



Hochschule RheinMain
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim Geisenheim

Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Studiengang Umwelttechnik

Bachelorarbeit

Andreas Schütz

Rüsselsheim, Juni 2011

Thema: Optimierung und Auswertung hydrologischer
Kenngrößen in Klimaprojektionen des Modells
Wettreg2006 mit Hilfe des NAO-Index

Referent: Prof. Dr. U. K. Deister
Korreferenten: Dr. H. Hübener
Dr. G. Berthold
Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie



Erklärung

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

Rüsselsheim, den.....

.....
Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Glossar	8
Zusammenfassung	10
Abstract	10
1 Einleitung.....	12
1.1 Motivation	12
1.2 Wissenschaftliche Grundlagen.....	13
1.2.1 Globale Zirkulation.....	13
1.2.2 Nordatlantische Oszillation	14
1.2.3 Klima-Szenarien	14
1.2.4 Verdunstung.....	15
1.2.5 Niederschlag.....	16
1.2.6 Klimatische Wasserbilanz.....	17
1.2.7 Grundwasser	17
1.2.8 Hessisches Ried.....	19
1.3 Erkenntnisse aus Vorgängerarbeiten	20
1.3.1 Jansky (2009).....	20
1.3.2 Geiger (2010)	21
2 Daten.....	22
2.1 Niederschlagsdaten	22
2.1.1 Gemessene DWD-Niederschlagsdaten	22
2.1.2 Simulierte Niederschlagsdaten aus WETTREG2006	22
2.2 NAO-Daten.....	23
2.3 Grundwasserdaten	25
2.4 Verdunstungsdaten.....	26
2.4.1 Gemessene Verdunstungsdaten (1971-2000)	28
2.4.2 Projizierte Verdunstungsdaten (2001-2100).....	28
3 Ergebnisse.....	29
3.1 Anwendung der Aufprägungsformel.....	29
3.2 Untersuchung der Korrelation zwischen den Grundwasserganglinien.....	33
3.3 Untersuchung der Korrelation der Grundwasserstände mit der KWB (1971-2000). 36	
3.4 Regressionsanalyse zwischen GW-Ständen und KWB (1971-2000).....	44
3.5 Projizierte Grundwasserstände von 2001 bis 2100	48

3.5.1	Projizierte Grundwasserstands-Zeitreihe mit WETTREG-Niederschlagsdaten	49
3.5.2	Projizierte Grundwasserstands-Zeitreihe mit korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten	49
3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	49
4	Diskussion	50
4.1	Korrelation der GW-Ganglinien	50
4.2	Korrelation der KWB mit den GW-Ganglinien.....	51
4.3	Regressionsanalyse.....	51
4.4	Projektion.....	52
5	Ausblick	53
6	Literaturverzeichnis.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schematische Darstellung der Grundwasserschichten.....	18
Abbildung 2	Schematische Darstellung des Wasserkreislaufes	19
Abbildung 3	Hessenkarte mit den Orten der Grundwassermessstellen	26
Abbildung 4	Hessenkarte der Klimastationen für die Verdunstungsbestimmung	28
Abbildung 5	WETTREG-Niederschlagsverläufe für das hWH	29
Abbildung 6	WETTREG-Niederschlagsverläufe für das DJF.....	30
Abbildung 7	WETTREG-Niederschlagsverläufe für das Q1.....	30
Abbildung 8	Ganglinien der Grundwassermessstationen (1971-2000).....	35
Abbildung 9	Vergleich der KWB mit dem Mittelwert der GW-Ganglinien (1971-2000).....	37
Abbildung 10	Gleit. Dreimonatsmittel und das Mittel der GW-Ganglinien (1971-2000).....	39
Abbildung 11	Gleit. Fünfmonatsmittel und das Mittel der GW-Ganglinien (1971-2000).....	41
Abbildung 12	Korrelationsanalyse des gleitenden Fünfmonatsmittels mit dem Mittel der GW-Ganglinien (1971-2000)	43
Abbildung 13	Streudiagramm des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB und des Mittels der GW-Ganglinien	44
Abbildung 14	Streudiagramm des Jahresmittels der KWB und des Jahresmittels des Mittelwertes GW-Ganglinien.....	46
Abbildung 15	Projizierte GW-Ganglinien.....	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Ausgewählte Grundwassermessstationen und deren Messzeiträume.....	25
Tabelle 2	Liste der Klimastationen für die Verdunstungsbestimmung.....	27
Tabelle 3	Mittelwerte des WETTREG-Niederschlages (2001–2100)	31
Tabelle 4	Standardabweichungen des WETTREG- Niederschlages (2001-2100)	31
Tabelle 5	Mehrjährigkeiten des korrigierten WETTREG-Niederschlages (2001-2100).....	32
Tabelle 6	Korrelationskoeffizienten zwischen den vier Grundwassermessstationen	33
Tabelle 7	Prüfgrößen für die Signifikanzprüfung.....	34

Abkürzungsverzeichnis

CPC	-	climate prediction center
CRU	-	climate research unit
DJF	-	meteorologischer Winter (Dezember, Januar, Februar)
DWD	-	Deutscher Wetterdienst
ET	-	Evapotranspiration
GWB	-	Grundwasserneubildung
hWH	-	hydrologisches Winterhalbjahr (November bis April)
IDP	-	Interaktives Diagnose- und Präsentationstool
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
KNMI	-	Königlich Niederländisches Meteorologisches Institut
KWB	-	Klimatische Wasserbilanz
NAO	-	Nordatlantische Oszillation
NN	-	Normalnull
NN+m	-	Meter über Normalnull
PSL	-	Druck auf Meeresebene (engl.: pressure on sealevel)
Q1	-	erstes Quartal des Jahres (Januar bis März)
RR	-	Niederschlag
SRES	-	Special Report on Emission Scenarios
WETTREG	-	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode

Glossar

ECHAM5: ECHAM5 ist ein globales Klimamodell, dessen Ergebnisse die Ausgangsinformationen für regionale Klimamodelle wie WETTREG liefern. Die hier betrachteten WETTREG-Daten wurden mit Antriebsdaten aus ECHAM5 erzeugt.

Gleitender Mittelwert: Der gleitende Mittelwert, auch gleitender Durchschnitt genannt, wird verwendet, um Kurven, häufig Zeitreihen, zu glätten. Dabei werden je nach Bedarf z.B. drei Werte herangezogen, aus denen ein Mittelwert

gebildet wird. Bei einer Monatszeitreihe eines Jahres beispielsweise wird für den ersten Wert ein Mittel aus Januar, Februar und März gebildet. Dieser Wert wird dem Februar zugeordnet. D.h., dass der erste Wert (Januar) wegfällt, weil kein Mittel gebildet werden kann. Für den zweiten Wert (März) wird ein Mittel aus Februar, März und April gebildet usw.

- He_ori_T: He_ori_T ist ein, in dem Programm IDP abrufbarer, Datensatz der Originaldaten, also vom DWD gemessene Klimadaten transient ausgibt.
- HLUGTrans1: HLUGTrans1 ist ein mit WETTREG transient erzeugter Datensatz.
- IDP: IDP ist eine Software, die es ermöglicht, Klimadaten benutzerbezogen abzurufen bzw. zu visualisieren. Die Software enthält sowohl simulierte bzw. projizierte als auch gemessene Daten.
- Klimastationen: Klimastationen sind Messstationen, die je nach Ausstattung verschiedene Klima- bzw. Wetterdaten messen. Dazu gehören Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Windstärke und -richtung, Luftdruck, Globalstrahlung etc.
- Lag-Korrelation: Eine Lag- oder Verschiebungs-Korrelation liegt vor, wenn beispielsweise zwei Zeitreihen zwar voneinander abhängen, jedoch das Folgeereignis der zweiten Kurve erst nach einer gewissen Zeit eintritt, also zeitlich verschoben ist.
- Mehrjährigkeit: Die Mehrjährigkeit beschreibt die Dauer von Nass- bzw. Trockenperioden, die mehrere Jahre andauern. In der vorliegenden Arbeit wurden bei der Betrachtung, in Anlehnung an Geiger (2010), nur Langphasenwerte mit einer Abweichung vom Mittelwert von mehr als 50mm Niederschlagsmenge betrachtet.
- WETTREG: WETTREG ist ein regionales Klimaprojektionsmodell, das statistisch Zeitreihen des heutigen oder des zukünftigen Klimas projiziert. Es stehen 10 Simulationen zur Verfügung die unterschiedliche Simulationen für den gewählten Zeitraum liefern, die aber alle statistisch plausibel sind.

Zusammenfassung

Diese Abschlussarbeit baut auf den Ergebnissen der Vorgängerarbeiten von Jansky (2009) und Geiger (2010) auf. Mit Hilfe des in diesen Arbeiten entwickelten Korrekturverfahrens für projizierte Niederschläge sollten weitere hydrologische Kenngrößen optimiert werden. Zunächst wurde das Korrekturverfahren für die mit WETTREG projizierten Niederschlagsdaten von 2001 bis 2100 angewendet. Wie von Geiger (2010) für die Daten der Gegenwart beschrieben, wurden die Extrema und die Mehrjährigkeiten nach der Optimierung auch für die Zukunft (2001-2100) deutlich plausibler dargestellt. Mit diesen plausibleren Niederschlagsdaten wurden nun Grundwasserstände für den Zukunftszeitraum von 2001 bis 2100 projiziert. Dazu wurden vier Grundwassermessstationen ausgewählt und die Daten aus dem vergangenen Zeitraum 1971 bis 2000 untersucht. Die Korrelationsanalyse zwischen den einzelnen Ganglinien hat sehr gute Korrelationen aufgezeigt. Im nächsten Schritt wurden die Veränderungen der Grundwasserstände mit den Schwankungen der klimatischen Wasserbilanz verglichen. Auch hier wurden gute Korrelationen ausgemacht. Um diese hervorzuheben und genau zu bestimmen, musste die Kurve der klimatischen Wasserbilanz mit der Bildung von gleitenden Mittelwerten geglättet werden. Des Weiteren musste die Kurve der Grundwasserstände auf Grund einer bestehenden Lag-Korrelation um sechs Monate verschoben werden. Folgend wurde mittels einer Regressionsanalyse der Zusammenhang von klimatischer Wasserbilanz und Grundwasserständen in einer mathematischen Gleichung ausgedrückt, mit der es möglich ist, zukünftige Grundwasserstände abzuschätzen. Im letzten Schritt wurden projizierte Daten der klimatischen Wasserbilanz in die Regressionsgleichung eingesetzt und ein Trend für zukünftige Grundwasserstände der Jahre 2001 bis 2100 bestimmt. Dazu wurden die Daten der klimatischen Wasserbilanz sowohl aus unkorrigierten als auch aus den korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten und den Daten der Evapotranspiration ermittelt, verwendet und verglichen. Beide projizierten Ganglinien zeigen sinkende Grundwasserstände für den betrachteten Zeitraum.

Abstract

This thesis paper is based on the results of the earlier thesis papers of Jansky (2009) and Geiger (2010). In their work the authors developed a correction method for projected precipitation data. The corrected precipitation data shall be used to optimize further hydrologic parameters in modelling.

First of all the correction method was applied on the projected precipitation data for the years 2001 to 2100. As Geiger (2010) found out and described for present-day climate, the optimized precipitation data show more distinctive extremes and multiannual events also for

future climate. This more reasonable precipitation data shall be used to create projected data of groundwater levels of the years 2001 to 2100. To reach this goal the first step was to analyse the groundwater level data of four selected measuring stations of the time period 1971 to 2000. The result of the analysis showed a good correlation between these four stations. The second step was to compare the groundwater-level data with the data of the climatic water balance. Here good correlations were also found, even though some further operations had to be done, such as creating moving averages to make them visible. Furthermore the graph of the groundwater levels had to be moved back six months because of an existing lag-correlation. In a following analysis of regression a formula was determined that describes the mathematic relation between the groundwater level data and the climatic water balance. By inserting the predicted values of the climatic water balance, the formula is suitable to estimate future groundwater levels. The last step was to apply the formula to assess the groundwater-level values for the years 2001 to 2100. The climatic water balance data were created with corrected and original WETTREG-data. Both created graphs show decreasing groundwater levels.

1 Einleitung

Wasser ist die Grundlage allen Lebens. Es ist Lebensraum, Nährstoff, Nährstoffträger, Pufferelement in verschiedenster Weise und vieles mehr. Der globale Wasserkreislauf transportiert und verteilt das Wasser über Meeresströmungen und die Feuchtigkeit in der Luft in der ganzen Welt. Dieser Wasserkreislauf wird von vielen meteorologischen Phänomenen beeinflusst. Dazu gehört unter anderem die Struktur der globalen atmosphärischen Zirkulation. Sie wird begleitet von einigen Faktoren, die Einfluss auf regionale klimatische Verhältnisse nehmen. Die Nordatlantische Oszillation (NAO) ist einer dieser Einflüsse. Sie wirkt sich auf das Wetter und die klimatischen Verhältnisse in Europa und damit auch auf Hessen aus. Für die Menschen von großer Bedeutung sind besonders die Auswirkungen auf den Niederschlag und daraus folgend auch auf das Grundwasser. Ist der Grundwasserstand zu niedrig, können Landwirte mit ihren Pumpen das Wasser nicht mehr erreichen. Auch Wälder und sonstige Pflanzen können es nicht nutzen. Es kann sogar zu Setzschäden an Gebäuden kommen. Ist der Grundwasserstand jedoch zu hoch drückt sich das Wasser zum einen durch das Mauerwerk von Gebäuden und setzt die Keller unter Wasser und zum anderen werden Flächen, die z.B. landwirtschaftlich genutzt werden, vernässt und überflutet. Besonders in Gebieten, in denen die Grundwasseroberfläche keinen großen Abstand, d.h. weniger als circa fünf Meter zur Geländeoberfläche hat, wirken sich die Schwankungen der Grundwasserstände stark aus und sind von großer Bedeutung.

Aus diesem Grund ist es wichtig und sinnvoll, Grundwasserstände zu messen, wenn möglich für die Zukunft zu projizieren und diese Projektionen stetig mit neuen Erkenntnissen zu verbessern.

1.1 Motivation

Das anfängliche Grundproblem war, dass das regionale Klimamodell WETTREG die Niederschlagsmaxima und –minima sowie die Mehrjährigkeit nicht ausreichend gut darstellt. In der Arbeit von Jansky (2009) wurde untersucht, ob sich der NAO-Index dazu eignet, die oben genannten Ungenauigkeiten zu verringern. Dazu wurde untersucht, ob ausgewählte, beobachtete Niederschlagsdatenreihen mit NAO-Index-Daten korrelieren. Als Ergebnis wurde eine Korrelation beim Vergleich des Mittelwertes über ganz Hessen für einen Mittelungszeitraum von mehreren Monaten festgestellt. In der Folgearbeit von Geiger (2010) wurde eine Formel zur Aufprägung der NAO-Indices auf die mit WETTREG simulierten Niederschlagsdaten entwickelt.

Ein erstes Ziel dieser Arbeit ist, die gewonnenen Erkenntnisse bzw. die Formel von Geiger (2010) auf die mit WETTREG simulierten Daten des Zukunftszeitraumes der Jahre 2001 bis 2100 anzuwenden, die Ergebnisse zu beschreiben, zu interpretieren, zu bewerten und in den

Gesamtzusammenhang einzuordnen. Dies kann dann wiederum als Grundlage für weitere Untersuchungen und Anwendungen dienen.

In einer vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Arbeit zur „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ (HLUG et al., 2010) wurde unter anderem versucht, auf Grundlage von hydrologischen Parametern und verschiedenen Klimamodellen, darunter auch WETTREG, die zukünftige Entwicklung der Grundwasserneubildung zu projizieren. Es gibt einige globale sowie einige regionale Klimamodelle, die kombinierbar sind. Außerdem gibt es die SRES-Szenarien des Weltklimarates, auf deren Grundlage Projektionen berechnet werden. Dies bedeutet, es gibt sehr viele mögliche Modellketten; zu viele, um sie alle durchzurechnen und einzubeziehen. Da nur ein Teil aller möglichen Klimamodellkombinationen ausgewertet wurde und die Ergebnisse sehr variabel sind, ließen sich jedoch nur vage Projektionen erstellen. Zukünftige Forschungen sollen laut dem Bericht den Kenntnisstand erweitern (HLUG et al., 2010).

Dies ist das zweite Ziel dieser Arbeit. Die oben beschriebenen verbesserten simulierten Niederschlagsdaten aus WETTREG sollen genutzt werden, um hydrologische Kenngrößen zu optimieren. Präziser formuliert, sollen in dieser Arbeit die neuen Niederschlagsdaten verwendet werden, um die mögliche Entwicklung ausgewählter Grundwasserstände möglichst realitätsnah zu projizieren.

Diese Arbeit ist die dritte Abschlussarbeit, die sich mit dieser Thematik befasst. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen die Erkenntnisse aus den Vorgängerarbeiten von Jansky (2009) und Geiger (2010) anwenden, interpretieren und in weitergehenden Untersuchungen nutzen.

1.2 Wissenschaftliche Grundlagen

1.2.1 Globale Zirkulation

Der eigentliche Antrieb atmosphärischer Zirkulation ist die Sonne bzw. die Energie, die sie der Erde und der Erdatmosphäre zuführt. Da die Erde annähernd rund ist, werden die verschiedenen Regionen unterschiedlich stark bestrahlt. Den niedrigen Breiten (Tropen) wird mehr Energie zugeführt als den höheren Breiten (z.B. in Mitteleuropa). Des Weiteren führen unregelmäßige Land- bzw. Wasserflächen sowie topographische Gegebenheiten zu unterschiedlichen Energieaufnahmen. Beispielsweise ist die Landfläche mit ca. 29 % der Erdoberfläche bedeutend kleiner als die Wasseroberfläche. Wasser kann viel mehr Wärme speichern als fester Boden. Unterschiedliche Böden können in unterschiedlichem Maß Wärme aufnehmen. Diese Unterschiede müssen ausgeglichen werden. Dies geschieht zum größten Teil (ca. 60%) über die atmosphärische Zirkulation, aber auch über die

Meeresströmungen (ca. 40%). Die Meeresströmungen gleichen den meridionalen Temperaturunterschied des Wassers aus (Schlanger, 2003).

