradienten sehr stark unterschätzt wird.

Die großskaligen Gitterpunktsdistanzen der GCMs und die dadurch resultierende gröbere Auflösung der Alpen können für die Abweichungen zwischen den Häufigkeitsverteilungen von MESOCLIM und den Kontrollläufen der Modelle verantwortlich gemacht werden. Bei den Ableitungen des Nord-Süd-Druckgradienten macht sich vor allem die breitere und flachere Modelltopographie der Alpen in den GCMs bemerkbar und führt so zu einer starken Unterschätzung der Extremereignisse. Aus denselben Gründen sind auch Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen der Ableitungen des Ost-West-Druckgradienten nördlich des Alpenbogens zu erkennen. Hier führt die Abbildung der Alpen in den Modellen zu einer leichten Überschätzung der in der Realität vorherrschenden Druckverhältnisse.

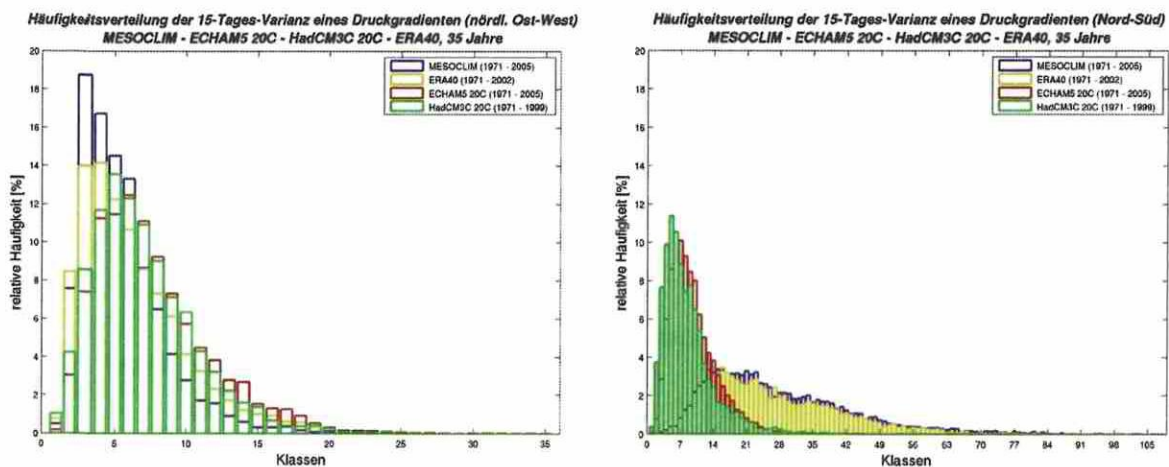


Abbildung 17: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der 15-Tages-Varianz des nördlichen Ost-West-Druckgradienten und des Nord-Süd-Druckgradienten (MESOCLIM – blau, ERA40 – gelb und 20C-Läufe der GCMs, ECHAM5 – rot, HadCM3C – grün)

3.2.3 Ergebnis Hypothese 2

Die Hypothese 2, dass die Wetterlagen bzw. Druckmuster beschreibenden Größen von Klimamodellen gut abgebildet werden konnte nicht bestätigt werden. Sowohl bei der Wetterlagenklassifizierung nach WLK733 als auch bei der Analyse der Bodendruckfelder ergeben sich starke Abweichungen zwischen Ergebnissen aus Reanalysedaten und aus Klimamodell-Kontrollläufen.

3.3 Hypothese 3: In den Zukunftsszenarien kommt es zu einer Veränderung im Auftreten der Wetterlagen bzw. Druckmuster

Für die Beurteilung der Veränderungen aufgrund des Klimawandels wurden die mit den Simulationsergebnissen der globalen Klimamodelle erstellten Wetterlagenkataloge für das 20. Jahrhundert mit jenen für das 21. Jahrhundert verglichen. Dabei wurde untersucht, welche Wetterlagen im 21. Jahrhundert eine größere bzw. geringere relative Häufigkeit aufweisen als in der historischen Vergleichsperiode.

