

Zusammenfassung des weiträumigen Klimadeterminismus der piezometrischen Pegelstände des Oberrhein-Aquifers

Lisa Baulon¹

¹ BRGM, 3 av. C. Guillemin, 45060 Orleans, Frankreich

Diese Zusammenfassung fasst die Ergebnisse der Teilmaßnahme „Analyse des Klimadeterminismus des Rhein-Aquifers“ (A3.6) zusammen, die im Rahmen der Aktion „Charakterisierung der Grundwasserentwicklung in Abhängigkeit von verschiedenen (klimatischen/anthropogenen) Faktoren“ des Interreg-Projekts GRoundwater EvoluTions and resilience of Associated biodiversity - Upper Rhine (GRETA) durchgeführt wurde.

1. Einführung

Der Oberrhein-Aquifer kann je nach Grundwasserdynamik in verschiedene Bereiche unterteilt werden (siehe Teilmaßnahme 3.3: „Analyse der zeitlichen Entwicklung des Grundwasserspiegels: Berechnung von Trends und Brüchen in den piezometrischen Messreihen“). So sind einige Bereiche eher reaktiv (schnelle Schwankungen des Grundwassers auf jährlicher oder sogar unterjähriger Skala), während andere eher träge sind (langsame Schwankungen des Grundwassers auf mehrjährige Sicht). Dies hängt größtenteils von den Eigenschaften des Grundwasserleiters ab. Für die trägsten Bereiche, wie das ausgewählte Beispiel des Rheingrundwassers, das durch das Epfig-Piezometer in Frankreich am linken Ufer des Rheins (Abbildung 1) repräsentiert wird, sind die jährlichen Schwankungen im Vergleich zu den mehrjährigen Schwankungen vernachlässigbar. Diese mehrjährigen Schwankungen des Grundwassers sind mit großräumigen atmosphärischen Prozessen verbunden, die sich über den euro-atlantischen Raum erstrecken.

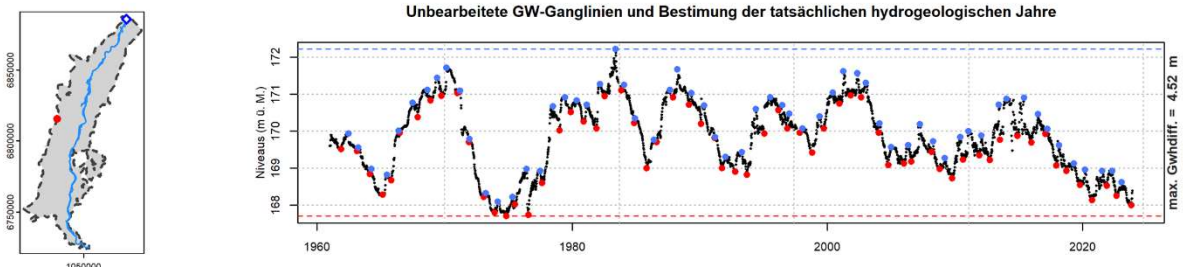


Abbildung 1 – Piezometrische Messungen des Grundwasserleiters des Rheinischen Aquifers in Epfig (03074X0015).

2. Stand der Technik und Methodik

Das Periodogramm und die Zerlegung des piezometrischen Signals in Epfig durch kontinuierliche Wavelet-Transformation deutet darauf hin, dass es mehrere mehrjährige Schwankungen mit unterschiedlichen Periodizitäten gibt, die sich innerhalb des piezometrischen Signals vermischen (Abbildung 2). Diese mehrjährigen Schwankungen weisen Periodizitäten von ~ 4 Jahren, ~ 7 Jahren und ~ 15 Jahren auf. Die ~ 4 -jährigen Schwankungen machen für das Beispiel Epfig einen vernachlässigbaren Teil des piezometrischen Signals aus, können aber für andere Piezometer und Bereiche des Rheingrundwassers signifikant sein (z. B. Bauwerk 30/019-8 in Burkheim in Deutschland am rechten Ufer des Rheins; Anlage 1).

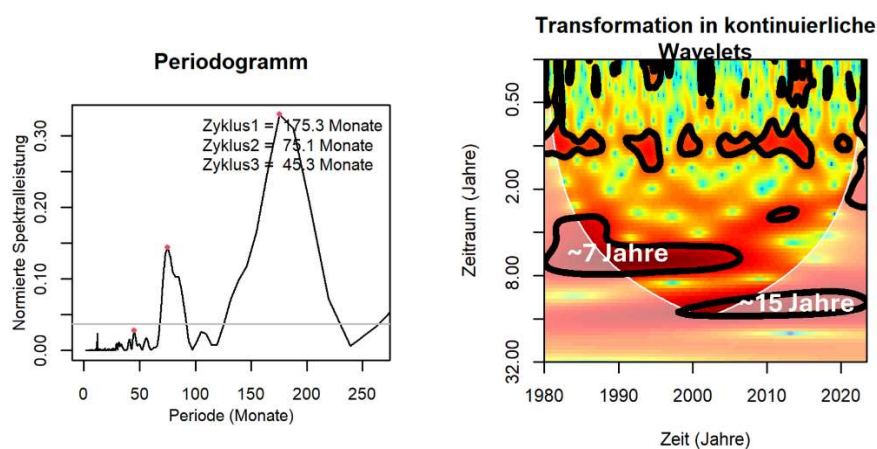


Abbildung 2 – Periodogramm und kontinuierliche Wavelet-Transformation der piezometrischen Messungen in Epfig.