Vom Äquator aus gibt es in nördlicher wie in südlicher Richtung je drei Zirkulationszellen, die Hadley-Zelle, die Ferrel-Zelle und die polare Zelle. Der Übergang zwischen Hadley- und Ferrel-Zelle ist geprägt von absinkender Luft, was bedeutet, dass windarme Hochdruckgebiete (subtropischer Hochdruckgürtel) entstehen. Zwischen Ferrel- und polarer Zelle verhält es sich gegenteilig. Aufsteigende Luft erzeugt Tiefdruckgebiete (subpolare Tiefdruckrinne oder Polarfront) und damit starke Winde.

Die Luft strömt in Bodennähe immer von Hochdruckgebieten zu Tiefdruckgebieten, steigt dort auf und strömt in der Höhe wieder zurück in Richtung Hochdruckgebiet. Die Erdrotation bzw. die Coriolis-Kraft lenkt die Winde in der nördlichen Hemisphäre nach rechts ab und in der südlichen nach links. So entstehen beispielsweise die nordöstlichen Passatwinde der Nordhemisphäre oder die in den mittleren Breiten vorherrschenden Westwinde (Häkel, 1999; Malberg, 2002).

1.2.2 Nordatlantische Oszillation

Die nordatlantische Oszillation (NAO) beschreibt Schwankungen der Druckdifferenzen zwischen dem Azorenhoch und dem Islandtief über dem Nordatlantik. Das Azorenhoch ist Teil des oben erwähnten subtropischen Hochdruckgürtels. Das Islandtief bzw. die verschiedenen Tiefdruckgebiete, die als solches bezeichnet werden, gehören zur subpolaren Tiefdruckrinne. Die NAO wirkt sich bedeutend auf das europäische, aber auch auf das nordafrikanische und ostamerikanische Klima aus (Wiki Bildungsserver - Klimawandel, 2011). Besonders in den Wintermonaten prägt die NAO das Wetter in Mitteleuropa. Circa 30 Prozent des europäischen Wetters wird von der NAO bestimmt (Malberg, 2002; Spokes, 2003).

1.2.3 Klima-Szenarien

Im Jahr 2001 stellte der Weltklimarat (IPCC) seinen dritten Wissensstandsbericht vor. Dieser enthält die SRES-Szenarien (IPCC - Nakicenovic, et al., 2000). Sie wurden entwickelt, um mögliche sozioökonomische Entwicklungen und Verläufe darzustellen, mit deren Hilfe man Schlüsse bezüglich der Entwicklung des Klimas bzw. des Klimawandels ziehen kann. Im Jahr 2007 wurde bereits der vierte Sachstandsbericht veröffentlicht, der die bisherigen Kenntnisse aktualisiert und ergänzt, jedoch keine neuen Szenarien definiert (IPCC 2007: Solomon, et al., 2007).

Es gibt 40 verschiedene SRES-Szenarien, die in die vier „Familien“ A1, A2, B1 und B2 eingeteilt sind. Den vier „Familien“ und den darin enthaltenen Szenarien liegen unterschiedliche Annahmen betreffend der ökonomischen, politischen und sozialen Entwicklungen der Welt zugrunde (Welfens, 2008).

Genauer erläutert werden soll hier allerdings nur das in dieser Arbeit verwendete A1B-Szenario.

Die Szenariofamilie A1 legt eine ökonomisch ausgerichtete, globalisierte und homogene Welt zugrunde mit einem raschen Wirtschaftswachstum. Weitere Eigenschaften dieser möglichen Entwicklung sind die Angleichung von regional unterschiedlichen Einkommen und die Annäherung von Regionen und der dazugehörigen Kulturen durch zunehmende Interaktion. Die schnelle Einführung von neueren, effizienteren Technologien ist ebenso kennzeichnend für diese Szenariofamilie wie die Entwicklung der Bevölkerungszahl, welche bis ungefähr Mitte des Jahrhunderts zu- und bis Ende des Jahrhunderts wieder abnimmt (Wiki Bildungsserver - Klimawandel, 2011).

Die oben beschriebene Szenariofamilie teilt sich in die drei Untergruppen A1FI, A1T und A1B, die sich in ihrer energiewirtschaftlichen Ausrichtung unterscheiden.

Die Untergruppe A1B beschreibt eine ausgewogene, d.h. fossile und regenerative Energien im gleichen Maße nutzende, Entwicklung, bei der keine Abhängigkeit von einer einzelnen Energiequelle besteht (Deutscher Wetterdienst, 2011).

1.2.4 Verdunstung

Unter Verdunstung versteht man den Übergang von flüssigem Wasser in die Gasphase. Die Verdunstungsmenge hängt von der Wasser- und der Umgebungstemperatur sowie der bestehenden Wassersättigung der Luft und auch der Beschaffenheit des Untergrundes ab. Sie geht zunächst als Verlustgröße in die Wasserbilanz des Bodens ein. Sie macht den Wassertransport über die Luft erst möglich und stellt somit ein wichtiges Glied im weltweiten Wasserkreislauf und die Grundlage für den Niederschlag dar. Man unterscheidet die Verdunstung in Evaporation und Transpiration. Die Evaporation beschreibt alle Verdunstungsvorgänge aus allen feuchten Flächen und Böden, sowie aus Seen, Meeren und anderen mit der Atmosphäre in Kontakt stehenden Wasserkörpern. Die Transpiration hingegen beschreibt die Wasserabgabe aus Pflanzen. Über die Spaltöffnungen der Blätter geben sie Wasser frei, welches verdunstet und als Wasserdampf der Atmosphäre zugeführt wird. Zusammen nennt man die beiden Vorgänge Evapotranspiration oder auch Gesamtverdunstung. Die Evapotranspiration wird unterschieden in die potentielle Verdunstung, also jene mit maximal möglicher Verdunstungsmenge, und die tatsächliche

Verdunstung, also die unter den örtlichen Gegebenheiten verdunstete Wassermenge (Hölting & Coldewey, 2009).

Physikalisch betrachtet, werden bei dem Vorgang der Verdunstung die Wassermoleküle durch Energiezufuhr in Form von Wärme so stark in Bewegung gesetzt, dass sie aus dem Molekülverbund gerissen werden, also die Wasseroberfläche durchbrechen und der Atmosphäre zugeführt werden (Mattheß & Ubell, 2003).

Für die quantitative Messung der Evapotranspiration gibt es verschiedene praktische und theoretische Ansätze. Zu den praktischen Ansätzen gehört beispielweise die Messung mittels Lysimeter. Dabei wird in mit Boden befüllten Behältern das durchsickernde Wasser und der Gesamtwasserhaushalt bestimmt. Die Differenz der gesamten enthaltenen Wassermenge und des durchsickernden Wassers ergibt dann die Evapotranspiration.

Bei den unterschiedlichen theoretischen Ansätzen wird versucht, über verschiedene Klimadaten wie Luftdruck und -temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte etc. rechnerisch die Evapotranspiration näherungsweise zu bestimmen. Alle Mess- oder Rechenverfahren haben gemein, dass sie nur näherungsweise für bestimmte Orte und Zeiträume eine Abschätzung liefern können. Es ist also sehr aufwendig, die theoretisch bestimmten Werte zu kontrollieren (Hölting & Coldewey, 2009).

Die Ermittlung der Grasreferenzverdunstung hat sich dennoch als internationaler Standard zur Berechnung der potentiellen Verdunstungshöhe durchgesetzt. Die Grundlage ist das Modell von Penman und Monteith (Mattheß & Ubell, 2003). Hierbei werden sowohl verschiedene Klimadaten eingerechnet als auch die Verdunstungswiderstände von Pflanzen und Böden sowie die Geländehöhe. Die Klimadaten, die sich aus Lufttemperatur und Globalstrahlung zusammensetzen, können von Wetterstationen bezogen werden. Als Verdunstungswiderstand der Pflanzen wird derjenige von 12 cm hohem Gras mit unbegrenzt zur Verfügung stehendem Wasser verwendet (Mattheß & Ubell, 2003).

1.2.5 Niederschlag

Niederschlag kann in Form von Regen, Schnee, Hagel, Graupel, Tau, Nebelfrost und Reif auftreten. Aufgrund der geringen Niederschlagsmengen und des seltenen Vorkommens können die fünf letztgenannten Niederschlagsformen in dieser Arbeit vernachlässigt werden. Als Teil des globalen Wasserkreislaufes trägt der Niederschlag zur Verteilung des Wassers auf der Erde bei. Er beeinflusst maßgeblich die Grundwassermenge und damit die Grundwasserstände.

Wasser verdunstet, d.h. es wird gasförmig und wird so von der Atmosphäre aufgenommen. Zur Kondensation kommt es, wenn der Taupunkt erreicht wird, d.h. wenn die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Dies tritt ein aufgrund von starker Verdunstung und Änderungen

von Luftdruck und Temperatur, da der Taupunkt von diesen Faktoren abhängt. Ist der Taupunkt erreicht, kondensiert der Wasserdampf an in der Luft vorhandenen Aerosolen und Partikeln. Sie dienen als sogenannte Kondensationskerne. Diese können feine Salz- und Mineralienpartikeln, vulkanischer Staub oder Ähnliches sein. Topographische und erdoberflächenspezifische Eigenschaften nehmen starken Einfluss auf Ort und Menge des Niederschlages. Des Weiteren hängt der Niederschlag von verschiedensten atmosphärischen Einflüssen wie beispielsweise der NAO ab (Mattheß & Ubell, 2003).

1.2.6 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz, folgend als KWB bezeichnet, beschreibt die Differenz aus der Niederschlagshöhe und der potentiellen Evapotranspiration. Sie sagt aus, ob dem Boden mehr Wasser zugeführt wird (positive Werte) oder mehr Wasser abgeleitet wird (negative Werte). Im Normalfall gibt es in Mitteleuropa jährlich eine Phase der Wasseranreicherung, in der Rücklagen gebildet werden, und eine Phase der Rücklagenzehrung, allerdings kommt es durchaus vor, dass es örtlich mehrere Phasenwechsel gibt. Wird in der Anreicherungsphase die Feldkapazität erreicht, d.h. kann kein Wasser mehr gespeichert werden, sickert das überschüssige Wasser ins Grundwasser. Es kommt zur Grundwasserneubildung (Hölting & Coldewey, 2009; Mull & Holländer, 2002; Mattheß & Ubell, 2003).

1.2.7 Grundwasser

Grundwasser ist Teil des globalen Wasserkreislaufes. Es steigt und sinkt in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen, aber auch in vielen Gebieten zunehmend von anthropogenen Einflüssen (Mull & Holländer, 2002). Dies deutet bereits die Abhängigkeit des Menschen vom Grundwasser und dessen Bedeutung für den Menschen an. Städte wurden z.B. oft so angelegt, dass hochgelegene Grundwasservorkommen leicht zu erreichen waren (Hölting & Coldewey, 2009). Die Bewässerung von Agrarflächen sowie die Trinkwasserversorgung wurden und werden häufig durch Grundwasservorkommen gesichert und gewährleistet. Die Grundwasserhöhe nimmt heutzutage auch auf Bauvorhaben und Flächennutzungspläne großen Einfluss (Mull & Holländer, 2002).

Die Definition des Begriffs Grundwasser wurde in der DIN 4049 festgehalten (DIN 4049-1, 1992; DIN 4049-2, 1990; DIN 4049-3, 1994). Sie besagt: „Grundwasser ist unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird. Grundwasser fließt außerdem, wenn Gefälle vorhanden ist“ (Hölting & Coldewey, 2009).

Den Boden teilt man, bezogen auf Grundwasservorkommen, zunächst grob in drei Schichten ein. Die oberste Schicht, deren obere Grenze die Erdoberfläche ist, nennt man wasserungesättigte Zone oder auch Grundwasserüberdeckung. Sie führt bzw. speichert das Grundwasser nicht im eigentlichen Sinn, sondern ist im Grunde nur eine Sickerschicht, natürlich jedoch mit vielen weiteren wichtigen Eigenschaften, wie beispielsweise der Pufferwirkung. Die wasserungesättigte Zone bedeckt die wassergesättigte Zone. Der Übergang zwischen der wasserungesättigten und der wassergesättigten Zone wird auch Kapillarraum genannt. Im Kapillarraum nimmt die Wassersättigung mit der Tiefe zu. Die Grundwasseroberfläche liegt innerhalb dieser Grenzschrift, da der Übergang fließend ist. Das Wasser wird über die Kapillaren des Gesteins zu der unterhalb der Grundwasseroberfläche liegenden wassergesättigten Zone geleitet. Grundwasserleiter sind sehr gut durchlässige Bereiche der wassergesättigten Zone, die Wasser weiterleiten können und die ausreichende Wassermengen z.B. für einen Brunnen liefern können. Die dritte erwähnte Zone ist eine weitestgehend wasserundurchlässige Krustenschicht. Sie bildet die Untergrenze der wassergesättigten Zone. In welchen Tiefen diese Schicht beginnt, ist unterschiedlich und hängt vom geologischen Bau ab (Mattheß & Ubell, 2003).

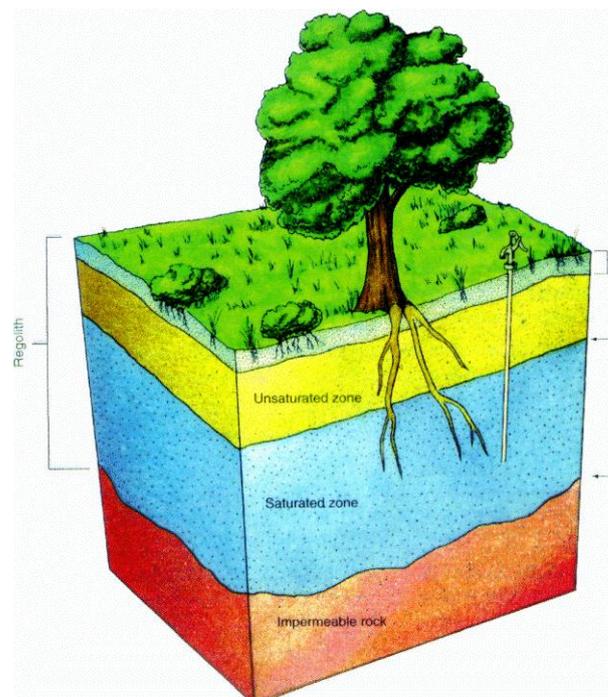


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Grundwasserschichten

Quelle: http://www.geo.tufreiberg.de/hydro/pr/wassererf%FCIlte_Zonen_im_Boden.GIF

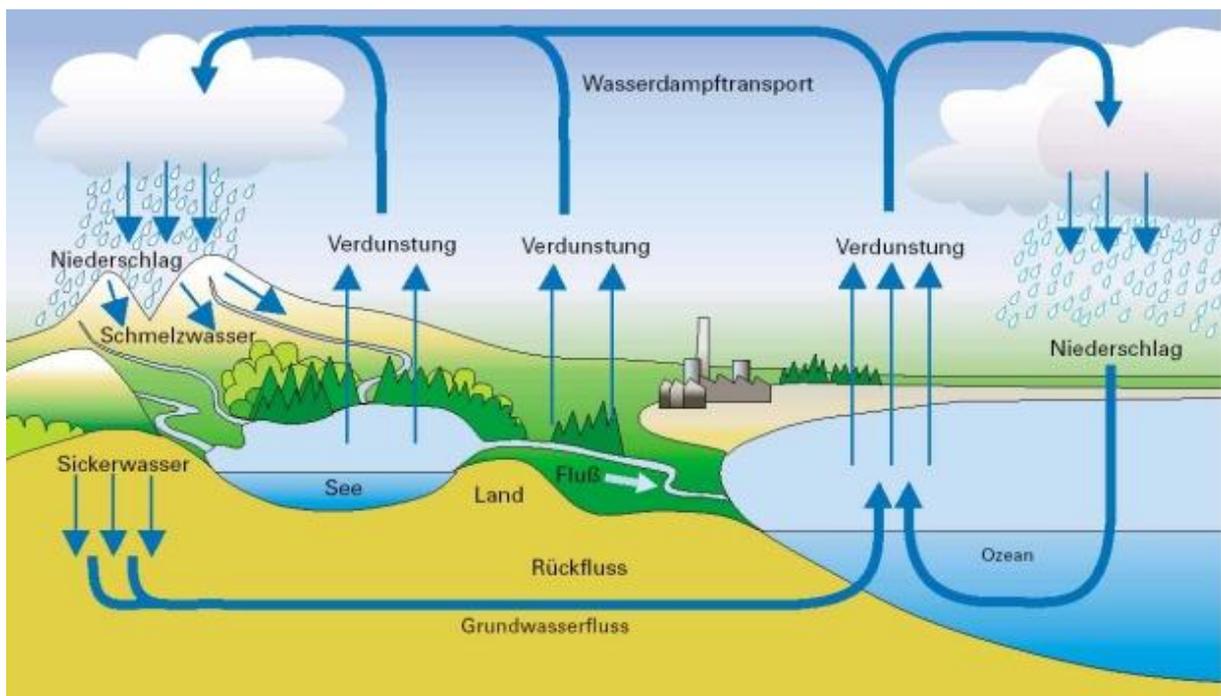


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Wasserkreislaufes
 Quelle: Wasserwirtschaftsverwaltung Rheinland-Pfalz
<http://www.wasser.rlp.de/servlet/is/2032/>

1.2.8 Hessisches Ried

Zwischen Rhein und Odenwald gelegen, ist das Hessische Ried der hessische Teil der Rheinebene. Im Norden erstreckt sich das Gebiet bis Darmstadt und Groß-Gerau, im Süden bis Lampertheim. Das ehemals sehr sumpfige Gebiet wurde erst mit dem Beginn der Rheinregulierung, das heißt beispielsweise der Begradigung im 19. Jahrhundert, nutzbar gemacht. Besonders stark wurde und wird es bis heute landwirtschaftlich genutzt. Verschiedene Gemüsesorten können in dem milden Klima gut angebaut werden, aber auch Tabak. Neben der immer noch starken agrarwirtschaftlichen Nutzung ist das Gebiet östlich des Rheins heutzutage ein stark besiedelter Wirtschaftsstandort. Der Bedarf an Siedlungs- und daraus resultierend der Bedarf an Naherholungsflächen steigt weiter. Diese Entwicklung mit unterschiedlichen Nutzungsformen hat zur Folge, dass Konflikte zwischen den Interessengruppen bezüglich der Landnutzung entstehen.

