

Professur für Hydrologie

Albert – Ludwigs – Universität Freiburg im Breisgau

Luisa Rieth

**Wassernutzungsanalyse während klimatisch
bedingter Dargebotsschwankungen im Zartner
Becken**

Masterarbeit unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Kerstin Stahl

Freiburg im Breisgau, den 31.01.2023

Professur für Hydrologie

Albert – Ludwigs – Universität Freiburg im Breisgau

Luisa Rieth

Matrikelnummer: 4311406

M. Sc. Hydrologie

E-Mail: rieth.luisa@gmail.com

Wassernutzungsanalyse während klimatisch bedingter Dargebotsschwankungen im Zartner Becken

Referentin: Frau Prof. Dr. Kerstin Stahl

Korreferent: Herr Prof. Dr. Markus Weiler

Fachliche Betreuung: Dirk Betting und Simon Brenner (badenovaNETZE GmbH)

Masterarbeit unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Kerstin Stahl

Freiburg im Breisgau, den 31.01.2023

*„Wo das Wasser endet,
endet auch die Welt“*

- Sprichwort aus Usbekistan

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Menschen danken, ohne die diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Zunächst möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Kerstin Stahl für die Vergabe des Themas und die Übernahme des Referats, und bei Herrn Prof. Dr. Markus Weiler für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Simon Brenner und Herrn Dirk Betting für die fachliche Betreuung während meiner Arbeit, sowie für die Bereitstellung von Daten, Informationen und Erfahrungen. Frau Sabine Mündlein vom Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald danke ich ebenfalls für das Bereitstellen von Daten und Informationen, sowie die stete Möglichkeit mich bei Rückfragen melden zu können. Für die Landnutzungskartierung 2014 und diesbezüglichen Rückfragen bedanke ich mich bei Herrn Martin Selz.

Auch geht mein Dank an Herrn Schelhorn für die Weitergabe von Grundwassernutzungsinformationen des Stadtgebietes Freiburgs und die Bereitstellung der Modellergebnisse zur Grundwasserneubildung im Zartner Becken, sowie der Beantwortung von fachlichen und technischen Fragen.

Herrn Vedder danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Mithilfe bei der anfänglichen Informationsbeschaffung in Form von weiteren Kontaktinformationen, die schließlich zu einem qualitativen Informationsgewinn meiner Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden, die mich auf meinem Weg stets unterstützt haben. Ohne euch hätte es diesen, so wie er war nicht gegeben!

Für das Korrekturlesen mit konstruktiven Anmerkungen und Tipps zu Formulierungen und Grafiken bedanke ich mich herzlich bei Simon Brenner, Dirk Betting, Pia Höfflin und Stefanie Rieth.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen im Text	III
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang	IV
Verzeichnis der Tabellen im Text	V
Verzeichnis der Tabellen im Anhang	V
Abkürzungen	VII
Zusammenfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung	1
2 Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken	4
2.1.1 Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes	4
2.1.2 Klima – aktuell und zukünftig	4
2.1.3 Geologie und Hydrogeologie	7
2.1.4 Landnutzungsentwicklung	9
2.1.5 Grundwasserneubildung und -bilanz	12
2.1.6 Oberflächengewässer	15
2.1.7 Interaktion Oberflächengewässer und Grundwasser	15
3 Problemstellung und Zielsetzung	18
4 Methodik	19
4.1 Datenzuständigkeit prüfen	21
4.2 Datensammlung	21
4.2.1 Wassernutzungen	21
4.2.2 Grundwasserstand	23
4.2.3 Wetter- und Klima	24
4.2.4 GIS-Daten	24
4.2.5 Wassernutzungskonkurrenzen	25
4.3 Datenqualität	25
4.4 Datenauswertung	25
4.4.1 Identifizierung der Wassernutzungsakteure	25
4.4.2 Wassernutzungen	25

4.4.3	Grundwasserdargebot	26
4.4.4	Grundwasserstand.....	27
4.4.5	Wassernutzungskonkurrenzen	28
5	Ergebnisse	29
5.1	Wassernutzungen.....	29
5.2	Grundwasserstand und Grundwasserdargebot.....	37
5.3	Wassernutzungskonkurrenzen.....	42
6	Diskussion	45
6.1	Validierung der Ergebnisse	45
6.2	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	45
6.2.1	Wassernutzungen.....	45
6.2.2	Grundwasserstand und Grundwasserdargebot	52
6.2.3	Einfluss Grundwasserförderung auf Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser.	56
6.2.4	Wassernutzungskonkurrenzen	56
7	Fazit.....	59
	Literaturverzeichnis.....	XI
	Anhang	XVII
	Eidesstattliche Erklärung.....	XXIII

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1	Anzahl der Messstellen nach Kreis, die im jeweiligen Jahr ihren historischen Tiefststand erreicht haben. Abgeändert nach Joeres et al. (2022a).....	1
Abbildung 2	Geografische Lage und Gemeinden des Zartner Beckens. Abgeändert nach Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (2020).....	4
Abbildung 3	Links: Klimadiagramm der Wetterstation am Wasserwerk; rechts: Klimadiagramm Wetterstation des DWDs in Buchenbach (bnNETZE 2022; DWD 2022b)	5
Abbildung 4	Standorte der Klimastationen Buchenbach (orange) und am Wasserwerk in Ebnet (gelb) (bnNETZE 2022; DWD 2022b).....	6
Abbildung 5	Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg. Links: Ist-Zustand basierend auf den mittleren Temperaturen von 1971 - 2000; rechts: prognostizierte Veränderung der mittleren Temperatur für den Zeitraum 2021 – 2050. Schwarzes Quadrat: Lage des Zartner Beckens (LUBW 2013)	7
Abbildung 6	Links: Verteilung der Mächtigkeiten der Schicht alter Schotter im Zartner Becken. Rechts: Verteilung der Mächtigkeiten der Schicht junger Schotter im Zartner Becken (Schelhorn 2022).....	9
Abbildung 7	Profilquerschnitt des Zartner Beckens von Westen nach Osten. In diesem Bereich liegen auch die Tiefbrunnen des Wasserwerks Ebnet (Wirsing und Ohnemus 1998).....	9
Abbildung 8	Landnutzung im Zartner Becken 1975, 2000, 2010(abgeändert nach LUBW (2022)) und 2014 (Selz 2022).....	12
Abbildung 9	Variabilität des Bodenwasserhaushalts der hydrologischen Einzeljahre im Modellgebiet Zartner Becken für die Periode 1988 bis 2019 (Schelhorn 2022)	14
Abbildung 10	Gewässernetz mit Haupt- und Nebengewässern des Zartner Beckens (LUBW 2022).....	15
Abbildung 11	Übersichtskarte der Interaktionsverhältnisse zwischen Oberflächen- und Grundwasser, sowie Grundwassergleichen für niedrige Grundwasserverhältnisse im Zartner Becken (auf Grundlage der Stichtagsmessung vom 14.07.2020) bis zum Pegel Ebnet (Schelhorn und Schrempp 2021)	16
Abbildung 12	Strukturelle Vorgehensweise zur Sammlung und Auswertung der in dieser Arbeit verwendeten Daten	20
Abbildung 13	Standorte der Grundwassermessstellen (GWM) und der Klimastation in Ebnet im Zartner Becken. Blau sind die Messstellen für die hochaufgelöste Daten vorliegen, in Rot die, für die es langzeit-Handmessungen gibt (bnNETZE 2022).....	28
Abbildung 14	Standorte der Förderbrunnen, Klimastationen, Pegel und Wasserkraftanlagen im Zartner Becken nach Gemeinde (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)	29
Abbildung 15	Absolute jährliche Wassernutzungen im Zartner Becken in Mio. m ³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)	31
Abbildung 16	Absolute jährliche nicht öffentliche Wassernutzungen im Zartner Becken in 1000 m ³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022).....	32

Abbildung 17	Anzahl der aktiven Brunnen pro Jahr nach Akteuren (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)	34
Abbildung 18	Umfrageergebnisse: Relative Nutzung der Wasserressourcen per Interessensgruppe und Region. Verändert nach Blauhut et al. (2017).....	36
Abbildung 19	Umfrageergebnisse zu alternativen oder zusätzlichen Wassernutzungen während Trockenheit im Untersuchungsgebiet der Dreisam. Verändert nach Blauhut et al. (2017).....	36
Abbildung 20	Extremwerte der jeweiligen Messstellen für die Zeitreihe der Handmessungen des Grundwasserstands von 1987 bis 2021. Rot: Minimum der jeweiligen Zeitreihe im dargestellten Zeitraum; blau: Maximum der jeweiligen Zeitreihe im dargestellten Zeitraum (bnNETZE 2022)	38
Abbildung 21	Gegenüberstellung von stündlichen Grundwasserständen dreier feuchter (2010, 2013, 2021) mit drei trockenen (2011, 2015, 2018) Jahren. Dargestellt ist jeweils das hydrologische Jahr (bnNETZE 2022)	40
Abbildung 22	Jährliches Grundwasserdargebot und -förderung in Mio. m ³ mit 10-jährigen gleitenden Mitteln: GM D 10 = Gleitendes Mittel für Grundwasserdargebot, GM F 10 = Gleitendes Mittel für Grundwasserförderung (bnNETZE 2022; GIT HydroS Consult GmbH 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a).....	41
Abbildung 23	Umfrageergebnisse zu Trockenheitsindikatoren in Baden - Württemberg nach Sektoren und Region (Stölzle und Stahl 2011).....	43

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung 24	Grundwassergleichenplan für hohe Grundwasserverhältnisse. Basierend auf der Stichtagsmessung vom 13.04.1988 (Schelhorn und Schrempp 2021).....	XX
Abbildung 25	Entwicklung der Einwohnerdichte der im Zartner Becken liegenden Gemeinden, 1960 bis 2020. Verändert nach Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2021).....	XX
Abbildung 26	Absolute monatliche Wassernutzungen im Zartner Becken in 1000 m ³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (bnNETZE 2022; GIT HydroS Consult GmbH 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a)	XXI
Abbildung 27	Absolute monatliche nicht öffentlichen Wassernutzungen im Zartner Becken in 1000 m ³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (bnNETZE 2022; GIT HydroS Consult GmbH 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a).....	XXI
Abbildung 28	Generalized linear Model mit 95 % Konfidenzintervallen für jeweils zehnjährige Teilperioden des Grundwasserdargebots und der Grundwasserförderung von 1990 bis 2019.....	XXII
Abbildung 29	Jährliche Wassergewinnung in Mio. m ³ a ⁻¹ der verschiedenen Wasserwerke der bnNetze von 2004 bis 2020 (bnNETZE 2020)	XXII

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1	Grundwasserrandzuflüsse aus den Seitentälern des Zartner Beckens (Schelhorn 2022).....	13
Tabelle 2	Mittlere Bilanzgrößen des Grundwasserhaushaltes im Zartner Becken, Zu- und Abflüsse in $l\ s^{-1}$ (Schelhorn 2022).....	14
Tabelle 3	Bestimmung der Rückführungsart des geförderten Grundwassers im Zartner Becken nach Akteuren. Unterschieden wird in direkte, indirekte, regionale und nicht regionale Rückführung in das System	35

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tabelle 4	Übersicht der zusammengetragenen Daten. Aufgeführt sind Datenherkunft, Bezeichnung, ID der Messstelle (falls vorhanden), Ort der Datenaufnahme, Status zur Datenqualität, Einheit, Zeitraum der Datenverfügbarkeit, Datenauflösung, Bemerkungen zu Besonderheiten/ Merkmalen und ob die Daten in dieser Arbeit verwendet wurden.....	XVII
-----------	--	------

Abkürzungen

Name	Einheit	Symbol/ Abkürzung
© GIT HydroS Consult GmbH		GIT
badenovaNETZE GmbH		badenovaNETZE
Baden-Württemberg		
Bundesamt für Kartografie und Geodäsie		BKG
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz		BMUV
Climate-Data-Center des Deutschen Wetterdienstes		CDC
Deutscher Wetterdienst		DWD
Digitales Höhenmodell		DGM
Durchlässigkeitsbeiwert, je höher der Wert, desto höher die Durchlässigkeit	[m/s]	kf
Energie- und Wasserversorgung Kirchzarten GmbH		EWK
et cetera		etc.
Exfiltration aus dem Grundwasser in Oberflächengewässer	[l/s]	E
Generalized Linear Model		GLM
Geoinformationssystem		GIS
Grad Celsius	[°C]	°C
Grundwasser		GW
Grundwasserdargebot	[l/s]	GWD
Grundwassermessstellen		GW-Messstellen
Grundwassermessungen		GW HM
Handmessungen		
Grundwassermessungen hochaufgelöst		GW HG
Grundwasserneubildung		GWN
Grundwasserwärmepumpe		GWP
Infiltration aus Oberflächengewässern ins Grundwasser	[l/s]	I
Kilometer	[km]	km
Kilometer (Flusslänge) pro Quadratkilometer	[km/km ²]	km km ⁻²
Kubikmeter	[m ³]	m ³
Kubikmeter pro Jahr	[m ³ /a]	m ³ a ⁻¹
Kubikmeter pro Tag	[m ³ /d]	m ³ d ⁻¹
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau		LGRB
Landesanstalt für Umwelt		LUBW

Landratsamt		LRA B-H
Breisgau-Hochschwarzwald		
Liter pro Einwohner pro Tag	[l]	l/EW/d
Maximum		Max.
Meter	[m]	m
Meter über Normalnull	[m]	m ü. NN
Millimeter	[mm]	mm
Millionen		Mio.
Minimum		Min.
Prozent	[%]	%
Quadratkilometer	[km ²]	km ²
Randzuströme aus den Seitentälern	[l/s]	R
Statistisches Landesamt		Stat. LA B-W
Tiefbrunnen		TB
Untere Wasserbehörden		UWB
Wassergesetz Baden-Württemberg		WG BW
Wasserhaushaltgesetz		WHG
Wasserschutzgebiet		WSG
Wasserwerk Ebnet		WW-Ebnet
Wasserwerk Hausen an der Möhlin		WW-Hausen a. d. M.
Zentimeter	[cm]	cm

Zusammenfassung

Aufgrund des *Klimawandels* sind seit einigen Jahren Veränderungen im *Wasserhaushalt* Deutschlands zu beobachten: Der mittlere jährliche Niederschlag nimmt ab, ebenso wie Quellschüttungen und die Grundwasserneubildung. Gleichzeitig steigt aufgrund zunehmender Hitzeperioden und *Dürren* der *Wasserbedarf*, vor allem bei Bedarfsspitzen in der öffentlichen Wasserversorgung. Der Aquifer im *Zartner Becken* spielt für die Wasserversorgung der Region und der Stadt Freiburg eine maßgebliche Rolle. Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind auch hier Veränderungen im Wasserhaushalt zu erwarten. Aktuell existiert für dieses Gebiet kein umfassendes Lagebild der quantitativen *Wassernutzungssituation*. Für eine auch zukünftig sichere und nachhaltige Wasserbewirtschaftung ist es jedoch wesentlich die Wasserressourcen vor Ort, sowie deren Dynamiken und Nutzungen genau zu kennen. Ziel dieser Arbeit ist ein erstes umfassendes Lagebild der zeitlichen, räumlichen und quantitativen Wassernutzungssituation im Zartner Becken abzubilden und dieses in Relation mit dem *Wasserangebot*, vor allem während Trockenperioden, zu setzen. Dazu wurden Nutzungsinformationen institutionsübergreifend zusammengetragen, vereinheitlicht und sektorenübergreifend ausgewertet. *Grundwasserdaten* wurden zusammengetragen und ausgewertet, sowie zusätzlich Informationen zu aktuellen und potenziellen wasserbezogenen Konkurrenzen in der Region gesammelt und reflektiert. Die Ergebnisse zeigen, dass im Zartner Becken keine Nutzung von Oberflächengewässern stattfindet, sondern ausschließlich des Grundwassers. Die *badenovaNETZE* sind dabei die dominanten Wassernutzer, mit Abstand gefolgt von den anderen öffentlichen Wasserversorgern der anliegenden Gemeinden. Private und gewerbliche Wassernutzungen machen dabei nur einen Bruchteil der Gesamtförderungen aus. Grundwassermessstellen erreichen in den letzten zehn Jahren des Beobachtungszeitraums vermehrt ihre Tiefststände und Veränderungen in saisonalen Grundwasserdynamiken sind zu erkennen. Aktuell gibt es im Zartner Becken keine offiziell bekannten Wassernutzungskonkurrenzen, doch könnte die angespanntere Situation im benachbarten Oberrheingraben ein Vorbote sein.

Insgesamt haben die Untersuchungen einem besseren Verständnis der Wassernutzungen im Verhältnis zur sich verändernden Dargebotssituation geführt. Die Grundwasserförderungen nehmen stärker ab als das Dargebot und die Grundwasserbilanz des Gebietes ist positiv. Damit wird die Wasserbewirtschaftung im Zartner Becken als nachhaltig bewertet, doch wird auch hier voraussichtlich der Druck auf die Wasserressourcen zunehmen. Daher ist es wichtig, vorsorglich zusammen mit allen Interessensgruppen, Konzepte und Entscheidungsprozesse für Regelungen bei Wasserknappheit zu erarbeiten. Allgemein gilt es, die umfassende Datenlage zu Wassernutzungen im Zartner Becken zu verbessern, um saisonale Dynamiken besser analysieren zu können. Auch sollten die Auswirkungen der Wasserbewirtschaftung auf regionale Gewässerlandschaften genauer betrachtet werden.

Stichworte: Klimawandel, Wasserhaushalt, Dürre, Wasserbedarf, Wassernutzung, Wasserangebot, Grundwasser, Wassernutzungskonkurrenzen, Zartner Becken, badenovaNETZE

Abstract

Due to *climate change*, changes in Germany's *water balance* have been observed in recent years: the average annual precipitation is decreasing, as well as spring spills and groundwater recharge. At the same time, *water demand* is increasing, especially the peak demand in the public water supply, due to increasing heat periods and *droughts*. The aquifer in the *Zartner Basin* plays an important role in the water supply of the region and the city of Freiburg. In the context of climate change, changes in the water balance are here also expected. There is currently no comprehensive picture of the quantitative *water use* situation in this area. For safe and sustainable water management in the future, however, it is essential to know the local water resources, as well as their dynamics and uses.

The aim of this work is to provide a first comprehensive picture of the temporal, spatial and quantitative water use situation in the *Zartner Basin* and to put this in relation to the water supply, especially during dry periods. For this purpose, water usage information was collected across institutions, standardized, and evaluated across sectors. *Groundwater* data were collected and evaluated, as well as information on current and potential *water-related competition* in the region.

The results show that the *Zartner Basin* does not use surface water, but only groundwater. The *badenovaNETZE* are the dominant water users, followed by the other public water suppliers of the adjacent municipalities. Private and commercial uses of water account for only a fraction of total water production. Over the past ten years, groundwater measuring stations have increasingly reached their lowest levels in this observation period and changes in seasonal groundwater dynamics could be detected. Currently, there are no officially known water use competitions in the *Zartner Basin*, but the more tense situation in the neighbouring *Oberreingraben* could be a harbinger.

Overall, the studies have led to a better understanding of water uses in relation to the changing water quantity situation. Water productions are decreasing more than the availability of groundwater and the groundwater balance of the area is positive. Thus, water management in the *Zartner Basin* is assessed as sustainable, but pressure on water resources is expected to increase here, too. It is therefore important to develop preventative concepts and decision-making processes for dealing with water scarcity in cooperation with all stakeholders. In general, it is important to improve the comprehensive data on water use in the *Zartner Basin* to better analyse seasonal dynamics. The impact of water management on regional water landscapes should also be examined more closely.

Keywords: climate change, water balance, drought, water demand, *Zartner Basin*, water use, water supply, groundwater, water-related competition, *badenovaNETZE*

1 Einleitung

Bis vor wenigen Jahren fanden die Themen Trockenheit und Dürre nur selten ihren Weg in die Öffentlichkeit. Doch heute sind sie in den Medien allgegenwärtig.

Analysen zur Wasserbilanz von Rodell et al. (2018) haben gezeigt, dass Deutschland zu den Ländern auf der Welt mit dem stärksten Wasserverlusten in den letzten Jahren gehört. Im letzten Jahrzehnt hat Deutschland Wasser etwa im Volumen des Bodensees verloren, wobei sich gleichzeitig durch die veränderten klimatischen Bedingungen in den letzten zehn bis 20 Jahren weniger Grundwasser neu gebildet hat (Pahl-Wostl 2022).

Landwirtschaftliche Betriebe müssen aufgrund der Trockenheit zunehmend bewässern und auch Haushalte benötigen während Hitzeperioden mehr Wasser, gleichzeitig sinkt das Dargebot (Pahl-Wostl 2022; Thober et al. 2018). In Deutschland könnten zukünftig etwa 2 Millionen (Mio.) Hektar Ackerland von zusätzlicher Bewässerung abhängig sein, das entspricht einer Vervierfachung der aktuell bewässerten Agrarflächen (Joeres et al. 2022b). Untersuchungen von Joeres et al. (2022a) haben ergeben, dass knapp die Hälfte aller in ihrer Studie betrachteten 6 700 Messstellen in Deutschland in den Dürrejahren 2018 und 2021 ihren niedrigsten Grundwasserstand seit 1990 erreichten.

Dies trifft auch für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit zu: Das Zartner Becken liegt am östlichen Rand des Stadtgebiets Freiburg im Breisgau, an der Grenze zwischen Südschwarzwald und Oberrheingraben. Der anliegende Aquifer ist der wichtigste und größte im gesamten Einzugsgebiet der Dreisam. Für die Anliegenden Gemeinden, und vor allem für die Stadt Freiburg, spielt er eine maßgebliche Rolle in der öffentlichen Trinkwasserversorgung.

Abbildung 1 zeigt die Anzahl der Messstellen in den Kreisen Freiburg im Breisgau und Breisgau-Hochschwarzwald, die im jeweiligen Jahr ihren historischen Tiefststand erreicht haben. Hierbei sticht die Dürreperiode von 2018 bis 2020 deutlich hervor, vor allem im Kreis Breisgau-Hochschwarzwald, zu dem das hier untersuchte Zartner Becken, aber auch Teile des Oberrheingrabens gehören.

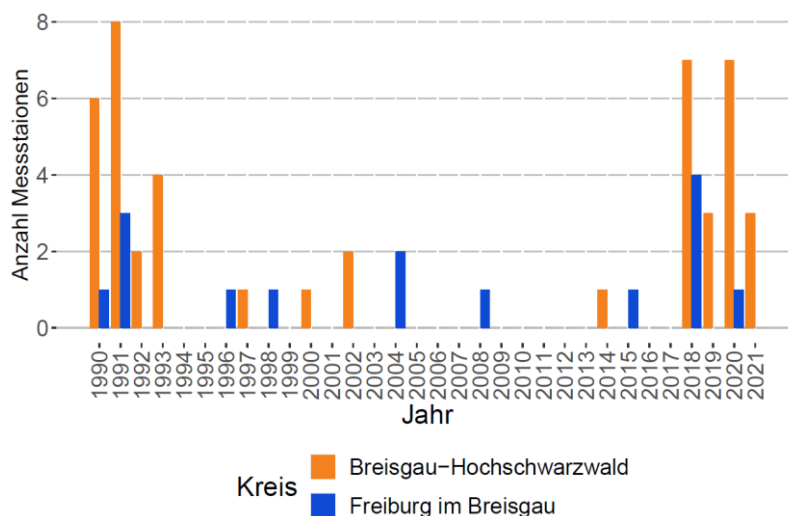


Abbildung 1 Anzahl der Messstellen nach Kreis, die im jeweiligen Jahr ihren historischen Tiefststand erreicht haben. Abgeändert nach Joeres et al. (2022a).

Einleitung

Die Trinkwasserversorgung der Stadt Freiburg im Breisgau, sowie die der im Zartner Becken liegenden Gemeinden, hängt vom Wasserdargebot in diesem Bereich ab. Bei deutlich zunehmender Bevölkerung (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2021) bleiben die Grundwasservorkommen hier jedoch nahezu unverändert, mit einer leicht abnehmenden Tendenz (siehe Kapitel 5.2). Dazu kommt, dass Gemeinden in den Höhenlagen des Schwarzwaldes sich nicht mehr, wie bisher, aus eigenen Quellvorkommen versorgen können (Mohl 2016; Beule et al. 2019; Peyk und Schütze 2022). Diese fallen vermehrt trocken, was zur Folge hat, dass diese Gemeinden voraussichtlich an angrenzende öffentliche Trinkwasserversorgungen, unter anderem des Zartner Beckens, angeschlossen werden müssen.

Die bisher wenigen Untersuchungen in der Region bezogen sich größtenteils auf die Wasserqualität, weniger auf dessen Quantität. Für das Zartner Becken selbst liegen keine öffentlich zugänglichen wissenschaftlichen oder behördlichen Analysen zum Wasserhaushalt oder den Wassernutzungen in diesem Gebiet vor. Lediglich für den gesamten Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald gibt es nähere Untersuchungen. Doch inhaltlich wird in diesen hauptsächlich auf die intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen im angrenzenden Oberrheingraben eingegangen. Auch hier liegt der Fokus verstärkt auf der Analyse der Wasserqualität. Die Betrachtung des Zartner Beckens fand im Themenkontext dieser Arbeit bisher deutlich weniger Beachtung als die benachbarte Region.

Die öffentlichen Wasserversorger nutzen aktuelle Grundwassermodelle für das Zartner Becken, doch gibt es auch hier bisher keine intensivere Auseinandersetzung mit der lokalen Wassernutzungssituation. Es ist bekannt, dass diese Informationen bei verschiedenen Institutionen vorliegen und dort jeweils dokumentiert werden, doch wie diese konkret aussehen, zusammenhängen, in welcher Auflösung und über welchen Zeitraum die jeweiligen Daten vorliegen und wo die Entnahmen stattfinden, ist institutionsübergreifend nicht unbedingt bekannt.

Trotz Zuwachs der Einwohnerzahlen ist der Wasserbedarf pro Kopf im Stadtgebiet Freiburg zwischen 2004 und 2013 gesunken. Nach Dornbusch und Nienhaus (2020) ist der spezifische Wasserbedarf von Haushalten von etwa 120 Litern pro Einwohner pro Tag (l/EW/d) auf 106 l/EW/d gesunken. Grund dafür könnten unter anderem Wassersparmaßnahmen sein. Seit 2013 steigt der Bedarf wieder an, bleibt jedoch unter dem Vorniveau von 120 l/EW/d. Dem entgegen steht die Zunahme von Tagesbedarfsspitzen in der öffentlichen Trinkwasserversorgung (Umwelt Bundesamt 2019; bnNETZE 2020). Grund dafür ist der bereits erwähnte erhöhte Wasserbedarf von Haushalten, Gewerben (beispielsweise für Kühlsysteme) und der Landwirtschaft während Hitzeperioden und starker Trockenheit im Sommer. Unter anderem deshalb haben die badenovaNETZE einen neuen Wasserrechtsantrag für das Wasserwerk Hausen an der Möhlin (WW-Hausen a. d. M.) gestellt. Die aktuelle maximale Tagesförderung beträgt hier 60 000 m³. Zwischen den Jahren 2017 bis 2019 betragen Tagesbedarfsspitzen jedoch bis zu 95 000 m³. Hintergrund des Antrags ist auch, dass in Zukunft von möglichen Teilausfällen des Wasserwerks Ebnet (WW-Ebnet) im Zartner Becken aufgrund eines

Einleitung

potenziell zu geringen Wasserdargebots gerechnet wird. Der Antrag beläuft sich daher auf eine maximale Tagesförderung von 93 000 m³.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte ist es wichtig die aktuelle Grundwassernutzungs- und Grundwasserdargebotssituation im Zartner Becken genauer zu betrachten, um möglichen Handlungsbedarf für eine angepasste auch zukünftig nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen zu bewerten. Der Unsicherheit von Klimamodellen und zu erwartenden nicht linearen Effekten im Klimawandel bei einer Erwärmung der globalen Temperatur um mehr als 2 °C müssen robuste Strategien gegenüberstehen (Thober et al. 2018).

Auch wenn schon Trends im Grundwasserspiegel und einer verringerten Grundwasserneubildung zu erkennen sind, steht Baden-Württemberg im europa- und deutschlandweiten Vergleich noch gut dar. Doch sind die Vorboten der zukünftigen Entwicklung der Wasserressourcen schon zu erkennen und sollten als Chance einer rechtszeitigen Anpassung an diese neuen Verhältnisse betrachtet werden (Cammalleri et al. 2020; Pahl-Wostl 2022; IPCC 2012).

2 Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

2.1.1 Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Das Zartner Becken liegt im Südwesten Baden-Württembergs an der östlichen Grenze der Stadt Freiburg im Breisgau zum Schwarzwald hin (siehe Abbildung 2). Die Beckenstruktur beginnt im Westen an der Freiburger Stadtgrenze bei Ebnet und erstreckt sich bis zum Anstieg der Seitentäler der Haupt- und Nebengewässer des Dreisam Einzugsgebietes (EZG) (Schelhorn 2022). Es gehört zum Regierungsbezirk Freiburg und zum Kreis Breisgau-Hochschwarzwald. Im Zartner Becken liegen die Gemeinden Kirchzarten, welche den größten Flächenanteil einnimmt, Stegen, Oberried, Buchenbach und der Stadtteil Freiburg – Ebnet.

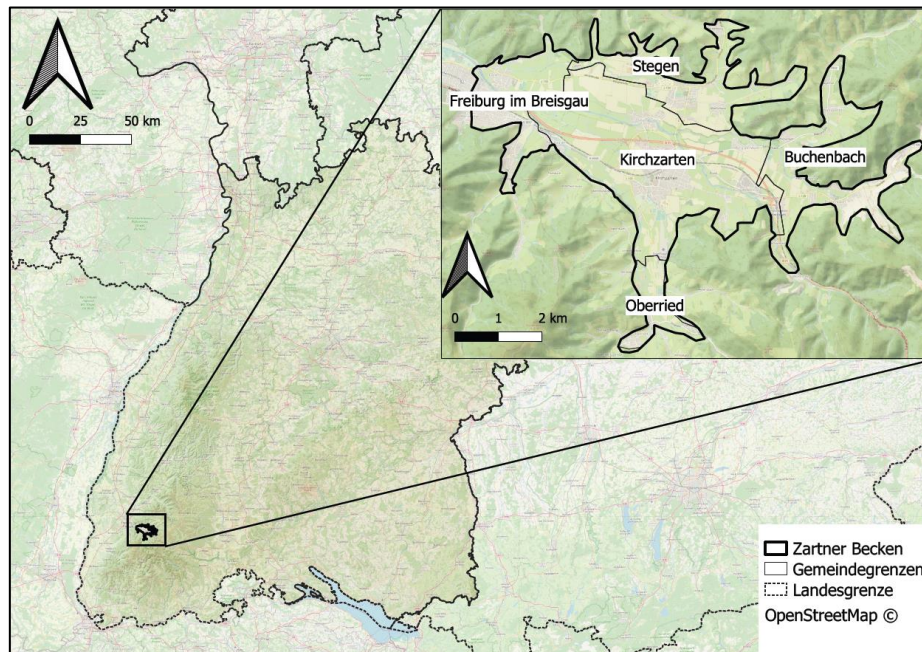


Abbildung 2 Geografische Lage und Gemeinden des Zartner Beckens. Abgeändert nach Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (2020).

Das Untersuchungsgebiet entspricht in etwa den Außengrenzen des Wasserschutzgebietes des Wasserwerks in Ebnet. Es ist in westlicher Richtung lediglich bis zum Pegel Ebnet ausgedehnt und deckt in östlicher Richtung Höhenlagen bis etwa 500 Metern über Normalnull (m ü. NN) ab.

2.1.2 Klima – aktuell und zukünftig

Das Zartner Becken liegt in den gemäßigten Breiten, im Übergangsbereich von See- zu Kontinentaler Klimazone (Beck et al. 2018). Es befindet sich an der Grenze zwischen Oberrheingraben und dem südlichen Schwarzwald. Die jährliche Durchschnittslufttemperatur liegt hier bei etwa 9,4 °C, der jährliche Niederschlag bei 768 Millimetern (mm). Dieser variiert von monatlichen Werten zwischen 70 mm im Februar bis 112 mm im Mai (Schelhorn 2022). Die monatliche Verdunstung übersteigt hier nie den mittleren monatlichen Niederschlag und schwankt zwischen 10 und 91 mm, wobei die höchsten Werte in den Monaten zwischen Mai und September auftreten (Schelhorn 2022).

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

Abbildung 3 zeigt Klimadiagramme zweier Klimastationen im Zartner Becken. Die Station Ebnet (links) liegt im westlichen Teil am Wasserwerk in Ebnet, die Station Buchenbach am östlichen Ende des Beckens. Abbildung 4 zeigt die Lage der Stationen zueinander.

Obwohl der Abstand zwischen den beiden Klimastationen nur etwa sechs Kilometer (km) Luftlinie beträgt, gibt es einen sichtbaren Unterschied in der mittleren jährlichen Temperatur und den jährlichen Niederschlägen. Bei der niedriger gelegenen Station im Westen regnet es durchschnittlich 200 mm mehr im Jahr. Die Saisonalitäten des Niederschlags sind jedoch nahezu gleich. Der höchsten Niederschlagssummen fallen hier bei beiden Stationen, bedingt durch konvektive Niederschläge, in den Sommermonaten. Aufgrund der höheren Lage ist unter anderem auch die Durchschnittstemperatur der Klimastation Buchenbach niedriger.