Diese mehrjährigen Schwankungen, die auch als niederfrequente Schwankungen bezeichnet werden, sind mit den mehrjährigen Schwankungen der lokalen Klimavariablen (Temperatur, Niederschlag, Evapotranspiration) verbunden. Sie sind jedoch in ihrer Amplitude im Signal der Klimavariablen viel weniger ausgeprägt, da sie weitgehend von den hochfrequenten Schwankungen (unterjährig bis jährlich) überdeckt werden. Wassereinzugsgebiete und Grundwasserleiter fungieren dann als Tiefpassfilter, die hochfrequente Schwankungen zugunsten niederfrequenter Schwankungen stark abschwächen. Der Grad der Abschwächung (Glättung) dieser hochfrequenten Schwankungen hängt weitgehend von den physikalischen Eigenschaften des Grundwasserleiters und seines Einzugsgebiets ab; so werden einige Grundwasserleiter oder Grundwasserleiterbereiche die niederfrequente Klimavariabilität stark wiedergeben, während andere sie nur schwach wiedergeben.

Ähnlich wie bei der hochfrequenten Schwankung ist auch diese niederfrequente Schwankung mit der natürlichen Klimavariabilität verbunden. Atmosphärische oder ozeanische Zirkulationsmuster wie die Nordatlantische Oszillation (NAO) können diese Klimavariabilität beschreiben. Mehrere Studien haben die Zusammenhänge zwischen diesen Modi der atmosphärischen oder ozeanischen Zirkulation und den

niederfrequenten Schwankungen (mehrjährig bis mehrere Jahrzehnte) der hydroklimatischen Variablen (Temperatur, Niederschlag, Evapotranspiration) und der piezometrischen Pegel in Europa aufgezeigt (Rust et al., 2022 und 2024; Neves et al., 2019; Liesch und Wunsch, 2019; Baulon, 2023). Die Mehrheit dieser Studien verwendet daher Indizes mit vordefinierten Handlungsschwerpunkten¹ (z. B. NAO), die bestimmte Mechanismen der atmosphärischen Zirkulation über den Zeitverlauf beschreiben.

Es ist jedoch möglich, dass diese Indizes die lokalen hydro(geo)logischen Schwankungen nicht optimal beschreiben. Aus diesem Grund wurden neue statistische Ansätze entwickelt, die es ermöglichen, ausgehend vom lokalen hydrologischen Signal die breit angelegten klimatischen Einflüsse auf die lokalen hydrologischen Schwankungen zu identifizieren (Massei et al., 2017; Baulon, 2023). Diese Art von Ansätzen, genauer gesagt eine zusammengesetzte Analyse nach Skalenwerten² (Baulon, 2023), wird verwendet, um die großskaligen Klimaeinflüsse der niederfrequenten Schwankungen auf die piezometrischen Pegel im Oberrhein-Aquifer zu identifizieren. Außerdem wird die Analyse für jede der niederfrequenten Schwankungen (~4 Jahre, ~7 Jahre, ~15 Jahre) einzeln durchgeführt, da sich die atmosphärischen Muster und Mechanismen, die mit jeder dieser niederfrequenten Schwankungen verbunden sind, unterscheiden (Dieppo et al., 2016; Massei et al., 2017; Fossa, 2020; Baulon, 2023).

Die Suche nach weitreichenden Klimatreibern konzentriert sich auf die niederfrequenten Schwankungen, da die hochfrequenten (unterjährig bis jährlich) Schwankungen der Piezometrie eher von natürlichen (Eigenschaften des Einzugsgebiets und des Grundwasserleiters, Einfluss des Rheins oder von Wasserläufen, lokale Klimaeffekte) oder anthropogenen (z. B. Pumpen) lokalen Antrieben beeinflusst werden können. Sie sind daher, was die Piezometrie betrifft, oft nur wenig mit der weiträumigen Klimavariabilität verbunden.

Schließlich wird die Analyse für 5 Piezometer in verschiedenen Bereichen des Rheingrundwassers, entweder in einem reaktiven oder trägem Kontext (Abbildung 3), über den Zeitraum 1961-2022 durchgeführt. Die piezometrischen Messreihen sind in Abbildung 4 dargestellt.

¹ Lokalisierung von atmosphärischen Hoch- oder Tiefdruckgebieten.

² Analyse, die für jede Frequenz (Skala) des piezometrischen Signals (z. B. ~7 Jahre, ~15 Jahre) darauf abzielt, den atmosphärischen Antrieb über dem euro-atlantischen Raum (d. h. die Positionierung der atmosphärischen Hoch- und Tiefdruckgebiete) zu identifizieren, der seine zeitlichen Schwankungen erklärt.

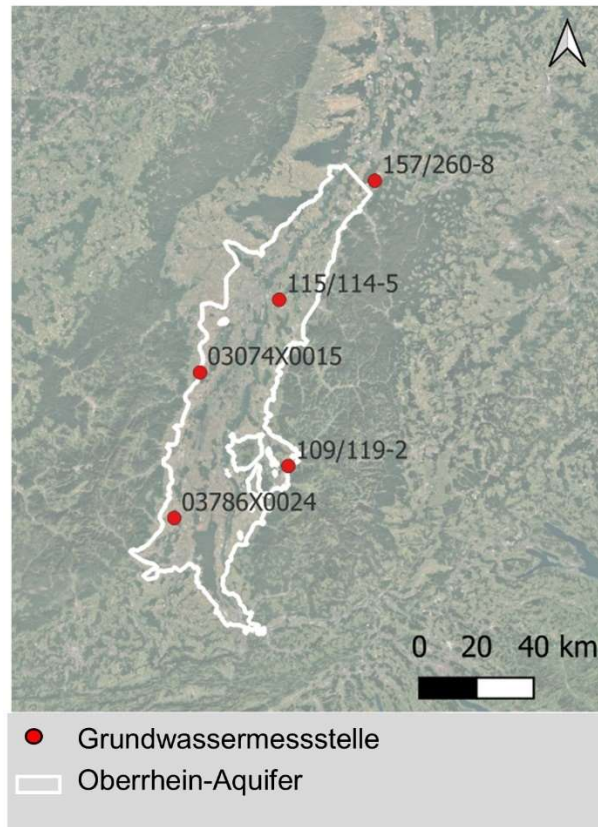
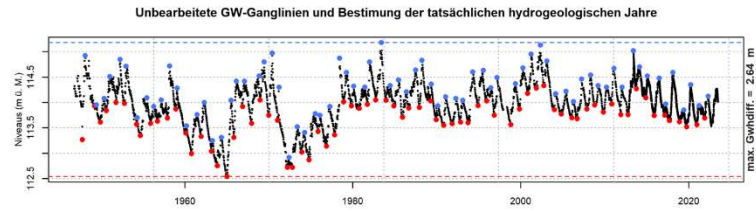
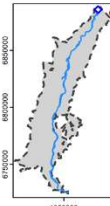
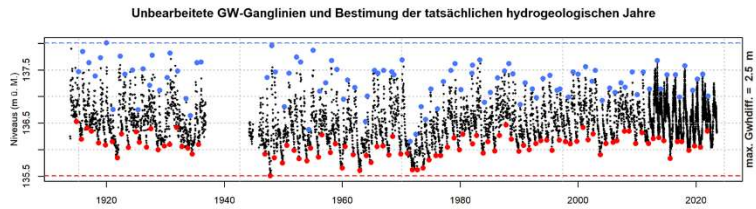
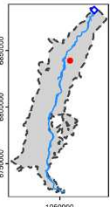