Die Grundwasservorkommen im Hessischen Ried gehören zu den größten in Hessen. Sie spielen also einerseits eine bedeutende Rolle bei der Wasserversorgung in Hessen, andererseits wirkt sich die Grundwasserhöhe, wie in der Einleitung beschrieben, bedeutend aus. In den siebziger Jahren z.B. sind nach einer mehrjährigen Trockenperiode und der daraus resultierenden intensiven Grundwassernutzung die Pegel um mehrere Meter gesunken, was zu Gebäudeschäden geführt hat. Der umgekehrte Fall trat rund 20 Jahre später auf und dauert bis heute an. Während der Trockenphase wurden viele Siedlungen in

Gebieten mit normalerweise höherem Grundwasserstand gebaut. Nun hat sich aufgrund der klimatischen Gegebenheiten der Grundwasserstand erholt, was zur Folge hat, dass Wasser in die Keller dringt. Es findet ein wiederkehrender Wechsel zwischen absinkenden und ansteigenden Grundwasserpegeln im Hessischen Ried statt (HMUELF, et al., 2011; Regierungspräsidium Darmstadt, 2011).

Die Beispiele verdeutlichen, dass eine Überwachung der Grundwasserstände wichtig ist. Mit 346 Landesmessstellen und 1953 Messstellen von den Betreibern der Wasserwerke, Deponien etc. wird dies in der Rheinebene getan (HLUG, 2011).

1.3 Erkenntnisse aus Vorgängerarbeiten

Bei allen vorgenommenen Untersuchungen wurden hier Vergangenheitsdaten aus dem Zeitraum 1971 bis 2000 verwendet.

1.3.1 Jansky (2009)

In der Arbeit von Jansky (2009) wurde untersucht, inwieweit der NAO-Index mit hessischen Klimadaten der Jahre von 1971 bis 2000 korreliert. Dazu wurden Niederschlags-, Verdunstungs- und KWB-Daten der beiden Stationen aus Beerfelden und Mannheim (s. Abb.3) sowie ein Mittelwert über ganz Hessen über unterschiedliche Zeiträume (Winter- und Sommerhalbjahr; Quartale; Jahreszeiten) mit den Verläufen der NAO-Indices verglichen. Da die Variabilität der NAO im Winter am stärksten ist, wurde der Fokus bei der Untersuchung auf die Winterzeiträume (DJF, Q1, hWH) gelegt.

Dabei wurde herausgefunden, dass bei den Einzelstationen nur sehr geringe Korrelationen mit dem Verlauf des NAO-Index auftreten. Beim Hessenmittel hingegen ist eine deutliche Korrelation mit dem Verlauf des NAO-Index erkennbar. Dies liegt laut Jansky (2009) daran, dass einzelne Niederschlagsereignisse, die lokal auftreten und sich stark auf Messungen einzelner Stationen auswirken, weggemittelt werden. Die Untersuchung der Niederschlagshessenmittel über einen Monat und, aufsummiert über das hydrologische Winterhalbjahr, das erste Quartal sowie den meteorologischen Winter, hat ergeben, dass die Summe über mehrere Monate (z.B. hydrologisches Winterhalbjahr) stärker mit dem NAO-Index korreliert als das Niederschlagshessenmittel über einen Monat. Dies liegt laut Jansky (2009) daran, dass gelegentliche, kurzzeitige Störeffekte, die auf kleine Werte Einfluss nehmen, bei der Summe über mehrere Monate weggemittelt werden.

Nach der Betrachtung aller Auswertungsergebnisse ist man zu dem Schluss gekommen, dass der NAO-Index als Optimierungsfaktor für hydrologische Kenngrößen, beispielsweise den Niederschlag aus dem regionalen Klimamodell WETTREG, geeignet ist (Jansky, 2009).

1.3.2 Geiger (2010)

Aufbauend auf der Arbeit von Jansky (2009) wurde in der Arbeit von Geiger (2010) eine Aufprägungsformel entwickelt, die es ermöglicht, die simulierten WETTREG-Niederschlagsdaten mittels NAO-Index zu optimieren. Das Ergebnis sind die folgenden beiden Formeln, die sich in einem zeitraumsspezifischen (bezogen auf die WETTREG-Daten) Skalierungsfaktor unterscheiden.

Für die WETTREG-Niederschlagsdaten des hydrologischen Winterhalbjahres gilt:

$$RR_{NAO} = \overline{RR} + 0,18 * (RR_i * NAO_i)$$

Für die WETTREG-Niederschlagsdaten des ersten Quartals und des meteorologischen Winters gilt

$$RR_{NAO} = \overline{RR} + 0,36 * (RR_i * NAO_i)$$

dabei ist:

RR_{NAO} : korrigierter Niederschlag

\overline{RR} : langjähriges Niederschlagsmittel aus WETTREG-Daten

RR_i : Niederschlag pro Jahr i aus den WETTREG-Daten

0,18; 0,36: Skalierungsfaktoren

NAO_i : NAO-Index pro Jahr i

Der Vergleich der simulierten Niederschlagsdaten aus WETTREG und der gemessenen Niederschlagsdaten des DWD bezüglich des Mittelwerts, der Standardabweichung, der Extrema und der Mehrjährigkeit hat ergeben, dass die Mittelwerte, der simulierten Daten, in allen drei verglichenen Zeiträumen (hWH, DJF, Q1) nur sehr gering von den beobachteten Mittelwerten abweichen. Die Standardabweichung und die Extrema fallen bei den simulierten Daten sehr viel geringer aus als bei den gemessenen. Auch die Mehrjährigkeit wird nicht ausreichend abgebildet.

Die Untersuchung und der Vergleich der verschiedenen Modell-NAO-Datenreihen des Modells ECHAM5 mit den NAO-Datenreihen der Beobachtungsdaten der CRU bezüglich der Standardabweichung, der Extrema und der Mehrjährigkeit haben ergeben, dass die größten Übereinstimmungen mit dem NAO-Gibraltar-Index des ersten Quartals bestehen.

Die Gegenüberstellung der gemessenen DWD-Niederschlagsdaten und der simulierten Niederschlagsdaten, die mittels Aufprägung des NAO-Index verbessert wurden, hat gezeigt, dass sowohl Mehrjährigkeit des Niederschlages als auch Extrema besser abgebildet werden als zuvor. Die Standardabweichung hat sich je nach Zeitraum um das Drei- bis Fünffache erhöht und somit den gemessenen Werten des DWD angenähert. Der Mittelwert hat sich durch die Korrektur nicht verändert (Jansky, 2009; Geiger, 2010).

2 Daten

2.1 Niederschlagsdaten

2.1.1 Gemessene DWD-Niederschlagsdaten

Die gemessenen Niederschlagswerte liegen als monatliche Hessenmittel für den Zeitraum der Jahre 1971 bis 2000 vor. Die Stationsdaten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD). Die Hessenmittel wurden in der Arbeit von N. Jansky (2009) berechnet und daraus übernommen.

2.1.2 Simulierte Niederschlagsdaten aus WETTREG2006

Für die Anwendung der Aufprägungsformel, die den NAO-Index auf die simulierte Niederschlagsdaten aus WETTREG aufprägen kann (Geiger, 2010), wurden die notwendigen WETTREG-Niederschlagsdaten mittels der Software IDP berechnet und ausgegeben.

Für den Zeitraum 2001 bis 2100 wurde über die Flächendarstellung in IDP für jeden benötigten Monat einzeln ein Niederschlagsmittel erstellt, d.h. die Monatssumme aus den Tagesmittelwerten über ganz Hessen für den betrachteten Monat. Die benötigten Monate waren jene des hydrologischen Winterhalbjahres (hWH), des meteorologischen Winters (DJF) und des ersten Quartals (Q1). D.h. es wurden die Monate Januar bis April sowie der November und der Dezember des jeweiligen Vorjahres verwendet (Aus diesem Grund beinhalten die Daten auch die November- und Dezemberwerte des Jahres 2000). Die Antriebsdaten der verwendeten WETTREG-Simulation stammen aus dem globalen Simulationsmodell ECHAM5. Als regionales Simulationsmodell für die Region Hessen wurde eine transient berechnende Wettreg2006-Erweiterung für den Datensatz „HLUGTrans1“ verwendet. Des Weiteren wurde das Zukunftsszenario A1B mit einer Mittelung aller zehn WETTREG-Simulationen ausgewählt. Die Auswahl der Einstellungen erfolgte in Anlehnung an die gewählten Einstellungen der Arbeit von A. Geiger (2010), um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Aus den so gewonnenen Monatsmittelwerten wurden die drei obengenannten Zeiträume hWH, DJF und Q1 zusammengestellt. In den weiteren Schritten wurde für jeden dieser Zeiträume für jedes Jahr die Niederschlagssumme gebildet und daraus der Mittelwert über die gesamten 100 Jahre von 2001 bis 2100. D.h., dass für die drei Zeiträume hWH, DJF und Q1 ein mittlerer Niederschlag über den gesamten betrachteten Zeitraum gebildet wurde. Diese Werte wurden für die Anwendung der Aufprägungsformel benötigt.

Für den Zeitraum von 1971 bis 2000 wurden die Daten von Albert Geiger (2010) übernommen.

2.2 NAO-Daten

Die Luftdruckdaten des Azorenhochs werden an verschiedenen Messstationen in Gibraltar und den Azoren gemessen, die des Islandtiefs in Reykjavik in Island. Die Luftdruckdifferenzen werden entweder aus den Daten des Islandtiefs und den in Gibraltar gemessenen Daten des Azorenhochs ermittelt oder aus den Daten des Islandtiefs und den auf den Azoren gemessenen Daten des Azorenhochs. Daraus ergeben sich der Gibraltar und der Azoren-Index.

Island: Reykjavik (64°07'N, 21°56'W)

64,12 Dezimalgrad Nord

21,93 Dezimalgrad West

Gibraltar (36°08'N, 05°21'W)

36,13 Dezimalgrad Nord

05,35 Dezimalgrad West

Azoren: Ponta Delgada (37°44'N, 25°40'W)

37,73 Dezimalgrad Nord

25,66 Dezimalgrad West

(Geiger, 2010)

Die Luftdruckdaten der beiden Messstationen für das Azorenhoch und der Messstation für das Islandtief, die für die Berechnung des NAO-Index benötigt werden, wurden aus dem Climate Explorer des Königlich Niederländischen Meteorologischen Instituts (KNMI) geladen. Der Climate Explorer ist eine Internetanwendung, die Klimadaten zusammenträgt und für statistische Auswertungen abrufbar macht.

Die Luftdruckdaten auf Meeressniveau (psl) wurden für den Zeitraum von 2000 bis 2100 des globalen Simulationsmodells ECHAM5 im Feld „monthly scenario runs“ für das Szenario SRES A1B abgerufen. Mit den Koordinaten der drei Messstationen als Dezimalzahlen und den folgenden Einstellungen wurden die Datensätze erstellt.

„interpolated“: Zwischen den Gitterpunkten wird interpoliert.

„average“: Der Durchschnitt aus allen Koordinaten wird bestimmt (nur wenn mehrere Koordinaten eingegeben wurden. Hier nicht der Fall).

„everything“: Sowohl Land- als auch Seegitterpunkte werden einbezogen.

Für die Ausgabe der Daten im ASCII-Format wurde hierbei der erste gelistete Lauf 0 gewählt. Dieser entspricht demjenigen, der als Antrieb der Simulation mit WETTREG genutzt wurde. Die Auswahl der Einstellungen erfolgte in Anlehnung an die Arbeit von A. Geiger (2010), um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Auch die Aufbereitung der Daten erfolgte analog zu dem Vorgehen in der Arbeit von A. Geiger (2010). Grundlage der Aufbereitung waren die Daten der drei Messorte Reykjavik, Gibraltar und Ponta Delgada. Für jeden Monat jeden Jahres gibt es einen Luftdruckwert. Zunächst mussten die Druckanomalien für jeden Monat bestimmt werden. Dazu wurde das jeweilige langjährige Monatsmittel von den Luftdruckwerten der einzelnen Monate abgezogen. Hier wurde nicht das langjährige Monatsmittel des betrachteten Zeitraums 2001 bis 2100 verwendet, sondern das langjährige Monatsmittel des Referenzzeitraumes 1971 bis 2000. Diese Werte wurden aus der Arbeit von Geiger (2010) übernommen. Die langjährigen Monatsmittel des Referenzzeitraumes mussten verwendet werden, da das Simulationsmodell ECHAM5 für die Zukunft, mit einigen Szenarien, größer werdende NAO-Indices projiziert. Positive NAO-Indices gehen einher mit Niederschlagsereignissen in Hessen. Das bedeutet möglicherweise für die Zukunft, dass tendenziell mehr Niederschlag fällt. Damit der korrigierte Niederschlag diesen möglichen Trend wiedergibt, müssen die langjährigen Monatsmittel des Referenzzeitraumes benutzt werden. Würde man an dieser Stelle das langjährige Monatsmittel des Zeitraums 2001 bis 2100 verwenden, wäre der Mittelwert der korrigierten Daten gleich dem der unkorrigierten Daten. Folgend wurde für das erste Quartal (Q1) der Mittelwert für jedes Jahr (aus den drei Monaten des Q1), die Standardabweichung und daraus die normierten Druckanomalien berechnet. Der NAO-Index wurde bestimmt, indem von den normierten Druckanomalien der Gibraltardaten die normierten Druckanomalien der Islanddaten abgezogen wurden. Daraus ergibt sich der Gibraltar-Index.

Für die Weiterverwendung zur Aufprägung auf die simulierten WETTREG Niederschlagsdaten wurden nur die NAO-Index Daten des ersten Quartals (Q1) des Gibraltar-Index herangezogen. Aus der Arbeit von A. Geiger (2010) geht hervor, dass sich diese Daten am besten zur Aufprägung eignen.

2.3 Grundwasserdaten

Die Grundwasserdaten stammen von vier über Hessen verteilten Grundwassermessstellen (siehe Abbildung 3):

Tabelle 1 Ausgewählte Grundwassermessstationen und deren Messzeiträume

	Station	Nr.	Messzeitraum	Geländehöhe [m+NN]
1.	Bracht	434028	1970-2010	266,7
2.	Zell	461021	1970-2010	332,39
3.	Burghardsfelden	460029	1970-2010	231,44
4.	Bauschheim	527055	1965-2010	87,97

Diese Stationen wurden ausgewählt, da sie jahreszeitlichen Einflüssen unterliegen, typisch auf Nass- und Trockenperioden reagieren und nicht von Grundwasserentnahmen beeinflusst werden. Nicht zuletzt war der Messzeitraum der Grund für die Auswahl, da er es erlaubt, den Zeitraum über 30 Jahre von 1971 bis 2000 zu betrachten. Die Grundwasserstände werden einmal wöchentlich gemessen. Gemessen wird hierbei der Flurabstand, d.h. der Abstand zwischen Grundwasseroberfläche und Geländeoberfläche. Die Geländehöhe abzüglich des Grundwasserflurabstandes ergibt dann den Grundwasserstand (m+NN). Sowohl Grundwasserstände als auch die Geländehöhen werden in m+NN angegeben. Mit den so ermittelten Werten wurden die Grundwasserganglinien erstellt, die den Verlauf des Grundwasserstandes über mehrere Jahre abbilden. Da man aufgrund der unterschiedlichen Gelände- und Messstellenhöhen die Ganglinien nicht direkt miteinander vergleichen kann, muss man die Veränderungen der Grundwasserstände vergleichen. Zunächst wurden aus den Rohdaten die Mittelwerte jedes Monats von Januar 1971 bis Dezember 2000 ermittelt. Für jede Station wurde nun ein langjähriges Monatsmittel jedes Monats (Januar bis Dezember) über den betrachteten Zeitraum (1971-2000) gebildet und von den jeweiligen Monatswerten abgezogen. Dieser Schritt vermeidet, dass die Jahresgänge der GW-Ganglinien Korrelationen zwischen den Ganglinien und mit der KWB verfälschen. Die so gewonnen Abweichungen vom langjährigen Mittel sind vergleichbar und lassen so eine Korrelationsuntersuchung der Ganglinien der vier Grundwassermessstellen zu. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden mit dem Begriff „Grundwasserganglinien“ die Abweichungen vom Mittelwert bezeichnet.

