

Masterarbeit Friederike Möll

**Regionale Unterschiede in Deutschlands
Grundwasserregimes und ihre Reaktion auf
Trockenwetterzeiten**

Referentin : Dr. Kerstin Stahl

Korreferent: Dr. Christoph Külls

Oktober 2013

Professur für Hydrologie

Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Danksagung

Für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Masterarbeit möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

Zunächst bei meiner Referentin Frau Dr. Kerstin Stahl und meinem Korreferenten Dr. Christoph Külls für das tolle Entgegenkommen bei der Erstellung des Themas und die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik während der Masterarbeit.

Bei Irene Kohn, die den Datensatz aufgearbeitet hat und mir auch während der Masterarbeit das ein oder andere Mal Hilfestellungen gegeben hat.

Bei Lina, Ulla, Clara und Stefan, die sei es durch Korrekturlesen oder hilfreiche Tipps unlösbar scheinende R-Probleme betreffend, besonders die Schlussphase dieser Abschlussarbeit erträglicher gemacht haben.

Ein weiterer Dank geht an meine zahlreichen Freunde, die es immer wieder geschafft haben, u.a. durch das ein oder andere Kalt- und Heißgetränk, für die nötige Ablenkung zu sorgen.

Nicht zuletzt herzlichen Dank an meine Eltern, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben und mir, in all den Jahren, statt Druck immer Verständnis und ein tiefes Vertrauen an einen erfolgreichen Abschluss entgegen gebracht haben.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Kurzfassung	VIII
Abstract.....	IX
1 Einleitung	1
Literaturrückblick	2
2 Problemstellung und Zielsetzung.....	8
3 Daten und Methodik	10
3.1 Datendokumentation	10
3.2 Verbesserung der Metadatenlage	11
3.2.1 Geographische Lage/Geländehöhe.....	11
3.2.2 Distanz zum nächsten Fließgewässer	12
3.2.3 Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten	12
3.2.4 Durchlässigkeiten bzw. Transmissivitäten der Aquifere	13
3.2.5 Hohlraumarten	13
3.2.6 Mittlerer Grundwasserflurabstand	14
3.2.7 Tiefe der Verfilterung/Sohltiefe.....	14
3.3 Datenanalyse.....	15
3.3.1 Unterteilung nach hydrogeologischen Unterregionen.....	15
3.3.2 Pardé-Koeffizient für Quellschüttungen.....	15
3.3.3 Berechnung des Grundwasserregime-Koeffizienten.....	16
3.3.4 Clusteranalyse.....	17
3.3.5 Vergleich der Cluster mit den Metadaten.....	18
3.4 Vergleich der hydrogeologischen Unterregionen mit den Clustern des GWRK	18

3.5	Untersuchung der Messstellen in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten am Beispiel des Jahres 2003.....	18
4	Ergebnisse	20
4.1	Unterteilung nach hydrogeologischen Einheiten	20
4.2	Clusteranalyse Pardé-Koeffizienten.....	24
4.3	Clusteranalyse der Grundwasserregime-Koeffizienten.....	27
4.4	Vergleich der Cluster (GWRK) mit den Metadaten.....	31
4.4.1	Geographische Lage/ Geländehöhe.....	31
4.4.2	Distanz zum Fließgewässer	34
4.4.3	Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten	35
4.4.4	Durchlässigkeiten.....	35
4.4.5	Hohlraumarten	38
4.4.6	Mittlerer Grundwasserflurabstand	39
4.4.7	Filterunterkante und Sohltiefe	40
4.5	Vergleich der Cluster mit den hydrogeologischen Unterregionen.....	41
4.6	Untersuchung der Messstellen in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten am Beispiel des Jahres 2003.....	44
4.6.1	Beispiele von GWM mit unterschiedlichem Regenerationsverhalten.....	46
5	Diskussion.....	48
5.1	Ergebnisse	48
5.2	Datenlage.....	50
5.3	Abschätzung des Gefährdungspotentials bezüglich Trockenwetterzeiten.....	51
6	Schlussfolgerung	53
	Literaturverzeichnis.....	54
	Anhang A: Agglomerationsplot und Dendrogrammplot	57
	Anhang B: Kürzel der Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters	59
	Erklärung	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Bestimmung des Grundwasserregime-Koeffizienten ($GWRK_{(Monat)}$) aus dem langjährigen Monatsmittel ($MHGW_{(Monat)}$), dem langjährigen Jahresmittel ($MHGW_{(Jahr)}$) und dem kleinsten langjährigen Monatsmittel ($MHGW_{(Min)}$) des Grundwasserstandes am Beispiel „GWM PE 2 Ebnet“ (Datenquelle: LUBW).....	16
Abb. 4.1: Langjährige Verläufe der Grundwasserspiegelhöhen der GWM in den jeweiligen hydrogeologischen Unterregionen sowie deren deutschlandweite Verteilung (links unten)	22
Abbildung 4.2: Standardabweichungen der langjährigen Amplituden der hydrogeologischen Unterregionen (UR)	23
Abb. 4.3: Cluster des PK der Quellschüttungen sowie die mittleren langjährigen Verläufe (PK mean) der Cluster	25
Abb. 4.4: PK-Schwankungen der jeweiligen Cluster.....	26
Abb. 4.5: Cluster der $GWRK$ der GWM.....	28
Abb. 4.6: mittlerer Verlauf der $GWRK$ der einzelnen Cluster	29
Abb. 4.7: Deutschlandkarte mit den GWM und ihrer jeweiligen Clusterzugehörigkeit (der $GWRK$), der Karte hinterlegt sind die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen hydrogeologischen Unterregionen gemäß der der Klassifikation der BGR im HAD bzw. der weiteren vorgenommenen Unterteilung der Unterregion Flachland und große Täler (ebenfalls beschrieben in Abschnitt 3.3.1)	30
Abb. 4.8: Längengrade der jeweiligen Cluster	31
Abb. 4.9: Breitengrade der jeweiligen Cluster	32
Abb. 4.10: Geländehöhen der jeweiligen Cluster	32
Abb. 4.11: Monat des maximalen $GWRK$ im Vergleich zu den Breitengraden (rechts) bzw. Längengraden (links), die Farben der Kreuze entsprechen den jeweiligen Clusterfarben	33
Abb. 4.12: Zeitintervall zwischen maximalem und minimalem $GWRK$ im Vergleich mit Breitengrad (rechts) bzw. Längengrad (links), die Farben der Kreuze entsprechen den jeweiligen Clusterfarben.....	34
Abb. 4.13: Distanz zum nächsten Fließgewässer der jeweiligen Cluster	35
Abb. 4.14: Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten der jeweiligen Cluster	35
Abb. 4.15: Durchlässigkeiten der jeweiligen Cluster.....	36

Abb. 4.16: Deutschlandkarte mit den Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters (BGR und SGD, 2011) im Bereich der GWM und Quellen, hinterlegt sind die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen hydrogeologischen Unterregionen gemäß der der Klassifikation der BGR im HAD bzw. der weiteren vorgenommenen Unterteilung der Unterregion Flachland und große Täler (ebenfalls beschrieben in Abschnitt 3.3.1).....	37
Abb. 4.17: Mittlerer Grundwasserflurabstand der jeweiligen Cluster	39
Abb. 4.18: Filterunterkanten der jeweiligen Cluster	40
Abb. 4.19: Prozentualer Anteil der hydrogeologischen Unterregionen (UR) innerhalb der Cluster.....	43
Abb. 4.20: Mittlerer Grundwasserflurabstand und. Clusterzugehörigkeit (des GWRK) der GWM, welche nicht im Bereich des H_{347} (schwarz) und denen GWM, welche im Bereich des H_{347} (rot) liegen	45
Abb. 4.21: Monatsmittelwerte der Jahre 2003 und 2004 und Quantile der langjährigen Werte der GWM st-gwm-11 „Neuwegersleben“ (Datenquelle: LHW)	46
Abb. 4.22: Monatsmittelwerte der Jahre 2003 und 2004 und Quantile der langjährigen Werte der GWM by-gwm-11 „Kronau 616“ (Datenquelle: LfU)	47
Abb. 5.1: Abschätzung eines möglichen Gefährdungspotentials in Trockenwetterzeiten	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Übersicht der Behörden der ausgewerteten Datenreihen der Grundwassermessstellen (GWM) und Quellschüttungen (Qu)	11
Tabelle 4.1: Kenngrößen der hydrogeologischen Unterregionen	24
Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Cluster des PK der Quellschüttungen und ihrer Kenngrößen	26
Tabelle 4.3: Tabelle zu den Hohlraumarten der jeweiligen Cluster	38
Tabelle 4.4: Kenngrößen der ausgewerteten Metadaten der jeweiligen Cluster	41
Tabelle 4.5: Prozentualer Anteil der hydrogeologischen Unterregionen innerhalb der Cluster	42
Tabelle 4.6: Vergleich der Grundwasserflurabstände bzw. Distanzen zum Fließgewässer zwischen den GWM, welche nicht im Bereich des H ₃₄₇ (weiß) und denen GWM, welche im Bereich des H ₃₄₇ (grau) liegen	44
Tabelle 4.7: GWM im Bereich des H ₃₄₇ (weiß) bzw. der GWM welche nicht im Bereich des H ₃₄₇ (grau) und ihren prozentualen Anteilen an den Cluster des GWRK	44

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb. A 1: Agglomerationsplot der Clusteranalyse der PK	57
Abb. A 2: Dendrogrammplot der Clusteranalyse der PK	57
Abb. A 3: Agglomerationsplot der Clusteranalyse der GWRK	58
Abb. B 1: Kürzel der Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters aus der HÜK 200 (BGR & SGD, 2011)	59

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit
ET _a	aktuelle Evapotranspiration
GWM	Grundwassermessstelle
GWN	GWN
GWRK	Grundwasserregime-Koeffizient
H ₃₄₇	Niedrigwasserstand (5%-Quantil)
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland
HÜK 200	Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 200 000 von Deutschland
k _f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
LFW	Bayrisches Landesamt Für Wasserwirtschaft
m. ü. NN	Meter über Normalnull
mm/a	Millimeter pro Jahr
PK	Pardé-Koeffizient
P _{korrt}	korrigierter Niederschlag
Q ₃₄₇	Niedrigwasserschüttung (5%-Quantil)
R _D	Direktabfluss
UR	(hydrogeologische) Unterregionen

Kurzfassung

An Hand von Grundwasser- und Quellschüttungszeitreihen wurden im Rahmen dieser Arbeit die unterschiedlichen Grundwasserregimes in Deutschland untersucht. Dies erfolgte zum einen durch die Unterteilung in hydrogeologische Unterregionen und zum anderen an Hand der Unterschiede im jahreszeitlichen Auftreten der Grundwasserhöchst- bzw. tiefststände. Um die Grundwasserregimes zu identifizieren, wurde eine Clusteranalyse der Grundwasserregime-Koeffizienten vorgenommen und die Cluster auf die unterschiedlichen Einflussgrößen, wie Grundwasserflurabstände, Distanzen zum nächsten Fließgewässer, Durchlässigkeiten der Aquifere etc. hin untersucht sowie Unterschiede heraus gearbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass eine Verspätung der maximalen Grundwasserstände mit steigendem Grundwasserflurabstand einhergeht. Auch der Einfluss der Kontinentalität auf das jahreszeitliche Auftreten der Maxima und Minima, also eine Verspätung dieses mit zunehmender Kontinentalität, konnte nachgewiesen werden.

Des Weiteren wurden die Messstellen auf ihre Reaktionen auf Trockenwetterzeiten hin untersucht. Dies erfolgte am Beispiel des Trockenjahres 2003, wobei auch das Folgejahr 2004 in die Betrachtung mit einbezogen wurde, um die Regenerationsfähigkeit der Aquifere zu untersuchen. Als Maß für eine extreme Reaktion auf das Trockenwetterjahr 2003 wurden die Messstellen auf ein Erreichen der Niedrigwasserstand H_{347} (Grundwasserstände) bzw. Niedrigwasserschüttung Q_{347} (Quellschüttungen) hin untersucht. Bei 50% der Grundwasser- sowie 50% der Quellschüttungsmessstellen war dies der Fall.

Abschließend wurde versucht, eine Abschätzung über das Gefährdungspotential von Aquiferen während langanhaltender Trockenheit zu geben.

Schlagwörter: Grundwasserregimes, hydrogeologische Unterregionen, Grundwasserregime-Koeffizient, Clusteranalyse, Trockenwetterzeiten

Abstract

On the basis of time series of groundwater level and spring discharge gauges the different groundwater regimes in Germany were investigated. This was done on the one hand by the breakdown into hydrogeological sub-regions and on the other hand to the differences in the seasonal occurrence of groundwater level maximum respectively minimum. In order to identify the groundwater regimes, a cluster analysis of the groundwater regime coefficients was carried out. The clusters were analysed to different factors, such as depth to water table, distances to the nearest watercourse, Darcy-permeabilities of the aquifers, etc. and the differences between the clusters were examined. It was shown that there is a delay of the maximum in groundwater levels associated with rising depth to water table. The continental influence on the seasonal occurrence of the maxima and minima, so that there is a delay with increasing continentality, could be detected.

Furthermore, the gauges were examined for their responses to prolonged dry weather periods. For this the data of the year 2003 were used, also the year 2004 was included into the analysis in order to investigate the regenerative capacity of the aquifers. As a measure of an extreme reaction to the dry weather of 2003 the gauges were analysed on reaching the low water level H_{347} (groundwater gauges) respectively low delivery Q_{347} (spring gauges). This was the case in 50% of the groundwater gauges and 50% of spring gauges.

Finally, an attempt was made to give an assessment of the hazard potential of aquifers during prolonged dry periods.

Keywords: groundwater regime, hydrogeological sub-regions, groundwater regime coefficient, cluster analysis, dry periods

1 Einleitung

Weltweit versorgen sich derzeit etwa 2 Milliarden Menschen mit Grundwasser. Grundwasser ist der meistgenutzte Rohstoff, und wird nicht zuletzt deshalb zunehmend auch als Wirtschaftsgut betrachtet (BMU, 2008). Bei Grundwasser handelt es sich als wichtiger Teil des Wasserkreislaufes - im Gegensatz zu Erdöl, Erdgas und Erzvorkommen - um eine in vielen Fällen erneuerbare Ressource (BMU, 2008). Des Weiteren stellt das System Grundwasser einen Lebensraum für viele Organismen dar und ist wesentliche Grundlage für das Vorhandensein verschiedener Ökosysteme, wie Moorlandschaften, Feuchtwiesen oder Auengebiete.

Die Grundwassernutzungsmöglichkeiten sind vielfältig. Neben der Trinkwasserversorgung und der Bewässerung in der Landwirtschaft findet die Verwendung bzw. Nutzung von Grundwasser auch in Form von Mineral- und Heilquellen sowie im Bereich der Geothermie statt. In weiten Teilen Deutschlands ist die Grundwasserentnahme die Grundlage der Trinkwasserversorgung. Grundwasser stellt gleichzeitig eine wichtige Ressource für die Industrie dar, z.B. als Kühlwasser oder als Rohstoff in der Nahrungsmittelindustrie. Im Jahr 2010 haben die öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland etwa 5 Milliarden Kubikmeter Wasser gewonnen, wobei es sich bei einem Anteil von 70% überwiegend um Grund- und Quellwasser handelte (Statistisches Bundesamt, 2010).

Die Verfügbarkeit von Grundwasser wird in erster Linie durch die Hydrogeologie bestimmt. Diese ist innerhalb Deutschlands sehr unterschiedlich. In der Norddeutschen Tiefebene sind große Grundwasserleiter zu finden, ebenso wie z.B. im Voralpenraum und dem Oberrheingraben. Die deutschen Mittelgebirge und Alpen hingegen bestehen größtenteils aus kristallinem Grundgestein und sind dadurch weniger reich an Grundwasservorkommen. Ebenso wie die hydrogeologischen Verhältnisse in Deutschland eine hohe Heterogenität aufweisen, ist dies auch bei anderen Einflussgrößen auf die Grundwasserergiebigkeit der Fall, wie u.a. der Niederschlagsverteilung. Mögliche Gefährdungen des Grundwassers sind durch Landwirtschaft, Altlasten, Deponien, Arzneimittel, Flächenversiegelung, Absenkungen durch Bergbauaktivitäten aber auch durch mögliche Auswirkungen des Klimawandels gegeben. Infolge des Klimawandels wird von räumlichen und jahreszeitlichen Veränderungen der Niederschlagscharakteristika ausgegangen (LAWA, 2010; Umweltbundesamt, 2008). Allgemein wird angenommen, dass die Häufigkeit und Intensität von meteorologischen Extremereignissen -somit sowohl längere Niedrigwasserperioden und extremere Hochwasserereignisse- zunehmen (LAWA, 2010).

Die Betrachtung dieser Veränderungen waren Anlass der vorliegenden Arbeit, mit dem Ziel, die Grundwasserregimes in Deutschland an Hand der Hydrogeologie sowie der Messdaten zahlreicher Grundwassermessstellen (GWM) zu untersuchen und deren mögliche Reaktionen bzw. die Gefährdungspotentiale in Bezug auf Trockenwetterzeiten abzuschätzen.

Literaturrückblick

Die regionale Verteilung der Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland weist sehr große Unterschiede auf. Der Hydrogeologische Atlas von Deutschland (HAD) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterteilt diese großräumig in hydrogeologische Unterregionen, wie folgt: „Küste“, „Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergesteine“, „Mittelgebirge, vorwiegend schwach verfestigte Schichtgesteine“, „Deutsche Mittelgebirge, vorwiegend stark verfestigte Schichtgesteine und kristalline Gesteine“ sowie „Deutsche Alpen und Voralpen, vorwiegend stark gefaltete Schichtgesteine“ (BMU, 2003).

Die hydrogeologische Region „Küste“ weist nur eng begrenzt nutzbare Aquifere auf und ist von Nord- und Ostsee beeinflusst, dadurch bedingt stehen die vorhandenen Grundwässer häufig in Kontakt zu unterirdisch eingedrungenem Meerwasser (BMU, 2008). Die Regionen „Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergesteine“ erstrecken sich über weite Teile Nord- und Süddeutschlands und sind hauptsächlich aus lockeren Ablagerungen (Sand, Kies, Lehm) der jüngsten geologischen Geschichte aufgebaut (BMU, 2003). Hierzu zählt auch das größte zusammenhängende Gebiet mit reichen Grundwasservorkommen, die Norddeutsche Tiefebene. Ebenfalls ergiebige Grundwasservorkommen, welche zu genannter Unterregion zählen, findet man im Alpenvorland, im Oberrheingraben sowie im Niederrheingebiet mit der Kölner Bucht (BMU, 2008). Die hydrogeologische Region „Mittelgebirge, vorwiegend schwach verfestigte Schichtgesteine“ umfasst Gebiete, in denen überwiegend Schichtgesteine des Mesozoikums vorkommen. In diesen Regionen sind regional bedeutsame Grundwasservorkommen u.a. in den Kalkformationen des Schwäbischen und Fränkischen Juras zu finden. Die hydrogeologische Region „Deutsche Mittelgebirge, vorwiegend stark verfestigte Schichtgesteine und kristalline Gesteine“ umfasst Gebiete, in denen größtenteils Gesteine aus dem Paläozoikum anzutreffen sind, welche einen sehr geringen Porenraum ausweisen und damit allenfalls als Kluftaquifere fungieren. In diesen Gebieten, wie dem Rheinischen Schiefergebirge, Harz, etc. gibt es folglich keine bedeutenden Grundwasservorkommen. Die hydrogeologische Region „Deutsche Alpen und Voralpen, vorwiegend stark gefaltete Schichtgesteine“ nimmt nur einen sehr kleinen Teil im Süden Deutschlands ein. Hier sind durch die starke Ausbildung der topographischen, kleinräumigen Höhenunterschiede zusammenhängende Grundwasservorkommen nur in den Unterregionen der Talfüllungen ausgebildet (BMU, 2003).

In Anlehnung an den Begriff der Abflussregime für Fließgewässer versteht man unter dem Begriff **Grundwasserregime** den mittleren jahreszeitlichen Verlauf des Grundwasserstandes. Einen Überblick über die verschiedenen Einflussfaktoren auf Grundwasserregimes gibt Tóth (1970). Er definiert den Begriff Grundwasserregime als Aspekt einer gegebenen geographischen Region bezogen auf das Grundwasser und den damit verbundenen Phänomenen, beschrieben durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers. Tóth (1970) beschreibt ein Konzeptmodell zu Grundwasserregimes, in dem er die Einflussfaktoren beschreibt, definiert und mathematisch zueinander in Bezug setzt. Er definiert die folgenden Parameter: Speichervolumen, räumliche Verteilung bzw. Bewegungsmuster des Grundwassers, Abflussvolumen bzw. Geschwindigkeit, chemische Zusammensetzung, Temperatur und andere

physikalische Eigenschaften sowie die Variabilität der eben genannten Einflussgrößen unter Berücksichtigung der Zeit.

Allen et al. (2010) klassifizierten kanadische Aquifere in einem ersten Schritt unter Berücksichtigung der regionalen Hydroklimatologie bzw. über die Dynamik der Schneeschmelze in den verschiedenen Regionen (pluvial, nival, hybrid). Des Weiteren wurde untersucht, ob direkte (durch Niederschlag) oder indirekte (durch infiltrierende Fließgewässer) Grundwasserneubildung (GWN) stattfindet und so eine weitere Unterteilung vorgenommen. Eine wichtige Einflussgröße, neben der GWN, ist die Hydrogeologie, da diese das Ausmaß sowie das zeitliche Auftreten der Reaktion des Aquifers bestimmen. So reagieren z.B. permeablere Aquifere im Allgemeinen schneller auf hydrologische Ereignisse, jedoch wird die Amplitude durch die moderate bis hohe Speicherkapazität dieser Aquifere gedämpft (Allen et al., 2010). Im Gegenteil hierzu reagieren Aquifere mit geringen Permeabilitäten und geringen Speicherkapazitäten zeitverzögert mit großen Änderungen der Amplituden. Die Saisonalität der Grundwasserspiegelschwankungen wird durch die hydroklimatologischen Bedingungen (pluvial, nival, hybrid) bestimmt. Das Ausmaß und das zeitliche Auftreten der Reaktion auf Niederschlagsereignisse werden hingegen durch den dominanten Prozess der GWN (direkt oder indirekt) gesteuert (Allen et al., 2010). In der Studie wurden die Grundwasserstände der Aquifere der verschiedenen Klassen (wie z.B. pluvial/direkte GWN, nival/indirekte GWN, etc.) mit Niederschlags- und Abflussdaten aus den jeweiligen Gebieten verglichen. Dadurch konnten vermutete Konnektivitäten zum Fließgewässer nachgewiesen und die Reaktionen des Aquifers beobachten werden. Bei den Aquifern für welche die direkte GWN als dominanter Prozess identifiziert wurde, handelte es sich größtenteils um anstehendes Festgestein. Bei den Aquifern mit indirekter GWN als dominantem Prozess handelte es sich hingegen größtenteils um (glazio-) fluviale und alluviale Ablagerungen sowie Deltaablagerungen. Alle Arten von Aquifern waren in allen hydroklimatischen Regimen zu finden, wodurch eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten und somit auch Reaktionsmöglichkeiten anzutreffen sind (Allen et al., 2010).

Van Camp et al. (2010) haben mit Hilfe eines Grundwasserströmungsmodells und meteorologischen Zeitreihen die Grundwasserströme eines Aquifers in Nordbelgien über einen Zeitraum von 173 Jahren rekonstruiert. Ziel der Studie war es, die zeitliche Variabilität des Grundwasserzyklus als Funktion der GWN über die Zeit zu untersuchen. Als Inputparameter dienten Monatsdaten von Temperatur und Niederschlag sowie maximaler Kapazität des Bodenwasserspeichers. Mittels der simulierten GWN wurden Piezometerhöhen berechnet und mit gemessenen Daten verglichen. Die Schwankungen der Piezometerhöhen wurden im Anschluss hinsichtlich ihrer innerjährlichen und dekadischen Schwankungen bzw. gegenüber der Saisonalität untersucht.

Schürch (2010) verwendet eine Klassifikation analog zum Pardé-Koeffizienten für die Grundwasservorkommen der Schweiz. Um den Höhenbezug bei Grundwassermessungen zu berücksichtigen, definiert er den Grundwasserregime-Koeffizienten, welcher den charakteristischen mittleren saisonalen Verlauf der Grundwasserstände darstellt. Dieser jahreszeitliche Verlauf spiegelt somit Jahreszeiten wieder, in denen die GWN überwiegt (Anstieg der Grundwasserstände), und solche in denen der Grundwasserabfluss überwiegt

(Absinken der Grundwasserstände). Des Weiteren erfolgt eine Identifizierung der Grundwasserregime nach den hydroklimatischen Bedingungen (pluvial, pluvio-nival bzw. nivoglazial). Schürch (2010) betrachtet ebenfalls, ob ein Grundwasserregime als standorttypisch oder als importiert einzuordnen ist.

Eine ausführliche Untersuchung der Grundwasserverhältnisse in Deutschland ist im „Atlas zum Nitratstrom in der Bundesrepublik Deutschland“ (Wendland & Becker, 1993) zu finden. In diesem sind u.a. Rasterkarten zu Durchlässigkeitsbeiwerten, Grundwassergefälle, Abstandsgeschwindigkeiten sowie Verweilzeiten des Grundwassers aufgeführt. Die GWN ist eine der wichtigsten Komponenten des Grundwasserhaushalts und unterliegt einem ausgeprägten Jahresgang, wobei der versickernde Anteil der Winterniederschläge i.d.R. erheblich höher ist, als der versickernde Anteil der Sommerniederschläge (LfU, 2004). Die GWN erfolgt daher in erster Linie im Winterhalbjahr.