Abbildung 3 – Lage der 5 ausgewählten Piezometer im trägen oder reaktiven Kontext zur Identifizierung der klimatischen Einflüsse auf die niederfrequenten Schwankungen der piezometrischen Pegel im rheinischen Grundwasserleiter.

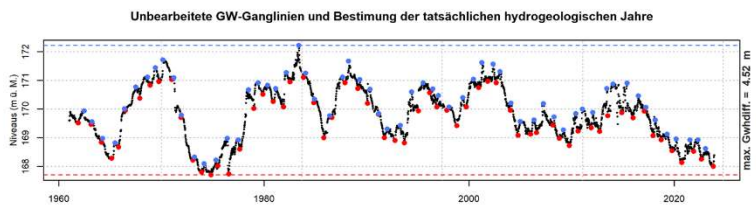
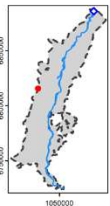
Ettlingen
(157/260-8)



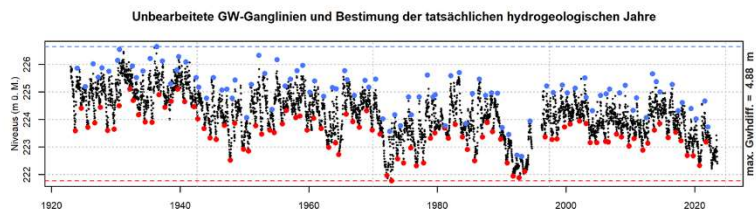
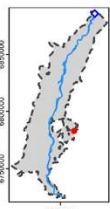
Kork
(115/114-5)



Epfig
(03074X0015)



Gundelfingen
(109/119-2)



Merxheim
(03786X0024)

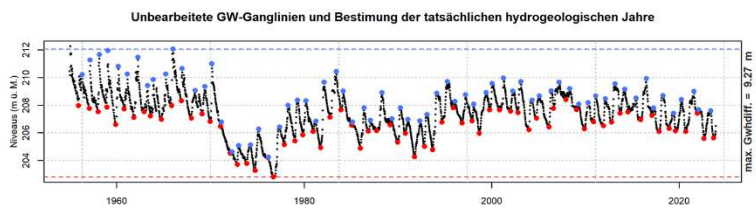


Abbildung 4 – Piezometrische Messungen der 5 Piezometer, die für die Identifizierung der klimatischen Einflüsse auf die niederfrequenten Schwankungen der piezometrischen Pegel ausgewählt wurden.

3. Großräumige klimatische Einflüsse auf die piezometrischen Pegel

Die großräumigen klimatischen Einflüsse in Bezug auf die niederfrequenten Schwankungen der piezometrischen Pegel sind für alle untersuchten Piezometer im rheinischen Aquifer identisch. Daher werden nur die Ergebnisse für das Piezometer in Epfig dargestellt. Die Ergebnisse für alle untersuchten Piezometer sind in Anhang 2 zu finden.

Die Abbildung 5 definiert die atmosphärische Struktur, die mit den Schwankungen der piezometrischen Pegel verbunden ist. Kurz gesagt wird für jedes Gitterfeld des atmosphärischen Feldes die Korrelation zwischen einer Frequenz der geopotentiellen Höhen³ (z. B. ~7 Jahre) und derselben Frequenz der Piezometrie des Rhein-Aquifers berechnet. Diese für alle Maschen des atmosphärischen Feldes durchgeführte Berechnung hebt Bereiche mit geopotentiellen Höhen hervor, die nicht mit der Piezometrie korrelieren (blau) sowie Bereiche, die mit ihr korrelieren (rot). Daraus ergibt sich eine Karte mit atmosphärischen Strukturen, aus denen sich die atmosphärischen Mechanismen ableiten lassen, die jede der niederfrequenten Schwankungen des piezometrischen Signals steuern.

Das Lesen dieser Karten entspricht also dem Lesen einer Korrelationskarte. So zeigt ein blauer Bereich für eine bestimmte Frequenz eine Anti-Korrelation zwischen den geopotentiellen Höhen für einen bestimmten Breitengrad-Längengrad und den piezometrischen Pegeln. Zum Beispiel ungewöhnlich niedrige geopotentielle Höhen (oft gleichbedeutend mit einem atmosphärischen Tiefdruckgebiet), wenn die piezometrischen Werte tendenziell hoch sind; oder umgekehrt ungewöhnlich hohe geopotentielle Höhen, wenn die piezometrischen Werte tendenziell niedrig sind.