3.3.1 Änderungen bei Hochwasser und Extremniederschläge auslösenden Wetterlagen

Der Vergleich der relativen Häufigkeiten der Wetterlagen zwischen der Referenzperiode im 20. Jahrhundert und der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zeigt insgesamt relativ geringe Veränderungen. Eine qualitative visuelle Beurteilung der Trends in den 10 jeweils relevantesten Wetterlagen zeigt, dass die prognostizierten Veränderungen verschiedener Modellen und Szenarien voneinander abwichen. Übereinstimmende Trends können nur für Winter und Frühling in nordwestlichen Regionen Österreichs festgestellt werden. Häufigeres Auftreten von Nord-West- und West-Wetterlagen, die in diesen Regionen und Jahreszeiten häufig zu Hochwasser führen, deuten auf einen Anstieg der Hochwasserhäufigkeit hin (Abbildung 18). Eine quantitative Aussage darüber, wie wahrscheinlich das Eintreffen der prognostizierten Veränderungen und wie groß deren Ausmaß ist, kann aber nicht abgeleitet werden.

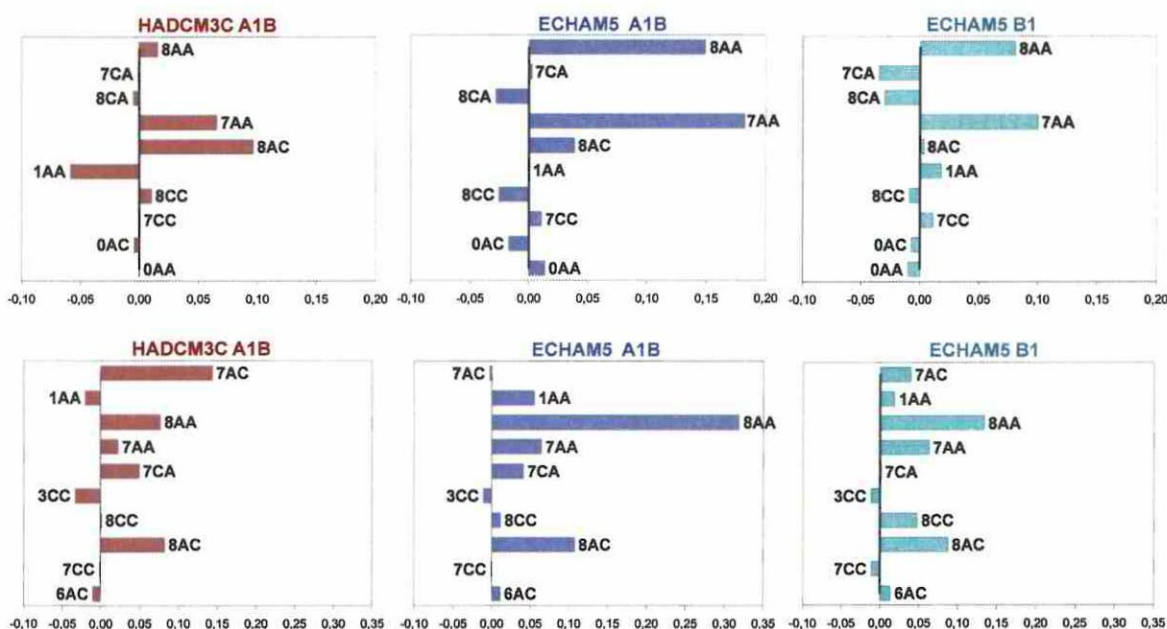


Abbildung 18: Veränderungen der Häufigkeiten von Hochwasser auslösenden Wetterlagen (multipliziert mit relativer Häufigkeit eines Hochwassers bei dieser Wetterlage) für die Klimaregion „Donau“ und Winter (oben) und für die Klimaregion „Mühl-Waldviertel“ und Frühling (unten)

Eine ähnliche Aussage ergibt sich für die Extremniederschlag verursachenden Wetterlagen. Abbildung 19 zeigt den Vergleich der Auftretenshäufigkeiten im 20. Jahrhundert mit der relativen Häufigkeit in der Zukunft (2051-2080) für die Region „Nord“ und Winter. Die Veränderungen sind negativ, wenn in der Zukunft eine Wetterlage seltener auftritt, und positiv, wenn eine Wetterlagen häufiger auftritt. In der Region „Nord“, aber auch in den Regionen „Inneralpin“, „West“ und möglicherweise „Donau“, könnte im Winter eine Zunahme der 3-tägigen Extremniederschläge auftreten. Für die übrigen Jahreszeiten kann aus den Auswertungen keine Tendenz abgelesen werden.