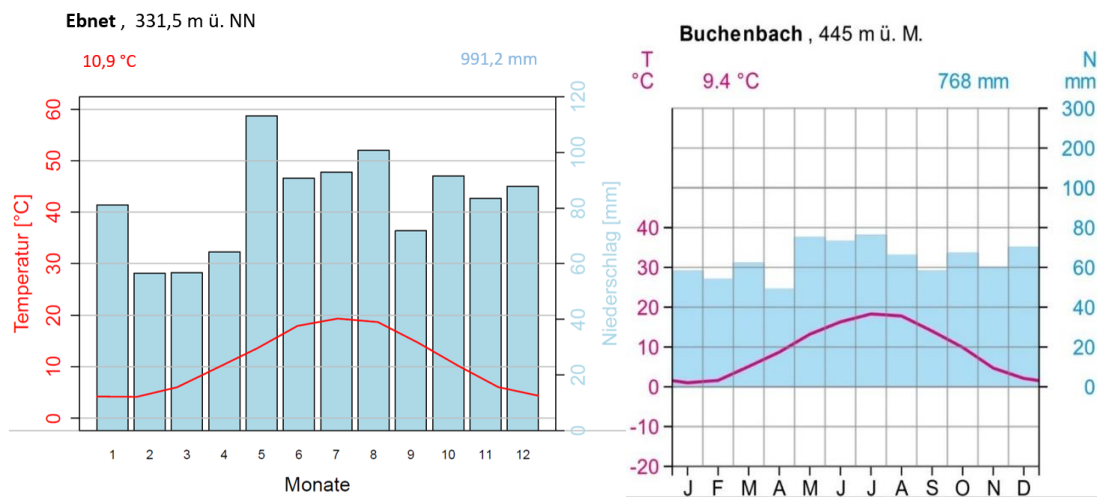


Abbildung 3 Links: Klimadiagramm der Wetterstation am Wasserwerk; rechts: Klimadiagramm Wetterstation des DWDs in Buchenbach (bnNETZE 2022; DWD 2022b)

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

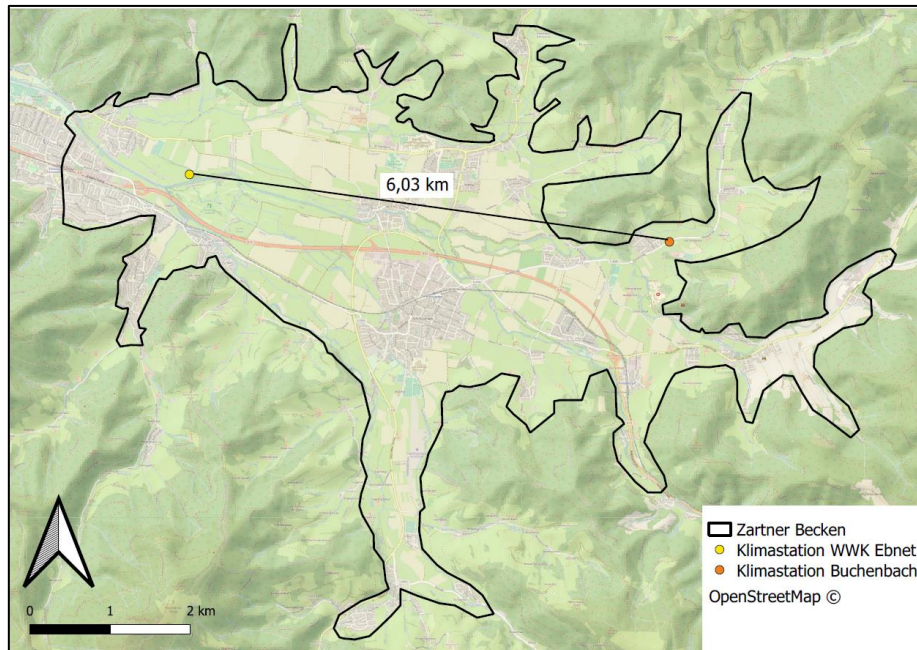


Abbildung 4 Standorte der Klimastationen Buchenbach (orange) und am Wasserwerk in Ebnet (gelb) (bnNETZE 2022; DWD 2022b)

Nach der LUBW (2013) werden sich die mittleren jährlichen Temperaturen in der Region erhöhen (siehe Abbildung 5). Temperaturen, die heute im angrenzenden Oberrheingraben normal sind, werden sich bis ins Zartner Becken in den Schwarzwald verschieben. Das Dürrejahr 2018, in dem es in ganz Mitteleuropa außergewöhnlich trocken war, war ein Vorbote für diese zukünftige Entwicklung. Die größten Abweichungen vom langjährigen Mittel traten dabei in Deutschland auf (Bathiany et al. 2021). Wie für Mitteleuropa vorhergesagt, ist es auch im Zartner Becken wahrscheinlich, dass hydrometeorologische Extremevents, wie Starkregen oder Dürren, an Zahl und Intensität zunehmen werden (IPCC 2022).

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

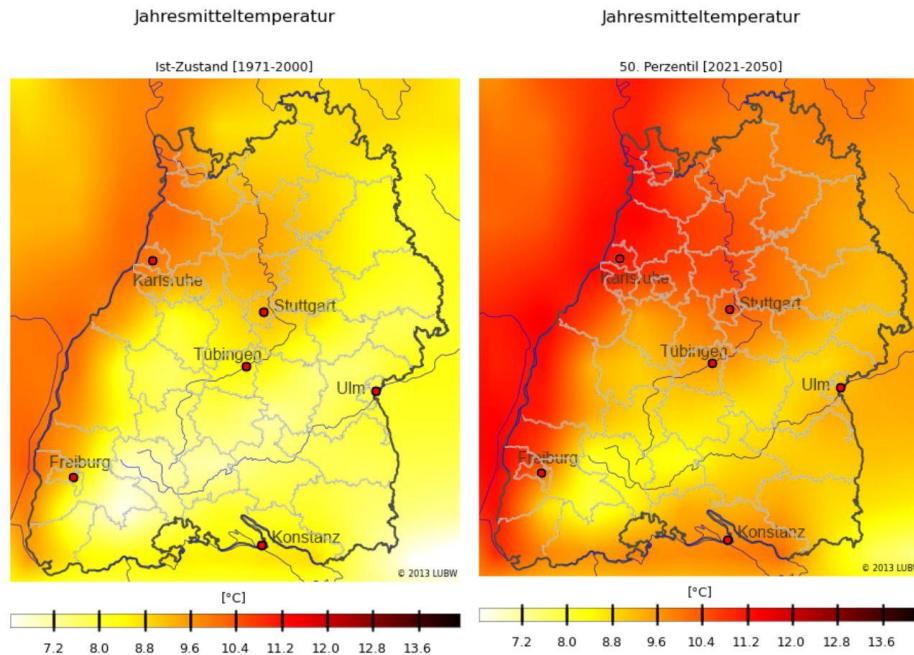


Abbildung 5 Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg. Links: Ist-Zustand basierend auf den mittleren Temperaturen von 1971 - 2000; rechts: prognostizierte Veränderung der mittleren Temperatur für den Zeitraum 2021 – 2050. Schwarzes Quadrat: Lage des Zartner Beckens (LUBW 2013)

2.1.3 Geologie und Hydrogeologie

Die Entstehung des Zartner Beckens hängt mit der Entstehung des Oberrheingrabens und des quer dazu verlaufenden Bonndorfer Grabens vor etwa 50 Millionen Jahren zusammen (Ebbmeyer 2020). Es ist ein intramontanes, mit fluvialen und würmeiszeitlichen Schottern aus dem Schwarzwald verfülltes Becken und bildet einen bedeutenden Grundwasserspeicher im Einzugsgebiet der Dreisam (Frieg 1987).

Die untere Begrenzung des Beckens bildet eine aus Gneis und Anatexiten bestehende Felswanne des Grundgebirges, welche mit quartären Lockersedimenten der Dreisam und ihren Nebenflüssen verfüllt ist (Schelhorn 2022). Die Seitentäler der Nebenflüsse ziehen sich teilweise bis tief in den zentralen Beckenbereich hinein (Morhard und Kern 2013). Der zentrale Beckenbereich hat eine Ausbreitung von etwa acht Kilometern in ost-westlicher Richtung und etwa 3,2 km in nord-südlicher Richtung. Die Höhenverteilung beginnt bei 465 m ü. NN am Fuße des Höllentals und fällt bis zur etwa einen Kilometer breiten Talverengung am Pegel Ebnet auf 308 m ü. NN. Dies entspricht einer Neigung von 1,5 % von Ost nach West. (Schelhorn 2022)

Im gesamten Zartner Becken bilden die jüngeren Schotter den Hauptgrundwasserleiter (Wirsing und Ohnemus 1998). Im Norden des Gebietes erreichen sie eine Mächtigkeit zwischen 25 und 40 Metern (m). Im Süden dagegen nur Mächtigkeiten zwischen zehn und 15 Metern. Daraus ergibt sich eine dominante Grundwasserrinne im nördlichen Talbereich, die den Effekt einer „unterirdischen Vorflut“ hat. Das bedeutet, dass sie Grundwasser aus dem Südtal, welches sich aufgrund des mangelnden Speicherraums dort nicht halten kann, abzieht (Ehrminger und Herdeg 1992). Hintergrund der Entstehung dieser unterschiedlichen Mächtigkeiten von Nord nach Süd sind vermutlich Schmelzwasserbäche nach der letzten Eiszeit, die vor allem in der Nordrinne verliefen und dort die

Ablagerung von gröberen Korngrößen begünstigte. Dies führte zu der Entstehung heutiger hoher k_f – Werte im nördlichen Beckenbereich. (Selz et al. 2006). Auch durch die gleichmäßig nach Westen hin abfallenden Geländeoberkante ergibt sich ein deutlicher Unterschied in der vertikalen Erstreckung der jungen Schotter, was in einer ausgeprägten Rinnenstruktur ebenso von Ost nach West resultiert (Morhard und Kern 2013).

Die älteren Schotter im Zartner Becken haben einen hohen Gehalt an verwitterten Komponenten. Durch hohe Schluffgehalte und eine dichte Lagerung hat diese Schicht eine geringe Durchlässigkeit. (Wirsing und Ohnemus 1998). Die jüngeren Schotter sind daher von besonderer Bedeutung für die wasserwirtschaftliche Nutzung (Morhard und Kern 2013). Der inhomogene Aufbau der fluvioglazialen Schotter, deren Korngrößenzusammensetzung horizontal als auch vertikal teilweise stark variiert, führt in manchen Bereichen zu einer unscharfen Grenze zwischen alten und jungen Schottern (Ehrminger und Herdeg 1992). Aufgrund der unterschiedlichen Durchlässigkeiten der beiden Schotterschichten wird ein sekundäres, hangparalleles Fließgefüge angenommen (Frieg 1987).

Abbildung 6 zeigt die jeweilige Mächtigkeit der jungen und alten Schotter im Zartner Becken. Bei den jungen Schottern ist vor allem die hohe Mächtigkeit am nord-östlichen Beckenrand zu erkennen. Abbildung 7 zeigt einen Querschnitt des Zartner Beckens von Westen nach Osten. In diesem Bereich liegen auch die Tiefbrunnen des Wasserwerks Ebnet. In Gebieten mit geringen Flurabständen reagiert der Grundwasserspiegel bereits innerhalb von ein bis zwei Wochen auf Niederschläge (Ehrminger und Herdeg 1992). Erfahrungen der badenovaNETZE nach führt dies teilweise zu Trübungen im Grundwasser, vor allem nach Starkregenereignissen.

Im Zartner Becken kommen vor allem Braunerden und Parabraunerden vor. Entlang der Gewässer können auch Auenbraunerden, oder durch Grundwasser beeinflusste Auengleye gefunden werden. (Selz et al. 2006). Nach Rücksprache von Schelhorn (2022) mit dem Gebietsgeologen Herr Winker sind die Erkenntnisse und Interpretation der Schichtverteilung im Zartner Becken von Frieg (1987), Ehrminger und Herdeg (1992), sowie Wirsing und Ohnemus (1998) auch heute noch gültig.

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

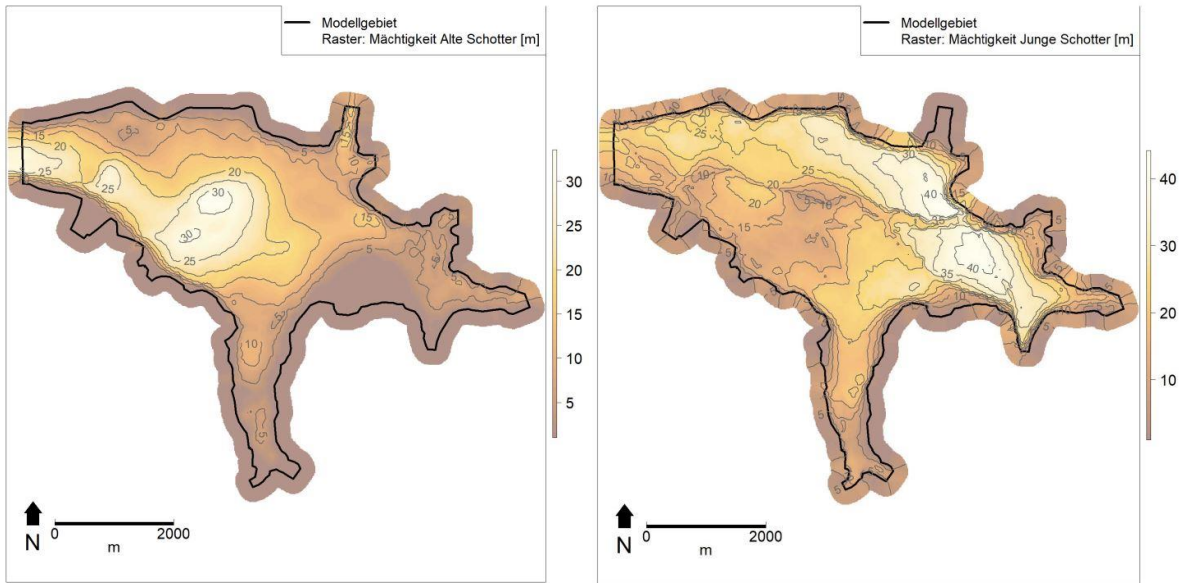


Abbildung 6 Links: Verteilung der Mächtigkeiten der Schicht alter Schotter im Zartner Becken. Rechts: Verteilung der Mächtigkeiten der Schicht junger Schotter im Zartner Becken (Schelhorn 2022)

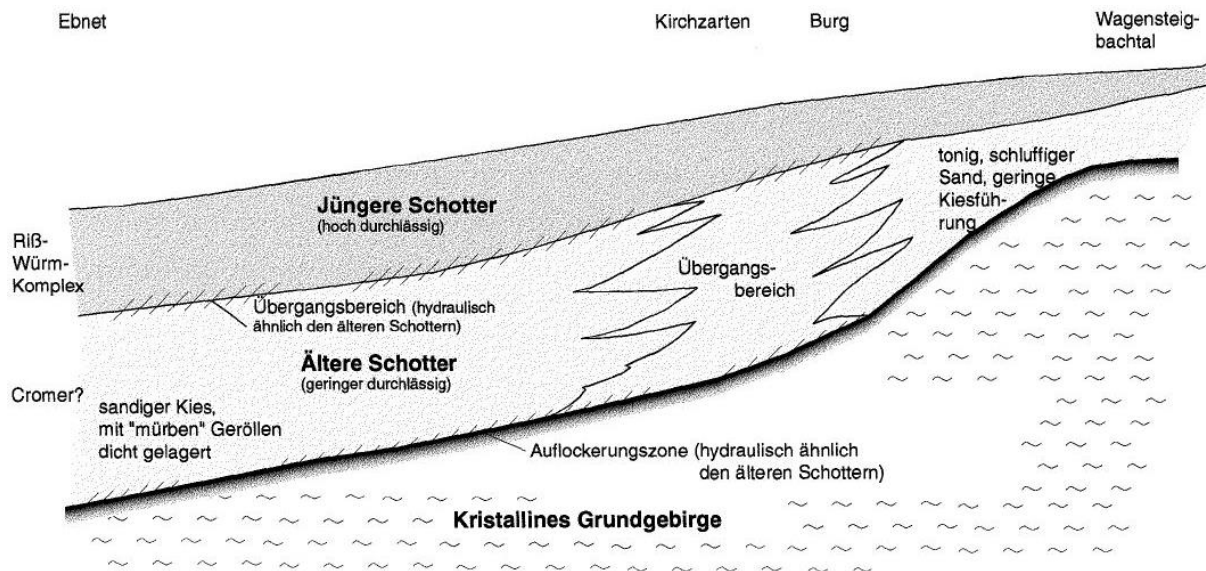


Abbildung 7 Profilquerschnitt des Zartner Beckens von Westen nach Osten. In diesem Bereich liegen auch die Tiefbrunnen des Wasserwerks Ebnet (Wirsing und Ohnemus 1998)

2.1.4 Landnutzungsentwicklung

Abbildung 8 zeigt die Landnutzungsentwicklungen im Zartner Becken ab 1975. Im Jahr 1975 spielte der Obstanbau noch eine zentrale Rolle und die besiedelte Flächen war deutlich kleiner als in den darauffolgenden Jahrzehnten. Zum Jahr 2000 hin gewann intensiv und extensiv bewirtschaftetes Grünland an Bedeutung und die Siedlungsfläche nahm deutlich zu. Auch die industriell genutzte Fläche hat sich in diesem Zeitraum mehr als verdoppelt.

Die Landnutzungskartierung von Selz et al. (2006) für das Jahr 2003 ergab, dass intensiv bewirtschaftetes Grünland mit 40 % Flächenanteil die dominierende Landnutzung im Zartner Becken

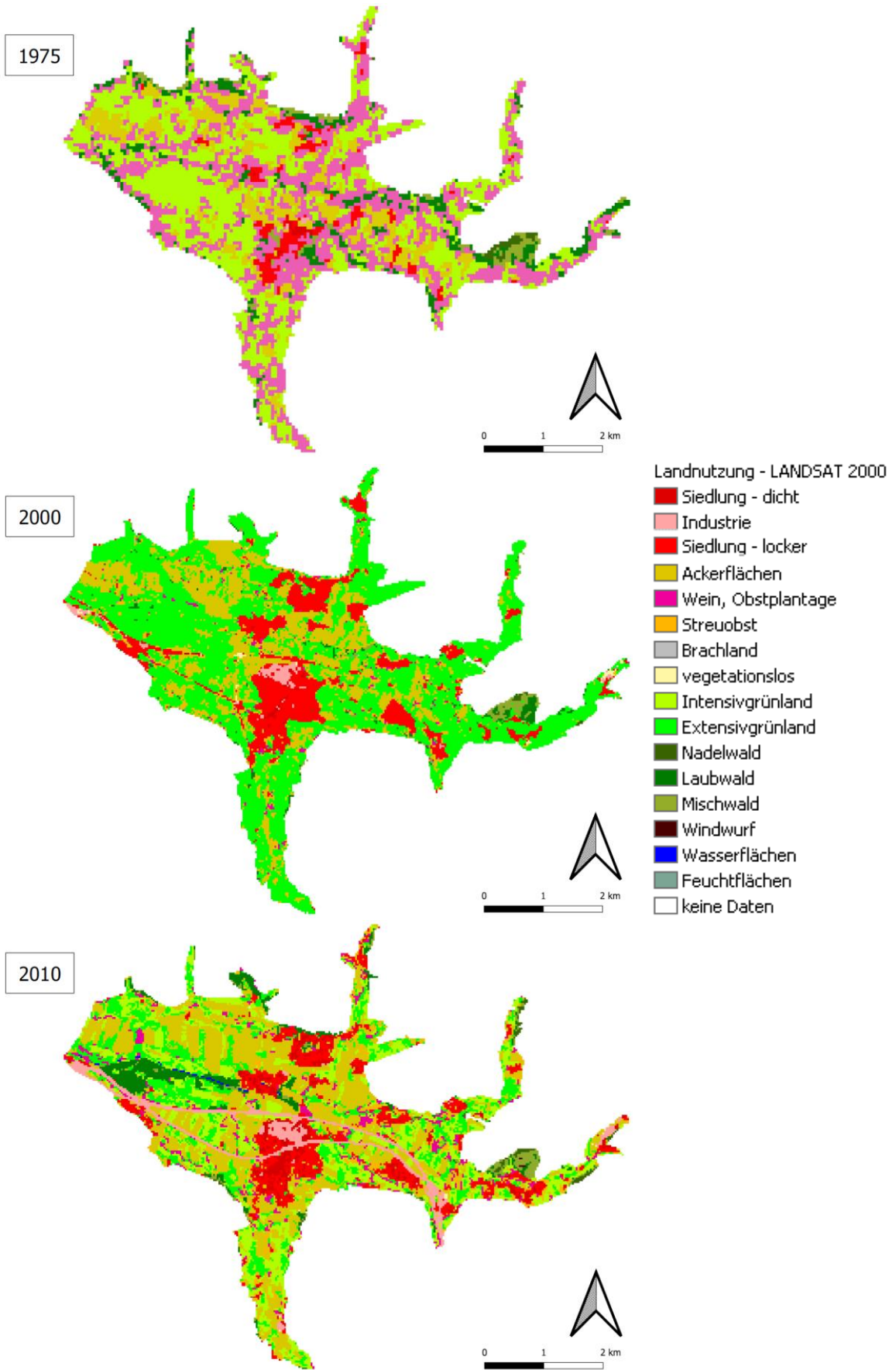
Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

war. Darauf folgten die landwirtschaftliche Nutzung mit 27 % und Siedungsflächen mit 24 %. Gewässer machten nur 1,3 % der Landoberfläche aus und Flächen für Obstanbau etwa 6 %.

Von 2000 bis 2010 nahm die Siedlungsfläche nochmals zu. Grünland wurde nun weitestgehend als Ackerflächen genutzt und vereinzelt wachsen die Flächen zum Obstanbau wieder. Dies geschieht vor allem im östlichen Teil des Beckens bei Burg am Wald und Buchenbach. Im Jahr 2000 wurde die Bundesstraße B31, die durch das Zartner Becken führt, ausgebaut, welche in den Karten von 1975, 2000 und 2010 als Industriefläche gekennzeichnet ist.

Von 2010 zu 2014 wurden wieder vermehrt Ackerflächen zu Grünland umgenutzt. Die Siedlungsflächen wuchsen abermals. Die aktuellste Kartierung der Landnutzung im Zartner Becken stammt aus eigener Recherche und Kartierung der badenovaNETZE GmbH (badenovaNETZE). Daher sind die Kategorien anders aufgeteilt als die der anderen Karten, deren Datenursprung von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) stammen.

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken



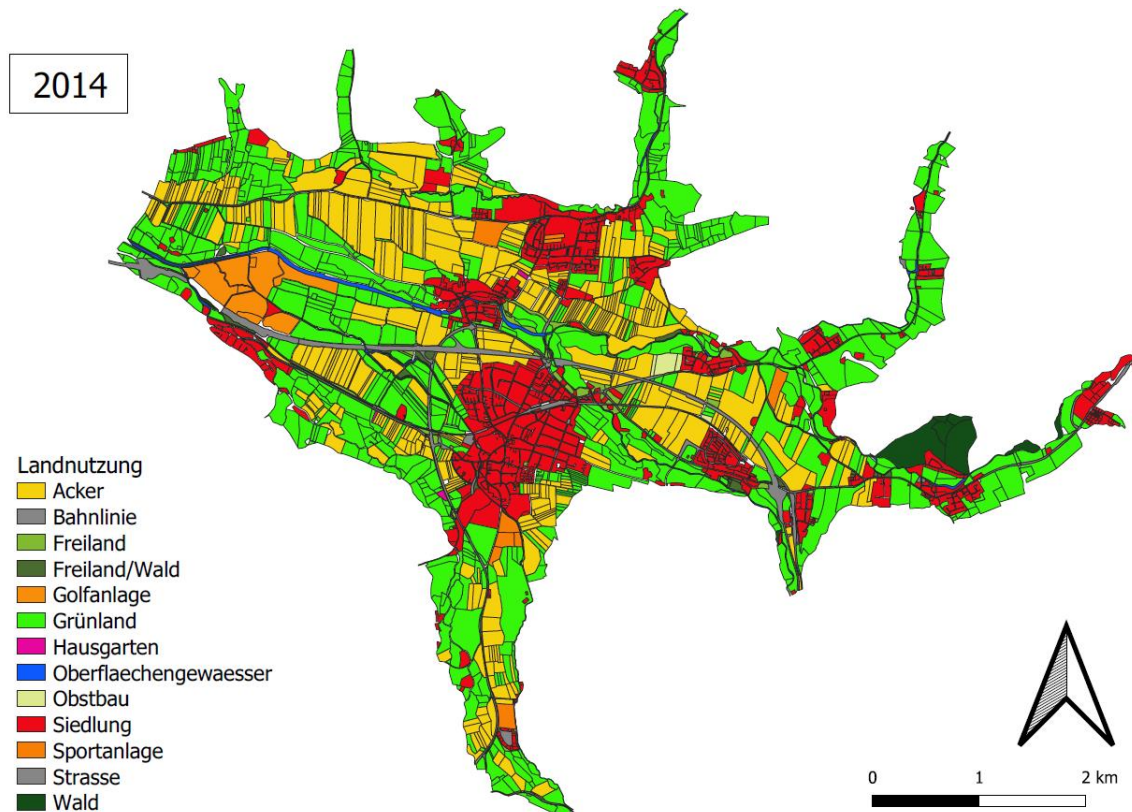


Abbildung 8 Landnutzung im Zartner Becken 1975, 2000, 2010(abgeändert nach LUBW (2022)) und 2014 (Selz 2022)

2.1.5 Grundwasserneubildung und -bilanz

„Die Grundwasserneubildung ist hauptsächlich von der Verteilung der Niederschläge und dem Versiegelungsgrad im Zartner Becken abhängig, da die Wasserkapazität der Böden relativ einförmig verteilt ist. In Siedlungsgebieten treten Grundwasserneubildungsraten im Mittel von 300 bis 400 mm und außerhalb von Siedlungen im Mittel von 500 bis 625 mm auf. An den ansteigenden Schwarzwaldhängen, insbesondere im Bruggatal aufgrund der Niederschlagszunahme und des ansteigenden Reliefs, werden diese Werte teilweise noch überstiegen. Generell nimmt die Niederschlagsverteilung von West nach Ost mit den ansteigenden Schwarzwaldhängen zu.“ (Schelhorn 2022)

Grundwasserrandzuflüsse kommen hauptsächlich aus den Seitentälern der Brugga, des Kappler Talbachs, des Zastlerbachs, des Wagensteigbachs und des Ibenbachs (siehe Tabelle 1). Dieser Anteil der Randzuflüsse an der gesamten Wasserbilanz ist jedoch, verglichen mit der Grundwasserneubildung und der Interaktion mit den Oberflächengewässern, relativ gering. Tabelle 2 zeigt die mittleren Bilanzgrößen des Grundwasserhaushaltes im Zartner Becken, basierend auf dem neusten Grundwassermodell von 2022 der © GIT HydroS Consult GmbH (GIT) (Schelhorn 2022) im Auftrag der badenovaNETZE, über einen Modellzeitraum von 33 Jahren.

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

Tabelle 1

Grundwasserrandzuflüsse aus den Seitentälern des Zartner Beckens (Schelhorn 2022)

Zufluss	[m³/d]	[l/s]
Kappeler Tal	216	2,5
Oberried Brugga	216	2,5
Zastlerbach	432	5,0
Dreisam/Rotbach	648	7,5
Wagensteigbach	1.728	20,0
Ibental	864	10,0
Brugga	432	5,0
Dietenbach	43	0,5
Geroldsbach	605	7,0
Zastlerbach/Osterbach	432	5,0
Zastlerbach Höhe Hannisenhof	432	5,0
Zastlerbach Giersberg	432	5,0
Dreisam/Rotbach Giersberg	432	5,0
Dreisam/Frauensteigfelsen	432	5,0
Rechtenbach/Oberbirken	216	2,5
Eschbach/Erlenbühl	432	5,0
Eschbach Ebnet	432	5,0

Über die etwa einen Kilometer breite Talverengung am westlichen Ende des Zartner Beckens und am östlichen Stadtrand Freiburgs entwässert der Aquifer sowohl ober- als auch unterirdisch (Schelhorn 2022).

„Große Gewässerabschnitte, die einer Grundwasserexfiltration in den Vorfluter unterliegen, befinden sich an der Dreisam, Brugga und Zastlerbach westlich des Wasserwerks Ebnet, am Eschbach unmittelbar vor dessen Mündung in die Dreisam, für den Wagensteigbach kurz oberhalb der Mündung des Ibenbachs und an der Brugga in etwa auf Höhe von Kirchzarten. Dies ist begründet durch die Verringerung des Gefälles der Geländeoberkante, geringere Durchlässigkeitswerte und die Verengung des Grundwasserkörpers.“ (Schelhorn 2022)

Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung hat aufgrund der geringeren Niederschläge der letzten fünf Jahre leicht abgenommen (Schelhorn 2022). Eine kürzere Schneeschmelze und verlängerte Vegetationsperiode, und damit eine Verringerung der Zeit mit der höchsten Grundwasserneubildung, als Folge des Klimawandels, könnten diese Entwicklung ebenfalls beeinflusst haben (IPCC 2022; Brasseur et al. 2017).

Gebietsbeschreibung: Das Zartner Becken

Tabelle 2

Mittlere Bilanzgrößen des Grundwasserhaushaltes im Zartner Becken, Zu- und Abströme in $l\ s^{-1}$ (Schelhorn 2022)

Bilanzgröße	Zustrom [l/s]	Abstrom [l/s]
Grundwasserneubildung	295	
Randzuströme	98	
Infiltration aus Oberflächengewässern	704	
Exfiltration in Oberflächengewässer		-306
Abstrom/ Exfiltration Ebnet		-512
Grundwasserentnahmen		-342

Abbildung 9 zeigt Einflussgrößen des Bodenwasserhaushaltes der hydrologischen Einzeljahre von 1986 bis 2020. Die mittlere Grundwasserneubildung beträgt $444\ mm\ Jahr^{-1}$. Die geringste Neubildung liegt im Jahr 2017 mit 198 mm und die höchste im Jahr 2001 mit 695 mm.

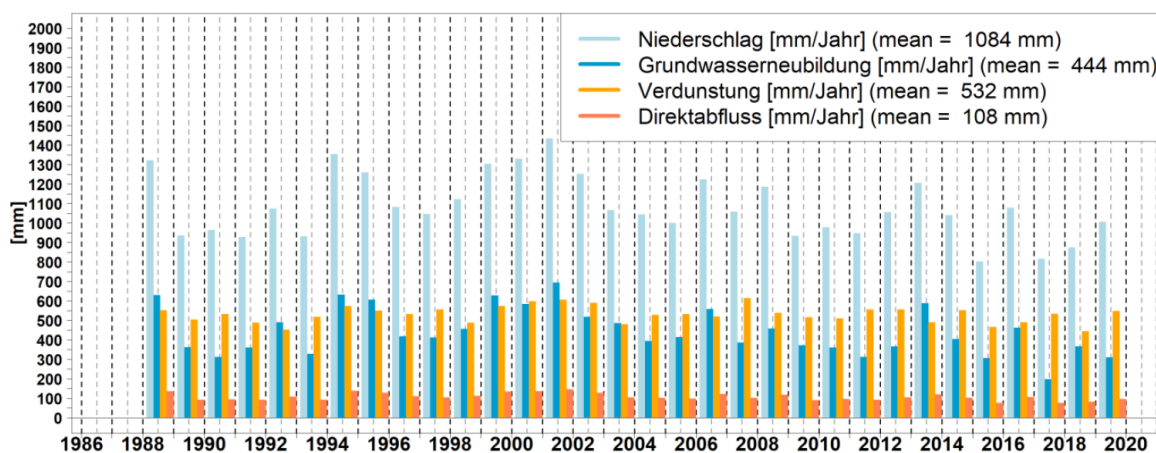


Abbildung 9 Variabilität des Bodenwasserhaushalts der hydrologischen Einzeljahre im Modellgebiet Zartner Becken für die Periode 1988 bis 2019 (Schelhorn 2022)

Grundsätzlich liegen die Grundwasserneubildungsraten im Zartner Becken weit über denen in vergleichbaren Gebieten in der Nähe des Oberrheingrabens (Schelhorn 2022). Als Folge von langanhaltenden Niedrigwasserperioden, die in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmen werden (IPCC 2022; Bresseur et al. 2017; IPCC 2012), stellen sich geringere Grundwasserspiegel ein. Diese können sich wiederum auf die Wasserversorgung auswirken (Hellwig 2019).

Auch im Zartner Becken sind bereits jetzt leicht negative Trends in der Entwicklung des Grundwasserspiegels zu erkennen, jedoch nicht so stark wie in anderen Regionen im Schwarzwald, beziehungsweise in Deutschland (Joeres et al. 2022a).

2.1.6 Oberflächengewässer

Der Hauptvorfluter des Zartner Beckens ist die Dreisam, die das gesamte Untersuchungsgebiet von Ost nach West durchströmt. Die größten Nebengewässer, welche alle der Dreisam zufließen, sind der Eschbach, Wagensteigbach und Ibenbach aus nord-östlicher Richtung und die Brugga und der Zastlerbach aus Süd-Osten. Daneben gibt es noch zahlreiche kleine Bäche und angelegte Gräben.

Bis zum Pegel Ebnet umfasst das oberflächliche Einzugsgebiet der Dreisam 258 Quadratkilometer (km²). Es wird durch die Täler der Nebenflüsse abgeschlossen. Das Zartner Becken nimmt nur etwa 10 % dieser Fläche ein. (Schelhorn 2022). Abbildung 10 veranschaulicht das Gewässernetz im Zartner Becken. Beschriftet sind die Dreisam und deren Hauptzuflüsse. Die Flusssichte von 1,66 km km⁻² ist hier vergleichsweise hoch (Frieg 1987).