Nüchel (1961) analysiert Grundwassertypen nach ihrem Auftreten von Grundwasserhöchst- und Tiefstständen und zeigt deren Beziehung zur Umwelt auf. Er unterteilt in seiner Arbeit die einzelnen GWM zunächst in ihre Zugehörigkeit zu den einzelnen Flusseinzugsgebieten. Anschließend werden deren Beeinflussung durch die drei Haupteinflussfaktoren untersucht: klimatische (mit Niederschlag und Evaporation), fluviale (mit Hoch- und Niedrigwasser der Flüsse) und edaphische (Beeinflussung durch Durchlässigkeit und Gefälle des Untergrundes) Faktoren. Vor dem Hintergrund der edaphischen Regime wurde die Verspätung der Jahresgänge durch die Grundwasserspiegeltiefe, die Beeinflussung durch die Grundwasserströmungsverhältnisse sowie die gegebenen Untergrundverhältnisse näher in Augenschein genommen. Das Hauptaugenmerk in der Arbeit von Nüchel (1961) liegt auf dem jahreszeitlichen Auftreten der Maxima und Minima der Grundwasserstände. Hierzu wird u.a. für die klimaphreatischen Regime die Verspätung der Abflussjahresgänge mit zunehmender Kontinentalität beschrieben. Des Weiteren fand eine Betrachtung der Zeitintervalle zwischen maximaler und minimaler Grundwasserstände statt, wobei eine Verkürzung dieser Zeitintervalle mit zunehmender Kontinentalität festgestellt wurde.

Peters et al. (2005) untersuchten die Verteilung von Grundwasserdürre sowie deren Indikatoren. Dies geschah mittels eines nicht-linearen Bodenwassermodells bzw. eines linearen Grundwasserspeichermodells (verbunden durch einen Reservoirkoeffizienten) und eines generierten Datensatzes, welcher aus meteorologischen Zeitreihen erzeugt wurde. Allgemein sind drei Indikatoren eines Grundwassersystem für dessen Reaktion auf Dürre ausschlaggebend: die Beständigkeit (Häufigkeit oder Wahrscheinlichkeit eines guten Systemzustandes), die Belastbarkeit (Dauer der Regenerationsfähigkeit des Systems) und die Vulnerabilität (Schweregrad der Systembeeinträchtigung) (Peters et al., 2005). Zum Anderen wurden neue Indikatoren definiert, um die einzelnen Indikatoren miteinander zu verbinden. U.a. wurde ein Indikator definiert, welcher bei der Definition des Schweregrades die Dauer und Intensität mitberücksichtigt wurde, dieser lieferte in den Modellrechnungen die besten Ergebnisse. Die Analyse der Dürre-Verteilungen ergab, dass im Falle von Dürren mit geringen Wiederkehrperioden, das Defizit des Grundwasserabflusses geringer ist als das Defizit der GWN. Wohingegen bei Dürren mit hohen Wiederkehrperioden das Defizit des Grundwasserabflusses höher ist als das Defizit der GWN (Peters et al., 2005).

MacDonald et al. (2012) untersuchten die quantitativen Grundwasservorkommen des gesamten afrikanischen Kontinents. Auf Grund der regional sehr unterschiedlichen bzw. teilweise sehr schlechten Datenverfügbarkeit wurde auf Proxys zurückgegriffen. So wurde anstatt der Transmissivität die Grundwasserförderrate von Bohrlöchern verwendet. Die effektive Porosität wurde an Hand der Lithologie und Speichercharakteristika der verschiedenen Lithologien abgeschätzt. Die Mächtigkeit der gesättigten Zone der Aquifere wurde aus ehemaligen Studien und hydrogeologischen Karten ermittelt. Mit Hilfe dieser Aquifercharakteristika erstellten sie Landkarten des afrikanischen Kontinentes mit den Grundwasserspeichereigenschaften; Grundwasserspeichervermögen und Aquiferproduktivität (Grundwasserhöflichkeit).

Im Rahmen des Grundwasserbeobachtungsnetzes der Schweiz (NAQUA) werden vom BAFU (Bundesamt für Umwelt) die Grundwasserregime der Schweiz beschrieben. Demnach ist bei Lockergesteinsaquiferen der ausschlaggebende Einflussfaktor -neben den hydroklimatischen Bedingungen bzw. Regionen der Schweiz- die Anbindung an das Fließgewässer (BAFU, 2009). Lockergesteinsaquifere ohne Anbindung an ein Fließgewässer und hohen Grundwasserflurabständen von über 10 m reagieren mit einer Verzögerung von einigen Monaten auf Veränderungen der Witterungsverhältnisse (BAFU, 2009). In Kluftaquiferen findet die GWN im Winter während anhaltender Niederschlagsperioden sowie während der Schneeschmelze statt. Diese Aquifere reagieren generell langsamer auf Veränderungen der Witterung (BAFU, 2009). Bei Kartsaquiferen findet die GWN ebenfalls während der Wintermonate und der Schneeschmelze statt, das Fließverhalten ist in diesen Gesteinen jedoch sehr variabel (BAFU, 2009).

Green et al. (2011) geben einen detaillierten Literatur- und Forschungsrückblick über die quantitativen sowie qualitativen **Auswirkungen des Klimawandels auf das System Grundwasser**. Sie beleuchten die möglichen Einflüsse auf Niederschlag, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss, Bodenwasserspeicher, vadosa Zone, gesättigte Zone, GWN, Abfluss, Grundwasserspeicher, Grundwasserqualität sowie die jeweiligen Interaktionen.

Eine exakte Vorhersage von Klimaextremereignissen ist derzeit unmöglich, jedoch werden in Deutschland wahrscheinlich extreme Wetter- und Klimaereignisse wie heiße Tage, sommerliche Dürren und Starkniederschläge im 21. Jahrhundert zunehmen (Zebisch et al., 2005). Durch steigende Temperaturen erhöht sich die Verdunstung und veränderte Niederschläge beeinflussen den Oberflächenabfluss sowie die GWN (BMU, 2008).

Derzeit konzentrieren sich erste Untersuchungen auf die Veränderung der GWN unter variierenden Klimabedingungen (BMU, 2008). Das BMU nennt für Deutschland folgende Veränderungen bezüglich zukünftiger Grundwasserneubildungsraten:

- für das Bundesland Hessen zeigen Untersuchungen eine Zunahme um etwa 25% bis 2050 (im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 bis 2000);
- für Süddeutschland wird von einer Erhöhung von 10% bis 20% ausgegangen;
- für die östlichen Bundesländer, z.B. Brandenburg, zeigen erste Studien hingegen einen Rückgang der GWN von bis zu 40%.

Durch die unterschiedlichen Auswirkungen auf die GWN, werden in Zukunft dementsprechend unterschiedliche Anpassungsmaßnahmen nötig sein. In Gebieten in denen von einer sinkenden GWN ausgegangen wird, werden Maßnahmen wie eine dezentrale Versickerung von

Regenwasser oder eine Einschränkung der Flächenversiegelung notwendig sein (BMU, 2008). Laut Umweltbundesamt (2008) kann eine weitere indirekte Gefährdung für die Grundwasserkörper in Deutschland durch die Landwirtschaft entstehen. Zwar profitiert diese teilweise von steigenden Temperaturen z.B. in Weinanbaugebieten, jedoch impliziert dies auch eine erhöhte Bewässerung, was wiederum Auswirkungen auf die Grundwasserstände haben könnte (Umweltbundesamt, 2008). Durch mildere Winter kann es zu einer Reduktion der Schneedecke und früherem Einsetzen der Schneeschmelze kommen, wodurch sich nicht nur die Abflussregime der Flüsse ändern können, sondern auch das jahreszeitliche Auftreten der GWN. Seit den 1950er Jahren wurde in Bayern und Baden-Württemberg z.B. eine Verkürzung der Schneedecken-Dauer um 30-40% in Höhenlagen unter 300 m ü. NN nachgewiesen (Umweltbundesamt, 2008). Damit könnte der Einfluss der Alpen, als Wasserspeicher während des Frühjahres bzw. des Sommers geringer werden (Umweltbundesamt, 2008). Durch die geringere Wasserspeicherung in der Schneedecke kann es zu erhöhten Abflüssen des Rheins im Winter und geringeren Abflüssen während der Sommermonate kommen (Shabalova et al., 2003). Somit steigt die Gefahr für Hochwasserereignisse in den Wintermonaten und eine Verschärfung der Niedrigwassersituation während der Sommermonate in den westdeutschen Fließgewässern.

Besonders für Regionen in Ostdeutschland, welche heute schon ein annähernd semi-arides Klima aufweisen, wird davon ausgegangen, dass es zukünftig zu noch geringeren Niederschlägen und somit einer Verschärfung der Situation kommen kann (Umweltbundesamt, 2008). In ihrer Studie zur klimatischen Entwicklung in Brandenburg prognostizieren Gerstengarbe et al. (2003), dass die geringeren Niederschläge in Kombination mit erhöhter Evapotranspiration zu einem drastischen Absinken der Grundwasserstände während der Sommermonate führen kann. Die GWN könnte demnach um 42 % fallen (Gerstengarbe et al., 2003). Damit wird sich die aktuelle Situation, eines geringen Wasserdargebots, weiter verschärfen und neben der Wasserquantität auch die Wasserqualität negativ beeinflussen (Umweltbundesamt, 2008). In Regionen mit geringen Grundwasserflurabständen und hohe Konnektivität zum Fließgewässer ist die Reaktion in Trockenwetterzeiten besonders ausgeprägt. Grund hierfür ist die verstärkte Drainage des Grundwassers durch die auslaufenden oberirdischen Gewässer in den Sommermonaten (LfU, 2004).

In großen Teilen Europas ist im Sommer 2003 eine ungewöhnliche Wetterperiode mit teilweise sehr hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen aufgetreten, von der auch Deutschland betroffen war (BfG, 2006). Im November und Dezember des Jahres 2002 kam es zu überdurchschnittlich hohen Niederschlägen, gefolgt von einer niederschlagsarmen Periode zwischen Februar und September 2003 mit Temperaturen, welche im August Werte erreichten, die an die Maximalwerte der bisherigen Beobachtungszeit heranreichten. Die Monatsmittelwerte im Sommer 2003 der Niederschläge und Abflüsse näherten sich sehr häufig den niedrigsten Werten längerer Messreihen an oder unterschritten diese gar (BfG, 2006). Das **Niedrigwasserjahr 2003** hat viele Umweltämter der jeweiligen Bundesländer dazu veranlasst u.a. die Grundwassersituationen in der aufgetretenen Trockenwetterphase genauer zu untersuchen. So berichtet die Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg, dass die Lysimeterbeobachtungen im Jahr 2003 extrem niedrige GWN aus Niederschlag

verzeichneten (LfU, 2004). Es wurden außergewöhnlich lange Ausfallzeiten der Versickerungen, ausgelöst durch die permanent unterdurchschnittlichen Niederschläge ab Februar 2003, beobachtet. Für den Oberrheingraben wurde, trotz eines hohen Ausgangsniveaus durch die starken Niederschläge zur Jahreswende 2002/2003, ein Leerlaufen des Bodenwasserspeichers im Laufe des trockenen Frühjahrs binnen zwei Monaten registriert. Dies hatte zur Folge, dass es zu einem besonders markanten Rückgang der Grundwasserstände kam. An dieser Situation konnten auch die überdurchschnittlichen Niederschläge in der ersten Oktoberhälfte 2003 nichts nennenswert verändern, da diese vorrangig dazu beitrugen den Bodenwasserspeicher wieder aufzufüllen (LfU, 2004).

Die Untersuchungen des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LFW, 2005) bezüglich der bayrischen Grundwasserstände während der Niedrigwasserperiode 2003 ergaben, dass es auf Grund der hohen Grundwasserstände zu Beginn des Jahres 2003 und verschiedenen wasserwirtschaftlichen Maßnahmen nicht zu großen Problemen der Wasserversorgung betreffend kam. Dennoch wurde festgestellt, dass es an einigen GWM im Jahr 2003 zu den niedrigsten jemals gemessenen Grundwasserständen kam. Einige kleinere Wasserversorger in Oberfranken und im Bayrischen Wald mussten Zusatzwasser aus Talsperren beziehen. Es kam zu Versorgungsengpässen in einigen Gemeinden im Bayrischen Wald, welche das Wasser ausschließlich aus Quellen mit kleinen Einzugsgebieten beziehen. Das Niedrigwasser der Donau verursachte im Sommer 2003 erhebliche Probleme für die Schifffahrt, wodurch Schaden für Wirtschaft und Tourismus entstand (LFW, 2005). Im alpinen Raum erfuhren einige Aquifere der Schweiz während des Hitzesommers 2003 erhöhte GWN, da eine überdurchschnittliche Schnee- und Gletscherschmelze stattfand. Jedoch verursachte das Niederschlagsdefizit konstant niedrige Grundwasserstände in der Schweiz in den Jahren 2004 und 2005 (BAFU, 2009).

2 Problemstellung und Zielsetzung

In Zeiten in denen die Niederschläge gering sind, werden Flüsse größtenteils vom Grundwasser gespeist. Grundwassersysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften reagieren auch unterschiedlich auf Trockenwetterzeiten. Unterschiede zwischen verschiedenen Aquiferen und Regionen wurden diesbezüglich noch wenig untersucht. Vor dem Hintergrund von Zukunftsszenarien mit längeren Trockenperioden ist dies in Deutschland u.a. relevant für die Speisung des Basisabflusses und Mindestabflussgarantien für Gewässerökologie, Industrie oder Energiegewinnung, sowie für die Wasserwirtschaft, insbesondere die Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasser.

Zur Verfügung stehen unterschiedlich lange Zeitreihen von 293 Grundwasser- und 40 Quellschüttungsmessstellen innerhalb Deutschlands, welche von Irene Kohn für einen Bericht für die Bundesanstalt für Gewässerkunde ausgewählt und aufbereitet wurden (Kohn et al., 2013/ in Vorbereitung). Diese wurden bisher lediglich Fest- und Lockergesteinsaquiferen zugeordnet. Ein Teil der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Metadatenlage zu den GWM zu verbessern. Hierzu werden die Einflussfaktoren beschrieben und erläutert, welche Zusammenhänge bestehen und wie und in welcher Form die Metadatenlage hierzu verbessert werden konnte. Die Zeitreihen der Quellschüttungen und die der GWM sind nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar, da es sich einerseits um Schüttungen (l/s) und andererseits um Höhenangaben (m. ü. NN) handelt, und werden getrennt voneinander betrachtet. Das Hauptaugenmerk der Arbeit soll hier auf den GWM liegen, da diese für die Wassergewinnung eine größere Bedeutung haben.

Im ersten Schritt wird an Hand von hydrogeologischen Karten bzw. Informationen der Behörden eine genauere Abgrenzung der GWM erfolgen und die jeweiligen Regimes genauer betrachtet und etwaige Auffälligkeiten beschrieben werden. Hierbei sollen die vorhandenen GWM in hydrogeologische Untereinheiten, welche aus dem HAD entnommen werden, weiter untergliedert werden.

Anschließend wird eine Klassifizierung der Quellschüttungen bzw. der Grundwasserregimes nur an Hand der Daten, also der langjährigen mittleren Verläufe, erfolgen. Hier findet keinerlei Berücksichtigung der jeweiligen Regionen statt. Im Anschluss werden die Regimeklassen auf die unterschiedlichen Einflussfaktoren hin untersucht. Ein besonderes Augenmerk soll auf räumliche und zeitliche Unterschiede gelegt werden.

Zusätzlich wird untersucht, in wieweit ein Zusammenhang zwischen den gebildeten hydrogeologischen Unterregionen und den an Hand von den Daten gebildeten Klassen der Grundwasserregimes besteht.

Abschließend werden die Regimes in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten untersucht und genauer analysiert. Die Grundwasserstände werden hierzu in ihren Verläufen im Trockenwetterjahr 2003 bzw. ihrem Regenerationsverhalten 2004 betrachtet und eventuelle Auffälligkeiten heraus gearbeitet.

Zusammenfassend wird eine kurze Abschätzung erfolgen, welche der GWM in Trockenwetterzeiten gefährdet sein könnten, bzw. näherungsweise ein Konzept zu dieser Einschätzung vorgestellt.

Bei einer Regimeklassifikation wird die Unterteilung aufgrund der Saisonalität vorgenommen, jedoch sollte in Anbetracht der Tatsache, dass für Deutschland mit ausgeprägteren Trockenwetterperioden zu rechnen ist (LAWA, 2010), ein größeres Hauptaugenmerk auf die Vulnerabilität (bezüglich der Reaktion auf Trockenwetterzeiten) der verschiedenen Aquifere gelegt werden. Dadurch kann genauer analysiert werden, auf welche Regionen eventuell größere Probleme und damit verbundene Mehrkosten zukommen.

3 Daten und Methodik

3.1 Datendokumentation

Zur Verfügung standen 293 Grundwasserstands- und 40 Quellschüttungsreihen innerhalb der Bundesrepublik. Zu den meisten Messstellen waren hydrogeologische Angaben von den Landesämtern vorhanden, diese wurden mit hydrogeologischen Karten abgeglichen. Für einen Teil der Messstellen waren Tiefe der Verfilterung und Sohlentiefe bereits bekannt. Die Zeitreihen lagen als einheitlich formatierte Textdateien vor. Der vorhandene Datensatz wurde zusammengestellt und aufbereitet durch Irene Kohn, Mitarbeiterin des Institutes für Hydrologie, im Rahmen des Berichtes „Das hydrologische Extremjahr 2011: Dokumentation, Einordnung Ursachen und Zusammenhänge“ (Kohn et al., 2013/ in Vorbereitung) für die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Der vorliegende Datensatz zeigt sich als relativ heterogen. Der Beprobungsturnus der Messstellen ist sehr unterschiedlich, teilweise wurde monatlich beprobt oder zweiwöchentlich bis hin zu (überwiegend) wöchentlichen oder gar stündlichen Datenübertragungen. Auch der Messbeginn der Zeitreihen variiert stark zwischen 1920 und 1990. Da es sich bei den Grundwasserstandsreihen um Höhenangaben (in m. ü. NN) und bei den Quellschüttungsreihen um Schüttungen (in l/s) handelt wurden diese getrennt voneinander betrachtet.

Aus dem HAD der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) lag lediglich eine Einteilung in Fest- und Lockergesteine vor bzw. eine Abgrenzung der hydrogeologischen Regionen zwischen:

- Küste (Unterregion 1)
- Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergesteine (Unterregion 2)
- Mittelgebirge, vorwiegend stark verfestigte Schichtgesteine und kristalline Gesteine (Unterregion 3)
- Mittelgebirge, vorwiegend schwach verfestigte Schichtgesteine (Unterregion 4)
- Deutsche Alpen und Voralpen, vorwiegend stark gefaltete Schichtgesteine (Unterregion 5)

In Tabelle 3.1 sind die Landesbehörden aufgeführt, welche die Zeitreihen sowie die weiteren erhaltenen Metadaten zur Verfügung gestellt haben.

Tabelle 3.1: Übersicht der Behörden der ausgewerteten Datenreihen der Grundwassermessstellen (GWM) und Quellschüttungen (Qu)

Behörde	GWM	Qu
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)	20	7
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)	33	7
Landesanstalt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) - Regionalabteilung Süd	9	
Landesanstalt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) - Regionalabteilung Ost	4	
Landesanstalt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) - Regionalabteilung West	12	
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)	19	4
Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt - Mecklenburgische Seenplatte (StALUMS)	8	
Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt - Westmecklenburg (StALU-WM)	5	
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)	68	
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)	26	
Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG)	10	12
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)	11	2
Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW)	23	
Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR)	22	
Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie (TLUG)	23	8

3.2 Verbesserung der Metadatenlage

Um eine genauere Analyse der Messstellen vorzunehmen, war es notwendig, die einzelnen Einflussfaktoren zunächst abzugrenzen und zu versuchen, weitere Metadaten zu erhalten. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Einflussgrößen zunächst definiert, deren Bedeutung beschrieben und erläutert, inwieweit die Metadatenlage versucht wurde zu verbessern, bzw. dies gelang.

3.2.1 Geographische Lage/Geländehöhe

Die Geländehöhe verändert die klimatischen Bedingungen und der Abfluss reagiert auf eine zunehmende Höhenlage mit einer Verspätung der Jahresgänge bzw. das „Schmelzwasser-

Regime“ des Gebirges zeigt eine Verzögerung mit steigender Geländehöhe des jeweiligen Einzugsgebietes (Nüchel, 1961). Dadurch kann von einer Verspätung der Jahresgänge mit zunehmender Höhenlage ausgegangen werden (Nüchel, 1961). Der von Nüchel (1961) beschriebene Einfluss der Kontinentalität wird an Hand von der geographischen Lage der GWM untersucht. Hierbei wird untersucht ob eine Verspätung der Jahresgänge mit zunehmender Kontinentalität bzw. eine Verkürzung des Zeitintervalls zwischen Maximum und Minimum der Grundwasserjahresgänge mit zunehmender Kontinentalität festzustellen ist. Nüchel (1961) untersuchte dies mittels Maiselscher Zonen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch die Angaben zu Längen- und Breitengraden verwendet, da diese ebenfalls eine grobe Abschätzung der Kontinentalität zulassen. Denn generell steigt die Kontinentalität von Nordwesten nach Südosten innerhalb Deutschlands. Die geographischen Lagen (Längen- und Breitengrade) der Messstellen waren bekannt und konnten dem Datensatz entnommen werden. Die Geländehöhen der einzelnen GWM waren teilweise bekannt. Falls diese nicht bereits vorhanden oder online abrufbar waren, wurden die einzelnen Landesämter angeschrieben.

3.2.2 Distanz zum nächsten Fließgewässer

Die Anbindung zum Fließgewässer beeinflusst die Intensität und den Zeitpunkt der Reaktion des Aquifers auf das Abflussverhalten eines Fließgewässers (Allen et al., 2010). Da zu den einzelnen GWM keinerlei Angaben über die genaue Anbindung an das Fließgewässer -mögliche exfiltrierende oder infiltrierende Wirkungen- vorhanden waren, wurde die Distanz zum nächsten Fließgewässer als Indikator verwendet. Um den Abstand zum nächsten Fließgewässer zu ermitteln, wurde eine Nachbarschaftsanalyse mit Hilfe des Werkzeuges „near“ von ArcMap 10.1 durchgeführt. Hierzu wurde die Gewässernetzkarte aus dem HAD verwendet.

3.2.3 Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten

Als dominantester Einflussfaktor auf das jahreszeitliche Verhalten von Grundwasserständen kann das Klima betrachtet werden. Die Niederschlagscharakteristika bestimmen das Abflussverhalten der Fließgewässer sowie das der Aquifere. Für die Grundwasserspiegelhöhe jedoch ist ausschlaggebend, wie hoch der Niederschlagsanteil ist, der im Aquifer ankommt, also der eigentliche Niederschlag abzüglich der direkten Oberflächenabflüsse und der gegebenen Evapotranspiration. Dieser Anteil wird ausgedrückt durch die Grundwasserneubildungsraten. Die GWN ist als wichtige Wasserhaushaltsgröße ein Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit unserer Grundwasserressourcen (BMU, 2003). Nach DIN 4049 ist die GWN definiert als der Wasserüberschuss, welcher vom korrigierten Niederschlag (P_{korr}) nach Abzug der verdunsteten (ET_a) und schnell abfließenden Anteile (R_D) übrig bleibt (BMU, 2003):

$$GWN = P_{korr} - ET_a - R_D \quad (\text{mm/a}) \quad (3.1)$$

Die Karte der mittleren jährlichen GWN, welche dem HAD zu entnehmen ist und als Datengrundlage diente, zeigt eine räumlich sehr differenzierte Verteilung in Deutschland. Laut Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003) liegen die Werte unter 25 mm/a im Nordosten Deutschlands und über 500 mm/a in den Hochlagen der Alpen. Im

Mittel liegt die GWN bei 135 mm/a. Da es sich hierbei um 30-jährige Mittel handelt, liefern die Werte der GWN nur ein stark geglättetes Bild des realen Wasserhaushaltsgeschehens (BMU, 2003).

