



Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim Geisenheim



Hessisches Landesamt  
für Umwelt und Geologie

**Fachbereich Ingenieurwissenschaften  
Studiengang Umwelttechnik**

**BACHELORARBEIT**

Name: Nadine Jansky

Referent: Prof. Dr. Ursula Deister

Korreferent: Dr. Heike Hübener

Thema:

Analyse des NAO-Index als Optimierungsfaktor der hydrologischen WETTREG-Daten

Ich versichere hiermit, diese Arbeit nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel selbständig angefertigt zu haben.

Rüsselsheim, den .....

Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>4</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>5</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>6</b>
<b>GLOSSAR .....</b>	<b>7</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>1.    <b>EINLEITUNG.....</b></b>	<b>10</b>
<b>1.1 Motivation .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Stand der Forschung / Hintergründe der Arbeit.....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Nordatlantische Oszillation (NAO) .....	13
Wie beeinflusst die Nordatlantische Oszillation das Wetter Europas?.....	14
Trends der NAO.....	18
ENSO – El Niño / Southern Oscillation .....	19
1.2.2 Grundwasser .....	21
Globale Grundwasservorkommen .....	24
Bedeutsamkeit des Grundwassers in Deutschland .....	25
Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt .....	25
<b>1.3 Fragestellung und Hypothesen.....</b>	<b>26</b>
<b>2.    <b>METHODE.....</b></b>	<b>27</b>
<b>2.1 NAO-Index-Daten .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 Klimadaten.....</b>	<b>30</b>

<b>3.</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Vergleich der Klimadaten von Mannheim, Beerfelden und Gesamthessen.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Korrelation der NAO-Index-Daten mit den Klimadaten.....</b>	<b>35</b>
3.2.1	Korrelation der NAO-Index-Daten mit Klimadaten aus Mannheim .....	36
3.2.2	Korrelation der NAO-Index-Daten mit Klimadaten aus Beerfelden .....	39
3.2.3	Korrelation der NAO-Index-Daten mit den mittleren hessischen Niederschlagsdaten .....	41
3.2.4	Monatskorrelation der NAO-Index-Daten mit den mittleren hessischen Niederschlagsdaten .....	42
3.2.5	Vergleich der Korrelationsergebnisse der verschiedenen Standorte untereinander .....	44
3.2.6	Regressionsanalyse der NAO-Indizes mit den hydrologischen Parameter in Form einer .....	45
3.2.7	Korrelationsgraphiken.....	48
	Niederschlag.....	48
	Verdunstung.....	51
	Klimatische Wasserbilanz.....	51
<b>3.3</b>	<b>Vergleich der Niederschlag- Korrelationsergebnisse mit der ENSO.....</b>	<b>53</b>
<b>4.</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>AUSBLICK .....</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>64</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Atmosphärische Zirkulation.....	14
Abb. 2:	Die Jetstream-Winde .....	15
Abb. 3:	Polarfrontjetstream ohne Mäander (positiver NAO-Index) .....	15
Abb. 4:	Polarfrontjetstream mit Mäander (negativer NAO-Index) .....	16
Abb. 5:	Positive NAO-Phase .....	17
Abb. 6:	Negative NAO-Phase .....	17
Abb. 7:	Der NAO-Index nach Hurrell .....	18
Abb. 8:	Komponenten des Wasserkreislaufs.....	22
Abb. 9:	NAO-Index gemittelt über die vier Jahreszeiten und basierend auf den CRU-Azoren-Daten.....	28
Abb. 10:	Vergleich der drei NAO-Indices (jeweils als Wintermittel).....	29
Abb. 11:	Vergleich der drei NAO-Indices (jeweils als Winterhalbjahrmittel) .....	29
Abb. 12:	Räumliche Verteilung des Niederschlags in Hessen gemittelt über die Jahre 1971 bis 2000.....	31
Abb. 13:	Jahresgang der mittleren Niederschlagshöhe (1971-2000) .....	32
Abb. 14:	Jahresgang der mittleren Verdunstung (1971 – 2000).....	33
Abb. 15:	Jahresgang der mittleren Klimatischen Wasserbilanz (1971 - 2000) .....	33
Abb. 16:	Regression des Mannheimer Niederschlags als Winterhalbjahrsumme auf den CPC-NAO-Index als Wintermittel .....	47
Abb. 17:	Regression der Mannheimer Verdunstung als Quartal-1-Summe auf den Mittelwert-NAO-Index als Quartal-1-Mittel.....	47
Abb. 18:	Regression der Mannheimer Klimatischen Wasserbilanz als Sommersumme auf den CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel .....	47
Abb. 19:	Regression des mittleren hessischen Niederschlags als Wintersumme auf den CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel .....	47
Abb. 20:	Regression des Beerfeldener Niederschlags als Wintersumme auf den CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel .....	47
Abb. 21:	Regression der Beerfeldener Verdunstung als Quartal-1-Summe auf den CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel .....	47
Abb. 22:	Regression der Beerfeldener Klimatischen Wasserbilanz als Sommersumme auf den CPC-NAO-Index als Quartal-1-Mittel.....	47
Abb. 23:	Regression des mittleren hessischen Niederschlags als Februarsumme auf den CRU-Gibraltar-NAO-Index als Februarmittel .....	47
Abb. 24:	Korrelation des CPC-NAO-Index als Wintermittel mit dem Mannheimer Niederschlag als Winterhalbjahrsumme .....	50
Abb. 25:	Korrelation des CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel mit dem Beerfeldener Niederschlag als Wintersumme.....	50
Abb. 26:	Korrelation des CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel mit dem mittleren hessischen Niederschlag als Wintersumme .....	50
Abb. 27:	Korrelation des CPC-NAO-Index als 3-Jahre-gleitendes Wintermittel mit dem Mannheimer Niederschlag als 3-Jahre-gleitende Winterhalbjahrsumme .....	50
Abb. 28:	Korrelation des CPC-NAO-Index als 3-Jahre-gleitendes Winterhalbjahrmittel mit dem Beerfeldener Niederschlag als 3-Jahre-gleitende Wintersumme .....	50
Abb. 29:	Korrelation des CPC-NAO-Index als 3-Jahre-gleitendes Winterhalbjahrmittel mit dem mittleren hessischen Niederschlag als 3-Jahre-gleitende Wintersumme .....	50
Abb. 30:	Korrelation des CRU-Gibraltar-NAO-Index für.....	51
Abb. 31:	Korrelation des Mittelwert-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Mannheimer Verdunstung als Quartal-1-Summe.....	52

Abb. 32:	<i>Korrelation des CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Mannheimer Klimatischen Wasserbilanz als Sommersumme.....</i>	52
Abb. 33:	<i>Korrelation des CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Beerfeldener Verdunstung als Quartal-1-Summe .....</i>	52
Abb. 34:	<i>Korrelation des CPC-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Beerfeldener Klimatischen Wasserbilanz als Sommersumme.....</i>	52
Abb. 35:	<i>Vergleich der ENSO-Jahre mit den negativen bzw. positiven Niederschlag- Korrelationsjahren für Mannheim .....</i>	54
Abb. 36:	<i>Vergleich der ENSO-Jahre mit den negativen bzw. positiven Niederschlag- Korrelationsjahren für Beerfelden .....</i>	54
Abb. 37:	<i>Vergleich der ENSO-Jahre mit den negativen bzw. positiven Niederschlag- Korrelationsjahren für Hessen .....</i>	54

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	<i>Durchgeführte Verdunstungs- und KWB-Korrelationen .....</i>	35
Tab. 2:	<i>Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und Niederschlag, Verdunstung bzw. Klimatischer Wasserbilanz an der Station Mannheim .....</i>	36
Tab. 3:	<i>Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und den Beerfeldener Niederschlägen, Verdunstungen bzw. Klimatischen Wasserbilanzen.....</i>	39
Tab. 4:	<i>Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und dem mittleren hessischen Niederschlag ....</i>	41
Tab. 5:	<i>Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und den hessischen Niederschlägen (jeweils als Monatsmittel-Reihen der verschiedenen Monate).....</i>	43
Tab. 6:	<i>Vergleich der höchsten Korrelationskoeffizienten der Korrelationen von Mannheim, Beerfelden und Hessen .....</i>	44
Tab. 7:	<i>Jahre, in denen El-Niño- oder La-Niña-Erscheinungen aufgetreten sind.....</i>	53

# Abkürzungsverzeichnis

$A_d$	Direktabfluss
$A_o$	Oberflächenabfluss
$A_z$	Zwischenabfluss
CPC	Climate Prediction Center
CRU	Climatic Research Unit
DWD	Deutscher Wetterdienst
ENSO	El Niño / Southern Oscillation
$E_p$	potentielle Evapotranspiration
$E_t$	tatsächliche Evapotranspiration
GCM	general circulation model = Globales Klimamodell
GWN	Grundwasserneubildung
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWB	Klimatische Wasserbilanz
NAO	Nordatlantische Oszillation
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ONI	Oceanic Niño Index
$P$	Niederschlag
PA	monatliche SLP-Anomalie
PL	langjähriges SLP-Mittel
RCM	regional climate model = Regionales Klimamodell
SLP	sea level pressure
SOI	Southern Oscillation Index
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
$\sigma$	Standardabweichung

# Glossar

<i>Azorenhoch</i>	<i>Das Azoorenhoch ist ein Hochdruckgebiet, das sich im Bereich der Azoren im Nordatlantik ausbildet und zur Subtropenfront bzw. zum subtropischen Hochdruckgürtel gehört.</i>
<i>El Niño</i>	<i>Unter El Niño wird die Erwärmung der Meeresoberfläche des äquatorialen Pazifiks verstanden.</i>
<i>ENSO</i>	<i>Die ENSO setzt sich zusammen aus dem El-Niño- / La-Niña-Phänomen und der Southern Oscillation.</i>
<i>Evaporation</i>	<i>Evaporation ist die direkte Verdunstung über freien Bodenoberflächen und über Wasseroberflächen unter Ausschluss biologisch physiologischer Prozesse.</i>
<i>Evapotranspiration</i>	<i>Die Evapotranspiration ist die Summe aus Evaporation und Transpiration.</i>
<i>Grasreferenzverdunstung</i>	<i>Die Grasreferenzverdunstung ist die Wassermenge je Zeiteinheit, die von einer standardisierten Grasdecke auf standardisiertem Boden bei optimaler Wasserversorgung verdunstet wird.</i>
<i>Grundwasser</i>	<i>Grundwasser ist alles in der äußersten Erdrinde zirkulierende, unter der Erdoberfläche befindliche Wasser, das die Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich die Schwerkraft bestimmt.</i>
<i>Grundwasserneubildung</i>	<i>Die Grundwasserneubildung ist das infiltrierte Wasservolumen, das dem Grundwasser je Flächeneinheit zugeführt wird.</i>
<i>Islandtief</i>	<i>Das Islandtief ist ein nahezu ständig ausgebildetes Tiefdruckgebiet über dem Nordatlantik im Bereich von Island, das zur Polarfront bzw. zur subpolaren Tiefdruckrinne gehört.</i>
<i>Jetstream</i>	<i>Der Jetstream ist ein schmales, bandartiges Starkwindfeld in der Tropo- oder Stratosphäre, das durch hohe vertikale und horizontale Windgeschwindigkeitsscherungen charakterisiert wird und ein Geschwindigkeitsmaximum oder mehrere -maxima aufweist. Als willkürliche untere Grenze der Windgeschwindigkeit des Jetstreams wurde der Wert 30 m/s festgelegt. Jetstreams bilden sich infolge globaler Ausgleichsbewegungen zwischen Regionen mit starken horizontalen Temperaturgradienten (z.B. zwischen den Subtropen und den gemäßigten Breiten).</i>
<i>Klima</i>	<i>Durch die Energieeinstrahlung und die Energieaufnahme sowie die Energieverteilung durch das Klimasystem für ein bestimmtes Gebiet resultierende charakteristische (d.h. heißt über einen längeren Zeitraum zu beobachtende) meteorologische Elemente (z.B. Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte,...). Für einen langjährigen Zeitraum (mehr als 10 Jahre) repräsentative Merkmale des Witterungsablaufs in einem Gebiet. Die Meteorologische Welt-Organisation (WMO) definiert jeweils 30jährige Zeiträume als Klimanormalperioden.</i>
<i>Klimatische Wasserbilanz</i>	<i>Die Klimatische Wasserbilanz errechnet sich als Differenz des Niederschlags und der potentiellen Evapotranspiration.</i>

<i>Kyoto-Protokoll</i>	<i>Am 11. Dezember 1997 auf der 3. Vertragsstaatenkonferenz in Kyoto verabschiedete Vereinbarung, die über die Klimarahmenkonvention hinausgehende Reduktionsverpflichtungen der Industrienationen für Kyoto-Gase (Treibhausgase) schafft. Danach sind nach einem festgelegten Schlüssel während der Verpflichtungsperiode (2008–2012) nur noch bestimmte Emissionen der Kyoto-Gase, die in Prozent bezogen auf die Emissionen des Jahres 1990 (bzw. 1995) angegeben werden, zulässig. Insgesamt soll so eine Reduktion der Kyoto-Gase um mindestens 5 % in den entwickelten Vertragsstaaten erreicht werden. Ferner wird ein Verfahren festgelegt, nach dem weitere Emissionsreduktionen nach der Verpflichtungsperiode beschlossen werden. Zudem wird der Handel mit Emissionsrechten und ein Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung beschrieben</i>
<i>La Niña</i>	<i>Bei einem La-Niña-Phänomen liegen die Meeresoberflächentemperaturen des äquatorialen Pazifiks unter dem langjährigen Mittel.</i>
<i>Lee</i>	<i>Dem Wind abgewandte Seite</i>
<i>Luv</i>	<i>Dem Wind zugewandte Seite</i>
<i>meridionale Strömung</i>	<i>Strömung, die im wesentlichen parallel zu den Längengraden (also entweder in Süd-Nord-Richtung oder umgekehrt) orientiert ist</i>
<i>Nordatlantische Oszillation</i>	<i>Ausprägung des Luftdruckgradienten zwischen Azorenhoch und Islandtief auf Meeresniveau</i>
<i>Quartal 1</i>	<i>Januar, Februar, März</i>
<i>Southern Oszillation</i>	<i>Luftdruckdifferenz-Schwankung zwischen dem südostasiatischen Tiefdruckgebiet und dem südostpazifischen Hochdruckgebiet</i>
<i>Transpiration</i>	<i>Verdunstung von Vegetationsoberflächen. Dabei geben die Pflanzen über Spaltöffnungen in ihren Blättern Wasser an die Atmosphäre ab.</i>
<i>Treibhausgase</i>	<i>Gasförmige Bestandteile der Atmosphäre, die infrarote Strahlung (etwa des Wellenlängenbereichs 5 bis 80 µm) absorbieren und wieder emittieren.</i>
<i>Wetter</i>	<i>Der physikalische Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt, wie er durch die meteorologischen Elemente gekennzeichnet ist.</i>
<i>Winter (meteorologisch)</i>	<i>Dezember, Januar, Februar</i>
<i>Winterhalbjahr (hydrologisch)</i>	<i>November, Dezember, Januar, Februar, März, April</i>
<i>Witterung</i>	<i>Der allgemeine, durchschnittliche oder vorherrschende Charakter des Wetterablaufs eines bestimmten Zeitraums (der mehrere Tage umfassende Charakter des Wetterablaufs).</i>
<i>Zyklone</i>	<i>Dynamisches Tiefdruckgebiet</i>



## **Zusammenfassung**

Das regionale Klimamodell WETTREG gibt den Datenreihenverlauf der hydrologischen Parameter in Bezug auf ihre Extreme und mehrjährige Periodizitäten unzureichend wieder. Der NAO-Index könnte in Form einer mathematischen Funktion als Optimierungsfaktor dienen.

In dieser Arbeit wird die Eignung des NAO-Index als Optimierungsfaktor geprüft. Datengrundlage sind gemessene Stationsdatenreihen.

Die Analyseergebnisse zeigen, dass sich bei der Korrelation der NAO-Index-Datenreihen mit ausgewählten Niederschlagsdatenreihen hohe Korrelationskoeffizienten ergeben, wenn als Datengrundlage auf großflächige Mittelwerte und zeitliche Mittelwerte über mehrere Monate zurückgegriffen wird.

Der NAO-Index ist daher als Optimierungsfaktor der hydrologischen WETTREG-Daten geeignet.

## **Abstract**

The regional climate model WETTREG reproduces a progression of the statistical series of the hydrological parameters. This reproduction is inadequate concerning the extremes and the annual and multi-annual periodicities of these parameters.

The NAO-index might serve as factor of optimization, if it is converted into a mathematical function.

In this bachelor thesis the suitability of the NAO-index as factor of optimization is examined. The data basis are measured station data series.

The analytical results demonstrate that the NAO-index-series correlates significantly with the selected data series of precipitation, particularly if the data basis are large-area mean values and temporally-averaged values over several months.

Thus, the NAO-index is suitable as factor of optimization of the hydrological data reproduced by WETTREG.

# 1. Einleitung

Das Klima ist keine Konstante und eine Veränderung nicht gleich eine Katastrophe – zumindest, wenn sich die Folgen in einem überschaubaren Rahmen halten lassen und eine Anpassung gelingt.

Das Klima der Erde ist nicht konstant. Es weist eine natürliche Variabilität auf, die im Wesentlichen durch astronomische und geogene Einflussgrößen bedingt wird. Beispiele für diese Einflussgrößen sind die zeitliche Veränderung der von der Sonne abgestrahlten Energie, Unregelmäßigkeiten in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne sowie Vulkanismus. Während der vier Milliarden Jahre alten Geschichte der Erde haben stets Klimaänderungen natürlichen Ursprungs stattgefunden. In der Regel erfolgen diese Klimaschwankungen auf Zeitskalen, die der Biosphäre eine Anpassung erlauben. Oder sie sind nicht so gravierend, dass eine ernsthafte Gefahr für die Ökosysteme bestehen würde. In Ausnahmefällen (z.B. Kollisionen mit größeren Meteoriten, Ausbrüche von vermuteten Supervulkanen) kommt es zu abrupten, katastrophalen Klimaänderungen<sup>1</sup> (HLUG, Glossar zum Klimaschutz).

Diese Klimaänderungen verliefen zum Teil abrupter und dramatischer als heute prognostiziert wird. „Das Schreckgespenst von der Klimakatastrophe ist nichts anderes als Panikmache und eine Klimälüge“, so BLÜCHEL (2007) in "Der Klimaschwindel".

Der Motor der Wissenschaft ist das ständige Hinterfragen und Anzweifeln vermeintlich sicherer Erkenntnis, doch diese Aussage Blüchels scheint oberflächlich und polemisch.

In der langen Geschichte unserer Erde trat der Mensch erst vor etwa 150.000 Jahren auf. Zu Beginn der Industrialisierung (18. Jahrhundert) erlangte er die Fähigkeit, im großen Stil Klimagase zu emittieren. Neben der Treibhausgaserzeugung beeinflussen wir heutzutage auf die verschiedensten Arten unser Klimasystem. Einige Beispiele sind die Übernutzung und Versteppung ehemals fruchtbarer Böden; das Umwandeln blühender Regionen in Mondlandschaften auf der Suche nach Kohle, Gold, Edelsteinen und anderen Bodenschätzen sowie die großflächige Versiegelung der Erde, die den Wasser- und Energieaustausch zwischen Boden und Atmosphäre behindert (HLUG, Klima und Klimawandel).

Seit dem 18. Jahrhundert avancierte der Mensch zu einem bedeutenden Einflussfaktor auf das Klimasystem unserer Erde. Die Auswirkungen sind weltweit zu spüren. Während der letzten 100 Jahren ist ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 0,74 Grad Celsius zu verzeichnen (IPCC, 2007), nach Daten der NASA (2005) war 2005 global gesehen das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen und die Eisdecken der Arktis schmelzen dramatisch. Weltweit berichten die Medien fast täglich über neue, verheerende Naturkatastrophen. Der Klimaschutz ist zu einem bedeutenden Thema geworden und wird international diskutiert und umgesetzt.

---

<sup>1</sup> Abrupte Klimaänderungen erfolgen so schnell, dass sich natürliche oder anthropogene Systeme nicht anpassen können und daher einschneidend verändert werden (HLUG, Folgen des Klimawandels).

Im Dezember 2009 wird in Kopenhagen die 15. UN-Weltklimakonferenz (COP 15) stattfinden. Sie ist von großer Bedeutung für den weltweiten Klimaschutz, da sie ein Folgeabkommen des 2012 auslaufenden Kyoto-Protokolls zum Ergebnis haben soll. Im Kyoto-Protokoll wurden erstmals völkerrechtlich verbindliche Zielwerte für den Ausstoß von Treibhausgasen festgelegt, welcher eine der Hauptursachen des globalen Klimawandels darstellt.

2007 veröffentlichte der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) seinen vierten Sachstandsbericht. Dieser dokumentiert die bereits sichtbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels. Die Veränderung des weltweiten Klimasystems zeigt sich bereits heute im Anstieg der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, im ausgedehnten Abschmelzen von Schnee und Eis an den Polen und im Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels (IPCC, 2007).

Um Projektionen über die zukünftigen Klimaänderungen zu erhalten, werden globale Klimamodelle (engl.: Global Circulation Models, GCM) verwendet. Diese berechnen die globale Klimaentwicklung (z.B. Temperatur- und Niederschlagstrends) auf einem großskaligen Raster (100 km x 100 km oder größer).

Die GCM basieren auf einem atmosphärischen Modell und werden durch weitere Teilmodelle (u.a. Ozean-, Schnee- und Eis- und Vegetationsmodell) ergänzt. Die anthropogenen Einflüsse gehen über die verschiedenen IPCC-Emissionsszenarien mit ein.

Das IPCC hat für den Zeitraum 2001 bis 2100 verschiedene Emissionsszenarien definiert, die sich in den Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel unterscheiden.

Auf globaler Maßstabsebene bilden die GCM die räumlichen Verteilungsmuster für Temperatur und Niederschlag gut ab. Die Ausprägung der Klimaänderungen ist jedoch regional sehr unterschiedlich und die Auflösung der GCM ist für lokale Effekte (wie den regionalen Niederschlag) zu grob (Hergesell & Berthold, 2008).

Regionale Klimamodelle (engl.: Regional Climate Models, RCM) nutzen die Globalmodelle als Antrieb und erreichen über Regionalisierungsverfahren feinmaschigere und höher aufgelöste Verteilungsraster. Ein Beispiel hierfür ist WETTREG („Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode“ der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC)).