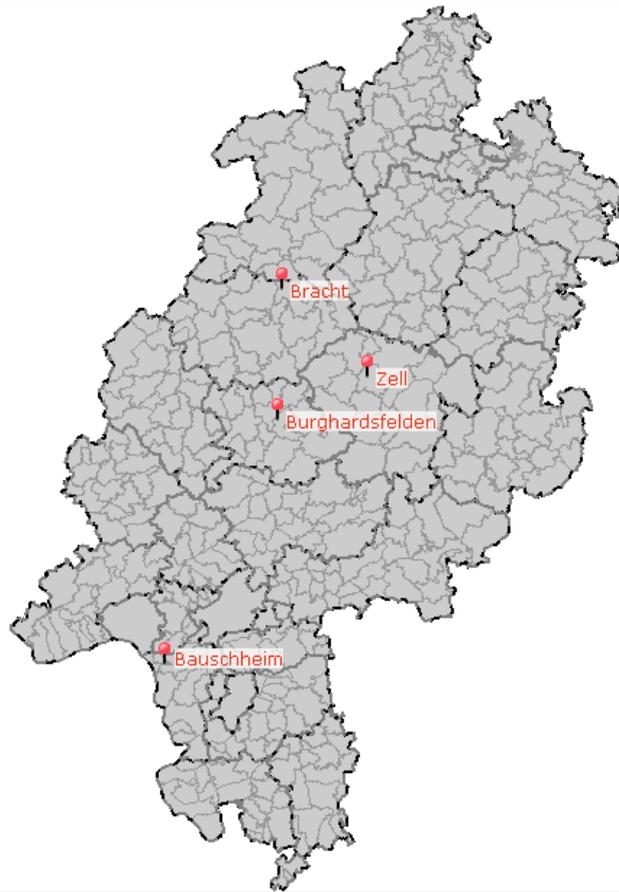


Abbildung 3 Hessenkarte mit den Orten der Grundwassermessstellen
Quelle: <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/>; Hessenviewer
(HLUG, 2009)

2.4 Verdunstungsdaten

Die Verdunstung beschreibt eigentlich nur die Evaporation. Gemeinhin wird jedoch die Evapotranspiration gemeint. Im Folgenden wird der Begriff Verdunstung für die gesamte Evapotranspiration verwendet. Stellvertretend dafür wird hier nach internationalem Standard die Verdunstung über die Formel zur Berechnung der Grasreferenzverdunstung bestimmt.

Die Verdunstungsdaten werden benötigt, um die klimatische Wasserbilanz zu ermitteln. Da die Niederschlagsdaten hier nur als Hessenmittel verwendet werden können, müssen die Verdunstungsdaten auch als Hessenmittel verwendet werden, damit ein sinnvolles Ergebnis zustande kommt.

Folgende sind die in der Software IDP für Hessen gelisteten Klimastationen, an denen die Verdunstung berechnet wird.

Tabelle 2 Liste der Klimastationen für die Verdunstungsbestimmung

	Klimastation
1.	Bad Hersfeld
2.	Beerfelden
3.	Biedenkopf
4.	Dillenburg
5.	Eschwege
6.	Geisenheim
7.	Gießen
8.	Gilserberg
9.	Grebenhain
10.	Hofgeismar
11.	Homberg
12.	Kassel
13.	kl. Feldberg Taunus
14.	Limburg
15.	Melsungen
16.	Neukirchen
17.	Schotten
18.	Sontra
19.	Wahlsburg
20.	Waldems
21.	Waldems-Steinfischbach
22.	Wasserkuppe
23.	Wiesbaden
24.	Bad Wildungen
25.	Willing
26.	Witzenhausen

Die räumliche Verteilung der Stationen ist in Abbildung 4 dargestellt.

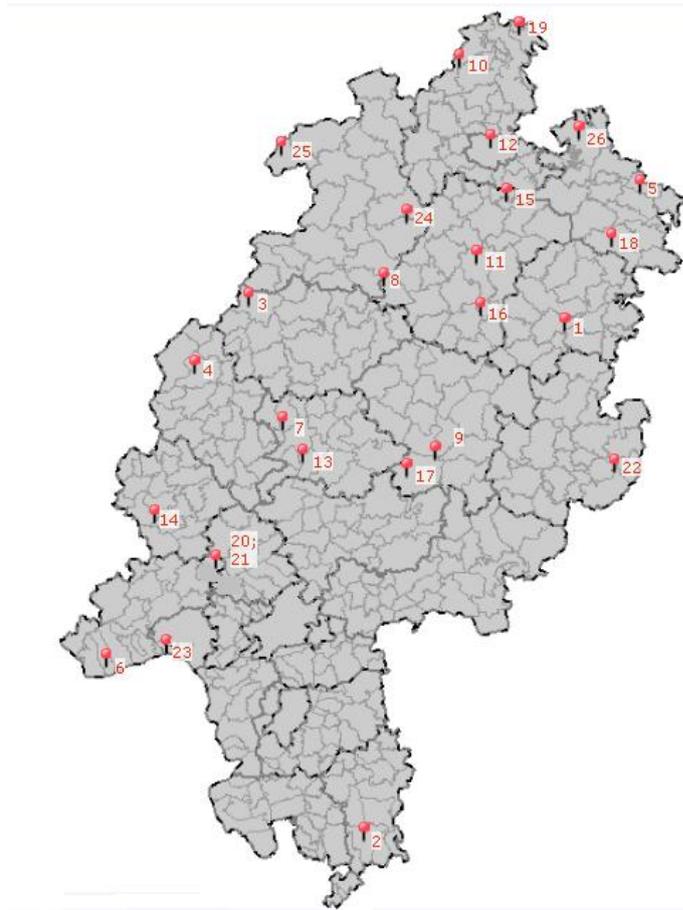


Abbildung 4 Hessenkarte der Klimastationen für die Verdunstungsbestimmung
 Quelle: <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/>; Hessenviewer (HLUG, 2009)

2.4.1 Gemessene Verdunstungsdaten (1971-2000)

Die Daten der Stationen wurden über die ASCII-Ausgabe der Software IDP ausgegeben. Aus dem transienten Datensatz „He_ori_T“ wurden die kontinuierlichen Datenreihen von 1971 bis 2000 ausgegeben. Aus den Tageswerten der Stationen wurde dann ein Monatsmittel über ganz Hessen bestimmt, welches für weitere Berechnungen genutzt werden kann.

2.4.2 Projizierte Verdunstungsdaten (2001-2100)

Auch die projizierten Verdunstungsdaten der Stationen wurden über die ASCII-Ausgabe der Software IDP ausgegeben. Aus dem WETTREG-Datensatz „HLUGTrans1“ wurden die kontinuierlichen Datenreihen von 2001 bis 2100 ausgegeben. Wie auch bei den gemessenen Daten wurden aus den Tageswerten der Stationen Monatsmittel über ganz Hessen bestimmt.

3 Ergebnisse

3.1 Anwendung der Aufprägungsformel

Wie von A. Geiger (2010) vorgeschlagen, wurde für die Aufprägung auf die projizierten Niederschlagsdaten aus WETTREG der NAO-Gibraltar-Index des ersten Quartals (Q1) verwendet. Den Niederschlagsmitteln der drei Zeiträume hWH, DJF und des ersten Quartals (Q1) wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise von A. Geiger (2010) der NAO-Index aufgeprägt.

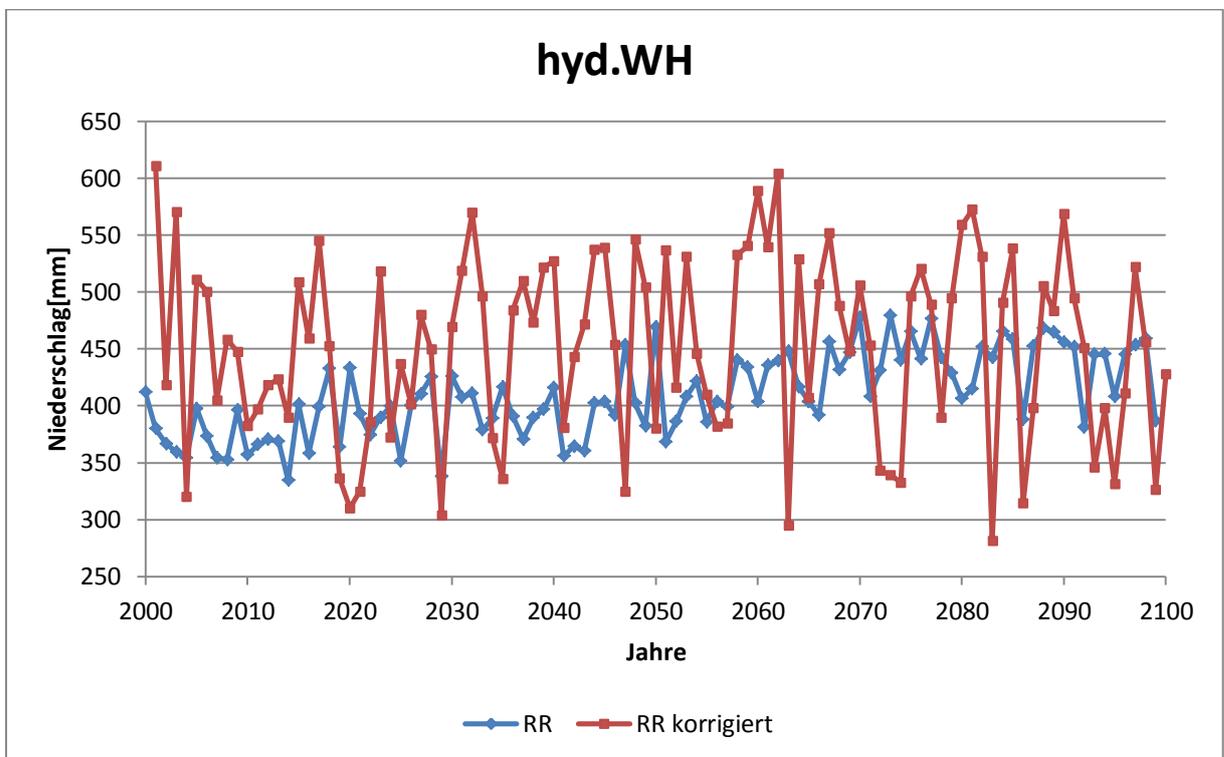


Abbildung 5 WETTREG-Niederschlagsverläufe für das hWH, vor der Aufprägung des NAO-Index (blau) und nach der Aufprägung des NAO-Index (rot).

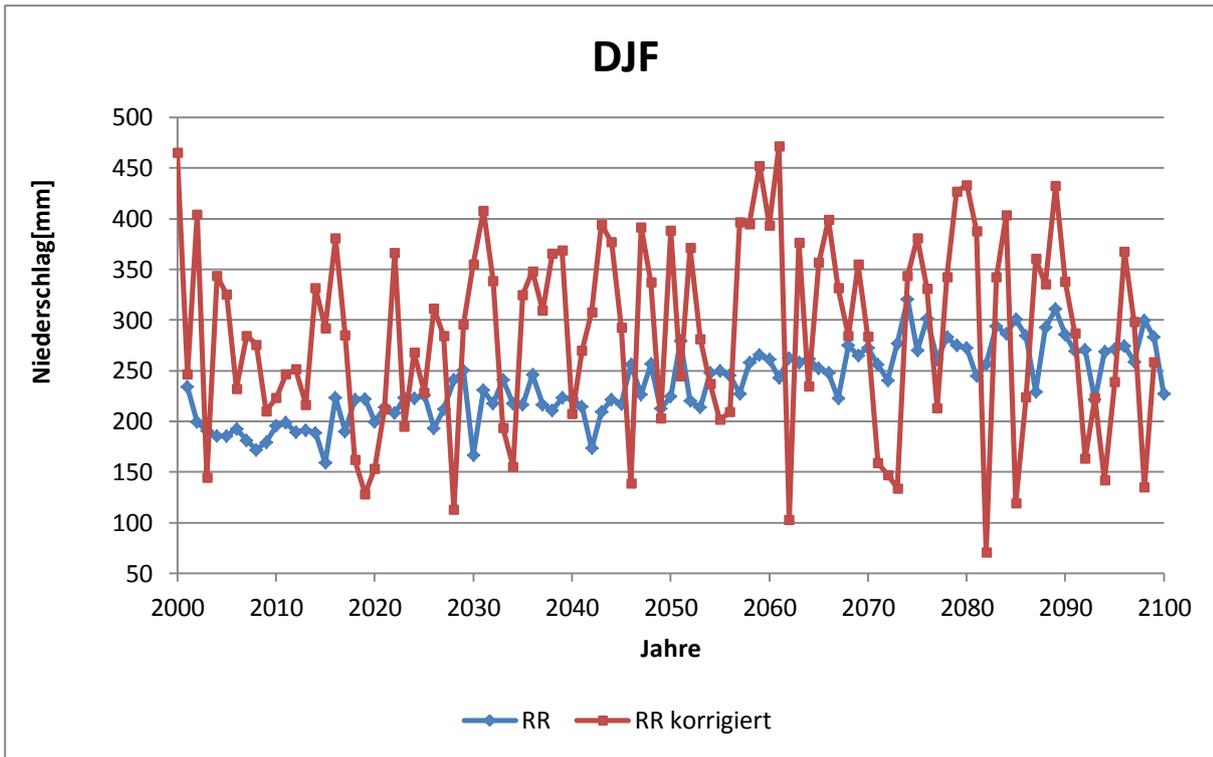


Abbildung 6 WETTREG-Niederschlagsverläufe für das DJF, vor der Aufprägung des NAO-Index (blau) und nach der Aufprägung des NAO-Index (rot).

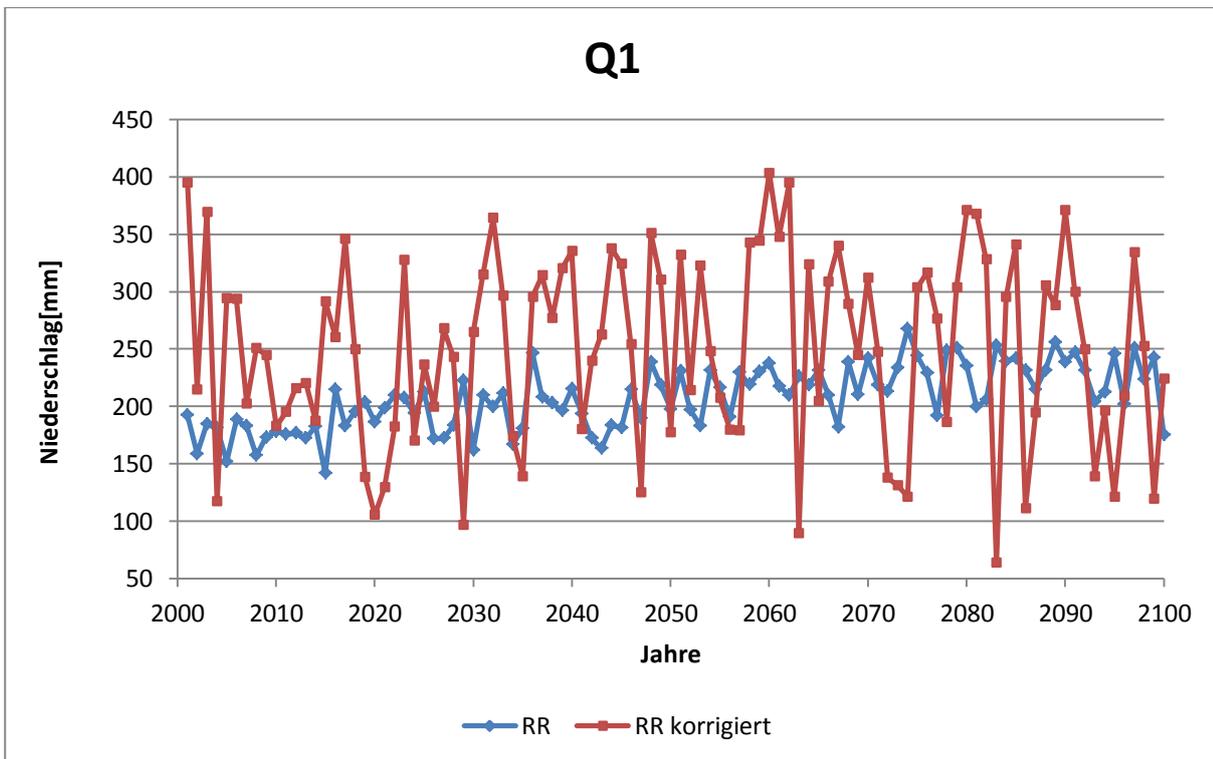


Abbildung 7 WETTREG-Niederschlagsverläufe für das Q1, vor der Aufprägung des NAO-Index (blau) und nach der Aufprägung des NAO-Index (rot).

Die Graphen der obigen Abbildungen 5, 6 und 7 zeigen den mit WETTREG simulierten Niederschlag für die Jahre 2001 bis 2100. Die blauen Kurven bilden die unkorrigierten Niederschläge ab, die roten Kurven bilden die korrigierten Niederschläge ab.

Wie in den beiden Vorgängerarbeiten von Jansky (2009) und Geiger (2010) ausgeführt wurde, war das Ziel der Verbesserung der Niederschlagsimulation eine bessere Darstellung der Extrema und der Mehrjährigkeiten. Dieses Ziel wurde laut Geiger (2010) für die Daten im Referenzzeitraum (1971-2000) erreicht.

Die Aufprägung des NAO-Index für den Zeitraum von 2001 bis 2100 soll nun auch die Niederschlagsprojektionen in Bezug auf die Extrema und die Mehrjährigkeiten verbessern. Der Vergleich der Kurven des korrigierten und des unkorrigierten Niederschlags zeigt, wie zu erwarten war, stärker ausgeprägte Extrema.

Außerdem zeigen die Kurven des korrigierten Niederschlags deutlich höhere Mittelwerte (Tab. 3) als die Kurven des unkorrigierten Niederschlags. Der Grund hierfür ist, dass das globale Klimamodell ECHAM5 mit einigen Szenarien, größer werdende NAO-Indices für die Zukunft (2001-2100), projiziert. Dies steht im Zusammenhang mit mehr und stärkeren Niederschlagsereignissen in Hessen. Dieser mögliche Trend wurde bei der hier durchgeführten Aufprägung berücksichtigt.

Tabelle 3 Mittelwerte des WETTREG-Niederschlags (2001–2100)

[mm]	hWH	DJF	Q1
Mittelwert unkorrigiert	409,50	237,14	207,37
Mittelwert korrigiert	452,96	287,67	251,21

Die in Tabelle 4 aufgeführten Standardabweichungen liegen bei den korrigierten Niederschlagsdaten um das Zwei- bis Dreifache höher als bei den unkorrigierten Niederschlagsdaten.

Tabelle 4 Standardabweichungen des WETTREG- Niederschlags (2001-2100)

[mm]	hWH	DJF	Q1
Standardabweichung unkorrigiert	36,04	35,95	27,30
Standardabweichung korrigiert	80,79	94,66	82,42

Im Vergleich dazu lagen bei den von Geiger (2010) für den Zeitraum 1971 bis 2000 untersuchten Niederschlagsdaten die Standardabweichungen um das Drei- bis Fünffache höher.