3.2.4 Durchlässigkeiten bzw. Transmissivitäten der Aquifere

Wie schon von Tóth (1970) ausführlich beschrieben, haben Speichergröße, Mächtigkeit bzw. Transmissivitäten der Aquifere einen großen Einfluss auf das Grundwasserregime. Denn diese Größen bestimmen zum einen das Wasserdargebot und zum anderen die Geschwindigkeit in der ein Aquifer leerläuft. Dementsprechend sind diese Größen maßgeblich u.a. für die Fragestellung, inwiefern ein Aquifer auf Trockenwetterzeiten reagiert bzw. wie schnell er sich im Anschluss daran wieder regeneriert. Die Durchlässigkeit eines Aquifers wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f ausgedrückt. Die Transmissivität ist die Summe der Produkte aus Durchlässigkeitsbeiwert und Mächtigkeit der grundwasserführenden Schicht. Dadurch wird die Transmissivität der Inhomogenität der Durchlässigkeiten in den Schichtenfolgen eher gerecht als der Durchlässigkeitsbeiwert, wodurch sie auch näherungsweise für Kluftgesteine gelten kann (Hölting & Coldewey, 2009). Die Anfragen an die einzelnen Landesämter bezüglich Transmissivitäten, Aquifermächtigkeiten bzw. Durchlässigkeitsbeiwerten blieben, bis auf vereinzelte Ausnahmen, leider erfolglos. Aus diesem Grund wurde auf die Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters aus der hydrogeologischen Übersichtskarte 1:200 000 von Deutschland (HÜK 200) des BGR zurückgegriffen. Für die einzelnen Messstellen wurden die jeweiligen Durchlässigkeitsbeiwerte des oberen Grundwasserleiters mit Hilfe des Werkzeuges „spatial join“ in ArcMap verwendet. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist wie folgt definiert (Hölting & Coldewey, 2009):

$$k_f = \frac{V}{A} * \frac{1}{i} \quad (\text{m/s}) \quad (3.2)$$

Wobei V=Volumenstrom (m^3/s), A=durchflossene Fläche (m^2) und i=hydraulischer Gradient.

Die Informationen über die Durchlässigkeitsbeiwerte sollten für den Rahmen dieser Arbeit genügen, da besonders in Lockergesteinsaquiferen die Durchlässigkeit mit der Tiefe abnimmt und somit ohnehin der obere Teil des Aquifers von größerer Bedeutung ist.

3.2.5 Hohlraumarten

Prinzipiell ist Grundwasserbewegung nur möglich, wenn zusammenhängende Hohlräume vorhanden sind (Hölting & Coldewey, 2009). Nach DIN 4049-3 werden die Hohlraumarten wie folgt unterschieden (Hölting & Coldewey, 2009):

- **Poren-Hohlräume**

Lockergesteine (Sande, Kiese) besitzen zwischen den einzelnen Körnern Poren-Hohlräume und sind in Gebieten mit Sedimenten des Jungtertiärs und Pleistozäns verbreitet, z.B. im norddeutschen Flachland, dem Oberrheingraben oder im Alpenvorland, sowie in Bach- und Flussniederungen. Festgesteine, wie verfestigte Sandsteine, können ebenfalls Poren-Hohlräume aufweisen. In Deutschland sind 46,6% der Oberfläche von Lockergesteinen bedeckt.

- **Kluft- (Trennflächen-) – Hohlräume**

Die Mittel- und Hochgebirge werden weitgehend aus Festgesteinen (z.B. Tonschiefer, Grauwacken, kristalline Gesteine, etc.) aufgebaut. In der Bundesrepublik sind 53,4% der Oberfläche Festgesteine. Die hydraulisch wirksamen Räume werden in diesen Festgesteinen generell nicht von Poren, sondern von Trennflächen gebildet.

- **Karst-Hohlräume**

Bei dieser Hohlraumart handelt es sich um eine Sonderform der Kluft-Hohlräume, da in wasserlöslichen Gesteinen, wie u.a. Kalk- und Dolomitgesteinen, zunächst Klüfte entstanden sind, welche durch die lösende Wirkung von Sickerwässern und zirkulierenden Grundwässern erweitert wurden.

- Anthropogen erzeugte Auflockerungen durch Baumaßnahmen (Tunnel, Schächte, etc.)

Auf letztere Hohlraumart wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Einerseits, durch die großflächige Auswertung und andererseits durch die eher geringe Bedeutung diese Arbeit betreffend bzw. keine Angaben hierzu vorhanden waren.

Die Hohlraumart beeinflusst die Grundwasserstände insoweit als das (unter Berücksichtigung von Gradienten, Größe des Aquifers, Anbindung zum Fließgewässer, etc.) Poren-Aquifere meist ein trägeres Verhalten aufweisen als Kluft-Aquifere. Jedoch ist oft die Speicherkapazität höher, wodurch große Poren-Aquifere tendenziell seltener trockenfallen. Die Hohlraumarten der einzelnen Aquifere wurden, wie die Durchlässigkeitsbeiwerte, der HÜK 200 entnommen. Der HÜK 200 sind folgende Klassen zu entnehmen; „Poren“, „Kluft/Poren“, „Kluft“ und „Kluft/Karst“.

3.2.6 Mittlerer Grundwasserflurabstand

Der mittlere Grundwasserflurabstand ist definiert als Differenz zwischen der Geländeoberkante (topographischer Höhe) und dem mittleren Grundwasserstand des Grundwasserleiters (Wendland & Becker, 1993). Der mittlere Grundwasserflurabstand gibt Aufschluss über die Versickerungsdauer, welche das Bodenwasser benötigt, um den Aquifer zu erreichen. In Regionen, in denen geringe Grundwasserflurabstände vorliegen, ist der Anteil des verdunstenden Grundwassers deutlich höher als in Regionen mit großen Flurabständen (Wendland & Becker, 1993). Regionen mit geringen Grundwasserflurabständen (< 1 m) sind in Deutschland fast ausschließlich an den Küstengebieten der Nordsee, an Talauen der Niederungsgebiete entlang der Flussläufe zu finden (Wendland & Becker, 1993). Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass mit steigenden Grundwasserflurabständen eine Verspätung der Jahresgänge einhergeht (Nüchel, 1961). Um die mittleren Grundwasserflurabstände der einzelnen Messstellen zu ermitteln, wird zunächst das langjährige Mittel der einzelnen Grundwasserspiegelhöhe gebildet und dann die Differenz zur Geländeoberkante berechnet.

3.2.7 Tiefe der Verfilterung/Sohltiefe

Die Verfilterungstiefen bzw. Sohliefen der einzelnen GWM geben, wie der mittlere Grundwasserflurabstand, Aufschluss über die Versickerungstrecke des Bodenwassers. Falls die Verfilterungstiefen bzw. Sohliefen der einzelnen GWM nicht bereits vorhanden oder online

abrufbar waren, wurden die einzelnen Landesämter angeschrieben. In diesem Zusammenhang wurden bei den jeweiligen Landesämtern ebenfalls Informationen nach dem Grundwasserstockwerk erbeten. Leider erfolgte hier nur in sehr vereinzelt Fällen eine Auskunft.

3.3 Datenanalyse

Die Berechnungen fanden ausschließlich mit dem Statistikprogramm „R“ (RStudio/R-2.15.1) statt. Des Weiteren wurde ArcMap 10.1 zur Ermittlung weiterer Metadaten (Durchlässigkeiten, Hohlraumart, Distanz zum Fließgewässer, mittlere jährliche GWN) sowie zur Kartendarstellung verwendet.

3.3.1 Unterteilung nach hydrogeologischen Unterregionen

Zunächst wurden für die 293 GWM langjährige Monatsmittel gebildet und zur Normierung diese als Abweichung vom jeweils kleinsten langjährigen Monatsmittel dargestellt. Es folgte eine Gruppierung nach den 5 hydrogeologischen Regionen aus dem HAD, welche noch erweitert wurde, indem die Region „Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergesteine“ (Unterregion 2) weiter untergliedert wurde in Rhein (Unterregion 2b), Donau (Unterregion 2c) und Norddeutsche Tiefebene/Norden (Unterregion 2a).

Die Unterteilung erfolgte in R mittels Werten, welche aus ArcGIS durch das Verschneiden mit den Flussgebieten 1. Ordnung, erhalten wurden. Eine weitere Unterteilung war auf Grund uneinheitlicher Angaben (einerseits von Landesämtern sowie auch in den zur Verfügung gestandenen hydrogeologischen Karten) im Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich.

3.3.2 Pardé-Koeffizient für Quellschüttungen

Der dimensionslose Pardé-Koeffizient (PK) stellt das Verhältnis zwischen dem langjährigen Monatsmittel ($MQ_{(Monat)}$) und dem langjährigen Jahresmittel ($MQ_{(Jahr)}$) dar und wird für die Definition der Abflussregime von Fließgewässern verwendet. Für natürliche Fließgewässer weist der PK erfahrungsgemäß einen Wertebereich von 0 bis 3,4 auf (Schürch 2010 nach Weingartner & Aschwanden, 1992).

$$PK_{(Monat)} = \frac{MQ_{(Monat)}}{MQ_{(Jahr)}} \quad (3.3)$$

Der Pardé-Koeffizient eignet sich prinzipiell auch für die Regimebeschreibung von Quellabflüssen (Schürch, 2010). Alljährliche singuläre Ereignisse, wie die Schneeschmelze, führen zu großen Schwankungsbereichen zwischen maximalem und minimalem PK. Ein mittlerer Schwankungsbereich ist z.B. bei Karstquellen mit hoher kurzfristiger Abflussvariabilität zu beobachten, da die raschen Abflussschwankungen während eines Niederschlagsereignisses nur wenig Einfluss auf das Monatsmittel haben. Kleine Schwankungsbereiche findet man z.B. bei langsam reagierenden Kluftgesteinsquellen, die einen über das Jahr relativ konstanten Abfluss aufweisen (Schürch, 2010).

3.3.3 Berechnung des Grundwasserregime-Koeffizienten

Bei der Beschreibung der Grundwasserregimes handelt es sich um Höhenangaben des Grundwasserstandes (m. ü. NN). Dies hätte zur Folge, dass bei der Berechnung nach der oben beschriebenen Formel der Koeffizient abhängig von der Höhe des Bezugspunktes ist und es würden bei gleichem Jahresgang unterschiedliche Werte ermittelt werden, je nachdem ob der Aquifer topographisch hoch oder niedrig liegt (Schürch, 2010). Deshalb ist der Pardé-Koeffizient nur bedingt geeignet und wurde von Schürch (2010) wie folgt abgewandelt. Um den Höhenbezug zu eliminieren werden das langjährige Monatsmittel $MH_{GW(Monat)}$ und das langjährige Jahresmittel $MH_{GW(Jahr)}$ zunächst als Abweichung vom jeweils kleinsten langjährigen Monatsmittel $MH_{GW(Min)}$ beschrieben und erst anschließend zueinander in Beziehung gesetzt. Dadurch erhält man den dimensionslosen Grundwasserregime-Koeffizienten (GWRK) nach Schürch (2010):

$$GWRK_{(Monat)} = \frac{MH_{GW(Monat)} - MH_{GW(Min)}}{MH_{GW(Jahr)} - MH_{GW(Min)}} \quad (3.4)$$

Durch eine solche Standardisierung können Grundwasserregimes unterschiedlicher Messstellen in Form des GWRK unabhängig von deren Höhenlage verglichen werden (Schürch, 2010). In Abb. 3.1 ist die Herleitung des dimensionslosen GWRK für die GWM „GWM PE 2 Ebnet“ (bw-gwm-11) dargestellt.

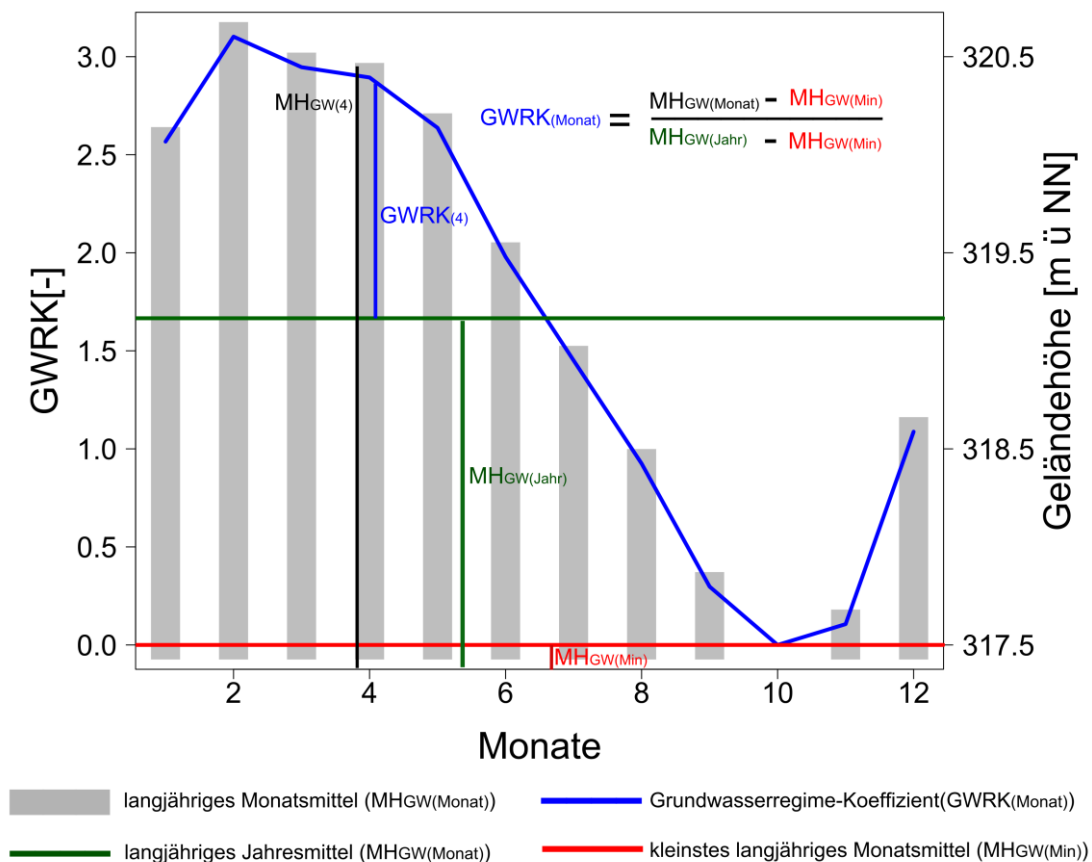


Abb. 3.1: Bestimmung des Grundwasserregime-Koeffizienten ($GWRK_{(Monat)}$) aus dem langjährigen Monatsmittel ($MH_{GW(Monat)}$), dem langjährigen Jahresmittel ($MH_{GW(Jahr)}$) und dem kleinsten langjährigen Monatsmittel ($MH_{GW(Min)}$) des Grundwasserstandes am Beispiel „GWM PE 2 Ebnet“ (Datenquelle: LUBW)

Da per Definition der geringste GWRK einer Messstelle Null beträgt ist dieser jedoch nicht direkt vergleichbar mit dem PK, welcher nur bei einem zeitweisen Versiegen der Quelle den Wert Null annimmt. Aus diesem Grund werden die Quellabflüsse später nur kurz betrachtet und das Hauptaugenmerk der Auswertung liegt auf den GWM, da dieser von größerer Bedeutung sind.

3.3.4 Clusteranalyse

Um eine Klassifizierung der verschiedenen Grundwasserregimes vorzunehmen, wurde eine Clusteranalyse der berechneten Pardé-Koeffizienten (der Quellschüttungen) bzw. der Grundwasserregimekoeffizienten (der GWM) mittels R durchgeführt. Hierzu wurde die Funktion `hclust()` (hierarchische Clustermethode) des Standardpaketes `{stats}` verwendet. Ziel bei der Clusteranalyse ist es, Gruppen zu bilden, welche eine hohe Intracluster-Homogenität und eine geringe Intercluster-Homogenität besitzen (Stein & Vollnhals, 2011). Bei einer clusteranalytischen Untersuchung werden die einzelnen Untersuchungsobjekte in ihrer Ähnlichkeit bzw. Distanz zueinander betrachtet und dies wird als Ähnlichkeits- bzw. Distanzmatrix dargestellt. Im Falle der Quellschüttungen wurde das euklidische Distanzmaß gewählt (Stein & Vollnhals, 2011). Bei der euklidischen Distanz handelt es sich um ein gebräuchliches Abstandsmaß und die gewünschte Distanzmatrix kann durch die R-Funktion `dist()` erzeugt werden.

$$d(q, 2)_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (3.5)$$

Als Ähnlichkeitsmaß zu deren Berechnung diente im Falle der Grundwasserregimekoeffizienten der Pearson Korrelationskoeffizient, da dieser die Saisonalität am besten widerspiegelt, dieser ist wie folgt definiert (Puhani, 2005).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.6)$$

Die erzeugte Ähnlichkeitsmatrix wurde mittels R in eine Distanzmatrix umgewandelt, da diese für die R-Funktion `hclust()` notwendig ist.

Die Anzahl der Cluster wurde mit Hilfe eines Agglomerationsplot bestimmt. Hierbei wird ein sprunghafter Anstieg der Distanzen in der Agglomerationsübersicht als Indiz für einen besonders starken Informationsverlust beim Zusammenfassen zweier Cluster gewertet. Zur Visualisierung der Clusteranalyse diente ein Dendrogrammplot.

Basierend auf der Erstellung der Distanzmatrix wurde mittels eines Clusteralgorithmus die Einteilung in die verschiedenen Cluster vorgenommen. Es wurde ein agglomeratives Verfahren gewählt, hierbei ist das Ziel das sukzessive Zusammenfassen der ungruppierten Fälle durch Fusion zweier Objekte (oder Cluster) zu einem neuen Cluster mit dem Endresultat eines letzten großen Clusters (Stein & Vollnhals, 2011). Als Algorithmus wurde das Ward-Verfahren angewandt, welches darauf beruht, dass die beiden Cluster zusammengefügt werden, welche die

minimalste Erhöhung der Varianz im neuen Cluster (durch das Hinzufügen weiterer Objekte) erzeugen (Stein & Vollnhals, 2011).

$$D_W(C_j, C_k) = \frac{n_j n_k}{n_j + n_k} \|\bar{x}_j - \bar{x}_k\|^2 \quad (3.7)$$

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass eine Berücksichtigung der Heterogenität in den Clustern gemessen durch die Binnenvarianz, zu welcher alle Objekte eines Clusters gemäß ihrem Abstand zum Clusterschwerpunkt gleichmäßig beitragen (Wiedenbeck & Züll, 2001).

3.3.5 Vergleich der Cluster mit den Metadaten

An Hand der gewonnen Metadaten wurde versucht, die durch die Klassifizierung gewonnen Cluster abzugleichen bzw. die Unterschiede näher zu erläutern. Hierzu werden zur Darstellung in erster Linie Boxplots verwendet, da hierdurch der Schwankungsbereich, Median und mögliche Ausreißer der einzelnen GWM der jeweiligen Cluster am besten sichtbar gemacht werden können. Grundsätzlich gilt, dass die einzelnen Einflussgrößen nicht komplett getrennt voneinander betrachtet werden können, da sie sich teilweise gegenseitig beeinflussen, abschwächen bzw. verstärken. Lockergesteins-Grundwasserleiter ohne Anbindung an ein Fließgewässer und hohem Grundwasserflurabstand reagieren z.B. generell einige Monate verzögert auf sich verändernde Witterungsverhältnisse (BAFU, 2009). Dennoch werden zunächst die Einflussfaktoren -der Übersichtlichkeit wegen- getrennt voneinander in Augenschein genommen und erst am Ende zusammengeführt.

3.4 Vergleich der hydrogeologischen Unterregionen mit den Clustern des GWRK

Von der Annahme ausgehend, dass in bestimmten hydrogeologischen Unterregionen unterschiedliche Grundwasserregime bzw. Tendenzen zu erwarten sind, werden diese unterschiedlichen Ansätze, Betrachtung der Regionen bzw. Daten, miteinander verglichen.

3.5 Untersuchung der Messstellen in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten am Beispiel des Jahres 2003

Vor dem Hintergrund des Trockenwetterjahres 2003 sollen die GWM in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten näher untersucht werden. Um mögliche längerfristige Auswirkungen, besonders in der Regenerationsfähigkeit der Aquifere wird das Folgejahr (2004) in die Betrachtung mit einbezogen.

Für die Untersuchung von Niedrigwasserabflüssen wird u.a. der Q_{347} verwendet. Dieser entspricht dem Abfluss-Tagesmittelwert, der im zehnjährigen Mittel an 95% der Tage -d.h. im Durchschnitt an 347 Tagen pro Jahr- erreicht oder überschritten wird (Pfaundler et al., 2011). In Anlehnung hierzu wird der Niedrigwasserstand H_{347} bzw. das 5%-Quantil der GWM im

jeweiligen Beobachtungszeitraum gebildet. Die Berechnung erfolgt in R mittels der Funktion `quantile()` aus dem Standardpaket `{stats}`.

Um eine Aussage über das Verhalten der GWM des Jahres 2003/2004 im Vergleich zu dem langjährigen Verhalten zuzulassen, soll untersucht werden, welche GWM mindestens einmal in den Jahren 2003 bzw. 2004 im Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} lagen. Die so getroffene Auswahl lässt die Aussage zu, welche bzw. wie viele GWM im genannten Zeitraum eine extreme Reaktion auf das Trockenwetterjahr 2003 zeigten.

Für diese Auswahl wiederum soll untersucht werden, ob folgende Faktoren zutreffen, von denen ausgegangen werden kann, dass sie -besonders in Kombination- zu einer extremen Reaktion und damit mit einem erhöhten Gefährdungspotential während Trockenwetterzeiten führen;

- geringe Grundwasserflurabstände
- geringer Abstand zum nächsten Fließgewässer
- hohe Durchlässigkeiten
- geringe GWN
- geringe räumliche Ausdehnung

Die geringe räumliche Ausdehnung ist nicht an Hand der Metadaten ersichtlich und kann dementsprechend nicht berücksichtigt werden. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden die GWM, welche extreme Reaktionen im Trockenwetterjahr 2003 bzw. im Folgejahr 2004 zeigten, mit jenen verglichen, die nicht im Bereich des berechneten Niedrigwasserstandes H_{347} lagen.

Die für den Bericht für die BfG von Kohn et al. (2013/ in Vorbereitung) verwendete Darstellung der Quantile der langjährigen Werte und zur Verfügung gestellten R-Skriptes wird verwendet, um sich einen groben Überblick der Reaktionen der Jahre 2003 bzw. 2004 im Vergleich zu den langjährigen Werten zu erlauben. Hieraus werden beispielhaft GWM ausgewählt, welche typische Reaktionen verdeutlichen sollen.

Die Auswertung erfolgt erneut in erster Linie für die GWM, da die Quellschüttungen, wie bereits erwähnt, für die Wasserversorgung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Quellschüttungen werden nur kurz in Betracht gezogen.

4 Ergebnisse

4.1 Unterteilung nach hydrogeologischen Einheiten

In Abb. 4.1 sind die normierten langjährigen mittleren Verläufe der GWM, unterteilt in die hydrogeologischen Unterregionen, dargestellt. Es wird deutlich, dass in den meisten Fällen die GWN am Anfang des Jahres stattfindet. Es zeichnen sich deutlich Schneeschmelze und Niederschläge (unter Berücksichtigung der Evapotranspiration) ab, welche zu einer Auffüllung des Speichers führen. In den meisten Fällen zeigt sich, dass die Grundwasserpegel gegen Ende der Sommermonate ihre Minima erreichen. Generell zeigen die langjährigen mittleren Grundwasserstände der Festgesteinsaquifere (Unterregion 2c, 3 und 4) höhere Amplituden, als die der Lockergesteinsaquifere (Unterregion 1, 2a, 2b und 5). Wobei der Unterregion 2c hier eine besondere Rolle zukommt, da für sie zwar vorwiegend Lockergestein zugeordnet wird, jedoch sich einige GWM im Voralpenraum in tieferen Stockwerken und damit im Bereich der Molasse, einem Festgestein befinden dürften. Diese unterschiedlichen Verläufe (zwischen Fest- und Lockergesteinen) in dieser Unterregion werden in der Abb. 4.1 sichtbar. Die im Folgenden beschriebenen Werte der einzelnen hydrogeologischen Unterregionen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. In Abb. 4.1 ist in der unteren linken Graphik die deutschlandweite Verteilung der GWM nach den jeweiligen hydrogeologischen Unterregionen dargestellt.

Bei den sechs GWM in der hydrogeologischen Unterregion 1 „**Küste**“ handelt es sich um Porenaquifere mit relativ geringen Flurabständen (0,6 - 3,2 m, im Mittel 1,5 m). Die GWM haben ihr Maximum im Januar/Februar und ihr Minimum im August, bis auf eine Ausnahme (Maximum im April und Minimum im November). Die mittlere Geländehöhe der GWM liegt bei 5,5 m. ü. NN und die mittlere langjährige GWN beträgt im Mittel 197 mm/a. Der jahreszeitliche Verlauf der langjährigen Monatsmittel zeigt bei allen Messstellen einen flachen Verlauf mit einer mittleren Amplitude von 0,36 m.

Bei der hydrogeologischen Unterregion 2a „**Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergestein (Norden)**“ handelt es sich um weitläufig zusammenhängende Porenaquifere des norddeutschen Tieflandes und damit um verhältnismäßig große Speicher. Diese weisen grundsätzlich ein trägeres Verhalten auf. Der größte Teil dieser GWM zeigt eher einen flachen Verlauf der jahreszeitlichen Amplituden von im Mittel 0,44 m. Der größte Teil der GWM hat sein Maximum im März und April bzw. sein Minimum im August bis November, mit einem Schwerpunkt im Oktober. Diese Gruppe stellt mit 126 GWM die größte Gruppe der hydrogeologischen Unterregionen. Die mittlere Geländehöhe liegt bei 46 m und die Flurabstände sind mit einem Mittel von 4,8 m eher unterdurchschnittlich.

Die hydrogeologische Unterregion 2b „**Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergestein (Rhein)**“ zeichnet sich durch ebenfalls relativ geringe Schwankungen der langjährigen Mittel (0,55 m) aus, bis auf eine Ausnahme (GWM „Ebnet“), welche stark durch die Bedingungen im Schwarzwald geprägt ist. Die 36 GWM zeigen ein typisches Verhalten für

Lockergesteinsaquifere mit großen Mächtigkeiten und hohen Durchlässigkeiten, wie sie im Oberrheingraben zu erwarten sind. Die mittlere Geländehöhe der GWM liegt bei 135 m und die Flurabstände sind, mit 4,5 m im Mittel, eher unterdurchschnittlich.