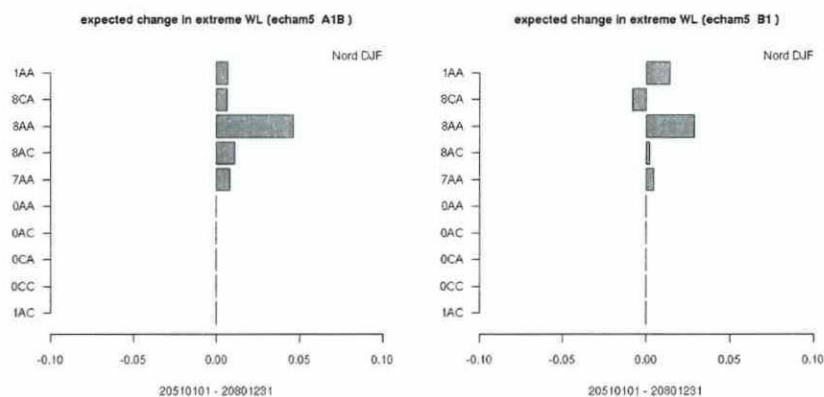


Abbildung 19: Veränderung der Häufigkeiten von Starkniederschlägen auslösenden Wetterlagen (multipliziert mit der relativen Häufigkeit eines Extremereignisses bei dieser Wetterlage) bei unterschiedlichen Szenarien (A1B, B1) des ECHAM 5 in der Region „Nord“ im Winter

3.3.2 Änderungen bei Extremwerten der Bodendruckfelder

Um die Unterschiede in den Randklassen der Häufigkeitsverteilungen zu verdeutlichen (entsprechen den Extremereignissen im Druck), wurden die relativen Häufigkeiten dieser Extremereignisse ausgewertet. Dafür erfolgte die Auszählung der Ereignisse ab einem gewählten Schwellwert. Es wurde jeweils der Rand der Verteilung gewählt, der mit extremen Niederschlagsereignissen bzw. Trockenperioden korreliert.

Über einen Zeitraum von 35 Jahren zeigt sich kaum eine Änderung im Verhalten der gemischten zweiten Ableitung (Abbildung 20). Man kann feststellen, dass sowohl ECHAM5 (A1B und B1) als auch HadCM3C (A1B) einen leichten Anstieg der Extreme in der zeitlichen Entwicklung des nördlichen Ost-West-Druckgradienten zeigen. Bei jener des Nord-Süd-Druckgradienten ist in den ECHAM5-Szenarien kein Trend erkennbar, HadCM3C A1B verzeichnet jedoch einen leichten Rückgang der Extrema. Durch die schon erwähnten großen Unterschiede zwischen Beobachtungen und GCM-Szenarien sind Tendaussagen allerdings wenig robust.

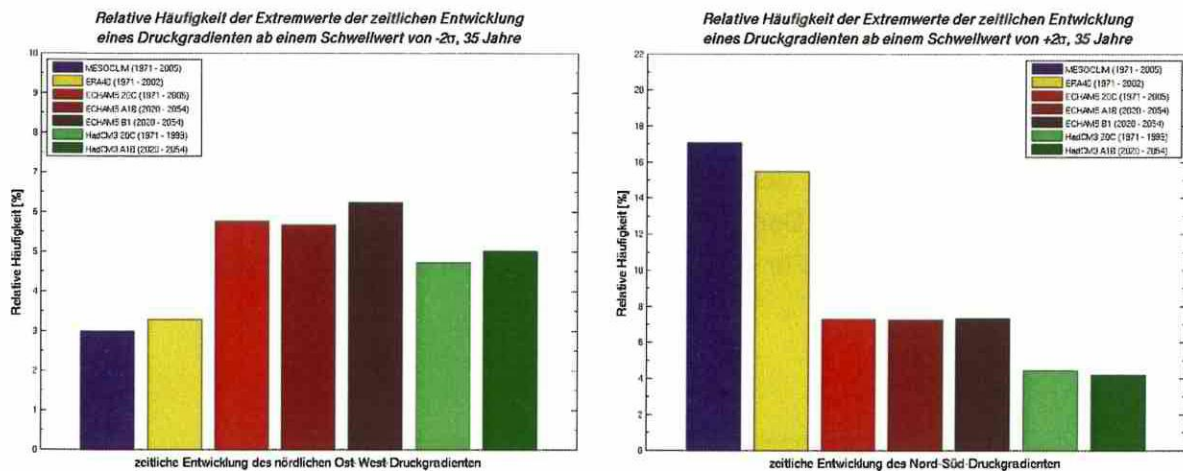


Abbildung 20: Extremwertauszählung der zeitlichen Entwicklung des nördlichen Ost-West-Druckgradienten (linker Rand) und des Nord-Süd-Druckgradienten (rechter Rand) aus MESOCLIM, ERA40 und den GCMs