## **1.1 Motivation**

Für Hessen stellt WETTREG die Klimaerscheinungen der Vergangenheit gut dar, es gibt jedoch zwei Schwachpunkte. Zum Einen werden die Maxima und Minima des jährlichen Winterniederschlags zu schwach wiedergegeben, zum Anderen wird eine vorhandene mehrjährige Periodizität der Niederschlagsmenge (die sich in der Abfolge von mehreren trockeneren Jahren und dann mehreren feuchteren Jahren zeigt) nicht dargestellt.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob sich diese beiden Schwachpunkte durch Aufprägung eines externen Faktors eliminieren oder zumindest reduzieren lassen. Als externer Faktor wird die NAO (Nordatlantische Oszillation) verwendet.

Die NAO ist eine großflächige atmosphärische Erscheinung und wird somit in den GCM gut wiedergegeben. Außerdem weist sie eine mehrjährige Periodizität auf. Es gibt verschiedene Verfahren einen Index aus Beobachtungs- oder Simulationsdaten zu generieren, die die NAO beschreiben. Mehrere Möglichkeiten werden in Kapitel 2.1 vorgestellt. Der NAO-Index (bzw. die Phase und Stärke der NAO zu einem gegebenen Zeitpunkt) ist über die simulierten Wetterlagen bereits als Information in WETTREG enthalten, soll aber in Form einer Modulation (als ein Faktor) WETTREG zusätzlich aufgeprägt werden.

Das Gesamtziel ist zu testen, ob eine Verschneidung des NAO-Index mit dem Winterniederschlag aus WETTREG es ermöglicht, die Maxima und Minima sowie die mehrjährige Periodizität des Niederschlags besser darzustellen um somit eine optimierte Zukunftssimulation zu erhalten.

Diese Arbeit ist ein erster Schritt auf dem Weg zum Gesamtziel. Sie vergleicht unterschiedliche, gemessene Datenreihen des NAO-Index sowie des Niederschlags, die jeweils verschieden aufbereitet wurden. Zuerst soll ein erwarteter Zusammenhang zwischen den NAO-Index-Datenreihen und den Niederschlagsdatenreihen bewiesen werden und dann eine Auswahl getroffen werden, welche Datenreihen am besten korrelieren.

## 1.2 Stand der Forschung / Hintergründe der Arbeit

### 1.2.1 Nordatlantische Oszillation (NAO)

Die Nordatlantische Oszillation beschreibt die Ausprägung des Luftdruckgradienten zwischen Azorenhoch und Islandtief auf Meeresebene. Sie ist ein charakteristisches und einflussreiches Phänomen der atmosphärischen Zirkulation auf der Nordhalbkugel. In den Wintermonaten ist sie stark ausgeprägt, während der anderen, verbleibenden Monate ist sie schwach ausgebildet.

Die NAO hat Einfluss auf das Klima der gesamten Nordhalbkugel. Vor allem während des Winters in Nord- und Zentraleuropa ist sie prägend für Fluktuationen von Temperaturen und Niederschlägen.

Nach HURRELL et al. (2003) sei die NAO für 31% der Schwankungen der winterlichen Oberflächentemperaturen über der nördlichen Hemisphäre nördlich von 20° N verantwortlich.

Der NAO-Index ist die Differenz der normierten Luftdruckanomalien in Höhe des Meeresspiegels (Sea Level Pressure, SLP) zwischen Azorenhoch und Islandtief. Als Messstationen für das Azorenhoch dienen Ponta Delgada (auf der Azoreninsel São Miguel), Lissabon (Portugal) oder Gibraltar (an der Südspitze der Iberischen Halbinsel); für das Islandtief kommen Stykkishólmur, Reykjavík oder Akureyri (alle Island) in Frage. Da mehrere Stationskombinationen möglich sind, gibt es unterschiedliche NAO-Index-Datenreihen.

Der monatliche NAO-Index wird folgendermaßen definiert:  $\frac{PA_A}{\sigma_A} - \frac{PA_B}{\sigma_B}$ .

An zwei festen Stationen A,B wird die monatliche SLP-Anomalie  $PA_{A,B}$  als Differenz des SLP-Monatsmittels  $PM_{A,B}$  und des langjährigen SLP-Mittels  $PL_{A,B}$  gebildet ( $PA_{A,B} = PM_{A,B} - PL_{A,B}$ ).

$\sigma_{A,B}$  ist die Standardabweichung von  $PA_{A,B}$  über den betrachteten Zeitraum:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PA_A)^2}{n}} \quad \text{und} \quad \sigma_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PA_B)^2}{n}}$$

mit n = Anzahl der Messwerte.

(DWD, 1996 - 2009)

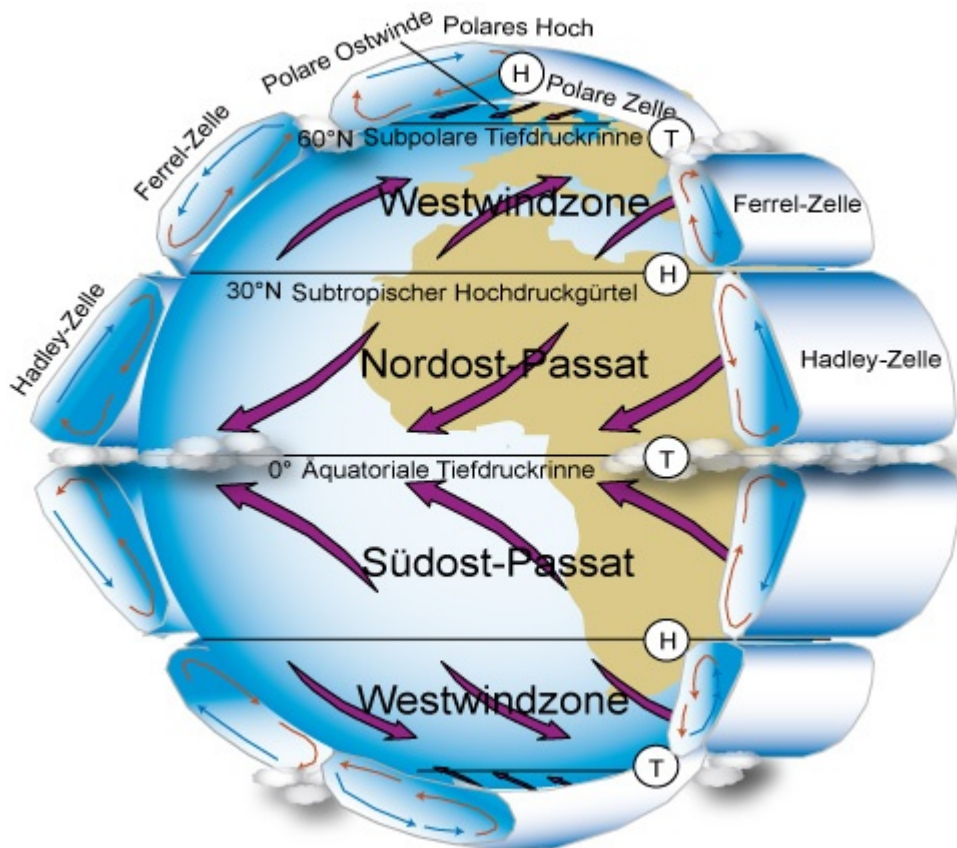
Islandtief und Azorenhoch schwanken in ihrer Ausprägung, Stärke und Position.

Häufig sind sie entweder beide stark oder beide schwach ausgeprägt (vergleiche BALDENHOFER, 2009).

Ein Druckanstieg im Azorenhoch und ein Druckabfall im Islandtief führen zu einer Verstärkung der Druckdifferenz und somit zu einem positiven NAO-Index.

Ein Druckanstieg im Islandtief und ein Druckabfall im Azorenhoch führen zu einer Verringerung der Druckdifferenz und so zu einem negativen NAO-Index.

## Wie beeinflusst die Nordatlantische Oszillation das Wetter Europas?



**Abb. 1:**      **Atmosphärische Zirkulation**  
Quelle: [http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/](http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Atmosphärische_Zirkulation)  
                 **Atmosphärische Zirkulation**  
                 **(KASANG, 2008)**

Das Islandtief gehört zur Polarfront bzw. subpolaren Tiefdruckrinne. Das Azorenhoch befindet sich im Bereich der Subtropenfront bzw. dem subtropischen Hochdruckgürtel. Zwischen diesen beiden Bereichen, zwischen 30° und 60° nördlicher Breite, befindet sich die Ferrel-Zelle. Hier wehen in Bodennähe die außertropischen Westwinde (vergleiche Abb. 1). An der Polarfront weht der Polarfront-Jetstream (im Mittel etwa 10 km über der Erdoberfläche), an der Subtropenfront der Subtropen-Jetstream (vergleiche Abb. 2). Ein Jetstream stellt ein schmales, bandartiges Starkwindfeld in der Tropo- oder Stratosphäre dar, das durch hohe vertikale und horizontale Windgeschwindigkeitscherungen charakterisiert wird und ein Geschwindigkeitsmaximum oder mehrere -maxima aufweist. Als willkürliche untere Grenze der Windgeschwindigkeit des Jetstreams wurde der Wert 30 m/s festgelegt. Jetstreams bilden sich infolge globaler Ausgleichsbewegungen zwischen Regionen mit starken horizontalen Temperaturgradienten (z.B. zwischen den Subtropen und den gemäßigten Breiten) (DWD, 1996 - 2009).

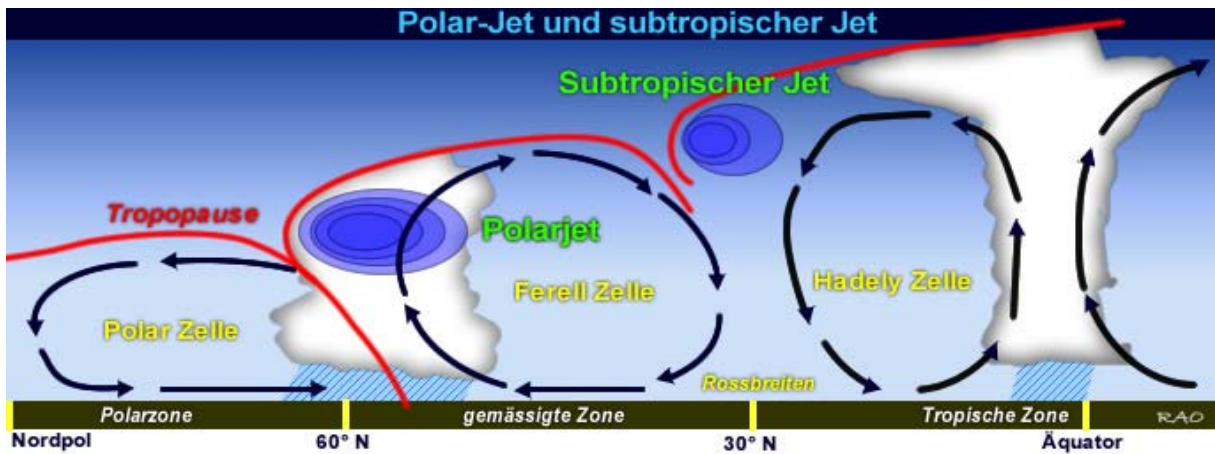


Abb. 2: Die Jetstream-Winde  
 Quelle: <http://www.raonline.ch/./images/edu/graph/jetgraph04.jpg>  
 (RAOnline, 2000 - 2009)

Polarfront und Polarfront-Jetstream verlaufen in einem Band um die Nordhalbkugel der Erde. Während der meisten Zeit des Jahres ist dieses Band wellenförmig (vergleiche Abb. 3 und Abb. 4). Die Schlingen des Polarfront-Jetstream werden Mäander genannt.

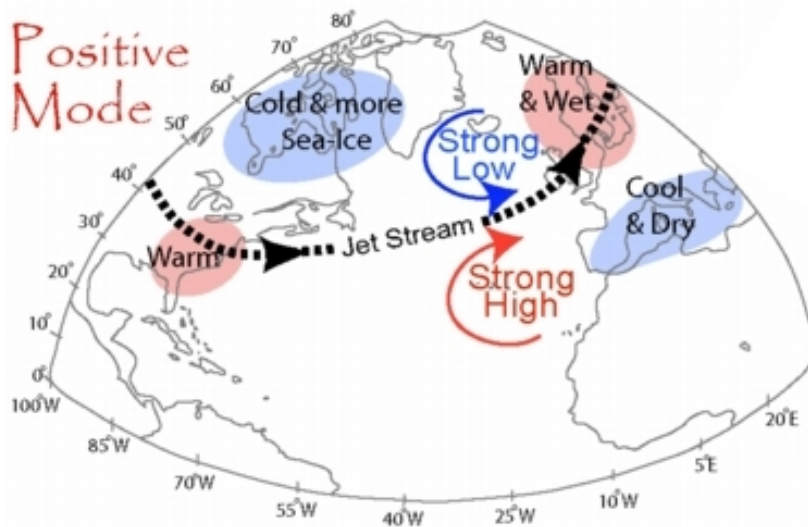
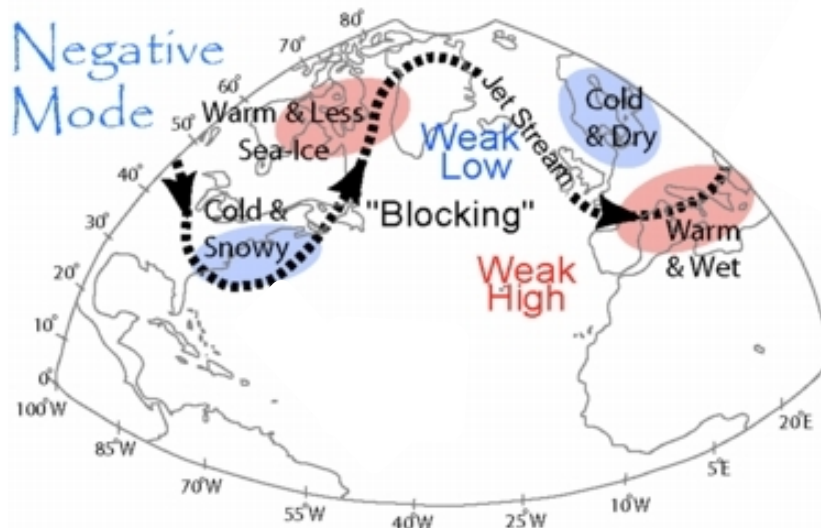


Abb. 3: Polarfrontjetstream ohne Mäander (positiver NAO-Index)  
 Quelle: <http://www.newx-forecasts.com/nao.html>  
 (NEWxSFC, 2001 - 2009)



**Abb. 4:** Polarfrontjetstream mit Mäandern (negativer NAO-Index)  
 Quelle: <http://www.newx-forecasts.com/nao.html>  
 (NEWxSFC, 2001 - 2009)

Entlang der Polarfront entstehen Zyklonen (dynamische Tiefdruckgebiete). Sie beeinflussen wesentlich das europäische Wetter. Die Zyklonen bilden sich über dem Nordatlantik, werden in der Westwindzone nach Osten transportiert und lösen sich im Allgemeinen östlich des Baltikums auf (Forkel, 2009).

Oberhalb der Reibungsschicht, wo sich bewegende Luftmassen nicht mehr durch Bodenreibung in ihrer Bewegungsrichtung beeinflusst werden, weht der Wind entlang von Linien gleichen Luftdrucks (geostrophische Bedingungen).

Es gilt: Je größer die Luftdruckdifferenz zwischen Azorenhoch und Islandtief (positiver NAO-Index), desto stärker die westlichen Winde über dem Nordatlantik und damit der Zustrom atlantischer Luftmassen nach Nordeuropa (Ruprecht, 2006).

In Wintern mit positivem NAO-Index wird eine größere Anzahl Zyklonen beobachtet, die Bahnen der Zyklonen sind mehr in Richtung Nordeuropa (Schottland, Skandinavien) gerichtet und die Zyklonen sind stärker. Im Gegensatz dazu stehen die Winter mit negativem NAO-Index. Während dieser ist eine geringere Anzahl von Zyklonen zu verzeichnen, die Zyklonen erreichen kaum Nordeuropa sondern eher den Mittelmeerraum und sie sind schwächer ausgeprägt (Ruprecht, 2006).

Von positivem zu negativem NAO-Index ändert sich die Wettersituation zwischen Nord- und Südeuropa in Gegenphase:

Winter mit positivem NAO-Index führen zu milden Temperaturen und starken Niederschlägen in Nordeuropa. Währenddessen erreichen kalte Ausläufer des Russlandhochs häufig den Mittelmeerraum. Dem entsprechend wird es dort kälter und trockener als gewöhnlich (vergleiche Abb. 5).



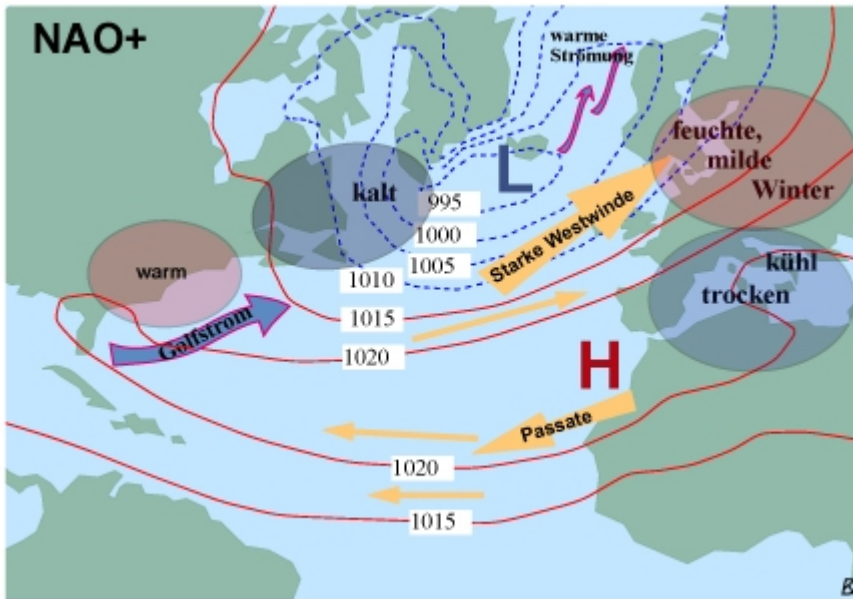


Abb. 5: Positive NAO-Phase  
 Quelle: [http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Bild:Nao\\_positiv\\_negativ.jpg](http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Bild:Nao_positiv_negativ.jpg)  
 (KASANG, 2009)

In Wintern mit negativem NAO-Index erhält Südeuropa (Portugal, Spanien, Mittelmeer) verstärkte Niederschläge. In Nordeuropa ist es trocken und es kann sehr kalt werden (vergleiche Abb. 6).

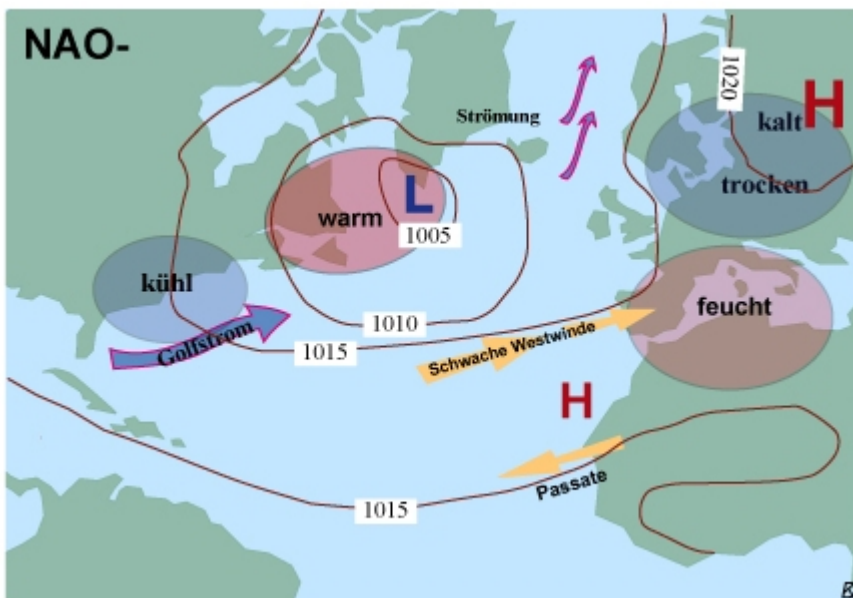


Abb. 6: Negative NAO-Phase  
 Quelle: [http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Bild:Nao\\_positiv\\_negativ.jpg](http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Bild:Nao_positiv_negativ.jpg)  
 (KASANG, 2009)

## Trends der NAO

Da Druckmessungen z.B. von Gibraltar schon seit langer Zeit vorliegen, lässt sich der NAO-Index reproduzieren. Per Definition ist das Mittel über den NAO-Index über den gesamten, analysierten Zeitraum immer Null. Innerhalb der Zeitreihe können sich jedoch Trends zeigen. In Abb. 7 ist eine solche Zeitreihe dargestellt. Die Säulen zeigen den mittleren Winter-NAO-Index (Dezember bis März) an, die schwarze Kurve das 5-Jahresmittel. Betrachtet man dieses 5-Jahresmittel, so ist ein Anstieg der NAO-Index-Werte seit den 80-er Jahren zu erkennen. Ungeklärt ist, ob dies ein anthropogener Effekt, ein Teil der normalen Variabilität oder eine Folge von Veränderungen der solaren Strahlung (z.B. durch Vulkanausbrüche oder ähnliches) ist. Die Ursache ist schwer zu bestimmen, weil das Zustandekommen von Veränderungen der NAO bis heute nicht verlässlich geklärt ist.

Ein vergleichbar radikaler Anstieg von negativen zu positiven NAO-Index-Werten wurde bisher noch nicht beobachtet, was für einen anthropogenen Trend spricht und z.B. eine Auswirkung der globalen Erwärmung sein könnte (nach Schindler, 2003).

