

Zusammenfassung der Charakterisierung der Hydrodynamik des Oberrhein-Aquifers

Lisa Baulon¹, Manceau JC.¹, Giuglaris E.²

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

² BRGM, rue du Pont-du-Péage Bâtiment H1, 67118 Geispolsheim, Frankreich

Dieser zusammenfassende Bericht ist das Ergebnis der Untersuchungen im Rahmen der Teilmaßnahme „Analyse der historischen Entwicklung des Grundwasserspiegels: Berechnung von Trends und Brüchen in den piezometrischen Messreihen“ (A3.3), die im Rahmen der Aktion „Charakterisierung der Grundwasserentwicklung in Abhängigkeit verschiedener Faktoren (klimatisch/anthropogen)“ des Interreg-Projekts GRoundwater EvoluTions and resilience of Associated biodiversity – Upper Rhine (GRETA) durchgeführt wurde. Weitere Einzelheiten zur Methodik oder den Ergebnissen können dem Bericht BRGM/RP-74683-FR entnommen werden.

1. Ziel, Hintergrund und Methoden

Aquifere jeglicher Art ermöglichen sowohl die Speicherung als auch den Abfluss des Grundwassers. Zwischen den Grundwasserleitern (GWL) bestehen große Unterschiede hinsichtlich ihrer speichernden und leitenden Eigenschaften. Diese sind abhängig vom geologischen Kontext (Gesteinseigenschaften, geologische Strukturen) und insbesondere von der Größe des Aquifers: Diese Parameter können daher in Bezug auf das Aquifer-System als intern definiert werden. Darüber hinaus hängt die Dynamik des Grundwassers auch von Bedingungen außerhalb dieses Systems ab, die den Wasserzufluss und -abfluss bedingt. Diese äußeren Bedingungen werden mitunter auch als Randbedingungen des Aquifer-Systems bezeichnet und spiegeln den Austausch zwischen dem Grundwasser und den anderen Komponenten des Hydrosystems wider. Hierzu zählen 1) der Austausch mit der Atmosphäre durch die Infiltration von Niederschlägen über den Boden und seine Bedeckung (z. B. Vegetationsdecke) sowie über die ungesättigte Zone und 2) der Austausch mit dem Oberflächenwasser, das je nach Situation den Grundwasserspiegel entwässern (typischer Fall von Quellen) oder mit Wasser anreichern kann.

Neben diesem „natürlichen“ Grundwasserregime kann auch der Einfluss des Menschen diese Grenzbedingungen durch Grundwassernutzung für verschiedene Verwendungszwecke verändern, die das Oberflächenwasserregime (z. B. durch die Einrichtung von Infrastrukturen in einem Wasserlauf) oder die Infiltrationsbedingungen beeinflusst (z. B. durch eine veränderte Landnutzung oder kontrollierte Infiltration in den Grundwasserleiter).

Die korrekte räumliche und zeitliche Charakterisierung der Funktionsweise eines Grundwassersystems, d. h. der oben erläuterten internen und externen Einflüssen, trägt zu dessen guter Bewirtschaftung bei, sei es saisonal oder auch langfristig, insbesondere im Kontext des aktuellen globalen Klimawandels.

Diese Charakterisierung ist jedoch nicht einfach, da die erklärenden Faktoren, sei sie intern oder extern, nicht immer quantifizierbar und/oder überwachbar sind, zeitlich und/oder räumlich variieren und ihre Auswirkungen voneinander abhängig sind.

Die Entwicklung der Grundwasserstände integriert diese Vielschichtigkeit und daher kann ihre Analyse zu einer raumzeitlichen Beschreibung der hydrogeologischen Funktionsweise eines Gebietes beitragen – vorausgesetzt 1) das Messstellennetz ist ausreichend dicht (zeitlich und räumlich) und 2) es werden Indikatoren entwickelt, die es ermöglichen, die Grundwasserdynamik zu beschreiben, wobei insbesondere deren unterschiedlichen Einflussfaktoren identifiziert werden müssen.

Das Untersuchungsgebiet, befindet sich im südlichen Teil des alluvialen Grundwasserleiters im Oberrhein, in der Rheinebene zwischen den Ausläufern der Vogesen (Frankreich) und des Schwarzwaldes (Deutschland). Dieser bedeutende Grundwasserspeicher birgt die unterschiedlichsten Herausforderungen, da dessen Ressource über Brunnenentnahmen für zahlreiche anthropogene Verwendungen genutzt wird, wie Industrie, Trinkwasserversorgung sowie Landwirtschaft.

Außerdem spielt der Grundwasserleiter des Rheinischen Aquifers eine wichtige Rolle bei der Wasserversorgung von Feuchtgebieten und ist eng mit dem Oberflächenwassersystem verbunden, wie die zahlreichen grundwasserführenden Oberflächengewässer beiderseits der deutsch-französischen Grenze belegen. In diesem komplexen Zusammenhang ist es von entscheidender Bedeutung, die wichtigsten Faktoren zu identifizieren, die die Dynamik des Grundwasserspiegels mit den bisher beobachteten Entwicklungen erklären, und damit insbesondere die möglichen zukünftige Entwicklungen vorhersagen zu können.

Darüber hinaus verfügt das Grundwasser im Gebiet des Oberrheingrabens über eine bedeutende Dichte an Grundwassermessstellen (GWM) (1 680 Messreihen; Abbildung 1¹), die eine genaue zeitliche und räumliche Charakterisierung des Grundwassers ermöglichen.

¹ Datenquelle: APRONA (Vereinigung zum Schutz des Grundwassers der elsässischen Ebene) auf französischer Seite (ergänzt durch einige von der „VNF - Voies Navigables de France“ (dt. Französische Wasserstraßenverwaltung) zur Verfügung gestellten Messreihen) und LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) auf deutscher Seite

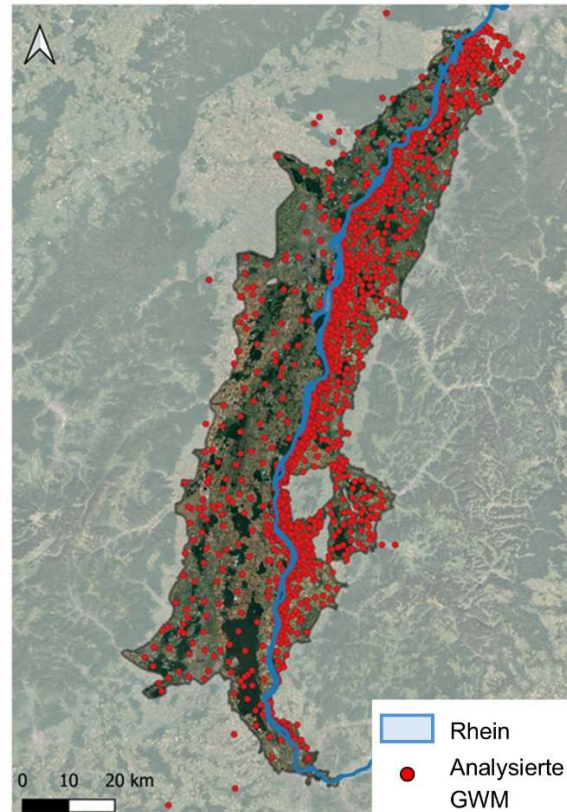


Abbildung 1: Lage der Grundwassermessstellen (GWM), deren Daten im Laufe der Untersuchung analysiert wurden.