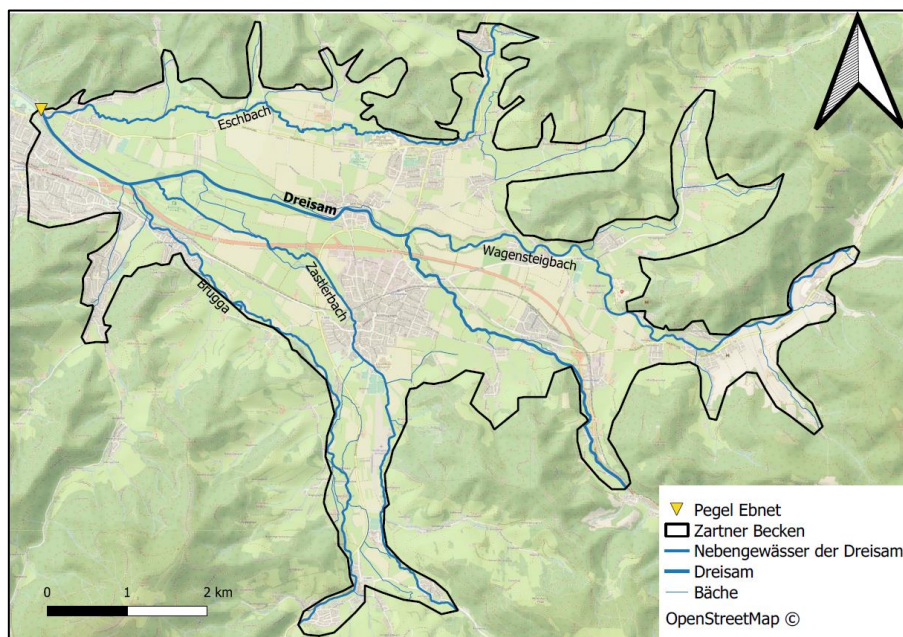


Abbildung 10 Gewässernetz mit Haupt- und Nebengewässern des Zartner Beckens (LUBW 2022)

2.1.7 Interaktion Oberflächengewässer und Grundwasser

Im Auftrag der badenovaNETZE hat GIT im April 2021 einen Modellbericht zum Grundwassereinfluss auf die Fließgewässer im Zartner Becken veröffentlicht, dessen Kernaussagen in diesem Kapitel kurz zusammengefasst werden. Hintergrund des Auftrags war es, herauszufinden, ob der Betrieb der Tiefbrunnen im Zartner Becken Einfluss auf Pegelstände der anliegenden Oberflächengewässer haben.

Ergebnis der Arbeit war unter anderem eine Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes, in der die Gewässerinteraktion in drei Kategorien eingeteilt wurden: *Grundwasserkontakt* (Abstand zwischen Grundwasser und Gewässersohle ist durchgehend kleiner als 1,5 m), *kein Grundwasserkontakt/schwebende Verhältnisse* (Abstand Grundwasser und Gewässersohle ist durchgehend größer als 1,5 m) und *wechselnde Verhältnisse* (abhängig vom zeitlichen Verlauf besteht bei hohen

Grundwasserverhältnissen Kontakt, bei niedrigen nicht). Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

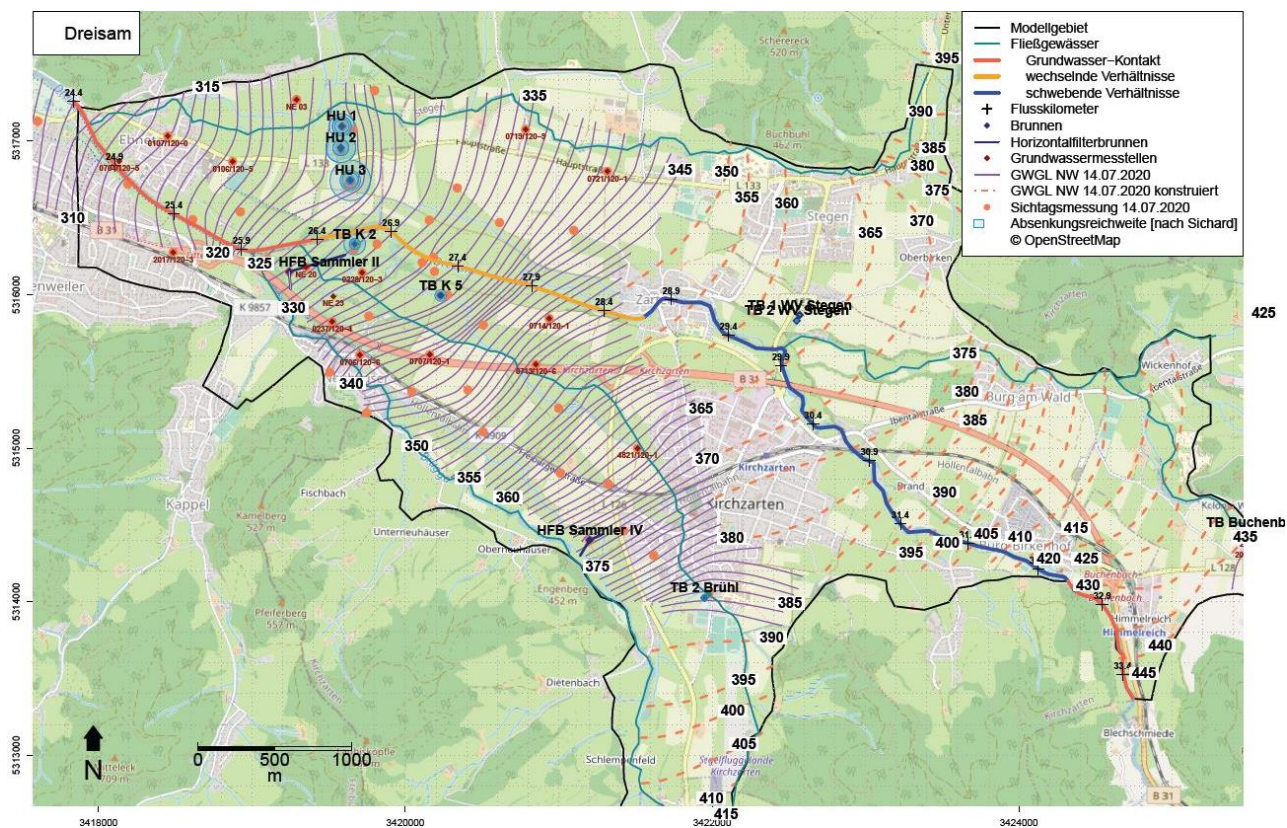


Abbildung 11 Übersichtskarte der Interaktionsverhältnisse zwischen Oberflächen- und Grundwasser, sowie Grundwassergleichen für niedrige Grundwasserverhältnisse im Zarter Becken (auf Grundlage der Stichtagsmessung vom 14.07.2020) bis zum Pegel Ebnet (Schelhorn und Schrempf 2021)

Dreisam

Eine direkte Beeinflussung des Interaktionsbereichs am Gebietsauslauf (Flusskilometer 24,3 bis 26,3) durch die Absenktichter der Tiefbrunnen besteht nicht. Lediglich der Kontaktpunkt der Grundwasser – Oberflächengewässer – Interaktion wird potenziell durch die Grundwasserentnahmen der Tiefbrunnen beeinflusst. Im Bereich der Flusskilometer 26,4 bis 28,7 findet nur bei hohen Grundwasserverhältnissen eine potenziell direkte Beeinflussung durch die K – Brunnen der badenovaNETZE statt. Bei niedrigen Grundwasserverhältnissen kommt es hier jedoch zu keinem Einfluss, da dann für den Gewässerabschnitt schwebende Verhältnisse vorherrschen. Ansonsten wird die Dreisam nicht beeinflusst, da sie schwebende Verhältnisse aufweist. Unabhängig von der Brunnenreichweite kann sich durch die Grundwasserbewirtschaftung der Kontaktpunkt zwischen Oberflächen- und Grundwasser flussabwärts verschieben.

Brugga

Die Grundwasserbewirtschaftung hat hier keinen Einfluss auf den Wasserstand des Gewässers, da in den Interaktionsbereichen keine Bewirtschaftung stattfindet, oder die Brugga schwebende Verhältnisse aufweist.

Eschbach

Der Eschbach hat nur im Mündungsbereich mit der Dreisam Kontakt zum Grundwasser. In diesem Bereich findet jedoch keine Bewirtschaftung statt. Aufgrund der ansonsten schwebenden Verhältnisse haben die nahe gelegenen HU – Brunnen der badenovaNETZE trotz ihrer hohen Entnahmen keinen direkten Einfluss auf das Gewässer. Allgemein kann sich durch die Grundwasserbewirtschaftung der Punkt, an dem der Eschbach den Kontakt zum Grundwasser verliert, flussabwärts verschieben.

Zastlerbach

Auch der Zastlerbach hat lediglich im Mündungsbereich Kontakt zum Grundwasser und weist ansonsten schwebende Verhältnisse auf. Im Interaktionsbereich findet keine Beeinflussung durch Brunnenbewirtschaftung statt.

Wagensteigbach

Der Wagensteigbach hat größtenteils schwebende Verhältnisse. In den Bereichen wechselnder Verhältnisse besteht keine Bewirtschaftung des Grundwassers und daher auch keine Beeinflussung des Gewässers. Ab Flusskilometer 4,0 bis 4,8 besteht ein sehr geringfügiger Einfluss durch den Tiefbrunnen (TB) Buchenbach. Hier kann es bei hohen Grundwasserverhältnissen zu einer verringerten Exfiltration in den Wagensteigbach kommen, und bei niedrigen Verhältnissen zu einer geringen Infiltrationsleistung. Allgemein ist die Beeinflussung hier als sehr gering anzusehen.

Ibenbach

Beim Ibenbach ist von wechselnden Bedingungen auszugehen, es findet jedoch im gesamten Bereich keine Grundwasserbewirtschaftung statt.

3 Problemstellung und Zielsetzung

Der Aquifer im Zartner Becken spielt für die Wasserversorgung der anliegenden Gemeinden und der Stadt Freiburg eine maßgebliche Rolle. Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist auch hier mit einer Veränderung des Wasserhaushaltes zu rechnen. Damit eine nachhaltige Wasserversorgung unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer als auch soziologischer Aspekte gewährleistet werden kann, ist es wichtig die Nutzungen der Wasserressourcen vor Ort zu kennen. Aktuell existiert jedoch kein umfassendes Bild der Wassernutzungssituation für diese Region. Daten und Informationen hierzu liegen verschiedenen Institutionen vor. Zeitraum, Auflösung, Qualität und Quantität sind institutionsübergreifend jedoch nicht unbedingt bekannt.

Für eine auch zukünftig nachhaltige Wasserbewirtschaftung ist es jedoch wichtig, die Wasserressourcen und deren Dynamiken, sowie deren Nutzungen genau zu kennen. Daher ergeben sich für diese Arbeit folgende Ziele:

1. Bestehende Wassernutzungsinformationen und -daten aus den verschiedenen Institutionen und Bereichen sammeln, vereinheitlichen und quantitativ sowie qualitativ auswerten
2. Sektoren und Akteure der Wassernutzungen im Zartner Becken identifizieren und deren Nutzungsverhalten analysieren, gegenüberstellen und bewerten
3. Wassernutzungen mit dem verfügbaren Grundwasserdargebot in Bezug setzen und auf deren Nachhaltigkeit bewerten. Aspekte der Bewertung sollen dabei sein:
 - 3.1. Ergebnis der Grundwasserbilanz
 - 3.2. Versorgungssicherheit mit Trinkwasser
 - 3.3. Generationenübergreifender Gerechtigkeitsaspekt einer nachhaltigen Ressourcennutzung
 - 3.4. Ökologische und ökonomische Aspekte
4. Den aktuellen und potenziellen Einfluss von Wassernutzungen auf anliegende Oberflächengewässer betrachten
5. Entwicklungen des Grundwasserstandes und -dargebots betrachten, analysieren und bewerten
6. Informationen über Art, Hintergrund und Eskalationsgrad von regionalen Wassernutzungskonkurrenzen sammeln und aktuelle sowie zukünftige Konkurrenzpotenziale für das Zartner Becken abschätzen

Diese Arbeit soll ein erstes umfassendes Lagebild der zeitlichen und räumlichen Wassernutzungssituation im Zartner Becken abbilden. Durch die Analyse der Wassernutzungen soll ein Handlungs- und Anpassungsbedarf eines nachhaltigen Wasserressourcenmanagements und einer fairen Bewirtschaftung des örtlichen Grundwasserkörpers im Zartner Becken geklärt werden. Der Fokus liegt dabei vor allem bei der Analyse von Trocken- und Dürreperioden, dann wenn Oberflächen- und Grundwasser besonders vulnerabel sind.

4 Methodik

Folgende Abbildung soll eine Übersicht der strukturellen Vorgehensweise zur Sammlung und Auswertung der in dieser Arbeit verwendeten Daten geben. Zusätzliche Informationen, Details und Arbeitsprozesse werden in den jeweiligen Unterkapiteln ausgeführt.

In der ersten Phase wurden die Datenzuständigkeiten recherchiert und folgend versucht maximal viele offizielle Informationen mittels einer Art Schneeballverfahren zu ermitteln. Dazu wurden beispielsweise die jeweiligen unteren Wasserbehörden oder öffentliche Trinkwasserversorger nach Erfahrungen und möglichen Quellen weiterer Daten befragt. Dies führte zu einem maßgeblichen Gewinn an zusätzlichen Informationen für diese Arbeit.

Nachdem die Datenquellen bekannt waren, wurden je nach Institution verschiedene Methoden zur Datensammlung angewendet. Eine Übersichtstabelle mit allen gesammelten Daten, deren Herkunft, Einheit, Auflösung, Zeitraum und kurzer Beschreibung befindet sich im Anhang (siehe Tabelle 4). Darauf folgte die Auswertung der verschiedenen Daten. In den jeweiligen Unterkapiteln wird im Detail auf die Methodenwahl und jeweilige Zielsetzung eingegangen wird.

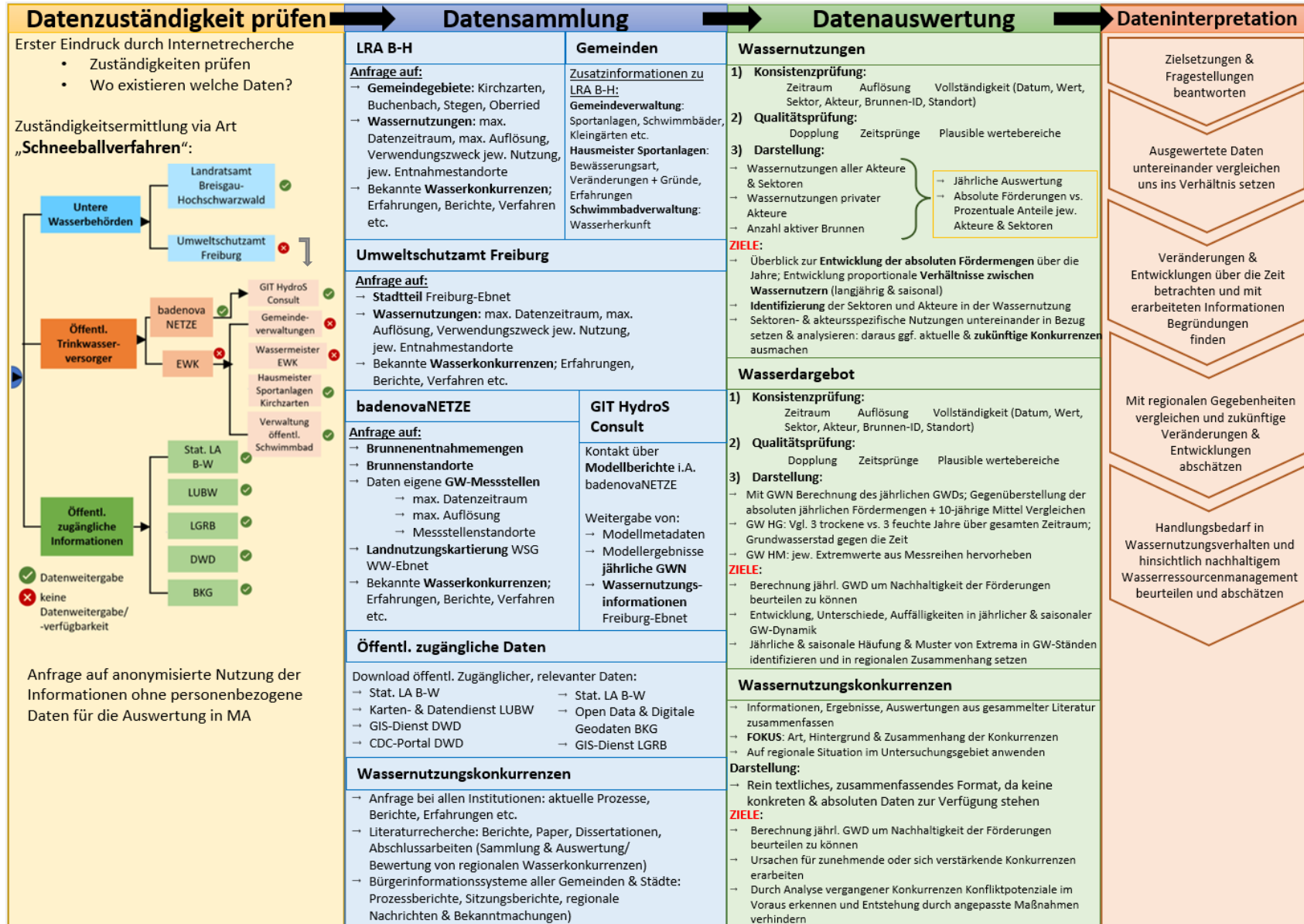


Abbildung 12 Strukturelle Vorgehensweise zur Sammlung und Auswertung der in dieser Arbeit verwendeten Daten

4.1 Datenzuständigkeit prüfen

Zu Beginn dieser Arbeit war lediglich bekannt, dass Daten zu Wassernutzungen bei verschiedenen Institutionen vorliegen. Dies betraf zunächst die unteren Wasserbehörden des Untersuchungsgebietes und die öffentlichen Trinkwasserversorger. Ziel war jedoch auch weitere Wassernutzungsinformationen zu erlangen, um ein quantitativ möglichst flächendeckendes Bild der Situation im Zartner Becken abbilden zu können. Um dies zu erreichen, wurde eine Art Schneeballverfahren angewendet. Grundlage dieser Methode war es, ausgehend der bereits bekannten Institutionen, mehr Daten und Metadaten bezüglich vergangenen, aktuellen und voraussichtlichen Wassernutzungen im Untersuchungsgebiet zu erhalten.

Ausgangskontakte waren dabei zunächst die unteren Wasserbehörden (Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald und Umweltschutzamt Freiburg), die öffentlichen Trinkwasserversorger (zunächst badenovaNETZE und EWK) und Plattformen offizieller Institutionen mit öffentlich zugänglichen Daten- und Kartenportalen (beispielsweise LUBW, DWD, statistisches Landesamt Baden-Württemberg etc.). Von dieser Ausgangslage wurden weitere Kontakte und Informationen wie in der ersten Spalte in Abbildung 12 dargestellt erlangt. Eine konkrete Darstellung und Übersicht dieser Informationen sind in den folgenden Kapiteln, sowie in der Übersichtstabelle im Anhang dargestellt.

4.2 Datensammlung

Die nächste Aufgabe bestand darin, genügend Daten zu Wassernutzungen in ausreichender Qualität bei den verschiedenen Institutionen zu sammeln. Vor allem Auflösung, Zeitraum, Standort der Wasserentnahme und Akteur, beziehungsweise Sektor, der jeweiligen Wassernutzungen waren dabei von Interesse.

Quantitative Daten, die in dieser Arbeit verwendet wurden, stammen hauptsächlich vom Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald, den badenovaNETZEN, und den GIT. Darauf folgen Daten aus den öffentlichen online-Portalen und der Literaturrecherche bezüglich Wassernutzungskonkurrenzen. Alle nach Daten angefragten Institutionen wurden auch nach Erfahrungen, bekannten Prozessen, Berichten oder aktuellen bekannten Wassernutzungskonkurrenzen im Untersuchungsgebiet befragt, jedoch fand hier kein Informationsgewinn statt. Zusätzlich wurden die jeweiligen Bürgerinformationssysteme der Rathäuser aller im Zartner Becken liegenden Gemeinden, sowie der Stadt Freiburg nach diesen Aspekten durchsucht. Auch hier gab es keine zusätzlichen Informationen.

In dieser Arbeit wurden ausschließlich Sekundärdaten verwendet und ausgewertet. Es fand keine eigene Datenaufnahme statt.

4.2.1 Wassernutzungen

4.2.1.1 Grundwasser

Die Unteren Wasserbehörden sind für das Erfassen von Grundwasserentnahmedaten zuständig. Hierbei werden lediglich Entnahmen von mehr als 4.000 m³ Jahr⁻¹ aufgenommen, da für diese das Wasserentnahmeentgelt nach § 103 Nr. 9b des Wassergesetzes für Baden-Württemberg – WG erhoben

wird. Unter dieses Kriterium fallen auch die Grundwasserentnahmen der öffentlichen Trinkwasserversorger. So auch die monatlichen Brunnenförderungen der EWK, der badenovaNETZE und der eigenbetriebenen Wasserversorgungen der Gemeinden Buchenbach, Stegen und Oberried. Für die Auswertung wurden die von den badenovaNETZEN direkt übermittelten Daten verwendet. Ansonsten die vom Landratsamt und die der GIT übermittelten, die ebenso weitere gewerbliche und private Wassernutzungen beinhalten.

Die Datenlage und mögliche -weitergabe zur Bearbeitung in dieser Arbeit wurden zunächst telefonisch angefragt. Von Seiten des Landratsamts wurden darauf Grundwasserfördermengen nach Akteuren und Sektor aus den Verwaltungsgebieten der Gemeinden Kirchzarten, Stegen, Oberried und Buchenbach übermittelt. Ebenso die Koordinaten der jeweiligen Entnahmestellen. Mit einer nahezu durchgängigen monatlichen Auflösung ist der Zeitraum 1990 bis 2021 abgedeckt. Für einige Brunnen liegen jedoch lediglich jährliche Wasserentnahmeinformationen vor.

Die vom Umweltamt der Stadt Freiburg zur Verfügung gestellten Daten konnten aus Qualitäts- und Auflösungsgründen leider nicht zur Auswertung in dieser Arbeit verwendet werden. Die Daten wurden in jährlicher Auflösung, ohne Entnahmeorte und lediglich für ganze Stadtteile zusammengefasst übermittelt, sodass die Wassernutzungen dem Untersuchungsgebiet nicht klar zugeordnet werden konnten. Nach mehrfacher Rückfrage nach den vollständigen Daten hieß es, die Daten seien zwar in der gewünschten Form vorhanden, das Bereitstellen würde jedoch einen „[...] unverhältnismäßigen Aufwand bedeuten“ (E-Mail vom Umweltamt Freiburg, 16.09.2022). Diese angefragten Daten konnten jedoch von GIT zur Verfügung gestellt werden. Für den hier zitierten Grundwassermodellbericht des Zartner Beckens (Schelhorn 2022) wurden in der Vergangenheit die Daten vom Umweltschutzamt der Stadt Freiburg für den Zeitraum 1990 bis 2019 erhalten. Nach Rücksprache genehmigte das Amt die Weitergabe der Daten für diese Arbeit.

Informationen zur Bevölkerungsentwicklung in den jeweiligen Gemeinden im Untersuchungsgebiet und zur Wassergewinnung in Baden-Württemberg seit 1975 stammen vom statistischen Landesamt Baden-Württemberg. Die Daten stehen im Internetauftritt des Amtes frei zur Verfügung (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2021).

4.2.1.2 Oberflächenwasser

Für die Prüfung der Oberflächengewässernutzung im Zartner Becken wurden ebenfalls zunächst die unteren Wasserbehörden zu offiziellen Daten angefragt. Dort hieß es, dass es keine Entnahmen aus Gewässern in dem Volumen gäbe, die einer offiziellen Dokumentation bedürften. Es fänden lediglich potenzielle Nutzungen des Gemeingebrauchs statt deren Entnahmemenge und -orte jedoch einem geringen Privatverbrauch unterliegen und deren Ausmaße daher nur schwer abschätzbar wären.

Darauffolgend wurde bei den jeweiligen Gemeinden telefonisch angefragt, ob Nutzungen, auch in kleinerem Ausmaß (zum Beispiel zur Bewässerung einer Sportanlage oder Kleingartenanlagen etc.),

bekannt seien. Auch hier wurde verneint. Jedoch wurden Kontakte, beispielsweise zum Hausmeister einer Sportanlage oder der öffentlichen Verwaltung eines Schwimmbads, verwiesen, durch die weitere qualitative Informationen gewonnen werden konnten: In den meisten Fällen wurde darauf verwiesen, dass zur Bewässerung der Plätze und Flächen in den Sommermonaten auf die jeweilige öffentliche Wasserversorgung zurückgegriffen werde, was auch die anliegenden Schwimmbäder tun. Dies hätte unter anderem den Hintergrund, dass zu den Zeiten, zu denen eine Bewässerung nötig sei, die anstehenden Gewässer entweder einen zu geringen oder keinen Abfluss mehr hätten. Hintergrund eines zu geringen Abflusses zur Bewässerung ist die Rechtsverordnung über die Einschränkung des Gemeingebrauchs (für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit: Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald (2022)). Die Entnahme aus sämtlichen Oberflächengewässern der in dieser Arbeit betroffenen Gemeinden wird untersagt, wenn ein Pegelstand von 42 cm am Pegel Ebnet erreicht oder unterschritten wird. Auch gebe es nach Blauhut et al. (2017) im Dreisamgebiet ein offizielles Verbot Oberflächengewässer zur Bewässerung zu nutzen. Daher finde die Bewässerung ausschließlich über Grundwasservorräte statt.

Von einem Kontakt kam die Information, dass eine Sportanlage früher mit Wasser aus dem anliegenden Bach bewässert worden wäre, wozu jedoch keine Mengen dokumentiert wurden. Wegen zu geringer Verfügbarkeit wurde auch hier schließlich auf die Bewässerung durch den örtlichen Wasserversorger umgestiegen. Zu Pumpkapazitäten, Zeiträumen oder Volumen der Bewässerung konnten keine Angaben gewonnen werden, da diese nicht dokumentiert würden.

Somit sind Wassernutzungen von Sportplatzbewässerungen oder Schwimmbadbefüllungen in den in Kapitel 4.4.1 aufgeführten Kategorien der öffentlichen Trinkwasserversorgung enthalten und können im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter spezifiziert werden.

Im Zartner Becken befinden sich einige Wasserkraftanlagen zur Stromgewinnung an beispielsweise der Brugga, dem Zastlerbach und der Dreisam. Informationen zur Lage und dem Zweck der Anlagen konnten über die LUBW (2022) gewonnen werden. Doch nach Rücksprache mit der Landesanstalt liegen keine Informationen zu Nutzungsvolumen vor, sondern lediglich der Abstand, nach dem das abgeführte Wasser wieder dem Gewässer zugeführt wird. Daher konnte leider keine weitere Auswertung oder Analyse dieser Wassernutzungen durchgeführt werden.

Da für die Nutzung von Oberflächengewässern im Zartner Becken keine oder nur sehr eingeschränkte Informationen vorliegen, wird in dieser Arbeit nicht weiter auf diese eingegangen.

4.2.2 Grundwasserstand

Informationen zum Grundwasserstand stammen ausschließlich von den Messstellen der badenovaNETZE. Dabei liegen die Daten in zwei Formaten vor: Stündlich aufgelöste Daten zum Grundwasserstand in Metern ab der Rohrkante von Januar 2008 bis Juni 2022 für zehn Messstellen, und Handmessungen für 17 Messstellen in m ü. NN, die zu Beginn der Zeitreihe zweiwöchig, dann

monatlich und schließlich nur noch zweimonatig, von 1987 bis 2021 erhoben wurden. Die hochaufgelösten Daten wurden mit den Höhen der jeweiligen Rohrkanten ebenfalls zu m ü. NN umgerechnet.

4.2.3 Wetter- und Klima

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 dargestellt, befinden sich zwei Klimastationen im Untersuchungsgebiet des Zartner Beckens. Niederschlagsdaten zur Station Buchenbach (ID 757) stammen aus dem öffentlich zugänglichen CDC-Portal des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2022a). Ebenso wurden teilweise Informationen aus dem Geoportal des DWD (DWD 2022b) verwendet, die jeweils als solche gekennzeichnet sind. Die Niederschlagsdaten liegen vom ersten Oktober 1990 bis 26. Juli 2022 in täglicher Auflösung vor.

Die Daten der Klimastation auf dem Gelände des Wasserwerks in Ebnet wurden von den badenovaNETZEN zur Verfügung gestellt. Es liegen Daten zum täglichen Niederschlag, Tagesmittel-, maximaler-, und minimaler Lufttemperatur, sowie zur mittleren täglichen Bodentemperatur vor. Die Datenreihe beginnt am 01. April 2002 und endet am 31. März 2022.

4.2.4 GIS-Daten

Zur Analyse auf räumlicher Ebene wurden geobasierte Daten aus mehreren Quellen zusammengetragen. Als geografische Hintergrundkarte wurde OpenStreetMap® gewählt. Zur Darstellung des Reliefs stellt die LUBW ein digitales Geländemodell (DGM) im Raster mit einer Auflösung von 30 Metern frei zur Verfügung.

Ebenso von der LUBW stammen räumliche Daten zum Fließgewässernetz, Einzugsgebieten und Teileinzugsgebieten, Wasserkraftanlagen und zur Landnutzung von 1975, 2000 und 2010 (LUBW 2022). Daten zu Verwaltungsgrenzen im Untersuchungsgebiet stehen im Internetauftritt des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie frei zur Verfügung (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2020).

Kartierungsdaten zu den Standorten der Tiefbrunnen, Grundwassermessstellen und der auf dem Gelände des Wasserwerks liegenden Klimastation der badenovaNETZE wurden von diesen freigegeben. Auch von den badenovaNETZEN zur Verfügung gestellt wurde der Grundwassergleichenplan von 2020 für das Zartner Becken. Erstellt wurde dieser von Schelhorn und Schrempp der GIT im Auftrag der badenovaNETZE (Schelhorn und Schrempp 2021). Ebenso stammen Informationen zu den Außengrenzen des Wasserschutzgebietes (WSG) und zur Landnutzung im Jahr 2014 im Zartner Becken von den badenovaNETZEN.

Der Standort der Klimastation in Buchenbach war Bestandteil des Datensatzes der Station des CDC-Portals des DWD (DWD 2022a). Standorte der Grundwasserentnahmen in den Verwaltungsgebieten der Gemeinden Kirchzarten, Stegen, Oberried und Buchenbach wurden mit den Daten zu den Quantitäten vom Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald übermittelt.

4.2.5 Wassernutzungskonkurrenzen

Informationen zu vergangenen, aktuellen und potenziellen Konkurrenzen im Zusammenhang mit Wasserverfügbarkeit und -nutzung in Deutschland, Baden-Württemberg und dem Zartner Becken stammen ausschließlich aus Literaturrecherchen. Die jeweiligen Quellen sind unter den Kapiteln 5 und 6 aufgeführt.

4.3 Datenqualität

In dieser Arbeit wurden ausschließlich Sekundärdaten verwendet. Größenordnungen der jeweiligen Fördermengen, Grundwasserständen und Abflusswerten der verschiedenen Quellen wurden auf ihre Sinnhaftigkeit, und Zeitpunkte der Datenaufnahme auf ihre Konsistenz untersucht. Lücken in den Datensätzen wurden nicht mit äquivalenten Mess- oder Förderdaten ergänzt. Hierbei handelt es sich nach Rücksprache mit der jeweiligen Institution entweder um Fördermengen geringer als $4.000 \text{ m}^3 \text{ Jahr}^{-1}$, eine nicht sachgerechte Informationsweitergabe der Brunnenbetreiber, oder es fand keine Nutzung statt.

4.4 Datenauswertung

4.4.1 Identifizierung der Wassernutzungsakteure

Anhand der von den verschiedenen Institutionen übermittelten Daten wurden Akteursgruppen der Wassernutzung im Zartner Becken ermittelt. Unterschieden wurde dabei in folgende zehn Hauptakteure:

- Öffentliches Trinkwasser bnNETZE
- Öffentliches Trinkwasser Kirchzarten
- Öffentliches Trinkwasser Stegen
- Öffentliches Trinkwasser Buchenbach
- Privates Trinkwasser
- Schwimmbad
- Grundwasserwärmepumpen
- Brauchwasser
- Trink- und Brauchwasser
- Bewässerung

Es wurde sich in dieser Arbeit dazu entschieden, auch Wassernutzungen mit direkter Rückführung (wie Grundwasserwärmepumpen) zur Vollständigkeit mit in die Auswertung aufzunehmen.

4.4.2 Wassernutzungen

Die Auswertung der Wassernutzungsdaten fand in jährlicher als auch in monatlicher Auflösung statt. Da Wassernutzungsinformationen nicht für alle Brunnen in monatlicher Auflösung vorliegen, wurde in den Ergebnissen dieser Arbeit die Darstellung der jährlichen Grundwassernutzungen gewählt. Der Vollständigkeit halber sind die monatlichen Auswertungen dem Anhang hinzugefügt.

Zur Herausarbeitung von langjährigen und saisonalen Mustern und Entwicklungen in der absoluten und anteiligen Wassernutzung im Zartner Becken, wurden die Fördermengen in Form von Balkendiagrammen ausgewertet. Die jährlichen (und monatlichen, siehe Anhang) absoluten Grundwasserförderungen wurden den prozentualen Anteilen der jeweiligen Nutzungskategorien gegenübergestellt.