Umgekehrt zeigt ein roter Bereich eine Korrelation zwischen den geopotentiellen Höhen für einen bestimmten Breitengrad-Längengrad und den piezometrischen Pegeln – ebenfalls für eine bestimmte Frequenz. Zum Beispiel ungewöhnlich hohe geopotentielle Höhen (oft gleichbedeutend mit einem Hochdruckgebiet), wenn die piezometrischen Werte tendenziell hoch sind; oder umgekehrt ungewöhnlich niedrige geopotentielle Höhen, wenn die piezometrischen Werte tendenziell niedrig sind.

³ Die geopotentielle Höhe bezeichnet die Höhe, bei der ein bestimmter Druck erreicht wird: z. B. bezeichnet die geopotentielle Höhe bei 500 hPa die Höhe in der Atmosphäre, bei der ein Druck von 500 hPa erreicht wird. An einem gegebenen Punkt der Erde ändert sich diese Höhe im Laufe der Zeit in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen. Dies ist ein Indikator für Tiefdruck- oder Hochdrucksysteme. Diese Höhe der 500 hPa-Druckfläche hat die Tendenz, bei Vorhandensein eines Hochdruckgebiets zuzunehmen und bei einem Tiefdruckgebiet abzunehmen. In der Klimatologie wird die Verwendung der geopotentiellen Höhen bei 500 hPa oft der Verwendung des Drucks an der Meeresoberfläche vorgezogen, da sie eine bessere Annäherung an die Strömungen in der Atmosphäre ermöglichen (d. h. ohne Auswirkungen der Rauheit der Erde).

Die mit den ~4-Jahres- und ~15-Jahres-Schwankungen verbundenen atmosphärischen Strukturen sind in etwa gleich (Abbildung 5). Dabei handelt es sich um zwei Tiefdruckzentren, die sich über den Atlantik erstrecken und im Wesentlichen der Zugbahn des Golfstroms folgen, bis sie bei hohen Niederschlagsmengen und piezometrischen Werten in die Nordsee gelangen. Diese westliche Zirkulation führt zu einer massiven Feuchtigkeitszufuhr aus dem Atlantik in das Gebiet des rheinischen Grundwasserleiters. Umgekehrt deutet diese Art von atmosphärischer Struktur in Verbindung mit niedrigen Niederschlagsmengen und piezometrischen Werten auf eine Blockade mit einem Hochdrucksystem über dem Nordatlantik hin, das die Zufuhr von Feuchtigkeit in den Oberrheinischen Grundwasserleiter verhindert.

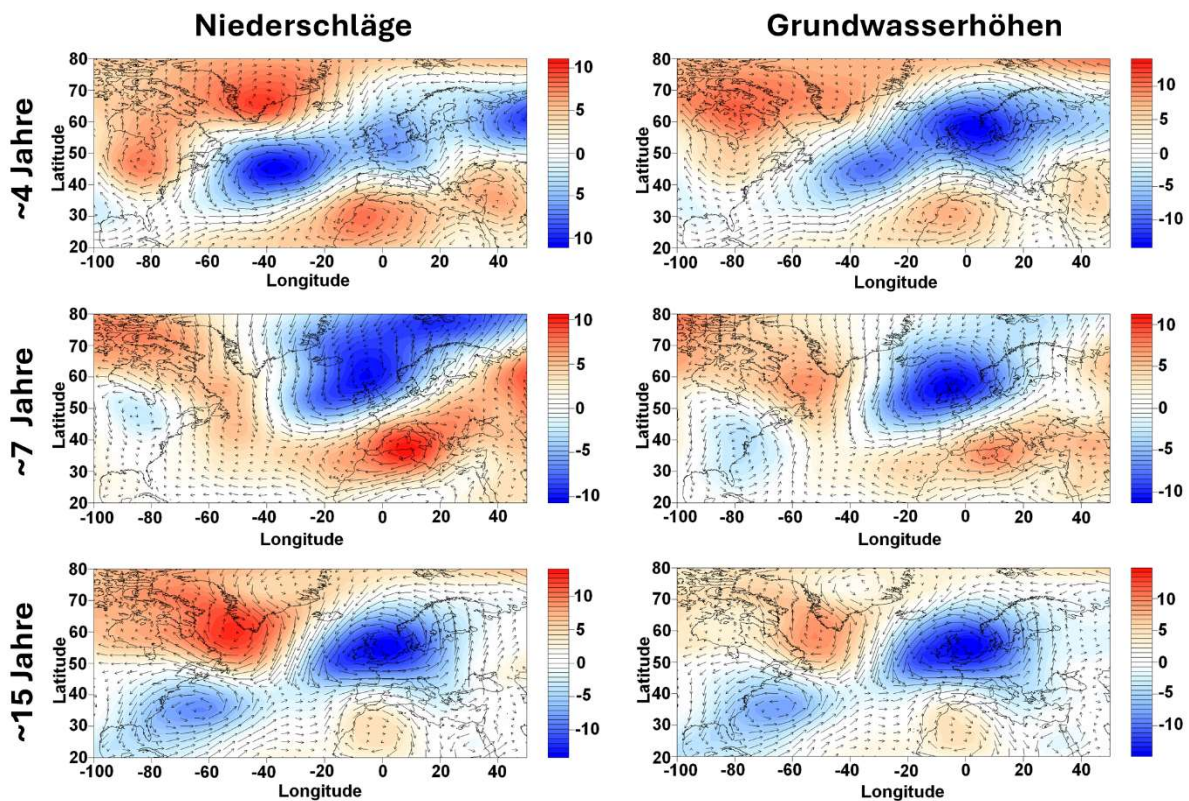


Abbildung 5 – Zusammensetzungen atmosphärischer Felddaten: Z500 - geopotentielle Höhen bei 500 hPa (m) und Windvektoren bei 500 hPa, verbunden mit den interannuellen bis 10-jährigen Schwankungen der Niederschläge und piezometrischen Pegeln in Epfig (Rheingrundwasser am linken Ufer des Rheins, Frankreich).