Zur erfolgreichen Durchführung dieser Charakterisierung wurden die piezometrischen Indikatoren nach verschiedenen, sich ergänzenden Ansätzen und Methoden entwickelt: zuerst wurden nur an den piezometrischen Messreihen Zeit- und Spektralanalysen durchgeführt, dann Korrelationsanalysen zwischen den piezometrischen und den jeweiligen klimatischen Messreihen (effektiver Niederschlag) und den Messreihen in Bezug auf den Abfluss des Rheins. Die erhaltenen Indikatoren ermöglichen es *letztendlich*, die in den piezometrischen Messreihen identifizierten Tendenzen und Brüche, die hydrodynamischen Eigenschaften (Trägheit) des rheinischen Grundwassers sowie die relative Bedeutung der verschiedenen externen Einflüsse (Klimaeinfluss, Einfluss des Rheins, Einfluss der Entnahmen) im Hinblick auf die piezometrischen Schwankungen nachzuvollziehen. Aus der Kombination dieser Ergebnisse ergibt sich eine erste Sektorisierung der hydrodynamischen Funktionsweise im Oberrheingraben. Diese hydrodynamische Sektorisierung wird es im Rahmen der weiteren Aufgaben des Projekts insbesondere ermöglichen, i) die Modelle zu erstellen, die den Simulationen der Grundwasserstände unter entsprechender Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse auf die Grundwasserstände dienen, ii) die Reaktion des Grundwassers auf Klimaextreme in Abhängigkeit von seiner Trägheit zu analysieren.

2. Hydrodynamische Karte auf der Grundlage piezometrischer Indikatoren und ihrer Sektoren

Die im Laufe dieser Studie entwickelten Indikatoren ermöglichen es, auf einfache Weise und ohne die Verwendung von aufwendigeren Clustering- oder Modellierungsansätzen zu einer ersten hydrodynamischen Karte des Grundwassers im Oberrheingraben in Abhängigkeit von den für die Grundwasserstände verantwortlichen Einflüssen zu gelangen (Abbildung 2). Diese Karte wird sich mit den Ergebnissen weiterentwickeln, die sich aus diesen weiterführenden Ansätzen zur Sektorisierung ergeben (z. B. Clustering, Modellierung).

Drei große Gruppen können anhand der Indikatoren identifiziert werden (die Farben im Text entsprechen den Farben auf der Karte in Abbildung 2):

- 1) Die Grundwasserbereiche, in denen sich die Grundwassermessstellen (GWM) befinden, für die **der Abfluss des Rheins der dominierende Einflussfaktor ist**. Hierbei handelt es sich um GWMGWM, die eine starke Korrelation mit den Abflüssen des Rheins aufweisen und sich logischerweise in der Nähe des Rheins befinden. Aufgrund des anthropogenen Einflusses durch die Bewirtschaftung der Stauanlagen des Rheins weisen vor allem die weit von den Stauanlagen entfernten oder flussabwärts liegenden GWM einen starken Zusammenhang mit den Abflüssen des Rheins auf.
- 2) Die Grundwasserbereiche, in denen sich die GWMGWM befinden, für die **das Klima der dominierende Einflussfaktor ist**. Dies sind die Messstellen, bei denen die Korrelation zwischen ihren Grundwasserständen und den Höhen der gemittelten effektiven Niederschläge signifikant ist. Die meisten dieser GWMGWM befinden sich weit entfernt vom Rhein in der Ebene, einige befinden sich jedoch auch in Flussnähe. Diese Grundwasserbereiche, deren dominanter Einfluss das Klima ist, können in 3 Untergruppen gegliedert werden:
 - a. *Grundwasserbereiche mit einer geringen Trägheitsdynamik (mit einer Dominanz schneller und jährlicher Schwankungen)*
 - b. *Grundwasserbereiche mit einer mittleren Trägheitsdynamik*
 - c. *Grundwasserbereiche mit hoher Trägheitsdynamik (mit einer Dominanz von langsamen und mehrjährigen Schwankungen)*
- 3) Grundwasserbereiche, die die GWM zusammenfassen, die keine **klar identifizierten Einflüsse aufweisen**. Dies sind die GWM, bei denen die Korrelation mit den Abflüssen des Rheins und den über das Impluvium gemittelten effektiven Niederschlägen gering ist. Diese GWM befinden sich häufig in der Nähe des Rheins und oberhalb von Stauanlagen.

In den Grundwasserbereichen, deren Dynamik hauptsächlich von Klimaschwankungen abhängt 2), kommt es manchmal zu saisonalen Absenkungen der Grundwasserstände in Zusammenhang mit einem zusätzlichen temporären Einfluss durch sommerliche Grundwasserentnahmen (Entnahmen für die Bewässerung, Aufnahme durch die Pflanzen durch Evapotranspiration ...), die zum klimatischen Einfluss hinzukommt. Eine Analyse auf der Grundlage des Frühbeginns der Niedrigwasserperiode ermöglichte eine **Unterteilung des Grundwassers in Abhängigkeit von dem möglichen Einfluss solcher Entnahmen auf die Grundwasserdynamik**:

- Grundwasserbereiche, in denen sich die GWM befinden, die **einen vermutlich starken Einfluss der sommerlichen Entnahmen auf die Dynamik des Grundwassers** durch frühzeitige Niedrigwasserperioden haben: Dies sind die GWM, deren mittlere Niedrigwasserdaten zwischen Juni und Ende August liegen. Die betreffenden GWM sind in Abbildung 2 mit einem schwarzen Rand markiert.