Auch bei der Auswertung der Extremwerte der 15-Tages-Varianz zeigen sich kaum Veränderungen für die Zukunft. Sehr deutlich sichtbar wird jedoch die leichte Überschätzung des Ost-West-, beziehungsweise deutliche Unterschätzung des Nord-Süd-Druckgradienten in den Modellen im Vergleich zu MESOCLIM und ERA40. Auffällig hierbei ist, dass das HadCM3C A1B Szenario für die geringen Varianzen beider Druckgradienten einen leichten Anstieg verzeichnet, wohingegen die ECHAM5 Szenarien für jene des Ost-West-Druckgradienten einen leichten Rückgang und jene des Nord-Süd-Druckgradienten auch einen leichten Anstieg verzeichnen. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in den Auswertungen der meteorologischen Halbjahre und Jahreszeiten wider.

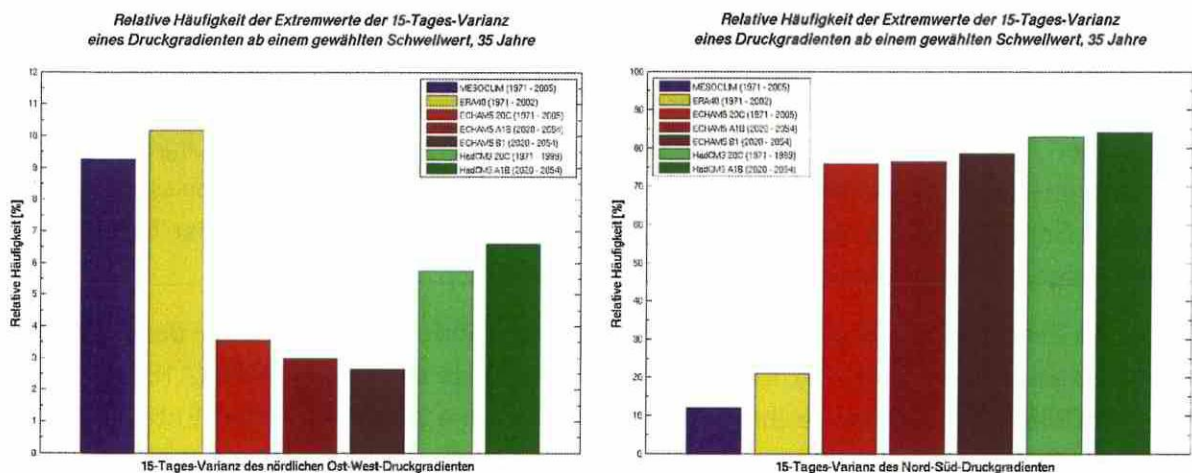


Abbildung 21: Extremwertauszählung der 15-Tages-Varianz des nördlichen Ost-West- und des Nord-Süd-Druckgradienten aus MESOCLIM, ERA40 und den GCMs

Für beide Auswertungen spiegelt sich das beschriebene Verhalten weitgehend in den Auswertungen nach meteorologischen Halbjahren und Jahreszeiten getrennt wider. Alle Auswertungen zeigen, dass die Zukunftsszenarien und Kontrollläufe der Modelle einander ähnlicher sind als die vergleichenden Auswertungen der Kontrollläufe des 20. Jahrhunderts mit den MESOCLIM-Daten. Dieses Verhalten spiegelt das schon mehrmals erwähnte Problem der Abbildung der Alpen in den GCMs wieder.

3.3.3 Ergebnis Hypothese 3

Teilweise zeigen die Klimamodelle Veränderungen im Auftreten der untersuchten Wetterlagen und Druckfelder. Die Veränderungen sind aber in den verschiedenen Modellen und Szenarien unterschiedlich. Vor allem sind die Änderungen in den Klimaszenarien geringer als die Abweichungen der Klimamodelle in Bezug auf Beobachtungen.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Analyse von möglichen Veränderungen in lokalen hydro-meteorologischen Extremereignissen unter geänderten Klimabedingungen. Die Outputs von Klimamodellen sind aufgrund der geringen räumlichen Auflösung allerdings nicht direkt für lokale bis regionale Analysen verwendbar.