Die Streuung um den Mittelwert ist bei den unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten für den Zeitraum 2001 bis 2100 ca. ein Drittel größer als für den Zeitraum 1971 bis 2000. Die Streuung um den Mittelwert bei den korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten liegt im Zeitraum 2001 bis 2100 bei etwas über 80mm (für DJF sogar bei 94,66mm). Im Zeitraum 1971 bis 2000 liegt die Streuung um den Mittelwert für das DJF, das Q1 und das hWH ebenfalls bei etwas über 80mm (Geiger, 2010). Dies zeigt, dass die projizierten WETTREG-Niederschlagsdaten bezüglich der Standardabweichung und damit zusammenhängend auch bezüglich der Extrema für den Zeitraum 2001 bis 2100 weniger stark korrigiert wurden als die des Zeitraums 1971 bis 2000.

Des Weiteren zeigt der Vergleich der Kurven des korrigierten und des unkorrigierten Niederschlags länger andauernde und häufiger vorkommende Mehrjährigkeiten, wie die unten stehende Tabelle 5 zeigt.

Tabelle 5 Mehrjährigkeiten des korrigierten WETTREG-Niederschlags (2001-2100)

Anz. der Jahre der Phase (pos.; neg.)	hWH (Häufigkeit)	DJF (Häufigkeit)	Q1 (Häufigkeit)
2	8	9	10
3	3	5	2
4	1	1	2
5	1	1	1

Im Gegensatz dazu zeigen die unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten keine Mehrjährigkeiten. Laut Definition (Geiger, 2010) müssen die Werte mindestens 50mm über oder unter dem Mittelwert liegen. Dies ist bei den unkorrigierten Niederschlagsdaten nicht der Fall.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Aufprägung des NAO-Index auf die WETTREG-Niederschlagsdaten nach dem Verfahren von Geiger (2010) eine deutlich plausiblere Niederschlagsprojektion, auch für Zukunftszeiträume, bewirkt. Dieser Aussage liegt die Annahme zugrunde, dass auch die für die Zukunft projizierten WETTREG-Niederschlagsdaten die Extrema und die Mehrjährigkeiten nicht ausreichend gut abbilden.

3.2 Untersuchung der Korrelation zwischen den Grundwasserganglinien

Um festzustellen, ob sich die Grundwasserstände bzw. die Ganglinien der Grundwassermessstellen dazu eignen, sie mit Niederschlagsdaten, KWB-Daten oder den NAO-Daten zu vergleichen, müssen zunächst die Grundwasserganglinien auf Korrelationen untersucht werden.

Abbildung 8 zeigt die vier ausgewählten Grundwasserganglinien von 1971 bis 2000 im Vergleich. Schon bei der ersten Betrachtung zeigt sich eine starke Korrelation der Grundwasserganglinien. Betrachtet man jedes Jahr einzeln, erkennt man, dass die Grundwasserstände der vier Messstationen meist nur um wenige Wochen versetzt steigen und fallen. Auch die Mehrjährigkeiten der Stationen stimmen sehr stark überein.

Die in der unten stehenden Tabelle 6 aufgeführten Korrelationskoeffizienten sind vergleichsweise hoch. Diese zeigen noch einmal die deutlichen Korrelationen auf.

Nur die Grundwasserganglinie der Messstation Bauschheim zeigt leichte Abweichungen, die sowohl in der Abbildung 8 mit den Graphen als auch an den geringeren Korrelationskoeffizienten zu sehen sind. Gelegen am nördlichen Ende des hessischen Rieds, ist sie relativ weit von den anderen drei Stationen, die nah beieinander liegen, entfernt (vgl. Abb.3). Dies ist eine mögliche Erklärung für die Abweichungen. Der grundsätzliche Trend spiegelt sich jedoch auch an der Bauschheimer Grundwasserganglinie wieder.

In welchem Ausmaß, d.h. wie viele Zentimeter oder Meter, das Grundwasser steigt oder fällt, ist bei dieser Betrachtung unerheblich, da unterschiedliche Grundwasserkörper vorliegen, die verschieden groß sind und verschiedene Formen haben. D.h., dass z.B. bei gleicher zugeführter Wassermenge der Grundwasserstand nicht zwangsläufig um die gleiche Höhe steigt. Nur der Zeitpunkt bzw. der Zeitraum ist für diese Betrachtung von Bedeutung. Wie man in Abbildung 8 erkennt, reagieren die Grundwasserstände der vier Messstationen zeitlich sehr eng zusammen.

Tabelle 6 Korrelationskoeffizienten zwischen den vier Grundwassermessstationen

	Zell	Burghardsfelden	Bracht	Bauschheim
Zell	x			
Burghardsfelden	0,83	x		
Bracht	0,84	0,75	x	
Bauschheim	0,71	0,65	0,59	x

Aus der obigen Tabelle 6 kann man entnehmen, dass die größten Korrelationen zwischen den drei Grundwasserganglinien der Stationen Zell, Burghardsfelden und Bracht bestehen.

Ein Grund dafür liegt vermutlich in der relativ geringen Entfernung der Stationen voneinander. Die Korrelation der Grundwasserganglinie von Bauschheim mit den drei anderen ist mit den Werten 0,71; 0,65 und 0,59, etwas geringer, allerdings ausreichend groß, um die Aussage zu treffen, dass der Trend der Ganglinien auch von der Bauschheimer Grundwasserganglinie wiedergegeben wird. Aus der Untersuchung der Korrelationen zwischen den Grundwasserganglinien geht hervor, dass die vier hier betrachteten Ganglinien gut miteinander korrelieren, sodass weitere Untersuchungen vorgenommen werden können. Um die Signifikanz der Korrelationen zu prüfen, wurde eine T-Statistik (Lohninger, 2010) angewandt. Danach wird nach folgender Formel eine Prüfgröße ermittelt, die mit einem T-Wert verglichen wird. Ist die Prüfgröße größer als der T-Wert, ist der Korrelationskoeffizient als signifikant einzustufen. Dabei wurde von einer fünfprozentigen Fehlerwahrscheinlichkeit ausgegangen.

$$t = \frac{|r|}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}}$$

Dabei ist:

| r | : Korrelationskoeffizient

n-2 : Freiheitsgrade (hier 358 Freiheitsgrade)

Tabelle 7 Prüfgrößen für die Signifikanzprüfung

	Zell	Burghardsfelden	Bracht	Bauschheim
Zell	x			
Burghardsfelden	23,97	x		
Bracht	24,96	18,05	x	
Bauschheim	15,99	13,79	11,83	x

Vergleicht man die Prüfgrößen aus Tabelle 7 mit dem aus der Tabelle der T-Verteilung ermittelten T-Wert von 1,648, erkennt man schnell, dass die Korrelationskoeffizienten deutlich signifikant sind. Dies geht damit einher, dass die Korrelationen schon in der Abbildung 8 deutlich zu erkennen sind, was eine hohe Signifikanz der Korrelationskoeffizienten untermauert.

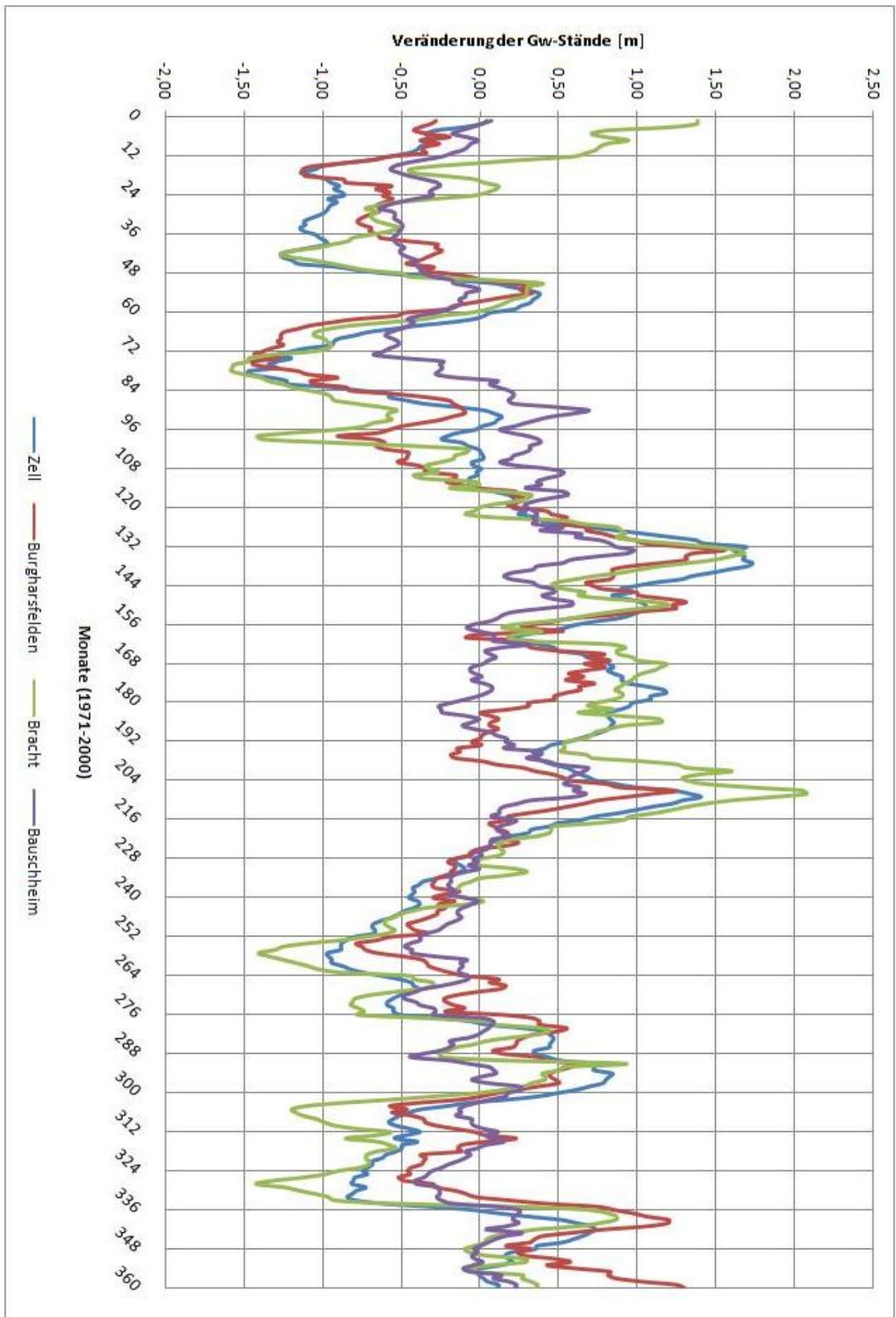


Abbildung 8 Ganglinien der Grundwasserstände der Grundwassermessstationen (1971-2000)

3.3 Untersuchung der Korrelation der Grundwasserstände mit der KWB (1971-2000)

Um das Ziel dieser Arbeit, zukünftige Grundwasserstände zu projizieren, erreichen zu können, muss zunächst festgestellt werden, inwieweit die Grundwasserganglinien mit der klimatischen Wasserbilanz korrelieren. Stellt man hierbei keine Korrelation fest, kann man keine sinnvolle mathematische Beziehung herstellen und somit die Grundwasserstände nicht projizieren.

Im ersten Schritt wurden die Monatswerte der KWB der 30 Jahre zwischen 1971 und 2000 mit den Monatswerten der Grundwasserstände desselben Zeitraums verglichen. Der Vergleich bezieht sich auf die Abweichungen vom langjährigen Monatsmittel, sowohl bei der KWB als auch bei den Grundwasserständen. Dabei wurde sowohl ein Mittel der Ganglinien als auch jede Ganglinie separat mit den KWB-Werten verglichen. Abbildung 9 zeigt beispielhaft das Vergleichsdiagramm des Mittels der Grundwasserganglinien aller vier Stationen und der KWB. Bei der Betrachtung erkennt man zunächst keine deutliche Korrelation. Der Graph der KWB ist im Vergleich zu dem Graph des Mittels der GW-Ganglinie sehr viel unruhiger, d.h. die Zeiträume der Wechsel zwischen Maxima und Minima sind sehr viel geringer. Der äußerst geringe Korrelationskoeffizient von 0,07 lässt weder auf eine Korrelation noch auf eine Antikorrelation schließen. Bei dem Graph der KWB sind auch keine Mehrjährigkeiten wie bei dem Mittel der GW-Ganglinien zu erkennen. Bei genauerer Betrachtung erkennt man jedoch, dass die beiden Kurven doch eine mögliche Antikorrelation aufweisen. Die Peaks der beiden Kurven treten relativ gleichmäßig versetzt auf. Der Vergleich der einzelnen Stationen mit der KWB brachte dieselben Ergebnisse, weshalb folgend weiterhin nur das Mittel der vier Grundwasserganglinien betrachtet wird.

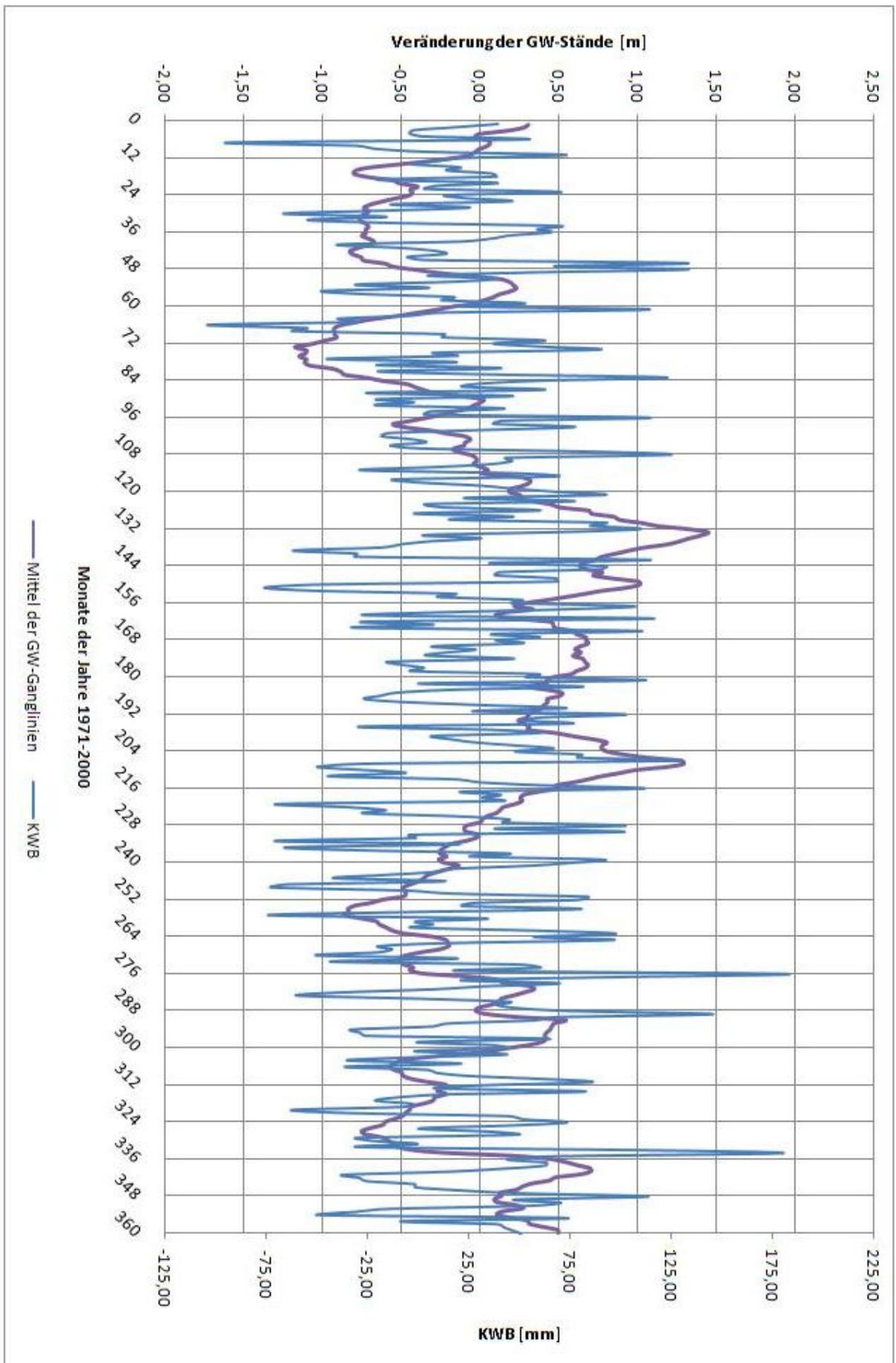


Abbildung 9 Vergleich der KWB mit dem Mittelwert der GW-Ganglinien (1971-2000)

Um die mögliche Korrelation erkennbar zu machen und herauszuarbeiten, wurden in den nächsten Schritten gleitende Mittelwerte der KWB zum Vergleich mit den Grundwasserganglinien herangezogen. Die gleitenden Mittelwerte glätten die Kurve, d.h. Extrema sind weniger stark ausgeprägt und kleine Peaks werden weggemittelt und den großen zugeordnet. Niederschlag kann sehr plötzlich auftreten und genauso plötzlich wieder aufhören. Das bedeutet, bezogen auf den Niederschlagsverlauf, dass es viele Wechsel zwischen positiven und negativen Peaks gibt. Das Grundwasser hingegen steigt und sinkt allmählich über einen längeren Zeitraum. Es reagiert träge auf Niederschlagsereignisse bzw. Veränderungen der KWB. Das heißt, bezogen auf die Grundwasserganglinien, dass weniger positive und negative Peaks vorhanden sind. Bildet man nun aus der KWB ein gleitendes Mittel, werden die vielen Veränderungen relativiert und die vielen Peaks zusammengefasst. So können die Kurven besser verglichen werden und die Korrelationsanalyse wird erheblich erleichtert.