- Die Grundwasserbereiche in denen **sich die GWM befinden**, bei denen **die Auswirkungen der sommerlichen Entnahmen auf die Dynamik des Grundwassers relativ unsicher sind**, mit einer weniger früh einsetzenden Niedrigwasser. Hierbei handelt es sich um die GWM, deren mittlere Niedrigwasserdaten im Monat September auftreten. Die betreffenden Piezometer sind in Abbildung 2 mit einem grauen Rand markiert.
- Die Grundwasserbereiche, in denen sich die GWM befinden, für die **keine Auswirkungen der sommerlichen Entnahmen auf die Dynamik des Grundwassers identifiziert werden** – durch den Indikator, der auf den Frühbeginn Frühzeitigkeit der Niedrigwasserperiode basiert. In diesen Bereichen hängt die Dynamik des Grundwassers und des Niedrigwassers hauptsächlich vom klimatischen Einfluss ab. Die betreffenden Piezometer sind in Abbildung 2 mit einem weißen Rand markiert.

Identifizierte Triebkräfte

- Keine klaren Einflüsse erkennbar *
- Einfluss: Rhein Vorrangiger

Einfluss: Klima

- Wenig Trägheit
- Mäßige Trägheit
- Starke Trägheit

* Wenig hydraulische Kopplung mit dem Rheinabfluss
oder mit dem Einflussindex des Niederschlags

Einfluss der Entnahmen im Sommer **

- Nicht detektiert
- Ungewiss
- Möglich

** auf der Grundlage von Informationen über die
Frühzeitigkeit von Niedrigwasserständen

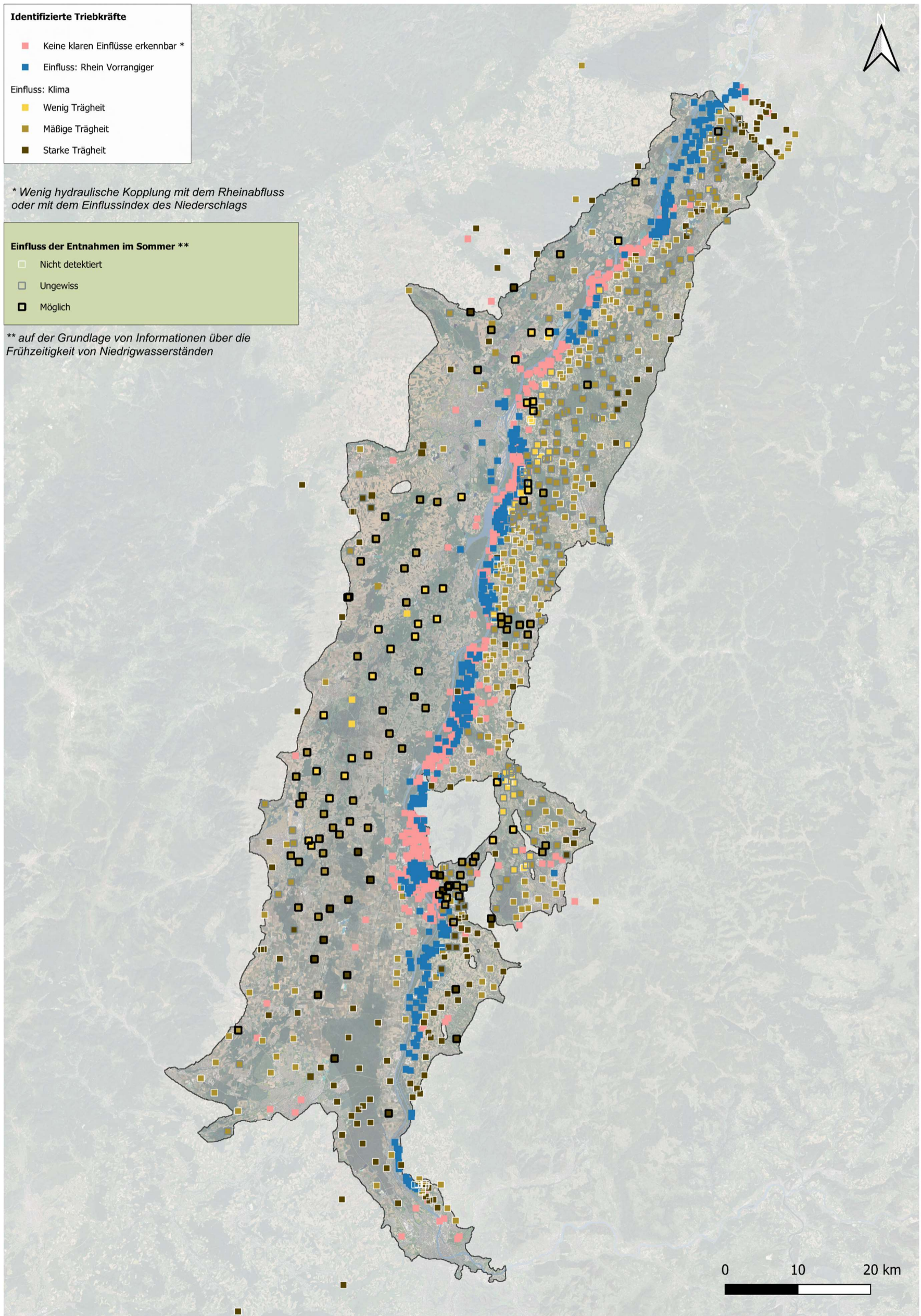
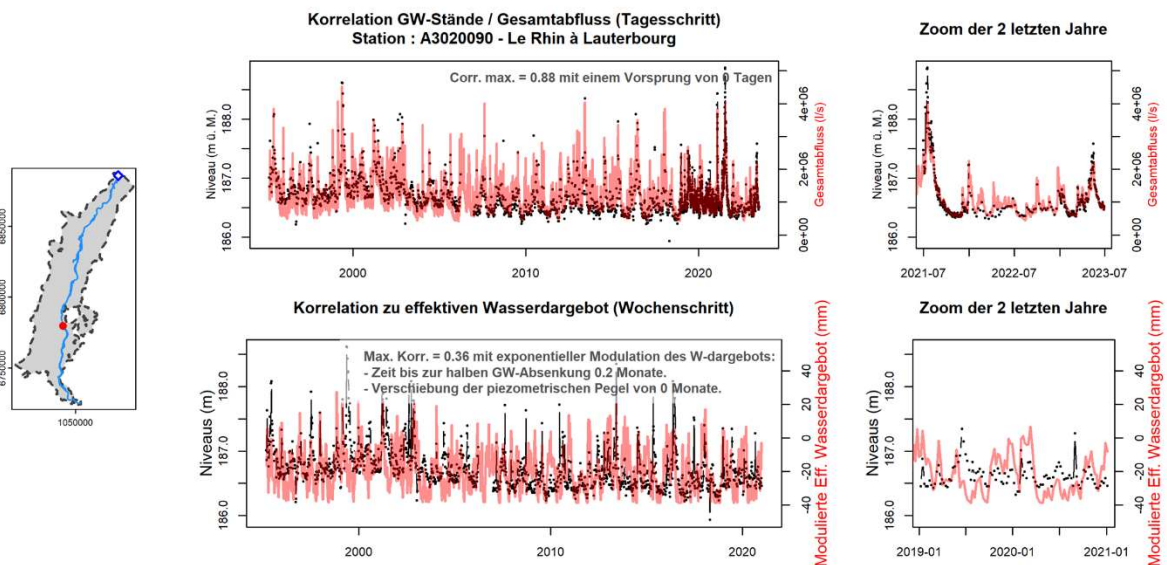