Bei der hydrogeologischen Unterregion 2c „**Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergestein (Donau)**“ handelt es sich um 23 GWM im Bereich der Molasse und damit einem Festgestein mit großer Mächtigkeit bzw. um GWM im Bereich größerer Flussläufe, welche wiederum dem Lockergestein zugeordnet werden können. Die Messstellen in dieser Unterregion liegen mit einer durchschnittlichen Geländehöhe von 508 m. ü. NN verhältnismäßig hoch. Auch die GWN ist mit 272 mm/a hoch und die GWM zeigen im Mittel hohe Flurabstände (12,4 m). Es ist eine jahreszeitliche Präferenz der Maxima zu erkennen, da einige GWM große Amplituden mit einem verspäteten Maximum bzw. einem sekundären Maximum aufweisen, andere hingegen sehr flache jahreszeitliche Verläufe aufweisen. Vermutlich handelt es sich bei letzteren, um die GWM in Bereichen der großen Flussläufe und bei den anderen um GWM in Alpennähe, wodurch die Maxima durch die verspätete alpine Schneeschmelze zu erklären wäre.

Die 83 GWM der hydrogeologischen Unterregion 3 „**Mittelgebirge, vorwiegend schwach verfestigt Schichtgesteine**“ zeigt die größten Amplituden (im Mittel 0,99 m) in den langjährigen Monatsmitteln, wobei hier besonders auf die Skalierung zu achten ist, da diese sich von den anderen Graphiken unterscheidet. Die mittlere Geländehöhe liegt bei 228 m. ü. NN und die Grundwasserflurabstände liegen im Mittel bei überdurchschnittlichen 12,5 m. Die Maxima zeigen sich größtenteils im März bis Juni und die Minima größtenteils im September, Oktober bzw. November. Hierbei handelt es sich um kleine Festgesteinsaquifere, wie sie beispielsweise im Rheinischen Schiefergebirge auftreten. In diesen Aquifern verhalten sich im jahreszeitlichen Verlauf ihrer Grundwasserstände dynamischer, da es sich um Kluft- oder Karstaquifere handelt. Einige GWM zeigen jedoch auch flache Verläufe, bei denen es sich um die GWM im Bereich von etwas weitläufigeren Tälern bzw. Flussläufen handeln dürfte.

Die 17 GWM der hydrogeologischen Unterregion 4 „**Mittelgebirge, vorwiegend stark verfestigte Schichtgesteine und kristalline Gesteine**“ zeigen ebenfalls wie Unterregion 3 hohe Amplituden (im Mittel 0,85 m). Hierbei handelt es sich ebenfalls um kleinere Festgesteinsaquifere. Die Maxima zeigen sich größtenteils im März bzw. April und die Minima im September, Oktober bzw. November. Die mittlere Geländehöhe der GWM liegt bei 280 m. ü. NN und sie zeigen im Mittel Grundwasserflurabstände von ca. 10 m.

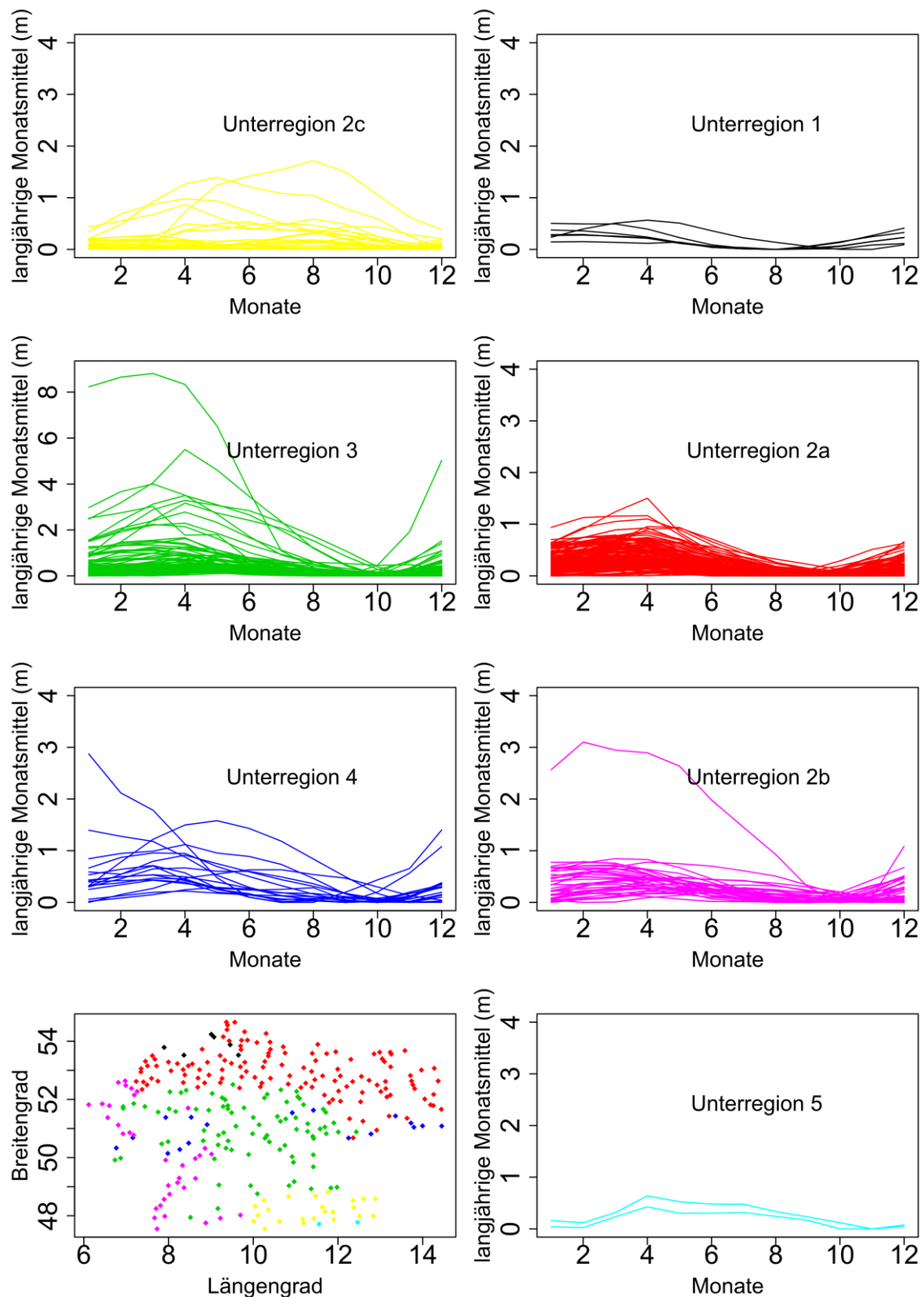


Abb. 4.1: Langjährige Verläufe der Grundwasserspiegelhöhen der GWM in den jeweiligen hydrogeologischen Unterregionen sowie deren deutschlandweite Verteilung (links unten)

Die zwei GWM aus der hydrogeologischen Unterregion 5 „**Deutsche Alpen und Voralpen, vorwiegend stark gefaltete Schichtgesteine**“ weisen eine mittlere Geländehöhe von 603 m. ü. NN auf und zeigen eine überdurchschnittliche GWN von 600 mm/a. Der mittlere Flurabstand

beträgt 4,5 m. Der relativ flache, jahreszeitliche Verlauf zeigt bei den Messstellen ein primäres Maximum im April und ein sekundäres Maximum im Juli, die Minima liegen im November.

In Abbildung 4.2 sind die Boxplots der Standardabweichungen der jahreszeitlichen Amplituden zwischen Maxima und Minima der einzelnen GWM, unterteilt in die hydrogeologischen Unterregionen, dargestellt. Auch hier wird sichtbar, dass die GWM in den Mittelgebirgsregionen (Unterregion 3 und 4) die größten Schwankungen zeigen. Ebenfalls zeigt sich hier, dass einige GWM der Unterregion 3 sehr hohe Amplituden aufweisen und in den Boxplots somit die auffälligsten Ausreißer zeigen. Auch die den Unterregionen 2a, 2b und 2c sind einzelne Ausreißer zu erkennen, der größte Teil der GWM jedoch zeigt, wie die der Unterregionen 1 und 5 geringe Standardabweichungen und damit eher flache langjährige Verläufe der Grundwasserstände.

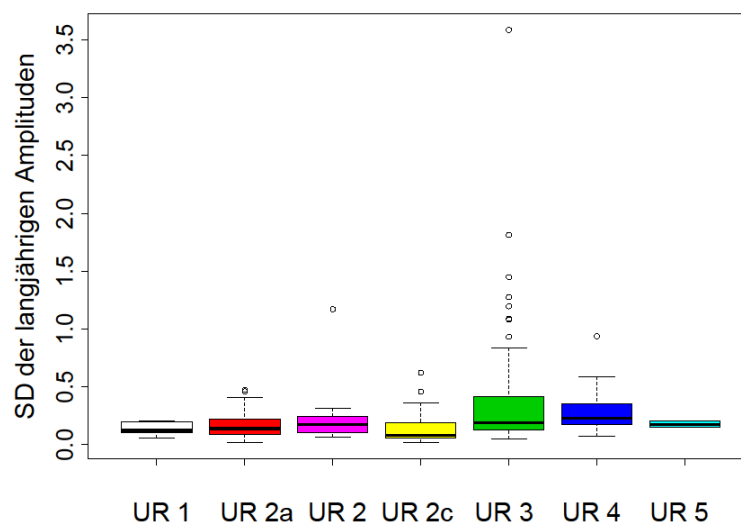


Abbildung 4.2: Standardabweichungen der langjährigen Amplituden der hydrogeologischen Unterregionen (UR)

Tabelle 4.1: Kenngrößen der hydrogeologischen Unterregionen

Unterregion	1	2a	2b	2c	3	4	5	Gesamt
Anzahl Messstellen	6	126	36	23	83	17	2	293
Mittlere Geländehöhe (m.ü.NN)	5,5	46,1	135,3	508,0	227,9	279,9	603,1	161,1
Mittlerer Flurabstand (m)	1,5	4,8	4,5	12,4	12,5	9,9	4,5	7,8
Mittlerer Schwankungsbereich Amplituden (m)	0,36	0,44	0,55	0,43	0,99	0,85	0,53	0,63
Mittlere GWN (mm/a)	197	129	154	272	109	100	600	140

Die 40 Messstellen der Quellschüttungen befinden sich in den hydrogeologischen Unterregionen 3 und 4 sowie eine Messstelle in der Unterregion 5 und damit ausschließlich in Festgesteinsbereichen, Mittelgebirge bzw. Alpen.

4.2 Clusteranalyse Pardé-Koeffizienten

Für die Quellschüttungen wurde der PK ermittelt. Der Agglomerationsplot, welcher dem Anhang A beigelegt ist, zeigt den ersten sprunghaften Anstieg im Übergang von 5 zu 4 Clustern. Da ein solcher sprunghafter Anstieg als Informationsverlust zu werten ist, wurde eine Clusteranzahl von 5 gewählt. Zur Visualisierung der 5 gebildeten Cluster dient der in dargestellte Dendrogrammplot, welcher ebenfalls dem Anhang A zu entnehmen ist.

In Abb. 4.3 ist das Ergebnis der Clusteranalyse der PK dargestellt. Alle Messstellen haben ihren maximalen PK im Winter bzw. Frühling und den minimalen PK im Spätsommer bzw. Herbst. Die Amplituden hingegen sind sehr unterschiedlich. Die Messstellen des Clusters 3 zeigen einen sehr flachen jahreszeitlichen Verlauf. Die PK der Cluster 4 und 5 hingegen zeigen sehr steile Verläufe und Cluster 1 und 2 befinden sich zwischen diesen beiden Extremen.

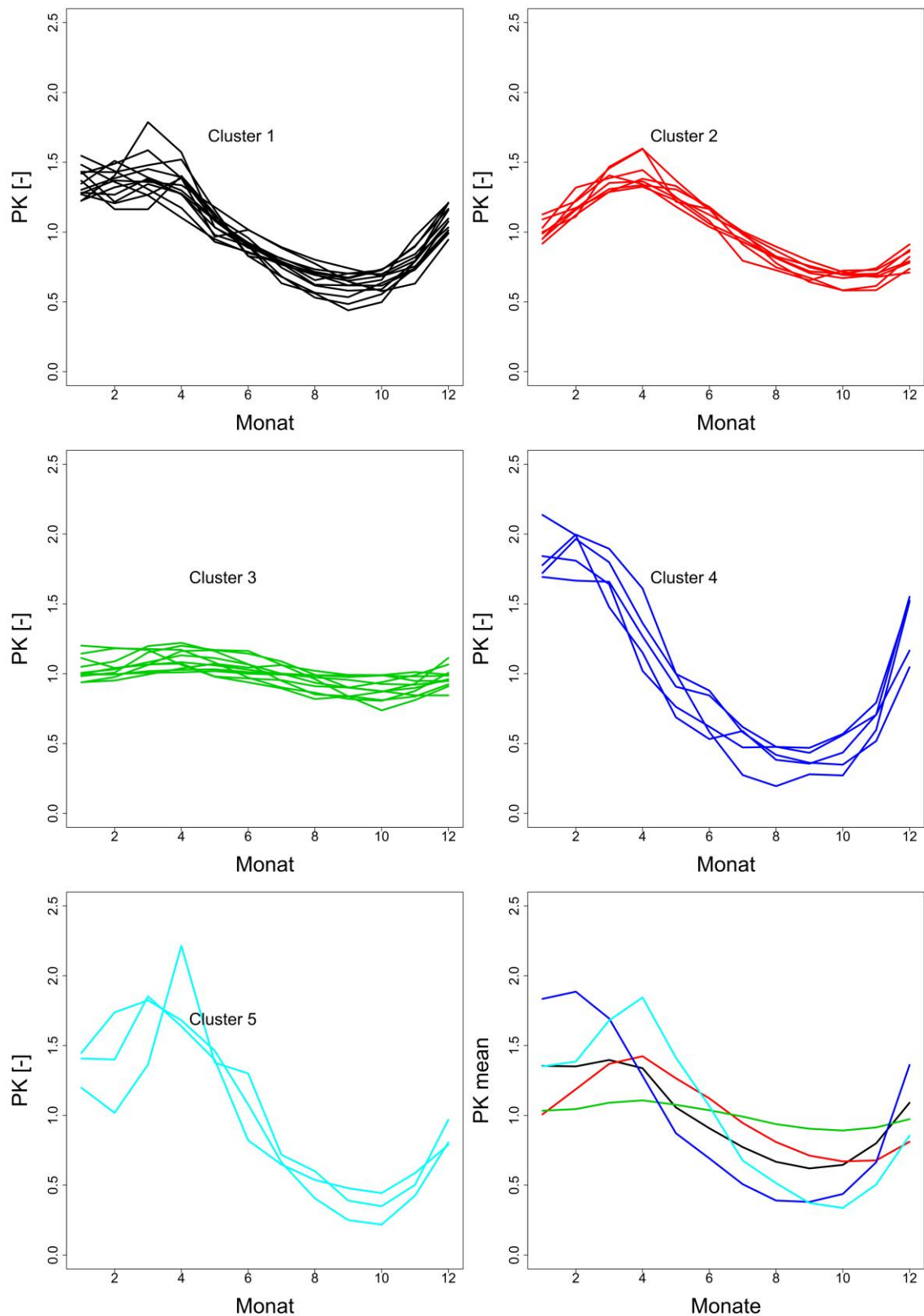


Abb. 4.3: Cluster des PK der Quellschüttungen sowie die mittleren langjährigen Verläufe (PK mean) der Cluster

In Abb. 4.4 sind die Schwankungsbereiche, zwischen maximalem und minimalem PK, der einzelnen Cluster als Boxplots dargestellt. In Tabelle 4.2 sind die im Folgenden beschriebenen Werte der jeweiligen Cluster zusammengefasst. Die Messstellen in Cluster 3 zeigen nur sehr

geringe Schwankungen und verlaufen demnach sehr flach, wie schon in Abb. 4.3 zu sehen ist. Die steilsten Verläufe bzw. höchsten Maxima des PK zeigen Cluster 5 bzw. 6 mit Werten bis zu 2,2.

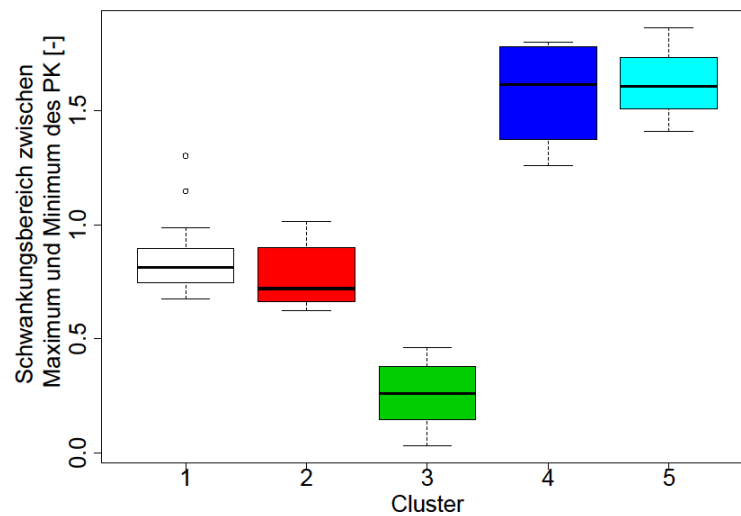


Abb. 4.4: PK-Schwankungen der jeweiligen Cluster

Den geringsten Schwankungsbereich des PK weist **Cluster 3** auf; die Werte schwanken im Mittel nur um 0,25. Hierbei handelt es sich vermutlich um Messstellen in Regionen in denen die Schneeschmelze nur einen geringen Einfluss auf das Abflussgeschehen hat. **Cluster 1** bzw. **2** weisen einen mittleren Schwankungsbereich auf und liegen im Mittel bei 0,87 bzw. 0,78. Hierbei könnte es sich um Karstquellen handeln, bei denen die hohen Abflussschwankungen als Reaktion auf Niederschläge sich nur geringfügig auf die Monatsmittelwerte auswirken. Die größten Schwankungsbereiche des PK zeigen die **Cluster 4** (1,56) und **5** (1,63), hier ist davon auszugehen, dass die starken Niederschläge im Winter bzw. die Schneeschmelze die hohe innerjährliche Variabilität verursacht.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Cluster des PK der Quellschüttungen und ihrer Kenngrößen

Cluster	1	2	3	4	5	Gesamt
Anzahl Messstellen	13	8	11	5	3	40
Mittleres Maximum PK	1,48	1,43	1,13	1,93	1,96	1,47
Mittleres Minimum PK	0,61	0,66	0,87	0,36	0,34	0,64
Schwankungsbereich	0,87	0,78	0,25	1,56	1,63	0,83
Monat der Maxima PK	2,6	3,9	3,6	1,4	3,3	3,1
Monat der Minima PK	9,2	10,2	10	9	10	9,4
Zeitintervall zwischen Max und Min	6,6	6,3	6,4	7,6	6,7	6,6

4.3 Clusteranalyse der Grundwasserregime-Koeffizienten

Die maximalen GWRK liegen im Mittel bei 2,1, der Median ebenfalls. Die Schwankungsbereiche sind sehr unterschiedlich; zwischen (per Definition) 0 und einem maximalen GWRK von 1,2 bzw. 3,1.

Der Agglomerationsplot, welcher dem Anhang A beigelegt ist, zeigt den ersten sprunghaften Anstieg im Übergang von 6 zu 5 Clustern. Da ein solcher sprunghafter Anstieg als Informationsverlust zu werten ist, wurde eine Clusteranzahl von 6 gewählt.

In Abb. 4.5 sind die einzelnen Cluster, die an Hand der Grundwasserregime-Koeffizienten der GWM gebildet wurden, dargestellt. Die saisonalen Schwankungen der Grundwasserspiegel sind gut zu erkennen. Des Weiteren ist deutlich sichtbar, dass bei dem größten Teil der GWM (**Cluster 1, 2, 3 und 4**) die GWN, durch die Anreicherung der Winterniederschläge, in den ersten Monaten des Jahres stattfindet. Diese Grundwasserregime zeigen ihre Maxima in den Monaten Januar bis April. Bei diesen GWM, welche mit 84% den größten Anteil der Messstellen ausmachen, fällt die Niedrigwasserperiode in den Spätsommer bzw. Herbst. Aus dieser jahreszeitlichen Verteilung der Hoch- und Niedrigwasserperioden kann hier auf ein pluvial geprägtes Regimes geschlossen werden. Die GWN findet hier hauptsächlich als Folge der jährlichen Niederschlagscharakteristika (unter Berücksichtigung der Evapotranspiration) statt. Die GWM des **Cluster 5** zeigt sein Maximum im Juni und das späteste Maximum weist **Cluster 6** im August bzw. September auf. Die Niedrigwasserperiode der GWM in **Cluster 5** fällt somit meist in den Zeitraum zwischen November und Februar, mit einer Häufung im Dezember. Die GWM des **Clusters 6** zeigen ihre Minima hingegen größtenteils im Monat März, jedoch sind in diesem, mit nur 7 GWM kleinsten, Cluster auch jeweils eine GWM mit einem Maximum im Dezember, Februar bzw. Juni zu vermerken. Die **Cluster 5 und 6** weisen eher alpine Regimes auf, bei denen die GWN generell im Frühling und Sommer während der Schnee- bzw. Gletscherschmelze stattfindet. Da jedoch in Deutschland, zumindest in den Mittelgebirgsregionen (in denen besonders viele GWM aus **Cluster 5** fallen), nicht von alpinen Bedingungen gesprochen werden kann, ist davon auszugehen, dass hier andere Faktoren (wie Anbindung an das Fließgewässer, Grundwasserflurabstand oder sommerliche Starkniederschläge im Stau der Gebirge) ausschlaggebend für das jahreszeitlich späte Auftreten der Maxima sind. Die GWM des **Clusters 5** zeigen einen jahreszeitlichen Verlauf wie er für Flüsse des Alpenvorlandes zu erwarten ist. Diese zeigen ein Sommermaximum und ein Winterminimum, da hier die Höhenlage zu einem verspäteten Schmelzwasserabfluss der alpinen Flüsse führt. Des Weiteren ist als klimatische Ursache die Stauwirkung der Alpen hervorzuheben, wodurch es in den Sommermonaten vermehrt zu Starkniederschlägen kommt. Da jedoch keineswegs alle GWM der Gruppe 5 im Alpenvorland anzutreffen sind, bedürfte dies einer näheren Untersuchung.

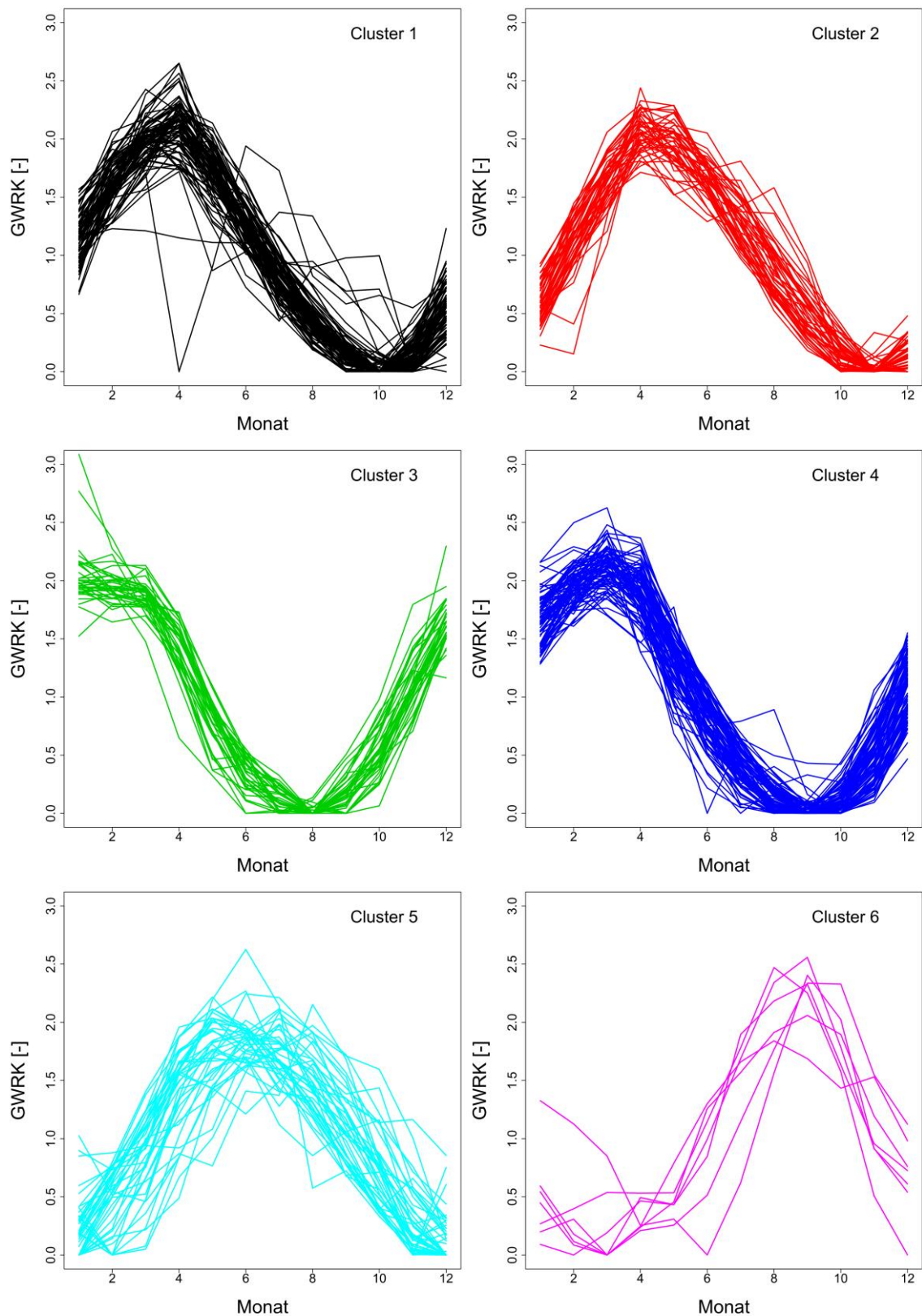


Abb. 4.5: Cluster der GWRK der GWM

In Abb. 4.6 sind die mittleren Verläufe der jeweiligen Cluster dargestellt. Hier ist der jahreszeitliche Versatz der Maxima bzw. Minima der einzelnen Cluster noch einmal deutlich zu erkennen. Die frühesten Maxima (Januar/Februar) weist **Cluster 3** auf. Es folgen in folgender

Reihenfolge; **Cluster 4** (März), **Cluster 1** (März/April), **Cluster 2** (April). Das Mittel von **Cluster 5** weist die den flachsten Verlauf auf und zeigt sein Maximum im Juni. Das mittlere Zeitintervall zwischen Maximum und Minimum aller Cluster schwankt zwischen 6 (Cluster 4) und 6,7 (Cluster 2) Monaten. Da in allen Clustern GWM mit sehr unterschiedlich langen Zeitintervallen zu finden sind, wird auf diese später in Bezug auf die Kontinentalität eingegangen. Die Rezessionsverläufe der mittleren Clusterverläufe zeigen keine deutlichen Unterschiede.