Verwendet wurden dazu die von Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald bereitgestellten Informationen zu Grundwasserfördermengen, die der Tiefbrunnen der badenovaNETZE und die über GIT bereitgestellten Daten des Umweltschutzamtes der Stadt Freiburg im Breisgau. Bei der Auswertung wurde der Zeitraum von Januar 1990 bis Dezember 2021 gewählt. Die Daten des Landratsamtes wurden für die jeweiligen Gemeinden übermittelt und wurden noch auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten.

Hierbei und bei der gesamten weiteren Auswertung wurden ausschließlich die offiziellen Daten berücksichtigt. Eine nicht sachgerechte, nicht legale oder nicht ordnungsgemäß gemeldete Nutzung von Grund- oder Oberflächenwasser über die offiziellen Daten hinaus ist durchaus möglich. Diese jedoch präzise auf ihren Zeitpunkt und Qualität zu ermitteln ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich und nicht zielführend gewesen.

Bezüglich der in den Grafiken benutzten Farben fiel die Auswahl auf eine Farbpalette, die auch für Farbenblinde gut zu unterscheiden ist. Stoelzle und Stein (2021) verweisen in ihrer Arbeit darauf, dass unangemessene Farbschemen, wie zum Beispiel oft genutzte Regenbogenfarben, zu Missinterpretationen führen können. Und das nicht nur bei Farbenblinden. In dieser Arbeit fiel auf Grundlage von Stoelzle und Stein (2021) und Schork (2022) die Farbwahl auf die Palette „Paired“ des R – Paketes „RColorBrewer“. Nach Angaben von Schork (2022) ist diese Farbpalette auch für farbenblinde Menschen klar differenzierbar.

Allgemein wurde sich für diese Art der Darstellung entschieden, da es mit ihr möglich ist, direkt und zugänglich Veränderungen der absoluten Fördermengen und der Anteile der verschiedenen Grundwassernutzer erkennen zu können.

4.4.3 Grundwasserdargebot

Um das Grundwasserdargebot (GWD) in jährlicher Auflösung darstellen zu können, wurden Daten aus dem Modellbericht für das Zartner Becken (Schelhorn 2022) verwendet. Zusätzlich zu den Werten der modellierten mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWN) im Zartner Becken, wurden zur Berechnung Größen aus der Grundwasserbilanz des Modellberichts eingesetzt: der mittlere Randzustrom aus den Seitentälern des Zartner Beckens (R), die mittlere Infiltration aus Oberflächengewässern (I) und die mittlere Exfiltration in die Oberflächengewässer (E). Tabelle 2 in Kapitel 2.1.5 zeigt die jeweiligen verwendeten Werte. Aus folgender Formel ergibt sich das hier verwendete Grundwasserdargebot:

$$\sum_{i=1}^n (GWN_i + R + I - E) \quad (1)$$

Der Grundwasserabstrom wird hier nicht in die Bilanz des Grundwasserdargebots hineingenommen. Die Exfiltration aus dem Grund- in Oberflächenwasser jedoch schon, da diese, vor allem, während Niedrigwasserperioden, wichtig für eine intakte Ökologie ist und im Idealfall nicht durch die Nutzung des Aquifers zu stark beeinflusst werden sollte.

Um die absoluten jährlichen Grundwasserfördermengen besser mit dem in dieser Arbeit berechneten mittleren jährlichen Grundwasserdargebot ins Verhältnis setzen zu können, wurde für beide Größen ein zehnjähriges gleitendes Mittel (Y_k) nach folgender Formel berechnet:

$$Y_k = \sum_{i=k-1}^{k+1} Y_i \quad (2)$$

Es wurde sich für diese Methode entschieden, da so konkrete Werte des gleitenden Mittels des Dargebots, mit dem der Förderungen über die Zeit verglichen werden können, sodass eine Veränderung oder Entwicklung besser beurteilt werden kann.

4.4.4 Grundwasserstand

Die Datenreihe der Handmessungen wurde dazu verwendet für jede Messstelle die minimalen und maximalen Grundwasserstände zu lokalisieren, um gegebenenfalls jährliche und saisonale Anhäufungen und Muster der jeweiligen Extrema ausfindig zu machen. Auch wenn die Auflösung der Handmessungen geringer und über den gesamten Zeitraum weniger konsistent ist, dokumentiert sie den längsten Datenzeitraum für die meisten Messstandorte und eignet sich daher gut für diese Art der Auswertung. Es wurden zunächst die über die Zeit unterschiedlich aufgelösten Handmessungen (zweiwöchig, monatlich und zweimonatlich) gegenüber dem Erfassungsdatum dargestellt. Folgend die Extremwerte des jeweiligen Messstandortes ermittelt und farblich hervorgehoben: Blau sind dabei die maximalen Grundwasserstände der Messreihen und in Rot die minimalen.

Die Unterschiede im Grundwasserstand zwischen den einzelnen Messstationen sind durch deren jeweilige topografische Lage, sowie der örtlichen Geologie bedingt (siehe Kapitel 2.1.3 sowie Abbildung 13 und Abbildung 11).

Die hochaufgelösten Daten wurden dazu verwendet den jährlichen Grundwasserstand von besonders trockenen oder Dürre Jahren mit dem von feuchten, beziehungsweise normalen Jahren zu vergleichen. Verwendet wurde dazu der Zeitraum des hydrologischen Jahres, vom ersten November bis Ende Oktober. Die Wahl fiel auf die Darstellung im hydrologischen Jahr, da so der Auffüllprozess des Grundwasserkörpers zusammenhängend betrachtet und somit besser verglichen werden kann. Hintergrund dieser Jahresaufteilung ist generell, dass die Wasserreserven in Deutschland Ende Oktober gewöhnlich am geringsten sind und die darauf folgenden Winterniederschläge bereits in die

hydrologische Jahresrechnung mitaufgenommen werden können. Die hochaufgelösten Grundwasserstandsinformationen wurden, mit farblicher Unterscheidung zwischen den Messstellen, den jeweiligen Messzeitpunkten gegenübergestellt.

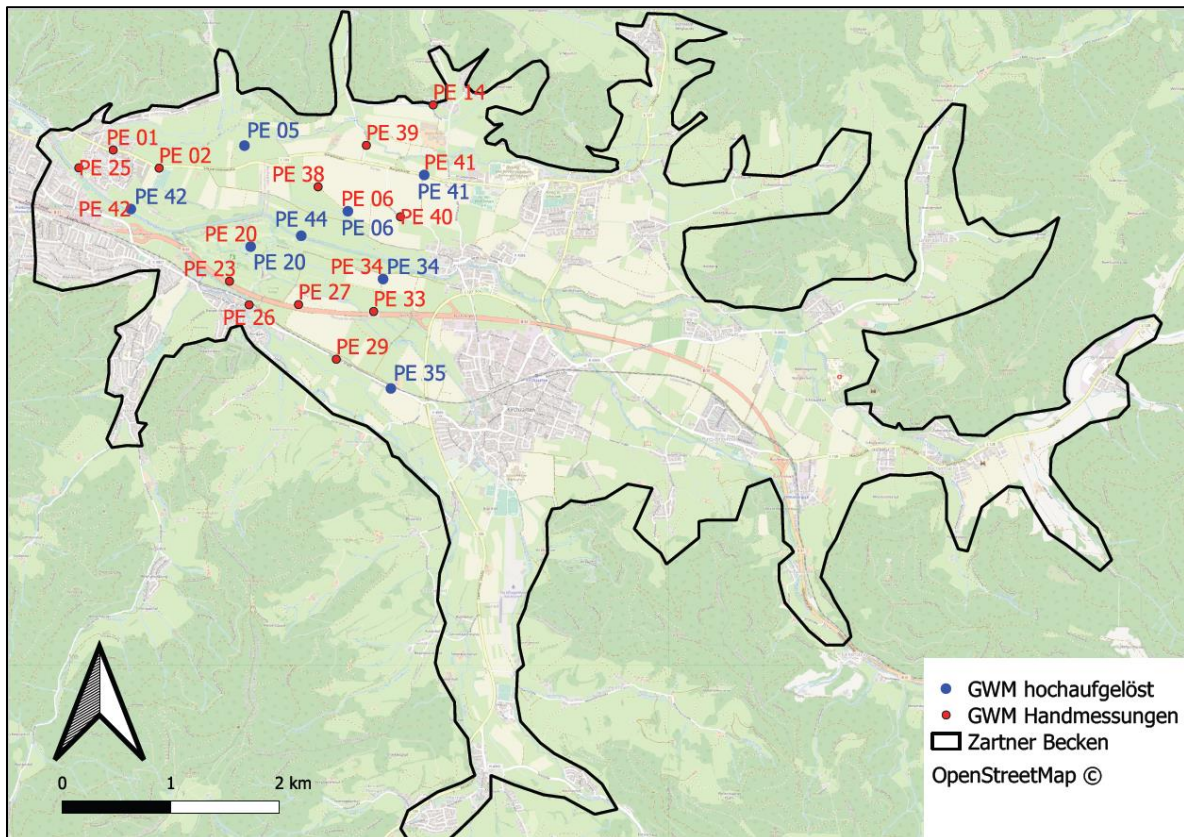


Abbildung 13 Standorte der Grundwassermessstellen (GWM) und der Klimastation in Ebnet im Zartner Becken. Blau sind die Messstellen für die hochaufgelöste Daten vorliegen, in Rot die, für die es langzeit-Handmessungen gibt (bnNETZE 2022)

4.4.5 Wassernutzungskonkurrenzen

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Wassernutzungskonkurrenzen in Baden-Württemberg wurden die Ergebnisse der verschiedenen Quellen zusammengefasst und verglichen. Der Fokus bei diesem Vergleich lag vor allem auf der Art, dem Hintergrund und dem Eskalationsgrad der jeweiligen Konkurrenzen. Die Ergebnisse wurden darauf auf die regionale Situation angewandt. Ziel dieser Betrachtung ist es, Gründe für zunehmende, sich möglicherweise verschärfende, oder eskalierende Konkurrenzen herauszufinden, um diese bei einer sich zukünftig potenziell verändernden Wasserressourcensituation vor Augen zu haben. Im Idealfall werden Konfliktpotentiale somit bereits im Vorfeld erkannt und deren Entstehung durch angepasste Maßnahmen verhindert.

5 Ergebnisse

5.1 Wassernutzungen

Abbildung 14 zeigt die Standorte aller in dieser Arbeit ausgewerteten Förderbrunnen nach Nutzungskategorie und Gemeinde, sowie die Lage der beiden Klimastationen und des Pegel Ebnet. Die höchste Brunnendichte ist am westlichen Ende des Zartner Beckens, kurz vor der Talverengung am Pegel Ebnet. Hauptsächlich befinden sich hier die Brunnen der öffentlichen Trinkwasserversorgungen der badenovaNETZE. Die Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Kirchzarten liegen im südlichen Beckenbereich, die zwei von Stegen im nördlichen, und die drei von Buchenbach im östlichen.

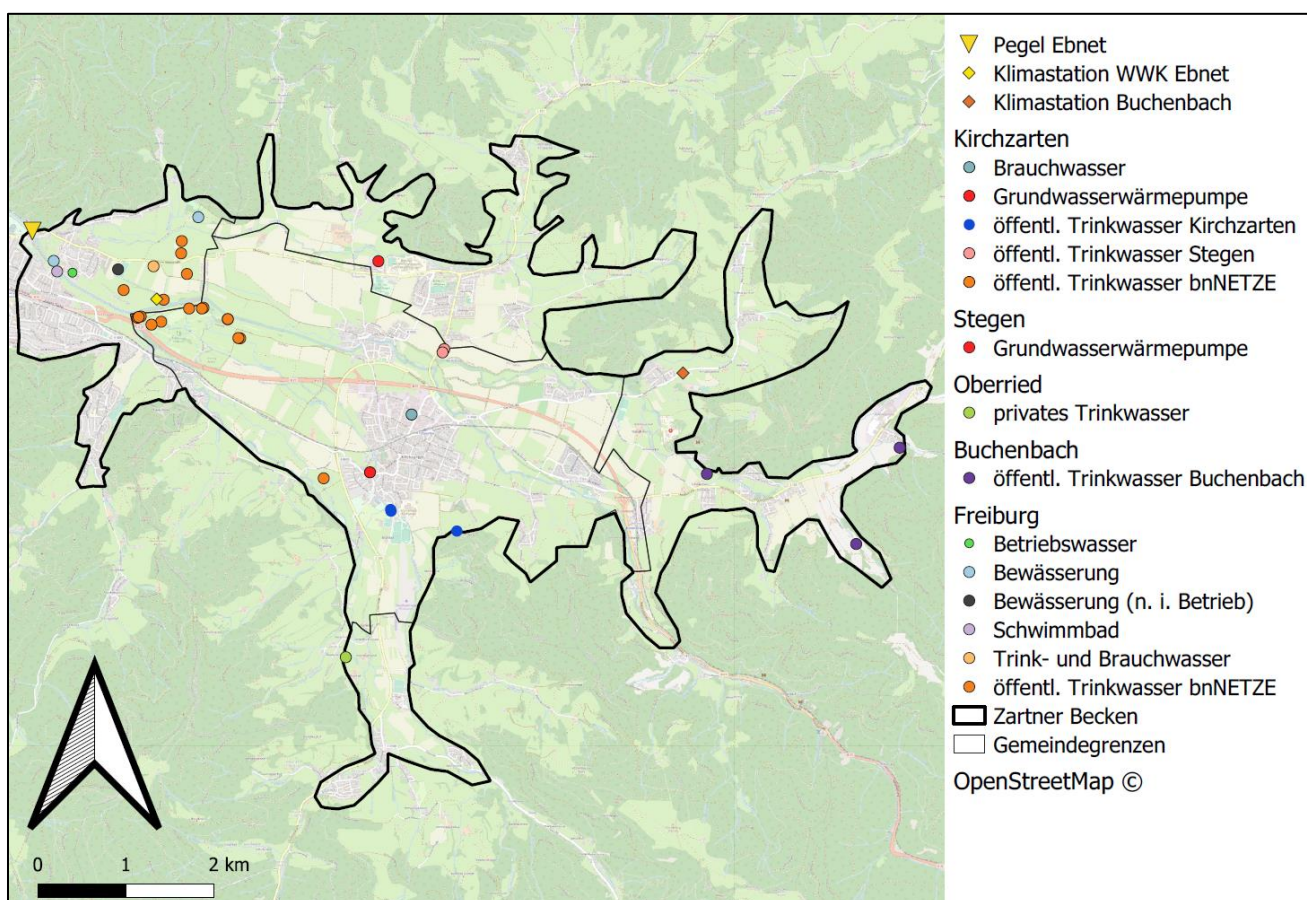


Abbildung 14 Standorte der Förderbrunnen, Klimastationen, Pegel und Wasserkraftanlagen im Zartner Becken nach Gemeinde (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)

Abbildung 15 stellt die absoluten jährlichen Fördermengen im Zartner Becken den prozentualen Anteilen der jeweiligen Akteure und Sektoren gegenüber. Die mittlere absolute Fördermenge hat von der ersten zur zweiten Periode der hier dargestellten Zeitreihe von etwa 15,3 Mio. m³ Jahr⁻¹ auf 13,4 Mio. m³ Jahr⁻¹ abgenommen. Die mittlere absolute Fördermenge über den gesamten Zeitraum beträgt 13,02 Mio. m³ Jahr⁻¹. Die maximale Förderung fand im Jahr 1993 mit 15,6 Mio. m³, die geringste im Jahr 2020 mit 10,2 Mio. m³ statt. Ab dem Jahr 2013 wird eine Fördermenge von 12 Mio. m³ Jahr⁻¹ nicht mehr überschritten. 1990 bis 1999 wurden jedoch fast jährlich noch 14 Mio. m³ Jahr⁻¹ oder darüber gefördert. Diese Menge wurde zuletzt 2008 erreicht.

Ergebnisse

Dominierende Akteure der Grundwasserförderung im Zartner Becken sind die öffentlichen Trinkwasserversorger. Den mit Abstand größten Teil über den gesamten Beobachtungszeitraum nehmen hierbei die Förderungen der badenovaNETZE mit über 398 Mio. m³ ein, in abnehmender Menge gefolgt von den öffentlichen Trinkwasserversorgungen der Gemeinden Buchenbach (ca. 7,1 Mio. m³), Stegen (ca. 6,8 Mio. m³) und Kirchzarten (ca. 3,6 Mio. m³). Die Gemeinde Kirchzarten bezieht jedoch seit einigen Jahren zusätzlich Trinkwasser aus dem Sammler 4 der badenovaNETZE. In Kapitel 6.2.1 wird detaillierter auf diesen Umstand eingegangen. Ebenso ergibt sich die Wasserversorgung der Gemeinde, nach Angaben des regionalen Wasserversorgers EWK, zu 50 % aus Grundwasserförderung von Tiefbrunnen, die im Zartner Becken als auch im angrenzenden Zastlertal liegen, und zu 50 % aus Quellwasser, welches ebenfalls außerhalb des Zartner Beckens gewonnen wird.

Ab 2008 nehmen die Anteile der öffentlichen Trinkwasserversorgung der Gemeinde Buchenbach sukzessiv zu, bleiben jedoch immer deutlich geringer als die der badenovaNETZE. Die höchsten Förderungen der Gemeinde finden in den Jahren 2009 (388 760 m³) und 2017 (332 930 m³) statt. Die minimale jährliche Grundwasserförderung der Gemeinde wird im Jahr 1995 mit 127 070 m³ erreicht.

Die Fördermengen der Gemeinde Stegen nehmen etwa ab dem Jahr 2003 geringfügig zu. 2014 findet hier die maximale Förderung mit 293 814 m³ im gesamten Betrachtungszeitraum statt. Das Minimum wird im Jahr 1991 mit 154 740 m³ gefördert.

Die Grundwasserförderung der Gemeinde Kirchzarten nimmt von allen öffentlichen Trinkwasserversorgungen den geringsten Anteil ein. Die jährlichen Förderungen steigen hier zwischen den Jahren 2000 bis 2006 geringfügig an, fallen darauf jedoch unter das Vorniveau. Im Jahr 2003 findet dabei die maximale Grundwasserförderung mit 233 934 m³ statt, im Jahr 2021 die geringste mit lediglich 45 310 m³. Seit einigen Jahren unterstützen jedoch die badenovaNETZE die Wasserversorgung von Kirchzarten mit Wasser aus ihrem Sammler 4. Dieser liegt etwa einen Kilometer westlich der beiden Tiefbrunnen Kirchzartens. Daher fällt ein gewisser Teil der Wassernutzungen von Kirchzarten in der Darstellung dieser Arbeit unter die Förderungen der badenovaNETZE.

Ergebnisse

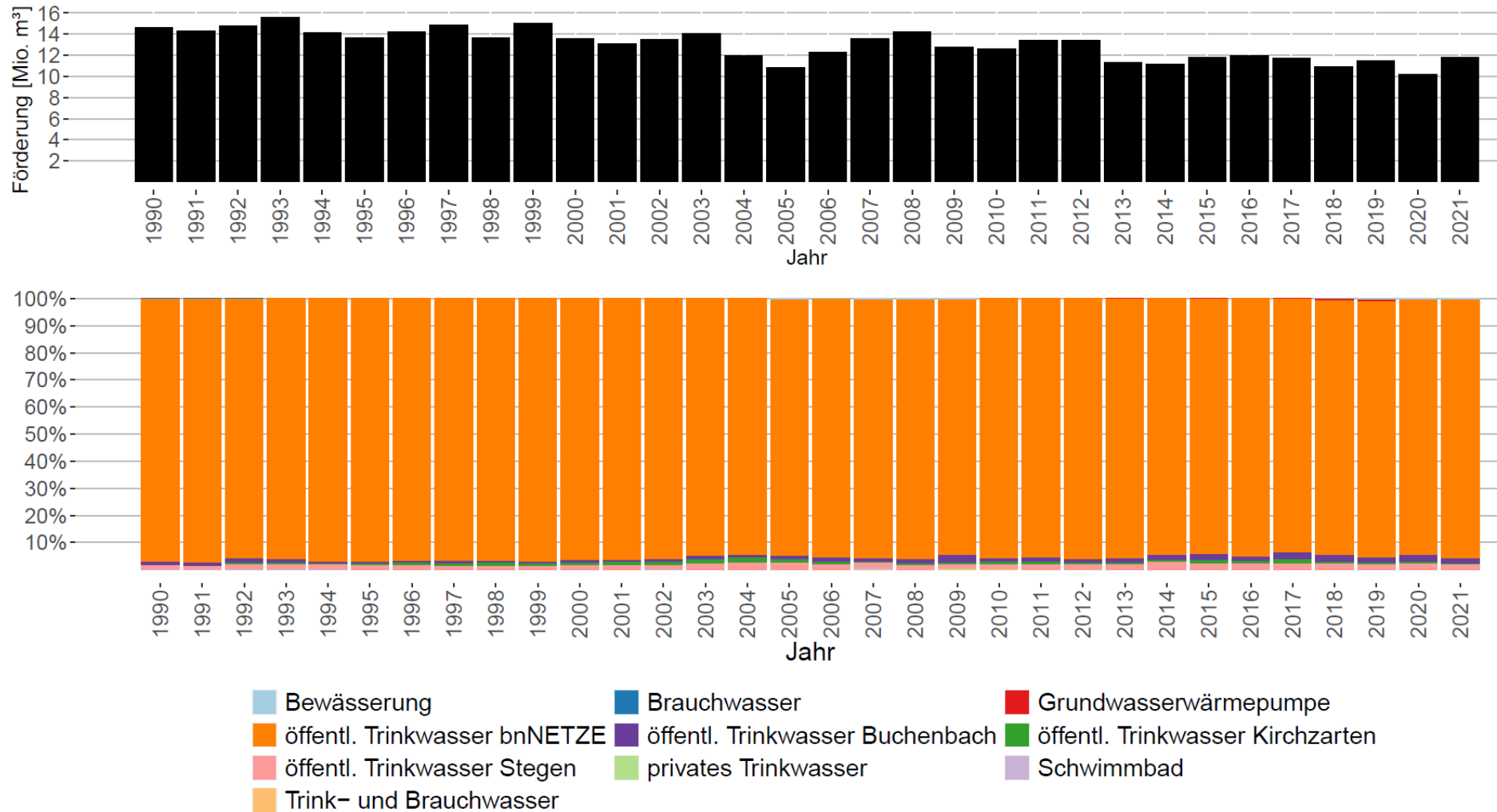


Abbildung 15 Absolute jährliche Wassernutzungen im Zartner Becken in Mio. m³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)

Ergebnisse

Da die privaten, beziehungsweise nicht öffentlichen, Grundwasserförderungen in Abbildung 15 aufgrund ihres vergleichsweise geringen Anteils an der Gesamtfördermenge nicht zur Geltung kommen, zeigt Abbildung 16 die gleichen Darstellungen wie zuvor ohne die öffentlichen Trinkwasserversorgungen. Die Fördermengen liegen hier lediglich im zehn- bis hunderttausend m³ - Bereich.

Ein deutliches Maximum dieser privaten Fördermengen liegt im Jahr 2007 mit etwa 163 700 m³. In den Jahren 2003 und 2004 fanden keine nichtöffentlichen Förderungen statt und die geringste Förderung liegt mit 26 800 m³ im Jahr 1993. Über die gesamte betrachtete Zeitreihe sind drei Perioden mit vermehrter Nutzung zu erkennen: 1990 bis 1994, 2005 bis 2009 und 2018 bis 2021. Dabei weist die zweite dieser drei Perioden die höchsten Fördermengen auf.

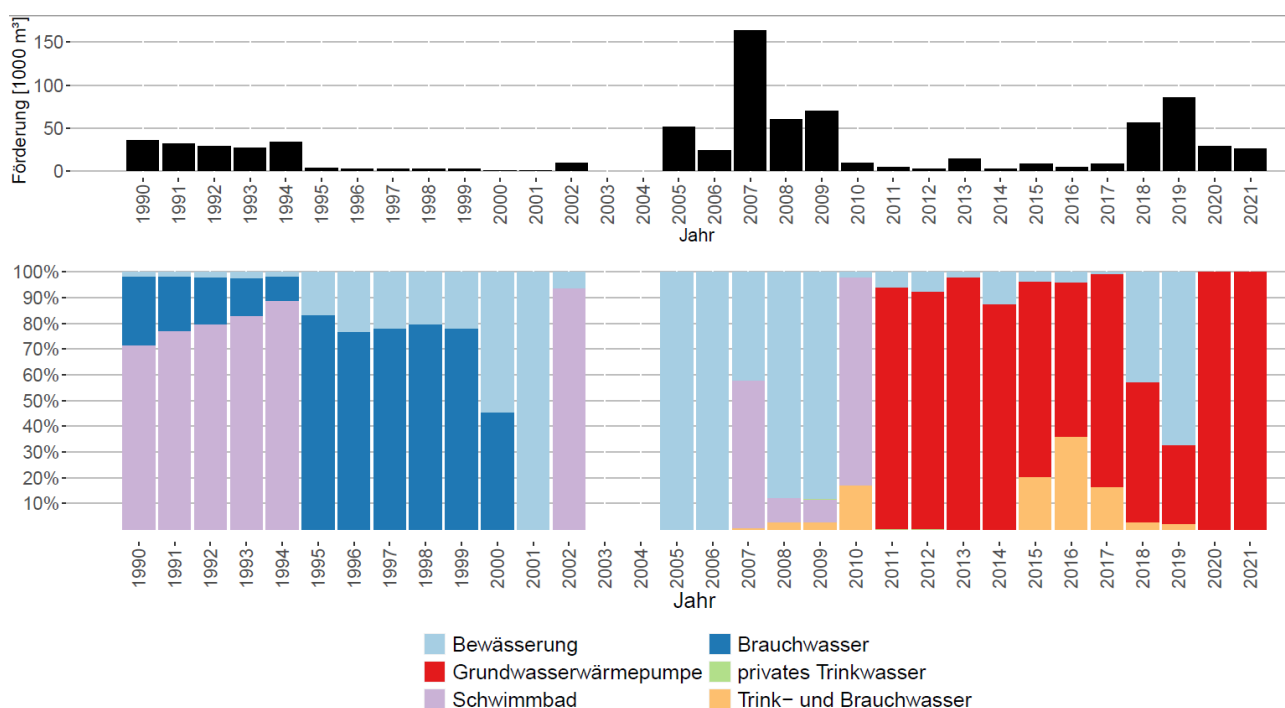


Abbildung 16 Absolute jährliche nicht öffentliche Wassernutzungen im Zartner Becken in 1000 m³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)

Über den gesamten Beobachtungszeitraum ist die Bewässerung unter den nicht öffentlichen Wassernutzungen mit 350 093 m³ der größte Nutzer. Darauf folgen das Schwimmbad (246 926 m³) und die Grundwasserwärmepumpen (GWP) (150 039 m³). Die private Trinkwassernutzung nimmt von allen Wassernutzungen im Zartner Becken mit insgesamt 533 m³ den kleinsten Teil ein. Zu Beginn der betrachteten Zeitreihe nimmt die Nutzung des Schwimmbads (eine von insgesamt zwei Brunnen für ein auf der Gemarkung Freiburg liegendes Schwimmbad) den größten Anteil an den Nutzungen ein. Darauf folgend nimmt ohne diese Nutzung auch die absolute Fördermenge ab. In den Jahren 2002 und 2007 bis 2010 wird abermals Grundwasser für das Schwimmbad aus diesem Brunnen gefördert, danach ist dieser Entnahmeverbrauch nicht mehr aktiv. Die Brauchwassernutzung einer Privatperson findet

Ergebnisse

lediglich von 1990 bis 2000 statt. Nach Rückfragen mit dem Amt konnte diese Nutzung nicht weiter spezifiziert werden.

Bei der Bewässerung handelt es sich um die einer Gärtnerei im Zartner Becken. Ausgenommen der Jahre 2003 und 2004 findet hier von 1990 bis 2019 eine jährliche Grundwasserförderung statt. Diese Daten stammen ursprünglich vom Umweltschutzamt der Stadt Freiburg und wurden von GIT für diese Arbeit zur Verfügung gestellt und liegen nur bis zum Jahr 2019 vor. Es ist davon auszugehen, dass in den folgenden Jahren 2020 und 2021 diese Nutzung ebenfalls stattfand.

Ab 2011 befindet sich auf der Gemarkung Kirchzarten eine aktive GWP, ab 2018 eine weitere auf der Gemarkung Stegen. Diese nehmen seither den größten jährlichen Anteil der privaten Grundwassernutzung ein. Die Kategorie „Trink- und Brauchwasser“ konnte nach Rückfragen ebenfalls nicht weiter spezifiziert werden. Diese Nutzung findet in den Zeiträumen 2007 bis 2010 und 2015 bis 2019 statt, wobei sie in der zweiten Periode einen deutlich höheren Anteil an der Gesamtnutzung einnimmt.

Das private Trinkwasser nimmt den kleinsten Anteil der gesamten Förderungen ein. Lediglich im Jahr 2009 findet eine Nutzung statt, die in diesem Jahr nur etwa 0,8 % der Gesamtförderung ausmacht.

Abbildung 17 zeigt die jährliche Anzahl der aktiven Brunnen nach Akteuren im Zartner Becken. In den Zeiträumen von 1990 bis 1994 und 1995 bis 2001 sind die Zusammensetzung und Anzahl der Brunnen in Betrieb konstant. Darauffolgend variiert diese Zahl fast jährlich in positive als auch negative Richtung. Betrachtet man diese Anzahl aktiver Brunnen treten zunächst die Jahre 2003 und 2004 hervor. Hier sind lediglich 28 von insgesamt 37 Brunnen aktiv. Nur im Jahr 2020 sind es mit 27 noch weniger. In den Jahren 2009 und 2010 sind mit 33 die meisten Brunnen gleichzeitig in Betrieb, die absoluten Fördermenge sinken hier im Vergleich zu den Vorjahren jedoch (siehe Abbildung 15).

In den Jahren 2009 und 2010 sind die meisten Akteure vertreten. Acht von elf Nutzungskategorien fördern hier Grundwasser. Die geringste Vielfalt liegt in den Jahren 2003 und 2004, da hier lediglich Grundwasser für die öffentliche Trinkwasserversorgung gefördert wird und keine privaten oder gewerblichen Brunnen aktiv Grundwasser fördern. Auch hier wird die Dominanz in der Grundwasserbewirtschaftung der badenovaNETZE im Zartner Becken deutlich. Über den gesamten betrachteten Zeitraum nehmen die Tiefbrunnen der badenovaNETZE jährlich über 50 % der gesamten aktiven Brunnen im Untersuchungsgebiet ein.

Ergebnisse

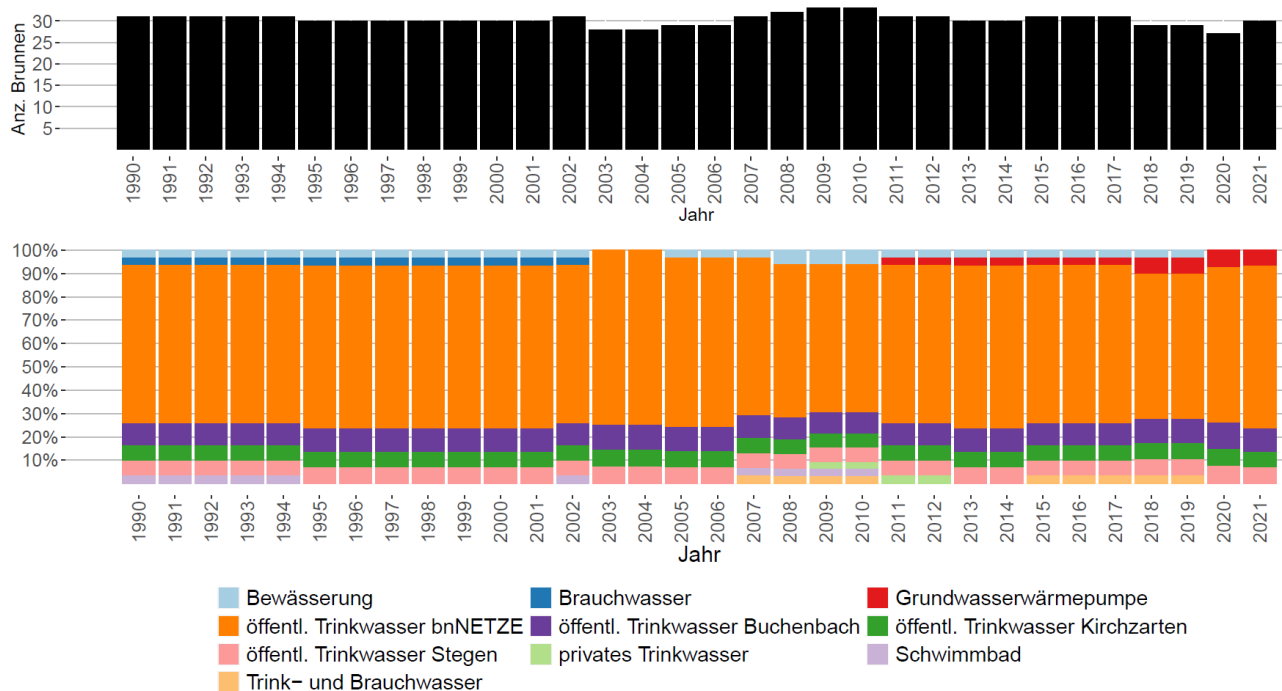


Abbildung 17 Anzahl der aktiven Brunnen pro Jahr nach Akteuren (DWD 2022a; LUBW 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a; GIT HydroS Consult GmbH 2022; bnNETZE 2022)

Die Rückführung des im Zartner Becken geförderten Grundwassers in den Wasserkreislauf, beziehungsweise in einen Aquifer, ist je nach Akteur unterschiedlich. Tabelle 3 stellt die Rückführungsarten nach Nutzungskategorien gegenüber. Unterschieden wird dabei in eine direkte, indirekte, regionale und nicht regionale Rückführung. Bei der direkten Rückführung wird das aus dem Aquifer gewonnene Wasser direkt wieder in diesen oder einen anderen Aquifer zurückgeführt. Die indirekte Rückführung kann zum Beispiel über Versickerung, Verdunstung (und Transpiration) oder über die Rückführung in Oberflächengewässer durch Kläranlagen stattfinden. Als regional wird hier eine Rückführung innerhalb des Zartner Beckens kategorisiert. Sobald die Rückführung außerhalb des Untersuchungsgebietes dieser Arbeit stattfindet, gilt sie als nicht regional.