Abbildung 2: Hydrodynamische Karte des Rheingrundwassers auf der Grundlage der in dieser Studie berechneten Grundwasser- Indikatoren.

2.1. Grundwasserbereiche mit dem Rhein als dominierendem Einfluss

Um die vom Rhein beeinflussten Bereiche des Rhein-Aquifers zu identifizieren, wurde die Ähnlichkeit zwischen den Abfluss-Messreihen des Rheins bei Lauterburg und den Grundwasserganglinien mit Hilfe einer Korrelationsanalyse bewertet. Die Bereiche, in denen eine deutliche Korrelation festgestellt wurde, liegen entweder unterhalb von Wasserkraftanlagen des Rheins (Abbildung 3) oder im flussaufwärts gelegenen Bereich des Untersuchungsgebiets und in der Nähe des Alten Rheins.

Grundwasser-Messstelle 2003/019-1 – flussabwärts von Brisach



Grundwasser-Messstelle 02351X0013 – flussabwärts von Gamsheim

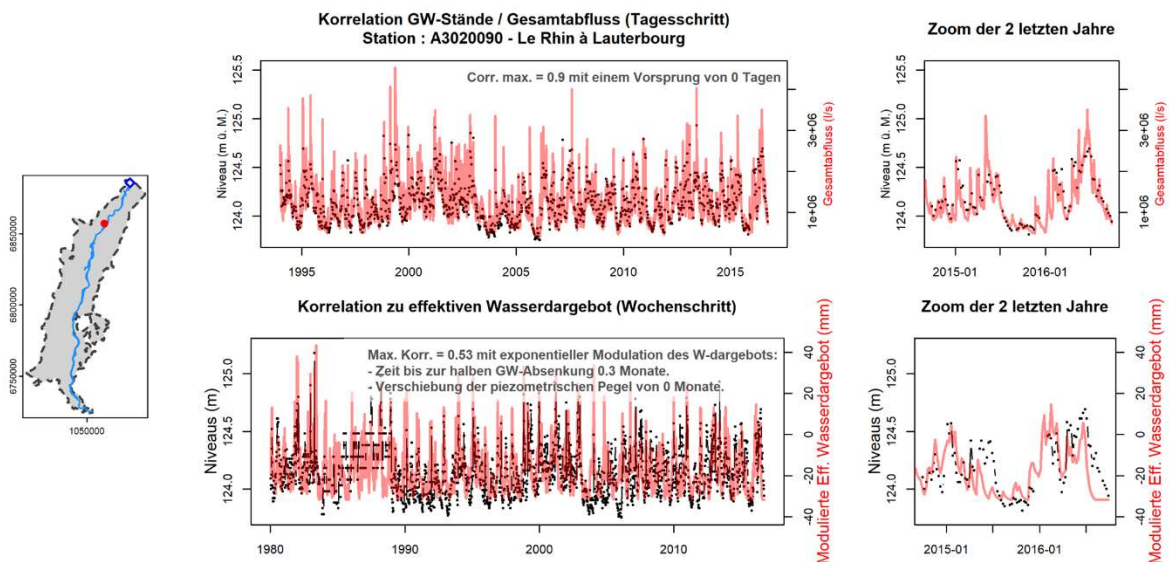


Abbildung 3: Kreuzkorrelation zwischen den piezometrischen Pegeln und dem Gesamtabfluss oder dem modulierten effektiven Niederschlag für zwei GWM flussabwärts von Wasserkraftanlagen am Rhein. (Übersetzung Titel: GWM flussabwärts der Wasserkraftanlagen am Rhein), rechts: Fokus auf die zwei letzten Jahre

Parallel dazu weisen diese Bereiche Grundwasserstände auf, die schwächer mit der Niederschlagsmessung korreliert sind (Abbildung 3). Die Grundwasserstände im Gebiet entwickeln sich daher hauptsächlich in Abhängigkeit von den Rheinpegelständen, deren Schwankungen sich von denen des effektiven Niederschlags im Untersuchungsgebiet unterscheiden: Der Rhein wird stark von seinem alpinen Bereich (flussaufwärts des Untersuchungsgebiets, in der Schweiz) beeinflusst und weist ein nivo-glaziales Muster mit Niedrigwasser im Winter und Hochwasser im Frühjahr auf.

2.2. Grundwasserbereiche mit dem Klima als vorherrschendem Einfluss

In anderen Bereichen des Rhein-Aquifers werden die Wasserstände überwiegend durch die jährlichen oder sogar mehrjährigen Klimaschwankungen über die Grundwasserneubildung gesteuert. Um diese Gebiete zu identifizieren, wurde die Ähnlichkeit zwischen den Grundwasserständen und dem modulierten effektiven Niederschlag mithilfe einer Korrelationsanalyse untersucht.

In der Rheinebene sind die beobachteten Entwicklungen der Grundwasserstände eindeutig auf die Beiträge durch effektive Niederschläge und die Grundwasserneubildung zurückzuführen: Der klimatische Einfluss scheint somit ein wichtiger Einflussfaktor für die beobachteten Schwankungen der Grundwasserstände zu sein.