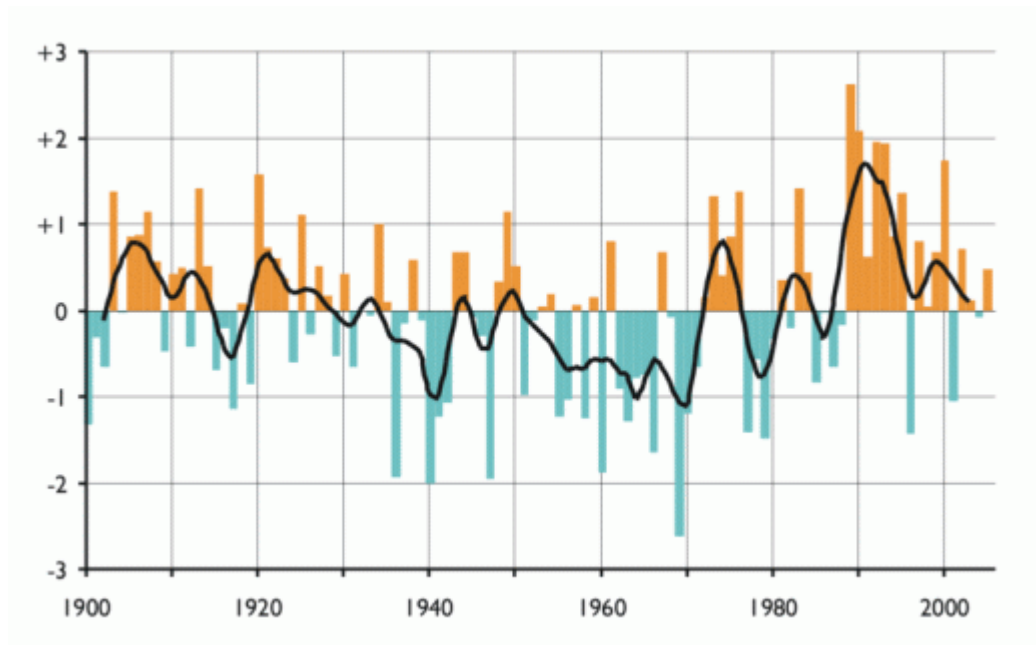


Abb. 7: Der NAO-Index nach Hurrell

Quelle: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Winter-NAO-Index.png>  
(Hanno, 2005)

## ENSO – El Niño / Southern Oscillation

Die ENSO setzt sich zusammen aus dem El-Niño- / La-Niña-Phänomen und der Southern Oscillation.

Die Southern Oscillation ist eine Luftdruckdifferenz-Schwankung zwischen dem südostasiatischen Tiefdruckgebiet und dem südostpazifischen Hochdruckgebiet. Sie findet Ausdruck im Southern Oscillation Index (SOI), der vergleichbar mit dem NAO-Index ist.

Es wird der Luftdruck über der Osterinsel (im Südostpazifik) und über Darwin (Nordaustralien) gemessen. Andere Stationen, die zur Messung herangezogen werden, sind z.B. Tahiti und Darwin. Nach Berechnung der Differenz der beiden Luftdruckwerte wird die Abweichung dieser Differenz vom langjährigen Mittel gebildet. Die Abweichung stellt den Index dar (BALDENHOFER, 2009).

Wie bei der NAO wirkt sich die Southern Oscillation auf die Stärke der Winde aus. Bei der Southern Oscillation sind dies die Passatwinde (vergleiche Abb. 1). Sie bilden den bodennahen Zweig der Hadley-Zelle. Unter dem Einfluss der Passatwinde quillt vor der Küste Südamerikas und längs des Äquators im östlichen Pazifik kaltes Tiefenwasser an die Meeresoberfläche. Dies führt zu relativ niedrigen Meerestemperaturen in dieser Region (Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2008). Mit der Stärke der Winde ändert sich die Oberflächentemperatur des äquatorialen Pazifiks. Je stärker die Passatwinde, desto mehr kaltes Tiefenwasser quillt auf, desto niedriger ist die Meeresoberflächentemperatur.

Als El Niño wird die Erwärmung der Meeresoberfläche des äquatorialen Pazifiks bezeichnet. Bei einem La-Niña-Ereignis liegen die Meeresoberflächentemperaturen des äquatorialen Pazifiks unter dem langjährigen Mittel (BALDENHOFER, 2009).

Die ENSO beschreibt das gesamte ozeanographisch-meteorologische Phänomen und somit das Abwechseln von El-Niño-Ereignissen, neutralen Phasen und La-Niña-Ereignissen. El Niño und La Niña (EN) stehen für die ozeanische Komponente, die Southern Oscillation (SO) stellt die atmosphärische Komponente dar (BALDENHOFER, 2009).

Die ENSO beschreibt somit die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre im pazifischen Raum.

Je nach Region wird sie durch verschiedene Indizes ausgedrückt. Ein in Amerika verbreiteter Index ist der ONI (Oceanic Niño Index) der US-amerikanischen NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Er beschreibt die Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik. In dieser Arbeit werden die ONI-Daten als Indikator für El Niño verwendet.

Aus einer Studie von atmosphärischen Großwetterlagen (FRAEDRICH, 1994) ergibt sich, dass im Winter ein El-Niño-Ereignis mit einer verstärkten Anzahl von Tagen mit zyklonalem Strömungsmuster über Europa einhergeht, d.h. vermehrt Zyklone mit ihren typischen Wettererscheinungen das meteorologische Bild prägen. Dies äußert sich in kälteren Wintertemperaturen über Zentral- und Nordeuropa sowie verstärktem Winterniederschlag in einem Band von den Britischen Inseln bis zum Schwarzen Meer.

Hingegen kommt es laut dieser Studien bei La-Niña-Ereignissen im Westen und Südwesten Europas zu geringerem Niederschlag, da sie eine gegenüber dem Wintermittelwert reduzierte Anzahl von zyklonalen Strömungstypen aufweisen.

Mögliche Auswirkungen der ENSO auf Europa sind nicht eindeutig belegbar und nach verbreiteter Ansicht verglichen mit anderen Großräumen nur schwach ausgeprägt. Die Unsicherheiten in der statistischen Analyse ergeben sich, weil starke El-Niño-Ereignisse selten sind, das atmosphärische Geschehen über dem Atlantik und Europa an sich sehr variabel ist und verschiedene El Niños in den letzten Jahrzehnten auf tropische Vulkanausbrüche folgten, die die Effekte verzerrten oder umkehrten. Viele Wissenschaftler sind der Ansicht, dass der Effekt nicht stationär ist, dass El Niño nicht immer denselben Einfluss auf Europa hat. Das bedeutet, dass z.B. sowohl warme als auch kalte Winter durch ein gleichzeitiges El-Niño-Ereignis erklärt werden können (BALDENHOFER, 2009).

## 1.2.2 Grundwasser

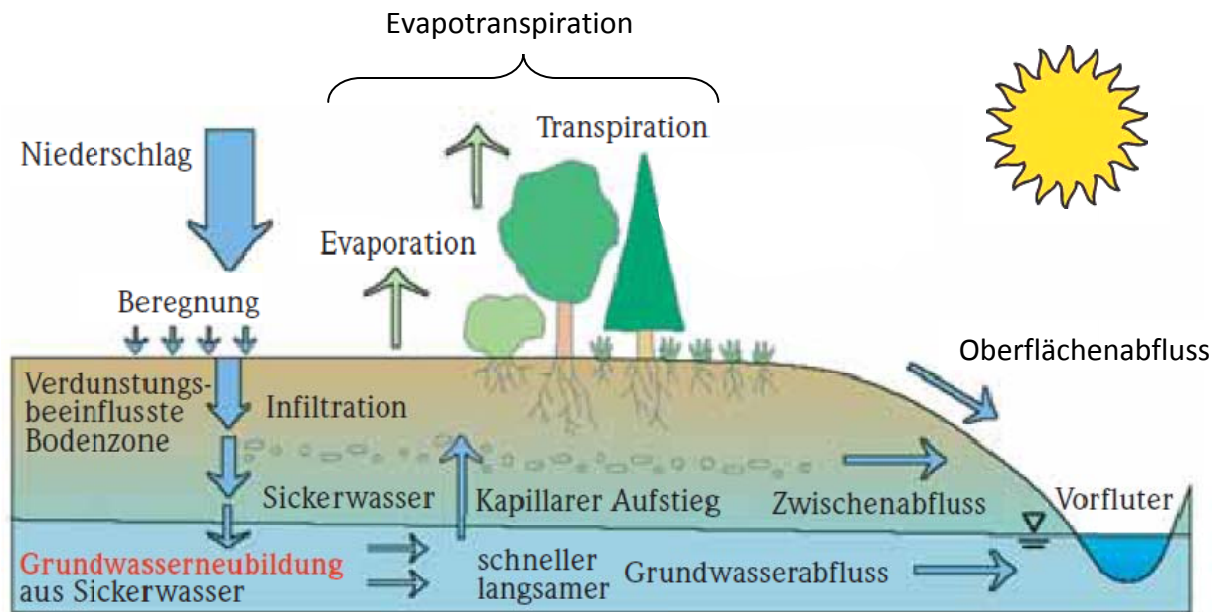
Grundwasser ist alles in der äußersten Erdrinde zirkulierende, unter der Erdoberfläche befindliche Wasser, das die Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich die Schwerkraft bestimmt. Es bildet sich dort, wo das versickernde Oberflächenwasser beim Durchfließen der Hohlräume des Bodens auf wasserundurchlässige Schichten trifft. Das von oben zufließende Wasser staut sich und wird der Schwerkraft nach unten folgend in seiner Fließbewegung umgelenkt (GRIEBLER & MÖSSLACHER, 2003).

Grundwasser-Systeme stellen keine isolierten Systeme dar, sondern sind in den globalen Wasserkreislauf eingebunden. Als Bewertungsparameter des Wasserkreislaufs spielen folgende hydrologische Größen eine Rolle: Niederschlag, Evaporation, Transpiration und Direktabfluss (vergleiche Abb. 8).

Hieraus lassen sich folgende Sekundärparameter berechnen:

$$\begin{aligned} \text{a) } ET &= E + T \\ \text{b) } KWB &= P - ET_p \\ \text{c) } GWN &= P - A_d - ET_t \quad \text{mit} \quad A_d = A_o + A_z \end{aligned}$$

Mit:	ET	=	Evapotranspiration
	E	=	Evaporation
	T	=	Transpiration
	KWB	=	Klimatische Wasserbilanz
	GWN	=	Grundwasserneubildung
	P	=	Niederschlag (precipitation)
	ET <sub>p</sub>	=	potentielle Evapotranspiration
	ET <sub>t</sub>	=	tatsächliche Evapotranspiration
	A <sub>d</sub>	=	Direktabfluss
	A <sub>o</sub>	=	Oberflächenabfluss
	A <sub>z</sub>	=	Zwischenabfluss (unterirdischer, oberflächennaher Wasserabfluss, der noch nicht das Grundwasser erreicht)



**Abb. 8:** Komponenten des Wasserkreislaufs  
Quelle: nach BMU (2003)

### a) *Evapotranspiration*

Evapotranspiration (ET) ist die Summe aus Evaporation (E) und Transpiration (T).

Evaporation ist die direkte Verdunstung über dem Land und über Wasseroberflächen unter Ausschluss biologisch physiologischer Prozesse. „Evaporation beinhaltet die physikalische Verdunstung der unbewachsenen Erdoberfläche, des auf Pflanzen zurückgehaltenen Niederschlagswassers (Interzeption) und von freien Wasserflächen.“ (DIN 4049).

„Die Verdunstung durch Stoffwechselprozesse von Organismen wird als Transpiration bezeichnet.“ (DIN 4049). Dabei geben die Pflanzen über Spaltöffnungen in ihren Blättern Wasser an die Atmosphäre ab.

Eine hohe Evapotranspiration zeigt sich an warmen, sonnigen Tagen, wenn zuvor reichlich Niederschlag gefallen ist und daher der Wasserspeicher des Bodens aufgefüllt ist.

Die Evapotranspiration lässt sich unterscheiden in:

- **Tatsächliche Evapotranspiration ( $ET_t$ )**

Die  $ET_t$  ist die Evapotranspiration einer teilweise oder ganz mit Pflanzen bewachsenen Fläche, deren Wassernachschub durch Wassermangel oder durch biologische oder physikalische Bedingungen begrenzt ist.

- **Potentielle Evapotranspiration ( $ET_p$ )**

Die  $ET_p$  ist definiert als die maximale Verdunstungshöhe, die unter gegebenen Klimabedingungen erzielt wird, unter der Voraussetzung, dass genügend Wasser verfügbar ist.

(Dietrich & Schöniger, 2008)

## **b) Klimatische Wasserbilanz**

$$KWB = P - ET_p$$

Die Klimatische Wasserbilanz errechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration.

Positive Werte kennzeichnen einen Wasserüberschuss, negative einen Wassermangel.

Niedrige oder negative Klimatische Wasserbilanzen treten auf, wenn der Niederschlag gering ist und / oder die Evapotranspiration hoch ist. Eine hohe Evapotranspiration zeigt sich an warmen, sonnigen Tagen, wenn zuvor reichlich Niederschlag gefallen ist und daher der Wasserspeicher des Bodens aufgefüllt ist.

## **c) Grundwasserneubildung (GWN)**

$$GWN = P - ET_t - A_d$$

Die Grundwasserneubildung ist das Wasservolumen, das dem Grundwasser je Flächeneinheit zugeführt wird. Die wichtigste Komponente der Grundwasserneubildung ist der Teil des Niederschlags, der in den Untergrund versickert und dem Grundwasser zufließt.

Die GWN ist ein komplexer Prozess. Die Höhe der GWN hängt nach GRIEBLER & MÖSSLACHER (2003) von zahlreichen Faktoren ab:

1. Niederschlag
2. Evapotranspiration
3. Jahreszeit
4. Klima (geographische Zone, Trocken- / Regenzeit)
5. Topographie, Beschaffenheit der Erdoberfläche (Art und Form der natürlichen Strukturen oder der menschlichen Bebauung)
6. Bodenbeschaffenheit (Fest-, Lockergestein), Eigenschaften des Untergrundes
7. Flurabstand (Tiefe des Grundwasserspiegels)
8. Lage zu Gewässern

Auf Grund des jahreszeitlichen Verlaufs der klimatischen Einflussgrößen, der daraus resultierenden Wachstumsperioden und der regional verschiedenen Gebietseigenschaften weist die Grundwasserneubildung eine sowohl zeitliche als auch räumliche Variabilität auf (BERTHOLD & HERGESELL, 2005).

In der Zeit von November bis März ist die GWN in der Regel hoch, da die Evapotranspiration bei geringer Vegetation und niedriger Temperatur gering ist und der Niederschlag größtenteils versickern kann. Von April bis Oktober ist die GWN gering, da die Evapotranspiration bei größerer Wärme und durch die Vegetation hoch ist (HERGESELL, 2008).

Die regionale Untersuchung der Grundwasserneubildung dient zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen und ist eine Grundvoraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen (HERGESELL & BERTHOLD, 2008).

In der vorliegenden Arbeit wird als Datensatz für die potentielle Evapotranspiration die Grasreferenzverdunstung verwendet. Die Grasreferenzverdunstung gibt die Wassermenge je Zeiteinheit an, die von einer standardisierten Grasdecke auf standardisiertem Boden bei optimaler Wasserversorgung verdunstet wird (vergleiche DVWK, 1996).

In den folgenden Kapiteln werden Niederschlag, Grasreferenzverdunstung (im folgenden Text als „Verdunstung“ bezeichnet) und Klimatische Wasserbilanz untersucht. Sie sind zentrale Größen bei der Analyse und Bewertung des Grundwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung.

## **Globale Grundwasservorkommen**

Die auf der Erde vorkommende Wassermenge beträgt 1,4 Milliarden km<sup>3</sup> und verspricht auf den ersten Blick unerschöpfliche Trinkwasserreserven. Allerdings liegt das Wasser zu 97,5 % als Salz- und Brackwasser und nur zu 2,5 % als Süßwasser vor. Vom Süßwasser sind 69,6 % in Gletschern und Eiskappen gebunden, 30 % kommen als Grundwasser vor und 0,3 % als See- und Flusswasser (UNESCO, 2003).

In den „aktiven“ Wasserkreislauf ist nur Grundwasser mit einbezogen, das sich in den obersten 100 Metern der Erdkruste befindet. Diese Zone beherbergt etwa 15 % aller Grundwasservorkommen. Die tiefen Grundwasserspeicher (= fossile Grundwasserlagerstätten) der Erde stellen große unterirdische Süßwasserreserven dar und machen 85 % aller Grundwasservorkommen aus. Zunehmend werden die fossilen Grundwasserlagerstätten in den wasserarmen Regionen der Welt zur Nutzung herangezogen. Doch dauerhaft nutzbar ist nur der Teil des Grundwassers, der am Wasserkreislauf teilnimmt und sich somit erneuert; bei den Tiefengrundwässern handelt es sich um eine nicht erneuerbare Ressource, deren Nutzung deshalb vermieden werden sollte. Zudem ist die Erschließung des Grundwassers, das sich tiefer als 100 m unter der Erdoberfläche befindet, technisch aufwendig und finanziell kostspielig. Ein großer Anteil des süßen Grundwassers ist in schlecht durchlässigen Tonschichten gebunden und damit immobil. Generell können etwa 45 % des unterirdischen Wassers als Süßwasser bezeichnet werden, der restliche Prozentanteil ist stark mineral- und salzhaltig (z.B. Thermalwasser) (GRIEBLER & MÖSSLACHER, 2003).



## **Bedeutsamkeit des Grundwassers in Deutschland**

In Deutschland stammen rund 74 % der Wasserförderung der öffentlichen Trinkwasserversorgung aus Grund- und Quellwasser. Separat betrachtet zeigen sich große Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern. Einige decken den Trinkwasserbedarf zu 100 % aus Grundwasservorkommen, andere nutzen zusätzlich natürliche oder künstliche Oberflächengewässer (Seen, Flüsse, Talsperren) sowie Uferfiltrat und künstlich angereichertes Grundwasser (BANNIK et al., 2008).

Für Hessen spielt Grundwasser eine besondere Rolle, da mehr als 95 % der Trinkwasserversorgung hierdurch gedeckt wird.

Die Berechnung regional differenzierter Grundwasserneubildungsraten dient vor allem zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen und ist eine Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen, wie sie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) verlangt wird. Von großem Interesse sind die zukünftigen, vom Klimawandel beeinflussten Grundwasserneubildungsraten (HERGESELL & BERTHOLD, 2008).

## **Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt**

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt sind regionsabhängig. In Deutschland sind folgende Konsequenzen zu erwarten:

- die Veränderung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Niederschläge, was zu einer Änderung der Abflussverhältnisse und der Grundwasserneubildung führt
- die Häufung von extremen Hochwasserereignissen infolge von Starkniederschlägen
- die Häufung von extremen Niedrigwasserabflüssen während längerer niederschlagsfreier Perioden

Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen für den Menschen:

- die regionale Gefährdung der Wasserversorgung während lang andauernder Dürreperioden und wegen des sich ändernden Niederschlags- und Abflussregimes
- die Verschärfung von Wassernutzungskonflikten zwischen Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz sowie Siedlungsschutz und Wasserversorgung
- ökonomische Konsequenzen für wasserabhängige Wirtschaftsbereiche wie die Landwirtschaft, Binnenschifffahrt, Elektrizitätswirtschaft und den Tourismus
- Setzrissschäden an Gebäuden und Infrastruktur während extremer Trockenperioden
- Kellervernässungen, Vernässung von landwirtschaftlichen Nutzflächen und Überflutung von Straßen während extremer Feuchtperioden

(HERGESELL & BERTHOLD, 2008)

## **1.3 Fragestellung und Hypothesen**

Für das Grundwasser spielt anders als beim Oberflächenabfluss die mehrjährige Periodizität der Niederschläge bzw. der klimatischen Wasserbilanz eine wichtige Rolle (träges Medium wegen Speicherwirkung). Die Abfolge und Dauer von Trocken- und Feuchtperioden sind maßgeblich entscheidend für die Entwicklung der Grundwasserstände.

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die verfügbaren Klimaszenarien die Extreme und die Periodizität des Feuchteregimes unzureichend abbilden.

Basierend auf Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes von 1971-2000 soll untersucht werden, ob eine Korrelation zwischen NAO-Index und den beiden hydrologischen Einflussgrößen Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz vorliegt. Bei der Korrelationsanalyse sollen sowohl saisonale Zusammenhänge als auch die mehrjährige Periodizität untersucht werden.

Die Ergebnisse der Arbeit sollen als Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Verbesserung der vom regionalen Klimamodell WETTREG simulierten Niederschlagsverteilung dienen.

## **2. Methode**

Niederschlag, Grasreferenzverdunstung (im folgenden Text als „Verdunstung“ bezeichnet) und Klimatische Wasserbilanz sind zentrale Größen bei der Analyse und Bewertung des Grundwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung. Sie werden in der vorliegenden Arbeit unter dem Begriff „Klimadaten“ zusammengefasst.

In den folgenden Kapiteln wird der erwartete Zusammenhang zwischen dem NAO-Index und den Klimadaten mittels Korrelations- und Regressionsanalyse überprüft. Des Weiteren wird eine Auswahl getroffen, welche der vielen möglichen Datenreihen-Kombinationen am besten korrelieren. Letztendlich wird entschieden, ob der NAO-Index als Optimierungsfaktor der WETTREG-Daten geeignet ist.

Als NAO-Index-Daten werden die Daten des Climate Explorers übernommen. Die Klimadaten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD).

Die NAO-Index-Daten umfassen den Zeitraum 1961 bis 2000. Die mittleren hessischen Niederschlagsdaten stehen nur von 1971 bis 2000 zur Verfügung. Die Korrelations- und Regressionsanalysen werden daher über diesen kürzeren Zeitraum durchgeführt.

Bearbeitet und analysiert werden die Daten in Microsoft Excel mit „WinSTAT“ (Statistik-Add-In für Microsoft Excel) als Zusatz.

Im Folgenden bedeutet „Winter 1972“ meteorologischer Winter 1972 (Dezember 1971, Januar 1972 und Februar 1972). „Quartal 1“ steht für Januar, Februar und März. „Winterhalbjahr 1972“ entspricht dem hydrologischen Winterhalbjahr 1972 und geht von November 1971 bis April 1972.