Ergebnisse

Tabelle 3 Bestimmung der Rückführungsart des geförderten Grundwassers im Zartner Becken nach Akteuren. Unterschieden wird in direkte, indirekte, regionale und nicht regionale Rückführung in das System

Nutzungskategorie	Rückführung [direkt/ indirekt]	Regionale Rückführung [Ja/ Nein]
Bewässerung	indirekt	Ja
Brauchwasser	keine Information	keine Information
Grundwasserwärmepumpe	direkt	Ja
Öffentliches Trinkwasser bnNetze	indirekt	Nein
Öffentliches Trinkwasser Buchenbach	indirekt	Nein
Öffentliches Trinkwasser Kirchzarten	indirekt	Nein
Öffentliches Trinkwasser Stegen	indirekt	Nein
Privates Trinkwasser	indirekt	Nein
Schwimmbad	indirekt	Ja
Trink- und Brauchwasser	keine Information	keine Information

In einer Pilotstudie zum Niedrigwassermanagement in Baden-Württemberg haben Blauhut et al. (2017) die Niedrigwasserhydrologie, sowie die Niedrigwassernutzung und -konflikte untersucht. Mit über 100 durchgeführten Umfragen konnten sie Informationen zur Wasserherkunft verschiedener privater und gewerblicher Wassernutzungen gewinnen; unter anderem auch für das Zartner Becken. Abbildung 18 stellt die Ergebnisse dieser Umfrage gegenüber. Die Auswertung für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist schwarz umrandet.

Auch wenn hier keine konkreten Nutzungsmengen aufgeführt werden, wird doch deutlich, dass die Nutzung von Quellwasser und die öffentliche Wasserversorgung im Zartner Becken eine dominante Rolle spielen. Wie in den Recherchen zu dieser Arbeit bereits festgestellt, zeigen auch die Umfrageergebnisse die untergeordnete Rolle der Fließgewässernutzung. Zu beachten ist dabei, dass die öffentliche Wasserversorgung im Zartner Becken auf der Förderung von Grundwasser basiert. Ebenfalls wurde festgestellt, dass Trockenheit von der Bevölkerung bewusster wahrgenommen wird als Niedrigwasser.

Ergebnisse

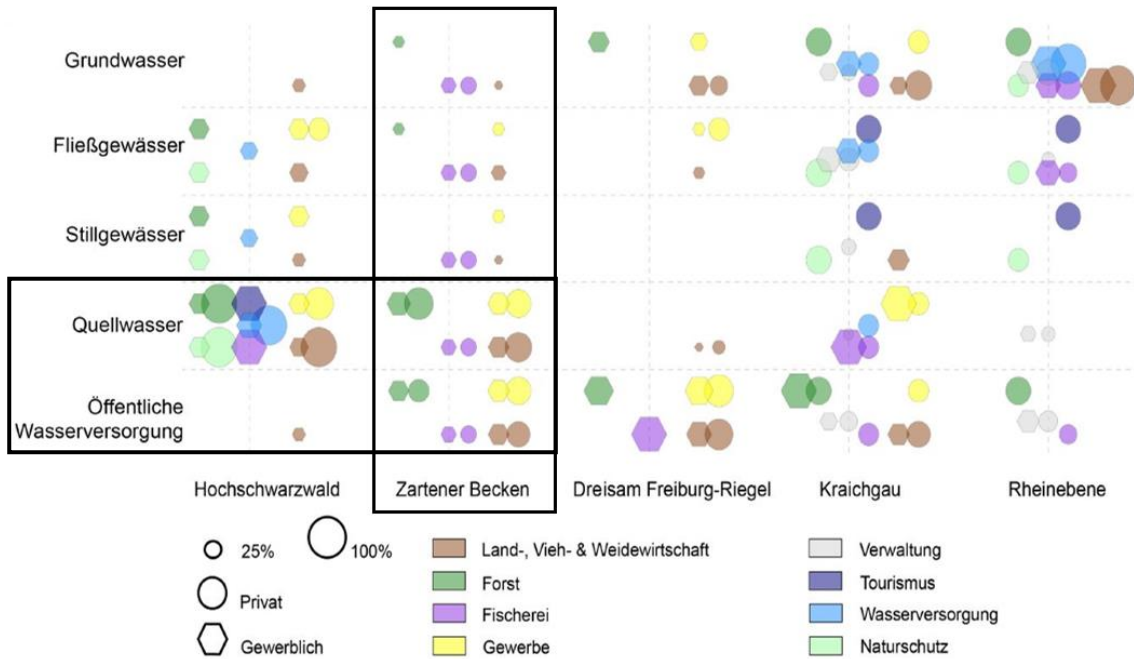


Abbildung 18 Umfrageergebnisse: Relative Nutzung der Wasserressourcen per Interessensgruppe und Region. Verändert nach Blauhut et al. (2017).

Abbildung 19 zeigt weitere Umfrageergebnisse aus dieser Studie zu alternativen Wasserressourcen bei Trockenheit. Wenn zusätzliche Wasserherkünfte herangezogen werden, nennen die meisten Akteure die öffentliche Wasserversorgung. Daneben noch Quell- oder Fließgewässer, die jedoch den deutlich kleineren Teil ausmachen. Im Hochschwarzwald gibt es mehr Akteure, die auf weitere Wasserressourcen zurückzugreifen. Auch hier dominiert die öffentliche Wasserversorgung als zusätzliche Quelle, gefolgt von Stillgewässern.

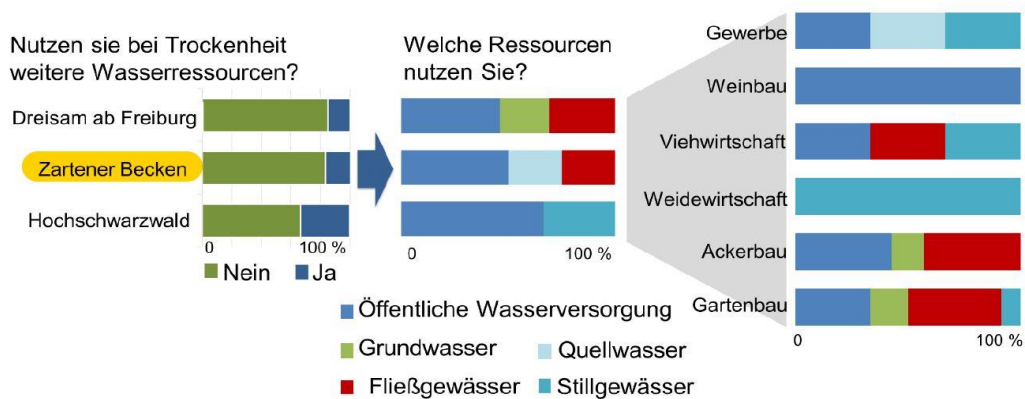


Abbildung 19 Umfrageergebnisse zu alternativen oder zusätzlichen Wassernutzungen während Trockenheit im Untersuchungsgebiet der Dreisam. Verändert nach Blauhut et al. (2017).

Die durch diese Umfrage gewonnenen Informationen ergänzen die in dieser Arbeit zusammengetragenen offiziellen Daten zu Wasserförderungen der unteren Wasserbehörden und öffentlichen Wasserversorger. Hierbei handelt es sich nämlich um Wassernutzungen, die außerhalb einer genehmigungspflichtigen Menge liegen und daher von den offiziellen Institutionen nicht erfasst werden.

5.2 Grundwasserstand und Grundwasserdargebot

Abbildung 20 zeigt Grundwasserstände in m ü. NN der Handmessungen der jeweiligen Messstandorte mit deren Extremwerten und ihrem zeitlichen Vorkommen. Da die Handmessungen zu Beginn der Zeitreihe noch zweiwöchig, beziehungsweise monatlich, aufgenommen wurden und später nur noch zweimonatlich, variieren die Abstände der einzelnen Werte über die Zeit. Ziel dieser Darstellung ist es, einen Überblick in einem möglichst langen Zeitraum zu möglichen Mustern oder Anhäufungen zu Minima (rot) oder Maxima (blau) im Grundwasserspiegel zu bekommen.

Die starke Variabilität zwischen den Messstellen rührt von der unterschiedlichen Lage im Zartner Becken her (siehe Abbildung 13). Wie in Kapitel 2.1.3 dargestellt variiert die Aquifermächtigkeit je nach Lage im Becken, was sich im Grundwasserstand widerspiegelt.

Besonders auffällig sind die maximalen Grundwasserstände bei neun von 17 Messstellen Anfang 1988. Eine deutliche Serie von niedrigen Grundwasserständen liegt zwischen Ende 2008 und Ende 2011. In diesem Zeitraum erreichen sechs von 14 Messstellen ihren niedrigsten Grundwasserstand in der betrachteten Zeitreihe. In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass sich die meisten Messstellen dieser beiden Phasen von Extremwerten überschneiden. Betrachtet man die Lage dieser Messstandorte im Zartner Becken (siehe Abbildung 13) und vergleicht diese mit den geologischen Bedingungen vor Ort (siehe Abbildung 6) kann festgestellt werden, dass diese sich hauptsächlich in Gebieten mit geringer Mächtigkeit des gut leitenden jungen Schotters befinden. Ausnahmen bilden dabei die Messstellen PE01 und PE02, die in Ebnet kurz vor der Talverengung am Ausgang des Zartner Beckens liegen.

Anfang 1995 und Anfang 2018 erreichen jeweils zwei weitere Messstellen ihren höchsten Grundwasserstand über die betrachtete Zeitreihe, obwohl diese beiden Jahre als besonders trocken gelten. Eine weitere Anhäufung von minimalen Grundwasserständen liegt zwischen Ende 1987 und Ende 1989. Weniger als zwei Jahre nach dem Grundwasserhöchststand an Messstelle PE01 tritt hier der minimale Grundwasserspiegel auf. An dieser Messstelle liegen die beiden Extremwerte am nächsten beieinander.

Ergebnisse

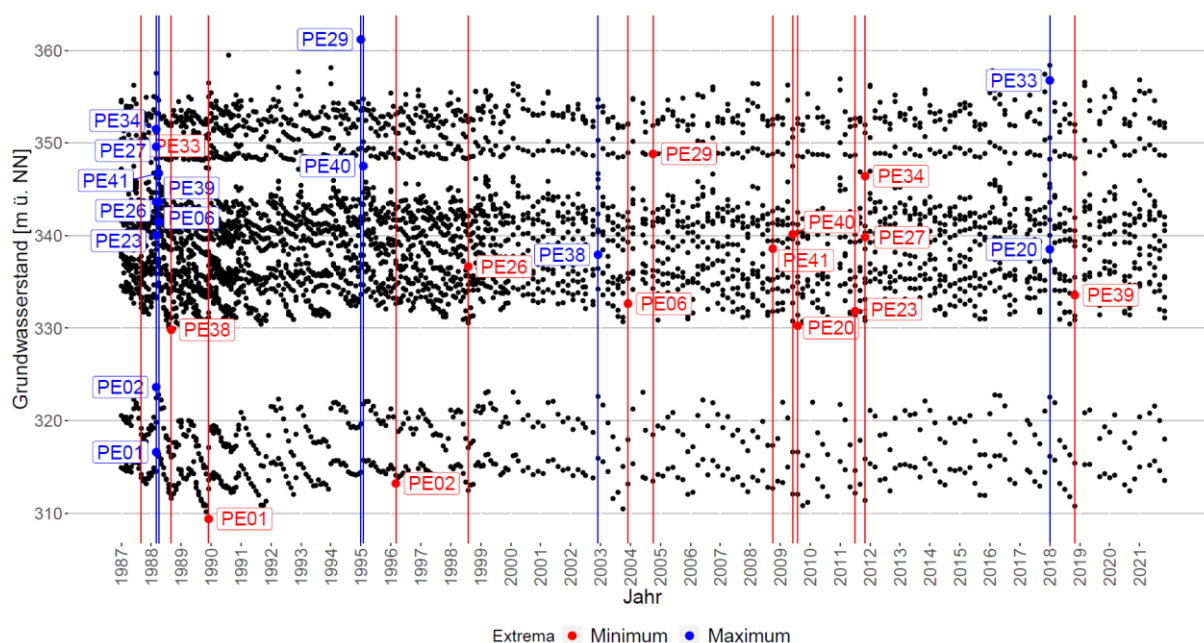


Abbildung 20 Extremwerte der jeweiligen Messstellen für die Zeitreihe der Handmessungen des Grundwasserstands von 1987 bis 2021. Rot: Minimum der jeweiligen Zeitreihe im dargestellten Zeitraum; blau: Maximum der jeweiligen Zeitreihe im dargestellten Zeitraum (bnNETZE 2022)

Betrachtet man im Folgenden die Dynamiken des Grundwasserstandes in trockenen und feuchten Jahren, fallen vor allem Unterschiede während der auffüllenden Phasen im Frühjahr, und in der darauffolgenden Entwässerung auf. Abbildung 21 stellt dazu stündlich aufgelöste Grundwasserstände von sieben Messstellen im Zartner Becken für sechs ausgewählte Jahre gegenüber. Dabei wurde sich für drei vergleichsweise feuchte (2010, 2013 und 2021) und drei trockene Jahre (2011, 2015 und 2018) entschieden. Die Auswahl und Beurteilung, ob ein Jahr als trocken oder feucht gilt, wurde mithilfe von Daten und Informationen des DWD getroffen (DWD 2022a).

Die Kurven des Grundwasserspiegelanstiegs zu Beginn der feuchten Jahre sind ausgeprägter als bei den trockenen. Der Anstieg bis zum Peak und das darauffolgende Absinken des Grundwasserspiegels im Frühjahr und Sommer sind relativ gleichmäßig. Bei den trockenen Jahren hingegen ist der Anstieg bis zum Peak des Grundwasserspiegels deutlich steiler als das Abfallen. Auch nimmt dieser hier darauffolgend geringere Werte an als in den feuchten Jahren. Das Jahr 2015 ist das einzige, in dem keine eindeutige Auffüllung des Grundwasserkörpers im Winter und Frühjahr zu erkennen ist, was sich auf den Grundwasserspiegel des restlichen Jahres auszuwirken scheint. Dieser erreicht hier deutlich niedrigere Werte als vor allem in den feuchten Jahren zu beobachten sind. 2018 findet zwar eine erkennbare Auffüllphase statt, doch erreicht diese einerseits nicht die Höchststände der anderen hier dargestellten Jahre, andererseits ist sie in ihrer Form weniger stark ausgeprägt.

Die Messreihe PE44 im Jahr 2018 zeigt etwa ab Mai starke Unregelmäßigkeiten. Nach Rücksprache mit den badenovaNETZEN (hier Messstellenbetreiber) sind diese Daten wahrscheinlich fehlerhaft. Der Datenlogger wurde im darauffolgenden Jahr ausgetauscht.

Ergebnisse

Außer im Jahr 2018 ist in allen Jahren, bei nahezu allen Grundwassermessstellen ein zweiter Anstieg im Grundwasserspiegel zwischen den Monaten April und Juni zu erkennen. In den trockenen Jahren erreicht diese zweite Anstiegsphase, in den hier ausgewählten Jahren, früher ihren Höhepunkt.

In den Jahren 2015 und 2018 sind die Grundwasserstände am Ende des hydrologischen Jahres bei allen Messstellen ungewöhnlich niedrig. Doch auch im Jahr 2021, in dem der Grundwasserspiegel im Sommer vergleichsweise hoch war, ist dieser am Jahresende an nahezu allen Standorten mit den Werten von 2018 vergleichbar.

Ergebnisse

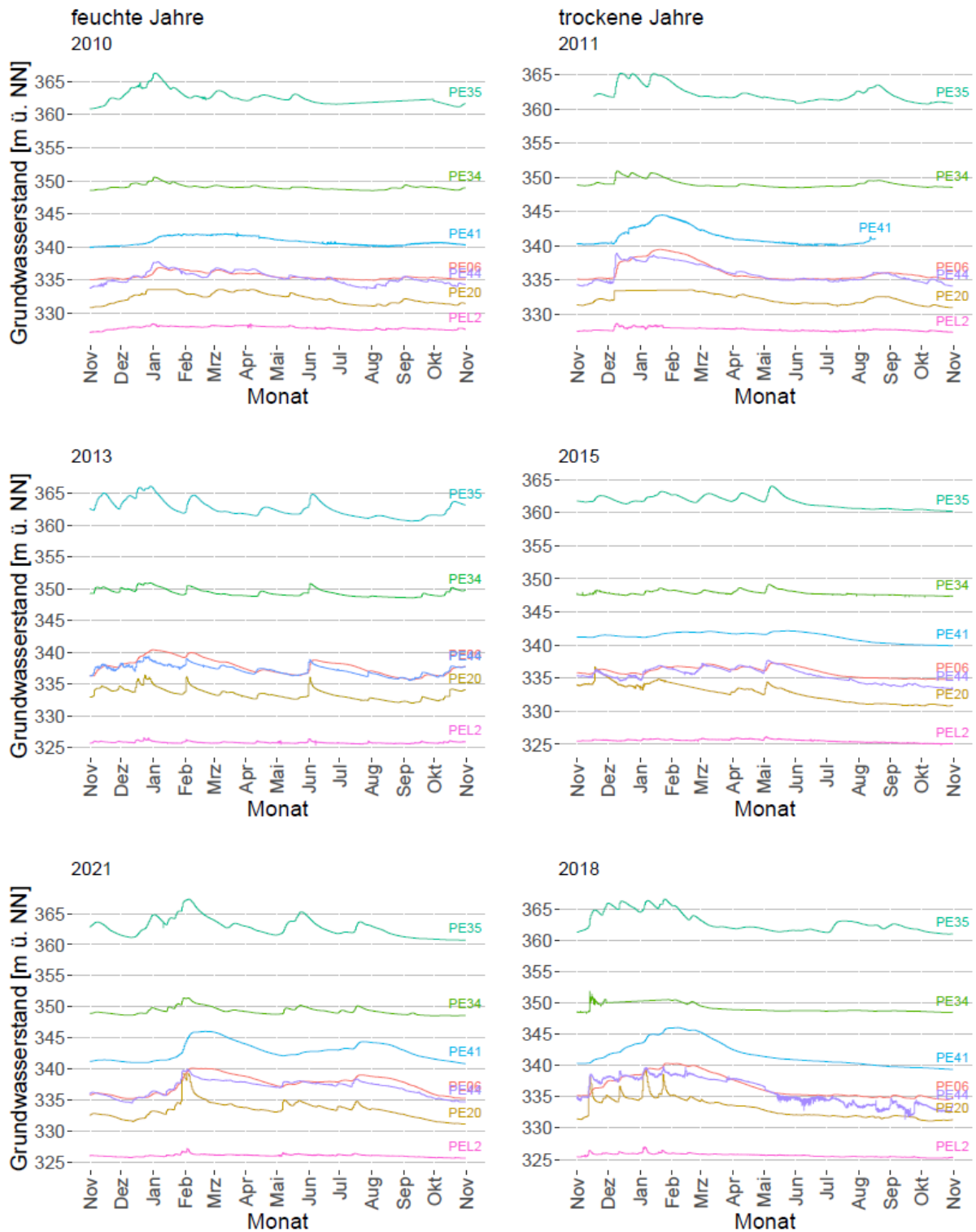


Abbildung 21 Gegenüberstellung von stündlichen Grundwasserständen dreier feuchter (2010, 2013, 2021) mit drei trockenen (2011, 2015, 2018) Jahren. Dargestellt ist jeweils das hydrologische Jahr (bnNETZE 2022)

Ergebnisse

Abbildung 22 stellt das jährliche Grundwasserdargebot (folgend Dargebot) mit den absoluten jährlichen Grundwasserfördermengen (folgend Förderung) von 1990 bis 2019 im Zartner Becken gegenüber. Zusätzlich ist für jede der beiden Größen ein zehnjähriges gleitendes Mittel dargestellt.

Betrag im Jahr 2000 das zehnjährige Mittel noch 25,8 Mio. m³ beim Dargebot und etwa 14,4 Mio. m³ in der Förderung, liegen diese Werte im Jahr 2019 nur noch bei 23,3 Mio. m³ und etwa 12 Mio. m³. Das zehnjährige Mittel des Dargebots hat somit um etwa 10 % abgenommen, das der Förderung um etwa 17 %. Beide Größen zeigen Abnahmen in ihren jährlichen Volumen, wobei die Abnahme der Förderung stärker ist als die des Dargebots.

Vergleicht man die prozentualen Anteile der Förderung am Dargebot, liegen diese im Jahr 1990 bei 66,1 % und im Jahr 2019 bei 52,1 %. Der maximale Anteil der Förderung am Dargebot wird im Jahr 1993 mit 69,3 % erreicht und der kleinste Anteil im Jahr 2013 mit 40,6 %. Eine Förderung von 60 % des Gesamtdargebots wurde seit 1997 nicht mehr überschritten.

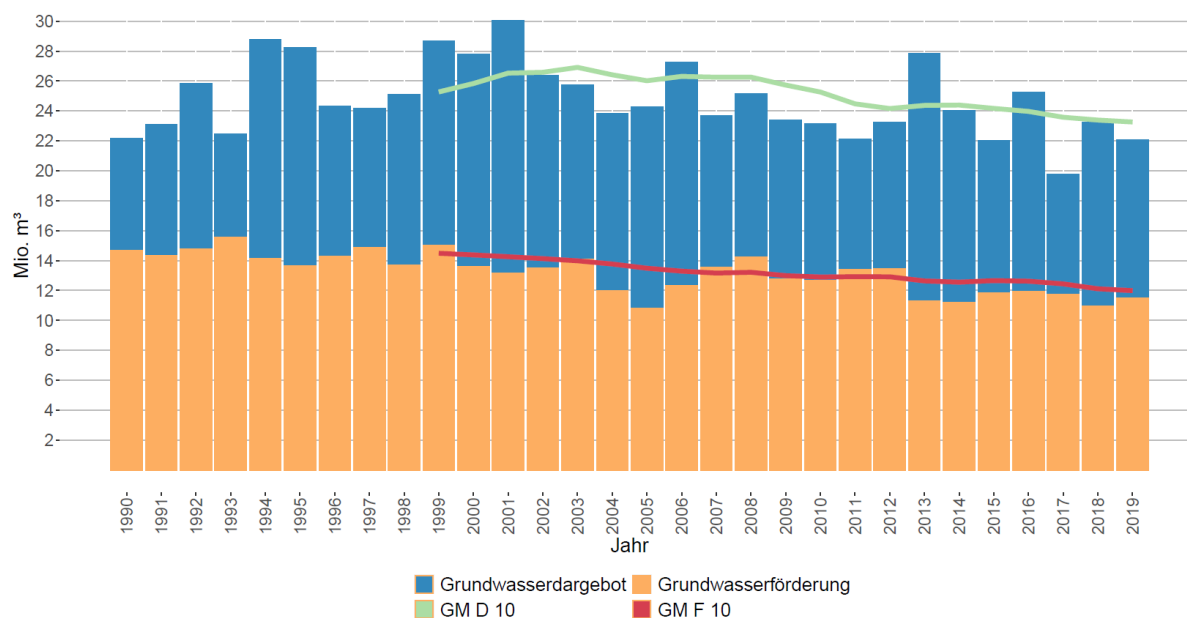


Abbildung 22 Jährliches Grundwasserdargebot und -förderung in Mio. m³ mit 10-jährigen gleitenden Mitteln: GM D 10 = Gleitendes Mittel für Grundwasserdargebot, GM F 10 = Gleitendes Mittel für Grundwasserförderung (bnNETZE 2022; GIT HydroS Consult GmbH 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a)

Abbildung 28 im Anhang zeigt zusätzlich für zehnjährige Teilperioden des Dargebots und der Förderung verallgemeinernde lineare Modelle (Generalized Linear Model (GLM)) mit einem 95 % - Konfidenzintervall. Die erste dieser drei Perioden weist beim Dargebot einen positiven Trend auf. Die zweite und dritte sind hingegen negativ, ebenso wie der Trend über den gesamten Betrachtungszeitraum. Bei der Förderung weist die letzte der drei Perioden von 2009 bis 2019 den stärksten negativen Trend aller drei Perioden auf. Von 1990 bis 2000 liegt hier der schwächste negative Trend vor.

5.3 Wassernutzungskonkurrenzen

Die öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg basiert hauptsächlich auf der Versorgung mit Grundwasser (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2021). Die Nutzung von Oberflächengewässern, wie Flüssen, Seen oder Talsperren, nehmen zusammen nur einen Teil von etwas mehr als 30 % ein.

Viele Prognosen gehen in die Richtung trockenerer Gesamtbedingungen (Briffa et al. 2009; Rodell et al. 2018). Damit steigt das Potential von wasserbezogenen Konflikten (BMUV 2021; IPCC 2012, 2022). Landwirtschaftliche Betriebe müssen aufgrund der Trockenheit zunehmend bewässern, was bereits jetzt in Teilen Deutschlands zu Nutzungskonkurrenzen führt (Pahl-Wostl 2022; Thober et al. 2018; Bathiany et al. 2021). Etwa zwei Mio. Hektar Agrarflächen in Deutschland könnten in Zukunft von einer zusätzlichen Bewässerung abhängen, was einer Vervielfachung der aktuellen Situation entspricht (Joeres et al. 2022b). Die unteren Wasserbehörden in Baden-Württemberg verzeichnen im Jahr 2019 schon einen Anstieg der Anträge zur Wasserentnahme, vor allem aus der Landwirtschaft (Meder et al. 2020).

In Ihrer Masterarbeit am Institut für Forst- und Umweltpolitik untersuchte Meder (2019) das Ausmaß und die Ausprägung dürrebezogener Wasserkonkurrenzen in Baden-Württemberg. Ergebnis ihrer Arbeit war unter anderem, dass sich die meisten Konkurrenzen auf die Wasserquantität bezogen und, dass die Konkurrenzen am ausgeprägtesten bei geringem Vorkommen und einer möglichen Priorisierung der Wassernutzung waren. Doch mit abnehmender Wassermenge in Trocken- und Dürreperioden verschlechterte sich meistens auch die Wasserqualität. Daher seien diese beiden Konfliktkategorien nicht klar voneinander zu trennen. Im Vordergrund standen dabei jedoch Oberflächengewässer.

Nach ihren Angaben stiegen mit anhaltender Trockenheit, beziehungsweise Dürre, illegale Mehrentnahmen aus legalen Brunnen. Durch diese nicht dokumentierten Entnahmen in unbekannter Menge, wird die nachhaltige und gerechte Bewirtschaftung eines Grundwasserkörpers erschwert.

In ihrer Arbeit stellte sie auch fest, dass im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald (in dem auch das hier untersuchte Gebiet liegt) unter anderem am meisten wasserbezogene Konkurrenzen während und durch die Dürre im Jahr 2018 auftraten. In den meisten Fällen bestanden Konkurrenzen zwischen offiziellen Institutionen, wie den unteren Wasserbehörden oder den regionalen Wasserversorgern, und Wassernutzern, beispielsweise aus der Landwirtschaft oder Industrie. Bisher verliefen diese Konkurrenzen jedoch größtenteils diskussionsorientiert und nur in sehr wenigen Fällen wäre die Polizei involviert gewesen.

Da bereits einige Wasserversorger in Deutschland und Baden-Württemberg ihre Versorgungsquellen ausweiten, oder sogar auf eine Alternative umsteigen mussten, berichtet Meder (2019), dass es dadurch in einigen Gebieten zu Beschwerden seitens der Anwohner kam. Vor allem durch die Änderung im

Ergebnisse

Kalkgehalt des Wassers merkten die Trinkwassernutzer die Umstellung in der Versorgung und fühlten sich übergangen.

Um Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Arbeitsbereiche besser zu verstehen, führten Stölzle und Stahl (2011) eine Umfrageuntersuchung zur Spezifizierung von Wassernutzungen und zur Verwundbarkeit durch Trockenheit in Baden-Württemberg durch. Abbildung 23 stellt die Ergebnisse der Umfrage zu Trockenheitsindikatoren nach Sektoren und Region dar. Je dunkler ein Feld unter dem jeweiligen Sektor oder der jeweiligen Region, desto relevanter ist dieser Trockenheitsindikator für diesen Bereich. Räumlich betrachtet fallen die Unterschiede für Trockenheitsindikatoren weniger stark aus. Innerhalb der Sektoren unterschieden sich die Angaben jedoch stärker.

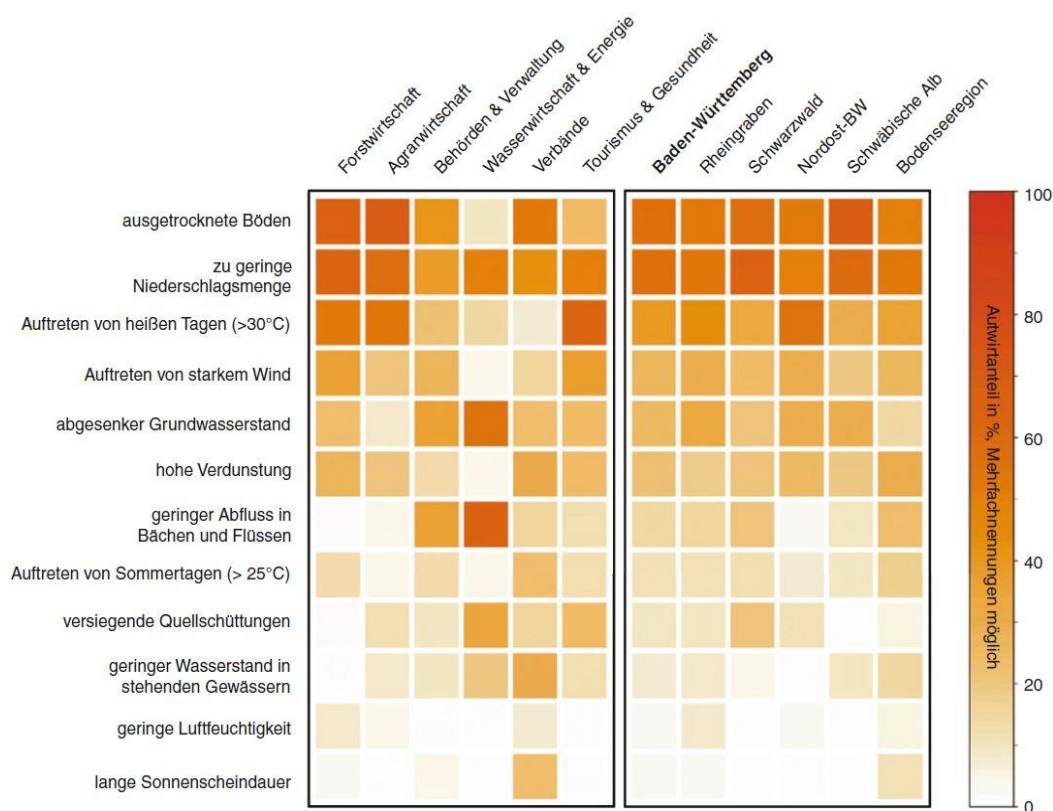


Abbildung 23 Umfrageergebnisse zu Trockenheitsindikatoren in Baden - Württemberg nach Sektoren und Region (Stölzle und Stahl 2011)

Nach Stölzle und Stahl (2011) zeige dies, dass die Ausprägung und Variabilität von solchen Extremereignissen je nach Akteur eine unterschiedliche Bedeutung haben kann. Auch sei eine weitere Intensivierung der sektorenübergreifenden Debatte bezüglich Nutzungskonkurrenzen, Priorisierungen in der Wassernutzung und Anpassungsmaßnahmen zu erwarten.

Auch Blauhut und Stahl (2018) sagen, dass allgemeine Dürregrenzwerte oder Gefahrenstufen in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll wären, da die verschiedenen Sektoren spezifisch auf Dürren und Trockenheit reagieren. Die größten Unterschiede zeigen sich hierbei sowohl zwischen den Sektoren als auch Regionen, wenn extreme Trockenheit vorherrscht. Nach deren Modellberechnung hat die

Ergebnisse

öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg eine besonders hohe Schadenswahrscheinlichkeit bei trockenen Bedingungen. Zurückzuführen könne dies unter anderem auf den vergleichsweise hohen Anteil der Nutzung von Quellen im Schwarzwald sein, die trocken fallen können und das Modellergebnis dahingehend beeinflussen.

Durch den globalen Klimawandel mit steigenden Temperaturen, Niederschlagsverschiebungen und auch sozioökonomischen Veränderungen werden sich voraussichtlich solche Konkurrenzen durch gegebenenfalls Nutzungseinschränkungen verschärfen (Bücker et al. 2012). Auch dürrebedingte Ertragseinbußen in Land- und Forstwirtschaft tragen bereits jetzt zu dieser Entwicklung bei (Bathiany et al. 2021).