Zunächst wurde das gleitende Mittel der KWB über drei Monate ermittelt und zum Vergleich herangezogen. Abbildung 10 zeigt das gleitende Mittel der KWB über drei Monate und das Mittel der Grundwasserganglinien im Vergleich. Der Graph des gleitenden Dreimonatsmittels der KWB zeigt die Peaks deutlicher als der Graph der nicht gemittelten KWB. Die einzelnen Peaks sind leichter zu erkennen und können so den Peaks der Grundwasserganglinien eindeutiger zugeordnet werden. Der Korrelationskoeffizient ist mit 0,1 geringfügig größer als der Korrelationskoeffizient der ungemittelten KWB und der Grundwasserganglinien.

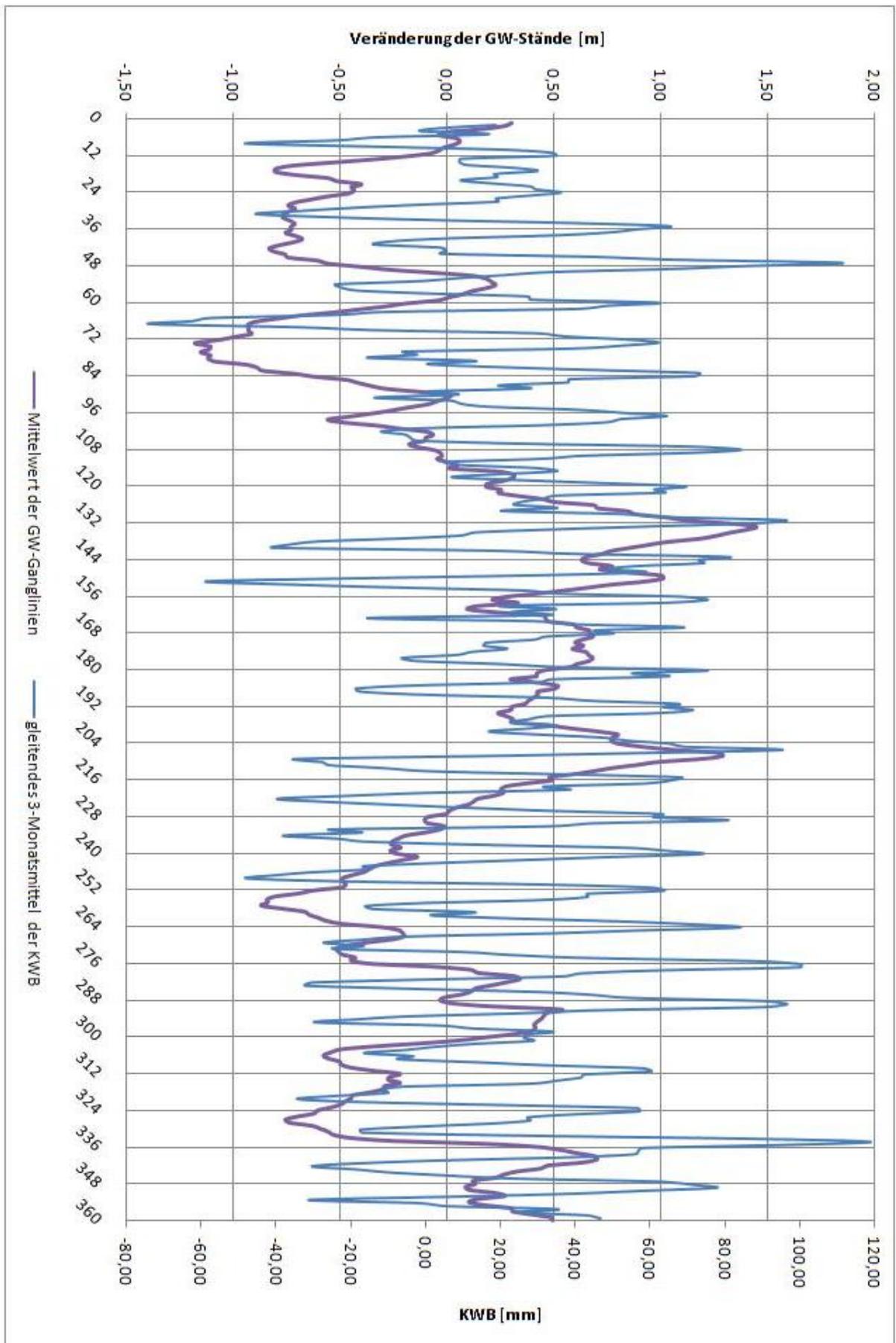


Abbildung 10 Gleitendes Dreimonatsmittel und das Mittel der GW-Ganglinien (1971-2000)

Um die Vergleichbarkeit noch einmal zu verbessern, wurde ein gleitendes Mittel der KWB über fünf Monate gebildet und mit dem Mittel der Grundwasserganglinien verglichen. Abbildung 11 zeigt diesen Vergleich grafisch. Man erkennt nun an vielen Stellen deutlich die zeitlich verschobenen Peaks der beiden Kurven. Mit einer zeitlichen Verschiebung von ca. fünf bis sieben Monaten folgen den Peaks des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB die Peaks des Mittels der Grundwasserganglinien. Bis auf wenige Ausnahmen wie beispielsweise bei den Monaten von ungefähr 296 bis 304 (ca. Oktober 1995 bis April 1996), wo ein Peak in der Kurve der KWB vorhanden ist, aber kein Peak der Grundwasserganglinie folgt, zeigt sich dieses Muster über den ganzen betrachteten Zeitraum von 1971 bis 2000. Der Korrelationskoeffizient von 0,13 ist im Vergleich zum Korrelationskoeffizienten des Vergleichs mit dem gleitenden Mittel der KWB über drei Monate leicht erhöht. Diese Erhöhung ist ein weiteres Indiz für eine Korrelation und daher ein Grund für weitergehende Untersuchungen.

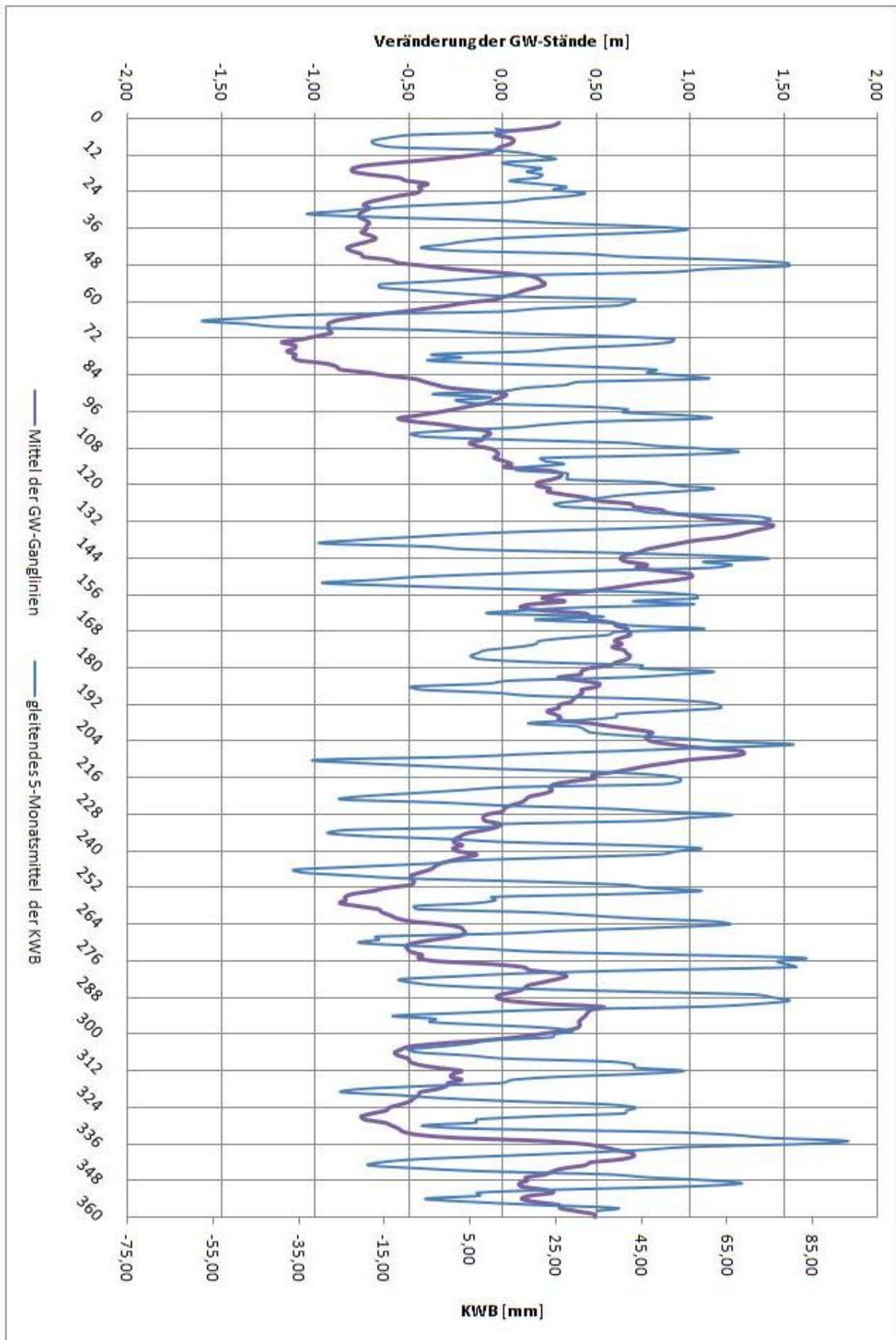


Abbildung 11 Gleitendes Fünfmonatsmittel und das Mittel der GW-Ganglinien (1971-2000)

Im letzten Schritt des Vergleichs der Grundwasserganglinien mit der KWB wurde nun eine Lag-Korrelationsanalyse des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB und des Mittel der Grundwasserganglinien durchgeführt. Dabei wurde die zeitliche Verschiebung der Peaks aufgehoben, sodass der Zusammenhang der Grundwasserstände und der KWB deutlich wurde. Die Grundwasserstände hängen vom Niederschlag und damit von der KWB ab. Das bedeutet, dass auf positive Peaks in der Kurve der KWB positive Peaks in der Grundwasserganglinie, also Grundwasseranstiege, folgen. Die KWB-Kurve ist die führende Kurve. Die Kurve der Grundwasserstände läuft hinterher. Für die hier betrachteten Abbildungen 8 bis 11 bedeutet dies, dass die Peaks der führenden Kurve (KWB) links von den „dazugehörigen“ Peaks der folgenden Kurve (Gw-Stände) sind. Wie den vorherigen Untersuchungen zu entnehmen ist, liegt der zeitliche Versatz der Peaks bei ca. fünf bis sieben Monaten. Daher erschien eine Verschiebung der Zeitreihe um sechs Monate sinnvoll. Abbildung 12 zeigt den um sechs Monate zurückversetzten Graph des Mittels der Grundwasserganglinien und den Graph des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB. Bei der Betrachtung erkennt man sofort einen Zusammenhang der Kurven. Bis auf wenige Ausnahmen ist bei jedem Peak der KWB auch ein Peak der GW-Ganglinien zu erkennen. Das Größenverhältnis der Peaks ist zwar nicht beim ganzen betrachteten Zeitraum gleich, jedoch kann man bei beiden Kurven denselben Trend erkennen. Die mehrjährigen Schwankungen der Grundwasserganglinien zeigen sich hier auch erkennbar in der Kurve der KWB. Der Korrelationskoeffizient von 0,37 unterstreicht die oben aufgeführten Beschreibungen und ist ausreichend hoch, um darauf die Aussage zu stützen, dass die KWB deutlich erkennbar mit den Grundwasserständen korreliert. Dabei ist nochmals herauszustellen, dass hier eine Lag-Korrelation vorliegt. Die Grundwasserstandsveränderungen folgen ca. sechs Monate nach den „dazugehörigen“ KWB-Änderungen. Diese Verschiebung lässt sich mit der sehr geringen Sickergeschwindigkeit des Wassers im Boden erklären. Die Sickergeschwindigkeit hängt von der Art des Bodens, dem Abstand der Grundwasseroberfläche zur Geländeoberfläche und der anfallenden Wassermenge ab. Die Zeiträume, bis sich Niederschlagsereignisse auf das Grundwasser auswirken, variieren zwischen einigen Wochen bis hin zu Jahrzehnten (G. Berthold, persönliche Mitteilung, 2011). Bei den hier betrachteten Grundwassermessstellen dauert dieser Sickerprozess im Mittel ca. ein halbes Jahr. Dies ist ein realistischer Wert. Die Signifikanz der Korrelation wurde analog zu der unter Punkt 3.2 beschriebenen Vorgehensweise, bestimmt. Aufgrund der Verwendung des fünfmonatigen gleitenden Mittels, haben wir hier nur 70 Freiheitsgrade. Damit ergibt sich ein T-Wert aus der T-Verteilungstabelle von 1,658. Die berechnete Prüfgröße liegt bei 3,33. Der Vergleich der Werte zeigt, dass die Prüfgröße deutlich größer als der T-Wert ist. Somit kann der Korrelationskoeffizient als signifikant angenommen werden.

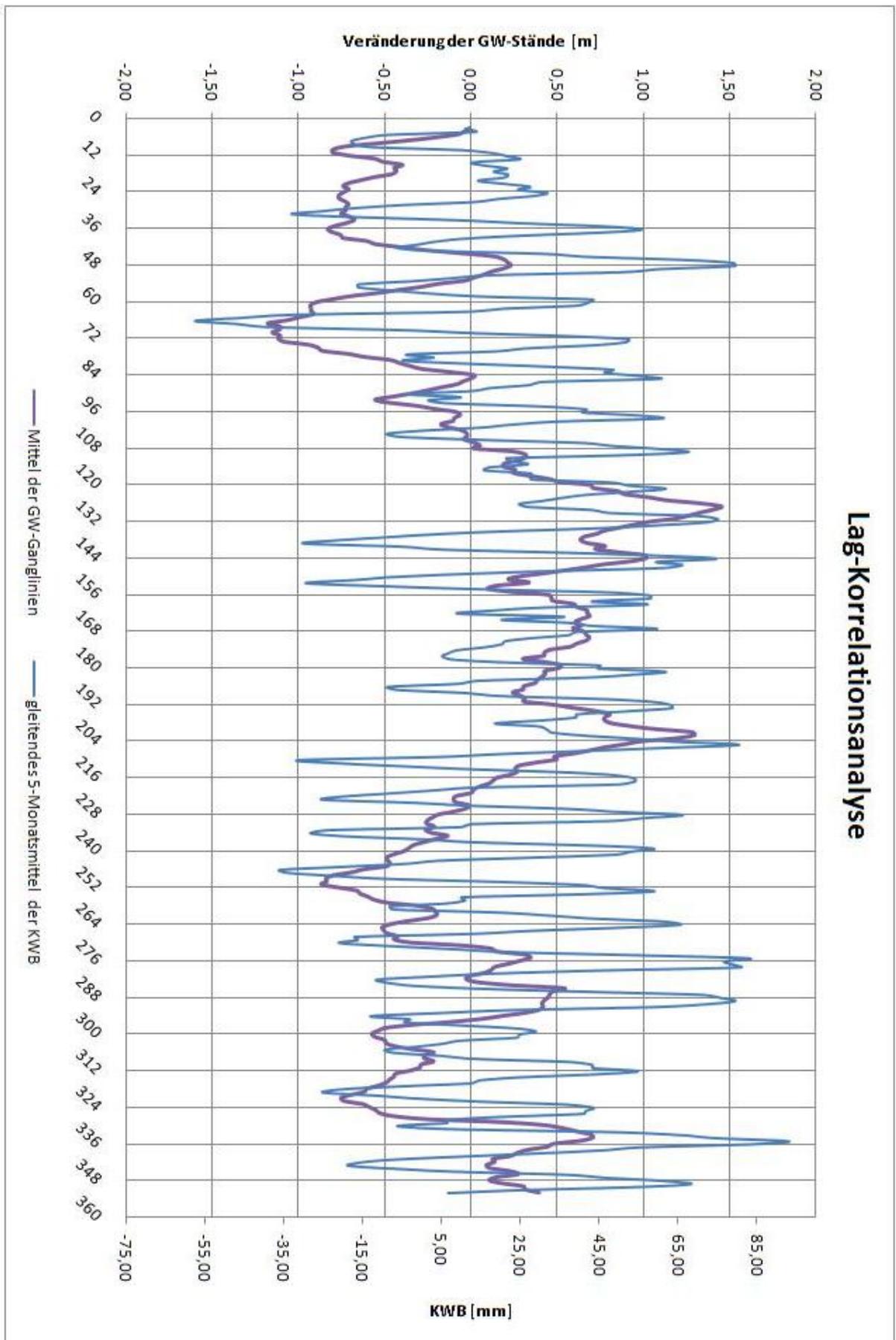


Abbildung 12 Korrelationsanalyse des gleitenden Fünfmonatsmittels mit dem Mittel der GW-Ganglinien (1971-2000)

Im nächsten Schritt muss geklärt werden, ob die bestehende Korrelation ausreichend groß ist, um sinnvoll eine Regressionsanalyse durchführen zu können, mit der die möglichen Grundwasserstände der vier Stationen projiziert werden können.

3.4 Regressionsanalyse zwischen GW-Ständen und KWB (1971-2000)

Im ersten Schritt wurde untersucht, ob aus dem direkten Vergleich der Monatswerte des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB und dem Mittel der Grundwasserganglinien ein sinnvoller mathematischer Zusammenhang abgeleitet werden kann.

Dazu wurde folgende Abbildung 13 erstellt, welches die Monatswerte des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB dem Mittel der Grundwasserganglinien gegenüberstellt.