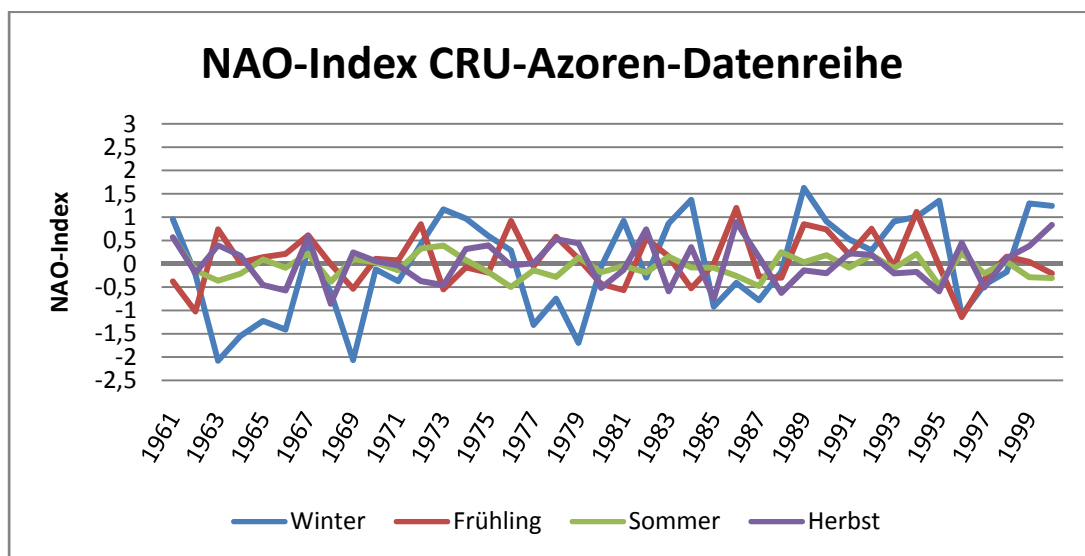
Die Klimadaten sind Summenwerte, die über den genannten Zeitraum aufaddiert wurden. Die NAO-Daten sind Mittelwerte, die über den jeweiligen Zeitraum arithmetisch gemittelt wurden.

## 2.1 NAO-Index-Daten

Repräsentativ für die Nordatlantische Oszillation werden drei verschiedene NAO-Index-Reihen getestet (CRU-Gibraltar, CRU-Azoren, CPC), wie auch deren Mittelwert und Median. Es gilt herauszufinden, ob eine der fünf Reihen am besten mit den Klimadaten korreliert.

Die Daten der CRU-NAO-Indices sind von der „Climatic Research Unit“ (CRU) in Norwich (Großbritannien). Sie basieren auf Luftdruckdaten von Reykjavik (Island), Gibraltar und Ponta Delgada (Azoren). JONES et al. (1997)<sup>2</sup> bestimmten zwei Indices, die jeweils auf Monatsbasis vorliegen und sich auf die normalisierten Luftdruckdifferenzen zwischen Island und Gibraltar (CRU-Gibraltar-Index) bzw. zwischen Island und den Azoren (CRU-Azoren-Index) beziehen. Die Daten des CPC-NAO-Index stammen vom „Climate Prediction Center“ (CPC) des NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) in den USA. Der Index wurde mittels der „Rotated Principal Component Analysis“ (RPCA)<sup>3</sup> vom CPC ermittelt.

Der NAO-Index schwankt vor allem im Winter (vergleiche Abb. 9). Daher werden bei der folgenden Datenanalyse nur die Mittelwerte für Winter, Quartal 1 und Winterhalbjahr betrachtet.



**Abb. 9:** NAO-Index gemittelt über die vier Jahreszeiten und basierend auf den CRU-Azoren-Daten

Die drei verschiedenen NAO-Indices sind in ihren Tendenzen sehr ähnlich. Die Ausprägung der jeweiligen Maxima und Minima ist jedoch unterschiedlich (vergleiche Abb. 10).

<sup>2</sup> Jones, P.D., Jónsson, T. and Wheeler, D., 1997: Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* 17, S. 1433-1450.

<sup>3</sup> Von Barnston und Livezey (1987, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083-1126); für nähere Informationen siehe [http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/history/method.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/history/method.shtml)

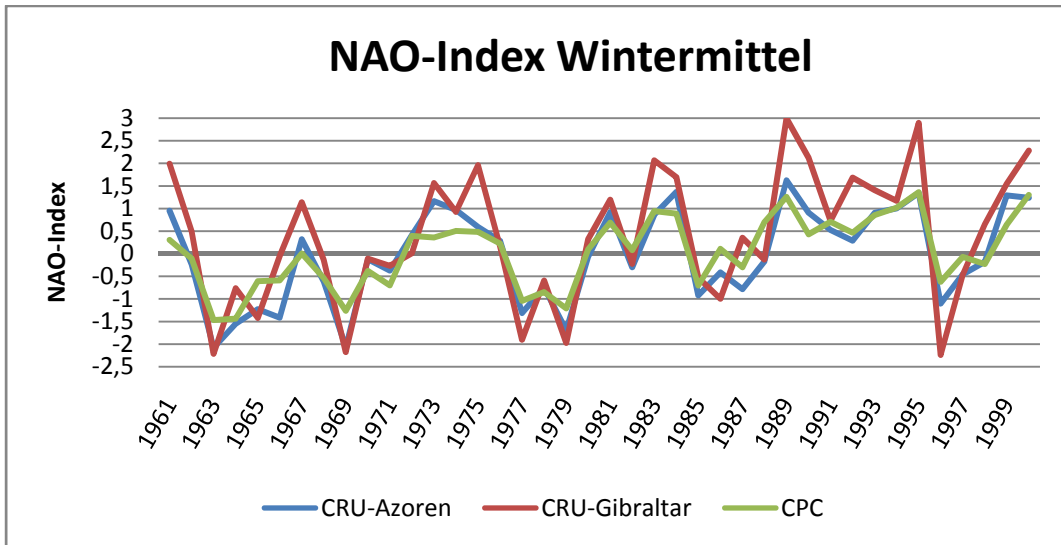


Abb. 10: Vergleich der drei NAO-Indices (jeweils als Wintermittel)

Aus Vergleich von Abb. 10 mit Abb. 11 ist zu erkennen, dass die Maxima und Minima bei einer Mittelung über den Winter als Jahreszeit stärker ausgeprägt sind als bei einer Mittelung über das Winterhalbjahr. Die Mittelung über einen größeren Zeitraum (Winterhalbjahr) schwächt die Extreme ab und verursacht einen gleichmäßigeren Kurvenverlauf.

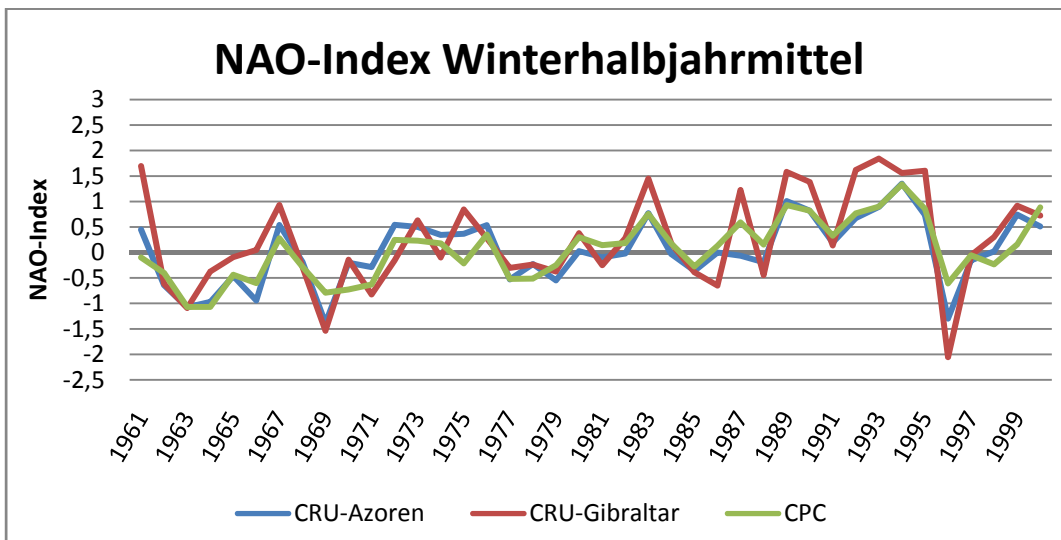


Abb. 11: Vergleich der drei NAO-Indices (jeweils als Winterhalbjahrmittel)

## 2.2 Klimadaten

Niederschlag, Grasreferenzverdunstung (im folgenden Text als „Verdunstung“ bezeichnet) und Klimatische Wasserbilanz sind zentrale Größen bei der Analyse und Bewertung des Grundwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung (siehe Kapitel 1.2.2 Grundwasser). Sie werden in der vorliegenden Arbeit unter dem Begriff „Klimadaten“ zusammengefasst. Alle verwendeten Klimadaten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD).

Anfangs werden die Klimadaten Mannheims verwendet, da diese meteorologisch das Gebiet des Hessischen Rieds (und somit der hessischen Niederungen) widerspiegeln. Das Hessische Ried dient wegen seiner natürlichen Gegebenheiten als Grundwasserspeicher für die Wasserversorgung im gesamten Rhein-Main-Gebiet.

Als zweites und als Gegensatz zu Mannheim werden die Beerfeldener Klimadaten analysiert. Beerfelden ist ein Beispiel für den Odenwald und somit für die hessischen Hochlagen (Mittelgebirgsregionen).

In Mannheim fällt weniger Niederschlag als im Mittel über ganz Hessen, in Beerfelden ist es umgekehrt (siehe Abb. 12).

Um im dritten Schritt einen Vergleich der Einzelstationsmesswerte mit den hessischen Mittelwerten anfertigen zu können, wurden aus den hessischen Stationsniederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes mittels IDP mittlere hessische Niederschlagswerte berechnet.

Die Niederschlagsdaten der Stationen Mannheim und Beerfelden wurden vor Verwendung in der vorliegenden Arbeit vom HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) korrigiert, da die gemessene Niederschlagshöhe in der Regel aufgrund von gerätespezifischen und aufstellungsabhängigen Verdunstungsverlusten und Windverdriftung zu niedrig ausfällt. Die Niederschlagskorrektur wurde in Abhängigkeit der Temperatur bzw. Niederschlagsart und Windstärke gemäß dem Verfahren nach SEVRUK (1989) durchgeführt. Die Verdunstungsdaten beruhen auf dem Datensatz der Grasreferenzverdunstung des DWD. Die Klimatische Wasserbilanz wird als Differenz des korrigierten Niederschlags und der Verdunstung berechnet.

Die hessischen Niederschlagsdaten, die für die Jahresgang-Graphiken verwendet werden, sind korrigierte Daten. Die hessischen Niederschlagsdaten, die für die Korrelationen verwendet werden, sind unkorrigierte Daten, da sie von IDP berechnet wurden.

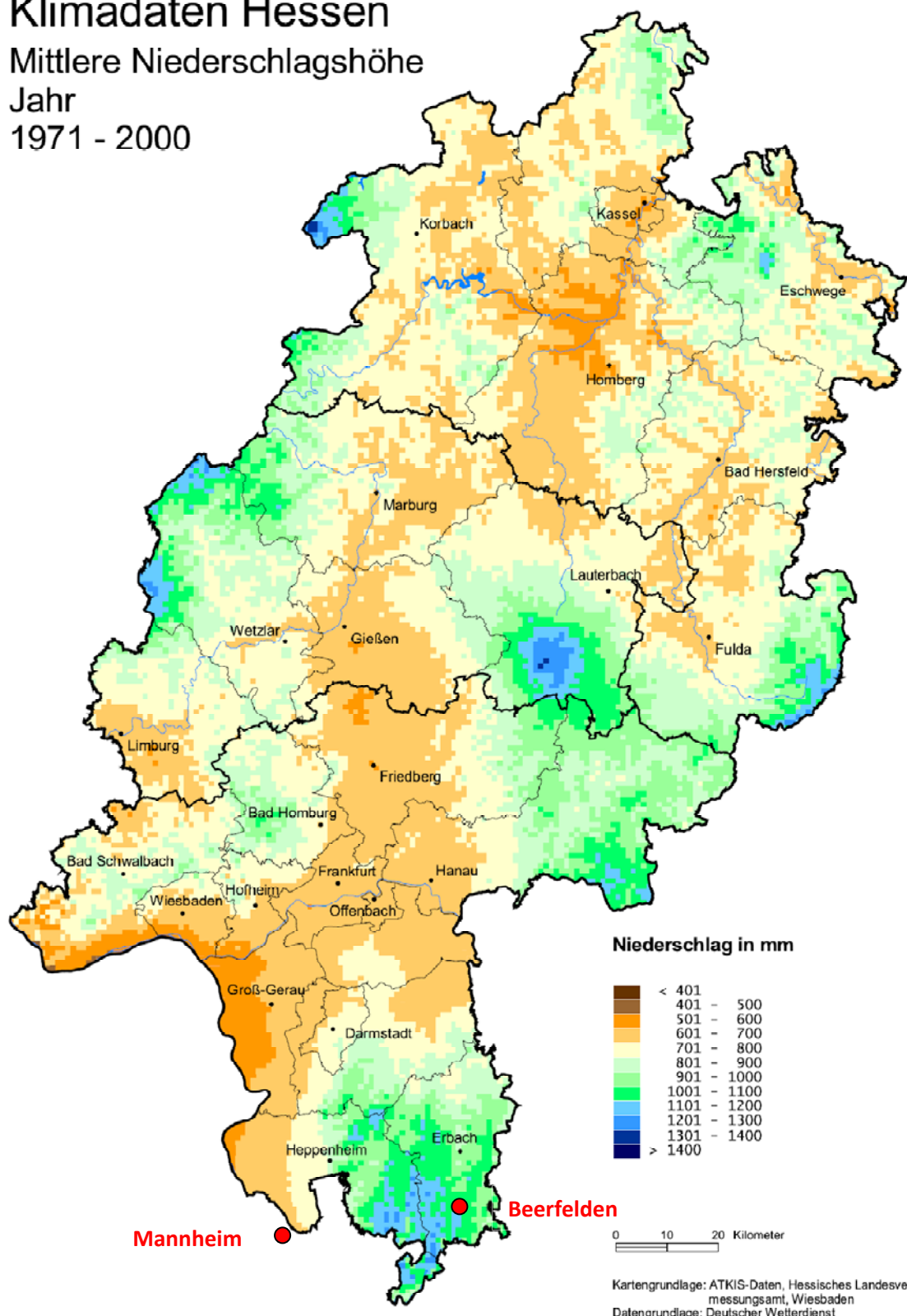
Dieser Unterschied innerhalb der hessischen Daten ist unerheblich. Bei der Korrektur handelt es sich um einen für jede Station konstanten Faktor. Die korrigierten Datenreihen unterscheiden sich von den unkorrigierten Datenreihen nur in ihren Absolutbeträgen, sie sind jedoch proportional zueinander.

# Klimadaten Hessen

## Mittlere Niederschlagshöhe

### Jahr

### 1971 - 2000



**Abb. 12:** Räumliche Verteilung des Niederschlags in Hessen gemittelt über die Jahre 1971 bis 2000  
 Quelle: <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/index-ie.html>  
 (HLUG, 2009)

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Vergleich der Klimadaten von Mannheim, Beerfelden und Gesamthessen

Abb. 13 zeigt den Jahresgang der Niederschläge von Mannheim und Beerfelden, sowie den mittleren hessischen Niederschlagsverlauf. Die Verläufe sind ähnlich. Sowohl das Hessenmittel als auch Beerfelden weisen zwei Maxima auf, eins im Sommer und eins im Winter. Beim Mannheimer Jahresgang ist nur ein Maximum im Sommer zu erkennen. Trotz ähnlicher Verläufe weichen die Absolutwerte der drei Jahresgänge von einander ab. Beerfelden hat generell höhere Niederschläge als das Hessenmittel, Mannheim hat hingegen (abgesehen von Mai, Juni und Juli) niedrigere Niederschläge als das Hessenmittel.

Somit können Beerfelden und Mannheim als zwei Gegensätze bezüglich der hessenweiten Niederschläge angesehen werden. Der mittlere hessische Niederschlag bildet in etwa den Mittelwert dieser beiden Gegensätze.

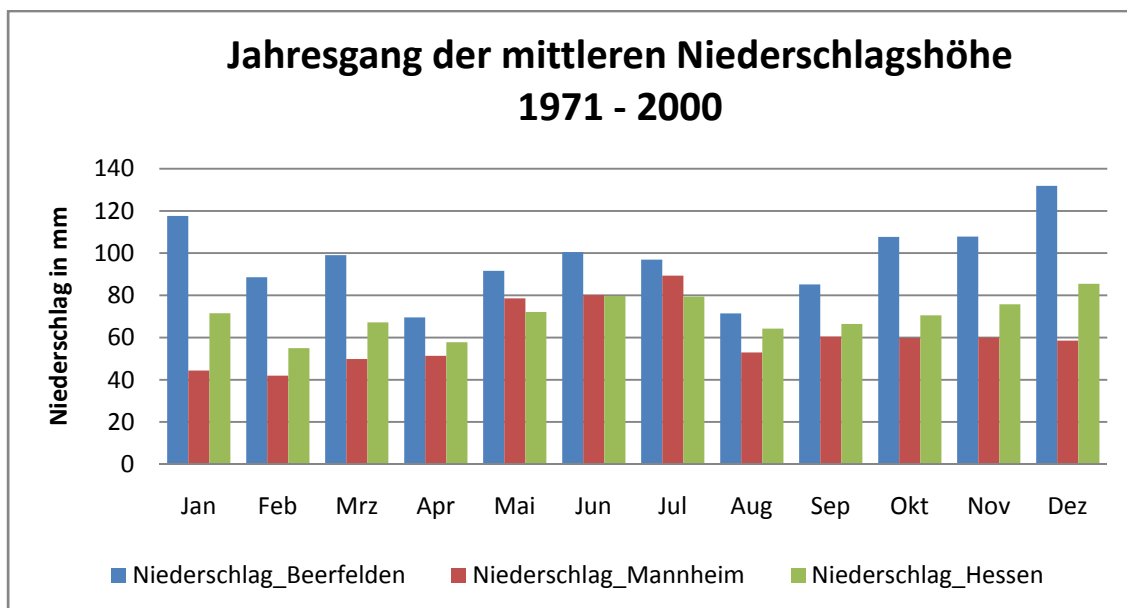
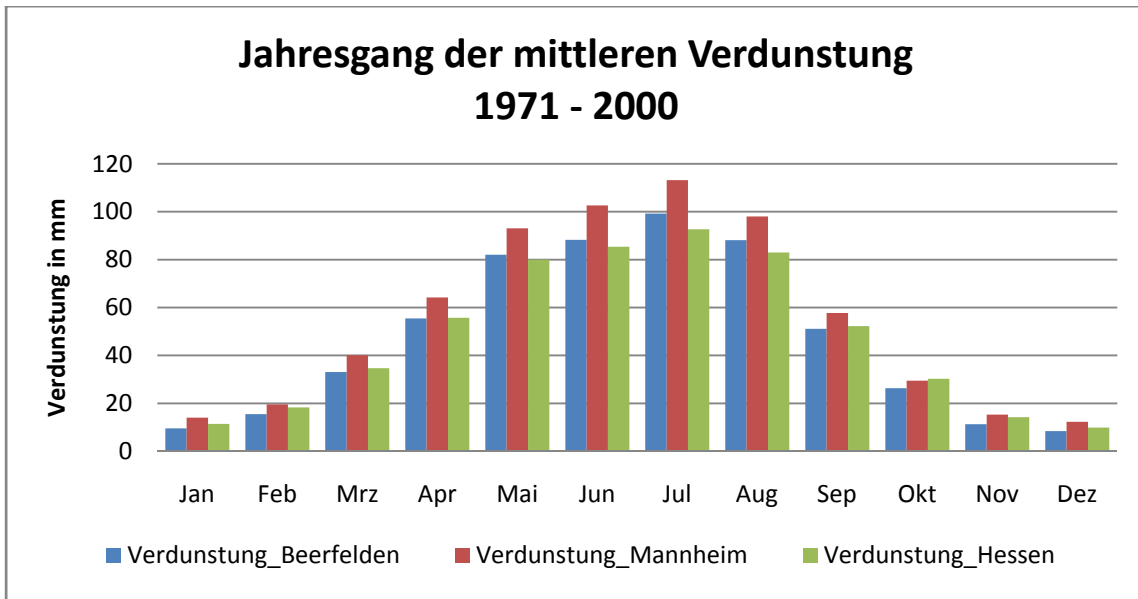


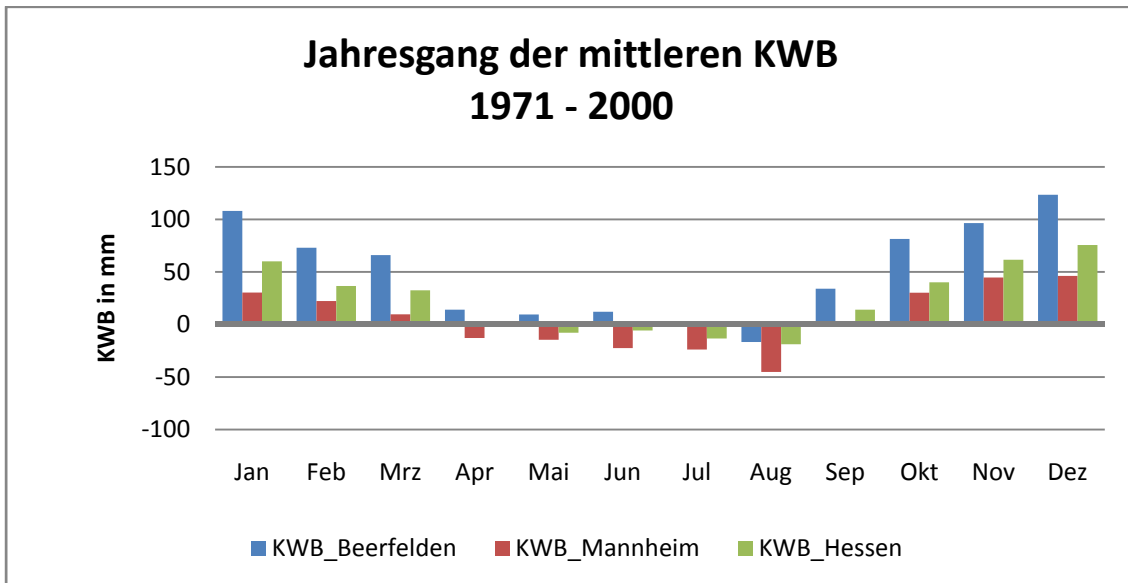
Abb. 13: Jahresgang der mittleren Niederschlagshöhe (1971-2000)





**Abb. 14:** Jahresgang der mittleren Verdunstung (1971 – 2000)

In Abb. 14 sind die Jahresgänge der Verdunstung von Mannheim, Beerfelden und dem Hessenmittel dargestellt. Die Verläufe sind gleich. Es gibt ein Maximum im Sommer. Die Absolutwerte unterscheiden sich gering.