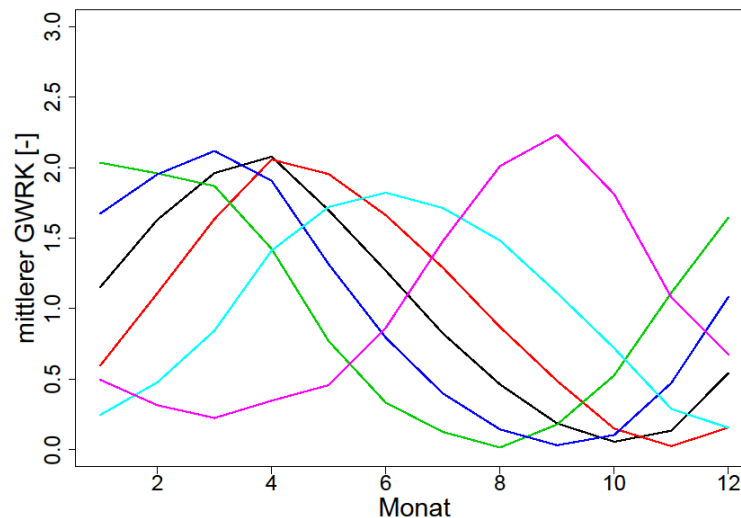


Abb. 4.6: mittlerer Verlauf der GWRK der einzelnen Cluster

Die mittleren Maxima bzw. Zeitintervalle der Cluster sind in Tabelle 4.4 auf Seite 41 zusammengefasst. In Abb. 4.7 ist die deutschlandweite Verteilung der sechs Cluster des GWRK sowie die geographische Lage der Quellen dargestellt. Es ist eine Häufung der GWM des **Clusters 3** im Nordosten der Bundesrepublik zu erkennen. Die GWM des **Clusters 6** zeigen eine Häufung im Südosten Deutschlands. **Die Cluster 1, 2, 4 und 5** lassen auf den ersten Blick keine besondere Regionalität vermuten. Die Beobachtungen werden im Anschluss an Hand der Daten über Längen- und Breitengrade näher überprüft. Der Karte sind die hydrogeologischen Unterregionen, welche im Kapitel 3.3.1 erörtert wurden, hinterlegt.

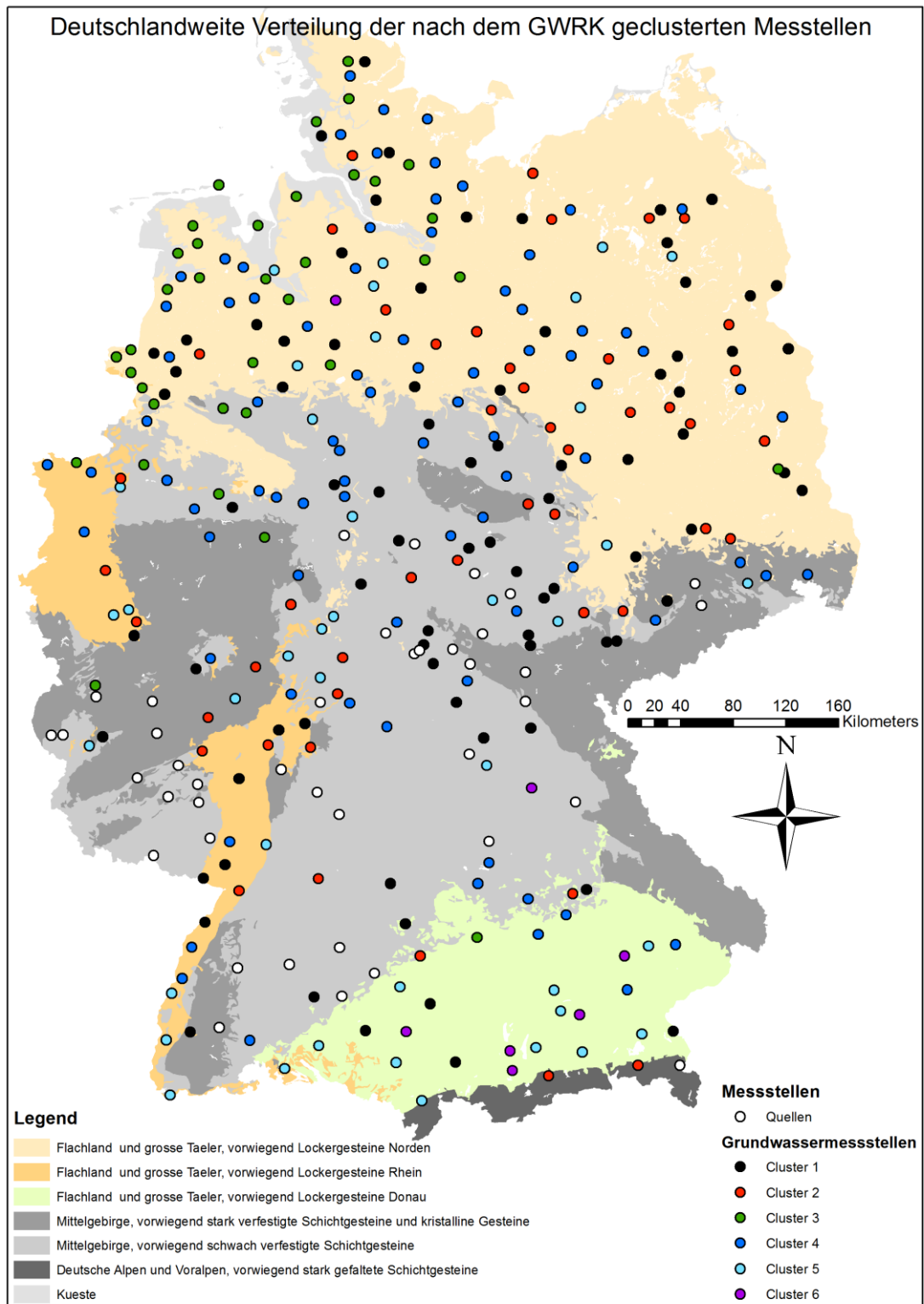


Abb. 4.7: Deutschlandkarte mit den GWM und ihrer jeweiligen Clusterzugehörigkeit (der GWRK), der Karte hinterlegt sind die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen hydrogeologischen Unterregionen gemäß der der Klassifikation der BGR im HAD bzw. der weiteren vorgenommenen Unterteilung der Unterregion Flachland und große Täler (ebenfalls beschrieben in Abschnitt 3.3.1)

4.4 Vergleich der Cluster (GWRK) mit den Metadaten

Die jeweiligen Cluster werden im folgenden Unterkapitel in ihren Ausprägungen die Metadaten betreffend dargestellt. Die Farbwahl und Nummerierungen folgen der in Abb. 4.5 dargestellten Cluster.

4.4.1 Geographische Lage/ Geländehöhe

Abb. 4.8 bzw. Abb. 4.9 zeigen die Verteilung der Längengrade bzw. Breitengrade der jeweiligen Cluster als Boxplots. Cluster 1, 2, 4 und 5 sind gleichmäßig in der gesamten Bundesrepublik verteilt. Die GWM des **Clusters 3** zeigen in Abb. 4.8 geringsten Längengrade und somit eine Häufung im Westen Deutschlands. Die GWM des **Clusters 6** hingegen zeigen die größten Längengrade und damit eine Konzentration im Osten Deutschlands.

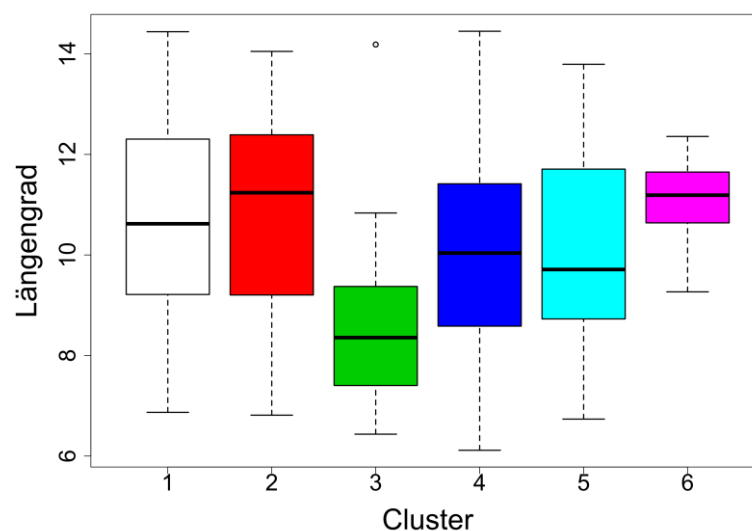


Abb. 4.8: Längengrade der jeweiligen Cluster

In Abb. 4.9 sind die Breitengrade der GWM der einzelnen Cluster aufgeführt. Cluster 5 zeigen eine relativ gleichmäßige Verteilung über die gesamte Bundesrepublik, ähnlich wie Cluster 1, 2 und 4. Den Breitengrad betreffend treten die GWM von **Cluster 6** am südlichsten auf. Die **Cluster 3** befinden sich größtenteils im Norden Deutschlands.

Die mittleren Längen- bzw. Breitengrade der Cluster sind in Tabelle 4.4 auf Seite 41 zusammengefasst.

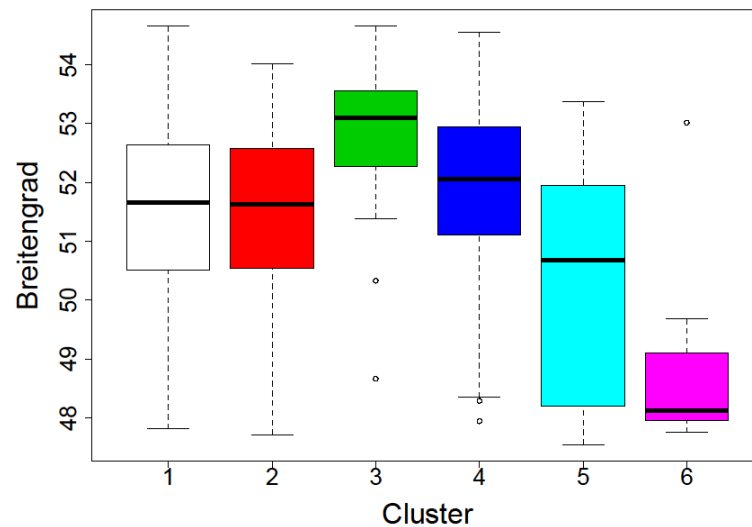


Abb. 4.9: Breitengrade der jeweiligen Cluster

Die mittlere Geländehöhe aller GWM liegt bei 161 m ü. NN, der Median bei 76 m ü. NN. Die topographisch niedrigste Höhe aller GWM liegt bei -0,28 m ü. NN, die höchste bei 782 m ü. NN. Der Vergleich der in Abb. 4.10 dargestellten Geländehöhen zeigt eine ebenso gleichmäßige Verteilung der 4 soeben genannten Cluster (1, 2, 4 und 5), wobei Cluster 5 den höchsten Median bzw. die höchsten Höhenlagen dieser vier Cluster aufweist. Die GWM von **Cluster 3** weist die geringsten Höhenlagen auf. Die höchsten Geländehöhen sind bei den GWM des **Clusters 6** zu erkennen. Dementsprechend kann die im Bezug auf Abb. 4.7 geäußerte Regionalität bestätigt werden; Cluster 3 zeigt eine Häufung im Nordwesten und Cluster 6 eine Häufung im Südosten Deutschlands, wohingegen die anderen Cluster keine regionalen Besonderheiten aufweisen.

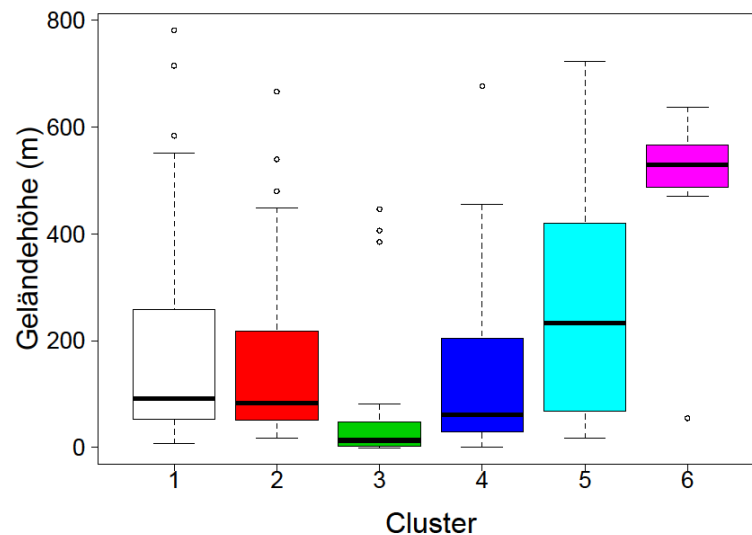


Abb. 4.10: Geländehöhen der jeweiligen Cluster

Die Kontinentalität betreffend wurde hinsichtlich einer Verspätung der Jahresgänge mit zunehmender Kontinentalität bzw. Verkürzung des Zeitintervalls zwischen Maximum und Minimum der Grundwasserjahresgänge mit zunehmender Kontinentalität untersucht. In Abb. 4.11 sind die Monate der maximalen GWRK gegen die jeweiligen Breitengrade (linke Graphik)

bzw. Längengrade (rechte Graphik) dargestellt. Die von Nüchel (1961) beschriebene Verspätung der Jahresgänge mit zunehmender Kontinentalität lässt sich zumindest bei den Breitengraden bestätigen. Es ist zu erkennen, dass mit niedrigeren Breitengraden, also zunehmender Kontinentalität, eine jahreszeitliche Verspätung der Maxima einhergeht. Bei den Längengraden ist ebenfalls eine leichte jahreszeitliche Verspätung, von West nach Ost zu erkennen. Wobei beide Korrelationskoeffizient, sowohl $-0,37$ als auch $0,25$, nicht signifikant sind. Dennoch ist in der linken Graphik in Abb. 4.11 deutlich zu erkennen, dass die GWM mit den frühesten Maxima des **Clusters 3** (grün) in den höheren Breiten anzutreffen sind und die GWM mit den späten Maxima **-Cluster 5** (hellblau) und **Cluster 6** (pink)- zum großen Teil in den niederen Breiten und damit im Süden Deutschlands. Auch hier wird deutlich, wie bereits in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, dass eine Konzentration der Maxima auf die Monate März und April fällt.

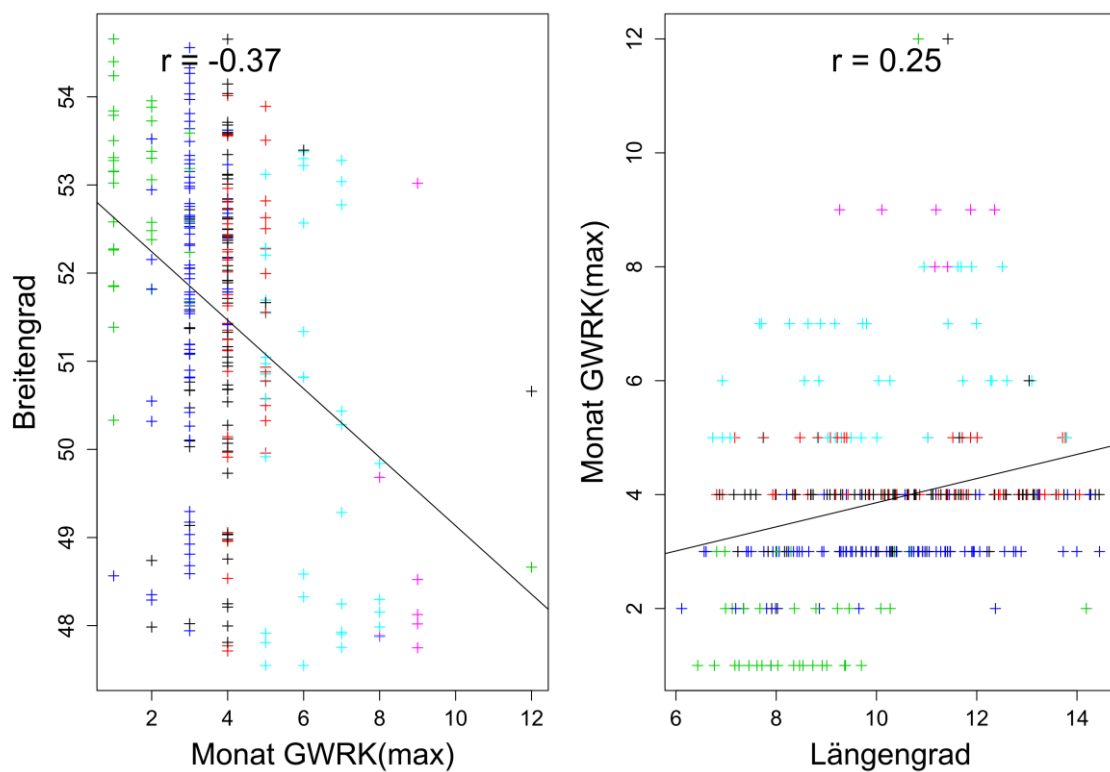


Abb. 4.11: Monat des maximalen GWRK im Vergleich zu den Breitengraden (rechts) bzw. Längengraden (links), die Farben der Kreuze entsprechen den jeweiligen Clusterfarben

In Abb. 4.12 sind die Zeitintervalle (in Monaten) zwischen den maximalen und minimalen GWRK gegen die jeweiligen Breiteregrade (linke Graphik) bzw. Längengrade (rechte Graphik) dargestellt. Die von Nüchel (1961) beschriebene Verkürzung Zeitintervalle zwischen Maximum und Minimum der Grundwasserjahresgänge mit zunehmender Kontinentalität lässt sich nicht bestätigen. Im Gegenteil, es ist vielmehr (zumindest was die Breiteregrade betrifft) eher eine Verlängerung des Zeitintervalls zu erahnen. Wobei bei einem Korrelationskoeffizienten von $-0,08$ nicht von einem Zusammenhang gesprochen werden kann. In Abb. 4.12 wird auch die bereits in Abschnitt 3.2.1 die Variabilität der Zeitintervall-Länge deutlich. Diese liegt im Mittel (aller GWM) bei 6,3 Monaten zwischen Maximum und Minimum. Der größte Teil der GWM

weist Zeitintervalle von 6 bis 7 Monaten auf, jedoch sind auch einige GWM mit deutlich kürzeren bzw. deutlich längeren Zeitintervallen zwischen Maximum und Minimum zu vermerken. Bei den Zeitintervallen zeigen die Cluster keine auffälligen Präferenzen.

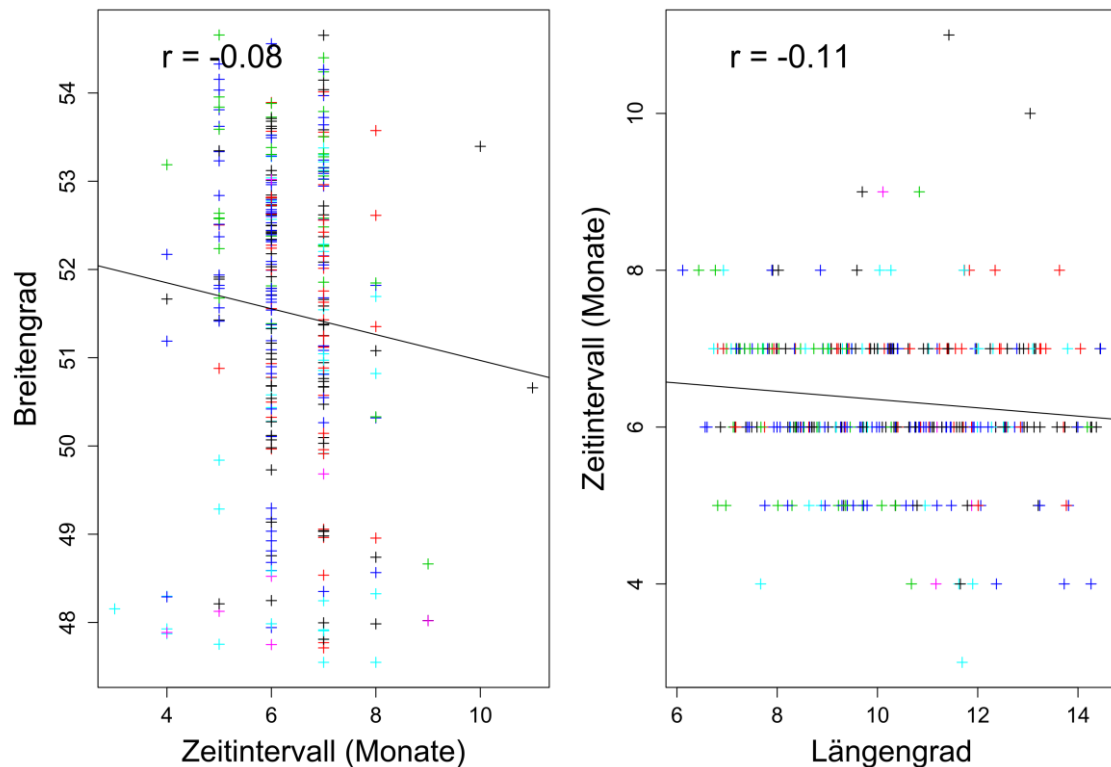


Abb. 4.12: Zeitintervall zwischen maximalem und minimalem GWRK im Vergleich mit Breitengrad (rechts) bzw. Längengrad (links), die Farben der Kreuze entsprechen den jeweiligen Clusterfarben

4.4.2 Distanz zum Fließgewässer

In Abb. 4.13 sind die Distanzen zum nächsten Fließgewässer der jeweiligen Cluster dargestellt. Die mittlere Distanz zum Fließgewässer aller GWM liegt bei 954 m, der Median bei 794 m. Die geringste Distanz zum Fließgewässer liegt bei 104 m und die höchste bei 2811 m. Die GWM der Cluster 1 bis 4 zeigen ein eher einheitliches Bild. Alle GWM der genannten Cluster liegen im Mittel näher als 1000 m an einem Fließgewässer. Die GWM von Cluster 5 hingegen liegen im Mittel mehr als 1000 m vom nächsten Fließgewässer entfernt. Noch größer sind die Distanzen der GWM des **Clusters 6**, hier liegt der Mittelwert der GWM bei über 2500 m. Die mittleren Distanzen zum nächsten Fließgewässer der GWM sind in Tabelle 4.4 für die jeweiligen Cluster zusammengefasst. Bei den Angaben zu den Distanzen zum nächsten Fließgewässer ist anzumerken, dass die verwendete Gewässernetzdichte-Karte mögliche kleinere Fließgewässer nicht berücksichtigt bzw. keine Aussage über Grundwasserströmungsgradienten vorhanden waren.