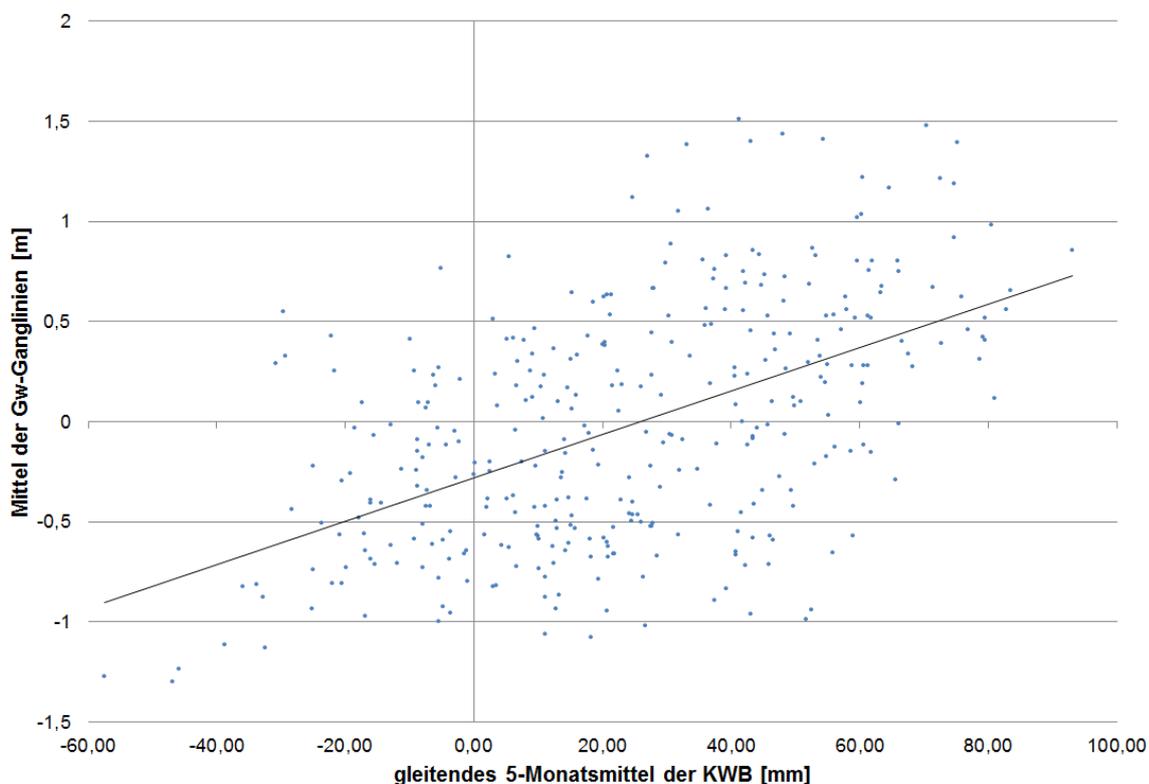


Abbildung 13 Streudiagramm des gleitenden Fünfmonatsmittels der KWB und des Mittels der GW-Ganglinien

Die Gegenüberstellung soll zeigen und verdeutlichen, ob bei gleichem KWB-Wert auch ähnliche Grundwasserstände vorliegen. Eine ideale Korrelation läge vor, wenn alle Punkte auf einer Linie lägen. Die Abbildung zeigt deutlich, dass dies mit Monatswerten nicht gegeben ist. Man kann nicht sagen, dass jedem KWB-Wert eine bestimmte Grundwasserhöhe bzw. ein Schwankungsbereich der Grundwasserhöhe zugeordnet werden kann. Die Trendlinie zeigt jedoch den erhofften Zusammenhang: Je niedriger die KWB, desto niedriger der GW-Stand und umgekehrt. Sie gibt Anlass zu weiteren Untersuchungen.

Dieser Zusammenhang soll nun in einer mathematischen Gleichung ausgedrückt werden, mit der man die Werte außerhalb des hier betrachteten Zeitrahmens von 1971 bis 2000 prognostizieren bzw. abschätzen kann. Ziel ist es, die Grundwasserstände von 2001 bis 2100 abzuschätzen.

Die Trendlinie des Streudiagramms (Abb.13) lässt sich über eine algebraische Geradengleichung ausdrücken.

$$\hat{Y} = \alpha + \beta x$$

Dabei ist:

\hat{Y} : Schätzwert

α : Schnittpunkt der Geraden mit der Y-Achse

β : Steigungskoeffizient

x : Variable (projizierte KWB-Werte)

Der Schnittpunkt der Trendlinie mit der Y-Achse (α) liegt in der hier betrachteten Abbildung 13 bei -0,28m.

Der Steigungskoeffizient (β) der Trendlinie liegt hier bei 0,01.

Daraus ergibt sich folgende Formel, mit der man zukünftige Grundwasserstände abschätzen kann.

$$\text{Formel 1: } \hat{Y} = -0,28 + 0,01 x$$

Hierbei muss allerdings Folgendes beachtet werden. Erstens ist das Bestimmtheitsmaß $[R^2]$ mit einem Wert von 0,27 sehr niedrig. Das bedeutet, die Güte der linearen Regression ist gering. Dies zeigt sich zweitens auch durch die große Streuung der Punkte, wie in Abbildung 13 zu sehen ist. Man kann also nur eine sehr vage Abschätzung der zukünftigen Grundwasserstände treffen.

Die Peaks in der Abbildung 12 der Lag-Korrelationsanalyse geben die einzelnen Monate nur äußerst ungenau wieder. Die Veränderungen der einzelnen Jahre hingegen werden in dieser Abbildung deutlich erkennbar wiedergegeben. Wie deutlich zu erkennen ist, ist auch die monatsweise Projektion bzw. Abschätzung der Grundwasserstände nicht genau. Um die Genauigkeit der Abschätzung und die Güte der linearen Regression zu verbessern, wurden aus den Monatsmittelwerten des Mittels der vier Grundwasserganglinien die Jahresmittel gebildet. Außerdem wurde ein Jahresmittel aus der KWB erzeugt. Diese Jahresmittel sind nicht über das kalendarische Jahr von Januar bis Dezember ermittelt worden, sondern über das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr, also von November bis Oktober. Der Grund

dafür ist, dass winter- bzw. sommerspezifische Grundwasserveränderungen nicht geteilt und dem falschen Jahresmittel zugeordnet werden sollen. Diese beiden Jahresmittel wurden gegenübergestellt (Abb.14). Dies verhindert eine theoretisch mögliche Abschätzung von Monatswerten, allerdings wird so die Streuung der vielen einzelnen Werte weggemittelt, wie in Abbildung 14 zu sehen ist. Dies ermöglicht zwar nur eine jährliche Abschätzung, mit der man nur einen Trend der Grundwasserstände in den nächsten Jahren abschätzen kann, dies aber dafür belastbarer. Hier ist deutlich zu machen, dass kein gleitendes Mittel der KWB verwendet wurde. Außerdem wurde auch hier die bestehende Lag-Korrelation berücksichtigt, indem die Grundwasserstands-Daten um sechs Monate zurückversetzt wurden.

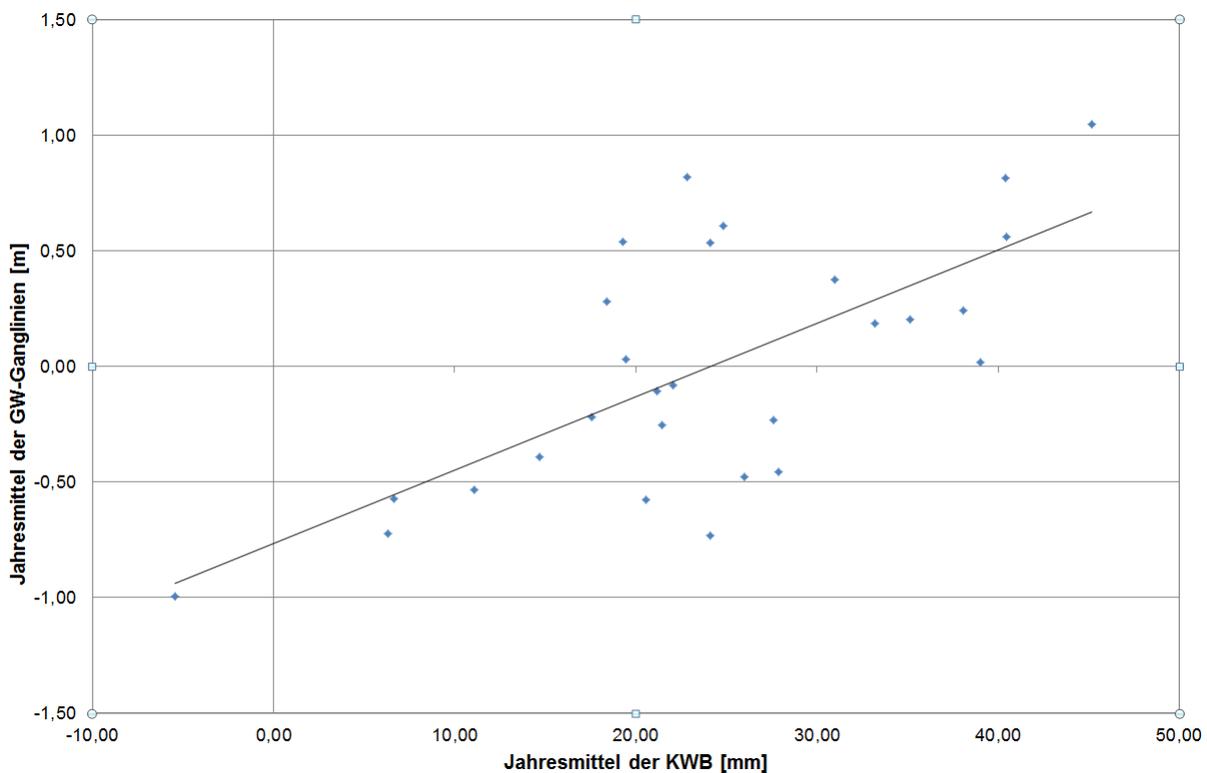


Abbildung 14 Streudiagramm des Jahresmittels der KWB und des Jahresmittels des Mittelwertes GW-Ganglinien

Analog zu der Gegenüberstellung der Monatsmittel soll nun auch die Trendlinie aus der Gegenüberstellung der Jahresmittel (Abb.14) durch eine mathematische Gleichung ausgedrückt werden.

Der Schnittpunkt der Trendlinie mit der Y-Achse (α) liegt in der hier betrachteten Abbildung 12 bei -0,77m.

Der Steigungskoeffizient (β) der Trendlinie liegt hier bei 0,03.

Daraus ergibt sich folgende Formel, mit der man zukünftige Veränderungen der Grundwasserstände jahresweise abschätzen kann. Die Formel ist also nur dazu geeignet, einen Trend zu projizieren.

$$\text{Formel 2: } \hat{Y} = -0,77 + 0,03 x$$

Das höhere Bestimmtheitsmaß $[R^2]$ der Trendlinie der Jahresmittel, mit einem Wert von 0,4628, zeigt, dass die Güte der linearen Regression verbessert wurde. Auch bei der Betrachtung von Abbildung 14 ist eine geringere Streuung der Werte zu erkennen. Man kann den Werten der KWB eindeutiger einen Schwankungsbereich der Grundwasserhöhen zuordnen.

Bei dem Vergleich der beiden Bestimmtheitsmaße ist zu beachten, dass ihnen unterschiedliche Freiheitsgrade zugrunde liegen. Mehr Freiheitsgrade bedeuten im Normalfall eine höhere Güte der Regression. Dem Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden der Gegenüberstellung der Jahresmittel (Abb.14) liegen 28 Freiheitsgrade zugrunde. Dem Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden der Gegenüberstellung der Monatsmittel (Abb.13) liegen 358 Freiheitsgrade zugrunde. Dies würde bedeuten, dass die Regressionsgerade der Gegenüberstellung der Monatsmittel (Abb.13) eine höhere Güte besitzt als die Regressionsgerade der Gegenüberstellung der Jahresmittel (Abb.14). Das höhere Bestimmtheitsmaß, und die damit verbundene höhere Güte der Regression, der Regressionsgeraden der Gegenüberstellung der Jahresmittel (Abb.14) lässt sich wie folgt erklären: Physikalisch betrachtet ist das höhere Bestimmtheitsmaß durchaus plausibel. Der Boden wirkt als Puffer auf sickendes Wasser. Niederschlagsereignisse sind an Grundwasseränderungen nicht im Einzelnen nachzuweisen. Viele über einen gewissen Zeitraum nacheinander stattfindende Niederschlagsereignisse werden im Boden „zusammengefasst“. Sie überlagern sich und wirken gemeinsam auf das Grundwasser. Dies verdeutlicht, dass das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden der Gegenüberstellung der Jahresmittel (Abb.14) durchaus plausibel ist und die Güte im Vergleich tatsächlich höher ist, trotz der geringeren Anzahl an Freiheitsgraden.

Abschließend kann man festhalten, dass die Ergebnisse der Regressionsanalyse nicht dazu geeignet sind, die Grundwasserstände exakt zu projizieren. Es ist aber möglich, einen groben Trend abzuschätzen. Dazu sollte aufgrund zu erwartender plausiblerer Ergebnisse die zweite ermittelte Formel verwendet werden.

3.5 Projizierte Grundwasserstände von 2001 bis 2100

Mit der ermittelten Formel aus der Regressionsanalyse kann nun ein Trend der zukünftig zu erwartenden Entwicklung der Grundwasserstände projiziert werden. Dazu müssen die projizierten Werte der KWB in die Formel eingesetzt werden. Eingesetzt wurden hier zwei verschiedene KWB-Datensätze. Erstens wurden die KWB-Daten, die aus den unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten und der Verdunstung ermittelt wurden, eingesetzt. Zweitens wurden die KWB-Daten, die aus den korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten und der Verdunstung ermittelt wurden, eingesetzt. Dazu wurde auf Grund der zu erwartenden plausibleren Ergebnisse die zweite ermittelte Formel (für Jahreswerte) verwendet. Bei der Benutzung dieser Formel musste darauf geachtet werden, dass zunächst auch die Jahresmittel aus den simulierten KWB-Werten aus WETTREG gebildet werden. Diese Jahresmittel durften nicht über das kalendarische Jahr von Januar bis Dezember gebildet werden, sondern nur über das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr, also von November bis Oktober.

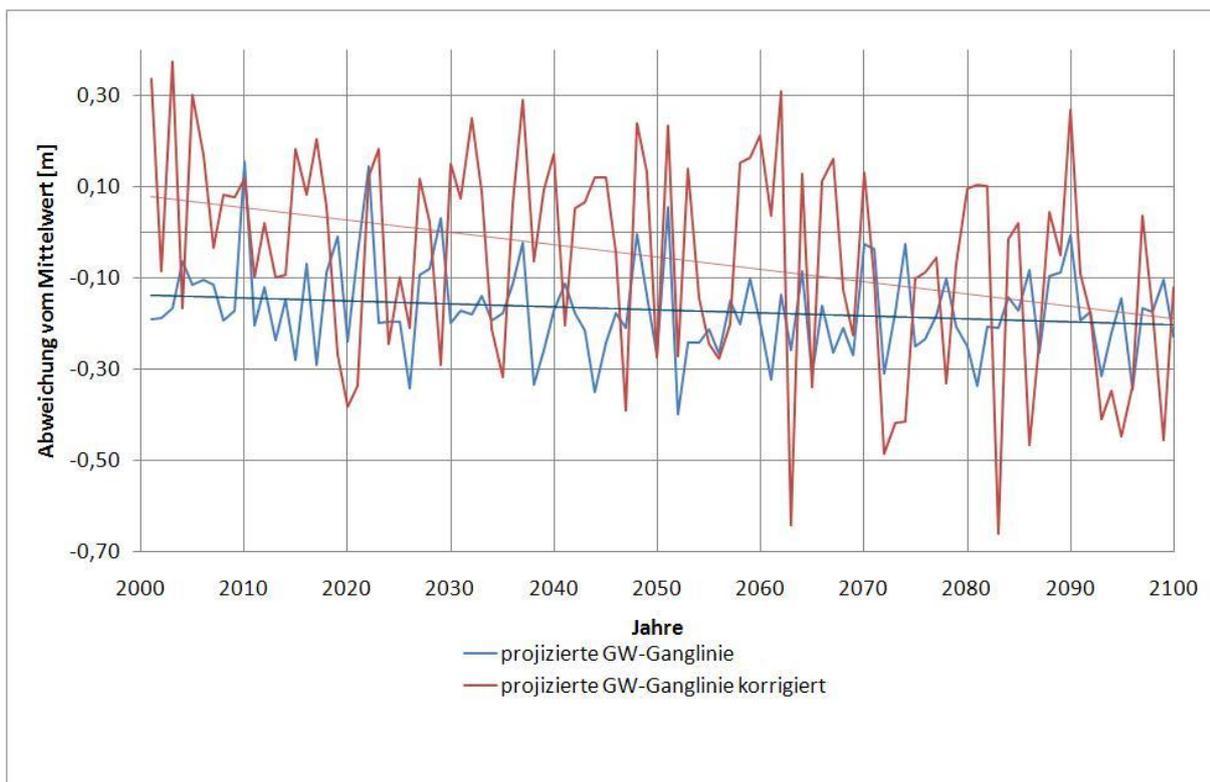


Abbildung 15 Projizierte GW-Ganglinien mit korrigierten (rot) und unkorrigierten (blau) WETTREG-Niederschlagsdaten (2001-2100)

3.5.1 Projizierte Grundwasserstands-Zeitreihe mit WETTREG-Niederschlagsdaten

Bei der Betrachtung der projizierten bzw. geschätzten Grundwasserganglinie (Abb.15 blau) erkennt man einen Trend nach unten, wie die blaue Trendlinie (Abb.15 blau) zeigt. Die negative Steigung der Trendlinie von $-0,0006$ ist zwar äußerst gering, aber erkennbar. Dies macht sich bereits am Mittelwert der Kurve bemerkbar. Er liegt bei $-0,17$ m. Das bedeutet, dass der Grundwasserstand im hier betrachteten Zeitraum von 2001 bis 2100 im Schnitt um $0,17$ Meter niedriger liegt als im Referenzzeitraum von 1971 bis 2000.