**Abb. 15:** Jahresgang der mittleren Klimatischen Wasserbilanz (1971 - 2000)

Abb. 15 zeigt die Jahresgänge der Klimatischen Wasserbilanz von Mannheim, Beerfelden und Hesse. Die einzelnen Verläufe sind ähnlich. Es gibt ein Maximum um den Dezember und ein Minimum im August. Die Absolutwerte weichen stark voneinander ab. Die Mannheimer KWB liegt generell unter dem Hessenmittel, die Beerfeldener KWB hingegen über dem Hessenmittel. Mannheim weist von April bis August negative Werte auf, das Hessenmittel von Mai bis August und Beerfelden nur im Juli und August.

Aus Abb. 13 bis Abb. 15 ist zu erkennen, dass für die Grundwasserneubildung vor allem die Winterniederschläge von Wichtigkeit sind.

Die hohen Sommerniederschläge werden durch eine hohe Verdunstung während dieser Zeit kompensiert, die KWB fällt im Sommer gering oder gar negativ aus.

Im Winter fällt weniger Niederschlag als im Sommer. Es verdunstet jedoch nur ein geringer Teil der Niederschläge und so zeigen sich in dieser Zeit die höchsten KWB-Werte. Als Resultat kann im Winter eine höhere Grundwasserneubildungsrate als im Sommer angenommen werden.

## 3.2 Korrelation der NAO-Index-Daten mit den Klimadaten

Wegen des Einfluss' der orographischen Lage auf die Klimaparameter werden Daten unterschiedlicher Standorte (Mannheim und Beerfelden) sowie ein flächiger Mittelwert (Hessen) untersucht.

Alle Klimadaten sind Summenwerte, die über den genannten Zeitraum aufaddiert wurden.

Bei allen drei Untersuchungen werden folgende Niederschlagsdaten mit den NAO-Index-Daten korreliert:

- Winter (Dezember, Januar, Februar)
- Quartal 1 (Januar, Februar, März)
- hydrologisches Winterhalbjahr (November bis April)

Für Mannheim und Beerfelden werden zusätzlich folgende Verdunstungs- und KWB-Daten mit dem NAO-Index korreliert:

**Tab. 1: Durchgeführte Verdunstungs- und KWB-Korrelationen**

Verdunstung	Winter <sup>M</sup>	KWB	Winter <sup>B</sup>
	Quartal 1 <sup>M, B</sup>		Quartal 1
	Frühling		Frühling
	Quartal 2		Quartal 2 <sup>B</sup>
	Sommer <sup>B</sup>		Sommer <sup>M, B</sup>
	Quartal 3		Quartal 3
	Herbst		Herbst
	Quartal 4		Quartal 4
	Winterhalbjahr		Winterhalbjahr <sup>M</sup>
	Sommerhalbjahr <sup>M, B</sup>		Sommerhalbjahr <sup>M</sup>

Um den Umfang der Arbeit gering zu halten, werden nachfolgend nicht alle Korrelationen gezeigt, sondern jeweils nur die drei Korrelationsreihen mit den höchsten Korrelationskoeffizienten.

Für Tab. 1 gilt:

Rote Schriftfarbe = markante Korrelations-Reihen

<sup>M</sup> = markante Korrelations-Reihen für Mannheim (siehe Tab. 2)

<sup>B</sup> = markante Korrelations-Reihen für Beerfelden (siehe Tab. 3)

Als Flächenmittel für Hessen stehen keine Verdunstungs- oder KWB-Daten zur Verfügung.

### 3.2.1 Korrelation der NAO-Index-Daten mit Klimadaten aus Mannheim

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und Niederschlag, Verdunstung bzw. Klimatischer Wasserbilanz an der Station Mannheim

		Niederschlag			Verdunstung			KWB			
		Winter	Quartal 1	Winterhalbjahr	Winter	Quartal 1	Sommerhalbjahr	Sommer	Winterhalbjahr	Sommerhalbjahr	
NAO-Index	Winter	CRU-Azoren	-0,031	-0,061	0,088	0,501	0,511	0,379	-0,144	-0,009	-0,100
		CRU-Gibraltar	0,096	0,004	0,218	0,533	0,498	0,393	-0,116	0,127	-0,106
		CPC	0,065	0,086	0,261	0,553	0,466	0,356	-0,105	0,156	-0,041
		Mittelwert der drei Indizes	0,052	0,004	0,195	0,547	0,512	0,393	-0,126	0,096	-0,092
		Median der drei Indizes	-0,035	-0,057	0,085	0,483	0,469	0,365	-0,106	-0,008	-0,074
	Quartal 1	CRU-Azoren	0,104	0,006	0,199	0,486	0,628	0,542	-0,307	0,104	-0,292
		CRU-Gibraltar	0,238	0,014	0,259	0,495	0,688	0,565	-0,347	0,155	-0,336
		CPC	0,101	-0,038	0,231	0,532	0,689	0,553	-0,294	0,123	-0,254
		Mittelwert der drei Indizes	0,172	0,000	0,244	0,521	0,697	0,578	-0,336	0,137	-0,317
		Median der drei Indizes	0,106	-0,011	0,201	0,501	0,665	0,543	-0,290	0,099	-0,269
	Winterhalbjahr	CRU-Azoren	-0,006	-0,118	0,116	0,390	0,438	0,529	-0,206	0,044	-0,248
		CRU-Gibraltar	0,178	-0,038	0,197	0,333	0,346	0,428	-0,150	0,141	-0,191
		CPC	0,141	-0,006	0,192	0,360	0,343	0,374	-0,062	0,130	-0,048
		Mittelwert der drei Indizes	0,122	-0,056	0,182	0,376	0,392	0,468	-0,152	0,117	-0,181
		Median der drei Indizes	0,096	-0,052	0,180	0,392	0,368	0,448	-0,123	0,115	-0,153

Anmerkung: rote Schriftfarbe: negativer Zahlenwert; gelb hinterlegt: Werte > 0,3 oder < -0,3; grün hinterlegt: jeweils die höchsten beiden Werte, Die farbigen Hinterlegungen des Textes zeigen an, zu welchen Korrelationen Graphiken abgebildet werden (siehe Abb. 24).

Tab. 2 zeigt die Korrelationsergebnisse der NAO-Indizes mit den Mannheimer Klimaparametern.

Bei den Niederschlagskorrelationen treten relativ niedrige Korrelationskoeffizienten auf. Alle Werte sind kleiner als 0,3. Der Maximalwert liegt bei 0,261 und ergibt sich bei der Korrelation des Winter-NAO-Index der CPC-Datenreihe mit dem Niederschlag im Winterhalbjahr.

Die positiven Korrelationskoeffizienten zeigen einen proportionalen Zusammenhang zwischen NAO-Index und Niederschlag an. Da sie gering positiv sind, ist der Zusammenhang nicht eindeutig nachweisbar. In der Theorie sollte ein positiver, winterlicher NAO-Index zu hohen Niederschlagsraten während des gleichen Zeitraums führen (vergleiche Text zu Abb. 5).

Die Verdunstungskorrelationen zeigen Korrelationskoeffizienten von bis zu 0,697. Dieser Maximalwert ergibt sich bei der Korrelation des Quartal-1-NAO-Index der Mittelwert-Datenreihe mit den Niederschlägen aus Quartal 1.

Die hohen positiven Korrelationskoeffizienten lassen auf einen proportionalen Zusammenhang zwischen NAO-Index und Verdunstung schließen.

Eine hohe Verdunstungsrate zeigt sich an warmen, sonnigen Tagen, wenn zuvor reichlich Niederschlag gefallen ist und daher der Wasserspeicher des Bodens aufgefüllt ist (siehe Unterschied zwischen tatsächlicher und potentieller Verdunstung, S. 22, Abs. a)).

Hohe Niederschlagsraten im Winter treten bei positivem NAO-Index auf (vergleiche Text zu Abb. 5). Ein hoher positiver NAO-Index führt über hohe Niederschlagsraten zu einer hohen Verdunstungsrate im gleichen Zeitraum.

Bei den KWB-Korrelationen treten geringe Korrelationskoeffizienten auf. Der höchste Korrelationskoeffizient zeigt sich bei der Korrelation der Winterhalbjahr-Niederschläge mit dem Winter-NAO-Index der CPC-Datenreihe. Er beträgt 0,156 und ist sehr gering.

Sowohl bei den Korrelationen der Niederschläge als auch bei den Korrelationen der KWB treten negative Korrelationskoeffizienten auf. Beim Niederschlag sind die negativen Werte nur gering negativ und somit unerheblich. Bei der KWB sind stärker negative Werte zu verzeichnen, wobei der höchste negative Wert bei -0,347 liegt. Er ergibt sich bei der Korrelation des Quartal-1-NAO-Index der CRU-Gibraltar-Datenreihe mit der Sommer-KWB.

Negative Korrelationen zeigen einen antiproportionalen Zusammenhang zwischen den beiden Korrelationsparametern (Reziproke Proportionalität). Am Beispiel der negativen KWB-Korrelationen bedeutet dies: Im gleichen Verhältnis wie der NAO-Index zunimmt, nimmt die KWB ab und umgekehrt. Wenn sich die NAO-Index-Werte verdoppeln, halbieren sich die KWB-Werte und umgekehrt.

Die Klimatische Wasserbilanz berechnet sich aus den Niederschlägen minus der Verdunstung während eines bestimmten Zeitraums (siehe S. 22, Abs. a)).

Niedrige Klimatische Wasserbilanzen treten auf, wenn (a) der Niederschlag gering ist und / oder (b) eine hohe Verdunstungsrate vorherrscht.

Bezogen auf die sommerliche KWB gilt folgendes:

Die Mannheimer KWB ist im Sommer negativ (siehe Abb. 15).

Es kann jedoch keine Aussage zu (a) - nämlich über den sommerlichen Niederschlag - gemacht werden.

Eine hohe sommerliche Verdunstungsrate (b) zeigt sich (b1) an warmen, sonnigen Tagen, wenn (b2) im vorigen Winter bzw. Frühjahr reichlich Niederschlag gefallen ist und daher der Wasserspeicher des Bodens aufgefüllt ist.

Zu (b1) - nämlich sommerliche Temperaturen und Sonnenscheindauer - kann keine Aussage gemacht werden. Ein positiver winterlicher NAO-Index geht in der Theorie einher mit hohen Niederschlagsraten während des gleichen Zeitraums (b2).

Ein positiver winterlicher NAO-Index kann somit über den Niederschlag als eine Ursache unter anderen zu hohen sommerlichen Verdunstungsraten führen. Diese hohen sommerlichen Verdunstungsraten können (neben niedrigen sommerlichen Niederschlagsraten) zu niedrigen oder gar negativen sommerlichen Klimatischen Wasserbilanzen führen.

Es scheint somit physikalisch erklärbar, dass ein positiver winterlicher NAO-Index mit einer negativen sommerlichen KWB einhergeht und sich der Winter-NAO-Index antiproportional zur Sommer-KWB verhält.

Die NAO-Index-Datenreihen, die die höchsten Korrelationskoeffizienten aufweisen, sind die CRU-Gibraltar-Datenreihe, die CPC-Datenreihe und die Mittelwert-Datenreihe.

### 3.2.2 Korrelation der NAO-Index-Daten mit Klimadaten aus Beerfelden

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und den Beerfeldener Niederschlägen, Verdunstungen bzw. Klimatischen Wasserbilanzen

		Niederschlag			Verdunstung			KWB			
		Winter	Quartal 1	Winterhalbjahr	Quartal 1	Sommer	Sommerhalbjahr	Winter	Quartal 2	Sommer	
NAO-Index	Winter	CRU-Azoren	0,117	-0,045	0,038	0,418	0,401	0,334	0,103	-0,245	-0,235
		CRU-Gibraltar	0,203	0,017	0,160	0,413	0,361	0,358	0,185	-0,168	-0,171
		CPC	0,256	0,131	0,232	0,310	0,403	0,319	0,244	-0,244	-0,256
		Mittelwert der drei Indizes	0,196	0,025	0,144	0,404	0,396	0,354	0,180	-0,217	-0,217
		Median der drei Indizes	0,125	-0,035	0,054	0,381	0,374	0,316	0,111	-0,206	-0,198
	Quartal 1	CRU-Azoren	0,097	-0,019	0,048	0,479	0,487	0,495	0,083	-0,381	-0,447
		CRU-Gibraltar	0,186	0,005	0,129	0,590	0,450	0,521	0,170	-0,355	-0,446
		CPC	0,076	-0,044	0,019	0,490	0,474	0,467	0,063	-0,357	-0,532
		Mittelwert der drei Indizes	0,140	-0,014	0,082	0,555	0,486	0,522	0,124	-0,379	-0,484
		Median der drei Indizes	0,099	-0,029	0,049	0,518	0,467	0,488	0,084	-0,376	-0,440
	Winterhalbjahr	CRU-Azoren	0,159	-0,083	0,144	0,407	0,469	0,500	0,147	-0,252	-0,309
		CRU-Gibraltar	0,286	0,019	0,274	0,316	0,315	0,406	0,276	-0,135	-0,191
		CPC	0,345	0,080	0,295	0,220	0,322	0,346	0,341	-0,176	-0,260
		Mittelwert der drei Indizes	0,279	0,005	0,255	0,335	0,381	0,441	0,269	-0,189	-0,256
		Median der drei Indizes	0,269	0,001	0,249	0,299	0,373	0,430	0,259	-0,183	-0,205

Anmerkung: rote Schriftfarbe: negativer Zahlenwert; gelb hinterlegt: Werte > 0,3 oder < -0,3; grün hinterlegt: jeweils die Werte mit den höchsten Beträgen  
Die farbigen Hinterlegungen des Textes zeigen an, zu welchen Korrelationen Graphiken abgebildet werden (siehe Abb. 25, Abb. 28, Abb. 33 und Abb. 34).

Tab. 3 zeigt die Korrelationsergebnisse der NAO-Indizes mit den Beerfeldener Klimaparametern.

Die Niederschlagskorrelationen erreichen einen Maximalwert von 0,345. Dieser ergibt sich bei der Korrelation der Winter-Niederschläge mit dem Winterhalbjahr-NAO-Index der CPC-Datenreihe. Im Vergleich zu den Mannheimer Niederschlagskorrelationen (siehe Tab. 2) liegen die höchsten Korrelationskoeffizienten geringfügig höher.

Die positiven Korrelationskoeffizienten zeigen einen proportionalen Zusammenhang zwischen NAO-Index und Niederschlag an. Da sie gering positiv sind, ist der Zusammenhang nicht eindeutig nachweisbar. In der Theorie sollte ein positiver, winterlicher NAO-Index zu hohen Niederschlagsraten während des gleichen Zeitraums führen (vergleiche Text zu Abb. 5).

Die Korrelationskoeffizienten der Verdunstungskorrelationen erreichen Werte von bis zu 0,59 bei der Korrelation der Quartal-1-Verdunstungen mit dem Quartal-1-NAO-Index der CRU-Gibraltar-Datenreihe.

Die hohen positiven Korrelationskoeffizienten lassen auf einen proportionalen Zusammenhang zwischen NAO-Index und Verdunstung schließen. Ein hoher positiver NAO-Index führt über hohe Niederschlagsraten zu einer hohen Verdunstungsrate im gleichen Zeitraum (vergleiche Mannheimer Verdunstungskorrelationen, Text zu Tab. 2).

Der höchste Korrelationskoeffizient der KWB-Korrelationen liegt bei 0,341 und ergibt sich bei der Korrelation der Winter-KWB mit dem Winterhalbjahr-NAO-Index der CPC-Datenreihe. Auffallender sind die stark negativen Werte sowohl bei den Quartal-2-KWB als auch bei den Sommer-KWB. Der höchste negative Korrelationskoeffizient hat einen Wert von -0,532 und ergibt sich bei der Korrelation der Sommer-KWB mit dem Quartal-1-NAO-Index der CPC-Datenreihe. Es liegt ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen dem NAO-Index und der KWB vor. Wie im Text zu Tab. 2 beschrieben, scheint es physikalisch erklärbar, dass ein positiver winterlicher NAO-Index mit einer negativen sommerlichen KWB einhergeht.

Die beiden NAO-Index-Datenreihen, die die höchsten Korrelationskoeffizienten aufweisen, sind die CRU-Gibraltar-Datenreihe und die CPC-Datenreihe. Sie eignen sich am besten für weitere Untersuchungen.



### 3.2.3 Korrelation der NAO-Index-Daten mit den mittleren hessischen Niederschlagsdaten

Verdunstungs- und KWB-Daten stehen für Hessen nicht als Flächenmittel zur Verfügung. Es werden daher ausschließlich die Niederschlagsdaten analysiert.

**Tab. 4: Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und dem mittleren hessischen Niederschlag**

		Mittlerer hessischer Niederschlag			
		Winter	Quartal 1	Winterhalbjahr	
NAO-Index	Winter	CRU-Azoren	0,329	0,200	0,272
		CRU-Gibraltar	0,432	0,257	0,425
		CPC	0,448	0,387	0,430
		Mittelwert der drei Indizes	0,419	0,280	0,393
		Median der drei Indizes	0,347	0,213	0,292
	Quartal 1	CRU-Azoren	0,316	0,222	0,302
		CRU-Gibraltar	0,386	0,249	0,369
		CPC	0,291	0,242	0,256
		Mittelwert der drei Indizes	0,357	0,249	0,336
		Median der drei Indizes	0,328	0,241	0,306
	Winterhalbjahr	CRU-Azoren	0,371	0,193	0,402
		CRU-Gibraltar	0,510	0,292	0,526
		CPC	0,551	0,387	0,497
		Mittelwert der drei Indizes	0,507	0,304	0,509
		Median der drei Indizes	0,503	0,309	0,513

Anmerkung: gelb hinterlegt: Werte > 0,3; grün hinterlegt: höchsten beiden Werte  
Die farbigen Hinterlegungen des Textes zeigen an, zu welcher Korrelation Graphiken abgebildet werden (siehe Abb. 26 und Abb. 29).

Tab. 4 zeigt die Korrelationsergebnisse der NAO-Indizes mit dem mittleren hessischen Niederschlag.

Die Korrelationskoeffizienten weisen hohe Werte von bis zu 0,551 auf. Dieser Maximalwert ergibt sich bei einer Korrelation der Winter-Niederschläge mit dem Winterhalbjahr-NAO-Index der CPC-Datenreihe.

Die beiden NAO-Index-Datenreihen, die die höchsten Korrelationskoeffizienten aufweisen, sind die CRU-Gibraltar-Datenreihe und die CPC-Datenreihe. Sie eignen sich am besten für weitere Untersuchungen.

Die hohen, positiven Korrelationskoeffizienten lassen auf einen proportionalen Zusammenhang zwischen NAO-Index und Niederschlag schließen. Es bestätigt sich die Theorie, dass ein positiver, winterlicher NAO-Index zu hohen Niederschlagsraten während des gleichen Zeitraums führt (vergleiche Text zu Abb. 5).

### **3.2.4 Monatskorrelation der NAO-Index-Daten mit den mittleren hessischen Niederschlagsdaten**

Bei den vorigen Untersuchungen korrelieren die drei verschiedenen NAO-Index-Datenreihen überwiegend besser mit den hydrologischen Parameter als die Mittelwert- oder die Mediandatenreihen, die sich aus den drei Einzelreihen ergeben (vergleiche Tab. 2 bis Tab. 4). Aus diesem Grund werden in der folgenden hessischen Monatskorrelation ausschließlich die drei Einzeldatenreihen berücksichtigt.

Tab. 5 zeigt die Korrelationsergebnisse der NAO-Indizes mit den mittleren hessischen Niederschlägen. Bei dieser Korrelation werden Monatsreihen miteinander korreliert.

Zur Aufbereitung der Daten werden diese nach Monaten und Jahren sortiert. Das Ziel ist eine Januar-Datenreihe über die Jahre 1971 bis 2000, eine Februar-Datenreihe über die Jahre 1971 bis 2000 usw. zu erhalten. Diese Datenreihen der einzelnen Monate über den Bearbeitungszeitraum werden sowohl für den NAO-Index als auch für den Niederschlag angefertigt.

Anschließend werden die Monatsreihen des NAO-Index mit den Monatsreihen des Niederschlags korreliert (siehe Tab. 5, mittlere Spalte).

Korrelierte man die Februar-Datenreihe des NAO-Index mit der Januar-Datenreihe des Niederschlags, so wäre dies z.B. ein Test, ob der Februar-NAO-Index von 1971 Auswirkungen auf den Januar-Niederschlag von 1971 hat oder umgekehrt.

Aus chronologischen Gründen kann sich der Februar-NAO-Index von 1971 nicht auf den Januar-Niederschlag von 1971 auswirken.

Eine umgekehrte Wirkrichtung (Niederschlag auf NAO-Index) ist theoretisch möglich, jedoch in der Praxis nicht plausibel und wird daher in der vorliegenden Arbeit nicht getestet.

Dies führt zu den leeren Zellen in der unteren, linken Hälfte der mittleren Spalte von Tab. 5.

Die rechte Spalte von Tab. 5 wurde angefertigt um zu testen, ob z.B. der Dezember-NAO-Index von 1971 Auswirkungen auf den Januar-Niederschlag von 1972 hat. Um korrekte Korrelationskoeffizienten zu erhalten, beginnen bei diesen Korrelationen die Monatsreihen des NAO-Index weiterhin mit dem Jahr 1971, die Monatsreihen des Niederschlags beginnen jedoch mit dem Jahr 1972.