Es ist anzumerken, dass grundsätzlich bessere Korrelationskoeffizienten nicht durch die Berechnung lokaler effektiver Niederschläge, sondern durch die Berechnung globaler/regionaler effektiver Niederschläge erzielt wurden, die für die Einzugsgebiete am linken Rheinufer für die französischen GWM und am rechten Rheinufer für die deutschen GWM berechnet wurden: Dies zeigt eine Grundwasserwiederergänzung in der Rheinebene wider, abhängig (i) von lokalen Niederschlägen, aber auch (ii) von den Gebirgen, durch den unterirdischen oder oberflächlichen Austausch über das aus den Vogesen oder dem Schwarzwald stammende Oberflächengewässern. Auch wenn die Entwicklung des Grundwasserstands in den vom Rhein entfernten Ebenen vom Klima abhängig ist, sind sie sehr unterschiedlich, der Grundwasserstand reagiert in den verschiedenen Gebieten unterschiedlich auf diesen Einfluss (unterschiedlicher Trägheitsfaktor). Dies wird im Abschnitt 2.2.1 dieser Zusammenfassung behandelt.

Die Bereiche, mit einer guten Korrelation zwischen Grundwasserständen und effektivem Niederschlag, sind auch diejenigen, in denen seit 1980 und 2000 häufig Abwärtstrends bei niedrigen und mittleren piezometrischen Wasserständen beobachtet wurden, meist in Übereinstimmung mit (nicht unbedingt statistisch signifikanten) Abwärtstrends bei den effektiven Niederschlägen.

2.2.1. Trägheitsgrad dieser Bereiche

In den überwiegend vom Klima beeinflussten Gebieten kann die Reaktionsgeschwindigkeit des Grundwassers auf dessen Neubildung (was manchmal als Trägheit bezeichnet wird) je nach den lokalen Eigenschaften des Grundwassersystems sehr unterschiedlich sein.

So ergeben sich entsprechend dem Trägheitsgrad des Grundwassers verschiedene Teilgebiete:

- Die **Gebiete mit der stärksten Trägheit**, die langsam auf die Grundwasserneubildung reagieren und sich vor allem mehrjährig verändern
- (Abbildung 4a). **Gebiete mit geringer Trägheit**, die schnell auf eine GW-Neubildung reagieren und sich überwiegend über jährliche oder geringere Zeitspannen verändern (Abbildung 4b). Die **Gebiete mit mittlerer Trägheit**, die sich überwiegend über jährliche bis mehrjährige Zeitspannen verändern (Abbildung 4c).

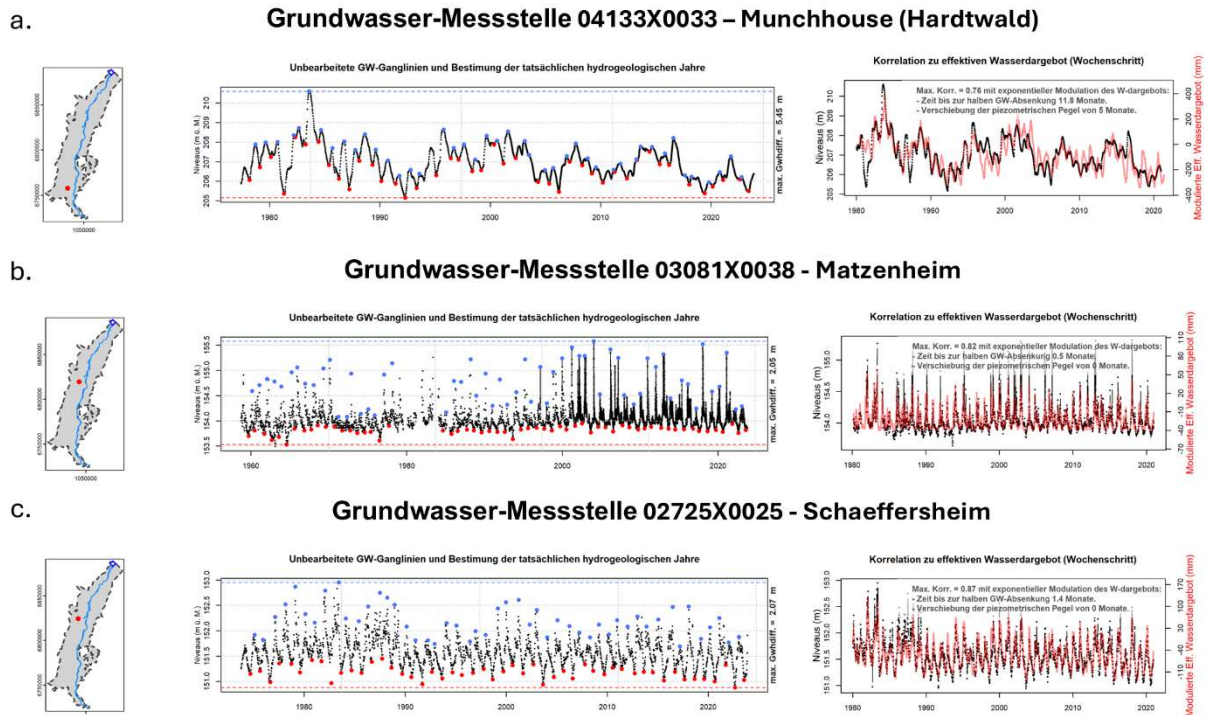


Abbildung 4: Beispiel für GWM in Gebieten mit unterschiedlicher Trägheit des Grundwassers mit einer GWM in einem Gebiet mit starker Trägheit (a), einem Gebiet mit geringer Trägheit (b) und einem Gebiet mit mittlerer Trägheit (c).

Die **Gebiete mit starker Trägheit** befinden sich hauptsächlich:

- Nördlich von Rastatt, in Deutschland, und im Norden des Untersuchungsgebiets mit einem Gebiet von recht geringer Größe, das jedoch räumlich klar abgrenzbar ist;
- Im Süden des Untersuchungsgebiets, beiderseits der Grenze, mit einem ebenfalls trägen Anteil des Grundwassers, das ebenfalls räumlich gut abgrenzbar und relativ weitläufig ist;
- Teilweise in der Nähe des Vorgebirges am Rande der Ebene. Diese Gebiete befinden sich überwiegend an den Grenzen des Untersuchungsgebiets und scheinen eher gering ausgeprägt zu sein.

Außerdem ist die zeitliche Verzögerung zwischen den effektiven Niederschlägen und den Grundwasserständen nördlich von Rastatt und im Bereich des Harthwaldes relativ groß (1 bis 6 Monate). Diese beiden Gebiete zeichnen sich durch einen tiefen Grundwasserstand und damit eine relativ mächtige ungesättigte Zone aus, was die Verzögerung erklären könnte. Die Verschiebung um ein halbes Jahr im Süden des Grundwasserleiters im Oberrhein könnte auch

mit einer (zumindest teilweisen) Infiltration durch den Rhein oder mit einer Anbindung zu anderen trägen Grundwasserleitern (Sundgau) zusammenhängen.