6 Diskussion

6.1 Validierung der Ergebnisse

Die Zielsetzungen konnten die Zielsetzungen dieser Arbeit konnten erreicht werden: Alle offiziell vorliegenden räumlichen und zeitlichen Wassernutzungsinformationen aus den verschiedenen Institutionen konnten zusammengetragen und auf ein Datenformat vereinheitlicht werden. Dadurch wurden auch die unterschiedlichen Akteure von relevanten Wassernutzungen identifiziert. Mit Hilfe der Grundwasserbilanz und der jährlichen Grundwasserneubildung konnte ein jährliches Grundwasserdargebot berechnet und mit den jährlichen Fördermengen in Relation gesetzt werden. Dieser Schritt hat zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Wassernutzung im Zartner Becken beigetragen. Auch der potenzielle Einfluss von Wassernutzungen auf anliegende Oberflächengewässer konnte ermittelt werden. Dadurch wurden Prognosen des Einflusses spezifischer Nutzungsverhalten auf diese abschätzbar.

Bei der Recherche der Datengrundlage und zur Datenzuständigkeiten konnte ein großes Interesse am Thema dieser Arbeit festgestellt werden. Die verschiedenen Kontakte unterschiedlicher Institutionen waren stark an den Ergebnissen interessiert und fragten um die Bereitstellung der Thesis nach Fertigstellung. Dies lässt auf einen ausständigen Bedarf einer zusammentragenden und regionalen Wassernutzungsanalyse im Zartner Becken schließen. Wie bereits erwähnt konnten keine zugänglichen Arbeiten zu langjährigen Wassernutzungsanalysen in dieser Region gefunden werden. Die unerwartet hohe Beachtung der Befragten aus Ämtern und Gemeindeverwaltungen gegenüber dieses Arbeitsthemas scheint diese fehlende Auswertung zu bestätigen.

Mögliche Fehlerquellen, beziehungsweise Unvollständigkeiten der Daten, können durch die nicht sachgerechte oder korrekte Übermittlung der Wassernutzungsmengen der, teilweise privaten, Wassernutzungsakteure an die jeweilige offizielle Institution entstanden sein. Da nur Entnahmen größer als $4\,000\text{ m}^3\text{ Jahr}^{-1}$ dem Wasserentnahmeendgeld und damit der Meldung an die jeweilige untere Wasserbehörde unterliegen, ist es durchaus möglich, dass es im Zartner Becken mehr Wasserförderungen und Nutzungsakteure gibt als in dieser Arbeit aufgeführt. Diese Mengen sind wahrscheinlich jedoch im Vergleich zu den hier aufgeführten Förderungen vernachlässigbar gering.

6.2 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Wassernutzungen

Seit 1950 hat sich die weltweite Wassernutzung verdreifacht (Löwe et al. 2012). Dabei liegt Deutschland unter den ersten fünf in Europa der höchsten geförderten Wassermengen im Verhältnis zu verfügbaren Wasserressourcen (Nixon et al. 2000). Insbesondere in urbanen Ballungsräumen und deren Umland steigt durch demografische und klimatische Veränderungen der Druck auf die Ressource Wasser (Löwe et al. 2012). Auch im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit steigt die Bevölkerungszahl und -dichte seit Jahrzehnten (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2021). Jedoch hat die mittlere absolute Fördermenge im Zartner Becken seit 1990 abgenommen (siehe Abbildung 15).

Bis zum Trockenjahr 2003 nimmt die absolute Fördermenge im Zartner Becken nur geringfügig ab. Danach sinkt sie bis 2005 auf die zweitniedrigste Quantität. Nur im Jahr 2020 liegen noch niedrigere Fördermengen vor. Grund für die geringe Förderung im Jahr 2005 könnte ein durch die vorherige Dürre verursachtes geringeres Grundwasserdargebot und eine daraufhin angepasste Grundwassernutzung sein. Neben der Einwohnerdichte und -zahl könnte ebenfalls eine durch die Trockenheit hervorgerufene Sensibilisierung gegenüber der Ressource Wasser Grund einer Nutzungsanpassung sein. In Kapitel 6.2.2 wird weiter auf diese Vermutung eingegangen.

Die Grundwasserförderungen der Gemeinde Kirchzarten sind in den Jahren 2003, 2005 und 2017 am höchsten und in den jeweils darauffolgenden Jahren deutlich geringer. Betrachtet man die monatliche Variabilität der Grundwasserförderungen der Gemeinde (siehe Abbildung 26), sowie die der anliegenden Gemeinde Buchenbach, ist ein saisonales Muster in der Nutzung, mit Höchstwerten in den Sommermonaten, zu erkennen. Hierbei treten vor allem die Jahre 2003 bis 2005 und 2018 bis 2021 hervor. Diese beiden Zeiträume gelten als besonders trockene und von Dürre geprägte Perioden. Hintergrund dabei ist mutmaßlich der Gebrauch des öffentlichen Trinkwassers zur Bewässerung von Sportanlagen als auch Privatgärten. Nach Rücksprache mit dem Hausmeister von Sportanlagen in Kirchzarten kann diese Annahme bestätigt werden. Wie in Kapitel 4.2.1 bereits erwähnt, wird, unter anderem aufgrund der Einschränkung des Gemeingebrauchs bei Trockenheit, auf die öffentliche Wasserversorgung als wichtige Quelle eines zusätzlichen Wasserbedarfs bei Trockenheit ausgewichen. Ebenso steigt mit zunehmender Hitze und Trockenheit der generelle gewerbliche, als auch private Wasserbedarf an.

Die Ressourcenförderung der öffentlichen Wasserversorgung in Kirchzarten liegt nur teilweise im Zartner Becken. Zusätzlich wird Quell- und Grundwasser aus dem anliegenden Zastlertal gefördert. Ebenso wird die Trinkwasserversorgung seit 2018 durch Wasser aus dem Sammler 4 der badenovaNETZE unterstützt. Bei der Auswertung in dieser Arbeit fallen also Wassermengen, die im Endeffekt in Kirchzarten genutzt werden, unter die hier dargestellten Förderanteile der badenovaNETZE. Die Abgaben liegen dabei in Bereichen zwischen etwa 152 300 m³ im Jahr 2018 und 82 700 m³ im Jahr 2022. In den Jahren dazwischen haben die jährlichen Wassernutzungen der Gemeinde Kirchzarten aus dem Sammler 4 sukzessiv abgenommen. Diese Mengen stellen im Vergleich mit den absoluten jährlichen Grundwasserförderungen der badenovaNETZE jedoch nur einen marginalen Teil dar.

Die Grundwasserförderungen der Gemeinde Stegen haben seit 2001 sukzessiv zugenommen. Grund dafür könnte einerseits die steigende Einwohnerzahl und -dichte und ein sich daraus ergebender höherer Wasserbedarf sein, andererseits eine Zunahme von Trockenheit und Dürreereignissen. Dafür spricht auch, dass die Grundwassernutzung der Gemeinde in den Perioden 2003 bis 2006 und 2018 bis 2021 ansteigt. Wie bereits im Absatz zuvor erwähnt, gelten diese Jahre als besonders trocken und von Dürre geprägt. Zurückzuführen kann der Anstieg des Wasserbedarfs in diesen Zeiträumen, wie in den

Diskussion

Gemeinden Kirchzarten und Buchenbach, auf die Nutzung des öffentlichen Trinkwassers zu Bewässerungszwecken und eines generell aufgrund von Trockenheit angestiegenen Bedarfs sein.

Da das Versorgungsgebiet der badenovaNETZE im Vergleich mit denen der anderen Gemeinden im Zartner Becken mit Abstand am größten, und auch die Einwohnerzahl und -dichte des Versorgungsgebietes am höchsten ist, nimmt wie erwartet deren Trinkwasserversorgung den größten Teil der Grundwasserförderungen ein. Nach Dornbusch und Nienhaus (2020) findet ein stetiger jährlicher Einwohnerzuwachs der Stadt Freiburg statt, der sich jedoch kontinuierlich verringert. Die verschiedenen Bevölkerungsprognosen für Freiburg unterschieden sich teilweise deutlich. Beispielsweise des statistischen Landesamtes Baden-Württemberg und des Amtes für Bürgerservice und Informationsverarbeitung der Stadt Freiburg zufolge wird die Einwohnerzahl in Freiburg im Jahr 2035 zwischen etwa 239 000 und 248 000 liegen. Ab hier wird von einem maximalen jährlichen Zuwachs von 0,4 % bis zum Jahr 2050 ausgegangen.

Die badenovaNETZE, setzen seit einigen Jahren vermehrt auf die Versorgung aus dem Wasserwerk Hausen an der Möhlin. Dieses liegt im nahegelegenen Oberrheingraben und greift auf einen der größten Grundwasserkörper Europas zu. Um die Wasserressourcen im Zartner Becken vor allem während Tagesbedarfsspitzen zu entlasten und die Versorgungssicherheit zu garantieren, wird daher vor allem das Stadtgebiet Freiburg vermehrt mit Trinkwasser aus dem Hausener Wasserwerk versorgt.

Trotz Zuwachs der Einwohnerzahlen in den letzten Jahren ist der Wasserbedarf pro Kopf zwischen 2004 und 2013 gesunken. Nach Dornbusch und Nienhaus (2020) ist der spezifische Wasserbedarf von Haushalten im Stadtgebiet Freiburg von etwa 120 Litern pro Einwohner pro Tag (l/EW/d) auf 106 l/EW/d gesunken. Grund dafür könnten unter anderem Wassersparmaßnahmen sein. Seit 2013 steigt der Bedarf wieder an, bleibt jedoch unter dem Vorniveau von 120 l/EW/d. Der Gesamtbedarf der zu versorgenden Gebiete der badenovaNETZE (zusammengesetzt aus dem Haushaltsbedarf und dem von Sondervertragskunden, wie zum Beispiel Gärtnereien oder landwirtschaftliche Betriebe) liegt zwischen 2007 und 2019 im Mittel bei 160 l/EW/d. Für die Wasserversorgung wird daher von einem Richtwert für Bedarfsspitzen von 165 l/EW/d ausgegangen. (bnNETZE 2020)

Um die Versorgungssicherheit bei Tagesspitzen im Wasserverbrauch auch bei Teil- / Ausfällen des Wasserwerks Ebnet sicherstellen zu können, wurde für das Wasserwerk Hausen ein Wasserrechtsantrag gestellt, der eine Erhöhung der maximalen Tagesfördermenge von 60 000 m³ d⁻¹ auf 93 000 m³ d⁻¹ vorsieht (bnNETZE 2020). Die gestiegenen Tageshöchstwerte, die vor allem im Sommer auftreten, können durch einen erhöhten Wasserbedarf von Haushalten, Landwirtschaft und Betrieben bei Trockenheit bedingt sein. Die offizielle maximale Jahresfördermenge soll dabei gleichzeitig von 20 Mio. m³ auf 17 Mio. m³ herabgesetzt werden (bnNETZE 2020). Grund dafür ist eine anfängliche Überschätzung des vermuteten Wasserbedarfs und eine darauffolgende Anpassung der maximalen jährlichen Grundwasserförderungen. Da aktuell im Wasserwerk Hausen a. d. M. etwa 11 Mio. m³ Grundwasser jährlich gefördert werden, entspricht dieser angepasste Jahresbedarf dennoch einer

Diskussion

Erhöhung des Ist-Zustandes. Abbildung 29 im Anhang zeigt, dass die Gesamtförderung aller Wasserwerke der badenovaNETZE, insgesamt zugenommen hat.

Bei den nicht öffentlichen Wassernutzungen entsprechen die drei Zeiträume erhöhter Förderungen (1990 bis 1994, 2005 bis 2009 und 2018 bis 2021) denen besonderer Trockenheit. Dies lässt auf einen erhöhten Wasserbedarf der hier aufgeführten Sektoren bei trockenen Bedingungen schließen. Betrachtet man die Verhältnisse der Nutzungsakteure während diesen Perioden, nimmt die Bewässerung vor allem in der zweiten und dritten den jeweils größten Anteil an der Wasserförderung ein. In der ersten Periode ist es die Förderung durch den Schwimmbadbrunnen. Mit zunehmender Trockenheit nimmt der Bedarf der einer Gärtnerei zugehörigen Bewässerung zu. Darauf lässt auch die saisonale Aufteilung dieser Nutzung schließen, die in den Sommermonaten einen höheren prozentualen Anteil an der Gesamtfördermenge einnimmt (siehe Abbildung 27 im Anhang). Da es sich bei dem Schwimmbad um ein Freibad handelt, kann durch starken Betrieb in besonders warmen Sommern, aufgrund einer erhöhten Verdunstung und gegebenenfalls einer Bewässerung des Rasens ebenfalls ein erhöhter Wasserbedarf entstehen.

Die Nutzung der GWP im Zartner Becken findet ausschließlich in den Winter- und Frühjahrsmonaten, und damit womöglich zu Heizzwecken statt (siehe Abbildung 27). Da das hier geförderte Wasser direkt und regional zurückgeführt wird, sowie die Temperatur des Grundwassers durch dessen Wärmenutzung vor der Rückführung herabgesetzt wird, kann eine solche Nutzung auch ökologische Vorteile haben. Wie Brielmann et al. (2011) in ihrer Arbeit festgestellt haben, reagiert vor allem die Grundwasserfauna sehr empfindlich auf erhöhte Temperaturen. Halten Temperaturerhöhungen mehr als vier Tage an, oder erreichen 20 °C, kann dies zum Absterben der Organismen führen. Ebenso beeinflusst die Temperatur die Bakterienzusammensetzung im Grundwasser. Temperaturen um die 10 °C sind für eine hohe Bakterienvielfalt, sowie für im Grundwasser lebende Invertebraten nach Brielmann et al. (2011) günstig. Das Umweltministerium Baden-Württemberg (2009b) (2009a) und das Umweltbundesamt (2014) bestätigen diese Sachverhalte.

Ebenso kann das Abkühlen des Grundwassers durch eine GWP dem durch Versiegelung bedingten Temperaturanstieg entgegenwirken (Zhu et al. 2010). Jedoch sind die aktuell im Zartner Becken liegenden GWP vermutlich zu kleinskalig, um einem solchen Temperaturanstieg im Grundwasser entgegenwirken zu können. Temperaturzunahmen im Grundwasser durch Versiegelung könnten im Zartner Becken künftig jedoch an Bedeutung zunehmen. Wie bereits zuvor erwähnt nimmt die Bevölkerungsdichte hier seit Jahrzehnten zu und auch die Landnutzungsveränderungen in Abbildung 8 zeigen eine zunehmende Versiegelung. Nach Schelhorn (2022) spielt der Versiegelungsgrad zusammen mit dem Niederschlag eine maßgebliche Rolle für die Grundwasserneubildung im Zartner Becken.

Die Datenlücken in den Jahren 2003 und 2004 lassen zunächst fehlende Daten und nicht tatsächlich ausgebliebene Fördermengen vermuten. Unabhängig voneinander wurden vom Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald und vom Umweltschutzamt der Stadt Freiburg keine Daten für nicht

öffentliche Wasserförderungen für diesen Zeitraum übermittelt. Jedoch spricht dagegen, dass Daten zu öffentlichem Trinkwasser sowie privaten Nutzungen außerhalb des Zartner Beckens bei verschiedenen Institutionen vorliegen. Eventuell gab es hier aufgrund der extremen Trockenheit im Jahr 2003 eine Priorisierung der Wassernutzung und Einschränkungen nicht versorgungsrelevanter Grundwasserförderungen im Zartner Becken. Durch Recherchen und auf Nachfrage bei den zuständigen unteren Wasserbehörden konnten jedoch keine Informationen gewonnen werden, die diese Vermutung unterstützen oder widerlegen. Daraus ergibt sich, dass in diesen beiden Jahren auch die zweitgeringste Anzahl von Förderbrunnen aktiv ist (siehe Abbildung 17), woraus auch die insgesamt geringen Fördermengen in diesen beiden Jahren folgen. Nur im Jahr 2020 sind noch weniger Brunnen aktiv und wird noch weniger Grundwasser gefördert. Die Diversität der Akteure nimmt hier jedoch zu. Die Nutzung durch GWP und die Bewässerung finden in diesem Jahr wieder statt. Der private Brunnen für Trink- und Brauchwasser ist nach Angaben des Umweltschutzamtes Freiburg nach 2019 nicht mehr in Betrieb.

Die Lage und Verteilung der Förderbrunnen im Zartner Becken (siehe Abbildung 14) ist bedingt durch die inhomogene Verteilung der Mächtigkeit des Grundwasserkörpers. Die meisten Brunnen liegen im westlichen oder nördlichen Teil des Beckens, dort wo sich (wie in Kapitel 2.1.3 dargestellt) die dominante Grundwasserrinne befindet. Zusätzlich gibt es vor der Talverengung am westlichen Beckenrand einen aufstauenden Effekt. Der zuvor deutlich breitere Grundwasserkörper verengt sich hier innerhalb weniger Kilometer von etwa 2,5 km Breite auf nur einen Kilometer. Dadurch wird das aus Osten zufließende Grundwasser an dieser Stelle aufgestaut.

Die in dieser Arbeit aufgeführten geförderten Wassermengen werden ausschließlich von den GWP direkt und regional dem entnommenen System im Zartner Becken zurückgeführt. Genutztes Wasser aus den öffentlichen Trinkwasserversorgungen kann aufgrund der variablen Nutzungsmöglichkeiten auf verschiedene Arten rückgeführt werden: Indirekt und nicht regional durch die Verwendung als Lebensmittel, zum Waschen oder Kochen und die Rückführung als geklärtes Abwasser in Gewässer; indirekt durch Verdunstung aus der Bewässerung von Garten- oder Agrarflächen; indirekt durch Verdunstung oder die Kanalisation durch Naherholungsangebote (beispielsweise private Pools oder öffentliche Schwimmbäder); indirekt und teilweise regional (abhängig vom Versorgungsgebiet der jeweiligen Wasserversorger) durch Tiefenperkolation aufgrund von Bewässerung (abhängig von den Vorfeuchtebedingungen des jeweiligen Bodens). Alle diese Rückführungen sind, gegenüber dem System, dem sie entnommen wurden, indirekt und nur teilweise regional. Mit dem Großteil der Wasserförderung durch die badenovaNETZE mit einem Versorgungsgebiet welches hauptsächlich außerhalb des Zartner Beckens liegt, steht diese geförderte Wassermenge dem Untersuchungsgebiet aufgrund der externen Rückführung nicht mehr direkt oder zur Grundwasserneubildung zur Verfügung. Außer den GWP führen lediglich die Bewässerung und zum Teil das Schwimmbad die geförderten Grundwassermengen regional zurück. Allerdings lediglich indirekt über die Verdunstung durch die

oberflächliche Ausbringung des Wassers. Dabei ist die Transpiration durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen eine maßgebliche Größe in der Gesamtverdunstung. Die Verdunstung über Agrarflächen kann wesentlich größer sein als beispielsweise über Grünland (Lehn et al. 1996). Vergleicht man diesen Sachverhalt mit der Landnutzungsentwicklung im Zartner Becken, ist mit der Zunahme von Ackerflächen seit dem Jahr 2000 auch mit einer zunehmenden Verdunstung in Form von Transpiration zu rechnen. Findet zusätzlich eine Bewässerung der Ackerflächen statt nimmt diese über den jeweiligen Flächen abermals zu. Wetterbedingt steht dieses regional verdunstete Wasser dem Ursprungssystem mutmaßlich nicht mehr als beispielsweise Niederschlag zur Verfügung. Durch die Bewässerung von Nutzpflanzen kann Wasser auch durch Tiefenperkolation wieder dem Grundwasser zurückgeführt werden. Jedoch sinkt dieser Anteil der Rückführung bei Trockenheit aufgrund einer geringen Vorgeuchte des Bodens und einem erhöhten Wasserbedarf der Pflanzen.

Die Ergebnisse aus der Pilotstudie von Blauhut et al. (2017) weisen darauf hin, dass der Druck auf die öffentliche Wasserversorgung im Zartner Becken in Zukunft steigen kann. Viele Wassernutzungsakteure nennen die öffentliche Wasserversorgung grundsätzlich als relevante Quelle. Zusätzlich wird sie am meisten als ergänzende Wasserressource bei Trockenheit genannt (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19). Vermehrt wird von versiegenden Quellen im Schwarzwald durch die letzten Trockenjahre berichtet (Mohl 2016; Peyk und Schütze 2022; Beule et al. 2019; LUBW 2019), von denen vor allem Gemeinden in den Höhenlagen, oder einzelne Höfe abhängig sind. Da diese zukünftig ihre eigenständige Versorgung gegebenenfalls nicht mehr gewährleisten können, ist eine Anbindung dieser Gemeinden an die anliegende öffentliche Trinkwasserversorgung voraussichtlich nötig. Die Umfrageergebnisse aus der Pilotstudie zeigen, dass die öffentliche Trinkwasserversorgung im Einzugsgebiet der Dreisam als verlässlich und quantitativ gut aufgestellt wahrgenommen wird. Auch deuten die Antworten der Befragten auf ein Vertrauen gegenüber den ansässigen Versorgungsunternehmen hin.

Gegenüber der öffentlichen Trinkwasserversorgung sind ökonomische Wassernutzungen im Zartner Becken vergleichsweise gering. Grund dafür ist möglicherweise auch, dass fast das gesamte Becken im Wasserschutzgebiet des Wasserwerks Ebnet liegt und daher besondere Regularien gewerbliche Nutzungen bestimmen. Generell spielt der Industriesektor im Untersuchungsgebiet keine übergeordnete ökonomische Rolle. Der Aquifer ist jedoch von fundamentaler Bedeutung für die Versorgungssicherheit mit Trinkwasser der anliegenden Gemeinden und der Stadt Freiburg.

Die badenovaNETZE sind mit Abstand die dominanten Wassernutzer im Zartner Becken. Alle anderen Wassernutzungen zusammen machen nur einen Bruchteil an der Gesamtförderung aus. Die Einschränkung dieser anderen Wassernutzungsakteure und -sektoren im Zuge einer Priorisierung der Wassernutzungen vor dem Hintergrund einer Anpassung auf das sich klimatisch bedingt verändernde Wasserdargebot würde aus Hinsicht der Gewährleistung der Trinkwasserversorgungssicherheit keinen mengenmäßig ausschlaggebenden Effekt bringen. Die badenovaNETZE haben damit den größten

Einfluss auf die nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung im Zartner Becken und damit gleichzeitig die in dieser Hinsicht größte Verantwortung.

Nach dem Wasserhaushaltgesetz Kapitel 2 Abschnitt 1 Gemeinsame Bestimmungen §6 Allgemeine Grundsätze der Gewässerbewirtschaftung und Abschnitt 4 Bewirtschaftung des Grundwassers §47 Bewirtschaftungsziele für das Grundwasser (BMUV 31.06.2009) sind Gewässernutzer gesetzlich dazu verpflichtet, Beeinträchtigungen des Wasserhaushalts und den damit verbundenen Ökosystemen zu vermeiden, sowie einer mengenmäßigen sowie chemischen Verschlechterung des jeweiligen Gewässerkörpers und möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen. Auch das Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG BW) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 03.12.2013) verpflichtet zu diesen Handlungsweisen.

Betrachtet man dahingehen die Grundwasserbilanz zur Bewertung der Einhaltung dieser Kriterien in der Wassernutzung im Zartner Becken, zeigt diese, dass die Anforderungen erfüllt werden: Wird die Grundwasserbilanz für das Untersuchungsgebiet exklusiv dem Grundwasserabstrom bei Ebnet (siehe Kapitel 4.4.3) und inklusive den Grundwasserentnahmen berechnet, ergibt sich eine positive Bilanz von 395 l s^{-1} . Berechnet man die mittleren jährlichen Grundwasserentnahmen mit den Daten aus dieser Arbeit, ergibt sich eine leicht geringere, aber weiterhin positive Grundwasserbilanz von 325 l s^{-1} . Grund für diese leicht unterschiedlichen Ergebnisse können in erster Linie die verschiedenen Berechnungszeiträume sein. Während Schelhorn (2022) die mittleren Grundwasserentnahmen über einen Zeitraum von 33 Jahren berechnet hat (1986 bis 2019), ist der Untersuchungszeitraum dieser Arbeit mit 31 Jahren (1990 bis 2021) etwas kürzer und beginnt gleichzeitig vier Jahre später. Dennoch können die verschiedenen Ergebnisse auf eine Veränderung im Wassernutzungsverhalten im Zartner Becken hinweisen. Ebenso kann die teilweise unübersichtliche Datenlage, beziehungsweise Datenzuständigkeit, zu Wassernutzungen im Untersuchungsgebiet zu verschiedenen Datengrundlagen der Berechnung geführt haben. In dieser Arbeit wurde größtes Bemühen daraufgelegt, für den hier analysierten Betrachtungszeitraum die maximal vorhandenen Wassernutzungsinformationen im Zartner Becken zusammenzutragen. Dennoch sind unterschiedliche Datengrundlagen für die sich überschneidenden Zeiträume nicht auszuschließen.

Dazu kommt, dass sich die Datenqualität zwischen den verschiedenen Institutionen unterscheidet. Oft liegen Informationen nur in jährlicher Auflösung vor. Für eine detaillierte und aussagekräftige Wassernutzungsanalyse, Prognose und Abschätzung des Handlungsbedarfs vor dem Hintergrund klimatisch bedingter Veränderungen im Wasserhaushalt, ist jedoch eine saisonale Betrachtung der Wasserdargebots- und Wassernutzungssituation unabdingbar. Ebenso werden bei den unteren Wasserbehörden lediglich Wassernutzungen von mehr als $4\,000 \text{ m}^3$ pro Jahr dokumentiert. Vergleicht man diese Menge beispielsweise mit den jährlichen Förderungen der badenovaNETZE, erscheint diese zunächst belanglos. Doch aufaddiert könnten diese Entnahmen im Zusammenhang mit dem jeweiligen Entnahmeort eine Rolle spielen. Generell sind diese auch von Bedeutung für ein vollständiges und

umfassendes Bild der Wassernutzungssituation im Zartner Becken. Dabei sollten auch die Entnahmen aus Oberflächengewässern betrachtet werden. Zu diesen konnten, außer den Wasserkraftanlagen (die die entnommene Wassermenge jedoch nahezu direkt zurückführen), keine Informationen zur Auswertung in dieser Arbeit ermittelt werden.

Es gibt viele Gewässerlandschaften und Auenbereiche im Zartner Becken (LUBW 2022) die wichtige Süßwasser-Ökosysteme und Habitate darstellen. Die konkreten Auswirkungen von Wassernutzungen und klimabedingten Veränderungen auf diese regionalen Ökosysteme sind noch nicht genauer untersucht. Daher kann aus aktueller Sicht keine Aussage bezüglich der Nachhaltigkeit des Zusammenhangs von Wassernutzungen und ökologischen Auswirkungen im Zartner Becken gemacht werden. Auch deshalb ist ein umfassendes und vollständiges Bild der Wassernutzungen in diesem Gebiet von Bedeutung.

Sektorenübergreifend wird der größte Teil der geförderten Grundwassermenge überregional dem Wasserhaushalt rückgeführt und dabei dem Untersuchungsgebiet entzogen. Dies kann sich vor allem bei klimatisch bedingt zunehmender Trockenheit potenziell ungünstig auf den regionalen Wasserhaushalt auswirken. Jedoch herrscht im Zartner Becken aktuell kein Wasserstress, der mit anderen dürrerelevanten Regionen Deutschlands vergleichbar wäre. Allerdings sollte die Entwicklung des Grundwasserdargebots und des Wasserhaushaltes, sowie die ganzheitliche Wassernutzungssituation unter Beobachtung bleiben, um rechtzeitig Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können.

6.2.2 Grundwasserstand und Grundwasserdargebot

Betrachtet man die Extremwerte der Grundwassermessstellen (Abbildung 20) fiel vor allem die Häufung von Maxima zu Beginn des Jahres 1988 auf, an denen neun von insgesamt 17 Maxima an zwei Zeitpunkten kurz aufeinander folgen. An sechs von diesen neun Messstandorten wird der höchste Grundwasserstand zum ersten Zeitpunkt erreicht. Genau diese Messstellen befinden sich hauptsächlich im südlichen Beckenbereich, dort wo die Mächtigkeit der jungen Schotter unter anderem am geringsten ist (Vergleich Abbildung 6).

Durch den geringen Flurabstand hat der Grundwasserspiegel hier schnell auf ein mögliches Niederschlagsereignis reagiert. Die Seitentäler, die sich im südlichen Teil dem Zartner Becken anschließen (Brugga und Zastlerbach), haben dazu die höchsten Einzugsgebiete aller Seitentäler. Da mit zunehmender Höhe der mittlere jährliche Niederschlag zunimmt, ist ein vergleichsweise hoher Zufluss bei regionalen Niederschlägen durch Oberflächen- und Gewässerabfluss aus diesen Seitentälern anzunehmen. Dieser höhere Zufluss kann ebenfalls dazu beigetragen haben, dass der Grundwasserspiegel im südlichen Beckenbereich zuerst seine maximalen Werte erreicht hat. Leider liegen beim DWD und den badenovaNETZEN keine Wetterinformationen für die im Zartner Becken liegenden Klimastationen für das Jahr 1988 vor. Somit kann ein Niederschlagsereignis zu diesem Zeitpunkt vermutet, aber nicht durch Messdaten bestätigt werden.

Diskussion

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben, könnte die dominante Grundwasserrinne im nördlichen Beckenbereich darauf als „unterirdischer Vorfluter“ fungiert und somit das Wasser aus dem Süd-Tal abgezogen haben. Daraus ergaben sich dann die späteren maximalen Grundwasserstände der nördlichen Messstellen PE 06, PE 41 und PE39, denen vermutlich das gleiche Niederschlagsereignis zugrunde liegt. Die zwei Maxima im Jahr 1995 könnten auf dieselbe Art zusammenhängen. Zuerst versickert der Niederschlag und beeinflusst den Grundwasserstand an Messstelle PE29 im südlichen Talbereich, von wo aus das Grundwasser dann zur Messstelle PE40 im nördlichen Beckenbereich fließt, und dort für einen maximalen Grundwasserstand sorgt.

Die Messstellen der Häufung minimaler Grundwasserstände zwischen den Jahren 2008 und 2011 überschneiden sich teilweise mit denen der Maxima von 1988. Jedoch liegen diese (2008 und 2011) zeitlich zu weit auseinander, um auf ein gleiches Ereignis, beispielsweise eine Dürre, zurückgeführt werden zu können. Der Winter 2008/2009 war durch kalte Temperaturen und ergiebigen Schneefall geprägt, ansonsten aber vergleichsweise trocken mit vielen Sonnenstunden (DWD 2009b). Darauf könnte der niedrige Grundwasserspiegel 2008 basieren. Da der Niederschlag als Schnee und nicht als Regen fiel, konnte sich der Grundwasserkörper zu diesem Zeitpunkt nicht auffüllen. Der Sommer 2009 war geprägt durch heftige Starkniederschläge nach Hitzewellen (DWD 2009a). Dadurch ist der Niederschlag vermutlich hauptsächlich oberflächlich abgeflossen und konnten das Grundwassersystem somit nicht erreichen. Das Jahr 2011 gilt ebenfalls als besonders trocken (DWD 2011), was die niedrigen Grundwasserstände im südlichen Talbereich erklärt.

1995 und 2018 gelten eigentlich ebenfalls als außergewöhnlich trockene und von Dürre geprägte Jahre. Dennoch erreichen hier vier Messstellen ihren maximalen Grundwasserstand. 2018 liegt dies an einem Tiefdruckgebiet, welches im Dezember 2017 und Januar 2018 für reichlich Niederschlag in Form von Regen sorgt (DWD 2018). Bereits im Februar 2018 wird es jedoch außergewöhnlich sonnig und trocken. Für das Jahr 1995 konnten leider keine spezifischen Wetterinformationen gefunden werden, jedoch ist eine ähnliche Situation wie 2018 anzunehmen.

Beim Vergleich der hier beispielhaft gewählten trockenen und feuchten Jahre sind vor allem Unterschiede in den Auffüllphasen im jeweiligen Frühjahr zu beobachten. Der in Kapitel 5.2 beschriebene Verlauf der feuchten Jahre ist als der natürliche Zustand zu betrachten: Das Grundwasser füllt sich in den Wintermonaten durch zunehmende Niederschläge, geringere Verdunstung und einen geringeren Wasserbedarf der Vegetation, Haushalten und Landwirtschaft auf. Im Frühjahr nach der Schneeschmelze steigt dieser Bedarf vor allem bei der Vegetation wieder und auch die Verdunstung nimmt zu. Somit entleert sich der Aquifer ab dem Frühjahr allmählich bis zum nächsten Winter. Durch klimatisch bedingte Verschiebungen der Niederschlagsverteilungen verändert sich dieses Auffüllverhalten der Grundwasserkörper. Generell weniger Niederschlag als Regen und vor allem Schnee in den Winter- und vermehrte Starkregenereignisse in den Sommermonaten prägen unter anderem diese klimatischen Veränderungen in Baden-Württemberg (Fliß et al. 2021).

Geringerer Schneefall im Winter führt zu weniger Schmelzwasser im Frühjahr. Da Schmelzwasser zu großen Teilen perkoliert, trägt es maßgeblich zur Grundwasserneubildung bei (Grotzinger und Jordan 2017). Durch die Verschiebung der Winterniederschläge in den Sommer findet verstärkt Oberflächenabfluss statt und die Tiefenperkolation nimmt ab. Bedingt ist diese Dynamik einerseits durch die zu dieser Jahreszeit oft ausgetrockneten Böden, andererseits durch die hohe Intensität von immer häufiger werdenden Starkniederschlägen. Je höher der organische Anteil in den Humusaufgaben der Böden, desto stärker ist bei Austrocknung deren Hydrophobizität (Doerr et al. 2000; Fohrer et al. 2016). Das führt dazu, dass Niederschläge auf trockenen Böden vermehrt oberflächlich abfließen, anstatt zu versickern. Auch wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität der Böden übersteigt, führt dies zu verstärktem Oberflächenabfluss. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist, dass sich im Winter weniger Grundwasser neu bildet und auch im Sommer mehr Oberflächenabfluss und weniger Grundwasserneubildung stattfindet. Dies führt zu sehr niedrigen Grundwasserständen nach trockenen Jahren am Ende der jeweiligen Sommer, wie es auch in Abbildung 21 zu erkennen ist. Besonders extrem ist diese Entwicklung im Jahr 2015 zu beobachten. Hier findet im Winter keine eindeutige Auffüllung des Grundwasserkörpers statt. Nach DWD (2015) war dieses Jahr, sowie das vorausgehende, zu trocken und sonnenscheinreich. Geprägt von einer Dürre, die in manchen Teilen Deutschlands bereits im Februar begann, fiel nur wenig Schnee Ende Januar und Anfang Februar, welcher zumeist nach kurzer Zeit bereits wieder abtaute. Die Monate November und Dezember stellten bis zu diesem Zeitpunkt neue Temperaturrekorde seit Beginn der Wetteraufzeichnungen 1881 auf und auch das gesamte Jahr 2015 galt bis dahin als das zweitwärmste seit Aufzeichnungsbeginn.