Daher wurden die folgenden zentralen Hypothesen formuliert:

- (1) Bestimmte Wetterlagen lösen hydro-meteorologische Extremereignisse aus.
 - a. Die auslösenden Wetterlagen sind in verschiedenen klimatischen Regionen unterschiedlich.
 - b. Die auslösenden Wetterlagen sind in verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich.

Sollten diese Annahmen bestätigt werden, dann kann die statistische Beziehung (1) aus Beobachtungen abgeleitet werden. Die Druckfelder der Klimamodelle werden dann nach dem gleichen Schema klassifiziert. Aus den zukünftig zu erwartenden Änderungen in der Wetterlagenhäufigkeit kann dann – unter der Annahme, dass dieser statistische Zusammenhang auch für die Zukunft gilt – auf zukünftige Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen geschlossen werden. Dafür wurden zwei weitere Hypothesen formuliert und überprüft:

- (2) Die Wetterlagen bzw. Druckmuster beschreibenden Größen werden von Klimamodellen gut abgebildet.
- (3) In den Zukunftsszenarien kommt es zu einer Veränderung im Auftreten der Wetterlagen bzw. Druckmuster.

Die Hypothesen 1, 1a und 1b konnten im Wesentlichen bestätigt werden.

Für 3-tägige Niederschlagsextreme sowie für Hochwasserereignisse kann ein – je nach Klimaregion unterschiedlich deutlicher – Zusammenhang zwischen dem Auftreten von bestimmten Wetterlagen und Extremereignissen hergestellt werden. Die auslösenden Wetterlagen unterscheiden sich dabei kaum, wenn verschieden große Hochwasserereignisse untersucht werden. In den vier Jahreszeiten lösen aber deutlich unterschiedliche Wetterlagen Ereignisse aus.

Für Niederwasserperioden und Trockenperioden kann mit den hier angewandten Methoden kein deutlicher Zusammenhang mit dem Auftreten bestimmter Wetterlagen belegt werden. Während der relativ lange andauernden Niederwasser- und Trockenphasen treten zu viele verschiedene Wetterlagen auf. Auswertungen, in denen die Parameter Wetterlage und Lufttemperatur kombiniert wurden, zeigen einen besseren Zusammenhang mit Niederwasserperioden. In zukünftigen Untersuchungen sollte daher die Lufttemperatur in weiterführende Analysen miteinbezogen werden.

Zwischen Extremwerten der zeitlichen Entwicklung eines Druckgradienten und Starkniederschlagsereignissen sowie der 15-Tages-Varianz eines Druckgradienten und Trockenperioden kann ein guter Zusammenhang gezeigt werden.

Die Wetterlagenklassifizierung nach WLK733 zeigt für die hier durchgeführten Auswertungen einige Defizite. Der Fokus auf die relativ kleinräumige Alpendomäne und die Anzahl der Parameter führt zu sehr häufig wechselnden Wetterlagen mit sehr geringen Persistenzen. Wenn man annimmt, dass gerade Niederwasserereignisse, aber auch große Hochwässer, durch länger anhaltende Wettersituationen ausgelöst werden, könnte eine Klassifikation, die persistente Muster ausweisen kann, bessere Ergebnisse liefern. Da die Größe des Druckgradienten nicht berücksichtigt wird, kann auch keine Aussage über die Intensität der Ereignisse getroffen werden. In der hier untersuchten Anwendung führt dies dazu, dass nur eine qualitative Auswertung von Häufigkeiten durchgeführt werden kann. Der Zusammenhang zwischen Druckverteilungen und Lufttemperatur wird ebenfalls nicht berücksichtigt. Möglichkeiten für verbesserte Auswertungen bieten einerseits die Weiterentwicklung der österreichischen WLK733-Klassifizierung, andererseits auch die Verwendung anderer Wetterlagenklassifizierungen, die im Rahmen von COST733 öffentlich zugänglich gemacht wurden.