Die **Gebiete mit geringer und mittlerer Trägheit** befinden sich vor allem im Zentrum des Untersuchungsgebiets. Die Trägheit dieses zentralen Gebietes ist jedoch nicht homogen, sie entwickelt sich aber eher gleichmäßig. Zu beachten ist, dass das Grundwasser in den folgenden Gebieten nur eine geringe Trägheit aufweist:

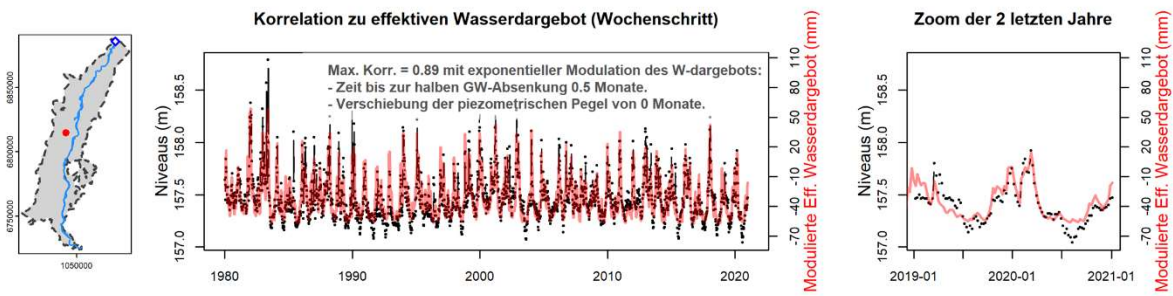
- Nahe des Randbereichs des Rheins;
- Nahe der Ill und der Zems;
- An der Ostflanke des Kaiserstuhls.

2.2.2. Einfluss der Entnahmen im Sommer (Entnahmen zur Bewässerung, Wiederaufnahme durch Evapotranspiration ...)

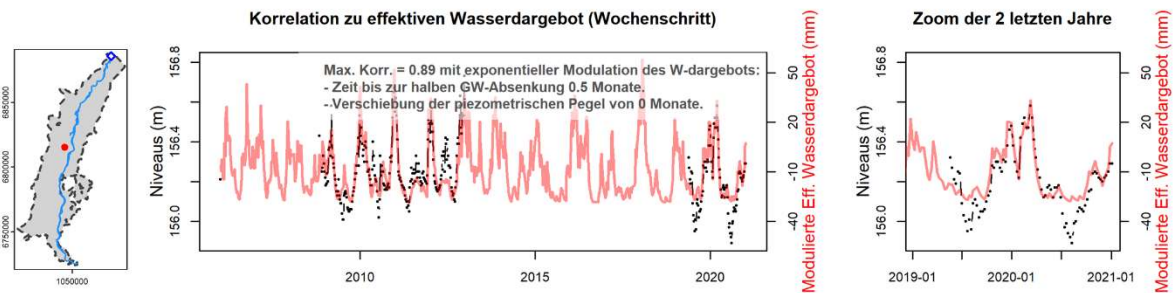
Eine genauere Analyse bestimmter Messreihen zeigt, dass in einigen Gebieten, mit allgemein guter Korrelation zwischen effektivem Niederschlag und Grundwasserständen, saisonale Rückgänge bei den Grundwasserständen in der Sommerperiode auftreten, ohne dass diese Entwicklungen bei den (modulierten²) effektiven Niederschlägen erkennbar sind (Abbildung 5). Dies spricht für einen zusätzlichen, temporären Einfluss durch sommerliche Entnahmen zum klimatischen Einfluss, der die Grundwasserdynamik beeinflusst. Angesichts der Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets werden hauptsächlich zwei Entnahmetypen in Betracht gezogen: Entnahmen durch Brunnenbewässerung und die Wiederaufnahme durch die Pflanzen direkt im Grundwasser der Vegetationsdecke/Waldbedeckung (Evapotranspiration) im Zusammenhang mit oberflächennahen Grundwasserständen (Vorhandensein von Feuchtgebieten).

² Die Methodik zur Berechnung des modulierten effektiven Niederschlags ist im Bericht BRGM/RP-74683-FR verfügbar.

Grundwasser-Messstelle 03081X0025 - Rossfeld



Grundwasser-Messstelle 03082X0264 - Herbsheim



Grundwasser-Messstelle 03078X0333 - Muttersholtz

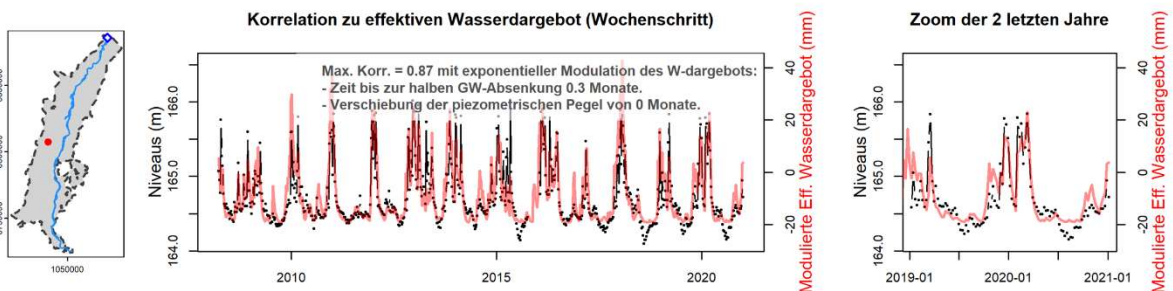


Abbildung 5: Beispiele für weniger gute Korrelationen zwischen Grundwasserganglinien und modulierten effektiven Niederschlägen bei Niedrigwasser (Übersetzung links: „ouvrage“: GWM – „Titel der GW-Ganglinien: Korrelation mit effektiven Niederschlägen (wöchentlicher Zeitschritt) – rechts: Fokus auf die letzten 2 Jahre)

Das frühzeitige Auftreten von Grundwasser-Tiefständen (d. h. der Zeitpunkt des Tiefstands) kann oftmals die Identifizierung von Brunnen ermöglichen, die potenziell von diesen Entnahmen betroffen sind. Normalerweise werden die natürlichen Tiefstände des Grundwassers ab Oktober erreicht. Im Untersuchungsgebiet kann das Niedrigwasser jedoch früher auftreten, was vermutlich auf weitere Beeinflussungen hindeutet. Je nach Frühzeitigkeit der GW-Tiefstände werden drei Gebietstypen identifiziert:

- Grundwasserbereiche, in denen sich GWM befinden mit **einem vermutlich starken Einfluss der sommerlichen Entnahmen auf die Dynamik des Grundwassers** (GW-Tiefstände zwischen Juni und Ende August).
- Grundwasserbereiche mit in denen sich GWM befinden mit **keinen eindeutigen Auswirkungen der sommerlichen Entnahmen auf die Dynamik des Grundwassers** (Niedrigwasser während des Monats September).