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten zwischen den NAO-Indizes und den hessischen Niederschlägen (jeweils als Monatsmittel-Reihen der verschiedenen Monate)

			Niederschlagsmittel Hessen ab 1971						Niederschlagsmittel Hessen ab 1972					
			Jan	Feb	Mrz	Apr	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Nov	Dez
NAO-Index ab 1971	Jan	CRU-Azoren	0,448	0,046	-0,009	0,108	-0,338	0,238	0,026	0,056	-0,313	-0,112	0,283	-0,324
		CRU-Gibraltar	0,434	0,025	-0,070	0,188	-0,314	0,239	0,148	0,015	-0,323	-0,156	0,304	-0,299
		CPC	0,384	0,105	0,071	0,072	-0,362	0,277	0,015	0,134	-0,236	-0,079	0,200	-0,258
	Feb	CRU-Azoren		0,453	-0,270	-0,121	0,163	-0,081	-0,253	-0,024	-0,497	0,140	0,180	-0,066
		CRU-Gibraltar		0,503	-0,210	-0,037	0,169	-0,155	-0,095	-0,127	-0,439	0,169	0,106	0,021
		CPC		0,333	-0,159	-0,045	0,144	-0,036	-0,128	-0,006	-0,439	0,229	0,194	-0,096
	Mrz	CRU-Azoren			0,303	0,312	-0,465	0,256	0,283	0,273	-0,043	0,171	0,212	-0,049
		CRU-Gibraltar			0,281	0,294	-0,315	0,295	0,292	0,253	0,013	0,150	0,054	0,206
		CPC			0,134	0,281	-0,445	0,168	0,138	0,426	-0,173	0,151	0,268	-0,070
	Apr	CRU-Azoren				0,101	0,278	0,031	0,335	0,072	0,006	-0,091	-0,077	0,099
		CRU-Gibraltar				0,081	0,310	-0,057	0,342	0,140	0,277	-0,180	-0,206	0,190
		CPC				-0,200	0,314	0,023	0,343	-0,057	0,231	-0,014	-0,090	0,330
	Nov	CRU-Azoren					-0,104	0,212	-0,012	-0,037	0,104	0,267	-0,015	-0,032
		CRU-Gibraltar					0,013	0,264	0,159	-0,054	0,078	0,155	-0,160	0,239
		CPC					-0,410	0,476	0,206	0,040	0,303	0,299	-0,014	0,148
	Dez	CRU-Azoren						0,309	0,342	-0,315	0,089	0,356	-0,282	-0,111
		CRU-Gibraltar						0,376	0,282	-0,222	0,287	0,348	-0,304	-0,194
		CPC						0,400	0,484	-0,153	0,296	0,255	-0,359	-0,132

Anmerkung: rote Schriftfarbe: negative Zahlenwerte; gelb hinterlegt: Werte > 0,3; hellrot hinterlegt: niedrigste vier Werte; grün hinterlegt: höchste vier Werte

Die farbigen Hinterlegungen des Textes zeigen an, zu welcher Korrelation eine Graphik abgebildet wird (siehe Abb. 30).

Tab. 5 zeigt die Korrelationsergebnisse der NAO-Indizes mit den mittleren hessischen Niederschlägen, wobei Monatsreihen miteinander korreliert werden.

Die hohen, positiven Korrelationskoeffizienten, die sich im rot-umrandeten Bereich befinden, lassen auf einen proportionalen Zusammenhang zwischen NAO-Index und Niederschlag schließen.

Es wird deutlich, dass der NAO-Index weitgehend im gleichen Monat, demnach höchstens wenige Wochen später, Wirkung auf den Niederschlag zeigt. Im Januar, Februar und März ist eine unmittelbare Wirkung zu verzeichnen. Im November und Dezember tritt die Wirkung mit etwa einem Monat Zeitverzögerung auf. Der höchste Korrelationskoeffizient ergibt sich mit einem Wert von 0,503 bei der Februar-Korrelation.

Es bestätigt sich die Theorie, dass ein positiver, winterlicher NAO-Index zu hohen Niederschlagsraten während des gleichen Zeitraums führt (vergleiche Text zu Abb. 5).

### **3.2.5 Vergleich der Korrelationsergebnisse der verschiedenen Standorte untereinander**

**Tab. 6: Vergleich der höchsten Korrelationskoeffizienten der Korrelationen von Mannheim, Beerfelden und Hessen**

	<b>Mannheim</b>	<b>Beerfelden</b>	<b>Hessen</b>	<b>Hessen Monatskorrelation</b>
<b>Niederschlag</b>	0,261	0,345	0,551	0,503
<b>Verdunstung</b>	0,697	0,590		
<b>Klimatische Wasserbilanz</b>	-0,347	-0,532		

Tab. 6 zeigt die höchsten Korrelationskoeffizienten der einzelnen Korrelationen.

Bei der Niederschlagskorrelation haben die beiden Hessenkorrelationen die höchsten Werte (größer als 0,5). Generell weisen die Korrelationskoeffizienten der hessischen Niederschlagskorrelationen wesentlich höhere Werte auf als die der Mannheimer oder der Beerfeldener Niederschlagskorrelation (vergleiche Tab. 4 und Tab. 5 mit Tab. 2 und Tab. 3). Dies ist damit zu erklären, dass es sich bei den hessischen Niederschlägen um flächige Mittelwerte handelt. Lokale orographische Effekte und die Verteilung einzelner Niederschlagsereignisse an den Messpunkten wirken sich stark auf die Datenreihen der einzelnen Stationen aus, werden jedoch im Flächenmittel heraus gemittelt.

Beim Vergleich der beiden hessischen Korrelationen untereinander liegt der Korrelationskoeffizient der hessischen Korrelation geringfügig höher als dieser der hessischen Monatskorrelation. Die zu Grunde liegenden Daten der hessischen Korrelation wurden über mehrere Monate gemittelt bzw. aufsummiert. Bei der Monatskorrelation wurde über einen Monat gemittelt bzw. aufsummiert. Der NAO-Index korreliert besser mit dem Niederschlag, wenn der NAO-Index längerfristig gemittelt ist und der Niederschlag längerfristig aufsummiert ist. Dies lässt sich damit erklären, dass selten oder kurzzeitig auftretende Störeffekte bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums heraus gemittelt werden.

Beim Vergleich der Korrelationkoeffizienten von Mannheim und Beerfelden haben die Beerfeldener Niederschlags- und KWB-Werte höhere Beträge. Bezüglich der Verdunstungskorrelation liegt der Mannheimer Wert höher.

### **3.2.6 Regressionsanalyse der NAO-Indizes mit den hydrologischen Parameter in Form einer**

Die folgenden Abbildungen (Abb. 16 bis Abb. 23) zeigen jeweils eine Regressionsanalyse der Parameterkombinationen, die die höchsten Korrelationskoeffizienten haben (vergleiche Tab. 2 bis Tab. 5 oder Tab. 6). Die rote Linie ist jeweils die lineare Trendlinie.

Bei den ersten beiden Graphiken (Niederschlag Mannheim und Niederschlag Beerfelden; Abb. 16 und Abb. 20) liegen die einzelnen Punkte relativ weit gestreut. Es ist lediglich eine schwache, positive lineare Abhängigkeit des Niederschlags vom NAO-Index zu erkennen. Dies ist gleichbedeutend mit dem schwachen proportionalen Zusammenhang der beiden Parameter, der im Text zu Tab. 2 und Tab. 3 beschrieben wird.

In den nächsten beiden Graphiken (Verdunstung Mannheim und Verdunstung Beerfelden; Abb. 17 und Abb. 21) erhöht sich die Anzahl der im Bereich der linearen Trendlinie liegenden Punkte. Es ist eine positive lineare Abhängigkeit der Verdunstung vom NAO-Index zu erkennen. Dies geht einher mit dem proportionalen Zusammenhang der beiden Parameter, der im Text zu Tab. 2 und Tab. 3 beschrieben wird. Auch die in Abb. 17 und Abb. 21 gezeigten  $R^2$ -Werte bestätigen dies. Sie haben jeweils einen Wert über 0,3.

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ist das Verhältnis von durch die lineare Gleichung erklärter Streuung zur Gesamtstreuung. Es gibt prozentual an, wie viel Streuung durch das gefundene lineare Gleichungssystem erklärt werden kann.

Die beiden Graphiken zur KWB von Beerfelden und Mannheim (Abb. 18 und Abb. 22) zeigen gestreute Werte. Die Streuung ist nicht so breit wie bei den Niederschlagsgraphiken der beiden Standorte. Dies bestätigt der jeweilige Wert des Bestimmtheitsmaß, der mit 0,1 bis 0,3 zwischen dem des Niederschlags und dem der Verdunstung liegt. Es ist eine leichte, negative lineare Abhängigkeit der KWB vom NAO-Index zu erkennen (negativ, da negative Steigung der Trendlinie). Dies geht einher mit dem antiproportionalen Zusammenhang der beiden Parameter, der im Text zu Tab. 2 und Tab. 3 beschrieben wird.

Die beiden untersten Graphiken (Abb. 19 und Abb. 23) beziehen sich auf den hessischen Niederschlag und den hessischen Monats-Niederschlag. Die Bestimmtheitsmaße liegen über 0,2. Sie zeigen eine positive lineare Abhängigkeit des Niederschlags vom NAO-Index an. Bestätigt wird dies mit dem proportionalen Zusammenhang der beiden Parameter, der im Text zu Tab. 4 und Tab. 5 beschrieben wird.

Die Streuung der hessischen Niederschlagswerte (Abb. 19 und Abb. 23) ist geringer als diese der Mannheimer (Abb. 16) oder Beerfeldener (Abb. 20) Werte; die Bestimmtheitsmaße der hessischen Niederschlagsgraphiken sind höher als diese der Mannheimer oder Beerfeldener Niederschläge. Dies ist wie im Text zu Tab. 4 beschrieben mit der flächigen Mittelung des hessischen Niederschlags im Gegensatz zu den Einzelstationsmesswerten von Mannheim und Beerfelden zu erklären.

Beim Vergleich der Bestimmtheitsmaße der beiden hessischen Niederschlagsgraphiken (Abb. 19 und Abb. 23) fällt auf, dass  $R^2$  bei der Monats-Regressionsanalyse (Abb. 23) einen höheren Wert hat. Das Bestimmtheitsmaß ist das Verhältnis von durch die lineare Gleichung erklärter Streuung zur Gesamtstreuung und gibt damit prozentual an, wie viel Streuung durch das gefundene lineare Gleichungssystem erklärt werden kann. Es lässt jedoch keinen Rückschluss darauf zu, wie weit die einzelnen Werte von der linearen Trendlinie durch Streuung entfernt sind. Vergleicht man die Breite des durch die Streuung eingenommenen Bereichs, so zeigt die Graphik des hessischen Winter-Niederschlags (Abb. 19) eine stärkere lineare Abhängigkeit des Niederschlags von dem NAO-Index. Dies ist wie im Text zu Tab. 6 Tab. 4 beschrieben mit der Mittelung über einen längeren Zeitraum des hessischen Winter-Niederschlags im Gegensatz zu dem hessischen Februar-Niederschlag zu erklären.

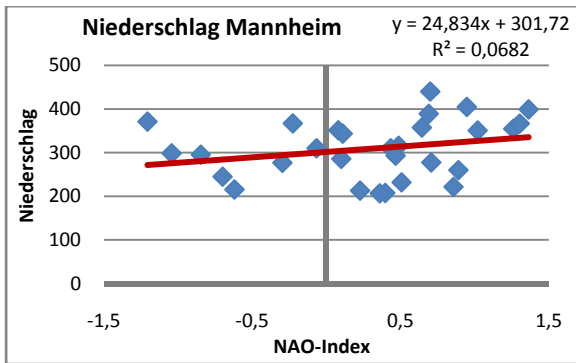


Abb. 16: Regression des Mannheimer Niederschlags als Winterhalbjahrsunne auf den CPC-NAO-Index als Wintermittel

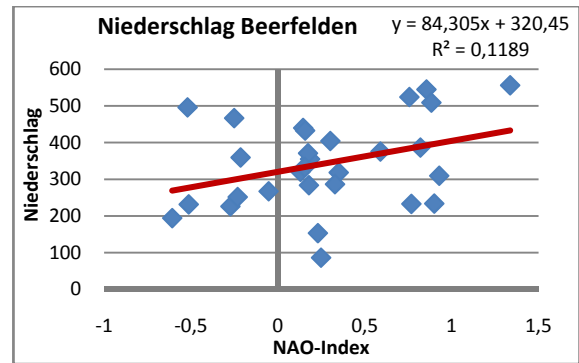


Abb. 20: Regression des Beersfeldener Niederschlags als Wintersunne auf den CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel

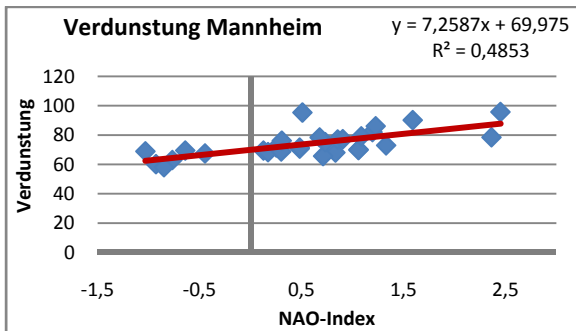


Abb. 17: Regression der Mannheimer Verdunstung als Quartal-1-Sunne auf den Mittelwert-NAO-Index als Quartal-1-Mittel

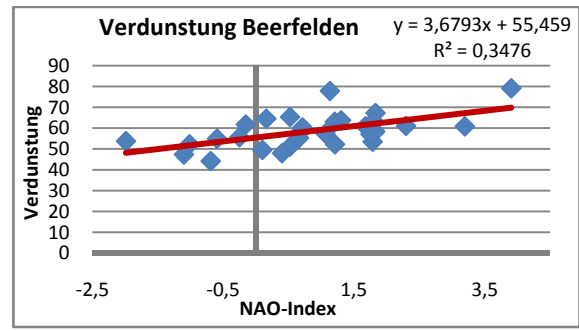


Abb. 21: Regression der Beersfeldener Verdunstung als Quartal-1-Sunne auf den CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel

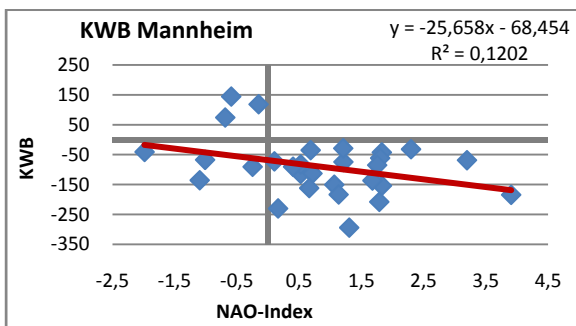


Abb. 18: Regression der Mannheimer Klimatischen Wasserbilanz als Sommersunne auf den CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel

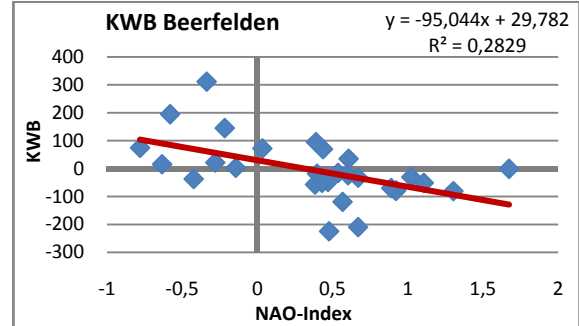


Abb. 22: Regression der Beersfeldener Klimatischen Wasserbilanz als Sommersunne auf den CPC-NAO-Index als Quartal-1-Mittel

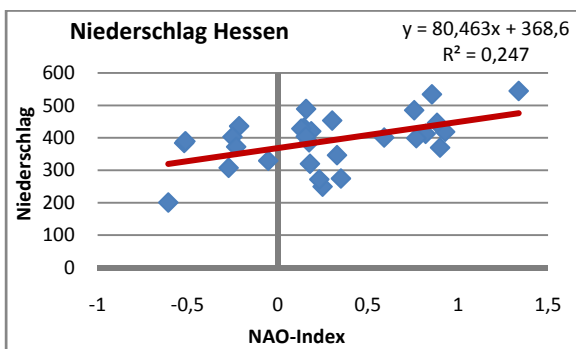


Abb. 19: Regression des mittleren hessischen Niederschlags als Wintersunne auf den CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel

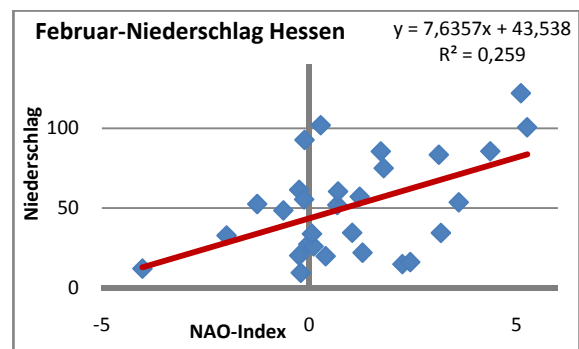


Abb. 23: Regression des mittleren hessischen Niederschlags als Februarsunne auf den CRU-Gibraltar-NAO-Index als Februarmittel

### **3.2.7 Korrelationsgraphiken**

#### **Niederschlag**

Mannheim:

Der höchste Korrelationskoeffizient der Mannheimer Niederschlagskorrelation hat einen Wert von 0,261 (siehe Tab. 2). Bei dieser Korrelation ergibt sich Abb. 24.

In der Graphik zeigt sich ab 1980 ein ähnlicher Kurvenverlauf des NAO-Index und der Mannheimer Niederschläge. Während der 70er Jahre und vor allem gegen Ende der 70er Jahre treten gegenläufige Abschnitte auf.

Bildet man einen gleitenden Mittelwert über drei Jahre, vereinheitlichen sich die Kurven (vergleiche Abb. 27). Ein gleitender Mittelwert verringert die in einer Datenreihe vorhandene Variation. Die Datenreihe wird geglättet. Maxima und Minima, die eventuell wegen Störeffekten auftreten, werden abgeschwächt.

Bei einer Zeitreihe über einen Zeitraum von 30 Jahren (1971 - 2000) ist ein 3-Jahresgleitender Mittelwert ein guter Kompromiss zwischen Vereinheitlichung der beiden Zeitreihen durch Glättung und Beibehaltung des charakteristischen Verlaufs der jeweiligen Zeitreihe.

Eine gegenläufige Phase während der 70er Jahre ist trotz gleitendem Mittelwert erkennbar.

Beerfelden:

Der höchste Korrelationskoeffizient der Beerfeldener Niederschlagskorrelation hat einen Wert von 0,345 (siehe Tab. 3). Bei dieser Korrelation ergibt sich Abb. 25. In der Graphik ist während der 70er Jahre, bis etwa 1978, eine gegenläufige Phase der beiden Kurven zu erkennen. Von 1987 bis 1990 zeigt sich eine weitere gegenläufige Phase.

Der gleitende Mittelwert über drei Jahre zeigt gegenläufige Phasen in den 70er Jahren (vergleiche Abb. 28). Die Extreme der beiden Kurvenverläufe werden stark abgeschwächt.

Hessen:

Der höchste Korrelationskoeffizient der hessischen Niederschlagskorrelation hat einen Wert von 0,551 (siehe Tab. 4). Bei dieser Korrelation ergibt sich Abb. 26.

Die NAO-Index- und die Niederschlags-Kurve in der Graphik haben einen annähernd gleichen Verlauf. Dies bestätigt, dass der mittlere hessische Niederschlag gut mit dem NAO-Index korreliert. Da die Korrelationskurven des hessischen Niederschlags einen besser übereinstimmenden Verlauf haben als die des Mannheimer oder des Beerfeldener Niederschlags, korreliert der flächig-gemittelte Hessenniederschlag besser mit dem NAO-Index als die Niederschläge der Einzelstationen Mannheim oder Beerfelden (vergleiche Text zu Tab. 4).

Von 1973 bis 1978 sind die Kurvenverläufe in Abb. 26 gegenläufig.



Bildet man einen gleitenden Mittelwert über drei Jahre (vergleiche Abb. 29), ist diese gegenläufige Phase schwächer ausgeprägt. Insgesamt ist die Anzahl der deutlich sichtbaren Maxima und Minima gering.

Der höchste Korrelationskoeffizient der hessischen Monatskorrelation hat einen Wert von 0,503 (siehe Tab. 5). Bei dieser Korrelation ergibt sich Abb. 30.

Die hessische Monatskorrelation hat einen geringfügig niedrigeren Korrelationskoeffizienten als die hessische Korrelation über mehrere Monate (siehe Tab. 6). Lässt man die Abweichungen in den Amplitudenwerten außer Betracht, so ist dieser geringe Unterschied zur Hessenkorrelation in der Graphik nicht sichtbar (vergleiche Abb. 26 mit Abb. 30). Die beiden Kurven korrelieren gut. Sie zeigen einen annähernd gleichen Verlauf, weisen zu den gleichen Zeitpunkten Maxima oder Minima auf.