Die atmosphärische Struktur, die mit den ~7-Jahres-Schwankungen verbunden ist, ist dagegen deutlich erkennbar. Sie ist typisch für eine westliche Zirkulation und genauer gesagt für ein Modell vom Typ NAO (Abbildung 5). Das Vorzeichen der Aktionszentren deutet auf ein Regime vom Typ NAO+ während Perioden mit hohen interannuellen piezometrischen Pegeln und vom Typ NAO- während Perioden mit niedrigen piezometrischen Pegeln hin.

Ein NAO+ Regime bedeutet somit eine Vertiefung des nordisländischen Tiefs und eine Aufblähung des Azorenhochs, was zu einer Zunahme des meridionalen Druckgradienten führt. In diesem Zusammenhang wandert die Tiefdruckrinne Richtung Nordeuropa, was

in diesen Regionen zu warmen und feuchten Bedingungen führt (Hurrell, 1995; Hurrell und Deser, 2015; Abbildung 6). Die Aktionszentren des nordisländischen Tiefs und des Azorenhochs müssen in Bezug auf ihre „Standard“-Position weiter nach Süden verschoben werden (angegeben in Abbildung 6), damit die Tiefdruckrinne die Region des Oberrheinischen Grundwasserleiters stark beeinflusst und dort für ungewöhnlich feuchte Bedingungen sorgt. Darauf deutet also die atmosphärische Struktur hin, die in Abbildung 5 identifiziert wurde.

Das NAO- Regime wiederum bedingt einen ungewöhnlich hohen Druck im Bereich des nordisländischen Tiefs und einen ungewöhnlich niedrigen Druck im Bereich des Azorenhochs, was zu einer Verringerung des meridionalen Druckgradienten führt (Abbildung 6). In diesem Zusammenhang wandert die Tiefdruckrinne in Richtung Mittelmeerregion. In Nordeuropa (Hurrell, 1995) und in der Region des Rheinischen Grundwasserleiters sind dann kalte und trockene Bedingungen zu beobachten.

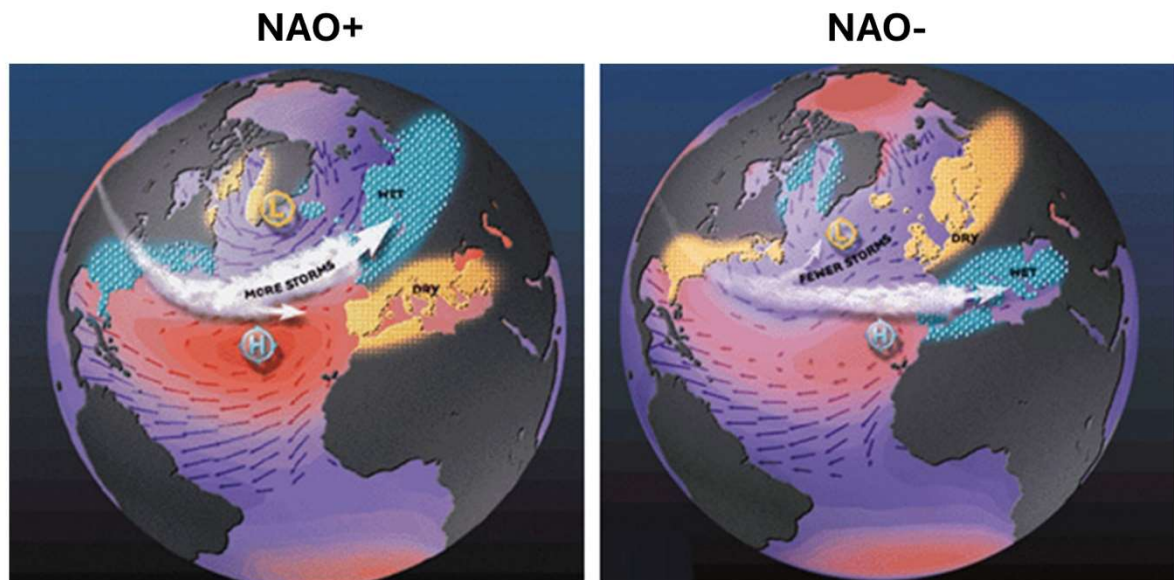


Abbildung 6 – Schematische Darstellung der Auswirkungen der positiven (NAO+), und negativen (NAO-) Phasen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) auf das europäische Klima. Quelle: Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University.

4. Schlussfolgerung

Für den gesamten Grundwasserleiter des Rheinischen Aquifers sind die großräumigen atmosphärischen Mechanismen, die mit den einzelnen Stufen der niederfrequenten Schwankungen der Piezometrie verbunden sind, identisch. Die Analyse der 5 den Rhein-Aquifer kartierenden Piezometer deutet auf ähnliche atmosphärische Strukturen und Mechanismen hin. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen einer früheren Studie überein, die die Piezometrie der Grundwasserleiter im Pariser Becken analysierte und in der die gleichen atmosphärischen Strukturen identifiziert wurden (Baulon, 2023). Das bedeutet, dass lokale klimatische Einflüsse (z. B. Föhn-Effekt aufgrund der Vogesen) die interannuellen bis zehnjährigen Schwankungen der Niederschläge und der Piezometrie des rheinischen Aquifers kaum beeinflussen.

Da in den trägen Bereichen die Piezometrie des Grundwassers hauptsächlich von großräumigen klimatischen Mechanismen abhängt, erscheint es wichtig, diese in den Modellen zur Vorhersage/Hochrechnung der Grundwasserspiegel angemessen zu berücksichtigen. Beispielsweise können die Ergebnisse dieser Studie Auswirkungen auf die Auswahl der GCM/RCM-Modelle haben, die zur Erstellung von Hochrechnungen unter Berücksichtigung des Klimawandels im Rahmen des Interreg-Projekts GRETA (Aktion 5 – „Simulation der Auswirkungen des Klimawandels bis zum Jahr 2100“) verwendet werden. Die Idee könnte sein, die Simulationen und dann die Hochrechnungen der GCM/RCM-Modelle auszuwählen, die diese niederfrequenten Schwankungen und möglicherweise die hier identifizierten atmosphärischen Zirkulationsmuster am besten wiedergeben – was nicht immer der Fall ist. Eine korrekte Simulation dieser niederfrequenten Schwankungen ist in der Tat essentiell, da für einige Grundwasserbereiche die niederfrequenten Schwankungen mehr als 80 % der Schwankungen der piezometrischen Werte erklären.