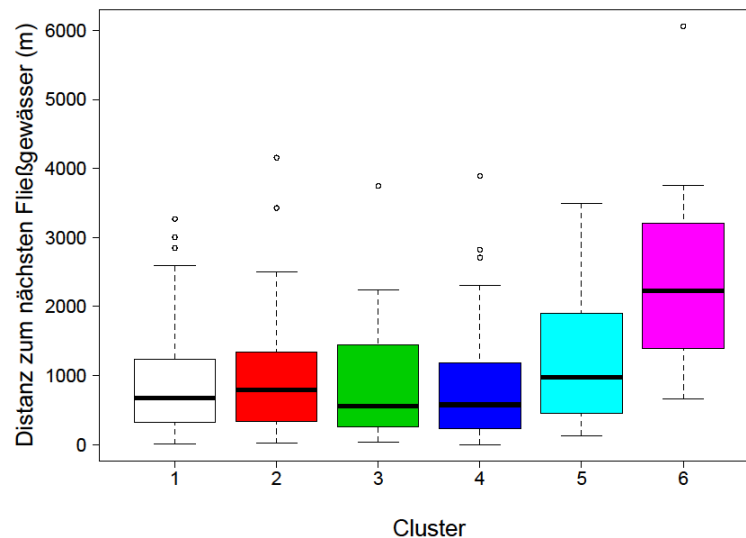


Abb. 4.13: Distanz zum nächsten Fließgewässer der jeweiligen Cluster

4.4.3 Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten

Die mittlere Grundwasserneubildungsrate aller GWM liegt bei 122 mm/a und der Median bei 111 mm/a. Die Spanne aller GWM ist mit -29 bis 526 mm/a erheblich. In Abb. 4.14 sind die mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten der GWM der jeweiligen Cluster dargestellt. Es ist deutlich die höhere GWN von im Mittel 272 mm/a der GWM des **Clusters 6** zu erkennen. Hierbei handelt es sich in erster Linie um GWM im südostdeutschen Raum mit höheren Niederschlagsraten und dementsprechend höheren Grundwasserneubildungsraten. Die übrigen Cluster zeigen ähnliche Streuungen mit einem Median, welcher im Bereich des, aus dem HAD entnommenen Mittels, von 135 mm/a liegt. Die mittleren Grundwasserneubildungsraten der einzelnen Cluster sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

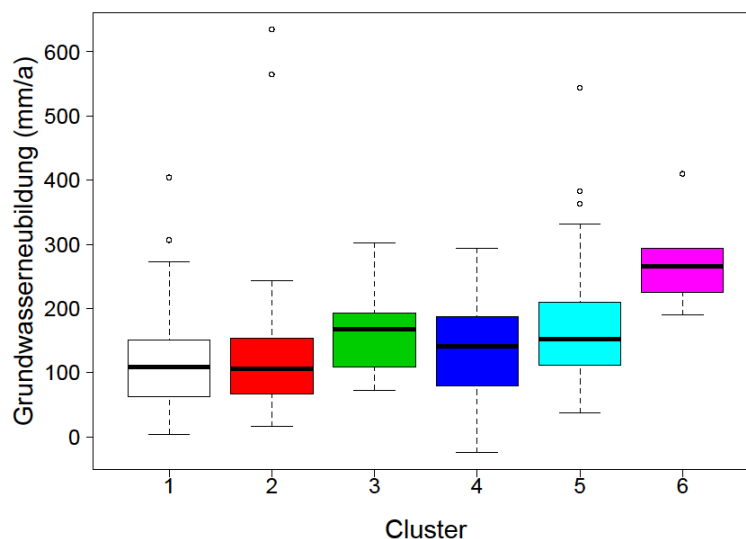


Abb. 4.14: Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten der jeweiligen Cluster

4.4.4 Durchlässigkeiten

In Abb. 4.15 sind die aus der HÜK 200 (BGR & SGD, 2011) entnommenen Durchlässigkeitswerte der einzelnen Cluster als Boxplots dargestellt. Die Durchlässigkeitsangaben in der HÜK

200 enthielten neben den hier dargestellten Kürzeln bzw. Klassen (1= „sehr hoch“, 7 = „sehr gering“) auch übergreifende Klassen (wie 11=„stark variabel“ oder 10 = „gering bis äußerst gering“). Die einzelnen Kürzel für die Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters, welche der HÜK 200 entnommen wurden, ist dem Anhang B beigefügt. Diese übergreifenden Klassen wurden bei der Auswertung nicht mit berücksichtigt, da die ohnehin schon generalisierten Angaben weiter an Aussagekraft verlieren würden. Im Mittel lagen die Werte bei 3,3, dies entspricht mittleren Durchlässigkeiten (k_f - Werte von 10^{-4} - 10^{-3} m/s). Die höchsten Durchlässigkeiten mit einem Wert von 2,6 weist **Cluster 6** auf, gefolgt von **Cluster 5** mit einem Wert von 2,9. Die geringsten Durchlässigkeiten weisen mit einem Wert von 3,5 im Mittel die GWM der **Cluster 1** und **4** auf. Die mittleren Durchlässigkeiten der GWM der jeweiligen Cluster sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

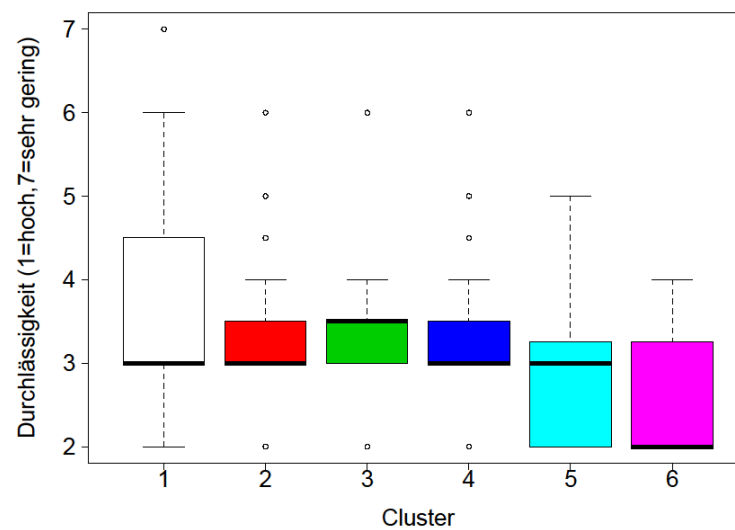


Abb. 4.15: Durchlässigkeiten der jeweiligen Cluster

In Abb. 4.16 ist die deutschlandweite Verteilung der einzelnen GWM und Quellen mit den aus der HÜK 200 entnommenen Angaben der Durchlässigkeiten dargestellt. Der Karte sind die hydrogeologischen Unterregionen, welche im Kapitel 3.3.1 erörtert wurden, hinterlegt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die in der vom BGR ausgewiesenen hydrogeologischen Region „Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergesteine“, wie zu erwarten, die höchsten (hohe bis mittlere) Durchlässigkeiten aufweisen, wohingegen die Gebiete der Mittelgebirge größtenteils mäßige bis (äußerst) geringe Durchlässigkeiten zeigen.

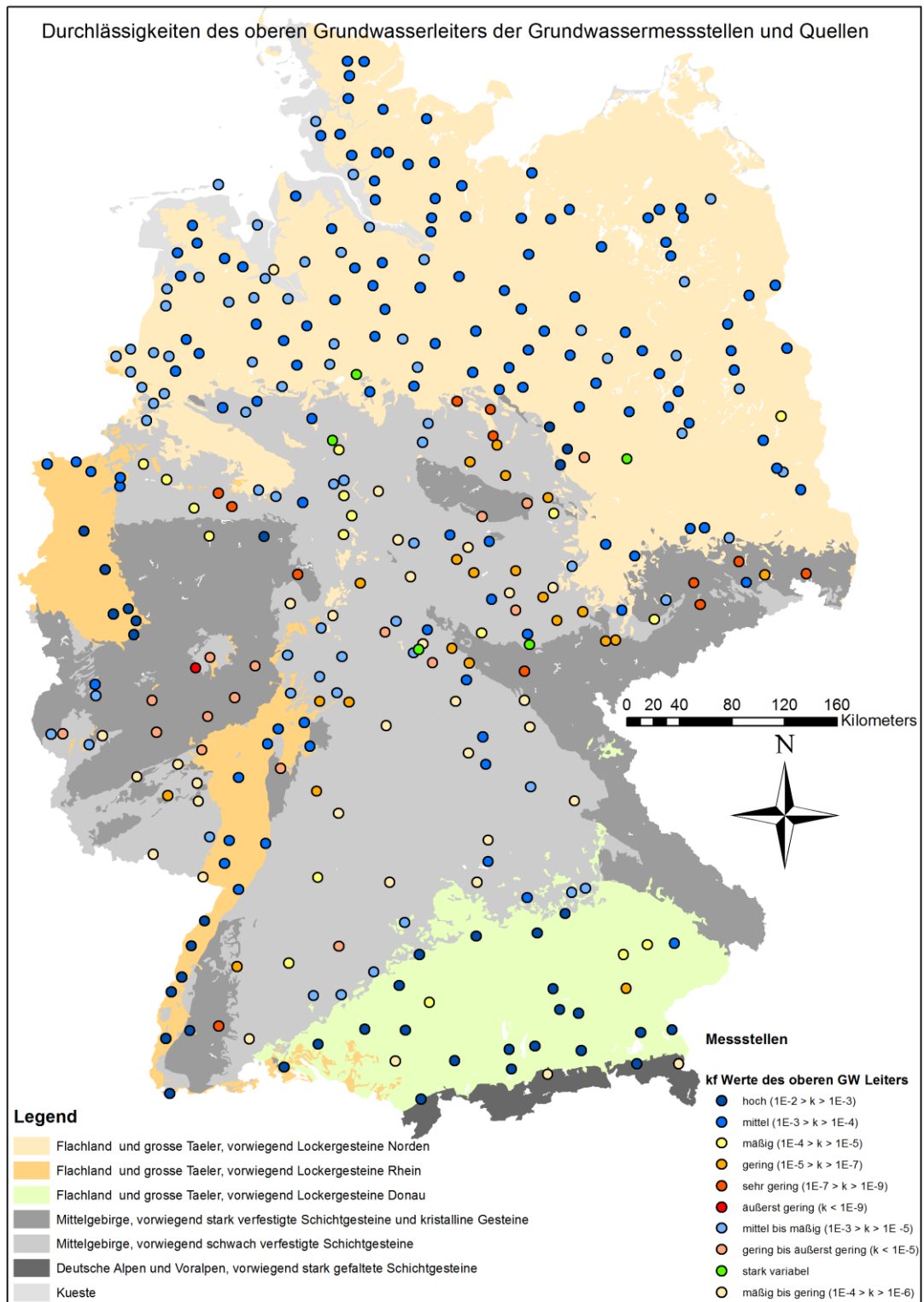


Abb. 4.16: Deutschlandkarte mit den Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters (BGR und SGD, 2011) im Bereich der GWM und Quellen, hinterlegt sind die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen hydrogeologischen Unterregionen gemäß der der Klassifikation der BGR im HAD bzw. der weiteren vorgenommenen Unterteilung der Unterregion Flachland und große Täler (ebenfalls beschrieben in Abschnitt 3.3.1)

4.4.5 Hohlraumarten

In Tabelle 4.3 sind die Hohlraumarten der GWM aufgeführt. Die Unterteilung in „Poren“, „Kluft/Poren“, „Kluft“ und „Kluft/Karst“ stammt aus der HÜK 200 (BGR und SGD 2011). Des Weiteren ist jeweils der prozentuale Anteil der Hohlraumart am jeweiligen Cluster angegeben. Bei dem größten Teil der GWM (75,4%) handelt es sich um Porengrundwasserleiter. Hierzu muss erwähnt werden, dass in diese Auswertung die Quellen, welche sich vorwiegend in Festgesteinsbereichen befinden, nicht eingeflossen sind. Außerdem sind die meisten bedeutenden Grundwasserleiter und damit auch GWM im Lockergesteinsbereichen und damit in Porenaquiferen anzutreffen. Aus diesem Grund macht hier nur der Vergleich der Cluster untereinander Sinn. **Cluster 3** zeigt den höchsten prozentualen Anteil an Porenaquiferen der Cluster und liegt deutlich über dem der Grundgesamtheit. Dadurch ist mit zu erklären, dass Cluster 3, wie bereits in Abschnitt 4.4.4 beschrieben, die höchsten Durchlässigkeiten der Cluster aufweist. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die GWM von Cluster 3 größtenteils in der Norddeutschen Tiefebene und damit, wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, in einem großen zusammenhängenden Porenaquifer liegen. Die GWM des **Clusters 2** weisen den höchsten prozentualen Anteil an Kluftaquiferen auf. Zwar liegen 85,7% der GWM des Clusters 6 im Bereich von Porenaquiferen, jedoch darf bei der Betrachtung der folgenden Abschnitte 4.4.6 bzw. 4.4.7, bezweifelt werden, ob die Grundwassersiegehhöhe im Bereich des oberen Grundwasserleiters liegt oder es sich nicht vielmehr um tiefere Grundwasserstockwerke handelt.

Tabelle 4.3: Tabelle zu den Hohlraumarten der jeweiligen Cluster

Cluster (Anzahl Messstellen)	„Poren“ (*)	„Kluft/Poren“(*)	„Kluft“ (*)	„Kluft/Karst“ (*)
1 (80)	57 (71,25)	0 (0)	14 (17,5)	9 (11,25)
2 (47)	33 (70,2)	1 (2,1)	10 (21,3)	3 (6,4)
3 (36)	33 (91,7)	0 (0)	1 (2,7)	2 (5,6)
4 (83)	60 (72,3)	4 (4,8)	14 (16,8)	5 (6,0)
5 (40)	32 (80,0)	2 (5,0)	6 (0,15)	0 (0)
6 (7)	6 (85,7)	0 (0)	0 (0)	1 (14,3)
Gesamt (293)	221 (75,4)	7 (2,3)	45 (15,4)	20 (6,8)

(*) prozentualer Anteil an Cluster

Der Vergleich der Angaben der Hohlraumarten bzw. Aquiferen der jeweiligen Landesämter mit den Angaben des BGR in der HÜK 200 sowie den Angaben aus dem HAD zeigte, dass diese nicht immer übereinstimmen. Dies mag einerseits an der Interpolation bei der Erstellung der HÜK 200 liegen, andererseits sind die Angaben auf den oberen Aquifer bezogen und es kann nicht in allen Fällen ausgeschlossen werden, dass es sich bei den GWM im Bereich tieferer Aquifere handelt. Hierauf kann im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen werden.

4.4.6 Mittlerer Grundwasserflurabstand

Der mittlere Grundwasserflurabstand aller GWM liegt bei 7,8 m, der Median bei 3,3 m. Die Spanne der Grundwasserflurabstände ist hoch, der geringste liegt bei 0,01 m und der größte bei 130 m. In Abb. 4.17 sind die mittleren Grundwasserflurabstände der jeweiligen Cluster dargestellt. Beim Vergleich der einzelnen Cluster zeigen die GWM des **Clusters 6** die tiefsten Grundwasserflurabstände, im Mittel liegen diese bei 25,9 m. Ebenfalls hohe Grundwasserflurabstände, im Mittel 15,9 m, weisen die GWM von Cluster 5 auf. Es folgen mit geringer werdenden Grundwasserflurabständen die Cluster 2, 1, 4 und mit den geringsten Grundwasserflurabständen **Cluster 3**.

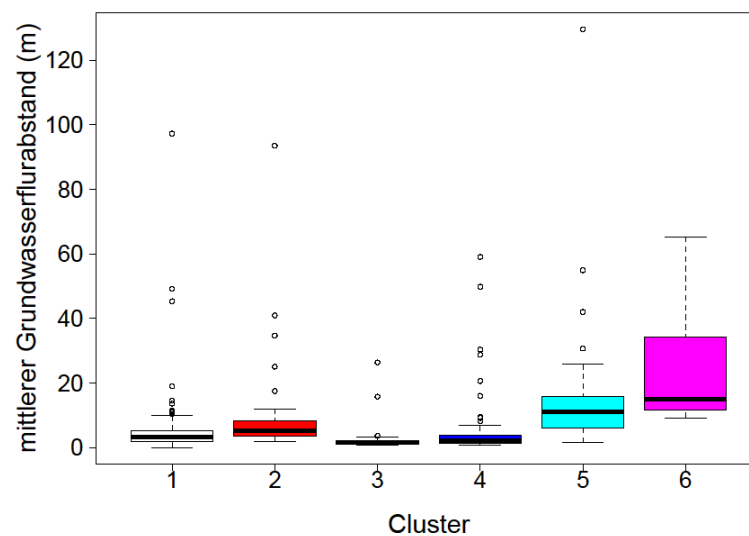


Abb. 4.17: Mittlerer Grundwasserflurabstand der jeweiligen Cluster

In Abb. 4.17 ist erneut die zeitliche Verzögerung der Maxima zu erkennen, welche im Zusammenhang steht, mit den mittleren Grundwasserflurabständen und damit mit den Versickerungszeiten des Bodenwassers im Untergrund; **Cluster 3** weist das jahreszeitlich früheste Maxima (Januar/Februar), sowie auch die geringsten mittleren Grundwasserflurabstände (2,7 m) auf (vergleiche hierzu Tabelle 4.4). Es folgen Cluster 4 und 1 mit ebenfalls frühen Maxima (März/April) und geringen Grundwasserflurabständen (4,9 bzw. 6,5 m), ebenso wie Cluster 2 mit einem Maxima im April und Grundwasserflurabständen von 9,3 m. Die jahreszeitlich spätesten Maxima weisen **Cluster 5** (Juni) und **Cluster 6** (August/September) auf, diese Cluster zeigen auch die höchsten mittleren Grundwasserflurabstände von 15,9 m (Cluster 5) bzw. 25,9 m (Cluster 6). In Tabelle 4.4 sind die mittleren Grundwasserflurabstände der jeweiligen Cluster aufgeführt. Auch hier kann noch einmal explizit betrachtet werden, dass die mittleren Grundwasserflurabstände der Cluster exakt der Verspätung der Maxima der jeweiligen Cluster folgen; je größer der Grundwasserflurabstand, desto größer die Verspätung des Maxima.

4.4.7 Filterunterkante und Sohltiefe

In Abb. 4.18 sind, soweit bekannt, die Filterunterkanten der einzelnen GWM, soweit bekannt, dargestellt. Die Sohlthiefen werden hier nicht explizit aufgeführt, da kein nennenswerter Unterschied zwischen den Ergebnissen besteht. Bei der Betrachtung der Filterunterkanten (wie auch der Sohlthiefen) zeigen die Cluster 5, 1 und 2 bzw. 4 ähnliche Werte, in nach der genannten Reihenfolge geringer werdenden Tiefen. Die GWM des **Clusters 6** hingegen zeigen den höchsten Median und somit die höchsten Filterunterkanten (und Sohlthiefen). Beim Vergleich der Filterunterkanten bzw. Sohlthiefen zeigt sich, erwartungsgemäß, die gleiche Verteilung wie schon bei der Betrachtung der Grundwasserflurabstände. In Tabelle 4.4 sind die mittleren Flurabstände bzw. Sohlthiefen der jeweiligen Cluster zusammengefasst.

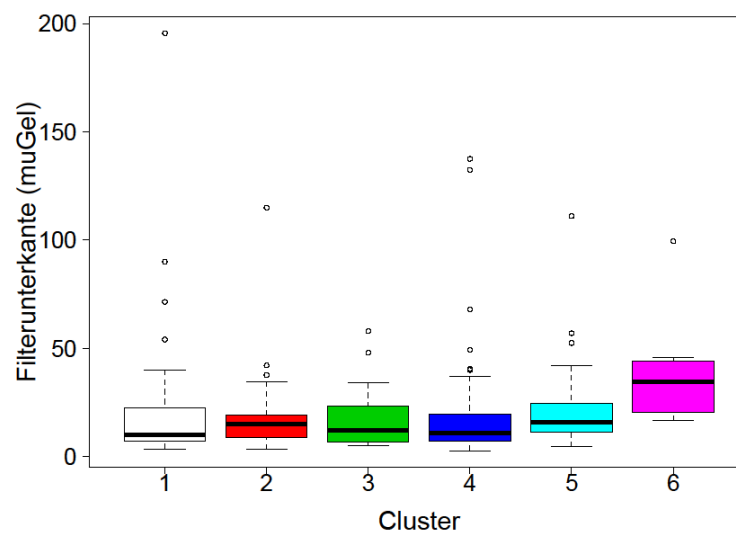


Abb. 4.18: Filterunterkanten der jeweiligen Cluster

Die in diesem Abschnitt erörterten Zusammenhänge bzw. Werte werden in Tabelle 4.4 für die jeweiligen Cluster zur Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Kenngrößen der ausgewerteten Metadaten der jeweiligen Cluster

Cluster	1	2	3	4	5	6	Gesamt
Anzahl Messstellen	80	47	36	83	40	7	293
Monat der Maxima GWRK	3,75	4,3	1,6	3,0	6,1	8,7	3,8
Zeitintervall zwischen Max und Min	6,5	6,7	6,3	6,0	6,4	6,1	6,3
Mittlere Distanz zum Fließgewässer (m)	883,6	975,4	893,6	799,0	1161,0	2589,0	954,2
Mittlere Durchlässigkeiten (1= hoch, 7=sehr gering)	3,5	3,2	3,3	3,5	2,9	2,6	3,3
Mittlere Geländehöhe (m)	167,2	159,3	54,0	129,0	259,2	475,5	161,1
Mittlere Filterunterkante (m)	20,1	18,5	16,4	18,5	22,3	40,0	19,7
Mittlere Sohltiefe (m)	20,1	20,2	16,2	18,0	29,0	40,3	20,8
Mittlerer Flurabstand (m)	6,5	9,3	2,7	4,9	15,9	25,9	7,8
Mittlerer Längengrad	10,7	10,8	8,6	10,1	10,0	11,1	10,2
Mittlerer Breitengrad	51,4	51,5	52,8	51,8	50,3	49,0	51,5
GWN (mm/a)	117	129	163	133	174	272	141

4.5 Vergleich der Cluster mit den hydrogeologischen Unterregionen

Die prozentualen Anteile der hydrogeologischen Unterregionen innerhalb der einzelnen Cluster sind in Tabelle 4.5 aufgeführt. Wie schon in Abschnitt 4.4.5 angesprochen, handelt es sich mit 63% bei dem größten Teil der GWM um Porengrundwasserleiter in der hydrogeologischen Unterregion „Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergesteine (2)“, wobei hier eine weitere Unterteilung („2a Norden“, „2b Rhein“ und „2c Donau“) stattfand. Die zweitgrößte Anzahl der GWM macht mit 28% die Unterregion „Mittelgebirge, schwach verfestigt (3)“ aus, gefolgt von der Unterregion „Mittelgebirge, stark verfestigt (4)“ mit knapp 6%. Die Unterregionen mit den wenigsten Messstellen sind die Unterregionen „Küste (1)“ mit 2% und „Deutsche Alpen und Voralpen (5)“ mit weniger als 1%. Am nächsten an diese Verteilung der Grundgesamtheit kommt Cluster 4 heran, wobei auch Cluster 1, 2 und 3 ähnliche prozentuale Anteile der hydrogeologischen Unterregionen aufweisen. **Cluster 5** zeigt unterschiedliche prozentuale Verteilungen, wobei hier die Unterregion 2a deutlich seltener vertreten ist und Unterregion 2c mehr Anteile einnimmt. Somit sind die GWM des Clusters 5 verhältnismäßig seltener in der Norddeutschen Tiefebene anzutreffen sind, dafür aber verhältnismäßig häufiger

im Flachland nördlich der Alpen. Noch deutlicher wird diese „Entwicklung“ bei **Cluster 6**, hier sind über 70% der GWM in Unterregion 2c und damit im Alpenvorland anzusiedeln.

Tabelle 4.5: Prozentualer Anteil der hydrogeologischen Unterregionen innerhalb der Cluster

Unterregion	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Gesamt
1	1,25	0,00	11,11	1,20	0,00	0,00	2,05
2a	47,50	46,81	52,78	43,37	25,00	14,29	43,00
3	35,00	27,66	11,11	31,33	27,8	14,29	28,33
4	2,50	8,51	5,56	8,43	5,00	0,00	5,80
5	0,00	4,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68
2b	10,00	10,64	16,67	10,84	20,00	0,00	12,29
2c	3,75	2,13	2,78	4,82	22,5	71,43	7,85

Zur Visualisierung der soeben beschriebenen Verteilungen bzw. Zusammenhänge dienen die Balkendiagramme in Abb. 4.19. Auch hier zeigt sich deutlich die unterschiedliche Verteilung der hydrogeologischen Unterregionen auf die Cluster. Während Cluster 1, 2 und 4 sehr ähnliche prozentuale Anteile der hydrogeologischen Unterregionen aufweisen ist bei Cluster 3 deutlich die Häufung im Norden Deutschlands zu sehen. Die prozentuale Verteilung der hydrogeologischen Unterregionen innerhalb des Clusters 5 zeigt bereits mehr Anteile der UR 2c, wobei es sich um die GWM im Flachland des Donaueinzugsgebietes handelt. In Cluster 6 zeigen die prozentualen Anteile der hydrogeologischen Unterregionen einen noch deutlicheren Unterschied zur Grundgesamtheit. Hier dominieren die GWM der hydrogeologischen Unterregion 2c. Hierbei handelt es sich erneut um die GWM im Donaueinzugsgebiet, welche die spätesten Maxima, wie bereits ausführlich in Abschnitt 4.4 beschrieben, aufweisen.