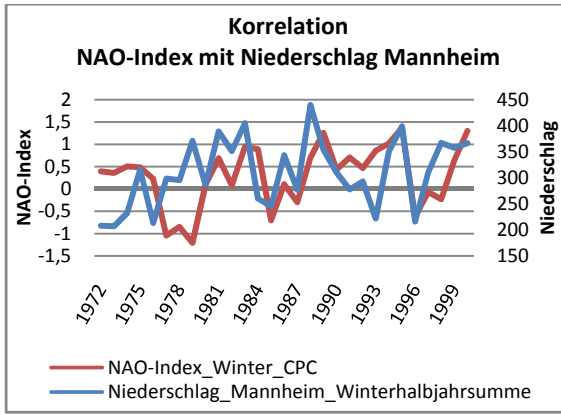


Abb. 24: Korrelation des CPC-NAO-Index als Wintermittel mit dem Mannheimer Niederschlag als Winterhalbjahrsumme

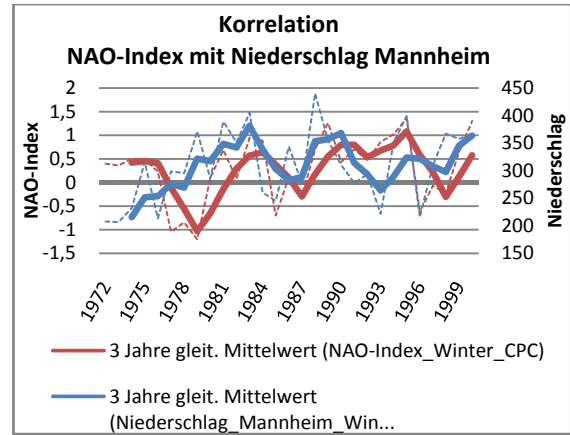


Abb. 27: Korrelation des CPC-NAO-Index als 3-Jahre-gleitendes Wintermittel mit dem Mannheimer Niederschlag als 3-Jahre-gleitende Winterhalbjahrsumme

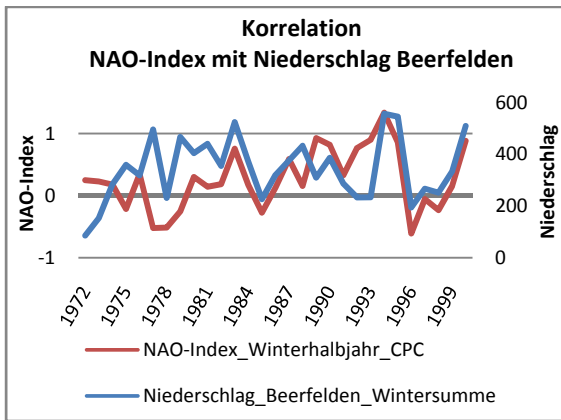


Abb. 25: Korrelation des CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel mit dem Beersfeldener Niederschlag als Wintersumme

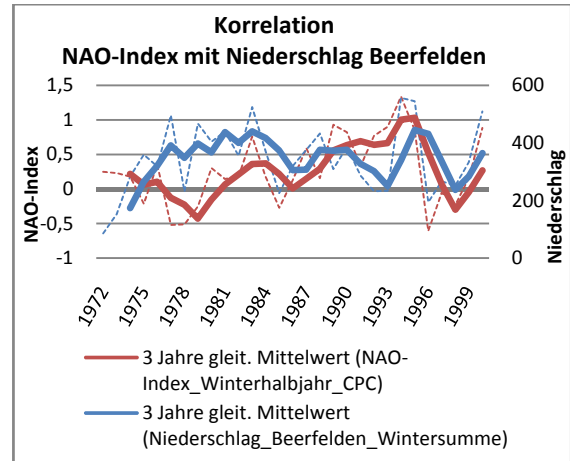


Abb. 28: Korrelation des CPC-NAO-Index als 3-Jahre-gleitendes Winterhalbjahrmittel mit dem Beersfeldener Niederschlag als 3-Jahre-gleitende Wintersumme

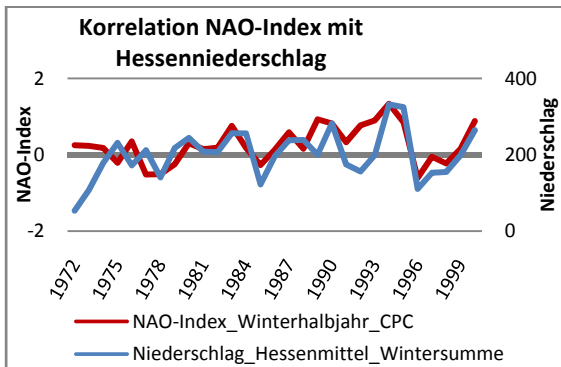


Abb. 26: Korrelation des CPC-NAO-Index als Winterhalbjahrmittel mit dem mittleren hessischen Niederschlag als Wintersumme

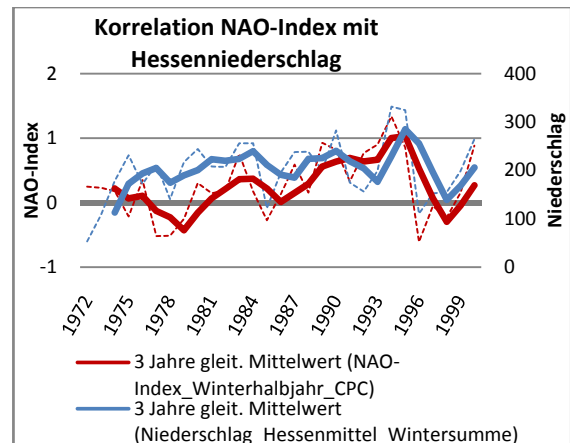


Abb. 29: Korrelation des CPC-NAO-Index als 3-Jahre-gleitendes Winterhalbjahrmittel mit dem mittleren hessischen Niederschlag als 3-Jahre-gleitende Wintersumme

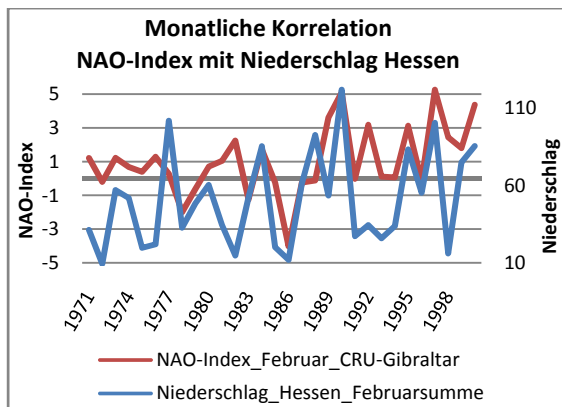


Abb. 30: Korrelation des CRU-Gibraltar-NAO-Index für Februar mit dem mittleren hessischen Niederschlag für Februar

## Verdunstung

Bei den Mannheimer Verdunstungskorrelationen liegt der höchste Korrelationskoeffizient bei 0,697 (siehe Tab. 2), bei den Beerfeldener Verdunstungskorrelationen erreicht er einen Wert von 0,59 (siehe Tab. 3). Die zugehörigen Korrelationsgraphiken (Abb. 31 und Abb. 33) zeigen nahezu deckende Kurvenverläufe. Bei der Beerfeldener Verdunstungskorrelation (Abb. 33) sind vor allem die längerfristigen Schwankungen sehr ähnlich.

## Klimatische Wasserbilanz

Bei den Mannheimer KWB-Korrelationen liegt der höchste negative Korrelationskoeffizient bei -0,347 (siehe Tab. 2), bei den Beerfeldener KWB-Korrelationen erreicht er einen Wert von -0,532 (siehe Tab. 3). Die zugehörigen Korrelationsgraphiken sind Abb. 32 und Abb. 34. In diesen Graphiken ist jeweils die Antiproportionalität der beiden Kurvenverläufe gut sichtbar.

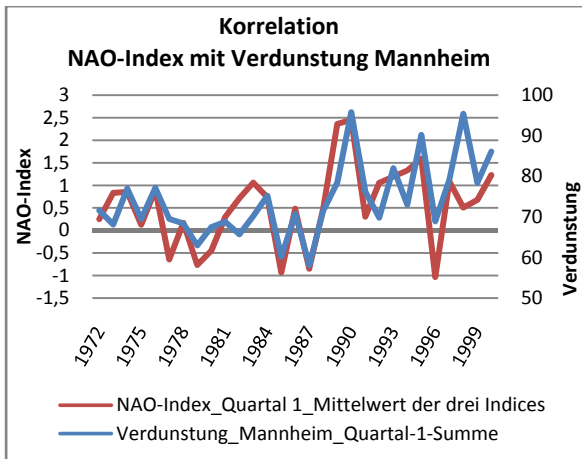


Abb. 31: Korrelation des Mittelwert-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Mannheimer Verdunstung als Quartal-1-Summe

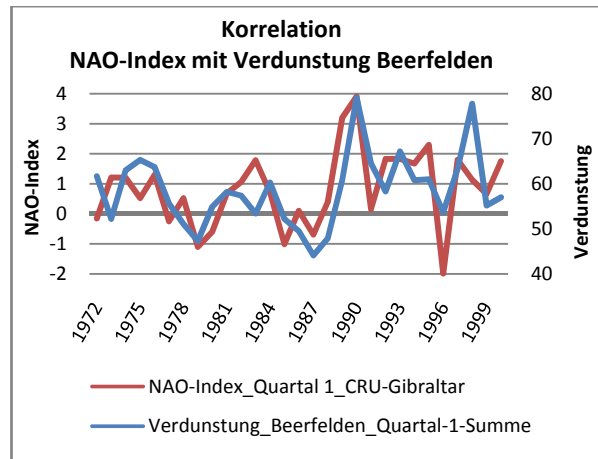


Abb. 33: Korrelation des CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Beerfeldener Verdunstung als Quartal-1-Summe

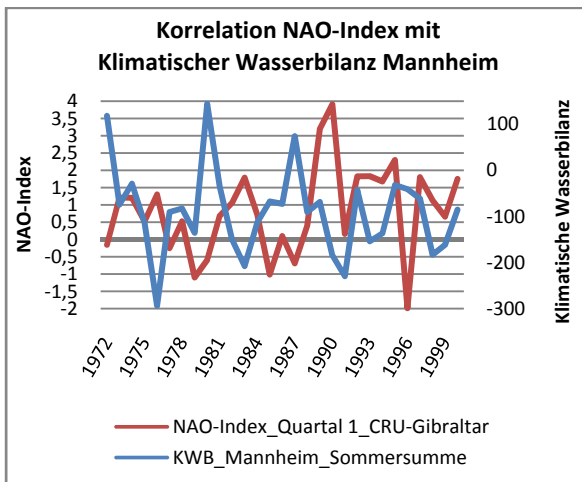


Abb. 32: Korrelation des CRU-Gibraltar-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Mannheimer Klimatischen Wasserbilanz als Sommersumme

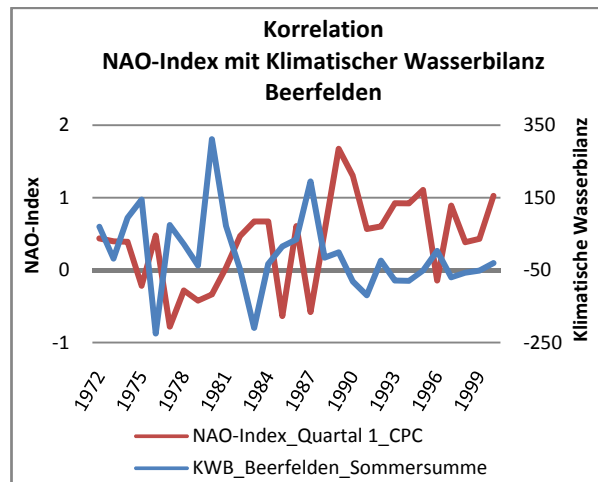


Abb. 34: Korrelation des CPC-NAO-Index als Quartal-1-Mittel mit der Beerfeldener Klimatischen Wasserbilanz als Sommersumme

### 3.3 Vergleich der Niederschlag- Korrelationsergebnisse mit der ENSO

Bei allen Niederschlagskorrelationen treten während der 70er Jahre antiproportionale Phasen auf, die in gegenläufigen Kurvenverläufen sichtbar werden. Diese Phasen verringern die jeweiligen Korrelationskoeffizienten. Sie führen innerhalb einer Korrelation zu einem niedrigeren Korrelationskoeffizienten, als wenn die Korrelation ab einem späteren Zeitpunkt durchgeführt würde.

Möglicherweise lassen sich die antiproportionalen Phasen mit dem Phänomen der ENSO (El Niño / Southern Oscillation) erklären. Wie aus der Studie von atmosphärischen Großwetterlagen (FRAEDRICH, 1994) einhergeht, kann sich die ENSO auf die Wettersituation Europas auswirken (vergleiche Abschnitt zur ENSO ab S. 21).

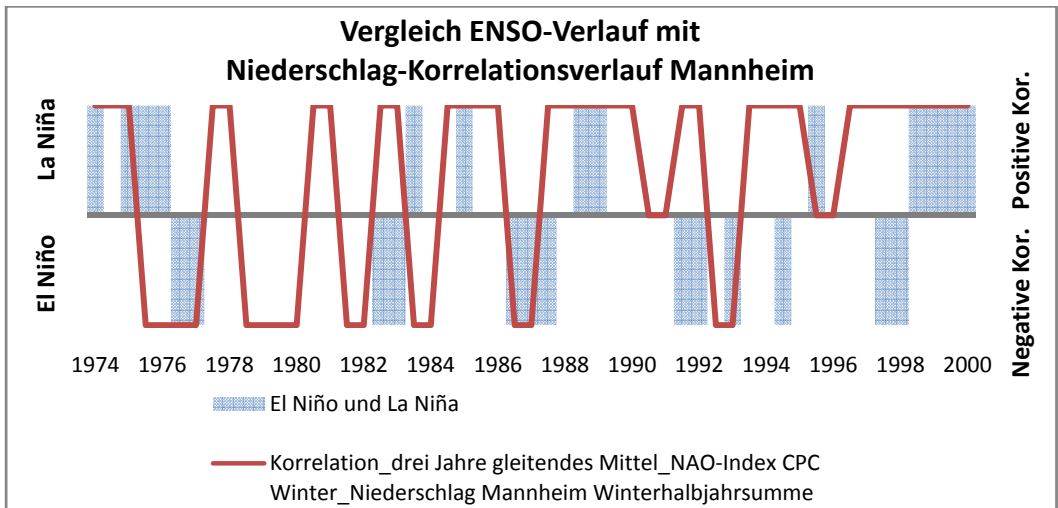
Um zu überprüfen, ob die gegenläufigen Kurvenverläufe (negative Korrelationsabschnitte) möglicherweise von der ENSO verursachte Störungen sind, wird ein Vergleich mit den Jahren angefertigt, in denen die ENSO-Erscheinungen auftraten.

Tab. 7 zeigt diese El-Niño- oder La-Niña-Jahre. Datengrundlage ist der Oceanic-Niño-Index der NOAA.

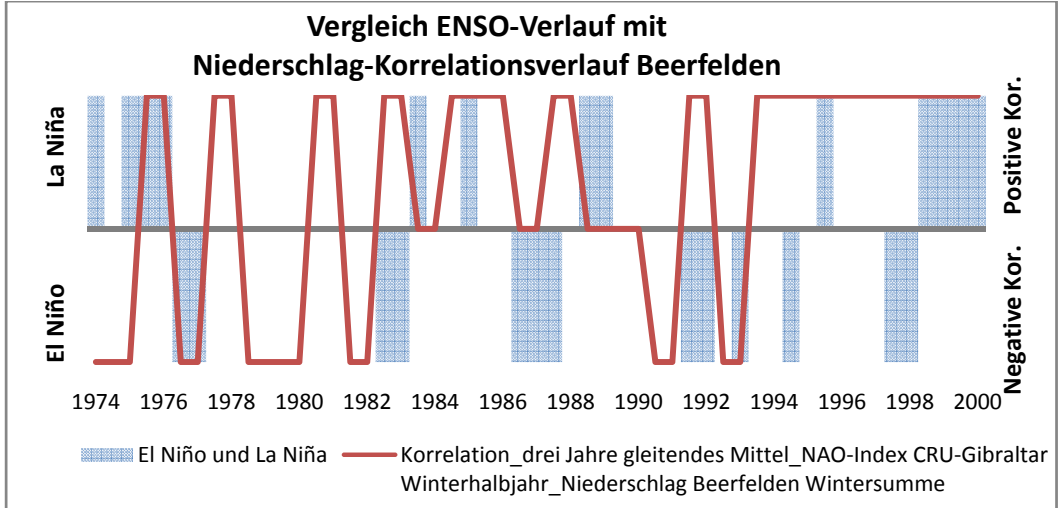
**Tab. 7: Jahre, in denen El-Niño- oder La-Niña-Erscheinungen aufgetreten sind**

Eintrittsjahre (1970 - 2000)	
El Niño = ENSO-Warmphase = positiver ONI	La Niña = ENSO-Kaltphase = negativer ONI
	1970 - 1971
1972 - 1973	
	1973 - 1974
	1975 - 1976
1976	
1977	
1982 - 1983	
	1983
	1985
1986 - 1987	
	1988 - 1989
1991 - 1992	
1993	
1994	
	1995
1997 - 1998	
	1998 - 2000

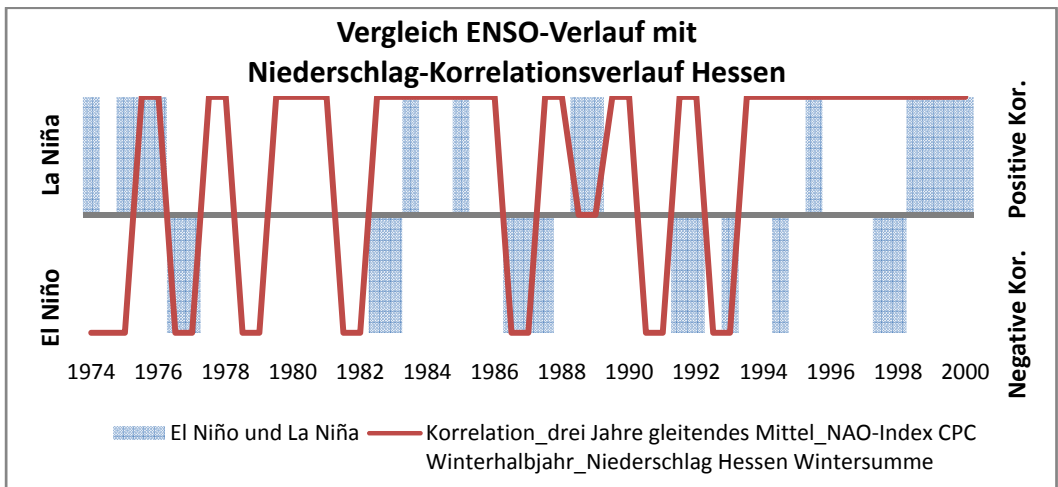
Quelle: NOAA / National Weather Service  
[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)  
 (NOAA, 2009)



**Abb. 35:** Vergleich der ENSO-Jahre mit den negativen bzw. positiven Niederschlag-Korrelationsjahren für Mannheim



**Abb. 36:** Vergleich der ENSO-Jahre mit den negativen bzw. positiven Niederschlag-Korrelationsjahren für Beerfelden



**Abb. 37:** Vergleich der ENSO-Jahre mit den negativen bzw. positiven Niederschlag-Korrelationsjahren für Hessen

In Abb. 35 bis Abb. 37 werden die Jahre, in denen ENSO-Erscheinungen aufgetreten sind, mit dem Verlauf der durchgeführten Niederschlagskorrelationen über den gleichen Zeitraum verglichen. Der Vergleich der positiven und negativen Korrelationsphasen mit den ENSO-Jahren wurde unternommen um möglicherweise eine Erklärung für die antiproportionalen Phasen zu erhalten. Es ist jedoch kein Zusammenhang zwischen diesen antiproportionalen Phasen und den ENSO-Jahren zu erkennen.

Wären bei dem Vergleich z.B. während der 70er Jahre die El-Niño-Phasen mit den negativen Korrelationen zusammengefallen, ab den 80er Jahren hingegen die La-Niña-Phasen, so wäre ein Zusammenhang sichtbar geworden, dem am Anfang der 80er Jahre eine systematische Änderung widerfährt. Damit hätten die antiproportionalen Phasen mit der ENSO erklärt werden können.

Der durchgeführte Vergleich ist so angelegt, dass nur überprüfbar ist, ob die ENSO immer den gleichen Effekt hat. Wenn die ENSO allerdings einen instationären Effekt auf das europäische Wettergeschehen hat (vergleiche S.21), dann sagt diese Graphik darüber nichts aus. Ein instationärer Effekt kann mit dieser Analyse nicht nachgewiesen werden. Das Ergebnis schließt somit die Annahme, dass die ENSO einen Effekt auf die Wettersituation in Europa hat, nicht aus.

Weitere Untersuchungen zur Erklärung der antiproportionalen Phasen während der 70er Jahre wurden aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

## **4. Diskussion**

Diese Arbeit hat verschiedene NAO-Index-Datenreihen mit dem Niederschlag, der Verdunstung und der Klimatischen Wasserbilanz an den Standorten Mannheim und Beerfelden verglichen. Des Weiteren wurde der mittlere hessische Niederschlag mit den NAO-Indices verglichen.

Hierfür wurden alle Daten verschiedenartig aufbereitet. So standen fünf verschiedenen NAO-Index-Datenreihen zur Verfügung (CRU-Azoren, CRU-Gibraltar, CPC, Mittelwert und Median), die jeweils auf vier Arten zeitlich gemittelt wurden (Mittelwert über einzelnen Monate, sowie über den Winter, das Quartal 1 bzw. das Winterhalbjahr).

Die Niederschlags-, Verdunstungs- und KWB-Daten wurden auf drei Arten zeitlich aufsummiert (jahreszeitenweise, quartalsweise und halbjahresweise). Der mittlere hessischen Niederschlag wurde zusätzlich noch monatsweise aufsummiert.

Ziel war es den erwarteten Zusammenhang zwischen den NAO-Index-Datenreihen und den Niederschlagsdatenreihen zu beweisen. Des Weiteren sollte eine Auswahl getroffen werden, welche der vielen möglichen Datenreihen-Kombinationen am besten korrelieren. Und letztendlich sollte entschieden werden, ob der NAO-Index als Optimierungsfaktor der WETTREG-Daten geeignet ist.

Die durchgeführten Analysen führen zu folgenden Ergebnissen:

### **1. Datenauswahl NAO-Index: CRU-Gibraltar-Datenreihe oder CPC-Datenreihe**

Bei den durchgeführten Korrelationen sind die beiden NAO-Index-Datenreihen, die die höchsten Korrelationskoeffizienten aufweisen, die CRU-Gibraltar-Datenreihe und die CPC-Datenreihe. Sie korrelieren überwiegend besser mit den hydrologischen Parameter als die Mittelwert- oder die Mediandatenreihen, die sich aus den drei Einzelreihen ergeben (vergleiche Tab. 3 und Tab. 4). Als Ausdruck der Nordatlantischen Oszillation eignen sich die CRU-Gibraltar-Daten und die CPC-Daten am besten für weitere hydrologische Untersuchungen.



## **2. Datenaufbereitung: Flächiger Mittelwert**

Der NAO-Index korreliert besser mit dem großflächigen hessischen Niederschlagsmittel als mit den Einzelstationsmesswerten (vergleiche Tab. 2 bis Tab. 5 und siehe Tab. 6).

Das Gebiet von Hessen gehört insgesamt zum warm-gemäßigten Regenklima der mittleren Breiten. Mit überwiegend westlichen Winden werden im klimatologischen Mittel das ganze Jahr über feuchte Luftmassen vom Atlantik herangeführt, die zu Niederschlägen führen. Durch die topographische Struktur des Landes mit seinen Mittelgebirgen, die verschiedene, flache Landschaften einschließen, wird das Klima stark strukturiert. Für den Niederschlag ist die Lage der Gebirge relativ zur Haupt-Windrichtung von Bedeutung. Im Luv der Berge (dem Wind zugewandte Seite) wird durch die erzwungene Hebung der Luft verstärkt Wolkenbildung und Niederschlag ausgelöst, im Lee der Gebirge (dem Wind abgewandte Seite) lösen sich die Wolken durch das Absinken der Luft auf und es entstehen relativ trockene Gebiete.

Während ein hoher oder niedriger Jahresniederschlag abhängig von der Topographie ist, hängt der Jahresverlauf des Niederschlags von den Wetterlagen ab. Auf diese Wetterlagen wirkt sich die NAO aus.

Bei Einzelstationen spielen die regionalen Gegebenheiten eine große Rolle. Die Korrelation mit dem NAO-Index ist gering.

Bei den mittleren, hessischen Niederschlägen handelt es sich um flächige Mittelwerte. Lokal auftretende Störeffekte, die sich nur an einzelnen Stationen ereignen, werden heraus gemittelt.