5. Referenzen

Baulon, L., 2023. Déterminisme climatique et hydrogéologique de l'évolution à long terme des niveaux piézométriques. (dt.: Klimatischer und hydrogeologischer Determinismus der langfristigen Entwicklung piezometrischer Pegel.) Dissertation. Normandie Universität.

Dieppoï, B., Pohl, B., Rouault, M., New, M., Lawler, D., Keenlyside, N., 2016. Interannual to interdecadal variability of winter and summer southern African rainfall, and their teleconnections. J. Geophys. Res. Atmospheres 121, 6215–6239. <https://doi.org/10.1002/2015JD024576>

Fossa, M., 2020. Non-linear and non-stationary hydroclimate variability in France and the Euro-Atlantic area (phdthesis). Normandie Universität.

Hurrell, J.W., 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. Science 269, 676–679. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>

Hurrell, J.W., Deser, C., 2015. Northern Hemisphere climate variability during winter: Looking back on the work of Felix Exner. Meteorol. Z. 24, 113–118. <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0578>

Liesch, T., Wunsch, A., 2019. Aquifer responses to long-term climatic periodicities. J. Hydrol. 572, 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.060>

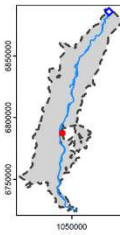
Massei, N., Dieppoï, B., Hannah, D.M., Lavers, D.A., Fossa, M., Laignel, B., Debret, M., 2017. Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: Application to the Seine river catchment, France. J. Hydrol. 546, 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.008>

Neves, M.C., Jerez, S., Trigo, R.M., 2019. The response of piezometric levels in Portugal to NAO, EA, and SCAND climate patterns. J. Hydrol. 568, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.054>

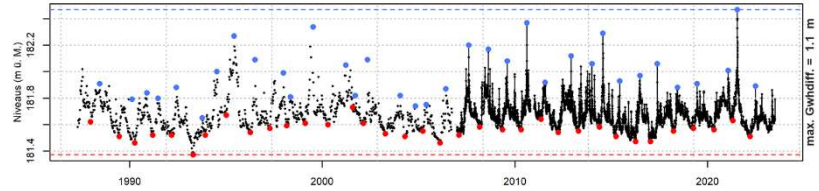
Rust, W., Bloomfield, J.P., Cuthbert, M., Corstanje, R., Holman, I., 2022. The importance of non-stationary multiannual periodicities in the North Atlantic Oscillation index for forecasting water resource drought. Hydrol. Earth Syst. Sci. 26, 2449–2467. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2449-2022>

Rust, W., Bloomfield, J.P., Holman, I., 2024. Long-range hydrological drought forecasting using multi-year cycles in the North Atlantic Oscillation. J. Hydrol. 641, 131831. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131831>

Anhang 1 – Rohdaten, Periodogramm und kontinuierliche Wavelet-Transformation des Burkheimer Piezometers

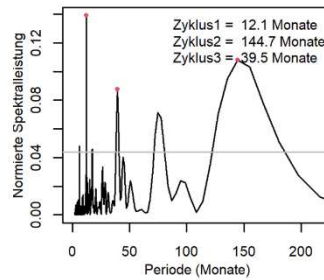


Unbearbeitete GW-Ganglinien und Bestimmung der tatsächlichen hydrogeologischen Jahre