3.5.2 Projizierte Grundwasserstands-Zeitreihe mit korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten

Die WETTREG-Niederschlagsdaten wurden nur für die Winterzeiträume hWH, DJF und Q1 korrigiert. Um einen möglichst langen korrigierten Zeitraum betrachten zu können, wurde hier für die Projektionen das hydrologische Winterhalbjahr (hWH) ausgewählt. Die korrigierten KWB-Daten der Monate November bis April wurden mit den unkorrigierten KWB-Daten der Monate Mai bis Oktober kombiniert, um eine ununterbrochene Zeitreihe betrachten zu können.

Bei der Betrachtung der projizierten bzw. geschätzten Grundwasserganglinie (Abb.15 rot), die mit korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten ermittelt wurde, erkennt man, wie bei der aus unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten ermittelten Ganglinie, einen Trend nach unten. Die rote Trendlinie hat eine Steigung von $-0,0027$. Der Mittelwert von $-0,06$ zeigt eine deutlich geringere Abweichung zum Mittelwert des Referenzzeitraums, jedoch ist durch ein höher projiziertes Grundniveau des Grundwasserstandes der Trend nach unten dennoch größer als bei der aus unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten ermittelten Ganglinie. Der Trend der korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten ist um das Viereinhalbfache stärker abfallend als der Trend der unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten.

Die korrigierte, rote Kurve weist stärker ausgeprägte Extrema sowie länger andauernde Hoch-, bzw. Tiefphasen auf. Insgesamt lässt sich der Schluss ziehen, dass die korrigierten Niederschlagsprojektionen die Grundwasserstandsabschätzungen durchaus plausibler machen.

3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Anwendung der Aufprägungsformel von Geiger (2010) für die projizierten WETTREG-Niederschlagsdaten des Zeitraums von 2001 bis 2100 hat ergeben, dass, wie erwartet, die Extrema und die Mehrjährigkeiten der Projektionen plausibler abgebildet werden.

Die Untersuchung der vier ausgewählten Grundwasserganglinien der Stationen Zell, Bracht, Burghardsfelden und Bauschheim für den Zeitraum 1971 bis 2000 hat ergeben, dass die vier Grundwasserganglinien gut miteinander korrelieren. Auch die weiter entfernte Messstation Bauschheim gibt den Trend eindeutig erkennbar wieder und korreliert gut mit den übrigen Ganglinien. Dieses Ergebnis war Grund genug für weitere Untersuchungen.

Der Vergleich der Grundwasserganglinien mit der klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum 1971 bis 2000 hat gezeigt, dass eine für weitere Auswertungen ausreichende Korrelation gegeben ist. Um diese Korrelation erkennbar zu machen, mussten gleitende Mittel der klimatischen Wasserbilanz ermittelt werden. Dabei wurde herausgefunden, dass eine Lag-Korrelation mit einer Verschiebung von ca. sechs Monaten vorliegt.

Die Regressionsanalyse hat eine Formel hervorgebracht, die es ermöglicht, einen ungefähren Trend zukünftiger Grundwasserstände abzuschätzen:

$$\hat{Y} = -0,7654 + 0,0318 x$$

Dabei werden, um die Projektion plausibler zu machen, die Mittelwerte der Jahre verwendet, und zwar sowohl der Werte der klimatischen Wasserbilanz als auch der Grundwasserdaten. Der hier betrachtete Referenzzeitraum sind die Jahre von 1971 bis 2000. Dies lässt zwar keine detaillierte Projektion mehr zu, reicht aber für die Ermittlung eines Trends aus.

Die Projektion bzw. Schätzung der zukünftigen Grundwasserganglinien wurde mit zwei Datensätzen durchgeführt. Erstens wurde die in die obige Formel einzusetzende klimatische Wasserbilanz aus unveränderten, projizierten WETTREG-Niederschlagsdaten und der Evapotranspiration ermittelt. Zweitens wurde die klimatische Wasserbilanz aus den korrigierten, projizierten WETTREG-Niederschlagsdaten und der Evapotranspiration ermittelt. Beide Projektionen zeigen einen Trend nach unten, also sinkende Grundwasserstände für den Zeitraum von 2001 bis 2100. Es kann angenommen werden, dass die korrigierten Niederschlagsdaten auch die Grundwasserstandsabschätzung optimieren.

4 Diskussion

4.1 Korrelation der GW-Ganglinien

Die GW-Messstationen wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt: Erstens unterliegen sie keiner Beeinflussung durch Grundwasserentnahmen. Zweitens sind die Messdaten für den gewählten Zeitraum verfügbar. Der Vergleich der Grundwasserganglinien der vier Messstationen zeigt sehr gute Korrelationen. Nur eine Station (Bauschheim), die am

weitesten entfernt von den anderen drei Stationen liegt, zeigt etwas größere Abweichungen. Dennoch ist auch bei dieser Station eindeutig zu erkennen, dass die Ganglinie ähnlich wie die drei weiteren Ganglinien, verläuft. Man kann also davon ausgehen, dass die Grundwasserstationen in Hessen in gewissem Maße miteinander korrelieren.

Ein Mittel der Grundwasserstände über ganz Hessen lässt sich kaum sinnvoll realisieren. Die Messstationen und die Grundwasserkörper unterliegen vielen unterschiedlichen Einflüssen und Gegebenheiten. Dazu gehören z.B. die Art des Bodens und die Stärke der wasserungesättigten Zone, welche beide die Sickergeschwindigkeit beeinflussen. Dazu zu gehören aber auch anthropogene Einflüsse, d.h. z.B. Grundwasserentnahmen- oder absenkungen. Ein Hessenmittel der Grundwasserstände wäre also ein sehr ungenauer Trend. Ein Hessenmittel wäre dennoch für weitere Untersuchungen wünschenswert, da die korrigierten Niederschläge nur als Hessenmittel verwendet werden können und deshalb auch die anderen Kenngrößen als Hessenmittel verwendet werden sollten.

Die Vorgehensweise dieser Arbeit erlaubt es, einen Trend abzuschätzen und ein Mittel der Mittelwertabweichungen von vier Grundwassermessstellen zu erstellen. Für eine weitergehende Projektion müsste weitere Gebietsmittel aus einigen Stationen erstellt werden. Aufgrund der Korrelationen der GW-Stände ist das möglich, müsste jedoch in weitergehenden Untersuchungen bestätigt werden.

4.2 Korrelation der KWB mit den GW-Ganglinien

Die Korrelationen zwischen den KWB-Werten und den GW-Ganglinien war sehr hoch. Zwar mussten erst einige Aufbereitungsschritte erfolgen, aber die Korrelation ist eindeutig. Die Verschiebung der Grundwasserkurve um sechs Monate trifft die Verschiebung zwar ungefähr, allerdings variiert die Verschiebung teilweise um ein bis drei Monate. Diese Variabilität wurde bei der Verschiebung nicht berücksichtigt, da sie relativ gering ist. Durch die Mittelung der vier Grundwasserganglinien wurden die unterschiedlichen Zeiträume, bis sich Niederschlagsereignisse auf das Grundwasser auswirken, verringert.

4.3 Regressionsanalyse

Mit der Regressionsanalyse wurde der Zusammenhang der klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserstände in Form einer mathematischen Gleichung ermittelt und ausgedrückt. Diese Gleichung ermöglicht, wie erwartet, die Abschätzung zukünftiger Grundwasserstände. Daher kann die Regressionsanalyse durchaus als „Erfolg“ gewertet werden. Dabei ist allerdings Folgendes zu beachten: Die Grundwasserstände der vier betrachteten Messstationen wurden gemittelt. D.h. es wurde mit einem Trend, ermittelt aus einer Auswahl an Messstationen, eine Formel entwickelt, um einen Trend für die Zukunft zu erkennen. Wie die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigen, ist es nur sinnvoll, die zweite ermittelte

Formel für die Abschätzung zu verwenden, die anhand von Jahresmittelwerten der Daten des Zeitraums von 1971 bis 2000 erstellt wurde.

Ein weiterer erwähnenswerter Punkt ist das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden. Mit einem Wert von 0,46 ist es zwar akzeptabel und für die Bestimmung zukünftiger Werte durchaus als geeignet zu betrachten, jedoch stellt es auch einen zusätzlichen Ungenauigkeitsfaktor dar.

Kritisch betrachtet werden muss an dieser Stelle auch der zugrunde liegende Referenzzeitraum von nur dreißig Jahren. Die Grundwasserganglinien zeigen durchaus eine mehrjährige Variabilität. Die betrachteten dreißig Jahre zeigen diese Variabilität zwar, jedoch muss man berücksichtigen, dass die Zeitspanne nicht unbedingt ausreicht, um diese Variabilität in der Abschätzung für die Zukunft wiederzugeben. Ein mindestens 60 Jahre umfassender Referenzzeitraum könnte die Darstellung dieser Variabilität verbessern. Zusammengefasst bedeutet dies, dass mit den hier ermittelten Formeln nur ein ungefährer Trend für die Zukunft abgeschätzt werden kann.

4.4 Projektion

Die KWB-Werte, die hier genutzt wurden, um anhand der ermittelten Formel die Grundwasserstände zu bestimmen, sind natürlich, da sie Zukunftswerte sind, projiziert, d.h. statistisch ermittelt und mit vielen Ungenauigkeiten bzw. Schätzungen behaftet. Hinzu kommt, dass, wie die Untersuchungen zeigen, nur die Ermittlung eines Jahresmittelwertes zukünftiger Grundwasserstände sinnvoll ist, d.h., dass nur ein Trend abgeschätzt werden kann.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Abschätzung aus den korrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten einen stärker negativen Trend ergibt, als die Abschätzung aus den unkorrigierten WETTREG-Niederschlagsdaten. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Projektion des NAO-Index einen leicht negativen Trend mit einer Steigung von $-0,0004$ aufweist. Dies bedeutet weniger Niederschlag und in der Folge niedrigere Grundwasserstände.

Die Abschätzung der Grundwasserstände zeigt höhere Extrema und stärker ausgeprägte Mehrjährigkeiten als die Abschätzung mit den unkorrigierten Niederschlagsdaten. Dies lässt darauf schließen, dass die Abschätzung mit den korrigierten Niederschlagsdaten statistisch plausibler ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die hier ermittelten Trendabschätzungen zwar relativ großen Ungenauigkeiten unterliegen, sie jedoch statistisch gesehen durchaus als plausibel und belastbar eingeschätzt werden können. Im Endeffekt kann allerdings nur die Zukunft zeigen, inwieweit diese Projektionen der Realität nahe kommen.

5 Ausblick

Diese Arbeit ist ein Schritt, um mit Hilfe des korrigierten Niederschlags Projektionen hydrologischer Kenngrößen zu verbessern. Dabei wurden Grundwasserstände von vier ausgewählten Stationen untereinander auf Korrelationen überprüft. Mittels einer Regressionsanalyse wurden daraufhin die Grundwasserstände für die Zukunft projiziert.

Diese Untersuchungen können auf die anderen Grundwassermessstellen ausgeweitet werden. Zum einen müsste geprüft werden, ob und wie stark Grundwasserganglinien in Hessen miteinander korrelieren. Daraufhin könnte man für offensichtlich zusammenhängende Gebiete bzw. die Grundwassermessstellen der Gebiete Mittelwerte bilden und gebietsweise die Grundwasserstände für die Zukunft projizieren und einen Trend abschätzen.

Des Weiteren wurde ein Vergleich angestellt, inwieweit sich die Korrektur der projizierten Niederschlagswerte auf die Abschätzung der Grundwasserstände auswirkt. Dieser Ansatz kann weiterverfolgt werden, indem die in dieser Arbeit gezeigten Auswirkungen der NAO-Korrektur bei der hessenweiten Untersuchung überprüft werden.

In den weiteren Untersuchungen müsste der erstellte Mittelwert der KWB über Hessen (1971-2000) optimiert werden, indem bisher nicht abrufbare Daten bestehender Klimastationen hinzugefügt werden.

Die Betrachtung anderer Modelle, wie z.B. das ebenfalls statistische Modell „Star2“ würde neue Erkenntnisse und einen interessanten Vergleich erbringen. Z.B. könnte man die hier mit WETTREG erstellten Abschätzungen für die vier Grundwassermessstationen auch mit „Star2“ ermitteln. Aus dem Vergleich und der Verbindung dieser beiden Ergebnisse könnte man ggf. präzisere Abschätzungen gewinnen.

Auch eine Ausweitung des Referenzzeitraums würde sich positiv auf neue Ergebnisse auswirken. Mehrjährige Variabilitäten der Grundwasserstände könnten so auch in der Abschätzung bestimmt werden.

Zusätzlich könnte man, um die Korrelation der klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserganglinien noch deutlicher zu machen, die gleitenden Mittelwerte über größere Zeiträume als fünf Monate bilden.

Folgend können mithilfe dieser neuen Untersuchungen die Auswirkungen der Veränderungen des Grundwasserstandes untersucht werden. Dabei können die Auswirkungen bezüglich der Nutzung des Grundwassers an sich sowie bezüglich der Nutzung der Landflächen untersucht werden. Denkbar sind auch Auswirkungen auf Fauna und Flora, im Sinne von Beeinträchtigungen, Verdrängung oder, im Gegenteil, die Schaffung neuer Lebensräume und Möglichkeiten zur Nischenfindung, die zu untersuchen wären.

Auf Grundlage dieser Arbeit werden im hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie weiterführende Untersuchungen in Richtung Projektion von Grundwasserständen durchgeführt. Weitere Ganglinien, vor allem im hessischen Ried, sollen untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

- Deutscher Wetterdienst. (2011). *DWD (Klimaszenarien - Einblicke in unser zukünftiges Klima)*. Abgerufen am 15. März 2011 von http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=P27200165321293012986287&T176000265321293013118776gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FHomepage%2FKlimawandel%2FKlimawandel__neu__Klimaszenarien__node.html%3F__nnn%3Dtrue
- DIN 4049-1. (1992). *Hydrologie - Grundbegriffe*. Berlin: Beuth.
- DIN 4049-2. (1990). *Hydrologie - Begriffe der Gewässerbeschaffenheit*. Berlin: Beuth.
- DIN 4049-3. (1994). *Hydrologie - Begriffe zur quantitativen Hydrologie*. Berlin: Beuth.
- Geiger, K. A. (2010). *Untersuchungen zur Skalierung von Klimaprojektionen des Modells WettReg mit Hilfe des NAO-Indexes*. Bachelorarbeit, Rüsselsheim.
- Häckel, H. (1999). *Meteorologie*. Stuttgart: Ulmer.
- Hessisches Ministeriums für Umwelt; Regierungspräsidium Darmstadt;HLUG; BGS-Darmstadt. (07. Februar 2011). *Broschüre Hessisches Ried*. Abgerufen am 22. März 2011 von http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/artikel/broschuere_hess_ried_1.pdf
- HLUG. (2009). *Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie*. Abgerufen am 01. April 2011 von Umweltatlas Hessen: <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/>
- HLUG. (07. Februar 2011). *HLUG (Grundwasserkarten)*. Abgerufen am 16. März 2011 von http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/gw_karten/gw_karten.htm
- HLUG; Hessenwasser; BGS Umwelt. (2010). *Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen - Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement*. Schlussbericht.
- Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2009). *Hydrogeologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- IPCC - Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. d., Fenhann, J., Gaffin, S., et al. (2000). *Special report on emission scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC 2007: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., et al. (2007). *Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.
- Jansky, N. (2009). *Analyse des NAO-Index als Optimierungsfaktor der hydrologischen WETTREG-Daten*. Bachelorarbeit, Rüsselsheim.
- Lohninger, H. (2010). *Grundlagen der Statistik*. (H. Lohninger, Hrsg.) Pressbaum, Austria: Epina.
- Malberg, H. (2002). *Meteorologie und Klimatologie*. Berlin Heidelberg New York: Springer.

Mattheß, G., & Ubell, K. (2003). *Allgemeine Hydrogeologie; Grundwasserhaushalt*. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.

Mull, R., & Holländer, H. (2002). *Grundwasserhydraulik und -hydrologie*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Regierungspräsidium Darmstadt. (2011). *Regierungspräsidium Darmstadt (Hessisches Ried)*. Abgerufen am 22. März 2011 von <http://www.rp-darmstadt.hessen.de/?cid=d06963c9505c4032941bb28bcd54a3be>

Schlanger, V. (17. November 2003). *Espere (Environmental science published for everybody round the Globe)*. (E. Kommission, I. M. Physics, C. Rheinland-Pfalz, Herausgeber, & Europäische Kommission; International Max Planck Research School on Atmospheric Chemistry and Physics; Chemieverbände Rheinland-Pfalz) Abgerufen am 16. März 2011 von <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/1pd.html>

Spokes, L. (01. Oktober 2003). *Espere (Environmental science published for everybody round the Globe)*. (Europäische Kommission; International Max Planck Research School on Atmospheric Chemistry and Physics; Chemieverbände Rheinland-Pfalz) Abgerufen am 09. März 2011 von http://www.atmosphere.mpg.de/enid/1__Ozeane_und_Klima/_Nordatlantische_Oszillation_2ru.html

The Royal Netherlands Meteorological Institute. (kein Datum). *KNMI climate explorer*. Abgerufen am 25. Februar 2011 von <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?someone@somewhere>

Welfens, M. J. (10. Juli 2008). *Bundeszentrale für politische Bildung (Klimaszenarien)*. Abgerufen am 11. März 2011 von <http://www.bpb.de/themen/DQUV8L,1,0,Klimaszenarien.html>

Wiki Bildungsserver - Klimawandel. (27. März 2011). (Hamburger Bildungsserver; climate prediction center) Abgerufen am 27. März 2011 von [Klimaszenarien: http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien)

Wiki Bildungsserver - Klimawandel. (27. Februar 2011). (Hamburger Bildungsserver; climate service center) Abgerufen am 09. März 2011 von [Nordatlantische Oszillation: http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Nordatlantische_Oszillation](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Nordatlantische_Oszillation)