## **3. Datenaufbereitung: Zeitlicher Mittelwert bzw. zeitliche Aufsummierung über drei bis sechs Monate**

Der NAO-Index korreliert besser mit dem Niederschlag, wenn der NAO-Index längerfristig gemittelt ist und der Niederschlag längerfristig aufsummiert ist (vergleiche Tab. 4 mit Tab. 5 und siehe Tab. 6).

Zeitlich gesehen ist eine Mittelung bzw. Aufsummierung der Daten über drei bis sechs Monate sinnvoll. Bei dieser längerfristigen Mittelung werden selten oder kurzzeitig auftretende Störeffekte heraus gemittelt.

Eine Ausweitung auf mehr als sechs Monate ist nicht sinnvoll. Beim NAO-Index ist der Grund dafür, dass die NAO nur im Winter ihre charakteristischen Schwankungen zeigt und während dieser Zeit das Wetter in Europa am stärksten beeinflusst. Beim Niederschlag ist es nicht sinnvoll, weil sich aus der Monatskorrelation ergibt, dass sich der NAO-Index zeitnah (nach einigen Wochen) auf den Niederschlag auswirkt. Der Mittelungszeitraum des NAO-Index sollte in etwa mit dem Aufsummierungszeitraum des Niederschlags übereinstimmen.

#### **4. Datenaufbereitung: Gleitendes Mittel über drei Jahre**

Werden die beiden jeweiligen Korrelationskurven als gleitendes Mittel über drei Jahre angezeigt, vereinheitlichen sich die Kurvenverläufe.

Ein gleitender Mittelwert verringert die in einer Datenreihe vorhandene Variation. Die Datenreihe wird geglättet. Maxima und Minima werden abgeschwächt und weniger ausgeprägt dargestellt (siehe Abb. 27, Abb. 28 und Abb. 29). Andererseits ist bei einer langen Zeitreihe (in dieser Arbeit über einen Zeitraum von 30 Jahren; 1971 – 2000) ein gleitender Mittelwert über nur drei Jahre dazu geeignet den charakteristischen Verlaufs der jeweiligen Zeitreihe beizubehalten.

Der NAO-Index soll einerseits dazu dienen die Klimaparameter, die WETTREG simuliert, in ihren Maxima und Minima stärker auszuprägen. Andererseits soll durch ihn die mehrjährige Periodizität, insbesondere in der Frequenz von etwa drei Jahren verbessert werden.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Ziele ist die Verwendung eines gleitenden Mittels über drei Jahre ein guter Kompromiss um beiden gerecht zu werden.

#### **5. Zusammenhang: lineare Abhängigkeit des Niederschlags, der Verdunstung und der KWB vom NAO-Index**

Beim hessischen Niederschlag (Abb. 19) und bei der Verdunstung an den Stationen Mannheim und Beerfelden (Abb. 17 und Abb. 21) zeigt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen diesen Klimaparametern und dem NAO-Index. Ein hoher positiver NAO-Index führt somit zu vermehrten Niederschlägen und vermehrter Verdunstung.

Bei der klimatischen Wasserbilanz an den Stationen Mannheim und Beerfelden zeigt sich ein antiproportionaler Zusammenhang mit dem NAO-Index (siehe Abb. 18 und Abb. 22). Ein hoher positiver NAO-Index führt zu einer verminderten Klimatischen Wasserbilanz.

#### **6. Niederschlag: Wirkung des NAO-Index auf den Niederschlag mit wenigen Wochen Zeitverzögerung**

Bei den hessischen Monatskorrelationen (Tab. 5) wird deutlich, dass der NAO-Index weitgehend im gleichen Monat, demnach höchstens wenige Wochen später, Wirkung auf den Niederschlag hat. Im Januar, Februar und März ist eine unmittelbare Wirkung zu verzeichnen. Im November und Dezember tritt die Wirkung mit etwa einem Monat Zeitverzögerung auf.

**7. Niederschlag:                                      Höchster                      Korrelationskoeffizient                      zwischen  
Niederschlag im Winter und NAO-Index für das  
Winterhalbjahr**

Der höchste Korrelationskoeffizient ergibt sich bei der Korrelation des (hessischen) Winter-Niederschlags mit dem Winterhalbjahr-NAO-Index (siehe Tab. 6 und Tab. 4).

**8. Verdunstung:                                      Höchster                      Korrelationskoeffizient                      zwischen  
Verdunstung und NAO-Index im Quartal 1**

Der höchste Korrelationskoeffizient ergibt sich bei der Korrelation der Verdunstung während Quartal 1 mit dem NAO-Index-Mittel über den gleichen Zeitraum (siehe Tab. 6 und Tab. 2).

Der NAO-Index wirkt sich innerhalb kürzester Zeit auf die Verdunstung aus.

Eine hohe Verdunstungsrate zeigt sich an warmen, sonnigen Tagen, wenn zuvor reichlich Niederschlag gefallen ist und daher der Wasserspeicher des Bodens aufgefüllt ist (siehe Evapotranspiration, S. 22 Abs. a)).

Hohe Niederschlagsraten im Winter treten bei positivem NAO-Index auf (vergleiche Text zu Abb. 5). Ein hoher positiver NAO-Index führt über hohe Niederschlagsraten zu einer hohen Verdunstungsrate im gleichen Zeitraum.

**9. KWB:    Höchster Korrelationskoeffizient zwischen der KWB im  
Sommer und dem NAO-Index im Quartal 1**

Der höchste negative Korrelationskoeffizient ergibt sich bei der Korrelation der sommerlichen KWB mit dem NAO-Index-Mittel über Quartal 1 (siehe Tab. 6 und Tab. 3).

Der NAO-Index spiegelt sich mit einigen Wochen Zeitverzögerung in der Klimatischen Wasserbilanz wider. Der Zusammenhang ist antiproportional. Dies bedeutet: Im gleichen Verhältnis wie der NAO-Index zunimmt, nimmt die KWB ab und umgekehrt. Dieser mathematische Zusammenhang ist scheinbar auch physikalisch erklärbar.

Die Klimatische Wasserbilanz berechnet sich aus den Niederschlägen minus der Verdunstung während eines bestimmten Zeitraums (siehe S. 22, Abs. a)).

Niedrige Klimatische Wasserbilanzen treten auf, wenn (a) der Niederschlag gering ist und / oder (b) eine hohe Verdunstungsrate vorherrscht.

Bezogen auf die sommerliche KWB gilt folgendes:

Die Mannheimer und Beerfeldener KWB ist im Sommer negativ (siehe Abb. 15).

Es kann jedoch keine Aussage zu (a) - nämlich über den sommerlichen Niederschlag - gemacht werden.

Eine hohe sommerliche Verdunstungsrate (b) zeigt sich (b1) an warmen, sonnigen Tagen, wenn (b2) im vorigen Winter bzw. Frühjahr reichlich Niederschlag gefallen ist und daher der Wasserspeicher des Bodens aufgefüllt ist.

Zu (b1) - nämlich sommerliche Temperaturen und Sonnenscheindauer - kann keine Aussage gemacht werden. Ein positiver winterlicher NAO-Index geht in der Theorie einher mit hohen Niederschlagsraten während des gleichen Zeitraums (b2).

Ein positiver winterlicher NAO-Index kann somit über den Niederschlag als eine Ursache unter anderen zu hohen sommerlichen Verdunstungsraten führen. Diese hohen sommerlichen Verdunstungsraten können (neben niedrigen sommerlichen Niederschlagsraten) zu niedrigen oder gar negativen sommerlichen Klimatischen Wasserbilanzen führen.

Es scheint somit physikalisch erklärbar, dass ein positiver winterlicher NAO-Index mit einer negativen sommerlichen KWB einhergeht und sich der Winter-NAO-Index antiproportional zur Sommer-KWB verhält.

## **10. ENSO:**

### **Kein Zusammenhang zw. negativen Korrelationsphasen der Niederschlagskorrelationen und ENSO-Jahren**

Bei allen Niederschlagskorrelationen treten während der 70er Jahre antiproportionale Phasen auf, die in gegenläufigen Kurvenverläufen sichtbar werden (siehe Abb. 24 bis Abb. 29). Diese Phasen verringern die jeweiligen Korrelationskoeffizienten. Sie führen innerhalb einer Korrelation zu einem niedrigeren Korrelationskoeffizienten, als wenn die Korrelation ab einem späteren Zeitpunkt durchgeführt würde.

Der Vergleich der positiven und negativen Korrelationsphasen mit den ENSO-Jahren (Abb. 35 bis Abb. 37) wurde unternommen um möglicherweise eine Erklärung für die antiproportionalen Phasen zu erhalten. Es ist jedoch kein Zusammenhang zwischen diesen antiproportionalen Phasen und den ENSO-Jahren zu erkennen.

Wären bei dem Vergleich z.B. während der 70er Jahre die El-Niño-Phasen mit den negativen Korrelationen zusammengefallen, ab den 80er Jahren hingegen die La-Niña-Phasen, so wäre ein Zusammenhang sichtbar geworden, dem am Anfang der 80er Jahre eine systematische Änderung widerfährt. Damit hätten die antiproportionalen Phasen mit der ENSO erklärt werden können.

Der durchgeführte Vergleich ist so angelegt, dass nur überprüfbar ist, ob die ENSO immer den gleichen Effekt hat. Wenn die ENSO allerdings einen instationären Effekt auf das europäische Wettergeschehen hat (vergleiche S.21), dann sagt diese Graphik darüber nichts aus. Ein instationärer Effekt kann mit dieser Analyse nicht nachgewiesen werden. Das Ergebnis schließt somit die Annahme, dass die ENSO einen Effekt auf die Wettersituation in Europa hat, nicht aus.

Weitere Untersuchungen zur Erklärung der antiproportionalen Phasen während der 70er Jahre wurden aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

## **11. Optimierungsfaktor: NAO-Index als Optimierungsfaktor geeignet**

Unter Berücksichtigung der Punkte 1. bis 9. lässt sich sagen, dass zwischen dem NAO-Index und den getesteten hydrologischen Parameter ein linearer Zusammenhang besteht. Es ist somit theoretisch möglich die hydrologischen Parameter über den NAO-Index in Form einer mathematischen Gleichung auszudrücken. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Streuung der Werte um den linearen Trend mit einer solchen Formulierung nicht wiedergegeben wird. Die durchgeführten Auswertungen lassen jedoch trotzdem den Schluss zu, dass der NAO-Index als Optimierungsfaktor für die hydrologischen Parameter in Frage kommt.

## **5. Ausblick**

Das Gesamtziel ist die von WETTREG simulierten Niederschlagsdaten hinsichtlich ihrer Maxima und Minima sowie der mehrjährigen Periodizität besser darzustellen um somit eine verbesserte Simulation des zukünftigen Klimas zu erhalten.

Die vorliegende Arbeit hat den ersten Schritt auf dem Weg zum Gesamtziel geleistet. Aus dem hier dargelegten Zusammenhang des NAO-Index mit den hydrologischen Parametern ergibt sich, dass der NAO-Index als Optimierungsfaktor für die simulierten hydrologischen Zeitreihen, sowohl für Simulationen der Vergangenheit (Validierungszeitraum), als auch für Simulationen der Zukunft (Szenarien) geeignet ist.

### **1. Korrelation weiterer hydrologischer Parameter mit dem NAO-Index**

Der nächste Schritt zur Erreichung des übergeordneten Zieles ist die Korrelation der Messdaten der Grundwasserneubildung (GWN) mit den NAO-Index-Datenreihen. Der Untersuchungszeitraum sollte weiterhin von 1971 – 2000 gewählt werden, um mit den hier vorgelegten Ergebnissen konsistent zu sein.

### **2. Korrelation der Simulationsdaten aus WETTREG mit dem NAO-Index**

Ergeben sich auch bei der GWN-Korrelation hohe Korrelationskoeffizienten, so kann eine Korrelation der simulierten WETTREG-Daten der hydrologischen Parameter mit den NAO-Index-Datenreihen für den gleichen Untersuchungszeitraum durchgeführt werden.

### **3. Identifizierung eines Optimierungsfaktors**

Die Ergebnisse der Korrelation der Simulationsdaten sollten mit den Ergebnissen der Korrelation der Messdaten verglichen werden um einen Optimierungsfaktor zu identifizieren.

Der Faktor soll eine mathematische Funktion in Abhängigkeit vom NAO-Index sein. Über ihn geht der NAO-Index ein zweites Mal in die WETTREG-Daten mit ein um die Extremwerte und die mehrjährige Periodizität der durch WETTREG simulierten Zukunftsdaten der hydrologischen Parameter besser darzustellen.

#### **4. Beurteilung der verbesserten, von WETTREG simulierten Zukunftsdaten und Entwicklung von Anpassungsstrategien**

Ist es unter Punkt 1 bis 3 geglückt einen Optimierungsfaktor herauszuarbeiten, so besteht die berechtigte Hoffnung, dass mit Hilfe dieses Optimierungsfaktors das prognostizierte regionale Klima der Zukunft realitätsgetreuer dargestellt wird und die Wirkungen von Veränderungen der hydrologischen Parameter auf den Wasserhaushalt besser beurteilt werden können.

Auf Grundlage dieser Beurteilung könnte eine integrierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen und die Entwicklung von Anpassungsstrategien vorangetrieben werden um der Verantwortung für die Sicherung der zukünftigen regionalen Wasserversorgung gerecht zu werden.

Das Klima ist keine Konstante und eine Veränderung nicht gleich eine Katastrophe – zumindest, wenn sich die Folgen in einem überschaubaren Rahmen halten lassen und eine Anpassung gelingt.

## 6. Literaturverzeichnis

Baldenhofer, K. (Januar 2009). *Das ENSO-Phänomen, Informationen zum ozeanisch-atmosphärischen Phänomen El Niño / Southern Oscillation*. Von <http://www.enso.info/index.html> abgerufen

Bannik, C., Engelmann, B., Fendler, R., Frauenstein, J., Ginzky, H., Hornemann, C., Ilvonen, O., Kirschbaum, B., Penn-Bressel, G., Rechenberg, J., Richter, S., Roy, L., Wolter R. (2008). Grundwasser in Deutschland. In *Reihe Umweltpolitik*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) / Umweltbundesamt (UBA).

Berthold, G., & Hergesell, M. (2005). *Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen - Abschlussbericht für den Bereich Grundwasser*. Von Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: <http://www.hlug.de/klimawandel/inklim/dokumente/endberichte/grundwasserneubildung.pdf> abgerufen

BGS UMWELT - Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH. (kein Datum). *AnKliG - Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter sowie Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement*. Von [http://www.anklig.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=5&Itemid=6](http://www.anklig.de/index.php?option=com_content&task=view&id=5&Itemid=6) abgerufen

Bissolli, P. (2002). Wetterlagen und Großwetterlagen im 20. Jahrhundert. In *Klimastatusbericht 2001* (S. 32). Offenbach: Deutscher Wetterdienst (Hrsg und Verlag).

Blüchel, K. G. (August 2007). *Der Klimaschwindel - Erderwärmung, Treibhauseffekt, Klimawandel - die Fakten*. C. Bertelsmann .

BMU. (2003). Kartentafel 5.5 „Mittlere jährliche Grundwasserneubildung“. In *Hydrologischer Atlas von Deutschland. - 3. Lieferung*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1996). *Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 238*. Bonn: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.

Deutscher Wetterdienst. (1996 - 2009). *Wetterlexikon, NAO / NAO-Index*. Von <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/download.php?file=NAO.pdf> abgerufen

Dietrich, J., & Schöniger, M. (2008). *HydroSkript - Hydrologie, Grundwassermodellierung, GIS, Klimatologie*. Von [http://www.hydroskript.de/html/\\_index.html?page=/html/hykp0505.html](http://www.hydroskript.de/html/_index.html?page=/html/hykp0505.html) abgerufen

Dietzer, B., Günther, T., Klämt, A., Matthäus, H., & Reich, T. (2002). Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen. In *Klimastatusbericht 2001* (S. 67). Offenbach: Deutscher Wetterdienst (Hrsg und Verlag).

*DIN 4049-1:1992-12, Hydrologie; Grundbegriffe*. (1992). Berlin/Wien/Zürich: Beuth.



Fooker, D. C. (2007). *Klimawandel und seine Folgen in Hessen*. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Forkel, M. (Juni 2009). *Das Klima der Erde*. Von <http://klima-der-erde.de/> abgerufen

Fraedrich, K. (1994). *An ENSO Impact on Europe? - A Review*. *Tellus*, 46A, 541-552. Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.

Fuhrmann, H. (November 1998). *Globale Umweltveränderungen, Interdisziplinäres Seminar, El Niño*. Von [http://www.mi.uni-hamburg.de/fileadmin/files/static\\_html/Globale\\_Umweltveraenderungen/Jacques/elnino.html](http://www.mi.uni-hamburg.de/fileadmin/files/static_html/Globale_Umweltveraenderungen/Jacques/elnino.html) abgerufen

Graedel, T. E., & Crutzen, P. J. (1996). *Atmosphäre im Wandel: Die empfindliche Hülle unseres Planeten*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.

Griebler, M. D., & Mösslacher, M. D. (2003). *Grundwasser-Ökologie*. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG.

Hanno. (November 2005). *Winter-NAO-Index*. Von <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Winter-NAO-Index.png> abgerufen

Hergesell, M. (2008). Grundwasserneubildung. In *Hydrologie in Hessen, Heft 3, Gewässerkundlicher Jahresbericht 2007 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (Hrsg) (S. 28)*. Wiesbaden.

Hergesell, M., & Berthold, G. (2008). Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser in Hessen. In *Jahresbericht 2007 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (Hrsg, © und Vertrieb) (S. 45)*. Wiesbaden.

HLUG. (2009). *Folgen des Klimawandels*. Von Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie - Fachzentrum Klimawandel: <http://www.hlug.de/klimawandel/monitor/dokumente/klimafolgen.pdf> abgerufen

HLUG. (2009). *Glossar zum Klimaschutz*. Von Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie - Fachzentrum Klimawandel: <http://www.hlug.de/klimawandel/monitor/dokumente/glossar.pdf> abgerufen

HLUG. (2009). *Klima und Klimawandel*. Von Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie - Fachzentrum Klimawandel: <http://www.hlug.de/klimawandel/monitor/dokumente/klimawandel.pdf> abgerufen

HLUG. (2009). *Klimadaten Hessen – Mittlere Niederschlagshöhe - Jahr 1971 - 2000*. Von Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie - Umweltatlas Hessen: <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/index-ie.html> abgerufen

Hupfer, P. (1996). *Unsere Umwelt: Das Klima. Globale und lokale Aspekte*. (M. C.-J. Bahadir, Hrsg.) Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft.

Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., & Visbeck, M. (2003). The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. In *American Geophysical Union Monograph Vol.134*.

IPCC. (2007). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger - Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC). In *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen*. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin: <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC2007-WG1.pdf>.

Kasang, D. (Juli 2008). *Atmosphärische Zirkulation - Zirkulationszellen und Windsysteme der atmosphärischen Zirkulation*. Von Wiki Bildungsserver: Quelle: [http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Atmosphärische\\_Zirkulation](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Atmosphärische_Zirkulation) abgerufen

Kasang, D. (Mai 2009). *Wetterlagen bei positiver und negativer NAO-Phase*. Von [http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Bild:Nao\\_positiv\\_negativ.jpg](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Bild:Nao_positiv_negativ.jpg) abgerufen

Kasang, D. (Mai 2009). *WIKI Bildungsserver, Nordatlantische Oszillation*. Von [http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Nordatlantische\\_Oszillation](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Nordatlantische_Oszillation) abgerufen

KLIWA. (2006). *Unser Klima verändert sich, Folgen – Ausmaß – Strategien, Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland*. Stuttgart: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).

LAWA- Ausschüsse Oberirdische Gewässer und Küstengewässer, G. u.-A. (September 2007). 1. *Entwurf eines LAWA-Strategiepapiers "Klimawandel - Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft" gem. Beschluss Nr. 2 zu TOP 6.2 a zur 133. LAWA-VV in Trier*. Von [http://www2.hmuelv.hessen.de/imperia/md/content/internet/wrrl/2\\_umsetzung/hintergrundinformationen/lawa\\_strategiepapier\\_klimawandel.pdf](http://www2.hmuelv.hessen.de/imperia/md/content/internet/wrrl/2_umsetzung/hintergrundinformationen/lawa_strategiepapier_klimawandel.pdf) abgerufen

Liljequist, G. H., & Cihak, K. (1984). *Allgemeine Meteorologie. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH.

Malberg, H. (1997). *Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Malberg, H. (2009). *Vereine Berliner Wetterkarte e.V. zur Förderung der meteorologischen Wissenschaft c/o Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin*.

Max-Planck-Institut für Meteorologie. (Februar 2008). *El Niño / La Niña*. Von <http://www.mpimet.mpg.de/presse/faqs/das-el-nino-southern-oscillation-enso-phaenomen.html> abgerufen

NASA. (2005). *NASA GISS: Surface Temperature Analysis 2005*. Von <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2005/> abgerufen

NEWxSFC. (2001 - 2009). *North Atlantic Oscillation*. Von <http://www.newx-forecasts.com/nao.html> abgerufen

NOAA. (2009). *Oceanic Niño Index*. Von NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) / National Weather Service: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) abgerufen

Peters, R. (2000). Nordatlantische Oszillation. *Klimatische Einflüsse auf den Meeresspiegel der Ostsee – Untersuchungen zur Wirkung der Nordatlantischen Oszillation, Studienarbeit im Fach Theoretische und Physikalische Geodäsie an der Technischen Universität Dresden* .

RAOnline. (2000 - 2009). *Polar-Jet und Subtropischer Jet*. Von <http://www.raonline.ch/./images/edu/graph/jetgraph04.jpg> abgerufen

Richter, D. (1995). Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. In *Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194* (S. 94). Offenbach: DWD.

Ruprecht, P. D. (2006). *Die Nordatlantische Oszillation und ihr Einfluss auf das Klima in Europa, IFM-GEOMAR, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel*. Von <http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=2694> abgerufen

Schindler, S. (2003, letzte Änderung der Seite: September 2005). *Die Nordatlantische Oszillation (NAO) oder Eine Zahl für das Wetter in Europa?* Von IFM-GEOMAR, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel, Schülerseiten, Albert Schweitzer Gymnasium Neckarsulm: [http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=oz-on\\_ao](http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=oz-on_ao) abgerufen

Sevruk, B. (Dezember 1989). Reliability of precipitation measurement. *Workshop on Precipitation Measurement, WMO/IAHS/ETH* .

UNESCO. (2003). *Water for people, water for life - United Nations World Water Development Report - Executive Summary*. Paris: UNESCO.