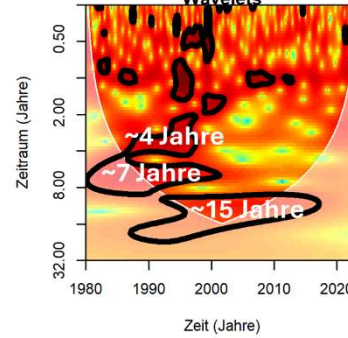


**Burkheim
(30/019-8)**

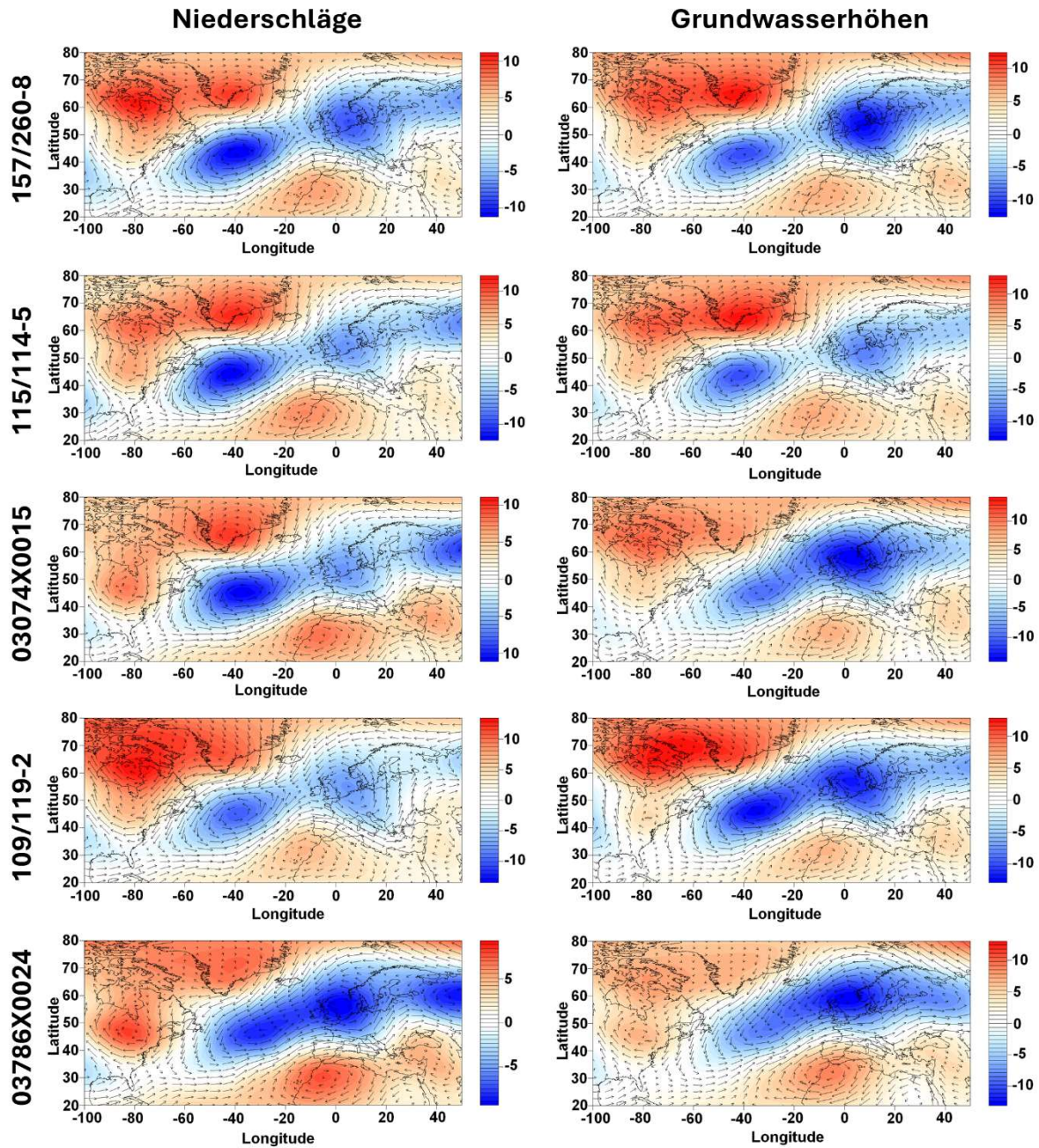
Periodogramm



Transformation in kontinuierliche Wavelets



Anhang 2 – Zusammengesetzte Analyse für die 5 Piezometer des rheinischen Aquifers

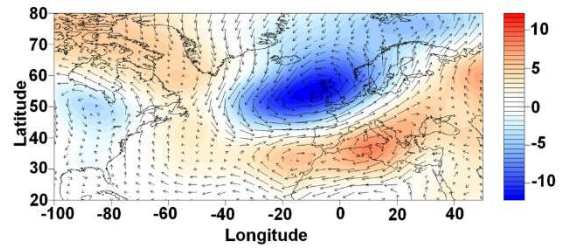
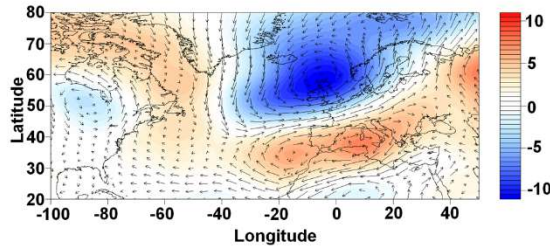


Zusammensetzungen von Z500 (m) und 500 hPa-Windvektoren, die mit den interannuellen (~4 Jahre) Schwankungen von Niederschlag und piezometrischen Pegeln jedes ausgewählten Piezometers im rheinischen Aquifer verbunden sind.

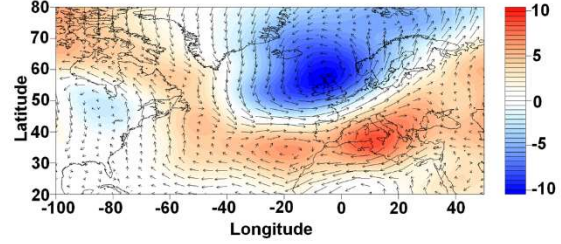
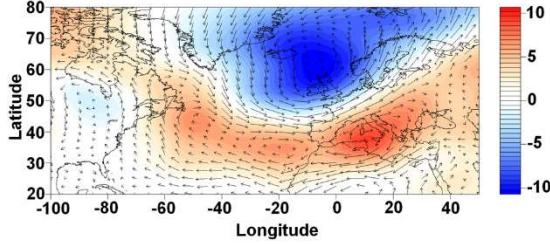
Niederschläge

Grundwasserhöhen

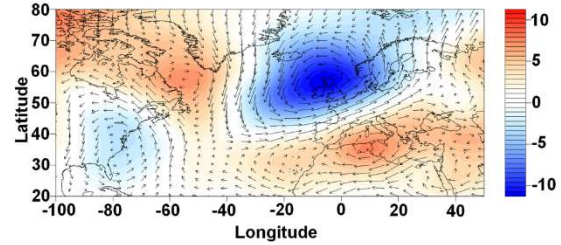
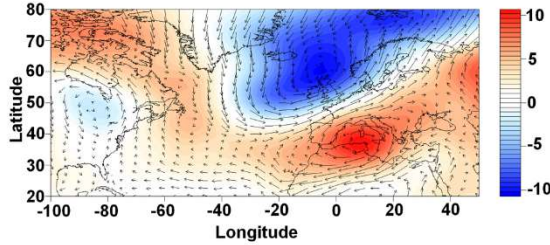
157/260-8



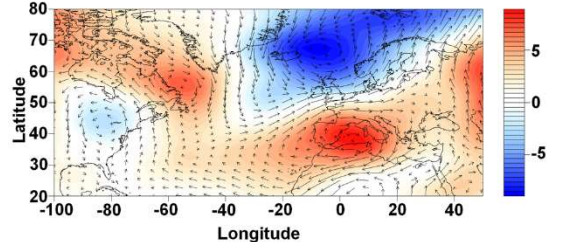
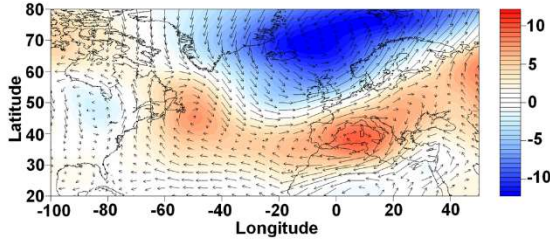
115/114-5