- Die Grundwasserbereiche, in denen sich GWM befinden ohne Auswirkungen der sommerlichen Entnahmen auf die Dynamik des Grundwassers (Niedrigwasser ab Oktober).

Auf der Grundlage dieser Klassifizierung können folglich mehrere Zonen hervorgehoben werden:

- Elsass/Frankreich:
 - Ein großflächiges Gebiet von Ensisheim bis Straßburg** (Großes Ried) mit einem starken Verdacht auf Auswirkungen der sommerlichen Entnahmen mit frühzeitigem GW-Tiefständen: Innerhalb dieses Gebiets, südlich von Colmar, wird trotz der großen Trägheit des Grundwassers im Sommer ein Einfluss auf die Grundwasserstände festgestellt.
 - Ein kleineres Gebiet nördlich von Straßburg** mit einem vermutlich starken Einfluss der sommerlichen Entnahmen mit frühzeitigem GW-Tiefständen.
- Aber auch in Baden-Württemberg/Deutschland:
 - Mehrere Gebiete geringer Ausbreitung, aber hoher Dichte an GWM südlich des Kaiserstuhls, im Zentrum des Untersuchungsgebiets in der Nähe von Lahr/Schwarzwald**, mit einem vermutlich starken Einfluss der sommerlichen Entnahmen mit frühzeitigem GW-Tiefständen.
 - Ein großflächigeres Gebiet im Norden des Untersuchungsgebiets (etwa von Offenburg bis Sinzheim)**, für das aber auch größere Unsicherheiten bestehen (GW-Tiefstände im September), sowie ein **kleines Gebiet im äußersten Norden** des Untersuchungsgebiets mit denselben Merkmalen.

Die Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für die Entwicklung des Zeitpunkts des GW-Tiefstands in einer GWM südlich des Kaiserstuhls. Die Statistiken zum Zeitpunkt des GW-Tiefstands (untere Grafiken) zeigen, dass dieses seit den 1980er Jahren früher einsetzt: Das Median-Datum des Niedrigwassers verändert sich von den Monaten November/Januar zu Anfang September.

Grundwasser-Messstelle 105/019-0 – Breisach am Rhein – südlich des Kaiserstuhls

Unbearbeitete GW-Ganglinien und Bestimmung der tatsächlichen hydrogeologischen Jahre

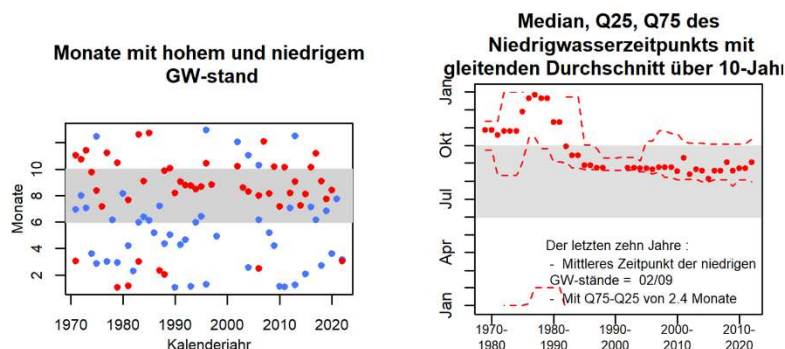
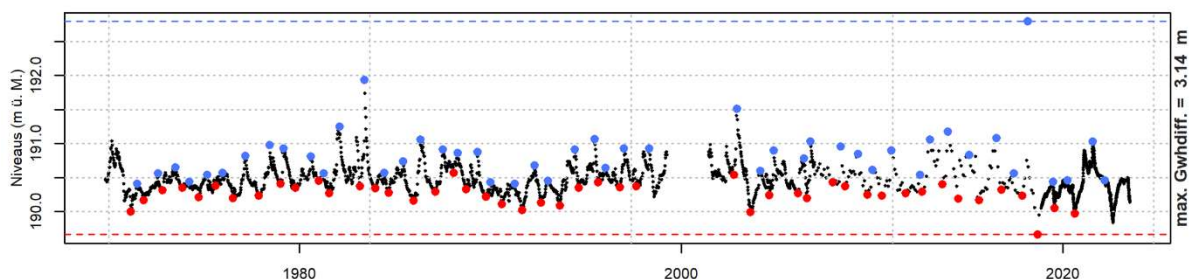


Abbildung 6: Entwicklung des Zeitpunkts des GW-Tiefstands für eine GWM südlich des Kaiserstuhls (Übersetzung Abb. oben: Grundwasserganglinie und Identifizierung der reellen hydrogeologischen Jahre“ – unten links: Monate der niedrigen und hohen GW-Stände – unten rechts: gleitender 10-Jahres Mittelwert, Q25 und Q75 der GW-Tiefstände.

Die Analyse stündlicher Grundwasserstände, sofern verfügbar, ermöglicht eine Präzisierung der Analyse auf der Frühzeitigkeit des Niedrigwassers basierenden Analyse, insbesondere wenn es schwierig ist, eine Beziehung zu den Entnahmemengen für Bewässerung zu finden (eine in Deutschland häufig auftretende Schwierigkeit, außer für das Gebiet südlich des Kaiserstuhls). Die stündlichen Grundwasserstände können tatsächlich Grundwasserschwankungen innerhalb eines Tages identifizieren, die auf die Schwankungen der Entnahmen im Laufe eines Tages zurückzuführen sind. Wenn diese (kurzzeitigen) Schwankungen höher als die täglichen Schwankungen sind, kann der Einfluss von Entnahmen auf die Grundwasserstände vermutet werden, insbesondere wenn sie in den Sommermonaten auftreten.

Südlich des Kaiserstuhls zum Beispiel konzentrieren sich hoch eingestuft stündlichen Schwankungen pro Monat auf die Monate Juni und August mit einem Maximum im Juli (Abbildung 7). Außerdem spricht die zeitliche Verteilung der piezometrischen Abwärts- und Aufwärtstrends der Grundwasserganglinien im Laufe des Tages (rot) für einen nahegelegenen Brunnen mit intermittierender Pumpkapazität. Dies scheint die Analyse der Frühzeitigkeit der GW-Tiefstände und dem Einfluss von Grundwasserentnahmen in der Nähe der GWM zu bestätigen.