In Bezug auf die Einteilung in Klimaregionen zeigt sich, dass vor allem die Klimaregionen „Nord“, „Inneralpin“ und „Adria“ mit ihren großen Ost-West-Erstreckungen tendenziell zu groß gewählt wurden. In zukünftigen Auswertungen sollte eine etwas kleinräumigere Einteilung der Untersuchungsregionen eine genauere Analyse der regionalen Muster erlauben.

Hypothese 2 konnte nicht bestätigt werden.

Bei der Anwendung der Wetterlagenklassifikation mit Daten globaler Klimamodelle zeigen sich für die Kontrollperiode Differenzen zwischen den aus Reanalysedaten erstellten Katalogen und

jenigen aus GCM-Daten. Während die Übereinstimmungen für Strömungsrichtungen insgesamt zufriedenstellend sind, ergeben sich für die Wetterlagen bei Berücksichtigung der Zyklonalität deutliche Diskrepanzen. Dies weist darauf hin, dass die untersuchten Modelle die verwendeten klimatischen Parameter bzw. den Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen nicht ausreichend gut abbilden, um die WLK733 in ihrer detaillierten Form anzuwenden. Bei einem Test mit auf das Raster der Reanalysedaten interpolierten GCM-Variablen zeigt sich außerdem eine hohe Sensitivität auf Lage und Abstand der Gitterpunkte bzw. Interpolation.

Ein vergleichbares Bild ergibt sich bei der Analyse der Bodendruckfelder. Durch die grobe räumliche Auflösung und die flachere Abbildung der Alpen in den GCMs kommen die für die Alpen typischen Druckmuster, wie z.B. Stau an den Alpen und die damit verbundenen Luv/Lee-Effekten, nicht so ausgeprägt zum Vorschein, wie diese aber in der Realität jedoch auftreten. Eine Unterschätzung der Extremereignisse tritt sowohl bei der zeitlichen Entwicklung eines Druckgradienten als auch bei der 15-Tages-Varianz eines Druckgradienten auf.

Hypothese 3 konnte teilweise bestätigt werden.

Übereinstimmende Trends konnten auf der Basis der Analysen mit WLK733 nur für Winter und Frühling gefunden werden: für diese Jahreszeiten wird ein häufigeres Auftreten von Nord-West- und West-Wetterlagen prognostiziert, die in den Klimaregionen im Norden und Westen Österreichs in diesen Jahreszeiten Hochwasserereignisse auslösen. In Übereinstimmung damit wird für den Winter für nord-westliche Regionen, aber auch für die Region „Inneralpin“, ein häufigeres Auftreten von Wetterlagen, die Starkniederschläge auslösen, prognostiziert.

In Bezug auf die Bodendruckfelder vermitteln die Szenarien von ECHAM5 den Eindruck, dass die Ost-West gerichteten Wellen im Modell in Zukunft verstärkt auftreten und somit weniger ruhige Phasen (gradientschwache Lagen) zu verzeichnen sind. Das HadCM3C Zukunftsszenario hingegen zeigt eine Zunahme der ruhigen Phasen in Ost-West Richtung, was für vermehrt auftretende und länger andauernde Trockenperioden sprechen würde.

Generell sind keine wesentlichen Veränderungen in den Auftrittshäufigkeiten von kritischen Wetterlagen erkennbar, woraus auch keine größeren Veränderungen in den Extremwerten resultieren.

Sowohl für Wetterlagen als auch für die Extremereignisse in den Bodendruckfeldern, sind – bei allen untersuchten Klimamodellen und -szenarien – die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Reanalysedaten und aus Modelldaten größer als die Klimaänderungssignale der Klimamodelle. Tendaussagen sind daher mit großer Unsicherheit behaftet. Bei einer zukünftig verbesserten Abbildung der Alpen in den Klimamodellen könnten die gefundenen Methoden auf die neuen Druckdaten angewandt und anschließend verlässlichere Zukunftsaussagen getroffen werden.

5 Abkürzungen

A1B, B1	IPCC-Szenarien der Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert
COST733	EU-Forschungsprojekt zu Wetterlagenklassifikationen
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ECHAM5	GCM des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
ERA40	Reanalysedaten des ECMWF
GCM	Global Circulation Model (Globales Klimamodell)
HADCM3C	GCM des britischen UK MetOffice
hPa	Hektopascal, Einheit des Luftdrucks
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MESOCLIM	Reanalysedaten des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien
WLK733	Wetterlagenklassifikation für den Alpenraum (in COST733 entwickelt)
20C	20. Jahrhundert