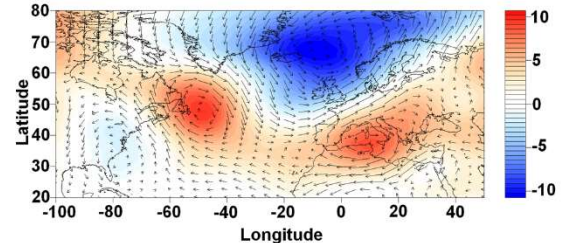
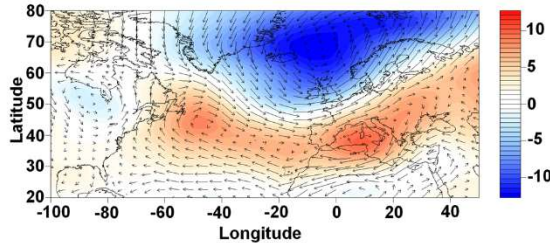
03074X0015



109/119-2



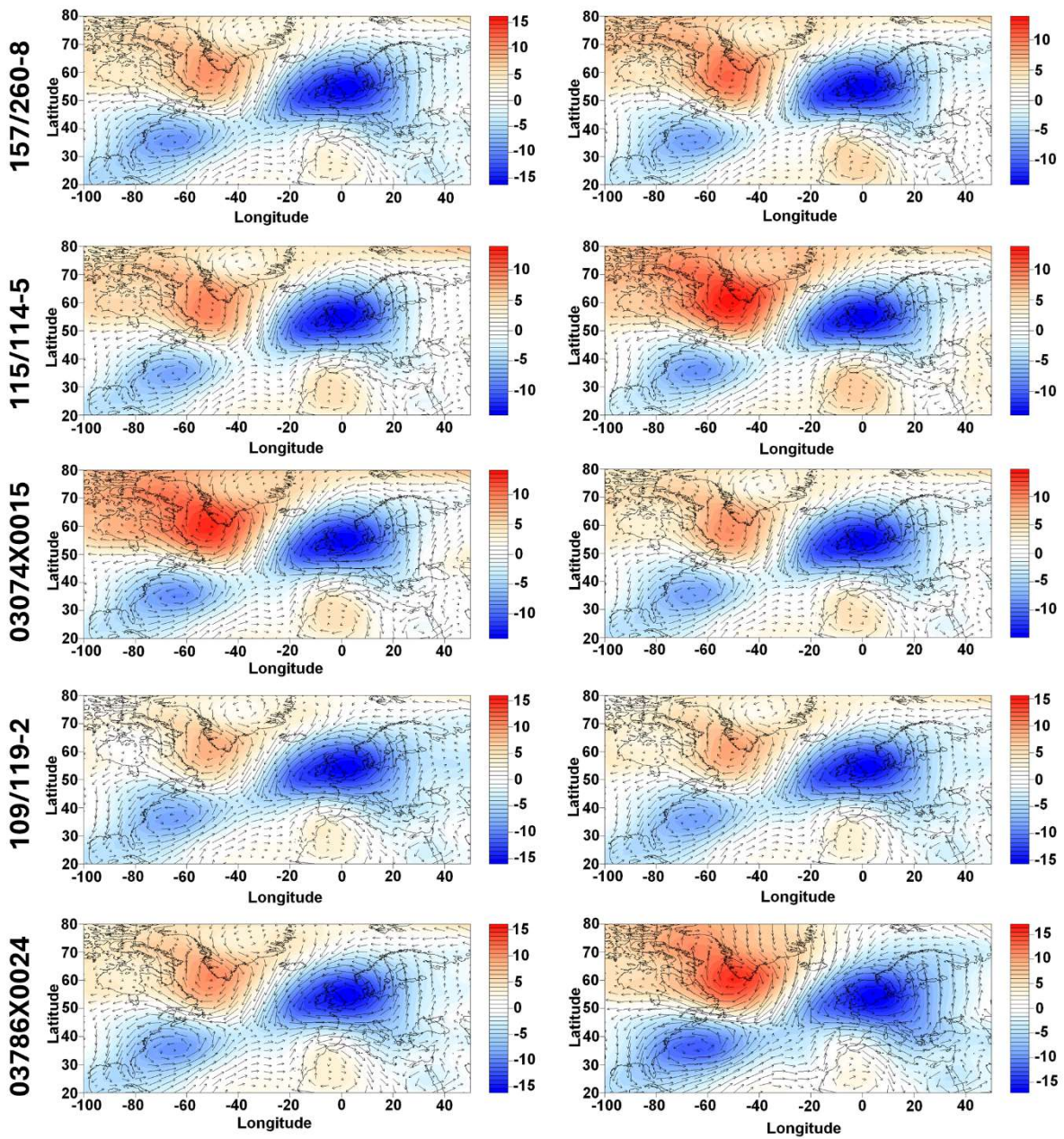
03786X0024



Zusammensetzungen aus Z500 (m) und 500 hPa-Windvektoren, die mit den interannuellen (~7 Jahre) Schwankungen von Niederschlag und piezometrischen Pegeln jedes ausgewählten Piezometers im rheinischen Aquifer verbunden sind.

Niederschläge

Grundwasserhöhen



Zusammensetzungen von Z500 (m) und 500 hPa-Windvektoren, die mit den zehnjährigen (~15 Jahre) Schwankungen von Niederschlag und piezometrischen Pegeln jedes ausgewählten Piezometers im rheinischen Aquifer verbunden sind.