Grundwasser-Messstelle 105/019-0 – Breisach am Rhein – südlich des Kaiserstuhls

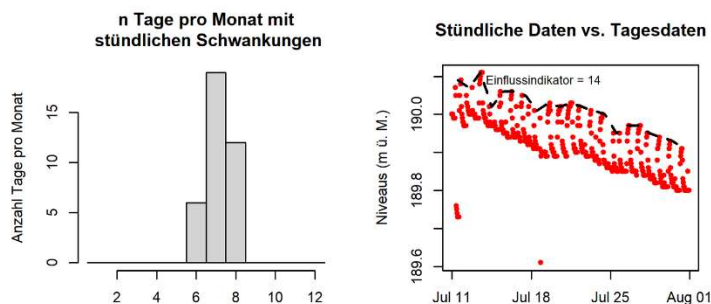


Abbildung 7: Bewertung der Bedeutung der stündlichen GW-Schwankungen (rot) im Vergleich zu den täglichen Schwankungen (schwarz) in der rechten Grafik. Die linke Grafik zeigt die Anzahl der Tage pro Monat, an denen die stündlichen Schwankungen deutlich über den täglichen Schwankungen liegen (Übersetzung links: Hoch eingestufte stündliche Veränderungen pro Monat – rechts: Stündliche Zeitschritte zu Tagesschritten)

Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Zusammenfassung und mit dem derzeitigen Wissensstand ist es schwierig, die tatsächlichen Auswirkungen der Wiederaufnahme der Evapotranspiration durch die Pflanzen von den Brunnenentnahmen zur Bewässerung zu unterscheiden in Beziehung auf die Grundwasserstände. Diese Analyse kann daher keine lokale Untersuchung ersetzen, die auf einem Vergleich zwischen Grundwasserganglinien und Entnahmemengen (möglichst in einem täglichen Zeitabschnitt) oder auch lokalen Daten zur Evapotranspiration beruht.

2.3. Grundwasserbereiche ohne eindeutig identifizierbaren Einfluss

Einige GWM zeigen keinen klar zu identifizierenden Einfluss, da weder die lokalen Niederschläge noch die Abflüsse des Rheins die beobachteten GW-Schwankungen zu erklären scheinen. Diese GWM befinden sich überwiegend am Rheinufer und hauptsächlich flussaufwärts der Regulierungsbauwerke. Die Entwicklung des Wasserstands des Rheins in diesen Gebieten, der insbesondere von den Regeln und Modalitäten der Regulierung abhängt, könnte die beobachteten piezometrischen Entwicklungen erklären. Da zum Zeitpunkt der Studie jedoch keine Messdaten über den Wasserstand des Rheins vorlagen, war es nicht möglich, die aufgestellte Hypothese zu bestätigen.

Einige GWM in der Rheinebene weisen nach den Analysen, die im Rahmen der Teilmaßnahme A3.3 durchgeführt wurden, keinen eindeutig identifizierten Einflussfaktoren auf die Grundwasserstände auf. Der Einfluss der Abflüsse und Pegelstände der Oberflächengewässern in den Vogesen und im Schwarzwald auf die Grundwasserstände ist nicht auszuschließen. Diese Hypothese wird im Rahmen der Arbeiten der Teilmaßnahme „Analyse und Interpretation **der Beziehungen zwischen dem Grundwasserspiegel, den Flüssen** und den Entnahmen im rheinischen Grundwasserleiter in allen Gebieten“ überprüft (A3.7.).

3. Bilanz der Untersuchung und Erkenntnisse für weitere Maßnahmen im Rahmen des GRETA-Projekts

Die hydrodynamische Karte des Grundwasserleiter am Oberrhein wurde durch die Untersuchung der verfügbaren Grundwassermessdaten des rheinischen Grundwasserleiters und ihrer Ähnlichkeit mit den klimatischen (effektiver Niederschlag) und hydrologischen (Abflüsse des Rheins) Variablen erstellt. Die Kreuzanalyse dieser verschiedenen Indikatoren für die Funktionsweise des Grundwassers führt zu einer ersten hydrodynamischen Sektorisierung, wie sie in Abschnitt 2 vorgeschlagen wird. Die Sektoren, die vermutlich einem Einfluss von sommerlichen Entnahmen unterliegen (Entnahmen für die Bewässerung, Wiederaufnahme durch Evapotranspiration ...), wurden ebenfalls identifiziert.

- Diese Vorstudie ermöglicht eine erste Identifizierung der Einflussfaktoren, die die Entwicklung der Grundwasserstände steuern und damit zu folgenden Ergebnissen beiträgt: Eine verbesserte Bewirtschaftung des Grundwassers, sowohl saisonal als auch langfristig, insbesondere vor dem Hintergrund des derzeitigen globalen Wandels.
- Die Entwicklung von Teilbereichen über die Maßnahme A3.4.: „Klassifizierung und Aufteilung des Rheinischen Aquifers im Untersuchungsgebiet in homogene Sektoren oder solche mit identischem hydrogeologischem Verhalten“ im Rahmen des Interreg-Projekts GRETA.
- Die Erstellung von Gardenia- oder KI-Modellen, die für die Simulation von Extremen und die Projektion von Grundwasserständen unter Einfluss des Klimawandels verwendet werden (Unteraktion A3.5.: „Entwicklung von nicht-räumlichen Modellen, die den Grundwasserspiegel an ausgewählten Beobachtungspunkten reproduzieren“ – im Rahmen des Interreg-Projekts GRETA).
- Eine bestmögliche Analyse der Reaktion des Grundwassers auf Klimaextreme in Abhängigkeit von seiner Trägheit (Aktion 5: „Simulation der Auswirkungen des Klimawandels bis zum Jahr 2100“ – im Rahmen des Interreg-Projekts GRETA).

Diese hydrodynamische Karte kann mit Hilfe dieser Untersuchungen aktualisiert werden, die im Rahmen des Projekts später durchgeführt werden, insbesondere durch die Modellierungsansätze. Die im Rahmen der Teilmaßnahme „Analyse und Interpretation in jedem Gebiet **der Beziehungen zwischen Grundwasserspiegel, Flüssen** und Entnahmen aus dem Rhein-Aquifer“ durchgeführte Analyse der Beziehung zwischen dem Oberflächenwasser und dem Grundwasser sollte ebenfalls grenzüberschreitend zusätzliche Informationen über den Zusammenhang zwischen den Grundwasserständen und den Abflüssen der Oberflächengewässer der Vogesen und des Schwarzwaldes liefern.