In den früheren Jahren in Abbildung 21 ist zwischen April und Mai zumeist ein zweiter Peak im Grundwasserstand zu erkennen. Bedingt könnte dieser durch die Schneeschmelze in den höheren Lagen und den Schmelzwasserzufluss ins Zartner Becken im Frühjahr sein. Es ist zu beobachten, dass dieser Peak in den trockenen Jahren teilweise bis zu einem Monat früher auftritt. In den Jahren 2015 und 2018 ist dieser zweite Peak nicht mehr zu erkennen. Grund dafür sind die bereits erwähnten sehr geringen Schneefälle in diesen Wintern. Ab dem Jahr 2013 sind stattdessen jedoch Anstiege des Grundwasserspiegels in den Sommermonaten zwischen Juni und August erkennbar. Zu beobachten sind diese vor allem in den Messreihen, welche sich im südlichen Beckenbereich befinden, dort, wo die Aquifermächtigkeit gering und der Grundwasserspiegel vergleichsweise oberflächennah liegt. So zum Beispiel Messstelle PE35. Der Grundwasserspiegel reagiert an diesen Messstandorten sensibler auf Niederschläge, so auch auf sommerliche Starkregen, die vermutlich diese Anstiege bedingen. Zusätzlich kann auch hier, wie zuvor bereits erwähnt, der Zufluss aus den hohen Einzugsgebieten der südlichen Seitentäler zu diesem Effekt beitragen.

Das Jahr 2021 war zwar ein vergleichsweise feuchtes Jahr, doch sind die vorausgehenden Trockenjahre dem Grundwasserspiegel noch anzuerkennen. Die Auffüllphase des Grundwasserspiegels beginnt hier etwa einen Monat später als beispielsweise 2010.

Diskussion

Nach Fliß et al. (2021) traten seit dem Jahr 2003 keine sogenannten Nassjahre mehr auf. Leider standen für die Auswertung in dieser Arbeit keine Grundwasserstandsdaten für Jahre vor 2003 zur Verfügung. Die hier ausgewählten feuchten Jahre sind dementsprechend nur vergleichsweise feuchte Jahre im Betrachtungszeitraum dieser Arbeit.

Beim Vergleich des jährlichen Grundwasserdargebots mit dessen Förderung (siehe Abbildung 22), ist bei beiden Größen eine Abnahme zu erkennen. Mit 17 % ist die Abnahme der mittleren jährlichen Förderung über den gesamten betrachteten Zeitraum größer als die Abnahme des mittleren jährlichen Grundwasserdargebots mit 10 %. Vor allem 2003 und 2005 stechen als die ersten Jahre mit niedrigen Grundwassermengen der hier dargestellten Messreihe hervor. Dabei ist auch eine Anpassung der Fördermengen zu beobachten, die hier ebenfalls stark zurückgeht. Darauf führt sich der abnehmende Fördertrend fort. Für den Rückgang der Förderungen kann es verschiedene Gründe geben. Nach Rücksprache mit den badenovaNETZEN könnte dies unter anderem auf den Zustand der Brunnen des Wasserwerks Ebnet zurückzuführen sein. Altersbedingt bringen die Förderbrunnen nicht mehr die gleiche Leitung wie zu Betriebsbeginn. Der Rückgang ist nach Rücksprachen jedoch nicht auf einen geringeren Wasserbedarf zurückzuführen. Wie in Kapitel 6.2.1 bereits dargestellt, hat der Wasserbedarf pro Kopf in Freiburg in den letzten Jahren wieder zugenommen. Unter anderem deshalb sollen die Tagesförderspitzen des Wasserwerks Hausen a. d. M. erhöht werden, damit dieses, um steigende Bedarfsspitzen abzudecken, das Wasserwerk Ebnet entlasten kann. Zusätzlich könnte eine Teilursache des Rückgangs der Grundwasserförderungen eine Sensibilisierung gegenüber dem Wasserverbrauch in der Bevölkerung und Landwirtschaft durch das extrem trockene Jahr 2003 sein, wobei auch durch private Maßnahmen Wasser eingespart werden konnte.

Das Grundwasserdargebot im Zartner Becken nimmt im betrachteten Zeitraum sukzessiv ab. Auch ist in Süddeutschland eine langfristig abnehmende Tendenz in den Grundwasserständen und Quellschüttungen zu beobachten, wobei vor allem der Zeitraum seit 2003 mit unterdurchschnittlichen Grundwasserneubildungsraten auffällig ist (Fliß et al. 2021).

Der bereits zu beobachtende Rückgang der Grundwasserförderungen im Zartner Becken, sowie eine weitere Beobachtung der Dargebotssituation sind durchaus sinnvoll, um eine potenzielle Knappheit der Wasserressourcen im Zartner Becken frühzeitig auszumachen und um rechtzeitig Maßnahmen und Strategien zum Umgang mit dieser zu entwickeln. Dazu existieren bereits aktuelle und präzise Grundwassermodelle für das Gebiet und befinden sich in der Anwendung. Zusätzlich gilt es die Wassernutzungen zeitlich und räumlich abdeckender zu sammeln und dokumentieren, damit nicht nur jährliche, sondern auch saisonale Veränderungen analysiert werden können.

6.2.3 Einfluss Grundwasserförderung auf Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser

Auch bei sich verschärfenden Trockensituationen im Zartner Becken hat die Grundwasserförderung voraussichtlich keinen maßgeblichen Einfluss auf anliegende Oberflächengewässer. Die meisten Teile der Gewässer, in deren interaktiven Bereichen Grundwasserförderung stattfindet, weisen bei niedrigen Grundwasserverhältnissen schwebende Verhältnisse auf (Schelhorn und Schrempp 2021). In diesem Zustand besteht keine gegenseitige Beeinflussung von Grund- und Oberflächenwasser und somit auch keine Beeinträchtigung des Abflusses durch Grundwasserförderungen (siehe Abbildung 11). Je nach Interaktions- und Grundwasserstandsverhältnissen, könnte die Förderung jedoch dazu führen, dass sich der Kontaktpunkt zwischen Grund und Oberflächenwasser weiter Flussabwärts verschiebt.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es anliegend an Oberflächengewässer im Zartner Becken ökologisch relevante Auenbereiche und kleinere Süßwasserökosysteme gibt (LUBW 2022), deren Beeinflussung durch Grundwasserförderungen noch nicht untersucht ist. Auswirkungen auf diese wasserabhängigen Habitate und Systeme durch Grundwasserförderung können daher bis jetzt nicht vollständig ausgeschlossen werden.

6.2.4 Wassernutzungskonkurrenzen

Das bisherige Wassermanagement Deutschlands bezog sich hauptsächlich auf dessen Qualität, weniger auf die Quantität (Pahl-Wostl 2022). Doch wie Meder (2019) in ihrer Arbeit darstellt, sind diese beiden Parameter in Bezug auf die Ressource Wasser nicht voneinander zu trennen. Bei Konkurrenzen und Diskussionen, vor allem bei starker Trockenheit, handelt es sich jedoch in den aller meisten Fällen um die Wassermenge. In Baden-Württemberg verliefen nach Meder (2019) Auseinandersetzungen zum Thema Wasser und Wassernutzungen zum Großteil diskussionsorientiert. Im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit sind keine jüngsten Konkurrenzen oder Auseinandersetzungen bekannt. Da das Zartner Becken schon seit langer Zeit fast vollständig im Wasserschutzgebiet des Wasserwerks Ebnet liegt, bestimmt hier eine andere Landnutzungsdynamik und auch ein anderer Landnutzungsdruck das Gebiet. Anlieger und Anwohner besitzen vermutlich ein größeres Bewusstsein gegenüber der Vulnerabilität der Ressource Wasser, da dies ein womöglich im Alltag präsent Thema war und ist. Etwas anders könnte dies im anliegenden Oberrheinraumbereich sein. Hier spielt die Landwirtschaft eine dominante Rolle und auch die Grundwasserressourcen scheinen trotz des großen Vorkommens von zunehmender Trockenheit nicht ungefährdet zu sein wie beispielsweise Abbildung 1 darstellt. Im Jahr 2018 kamen im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald mit am meisten wasserbezogene Konflikte in Baden-Württemberg vor (Meder 2019).

In den Ergebnissen wurde auch erwähnt, dass es bei Ausweitung der Wasserquellen der öffentlichen Trinkwasserversorgung zu Beschwerden seitens der Konsumenten kam, die Veränderungen in ihrem Trinkwasser feststellten. Das Problem dabei war grundsätzlich jedoch nicht der sich veränderte Kalkgehalt. Vermutlich fanden die Beschwerden vor dem Hintergrund statt, dass sich die Trinkwassernutzer bei einer wichtigen Veränderung, die sie in ihrem alltäglichen Leben betrifft,

übergangen fühlten. Nach Bücker et al. (2012) ist die Beteiligung der Öffentlichkeit und das wertschätzende Erfassen der Meinung von Nutzern grundlegend für den nachhaltigen Umgang mit Wasserressourcen. Interessensgruppen seien frühzeitig zu identifizieren, um gemeinsam relevante Bewertungskriterien und Gewichtungsfaktoren für kommende Entscheidungen zu erarbeiten. Dies kann auch im Zartner Becken relevant werden. Im Vergleich mit ähnlichen Gebieten in Deutschland und Baden-Württemberg ist die Situation bezüglich Wasservorkommen und -konkurrenzen noch entspannt. Doch ist auch hier eine klimawandelbedingte Veränderung des Gebietes wahrscheinlich. Daher ist generell eine rechtzeitige Identifizierung aller anliegenden Interessensgruppen und die vorläufige Erarbeitung von Konzepten zu Entscheidungsprozessen durchaus sinnvoll.

Wie in Kapitel 5.3 dargestellt, reagieren verschiedene Sektoren auf unterschiedliche Trockenheitsindikatoren, die für den jeweiligen Arbeitsbereich von Bedeutung sind. Je extremer die Trockenheit, beziehungsweise Dürre, desto drastischer wird der Unterschied der Auswirkungen zwischen den Sektoren. Dies kann zu gegenseitigem Unverständnis bei beispielsweise einer Priorisierung in der Wassernutzung oder finanzieller Unterstützung des betroffenen Sektors führen. Bereits in der Vergangenheit haben Trockenheit und Dürren enorme wirtschaftliche Schäden hinterlassen (Löwe et al. 2012, S. 3; Bathiany et al. 2021). Mehreren Quellen zufolge werden diese in Zukunft mit voranschreitendem Klimawandel zunehmen, was ebenfalls Konkurrenz- und Konfliktpotentiale steigern kann (Briffa et al. 2009; Löwe et al. 2012; Bathiany et al. 2021; IPCC 2022). Um solche potenziell angespannten Situationen zu vermeiden, ist prinzipiell eine sektorenübergreifende Debatte notwendig.

Im Fall des Zartner Beckens ist aufgrund der starken Dominanz in der Wassernutzung der badenovaNETZE die Priorisierung eines bestimmten Sektors oder Akteurs unwahrscheinlich. Stattdessen wäre eine Veränderung in der Trinkwasserzusammensetzung der badenovaNETZE Versorgungsgebiete in Zukunft denkbar. Beispielsweise werden zukünftig Stadtgebiete, die zuvor durch das Wasserwerk Ebnet versorgt wurden, mit Trinkwasser aus dem Wasserwerk Hausen a. d. M. beliefert, das eine merkbar höheren Kalkgehalt aufweist. In diesem Fall gilt jedoch gleichermaßen Interessensgruppen in den Veränderungsprozess mit einzubeziehen.

Ökonomisch spielt das Gewerbe im Zartner Becken im Vergleich mit der Landwirtschaft und der öffentlichen Wasserversorgung eine untergeordnete Rolle in der Wassernutzung. Doch aufgrund der seit einigen Jahren wieder zunehmenden Agrarflächen im Untersuchungsgebiet steigt auch das potenzielle dürrebedingte wirtschaftliche Schadenspotenzial der Region (Löwe et al. 2012; Bathiany et al. 2021). Bei gleichbleibendem Anbau ist zukünftig von einem steigenden Bewässerungsbedarf auszugehen, der entweder in Konkurrenz in der Grundwasserförderung gegenüber der öffentlichen Wasserversorgung resultieren kann, oder auf diese zurückgreift, was für diese eine zusätzliche Belastung darstellen würde. Auch in diesem Fall stehen Baden-Württemberg und das Zartner Becken im deutschlandweiten Vergleich noch gut dar. Es sind bereits mögliche Tendenzen einer Entwicklung der regionalen

Diskussion

Wasserressourcen und damit auch mögliche Veränderungen der regionalen Wassernutzung zu erkennen. Die Möglichkeit konkurrenz-mildernde Konzepte im Voraus zu entwickeln, sollte jedoch genutzt werden. Als Vorlage dazu können andere Regionen in Baden-Württemberg und Deutschland genommen werden, die bereits solchen Krisensituationen gegenüberstehen oder diese bereits bewältigt haben. Denn es ist mutmaßlich von einer Veränderung und vermutlich Verschärfung der aktuellen Wasserhaushalts- und Wasserbedarfssituation auszugehen. Diese kommenden Herausforderungen gilt es genau abzuschätzen und mediativ mit allen Interessensgruppen zusammenzuarbeiten, um eine faire und nachhaltige Wasserbewirtschaftung im Zartner Becken auf zukünftig, frei von Konkurrenzen, erhalten zu können.

7 Fazit

Die Untersuchungen dieser Arbeit sollten eine erste Einschätzung der Wassernutzungssituation im Zartner Becken sein, um die Notwendigkeit oder Dringlichkeit eines gegebenenfalls sektorenspezifischen Wasserressourcenmanagements zu prüfen. Ziele dieser Arbeit waren dabei hauptsächlich bestehende Wassernutzungsinformationen aus den verschiedenen Institutionen zu sammeln, um einerseits Akteure und Sektoren daraus zu identifizieren und andererseits die genutzten Wassermengen mit dem -dargebot ins Verhältnis zu setzen. Auch sollte die Entwicklung des Grundwasservorkommens und regionaler Wassernutzungskonkurrenzen betrachtet und bewertet werden.

Alle gesetzten Ziele konnten erreicht werden: alle dokumentationspflichtigen Wassernutzungsinformationen wurden in monatlicher oder jährlicher Auflösung aus den unteren Wasserbehörden, sowie den Wasserversorgungsunternehmen für den Zeitraum von 1990 bis 2021 zusammengetragen (1). Standorte der Grundwasserförderung konnten dabei bestimmt und akteursspezifischen Nutzungskategorien zugewiesen werden. Daraus wurden die akteursspezifischen Wassernutzungen über den Beobachtungszeitraum dieser Arbeit analysiert, bewertet und mit den anderen Nutzungen ins Verhältnis gesetzt. Die Nutzung von Oberflächengewässern wurde geprüft und ausgeschlossen (2). Durch diese Arbeit konnte eine Übersicht der Datenquellen zu Wassernutzungen und vielen damit im Zusammenhang stehenden Informationen erstellt werden. Für mögliche auf diese Arbeit folgende Untersuchungen ist damit eine schnellere Prüfung der Datenverantwortlichkeiten und -lage möglich.

Durch die Berechnung des jährlichen Grundwasserdargebots seit 1990 mit Hilfe jährlicher Grundwasserneubildungsinformationen und den mittleren jährlichen Größen aus der Grundwasserbilanz konnten die absoluten jährlichen Grundwasserförderungen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit mit dem Dargebot ins Verhältnis gesetzt und bewertet werden. Ebenso trug dazu die Berechnung der mittleren jährlichen Grundwasserbilanz aus bereits bestehenden, sowie neu dazugewonnenen Größen bei. Die Versorgungssicherheit mit Trinkwasser durch den Aquifer im Zartner Becken wird trotz klimatisch bedingter Veränderungen im Grundwasserdargebot als gesichert und ebenso nach Vorgaben des WHG und des WG BW als nachhaltig bewertet. Eine generationsübergreifend gerechte Wasserressourcennutzung wird somit als gegeben betrachtet. Einflussnahme der Wassernutzungen im Zartner Becken auf ökologische Aspekte, wie beispielsweise Gewässerlandschaften und Auenbereiche sowie andere Süßwasserökosysteme, wurden noch nicht hinlänglich untersucht. Hier besteht für ein umfassendes Bild der Auswirkungen von Wasserbewirtschaftung im Zartner Becken noch Forschungsbedarf. Ökonomische Wassernutzungen machen im Vergleich zu denen der öffentlichen Wasserversorgung nur einen sehr geringen Teil aus. Daher haben diese nur einen geringfügigen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der allgemeinen Wassernutzungen im Untersuchungsgebiet (3). Der aktuelle Einfluss der Grundwasserförderung im Zartner Becken auf Oberflächengewässer wurde mittels

Literaturrecherche untersucht und zusammen mit den Analysen zur Grundwasserstands- und Dargebotsentwicklung zukünftige Interaktionsveränderungen bei potenzieller Zunahme von Trockenheit und Dürren eigenständig bewertet (4).

Die verschiedenen Auflösungsformate und Zeiträume des Grundwasserstandes haben eine Analyse zu Grundwasserauffüll- und Entleerungsdynamiken in trockenen sowie feuchten Jahren ermöglicht. Damit wurden Veränderungen in den saisonalen Grundwasserdynamiken im hydrologischen Jahr seit Beginn des Betrachtungszeitraums dieser Arbeit festgestellt und zusammen mit Ergebnissen aus der Literatur eine potenzielle Abschätzung zukünftiger Entwicklungen möglich. Zusätzlich konnte eine Zunahme von Grundwassertiefstständen in den letzten zehn Jahren des Betrachtungszeitraums ausgemacht werden (5).

Durch Zusammentragen regionaler Untersuchungen und Umfragen zu wasserbezogenen Konkurrenzen und Konflikten wurden viele Informationen gewonnen und die bisherige Konkurrenzsituation sowie deren Hintergrund und Eskalationsgrad ermittelt. Diese Aspekte konnten dann auf die ökonomische und ökologische Situation im Zartner Becken angewendet werden, was zur Bewertung einer potenziellen zukünftigen Entwicklung der Konkurrenzsituation in der Region beitrug (6).

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die öffentliche Trinkwasserversorgung den mit Abstand größten Teil der Grundwassernutzung im Zartner Becken einnimmt. Bei den nicht öffentlichen Nutzungen handelt es sich sowohl um privat als auch gewerblich genutzte Grundwasserförderungen. Diese bleiben jedoch weit unter den Fördermengen des öffentlichen Sektors. Sowohl das Grundwasserdargebot als auch dessen Förderungen sind etwa seit 2001 rückläufig. Dabei sinkt die Fördermenge stärker als das Dargebot. Gründe dafür können einerseits die über die Jahre altersbedingt abnehmende Brunnenförderkapazität der Tiefbrunnen des Wasserwerks Ebnet sein, andererseits spielen gegebenenfalls dargebotsangepasste Förderungen, sowie eine Sensibilisierung bei der Wassernutzung in der Bevölkerung vor dem Hintergrund immer öfter vorkommenden Trockenjahren und heißeren Sommern eine zunehmende Rolle. Auch aufgrund der positiven Grundwasserbilanz ist die aktuelle Wasserbewirtschaftung im Zartner Becken nachhaltig und bietet für die kommenden Jahre zunächst eine sichere Versorgung. Aktuell existieren keine bekannten wasserbezogenen Konkurrenzsituationen im Zartner Becken selbst, doch könnten Regionen wie der angrenzende Oberrheingraben Vorboten für eine zukünftig angespanntere Situation sein.

Interessant für auf diese Arbeit folgende Untersuchungen wäre es, den zukünftigen Wasserbedarf der Region auf Grundlage verschiedener Bevölkerungsprognosen und landwirtschaftlicher Entwicklung genauer zu betrachten. Zusammen mit der Anwendung bereits existierender Grundwassermodelle könnte dann genauer abgeschätzt werden, wann und in welchem Umfang die Trinkwasserversorgung basierend auf dem Aquifer im Zartner Becken ergänzt werden müsste. Ebenfalls gibt es Bedarf bei der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Grundwasserförderung und schützenswerten Gewässerlandschaften, beziehungsweise süßwasserabhängigen Biotopen. Dabei gilt es zu prüfen,

Fazit

inwieweit diese ökologischen Systeme jeweils vom Grund- oder Oberflächenwasser abhängig sind und wie eine mögliche Interaktion bei Trockenheit oder Dürre zu bewerten ist.

Als generelle Aufgabe ergibt sich aus dieser Arbeit die Datenlage zu Wassernutzungen im Zartner Becken zu verbessern. Den unteren Wasserbehörden liegen nur Nutzungen über 4 000 m³ pro Jahr in maximal monatlicher, meist nur jährlicher Auflösung vor, in denen auch die Fördermengen der Trinkwasserversorgung enthalten sind. Auch wenn diese den signifikanten Teil der Grundwasserförderung einnehmen, ist es dennoch bedeutend ein ganzheitliches Bild der Lage im Zartner Becken zu betrachten.

Durch die globale Erwärmung und einer sich voraussichtlich verändernden Saisonalität des Wasserhaushalts wird der Druck auf die Ressource Wasser steigen. Baden-Württemberg gehört in Deutschland bisher nicht zu den am stärksten von Dürre und Trockenheit betroffenen Bundesländern. Jedoch geben diese Länder einen Ausblick auf die potenziell, durch das Vorschreiten des Klimawandels bedingte, zukünftige Situation. Klimaprognosen zufolge wird sich in Zukunft auch die Wassersituation im Zartner Becken verschärfen. Durch zusätzlich nötige Bewässerungen und einen erhöhten Wasserbedarf von Haushalten und Gewerbe steigt voraussichtlich der Druck auf die öffentliche Trinkwasserversorgung. Auch können illegale Entnahmen oder Mehrentnahmen aus Oberflächen- und Grundwasser wahrscheinlicher werden. Daher gilt es den aktuellen Handlungsraum zu nutzen, um die Vorsorge kommender Dürren, Trockenheit und Niedrigwasser hinsichtlich öffentlichen, gewerblichen, ökologischen und privaten Interessen voranzutreiben. Dazu ist es wichtig alle Interessensgruppen frühzeitig zu identifizieren, um gemeinsam Konzepte und Entscheidungsprozesse für nachhaltige und faire Regelungen bei Wasserknappheit zu erarbeiten. Dabei sollten süßwasserabhängige Ökosysteme genauso berücksichtigt werden, wie die Trinkwasserversorgung und existenziell wichtige ökonomische Nutzungen des Grundwassers.

Literaturverzeichnis

- Bathiany, Sebastian; Ney, Patrizia; Belleflamme, Alexandre; El Zohbi, Juliane; Goergen, Klaus; Rechid, Diana (2021): Entwicklung von Dürren in Deutschland, Europa und weltweit. Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg. In: *Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Graßl & D. Kasang (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*, S. 310–318. DOI: 10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.43.
- Beck, Hylke E.; Zimmermann, Niklaus E.; McVicar, Tim R.; Vergopolan, Noemi; Berg, Alexis; Wood, Eric F. (2018): Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. In: *Scientific data* 5 (1), S. 1–12.
- Beule, Katharina; Kleinberger, Lisa; Reinhard, Charlotte; Stangenberg, Lena (2019): Was tun, wenn Quellen Trocken fallen? In: *Lahrer Zeitung Verlagshaus*, 18.01.2019. Online verfügbar unter <https://www.schwarzwaelder-bote.de/inhalt.haslach-i-k-was-tun-wenn-quellen-trocken-fallen.2d88a4fb-f786-4e56-989a-b4c267f8efad.html>, zuletzt geprüft am 06.12.2022.
- Blauhut, Veit; Fleischer, Claudius; Stölzle, Michael (2017): Pilotstudien zum Niedrigwassermanagement in Baden-Württemberg. Abschlussbericht. Pilotgebiete: Dreisam und Leimbach. Unter Mitarbeit von Kerstin Stahl und Markus Weiler. Hg. v. LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Professur für Hydrologie und Professur für Umwelthydrosysteme, Albert-Ludwigs Universität Freiburg. Freiburg im Breisgau, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- Blauhut, Veit; Stahl, Kerstin (2018): Risikomanagement von Dürren in Deutschland: von der Messung von Auswirkungen zur Modellierung. In: *Forum Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (39), S. 203–213.
- BMUV (31.06.2009): Wasserhaushaltsgesetz. WHG. Fundstelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV).
- BMUV (Hg.) (2021): Nationale Wasserstrategie. Entwurf des Bundesumweltministeriums. Unter Mitarbeit von Franz Emde, Thomas Stratenwerth, BMUV, AG WR I 1-w, Fresh Thoughts Consulting GmbH, Franz Emde. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV). 1. Aufl. Bonn: BMU-Hausdruckerei, zuletzt geprüft am 18.08.2022.
- bnNETZE (2020): Hydrologischer Erläuterungsbericht zur Beantragung einer Wasserrechtlichen Bewilligung für die Grundwasserförderung zu Trinkwasserversorgungszwecken aus den Brunnen des Wasserwerks Hausen a. d. M. Unter Mitarbeit von Bieske und Partner - beratende Ingenieure GmbH. Hg. v. bnNetze GmbH.
- bnNETZE (2022): Informationen zu Grundwasserstand, eigenen Grundwassernutzungen und Landnutzung 2014 im Zartner Becken. Hg. v. bnNetze GmbH. Freiburg im Breisgau.
- Brasseur, Guy P.; Jacob, Daniela; Schuck-Zöller, Susanne (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven: Springer Nature.
- Brielmann, Heike; Lueders, Tillmann; Schreglmann, Kathrin; Ferraro, Francesco; Avramov, Maria; Hammerl, Verena et al. (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. In: *Grundwasser* 16 (2), S. 77. DOI: 10.1007/s00767-011-0166-9.
- Briffa, Keith R.; van der Schrier, Gerard; Jones, Philip D. (2009): Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought. In: *International Journal of Climatology* 29 (13), S. 1894–1905.
- Bücker, Amelie; Kaiser, Knut; Schlippenbach, Ulrike von (2012): Georessource Wasser. Herausforderung Globaler Wandel. Ansätze und Voraussetzungen für eine integrierte

Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (2020): Verwaltungsgrenzen. Hg. v. Bundesamt für Kartografie und Geodäsie. Online verfügbar unter https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete.html?__store=default, zuletzt geprüft am 14.09.2022.

Cammalleri, C.; Naumann, G.; Mentaschi, L.; Formetta, G.; Forzieri, G.; Gosling, S. et al. (2020): Global Warming and drought impacts in the EU, EUR 29956 EN, JRC118585, Publications Office of the European Union, Luxembourg. In: 92761294.

Doerr, Stefan H.; Shakesby, R. A.; Walsh, R.P.D. (2000): Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. In: *Earth-Science Reviews* 51 (1-4), S. 33–65.

Dornbusch, F.; Nienhaus, C. (2020): Hydrogeologischer Erläuterungsbericht zur Beantragung einer wasserrechtlichen Bewilligung für die Grundwasserförderung zu Trinkwasserversorgungszwecken aus dem Brunnen des Wasserwerks Hausen a. d. M. Hg. v. Bieske und Partner - beratende Ingenieure GmbH im Auftrag der bnNETZE GmbH. Lohmar.

DWD (2009a): Deutschlandwetter im Sommer 2009. Offenbach. Kirsche, Uwe; Lux, Gerhard, Frankfurter Straße 135 63067 Offenbach am Main pressestelle@dwd.de. Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2009/20090829_deutschlandwetter_sommer.html, zuletzt geprüft am 20.12.2022.

DWD (2009b): Deutschlandwetter im Winter 2008/2009. Offenbach. Kirsche, Uwe; Lux, Gerhard, Frankfurter Straße 135 63067 Offenbach am Main pressestelle@dwd.de. Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2009/20090226_deutschlandwetter_winter2008_2009.html, zuletzt geprüft am 20.12.2022.

DWD (2011): Deutschlandwetter im Jahr 2011. Offenbach. Kirsche, Uwe; Lux, Gerhard, Frankfurter Straße 135 63067 Offenbach am Main pressestelle@dwd.de. Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2011/20111229_deutschlandwetter_jahr.html, zuletzt geprüft am 20.12.2022.

DWD (2015): Deutschlandwetter im Jahr 2015. Offenbach. Kirsche, Uwe; Lux, Gerhard, Frankfurter Straße 135 63067 Offenbach am Main pressestelle@dwd.de. Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2015/20151230_deutschlandwetter_jahr2015.html, zuletzt geprüft am 20.12.2022.

DWD (2018): Deutschlandwetter im Winter 2017/18. Offenbach. Kirsche, Uwe; Lux, Gerhard, Frankfurter Straße 135 63067 Offenbach am Main pressestelle@dwd.de. Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20180227_deutschlandwetter_winter.html, zuletzt geprüft am 20.12.2022.

DWD (2022a): CDC - Climate Data Center. Online verfügbar unter <https://cdc.dwd.de/portal/>.

DWD (2022b): Geoportal. Online verfügbar unter <https://dwd-geoportal.de/>.

Ebbmeyer, Bernd (2020): Dreisamtal - Zartner Becken. Hg. v. Bernd Ennmeyer. Freiburg. Online verfügbar unter <https://dreisamtal-online.eu/landschaft/gewanne/zartnerbecken/artikel.html>, zuletzt geprüft am 14.09.2022.

Ehrminger, B.; Herdeg, U. (1992): Abschlussbericht über die isopenhydrologischen Untersuchungen und die erstellten Grundwassermodelle im Einzugsbereich des Wasserwerks Ebnet. Untersuchungen der Freiburger Energie- und Wasserversorgungs-AG und des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg. Hg. v. Freiburger Energie- und Wärmeversorgung, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg. Freiburg im Breisgau.

Fleiß, Ronja; Baumeister, Christof; Gudera, Thomas; Hergesell, Mario; Kopp, Benjamin; Neumann, Jörg; Posselt, Miriam (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland. In: *Grundwasser* 26 (1), S. 33–45. DOI: 10.1007/s00767-021-00477-z.

Fohrer, Nicola; Bormann, Helge; Miegel, Konrad; Casper, Markus (2016): Hydrologie: UTB (4513).

Frieg, Bernhard (1987): Hydrogeologie und Grundwasserhydraulik des Einzugsgebietes des Wasserwerkes Freiburg-Ebnet. Dissertation. Ruprechts-Karls-Universität, Heidelberg. Naturwissenschaftliche-Mathematische Gesamtfakultät.

GIT HydroS Consult GmbH (2022): Grundwassernutzungsinformationen Gemarkung Freiburg. Freiburg im Breisgau.

Grotzinger, John; Jordan, Thomas (2017): Der Kreislauf des Wassers und das Grundwasser. In: John Grotzinger und Thomas Jordan (Hg.): *Press/Siever Allgemeine Geologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 469–500. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-662-48342-8_17.

Hellwig, Jost (2019): Grundwasserdürren in Deutschland von 1970 bis 2018. In: *Deutsche Nationalbibliothek*.

IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi et al. Hg. v. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC (2022): Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. In: *IPCC Sixth Assessment Report*.

Joeres, Anika; Steeger, Gesa; Huth, Kathrin; Donheiser, Max; Wörpel, Simon (2022a): Wo in Deutschland das Grundwasser sinkt. Grundwasser-Atlas. In: *CORRECTIV – Recherchen für die Gesellschaft gemeinnützige GmbH*. Online verfügbar unter https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/10/25/klimawandel-grundwasser-in-deutschland-sinkt/?utm_source=pocket-newtab-global-de-DE&bbox=5.4850039355987406%2C46.37952421841322%2C14.789587430058532%2C55.72646743524618&zoom=5.414948112172262, zuletzt geprüft am 27.10.2022.

Joeres, Anika; Steeger, Gesa; Huth, Kathrin; Jacobsen, Marlene; Donheiser, Max (2022b): Ausgetrocknet. Deutschland kämpft um Wasser. In: *CORRECTIV – Recherchen für die Gesellschaft gemeinnützige GmbH*. Online verfügbar unter <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/06/14/klimawandel-konflikt-um-wasser-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 27.10.2022.

Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald (Hg.) (2022a): Grundwassernutzungsdaten im Zartner Becken.

Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald (2022b): Rechtsverordnung des Landratsamtes Breisgau-Hochschwarzwald über die Einschränkung des Gemeindegebrauchs.

Lehn, Helmut; Steiner, Magdalena; Mohr, Hans (1996): Wassernutzung in Baden-Württemberg. In: Helmut Lehn, Magdalena Steiner und Hans Mohr (Hg.): *Wasser — die elementare Ressource*:

Leitlinien einer nachhaltigen Nutzung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 45–164. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-642-80160-0_3.