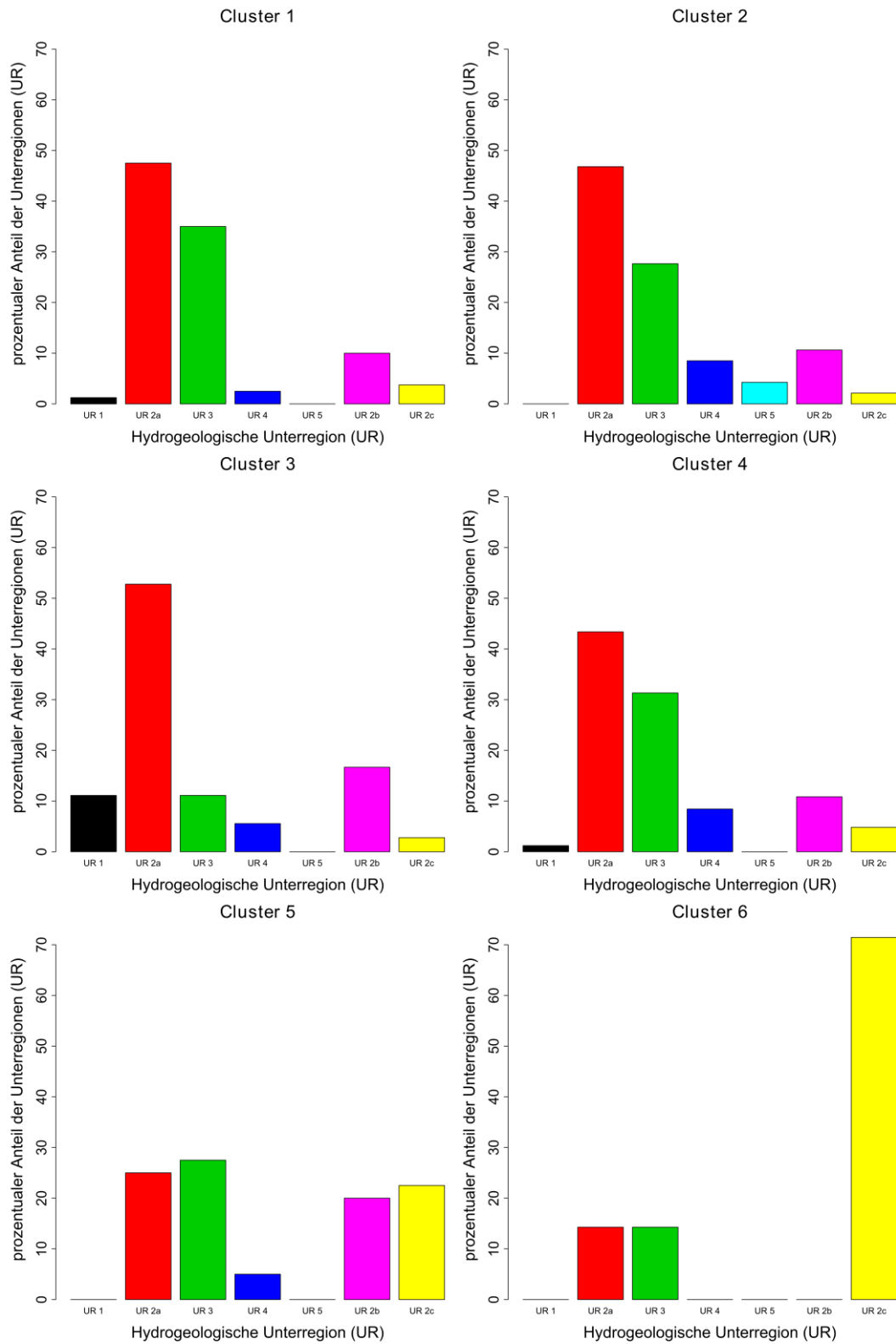


Abb. 4.19: Prozentualer Anteil der hydrogeologischen Unterregionen (UR) innerhalb der Cluster

4.6 Untersuchung der Messstellen in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten am Beispiel des Jahres 2003

Die Untersuchung der GWM ergab, dass 145 GWM im Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} lagen, also eine extreme Reaktion im Trockenwetterjahr 2003 bzw. im Folgejahr 2004 zeigten. Dies entspricht einem Wert von 50%, da 5 GWM wegen nicht vorhandenen Zeitreihen nicht in die Bewertung eingeflossen sind. 143 GWM lagen demnach nicht im Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} bzw. dem 5%-Quantil. Die Betrachtung der beiden Gruppen (mit extremer Reaktion bzw. ohne extreme Reaktion) ergab, dass weder die Durchlässigkeiten noch die Grundwasserneubildungsraten der beiden Gruppen erheblich voneinander abweichen. Die Auswertung der Grundwasserflurabstände bzw. der Distanzen zum nächsten Fließgewässer zeigten hingegen die eingangs beschriebenen Unterschiede. In Tabelle 4.6 sind diese aufgeführt. Die Grundwasserflurabstände der GWM, welche eine extreme Reaktion zeigten, haben ein geringeres Mittel bzw. einen geringeren Median, auch Minimum und Maximum dieser GWM sind geringer, als die der GWM ohne extreme Reaktion. Demnach kann die Aussage, dass mit einer extremeren Reaktion auf Trockenwetterzeiten bei GWM mit geringerem Grundwasserflurabstand zu rechnen ist, bestätigt werden. Das Gleiche gilt auch für die eingangs erhobene Vermutung, dass mit einer extremeren Reaktion bzw. höheren Gefährdung bei Trockenwetterzeiten mit geringeren Distanzen zum Fließgewässer zu rechnen ist. Die GWM welche extreme Reaktionen zeigten, liegen näher an Fließgewässern (siehe hierzu Tabelle 4.6), wodurch ein schnelleres Leerlaufen (bei guter Konnektivität) erfolgen kann.

Tabelle 4.6: Vergleich der Grundwasserflurabstände bzw. Distanzen zum Fließgewässer zwischen den GWM, welche nicht im Bereich des H_{347} (weiß) und denen GWM, welche im Bereich des H_{347} (grau) liegen

	Minimum	Median	Mittel	Maximum
Grundwasserflurabstände (m)	0,23	2,59	5,56	97,27
Grundwasserflurabstände (m)	0,01	4,67	10,21	129,6
Distanz zum Fließgewässer (m)	1,06	626,00	876,40	4156,00
Distanz zum Fließgewässer (m)	6,53	853,30	1049,00	6061,00

Bei der Clusterzugehörigkeit (siehe hierzu Tabelle 4.7) zeigt sich, dass die GWM des Clusters 5 und 2 vergleichsweise weniger extreme Reaktionen auf Trockenwetterzeiten zeigen. Die GWM der Cluster 3 und 4 hingegen zeigen verhältnismäßig öfter extreme Reaktionen.

Tabelle 4.7: GWM im Bereich des H_{347} (weiß) bzw. der GWM welche nicht im Bereich des H_{347} (grau) und ihren prozentualen Anteilen an den Cluster des GWRK

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6
< H_{347}	26,9	11,7	17,2	34,5	7,6	2,1
> H_{347}	28,7	21,0	5,6	21,7	20,3	2,8

In Abb. 4.20 sind die mittleren Grundwasserflurabstände sowie die Clusterzugehörigkeit (des GWRK) der GWM, welche im Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} (in rot) sowie der GWM welche oberhalb des Niedrigwasserstandes H_{347} (in schwarz) in den Jahren 2003 bzw. 2004 lagen dargestellt. Es zeigt sich auch hier, dass die GWM mit größeren Grundwasserflurabständen tendenziell weniger extrem auf Trockenwetterzeiten reagieren. Nur ca. ein Drittel der GWM mit Flurabständen von über 10 m fiel in den Jahren 2003 bzw. 2004 in den Bereich des Niedrigwasserstandes. Je geringer die Grundwasserflurabstände, desto geringer ist auch das Gefährdungspotential der Aquifere in Trockenwetterzeiten mit extremen Niedrigwasserständen zu reagieren. Dennoch sind auch im Bereich sehr geringer Grundwasserflurabstände, von unter 1 m, einige GWM zu verzeichnen, welche in den Jahren 2003 bzw. 2004 auf die langanhaltende Trockenheit nicht mit Niedrigwasserständen reagierten. Hier wird, wie schon bereits beschrieben, deutlich, dass die GWM des Clusters 5 weniger anfällig sind, näherungsweise kann dies auch von den GWM des Clusters 2 behauptet werden. Die GWM der Cluster 3 und 4 zeigen im Vergleich verhältnismäßig mehr GWM, die in den Jahren 2003 bzw. in den Niedrigwasserbereich H_{347} fielen. Die GWM der Cluster 1 und 6 hingegen zeigen keine eindeutigen Tendenzen in ihren Reaktionen.

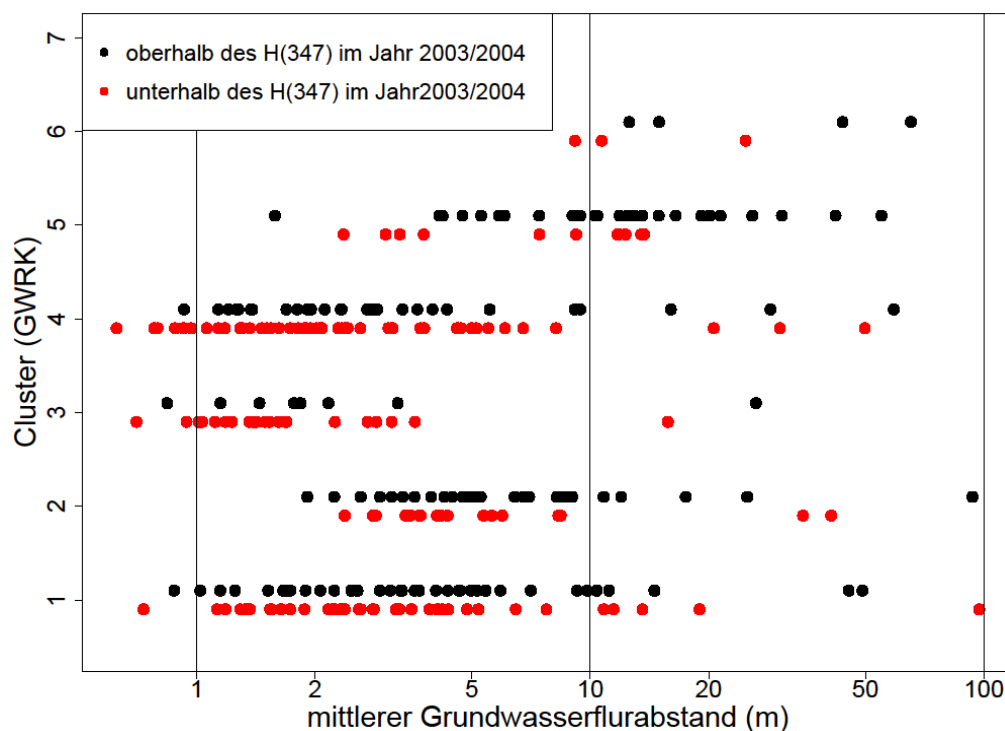


Abb. 4.20: Mittlerer Grundwasserflurabstand und Clusterzugehörigkeit (des GWRK) der GWM, welche nicht im Bereich des H_{347} (schwarz) und denen GWM, welche im Bereich des H_{347} (rot) liegen

Die Untersuchung der Quellschüttungen ergab, dass 19 der insgesamt 39 (von einer Messstelle waren keine Daten vorhanden) in den Jahren 2003 bzw. 2004 unterhalb des Niedrigwasserabflusses Q_{347} lagen. Dies entspricht ebenfalls knapp 50% der Messstellen, hier wurde mit einem höheren Anteil gerechnet, da die Quellschüttungen vorwiegend in den Festgesteinsbereichen der Mittelgebirge zu finden sind und hier ein erhöhtes Gefährdungspotential während langanhaltender Trockenwetterzeiten zu erwarten ist.

4.6.1 Beispiele von GWM mit unterschiedlichem Regenerationsverhalten

Bei der Betrachtung der einzelnen Quantilsverteilungen der GWM sowie der Verläufe der Grundwasserstände in den Jahren 2003 und 2004 fiel auf, dass einige Aquifere im Jahr 2004 deutlich extremere Niedrigwasserstände zeigten, als im eigentlichen Trockenwetterjahr 2003. Da im Rahmen dieser Arbeit nicht die Verläufe aller GWM einzeln diskutiert werden sollen, wurden beispielhaft zwei GWM ausgewählt, welche unterschiedliche Reaktionen, besonders im Regenerationsverhalten, zeigten.

Bei der in Abb. 4.21 dargestellten GWM handelt es sich um eine GWM aus Sachsen-Anhalt (st-gwm-11, „Neuwegersleben“). Diese befindet sich nach Angaben des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) im Bereich von quartärem Lockergestein auf einer Geländehöhe von 80,1 m ü. NN und zeigt im langjährigen Mittel ihr Maximum im April und ihr Minimum im Oktober. Die Auswertung des GWRK ergab eine Clusterzugehörigkeit zu Cluster 1. Die Angaben in der HÜK 200 zeigt im Bereich der GWM geringe Durchlässigkeiten mit k_f -Werten von 10^{-7} - 10^{-5} m/s und bezeichnet den oberen Aquifer in dieser Region als Kluftaquifer. Auch hier zeigt sich erneut, dass die aus der HÜK 200 gewonnen Angaben zu den Hohlraumarten nicht zwangsläufig mit denen der Landesämter übereinstimmen. Der mittlere Flurabstand beträgt 0,7 m und die Distanz zum Fließgewässer liegt bei 16,06 m, die mittlere jährliche Grundwasserneubildungsrate liegt nach Angaben des HAD bei 27 mm/a. Wie bereits in Abschnitt 1 beschrieben, befanden sich die meisten Grundwasserstände am Anfang des Jahres 2003, durch große Niederschlagsmengen am Ende des Jahres 2002, auf einem hohen Niveau (BfG, 2006). Dies war auch der Fall bei der in Abb. 4.21 dargestellten GWM. Während der langen niederschlagsarmen Periode im Jahr 2003, zwischen Januar und August, fiel der Grundwasserstand dann stetig und erreichte im August sein Minimum im Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} . Ab September 2003 erholte sich der Aquifer sukzessive und befand sich bereits Ende des Jahres 2003 in einem moderaten Zustand. Im Jahr 2004 lagen die Grundwasserstände in einem mittleren Bereich und der Aquifer zeigte somit keine längerfristige Beeinträchtigung.

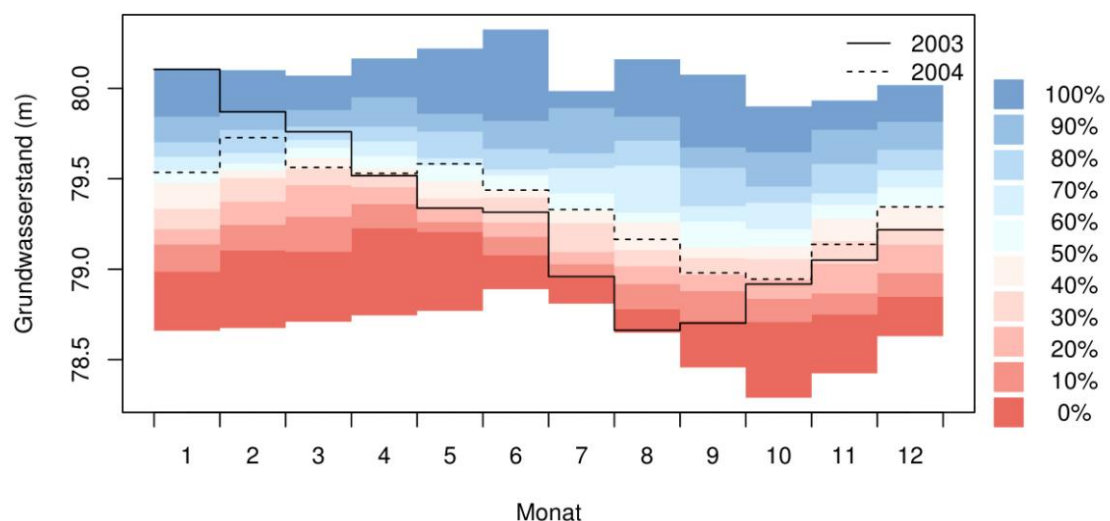


Abb. 4.21: Monatsmittelwerte der Jahre 2003 und 2004 und Quantile der langjährigen Werte der GWM st-gwm-11 „Neuwegersleben“ (Datenquelle: LHW)

Bei der in Abb. 4.22 dargestellten GWM handelt es sich um die eine GWM aus Bayern (by-gwm-11, „Kronau 616“). Diese befindet sich nach Angaben des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) im Bereich von quartärem Lockergestein auf einer Geländehöhe von 637,5 m ü. NN und zeigt im langjährigen Mittel ihr Maximum im September und ihr Minimum im März. Die Auswertung des GWRK ergab eine Clusterzugehörigkeit zu Cluster 6. Der mittlere Flurabstand beträgt 24,8 m und die Distanz zum Fließgewässer liegt bei 2230 m, die mittlere jährliche Grundwasserneubildungsrate liegt nach Angaben des HAD bei 410 mm/a. Die Angaben in der HÜK 200 zeigen im Bereich der GWM hohe Durchlässigkeiten mit k_f -Werten von 10^{-3} - 10^{-2} m/s. Nach den Angaben in der HÜK 200 handelt es sich ebenfalls bei dem oberen Aquifer in diesem Bereich um einen Porenaquifer. Die Monatsmittel der Jahre 2003 bzw. 2004 sowie die Quantile der langjährigen Werte sind in Abb. 4.22 dargestellt. Auch hier ist deutlich der hohe Grundwasserstand zu Beginn des Jahres 2003 zu erkennen. Zwischen Januar und Dezember zeigt der Aquifer einen sukzessiven Rückgang des Grundwasserstandes und erreicht im Dezember den Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} . Der Aquifer zeigt ein träges Regenerationsverhalten und erreicht im gesamten Jahr 2004 nicht mehr sein mittleres Niveau. Dies könnte an einer schlechten Konnektivität zu dem Fließgewässer liegen, worauf die hohe Distanz (2230 m) zu diesem hindeutet.

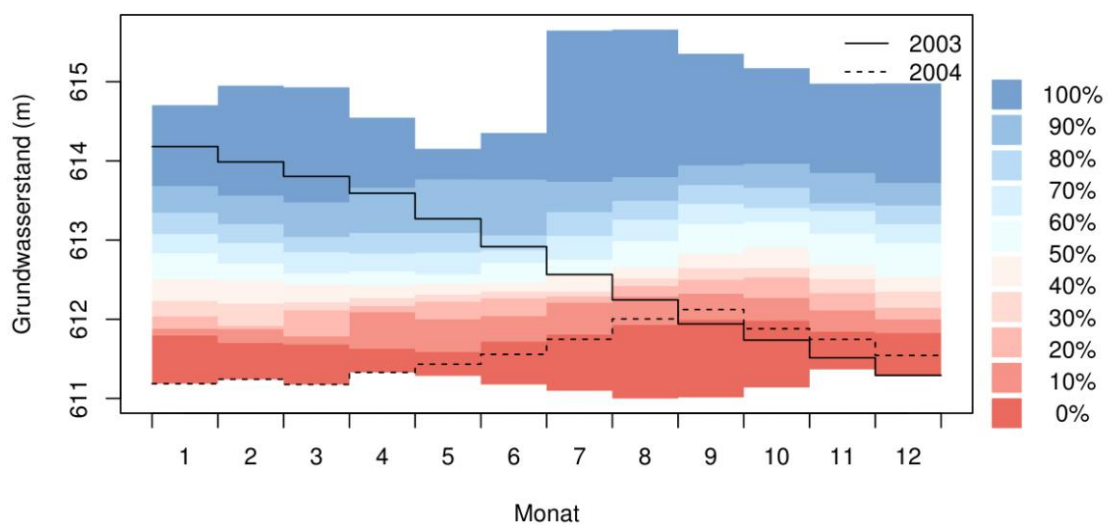


Abb. 4.22: Monatsmittelwerte der Jahre 2003 und 2004 und Quantile der langjährigen Werte der GWM by-gwm-11 „Kronau 616“ (Datenquelle: LfU)

Ein Vergleich der GWM bzw. ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten, am Beispiel des Jahres 2003 bzw. 2004, bezüglich der in Abschnitt 4.1 ausführlich beschriebenen hydrogeologischen Unterregionen ergab eine größtenteils gleichmäßige Verteilung. Lediglich die Verteilungen der GWM im Einzugsgebiet der Donau (UR 2c) unterschieden sich nennenswert; 16 GWM zeigten eine extreme Reaktion mit Niedrigwasserständen, 7 GWM hingegen fielen nicht in diesen Bereich.

5 Diskussion

5.1 Ergebnisse

Bei der Unterteilung der GWM in die **hydrogeologischen Unterregionen** konnte gezeigt werden, dass gewisse Ausprägungen, wie ein träges Verhalten großer Porenaquifere oder größere Amplitudenschwankungen in Festgesteinsaquiferen erkennbar sind.

Die **UR 1** sowie **UR 2a** zeigen, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, flache Verläufe der Grundwasserstände mit ihren Maxima im März und April, geringe Geländehöhen, geringe Grundwasserflurabstände und hohe Durchlässigkeiten. Dies gilt auch für die **UR 2b**, welche sich in erster Linie durch größere Geländehöhen von den beiden genannten Regionen unterscheidet. Bei den bisher genannten Unterregionen ist zu erwähnen, dass die Topographie hier gering bis sehr gering ausgeprägt ist, wodurch direkte GWN überwiegen dürfte. Des Weiteren kommt hinzu, dass die Zwischenspeicherung in der Schneedecke, durch den kleiner ausfallenden Temperaturgradienten, geringer ausfällt als in montanen Regionen. Diese Umstände führen zu den flachen Verläufen in den Grundwasserständen, wobei bei den Regionen 1 und 2a der ozeanische Einfluss noch hinzukommt, welcher ebenfalls das singuläre Signal der Schneeschmelze im Jahresverlauf dämpft. Dennoch sind innerhalb der hydrogeologischen Unterregionen, z.B. bei „Flachland und große Täler, vorwiegend Lockergestein“ im Einzugsgebiet der Donau (**UR 2c**), noch erhebliche Unterschiede im jahreszeitlichen Verlauf sowie der Amplituden zu erkennen. Dies zeigte, dass innerhalb der vom BGR ausgewiesenen Unterregionen weitere erhebliche Unterschiede in der Hydrogeologie zu vermerken sind, welche in die Betrachtungen mit einbezogen werden müssten. Somit wäre hier eine weitere Unterteilung notwendig, z.B. im Bereich der Unterregion 2c in GWM in tieferen Bereichen der Molasse (Festgesteinsbereiche) bzw. in den Flussniederungen (Lockergesteinsbereiche). Des Weiteren sind die jahreszeitlichen Schwankungen, wie bereits erörtert, auch von anderen Einflussfaktoren abhängig. Es könnte gegebenenfalls auch eine genauere Betrachtung der unterschiedlichen Grundwasserflurabstände, Geländehöhen, etc. innerhalb der hydrogeologischen Unterregionen stattfinden, welche vermutlich die unterschiedlichen Verläufe besser erklären würde. Die jahreszeitlichen Verläufe in den Grundwasserständen der **UR 3** sowie **UR 4** zeigen ein dynamischeres Verhalten, eine ausgeprägtere Topographie, hohe Grundwasserflurabstände und befinden sich -bis auf wenige Ausnahmen- in den Festgesteinsbereichen der Mittelgebirge. Hier ist davon auszugehen, dass die indirekte GWN der dominanter Prozess ist, da durch ein ausgeprägteres Gefälle mehr oberflächlicher Abfluss stattfindet und dadurch das Fließgewässer, meist kleinere Bachläufe, dominiert. Hinzukommt für diese Regionen, dass der Untergrund geologisch bedingt generell eine geringere Speicherkapazität aufweist, was höhere Grundwasserspiegelschwankungen zur Folge hat. Der relativ flache Verlauf der beiden GWM aus der **UR 5** lässt vermuten, dass es sich um Moränenablagerungen handelt. Auch die Information über die Hohlraumarten (aus der HÜK 200) zeigen dass die GWM sich im Bereich eines Porenaquiferes befinden.

Die Untersuchung der 40 **Quellschüttungsmessreihen** zeigte die sehr unterschiedlichen Amplituden der PK. Bei Quellen mit hohen Amplituden der PK ist ein alljährlich singuläres Abflussereignis, wie die Schneeschmelze, dominant. Es konnte durch die Clusteranalyse deutlich heraus gearbeitet werden, dass es Quellen gibt bei denen dies der Fall ist und welche, die wiederum einen sehr flachen Verlauf zeigen, ohne ein solches alljährliches, singuläres Ereignis. Bei diesen könnte es sich um langsam reagierende Kluftgesteinsquellen handeln. Bei allen Quellschüttungsmessstellen war das Maximum des PK in den Frühjahrsmonaten zu finden.