Löwe, Helmut; Schade, Johannes; Höcke, Verena (2012): Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM). im Rahmenprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklungen“ (FONA). Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Referat 724 – Ressourcen und Nachhaltigkeit. Bonn, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

LUBW (2013): Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/klimakarten-bw#_48_INSTANCE_WsMA2RqVvsNR_%253Dhttps%25253A%25252F%25252Fwww.lubw.baden-wuerttemberg.de%25252Fstatic-content%25252FkartenKlimaBW%25252F%3D%26_48_INSTANCE_WsMA2RqVvsNR_%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.lubw.baden-wuerttemberg.de%252Fstatic-content%252FkartenKlimaBW%252FJahresmitteltemperatur-ist_25km.html, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

LUBW (2019): Zu warm, zu heiß, zu trocken? Eine klimatische Einordnung des Jahres 2018 für Baden-Württemberg. Unter Mitarbeit von Kai Höpker, Sabrina Pleginere, Sandra Dezenter, Doreen Metzner, Renate Semmler-Elpers, Gabriele Fink et al. Hg. v. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Karlsruhe.

LUBW (2022): Daten- und Kartendienst der LUBW. Online verfügbar unter <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>.

Meder, Leonie (2019): Categorizing drought-related water conflicts in Baden-Württemberg in 2018. Masterthesis. Albert-Ludwigs Universität, Freiburg im Breisgau. Institut für Forst- und Umweltpolitik, zuletzt geprüft am 12.10.2022.

Meder, Leonie; Mueller, Wibke; Kruse, Sylvia; Stoelzle, Michael (2020): Water Use Conflicts in Baden-Württemberg in the Drought Year 2018: BUNDESANSTALT GEWASSERKUNDE-BFG POSTFACH 200 253, KOBLENZ, 56002, GERMANY (64). In: *HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG* (3).

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (03.12.2013): Wassergesetz für Baden-Württemberg. WG. Fundstelle: Landesrecht Baden-Württemberg Bürgerservice, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Mohl, Anette (2016): Versiegende Quellen, extremer Wassermangel. Trockenheit in Baden-Württemberg. In: *Stuttgarter Nachrichten Verlagsgesellschaft mbH*, 09.02.2016. Online verfügbar unter <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.trockenheit-in-baden-wuerttemberg-versiegende-quellen-extremer-wassermangel.b3e79fd8-a4a1-4a13-9720-5ca017eebb6c.html>, zuletzt geprüft am 06.12.2022.

Morhard, Andreas; Kern, Franz-Josef (2013): Grundwassermodell Zartener Becken. Modellaktualisierung und -Anpassung. im Auftrag der badenova AG & Co. KG. Unter Mitarbeit von Andreas Morhard und Franz-Josef Kern. Hg. v. GIT HydroS Consult GmbH. Freiburg, zuletzt geprüft am 17.08.2022.

Nixon, S. C.; Lack, T. J.; Hunt, D. T.E.; Lallana, C.; Boschet, A. F.; l'Eau, Agences de; Leader, ETCIW (2000): Sustainable use of Europe's water. In: *State, prospects and issues, European Environmental Agency, Environmental Assessment Series* (7).

Pahl-Wostl, C. (2022): Wasserwirtschaft - Wege aus der Trockenheit. In: *Spektrum der Wissenschaft* (11.22), Artikel 2057454, S. 47–54.

- Peyk, Stefanie; Schütze, Sabine (2022): Grundwasserschwind: Wasserknappheit im Südwesten. Klimawandel und Dürre. In: *SWR Wissen*, 22.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.swr.de/wissen/wasserknappheit-im-suedwesten-100.html>, zuletzt geprüft am 06.12.2022.
- Rodell, Matthew; Famiglietti, Jay S.; Wiese, David N.; Reager, J. T.; Beaudoin, Hiroko K.; Landerer, Felix W.; Lo, M-H (2018): Emerging trends in global freshwater availability. In: *Nature* 557 (7707), S. 651–659.
- Schelhorn, Joscha (2022): Grundwassermodell Zartener Becken Modelldokumentation und Modellergebnisse. im Auftrag von badenova AG & Co. KG. Hg. v. GIT HydroS Consult GmbH. Freiburg im Breisgau.
- Schelhorn, Joscha; Schrempp, Stephen (2021): Grundwassereinfluss auf die Fließgewässer im Zartener Becken. Im Auftrag von bnNetze GmbH. Hg. v. GIT HydroS Consult GmbH. Freiburg im Breisgau, zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- Schork, Joachim (2022): Change ggplot2 Color & Fill Using scale_brewer Functions & RColorBrewer Package in R. Hg. v. Statistics Globe. Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://statisticsglobe.com/scale-colour-fill-brewer-rcolorbrewer-package-r>, zuletzt aktualisiert am 22.03.2022, zuletzt geprüft am 31.10.2022.
- Selz, Martin (2022): Landnutzungskartierung des Zartner Becknes 2014. Hg. v. bnNetze GmbH.
- Selz, Martin; Betting, Dirk; Morhard, Andreas; Kern, Franz-Josef; Schrempp, Stephen (2006): Nitrathaushalt und Eintragspotentiale der Trinkwassergewinnungsgebiete. Entwicklung einer Auskunftsplattform Gewässerschutz. Abschlußbericht. Hg. v. Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz. badenova AG & Co. KG. Freiburg im Breisgau.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2021): Bevölkerung, Gemeindegebiet und Bevölkerungsdichte. Landesinformationssystem (LIS). Ergebnisse der Bevölkerungsfortschreibung auf Basis Zensus 2011. Hg. v. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/GebietFlaeche/01515020.tab?R=>, zuletzt geprüft am 16.08.2022.
- Stoelzle, Michael; Stein, Lina (2021): Rainbow color map distorts and misleads research in hydrology—guidance for better visualizations and science communication. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 25 (8), S. 4549–4565.
- Stölzle, Michael; Stahl, Kerstin (2011): Wassernutzung und Trockenheitsindikatoren in Baden-Württemberg. In: *Standort* 35 (3), S. 94–101.
- Thober, Stephan; Marx, Andreas; Boeing, Friedrich (2018): Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erwärmung von 1.5 Grad. In: *Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH — UFZ: Leipzig, Germany*.
- Umwelt Bundesamt (2019): WW-R-1: Wassernutzungsindex. Hg. v. Umwelt Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/ww-r-1-das-indikator>, zuletzt aktualisiert am 23.09.2020, zuletzt geprüft am 16.01.2023.
- Umweltbundesamt (2014): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Unter Mitarbeit von Christian Griebler, Claudia Kellermann, Christine Stumpp, Florian Helger, David Kuntz und Simone Walker-Hertkorn. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-thermischer-veraenderungen-infolgender>, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Umweltministerium Baden-Württemberg (2009a): Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Unter Mitarbeit von Michael Bauer, David Bendel, Albert Eppinger, Wilhelm Franßen, Michael Heinz, Bernhard Keim et al. Hg. v. Umweltministerium Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Erneuerbare_Energien/Geothermie/4_Arbeitshilfe_zum_Leitfaden.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Umweltministerium Baden-Württemberg (2009b): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Unter Mitarbeit von Michael Bauer, Albert Eppinger, Wilhelm Franßen, Michael Heinz, Bernhard Keim, Dirk Mahler et al. Hg. v. Umweltministerium Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/1_Leitfaden_Erdwaerme_Grundwasserwaermepumpen.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2023.

Wirsing, G.; Ohnemus, J. (1998): Hydrologischer Bau in den Einzugsgebieten der Brunnen der Freiburger Energie- und Wasserversorgungs AG. Wasserwerk Ebnet, Wasserwerk Hausen an der Möhlin. Hg. v. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. Freiburg im Breisgau.

Zhu, Ke; Blum, Philipp; Ferguson, Grant; Balke, Klaus-Dieter; Bayer, Peter (2010): The geothermal potential of urban heat islands. In: *Environmental Research Letters* 5 (4), S. 44002.

Anhang

Tabelle 4

Übersicht der zusammengetragenen Daten. Aufgeführt sind Datenherkunft, Bezeichnung, ID der Messstelle (falls vorhanden), Ort der Datenaufnahme, Status zur Datenqualität, Einheit, Zeitraum der Datenverfügbarkeit, Datenauflösung, Bemerkungen zu Besonderheiten/ Merkmalen und ob die Daten in dieser Arbeit verwendet wurden.

Institution	Datenart	Ort Pegel/ Nu	Pegelnummer	Status Datenqualität	Einheit	Zeitraum		Auflösung	Bemerkung	Verwendet
						von	bis			
bnNetze	Grundwasserspiegel									
			PE05	Rohdaten	m von Rohrkante	01.01.2008	02.03.2020	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE06	Rohdaten	m von Rohrkante	01.01.2008	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE12	Rohdaten	m von Rohrkante	14.01.2008	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE44	Rohdaten	m von Rohrkante	01.01.2008	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE51	Rohdaten	m von Rohrkante	18.01.2021	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	nein
			PE42	Rohdaten	m von Rohrkante	14.04.2022	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE41	Rohdaten	m von Rohrkante	01.01.2008	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE35	Rohdaten	m von Rohrkante	16.01.2008	14.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE34	Rohdaten	m von Rohrkante	16.01.2008	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
			PE20	Rohdaten	m von Rohrkante	01.01.2008	30.06.2022	stündlich	mit Rohkante auf m ü NN umgerechnet & monatl. aggregierten Daten verwendet	ja
	Grundwasserhöhen									
			PE01	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE02	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE6	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE14	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE20	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE23	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE25	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE26	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE27	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE29	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE33	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE34	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE38	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE39	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE40	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE41	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
			PE46	Handmessungen	m. ü. NN	1987	2021	Tageswerte	zweiwöchig, monatlich, zweimonatlich	ja
	Fördermengen, GW-Stand TB									ja
			HU1	Rohdaten	Fördermenge m ³ , Grundwasserstand m ü NN	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
			HU2	Rohdaten	Fördermenge m ³ , Grundwasserstand m ü NN	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
			HU3	Rohdaten	Fördermenge m ³ , Grundwasserstand m ü NN	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
			K2	Rohdaten	Fördermenge m ³ , Grundwasserstand m ü NN	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
			K5	Rohdaten	Fördermenge m ³ , Grundwasserstand m ü NN	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
			S2	Rohdaten	Fördermenge m ³	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
			S4	Rohdaten	Fördermenge m ³ , Grundwasserstand m ü NN	01.01.2019	01.01.2022	stündlich		ja
	Fördermengen TB									
			HU1	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			HU2	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			HU3	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			K2	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			K5	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			S2	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			S4	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			L3	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
			R5	Rohdaten	Fördermenge m ³	Jan 90	Dez 21	monatlich		ja
	Klimastation Ebnet									ja
		Ebnet	T Luft, T Boden, P, W, RF; min, max, mean	Rohdaten	°C, mm, km/h, ??	01.04.2002	31.03.2022	täglich		ja
		Ebnet	T Luft, T Boden, P, W, RF; min, max, mean	ausgewertet	°C, mm, km/h, ??	01.04.2002	31.03.2022	täglich		ja
DWD										
	Klimastation Buchenbach	Buchenbach	ID 757	Rohdaten	Temperatur °C	01.10.1990	26.07.2022	täglich		nein
statistisches Landesamt	Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung					1991	2019	jährlich	nach Wirtschaftsbereichen	ja
			Insgesamt		1000 m ³ , Anz. Wasserversorgungsunternehmen (WVU)	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja
			Grundwasser		1000 m ³ , Anz. WVU	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja
			Quellwasser		1000 m ³ , Anz. WVU	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja
			Uferfiltrat		1000 m ³ , Anz. WVU	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja
			angereichertes Grundwasser		1000 m ³ , Anz. WVU	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja
			See- und Talsperren		1000 m ³ , Anz. WVU	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja
			Flusswasser		1000 m ³ , Anz. WVU	2019	2019	jährlich	Daten für das Jahr 2019	ja

	Bevölkerungsdichte, Gemeindegebiet, Bevölkerung											ja
		Kirchzarten			EW/km ² , ha, Anz.	1961	2021	jährlich				ja
		Oberried			EW/km ² , ha, Anz.	1961	2021	jährlich				ja
		Buchenbach			EW/km ² , ha, Anz.	1961	2021	jährlich				ja
		Stegen			EW/km ² , ha, Anz.	1961	2021	jährlich				ja
Umweltamt Freiburg	Wassernutzung Freiburg											
			Industrie und Gewerbe	Datenangabe Umweltschutzamt Freiburg	Grundwasserentnahmen m ³	2010	2021	jährlich	nur entgeltpflichtige Entnahmen > 4000 m ³ /Jahr in Verwaltungsgebiet Freiburg --> Datenqualität zur Auswertung nicht ausreichend			nein
			Bäder/ Freizeiteinrichtungen	Datenangabe Umweltschutzamt Freiburg	Grundwasserentnahmen m ³ 132	2010	2021	jährlich	nur entgeltpflichtige Entnahmen > 4000 m ³ /Jahr in Verwaltungsgebiet Freiburg --> Datenqualität zur Auswertung nicht ausreichend			nein
			Sportvereine	Datenangabe Umweltschutzamt Freiburg	Grundwasserentnahmen m ³ 133	2010	2021	jährlich	nur entgeltpflichtige Entnahmen > 4000 m ³ /Jahr in Verwaltungsgebiet Freiburg --> Datenqualität zur Auswertung nicht ausreichend			nein
			Landwirtschaftliche/ gärtnerische Beregnung	Datenangabe Umweltschutzamt Freiburg	Grundwasserentnahmen m ³ 134	2010	2021	jährlich	nur entgeltpflichtige Entnahmen > 4000 m ³ /Jahr in Verwaltungsgebiet Freiburg --> Datenqualität zur Auswertung nicht ausreichend			nein
			Trinkwasserversorgung	Datenangabe Umweltschutzamt Freiburg	Grundwasserentnahmen m ³ 135	2010	2021	jährlich	nur entgeltpflichtige Entnahmen > 4000 m ³ /Jahr in Verwaltungsgebiet Freiburg --> Datenqualität zur Auswertung nicht ausreichend			nein
Landratsamt (Frau Mündlein)	Wasserentnahmen Dritter											
		Buchenbach	11/170-2	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Buchenbach	19/170-6	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021					ja
		Buchenbach	46/170-9	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Buchenbach	51/170-8	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Buchenbach	66/170-1	Datenangabe Landratsamt	m ³	1987	2021	monatlich				ja
		Buchenbach	2006/170-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	2001	2020	monatlich				ja
		Buchenbach	2039/170-5	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Buchenbach	2061/170-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	2019	2020	monatlich				ja
		Buchenbach	Wagensteigbach	Datenangabe Landratsamt	m ³	2004	2021	jährlich	Brauchwasser			ja
		Buchenbach	Spirzenbach	Datenangabe Landratsamt	m ³	1995	2021	jährlich	Beregnung Nassholzlager			ja
		Kirchzarten	247/120-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	1984	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	251/120-4	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2002	monatlich				ja
		Kirchzarten	253/120-5	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	254/120-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	265/120-2	Datenangabe Landratsamt	m ³	1988	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	266/120-8	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	373/120-5	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	377/120-7	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	379/120-8	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	380/120-5	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	381/120-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	382/120-6	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	384/120-7	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	385/120-2	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	386/120-8	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	4817/120-8	Datenangabe Landratsamt	m ³	2003	2021	monatlich				ja
		Kirchzarten	4828/120-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	2011	2021	monatlich				ja
		Oberried	9/121-4	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	jährlich	2010-2021 monatlich			ja
		Oberried	13/120-5	Datenangabe Landratsamt	m ³	2007	2021	monatlich				ja
		Oberried	35/120-9	Datenangabe Landratsamt	m ³	1984	2021	monatlich				ja
		Oberried	146/121-0	Datenangabe Landratsamt	m ³	1987	2021	monatlich				ja
		Oberried	147/121-6	Datenangabe Landratsamt	m ³	1987	2021	monatlich				ja
		Oberried	159/121-3	Datenangabe Landratsamt	m ³	1990	2021	monatlich				ja

		Oberried	4820/120-6	Datenangabe Landratsamt	m³	2007	2021	monatlich		ja
		Oberried	4825/120-3	Datenangabe Landratsamt	m³	2009	2012	jährlich	2009 monatlich	ja
		Oberried	7007/121-0	Datenangabe Landratsamt	m³	1990	2021	monatlich		ja
		Oberried	359/120-5	Datenangabe Landratsamt	m³	1995	1996	monatlich	keine Koordinaten vorhanden	ja
		Oberried	Quellbach	Datenangabe Landratsamt	m³	2003	2021	jährlich		ja
		Stegen	51/169-9	Datenangabe Landratsamt	m³	1987	2021	monatlich	1987-1990 jährlich	ja
		Stegen	711/119-6	Datenangabe Landratsamt	m³	1990	1993	monatlich	1990, 1991 nur jährlich	ja
		Stegen	716/119-3	Datenangabe Landratsamt	m³	1990	2005	monatlich	1990-1995 jährlich	ja
		Stegen	3235/119-9	Datenangabe Landratsamt	m³	2006	2021	monatlich	2009-2013 jährlich	ja
		Stegen	4836/120-5	Datenangabe Landratsamt	m³	2018	2021	monatlich		ja
GIT HydroS Consult GmbH	Wasserentnahmen Dritter (Weitergabe von Ursprung Umweltschutzamt Freiburg)									
		Freiburg	2174/120-2	Datenangaben Umweltschutzamt, Aufbereitung GIT HydroS Colsult	m³	2007	2019	monatlich		ja
		Freiburg	2225/120-3	Datenangaben Umweltschutzamt, Aufbereitung GIT HydroS Colsult	m³				Wassernutzung von 8000 m³/a beantragt, doch noch keine Nutzung dokumentiert	ja
		Freiburg	0726/120-9	Datenangaben Umweltschutzamt, Aufbereitung GIT HydroS Colsult	m³	1987	1989	monatlich		ja
		Freiburg	0910/120-4	Datenangaben Umweltschutzamt, Aufbereitung GIT HydroS Colsult	m³	1989	2010	monatlich		ja
		Freiburg	0705/120-0	Datenangaben Umweltschutzamt, Aufbereitung GIT HydroS Colsult	m³	2005	2019	monatlich		ja
		Freiburg	0722/120-7	Datenangaben Umweltschutzamt, Aufbereitung GIT HydroS Colsult	m³	1987	2017	monatlich		ja

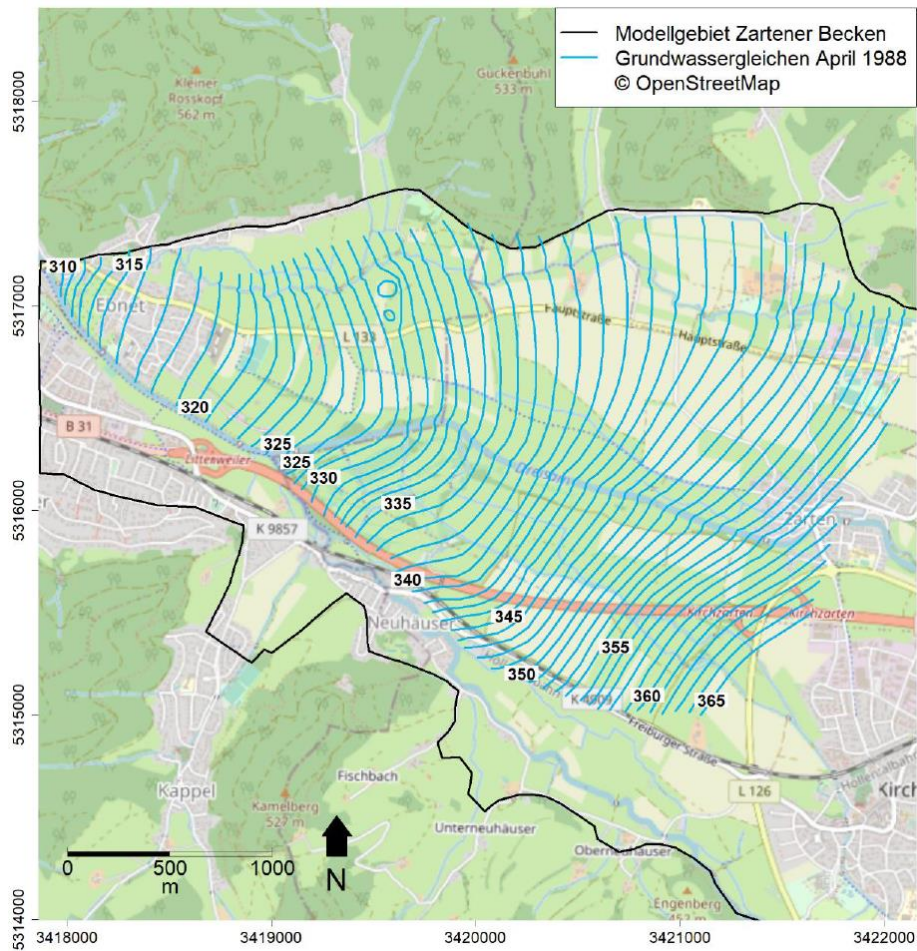


Abbildung 24 Grundwassergleichenplan für hohe Grundwasserverhältnisse. Basierend auf der Stichtagsmessung vom 13.04.1988 (Schelhorn und Schrempf 2021)

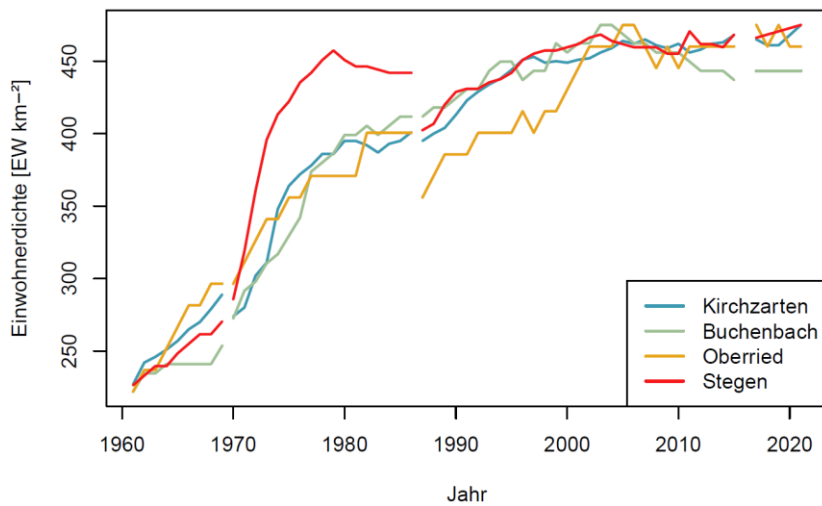


Abbildung 25 Entwicklung der Einwohnerdichte der im Zartener Becken liegenden Gemeinden, 1960 bis 2020. Verändert nach Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2021).

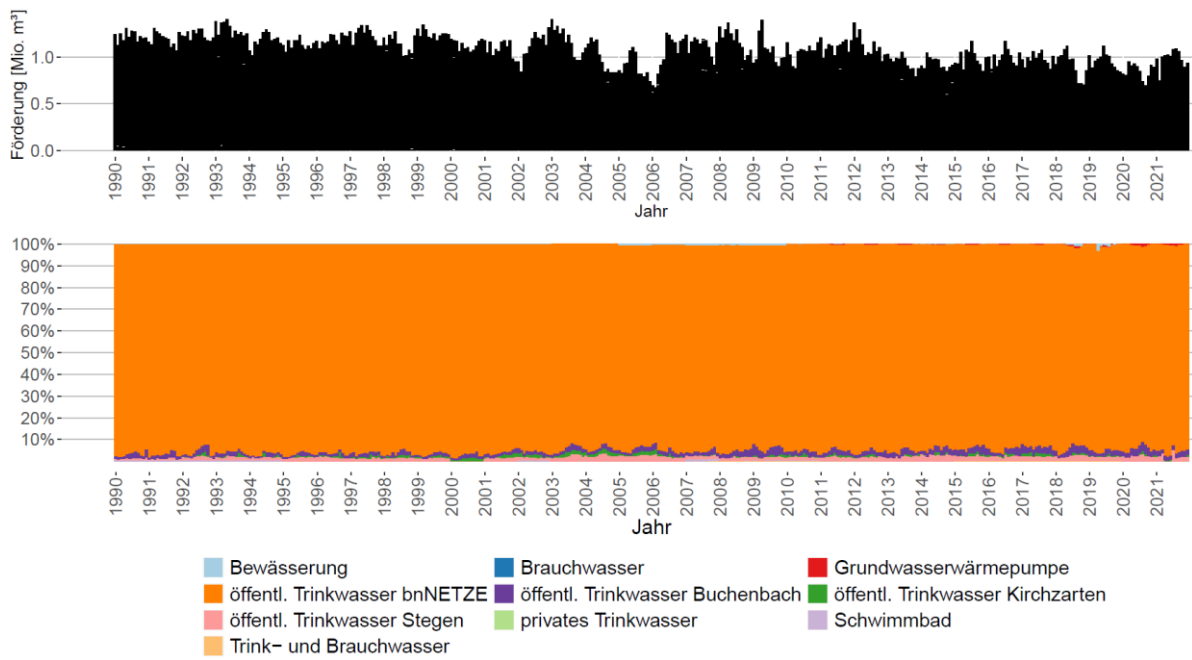


Abbildung 26 Absolute monatliche Wassermutzungen im Zarter Becken in 1000 m³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (bnNETZE 2022; GIT HydroS Consult GmbH 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a)

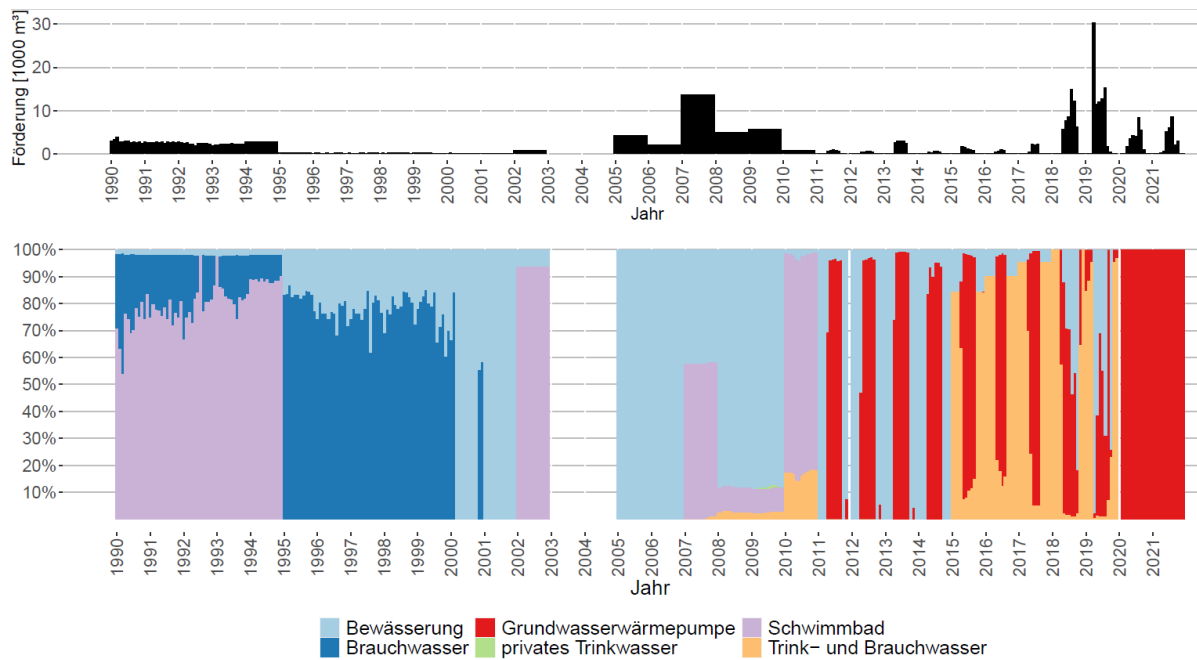


Abbildung 27 Absolute monatliche nicht öffentlichen Wassermutzungen im Zarter Becken in 1000 m³ und prozentuale Anteile der jeweiligen Akteure an der Förderung (bnNETZE 2022; GIT HydroS Consult GmbH 2022; Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald 2022a)

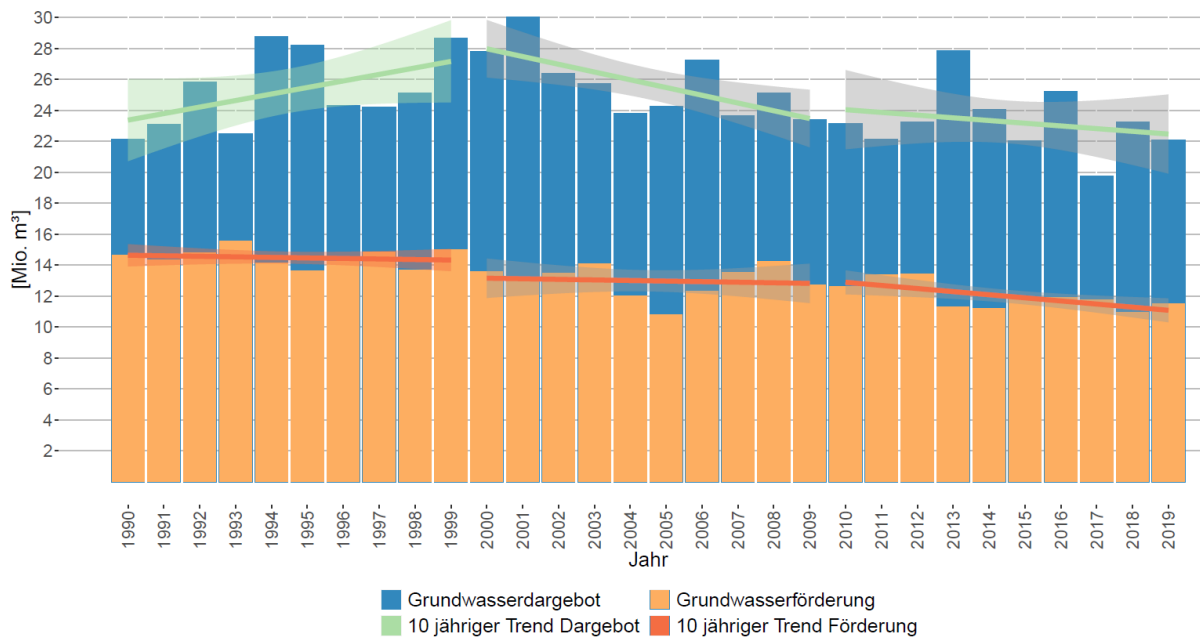


Abbildung 28 Generalized linear Model mit 95 % Konfidenzintervallen für jeweils zehnjährige Teilperioden des Grundwasserdargebots und der Grundwasserförderung von 1990 bis 2019

Lohmar, 30.07.2021

Nie: 564003T002_Wasserstatistik bis 2020

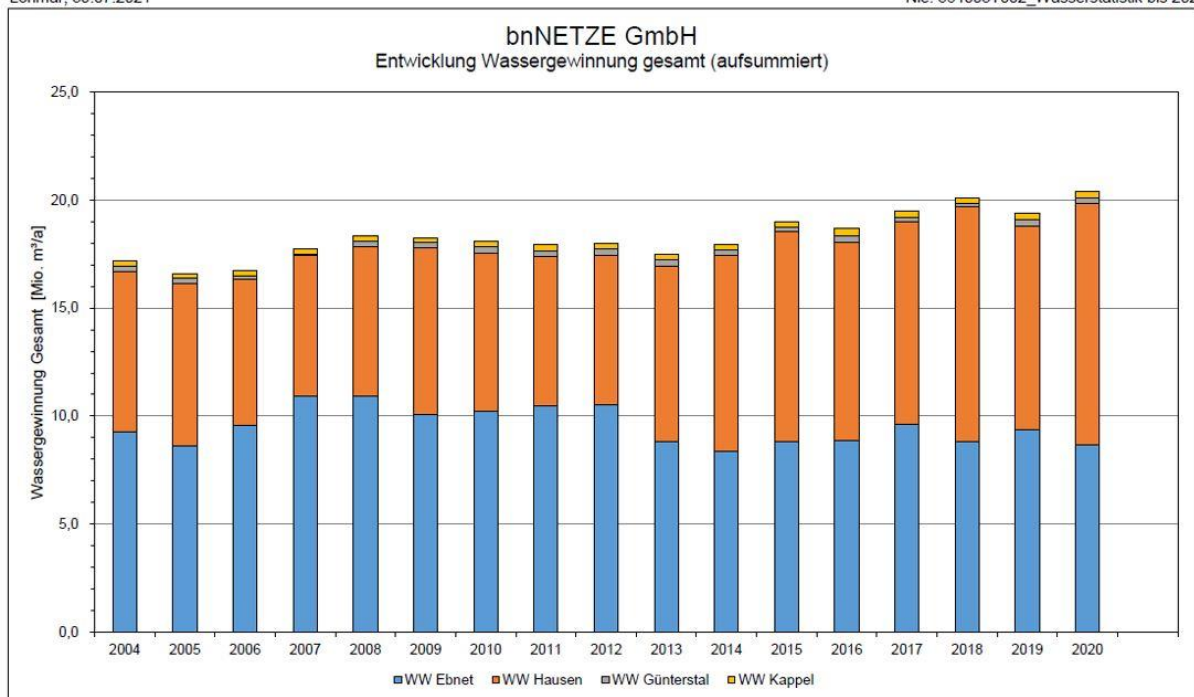


Abbildung 29 Jährliche Wassergewinnung in Mio. m³ a⁻¹ der verschiedenen Wasserwerke der bnNetze von 2004 bis 2020 (bnNETZE 2020)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die eingereichte Masterarbeit eigenständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Ich versichere, dass alle wörtlichen oder sinngemäßen Inhalte, die aus anderen Werken übernommen wurden als solche kenntlich gemacht sind.

Die eingereichte Masterarbeit ist oder war weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens.

Ich versichere, dass die elektronisch eingereichte Version der Masterarbeit in Inhalt und Formatierung mit den auf Papier ausgedruckten Exemplaren übereinstimmt.

Ort, Datum _____

Unterschrift _____