Die Auswertung der 293 **GWM** mit Hilfe des **GWRK** zeigte, dass die GWN bei 84% der GWM in den ersten Monaten des Jahres (Januar bis April) stattfindet. Dies entspricht den Erwartungen, da in diesen Zeiträumen die GWN bedingt durch die geringe Evapotranspiration am höchsten ist. Der Vergleich des jahreszeitlichen Auftretens der Maxima mit den Längen- bzw. Breitengraden zeigte, dass ein verspäteter Jahresgang mit zunehmender **Kontinentalität** zu verzeichnen ist. Die GWM des Clusters 3, welche sich im Nordwesten Deutschlands befinden, haben ihre Maxima im Januar und Februar, was auf den ozeanischen Einfluss zurückzuführen ist. Der Großteil der GWM, mit den Maxima im März und April, wird dominiert von der Schneeschmelze in diesen Monaten. Die GWM mit einem späten Maxima zeigten eine Konzentration im Süden Deutschlands und somit einen alpinen Einfluss auf die GWM, zumindest die des Clusters 6. Es muss beachtet werden, dass in den Darstellungen der Abb. 4.11 eine mögliche Verspätung der Maxima durch erhöhte Grundwasserflurabstände nicht berücksichtigt wurde bzw. ausgeschlossen werden kann. In Abschnitt 4.4.2 konnte gezeigt werden, dass die **Distanzen zum Fließgewässer** zum jahreszeitlichen Auftreten der Maxima folgen. Die GWM der Cluster mit den spätesten Maxima (Cluster 5 und 6) zeigen im Mittel die größten Distanzen. Hier wären weitere Untersuchungen -mit genauen Angaben zu Konnektivitäten bzw. Strömungsgradienten- erforderlich. Der Vergleich der mittleren **Grundwasserflurabstände** in Abschnitt 4.4.6 bestätigt deutlich die Annahme, dass eine jahreszeitliche Verspätung der Maxima mit steigendem Grundwasserflurabstand einhergeht. Die GWM von **Cluster 3** zeigen deutlich ein pluviales, ozeanisches Regime, ausschlaggebend hierfür sind folgende Faktoren; geringe Geländehöhe, geringer Grundwasserflurabstand sowie geringe Kontinentalität. Durch die geringe Topographie findet in diesen Regionen (Nordwestdeutschland) kaum nennenswerte Wasserspeicherung in der Schneedecke statt und geringe Grundwasserflurabstände begünstigen eine erhöhte Evapotranspiration. Hierdurch tritt das Maximum der Grundwasserstände früher im Jahr ein. Das saisonale Verhalten der GWM von **Cluster 6** bzw. der Vergleich mit den Metadaten zeigt deutlich, dass hier alle Einflussfaktoren ein jahreszeitlich spätes Auftreten begünstigen; hohe Distanzen zum Fließgewässer, hohe Topographie und dadurch verspätete Schneeschmelze, hoher Flurabstand und dadurch längere Versickerungsdauer des Bodenwassers sowie eine hohe Kontinentalität. Hinzu kommt im Falle der GWM des Clusters 6, dass die Stauwirkung der Alpen Starkniederschläge in den Sommermonaten begünstigt. Ansatzweise, wenn auch nicht genauso deutlich in der Ausprägung, treffen die genannten Eigenschaften auch auf **Cluster 5** zu. Die **Cluster 1, 2** sowie **4** sind in ihren jahreszeitlichen Ausprägungen sowie ihren Einflussfaktoren zwischen diesen Extremen, Cluster 3 (ozeanisch, pluvial) und Cluster 6 bzw. (näherungsweise) 5 („größtenteils“ alpin, pluvio-nival), einzugliedern.

Die Untersuchung der GWM in ihrer **Reaktion auf Trockenwetterzeiten** ergab, dass 50% der GWM und 50% der Quellen im Trockenwetterjahr 2003 bzw. im Folgejahr 2004 mit extremen Niedrigwasserständen bzw. –abflüssen reagierten. Die hierzu in Abschnitt 3.5 vermuteten Faktoren (geringe Grundwasserflurabstände, geringer Abstand zum nächsten Fließgewässer, hohe Durchlässigkeiten und geringe GWN) wurden diesbezüglich in die Betrachtung mit einbezogen. Lediglich die Vermutung hinsichtlich der Grundwasserflurabstände und der Distanzen zum Fließgewässer ließen sich bestätigen. Die GWM, welche in den Bereich des Niedrigwasserstandes H_{347} fielen, weisen durchschnittlich geringere Grundwasserflurabstände bzw. Distanzen zum Fließgewässer auf. Die beiden in Abschnitt 4.6.1 aufgeführten Beispiele zeigten jedoch auch, dass sowohl GWM mit geringen sowie hohen Grundwasserflurabständen mit extremen Niedrigwasserständen auf Trockenwetterzeiten reagieren können. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen **Regenerationsverläufe** fiel auf, dass die GWM mit großer Distanz zum nächsten Fließgewässer eine deutlich längere Beeinträchtigung aufweist. Hier wäre eine genauere Betrachtung bezüglich der Konnektivitäten der Aquifere zum Fließgewässer sinnvoll. Dies könnte z.B. mit dem Vergleich von Abflusszeitreihen und somit der direkten Reaktion auf einzelne Niederschlagsereignisse erfolgen. Dies kann Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

5.2 Datenlage

Es muss angemerkt werden, dass die Datenlage besonders bezüglich der Durchlässigkeiten, Hohlraumarten und mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten auf Interpolation beruht und damit deren Aussagekraft nicht überbewertet werden darf. Des Weiteren muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass mögliche anthropogene Einflüsse nicht berücksichtigt wurden und es im Rahmen dieser Arbeit auch nicht mehr möglich war, zu berücksichtigen ob es sich um ein standorttypisches oder importiertes Regime handelt. Da hierzu ebenfalls keine Daten vorhanden waren, konnte nicht untersucht werden, ob es sich bei manchen Aquiferen eventuell um gespannte Grundwasserleiter handelt, wodurch sich die Saisonalität sowie die Reaktion auf Trockenwetterzeiten sich zu denen in einem ungespannten Aquifer unterscheiden. Bezüglich der Distanzen zum nächsten Fließgewässer könnte eine detailliertere Gewässernetzkarte herangezogen werden, da die Gewässernetzkarte des HAD kleine Fließgewässer nicht beinhaltet bzw. die Genauigkeit generell nicht überbewertet werden darf. Es kommt hinzu, dass die Distanzen zum Fließgewässer horizontal gemessen wurden, wodurch auch die Tiefenlage des Aquifers nicht berücksichtigt wurde. Hier wäre es im Rahmen weiterer Untersuchungen denkbar, die Parameter „Distanz zum Fließgewässer“ und „Grundwasserflurabstand“ der GWM genauer zu analysieren. Denn bei geringer Topographie und hohen Grundwasserflurabständen ist selbst bei geringen Distanzen zum Fließgewässer eine Konnektivität mit dem Aquifer unwahrscheinlich. Außerdem wären die Gradienten der Grundwasserströmungen im Bereich der GWM hilfreich für die Auswertung. Für eine bessere Analyse der Regenerationsfähigkeit der Aquifere könnten mit Hilfe von Abflussdaten der Fließgewässer Korrelationen zwischen Grundwasserständen und Abflüssen untersucht werden und der Grad der Konnektivität herausgearbeitet werden.

5.3 Abschätzung des Gefährdungspotentials bezüglich Trockenwetterzeiten

Um eine allgemeine Abschätzung zu dem Gefährdungspotenzial bezüglich Trockenwetterzeiten abzugeben, ist eine vereinfachte Zusammenfassung in Abb. 5.1 abgebildet. Dargestellt sind die einzelnen Unterregionen, zunächst unterteilt in deren zu erwartenden Aquifergröße bzw. Mächtigkeit und ihrer (vorwiegenden) Zugehörigkeit in Locker- bzw. Festgestein sowie zu erwartenden effektiven Porosität. In der untergeordneten Darstellung sind die GWM in ihren Durchlässigkeiten gegenüber ihren mittleren Grundwasserflurabständen geplottet. Auch hier wurden nur diejenigen Durchlässigkeiten verwendet, wie schon in Abschnitt 4.4.4 beschrieben, welche keine klassenübergreifenden Angaben beinhalten. Die Farben der GWM folgt der Clusterzugehörigkeit aus Abschnitt 4.3.

Es kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass Aquifere mit geringen Mächtigkeiten und geringer Größe in den Festgesteinsbereichen das höchste Gefährdungspotenzial bezüglich Trockenwetterzeiten aufweisen. Zu solchen Aquiferen gehören z.B. diejenigen die sich in kleinen Tälern der Mittelgebirge, wie dem Schwarzwald, befinden (UR 3 & 4). Im Gegenteil hierzu kann bei Aquiferen, welche große Mächtigkeiten und Größen im Lockergesteinsbereich aufweisen, davon ausgegangen werden, dass diese während langanhaltenden Dürren weniger gefährdet sind und länger ein stabiles Verhalten zeigen. Hierzu kann z.B. der Oberrheingraben als wichtige Grundwasserquelle gezählt werden (UR 2b). Für GWM, die sich im Bereich großer Aquifere mit hohen Mächtigkeiten im Festgesteinsbereich befinden, wird von einem mittleren bis geringen Gefährdungspotential ausgegangen. Hierzu gehören z.B. Aquifere der Schwäbischen Alb oder der Molasse (UR 2c). Dieses mittlere bis geringe Gefährdungspotential gilt ebenfalls für GWM mit geringen Aquifergrößen bzw. Mächtigkeiten im Lockergesteinsbereich, wie z.B. Moränenablagerungen (UR 5). Die getroffenen Aussagen müssen jedoch unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren, besonders der Grundwasserflurabstände und Konnektivitäten zum Fließgewässer, stattfinden.

In Abb. 5.1 wurde versucht, die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse vereinfacht darzustellen. Dies soll näherungsweise eine Hilfestellung bei der Abschätzung des Gefährdungspotentials von Aquiferen gegenüber Trockenwetterzeiten geben bzw. die ausgewerteten GWM in diesem Bezug dazustellen.

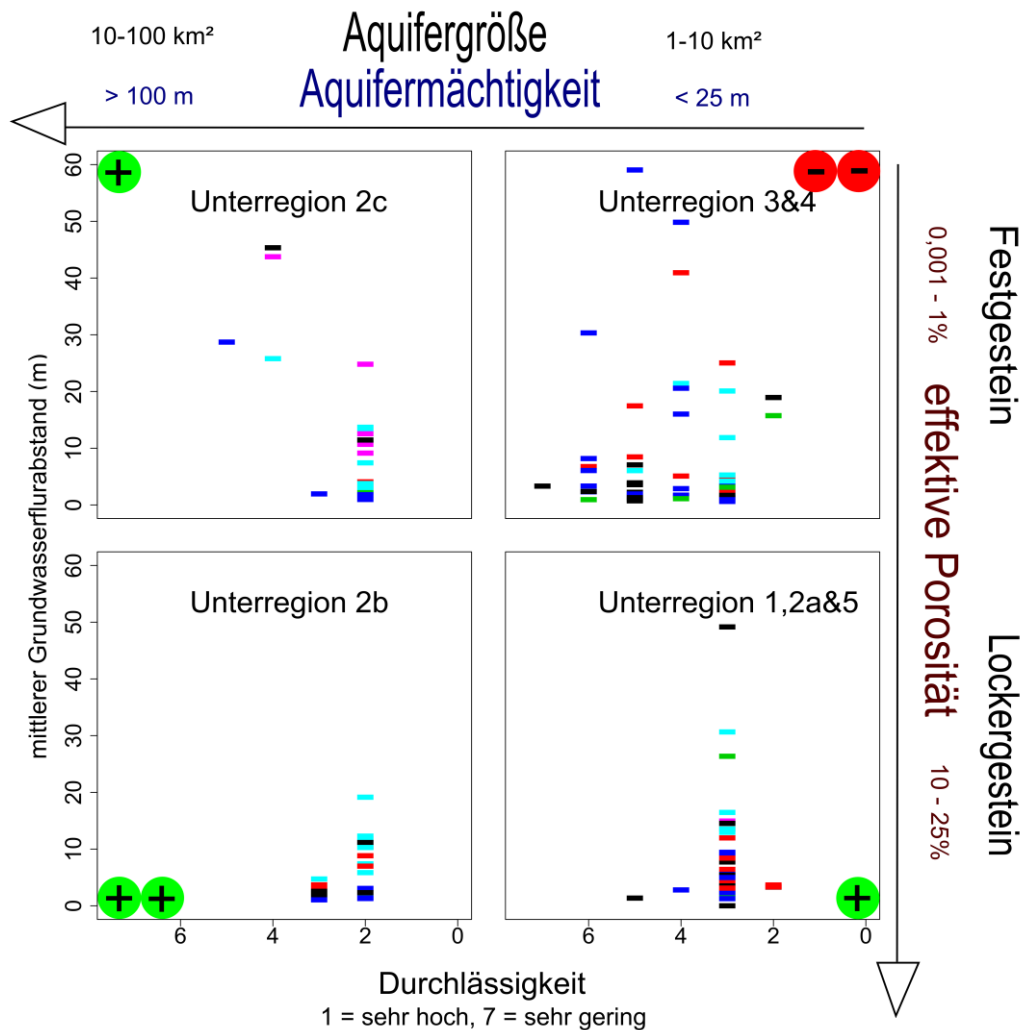


Abb. 5.1: Abschätzung eines möglichen Gefährdungspotentials in Trockenwetterzeiten

Der Vergleich der GWM bezüglich ihrer Reaktion in Trockenwetterzeiten und der soeben gegeben Abschätzung ergab kein eindeutiges Bild. Es hat sich, nicht erst im Laufe dieser Arbeit, gezeigt, dass eine sehr hohe Komplexität der Grundwasserregimes bzw. ihrer Einflussfaktoren besteht. Durch diese natürliche Komplexität der Aquifersysteme und ihrer Einflussfaktoren nur schwerlich Abschätzungen und schon gar keine verlässlichen Vorhersagen getroffen werden können. Hierzu wäre die Erarbeitung eines Konzeptes denkbar und wünschenswert, welches die Einflussfaktoren einerseits einzeln abgrenzt, um definierte Parameterangaben machen zu können, und andererseits ihre gegenseitige Beeinflussung mit in die Abschätzung mit einbezieht. Dies kann Gegenstand weiterer Arbeiten sein.

6 Schlussfolgerung

Die unterschiedlichen Betrachtungsansätze, einerseits auf Grund der Hydrogeologie und andererseits auf Grund der Daten (bzw. des GWRK), zeigten jeweils, dass die Grundwasserregime innerhalb Deutschlands zum Teil an Hand der Metadaten erklärt werden können.

Für eine Betrachtung der Grundwasserregime in Deutschland ist eine regionale Betrachtung, und sei es an Hand von hydrogeologischen Unterregionen, nicht ausreichend. Grund hierfür ist, dass wichtige Einflussfaktoren außer Acht gelassen werden bzw. weitere Unterteilungen notwendig wären.

Die Auswertung der Quellschüttungen ergab, dass erhebliche Unterschiede in den Amplituden der PK vorhanden sind, weniger jedoch in dem jahreszeitlichen Auftreten der Maxima.

Mit Hilfe der Clusteranalyse des GWRK und dem Vergleich mit den vorhandenen Metadaten konnten die jahreszeitlichen Verläufe bzw. Unterschiede gut herausgestellt werden. Durch den Vergleich zwischen den gebildeten Clustern und den hydrogeologischen Unterregionen konnte der Bezug zu gewissen Regionalitäten bestätigt werden. Die Betrachtung der mittleren Grundwasserflurabstände zeigt deutlich, dass mit steigenden Grundwasserflurabständen eine jahreszeitliche Verspätung der Verläufe einhergeht. Diese jahreszeitliche Verspätung ist ebenfalls mit zunehmender Kontinentalität zu beobachten. Des Weiteren wird deutlich, dass mit steigendem mittlerem Grundwasserflurabstand ebenfalls eine Verspätung der Grundwassersstände zu erwarten ist.

Die Untersuchung der GWM in ihrer Reaktion auf Trockenwetterzeiten am Beispiel der Jahre 2003 bzw. 2004 zeigen, dass die Hälfte aller verwendeten GWM eine extreme Reaktion, also innerhalb des Niedrigwasserstandes H_{347} lagen.

Verlässliche Aussagen das Gefährdungspotenzial der Aquifere betreffend sind auf Grund der natürlichen Komplexität kaum möglich.

Was die Datenlage betrifft sollte nicht nur eine deutschlandweite Standardbeprobungsfrequenz bzw. -aufzeichnung sondern auch eine zentrale landesweite Dokumentation festgelegter Metadaten angestrebt werden. Hierdurch würde nicht nur die Auswertung erleichtert, sondern auch eine bessere Vergleichbarkeit der Daten sowie Ergebnisse gegeben.

Literaturverzeichnis

Allen, D.M., Whitfield, P.H., Werner, A., 2010. Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: regime classification, and linkages to climate and streamflow. *Hydrol. Process.* (24), 3392–3412.

BAFU-Bundesamt für Umwelt, 2009. Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006, Umwelt-Zustand Nr. 0903. Bundesamt für Umwelt, Bern. 144 S.

BfG-Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2006. Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland Ursachen – Wirkungen – Folgen. Mitteilungen Nr. 27. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. 211 S.

BGR und SGD, 2011. HÜK200 OGWL V2.5, Hannover.

BMU-Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2003. Hydrologischer Atlas von Deutschland. Bonn, Berlin.

BMU-Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2008. Grundwasser in Deutschland. Reihe Umweltpolitik. 1. Auflage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin. 72 S.

Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P., 2003. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report Nr.83. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Potsdam. 96 S.

Green, T.R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H., Aureli, A., 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405 (3-4), 532–560.

Hölting, B., Coldewey, W.G., 2009. Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg. 7. Auflage, 384 S.

- Kohn, I., Freudiger, D., Rosin, C., Stahl, K., Weiler, M., 2013/ in Vorbereitung. Das hydrologische Extremjahr 2011: Dokumentation, Einordnung Ursachen und Zusammenhänge. Mitteilungen Nr. 29. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- LAWA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2010. Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“. Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden. 36 S.
- LfU-Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004. Das Niedrigwasserjahr 2003. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. 1. Auflage. 46 S.
- LFW– Bayrisches Landesamt Für Wasserwirtschaft, 2005. Wasserwirtschaftlicher Bericht – Niedrigwasserperiode 2003. Informationsberichte Heft 2/05, München. 162 S.
- MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Dochartaigh, B.É.Ó., Taylor, R.G., 2012. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environ. Res. Lett.* 7 (2), 24009–24016.
- Nüchel, H.J., 1961. Die Grundwasserregime in Deutschland. Dissertation erschienen in *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bad Godesberg. Bd. 137, 95 S.
- Peters, E., van Lanen, H.A.J., Torfs, P.J.J.F., Bier, G., 2005. Drought in groundwater—drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology* 306 (1-4), 302–317.
- Pfaundler, M., Dübendorfer, C., Zysset, A., 2011. Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer. Hydrologie – Abflussregime Stufe F (flächendeckend). Umwelt-Vollzug Nr. 1107. Bundesamt für Umwelt, Bern. 113 S.
- Puhani, J., 2005. Statistik. Einführung mit praktischen Beispielen. Lexika-Verlag, Eibelstadt. 10. Auflage, 222 S.
- Schürch, M., 2010. Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz. Konzept und Fallbeispiele. *gwa* 2010/11, 955–965.
- Shabalova, M.V., van Deursen, W.P.A., Buishand, T., 2003. Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Climate Research* (23), 233–246.

Statistisches Bundesamt, 2010.

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/AktuellTrinkwasser.html>. Accessed September 15, 2013.

Stein, P., Vollnhals, S., 2011. Grundlagen clusteranalytischer Verfahren, Vorlesungsskript, Institut für Soziologie, Universität Duisburg-Essen. 74 S.

Tóth, J., 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology* 10 (2), 164–176.

Umweltbundesamt, 2008. Impacts of climate change on water resources -adaption strategies for Europe, Texte 32/08, Dessau-Roßlau. 212 S.

van Camp, M., Coetsiers, M., Martens, K., Walraevens, K., 2010. Effects of multi-annual climate variability on the hydrodynamic evolution (1833 to present) in a shallow aquifer system in northern Belgium. *Hydrological Sciences Journal* 55 (5), 763–779.

Wendland, F., Becker, R., 1993. Atlas zum Nitratstrom in der Bundesrepublik Deutschland. Rasterkarten zu geowissenschaftlichen Grundlagen, Stickstoffbilanzgrößen und Modellergebnissen. Springer, Berlin, New York, 96 Seiten.

Wiedenbeck, M., Züll, C., 2001. Klassifikation mit Clusteranalyse: Grundlegende Techniken hierarchischer und K-means-Verfahren. ZUMA How-to-Reihe, Nr.10, Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen, Mannheim. 18 S.

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Haße, C., Fritsch, U., Cramer, W., 2005. Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Kurzfassung. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam. 12 S.

Anhang A: Agglomerationsplot und Dendrogrammplot

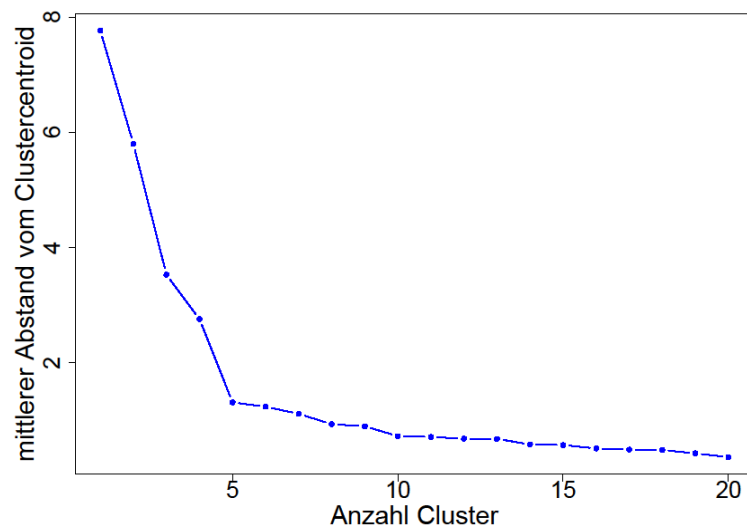


Abb. A 1: Agglomerationsplot der Clusteranalyse der PK

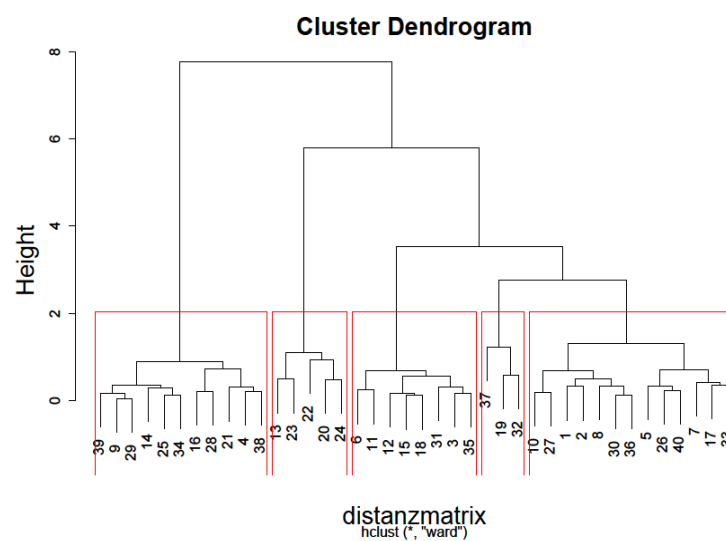


Abb. A 2: Dendrogrammplot der Clusteranalyse der PK

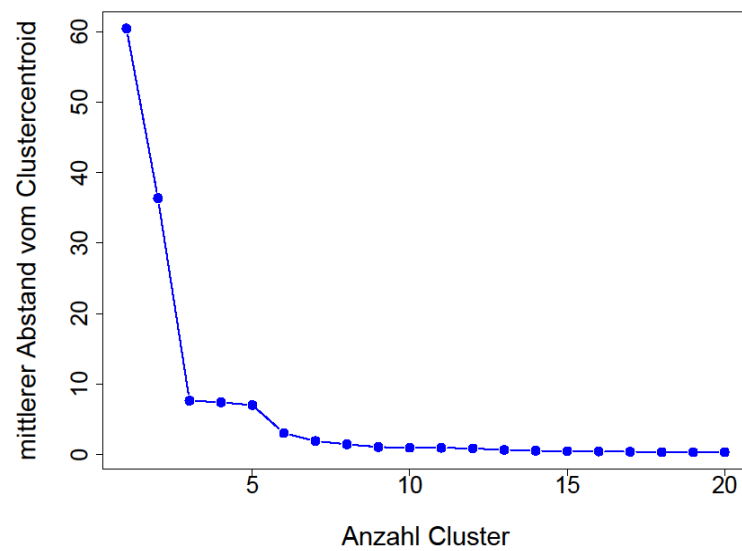


Abb. A 3: Agglomerationsplot der Clusteranalyse der GWRK

Anhang B: Kürzel der Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters

KF_L → Kürzel für "Durchlässigkeit Leiter"

KF_L	Durchlässigkeit
0	keine Angaben
1	sehr hoch ($>1E-2$)
2	hoch ($>1E-3 - 1E-2$)
3	mittel ($>1E-4 - 1E-3$)
4	mäßig ($>1E-5 - 1E-4$)
5	gering ($>1E-7 - 1E-5$)
6	sehr gering ($>1E-9 - 1E-7$)
7	äußerst gering ($<1E-9$)
übergreifende Klassen	
8	sehr hoch bis hoch ($>1E-3$)
9	mittel bis mäßig ($>1E-5 - 1E-3$)
10	gering bis äußerst gering ($<1E-5$)
11	stark variabel
12	mäßig bis gering ($>1E-6 - 1E-4$)
99	Gewässer

Abb. B 1: Kürzel der Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters aus der HÜK 200 (BGR & SGD, 2011)

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum

Unterschrift