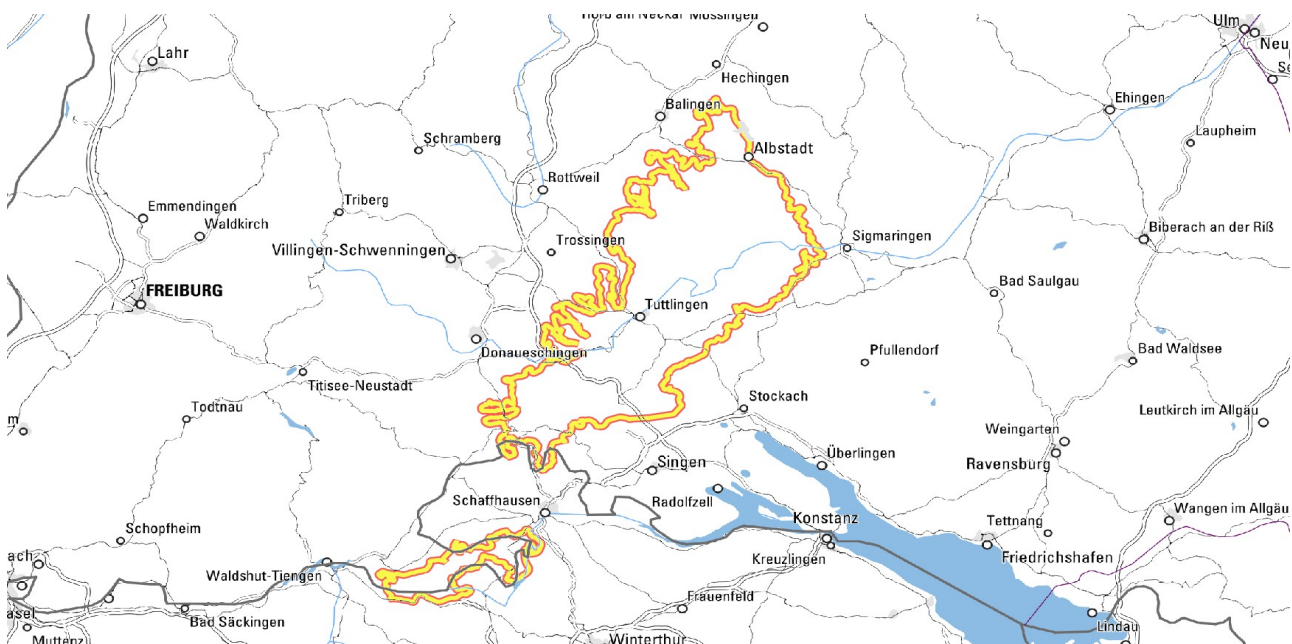


Grundwasserbeschaffenheit

Grundwässer werden anhand ihrer hydrochemischen und isotopehydrologischen Beschaffenheit charakterisiert. Die Inhaltsstoffe können sowohl geogener als auch anthropogener Herkunft sein. Im Interreg IIIA-Projekt Hegau Schaffhausen wurden u. a. für die Westalb, die Hegaualb und den Klettgau hydrochemische und isotopehydrologische Methoden eingesetzt, um Kenntnisse über die Qualität der Grundwässer, ihre Herkunft und ihr Alter zu gewinnen (Interreg IIIA, 2008). Edelgasuntersuchungen an ausgewählten Einzelproben lieferten Informationen über die Bildungsbedingungen tiefliegender Grundwässer.

Geogene Grundwasserbeschaffenheit am Beispiel von Blei



Hydrochemische und mikrobiologische Beschaffenheit

Die hydrochemische Beschaffenheit der Grundwässer ist geprägt durch die chemische Beschaffenheit der Böden und der Gesteine der ungesättigten Zone, die das Niederschlagswasser auf dem Weg bis zum Grundwasser durchsickert. Zudem wird die Grundwasserbeschaffenheit durch die Gesteinszusammensetzung des Aquifers beeinflusst. Je nach Gesteinsart und Verweildauer des Wassers im Untergrund sind diese Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen unterschiedlich intensiv. Die sich dabei herausbildenden spezifischen hydrochemischen Eigenschaften der Grundwässer bestimmen ihren Lösungsinhalt und damit den Grundwassertyp bzw. die geogene Grundwasserbeschaffenheit (Plum et al., 2009a).

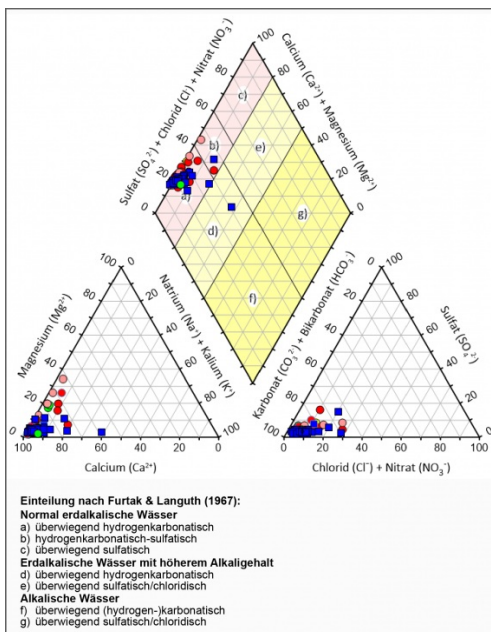
Die geogene Grundwasserbeschaffenheit (etwa 50 Einzelparameter) im Bereich der Region Westalb, Hegaualb und Klettgaualb ist in Form von Kartendarstellungen über den [LGRB-Kartenviewer](#) einsehbar. Neben den natürlichen Prozessen wirken sich auch anthropogene Einflüsse auf die hydrochemische Grundwasserbeschaffenheit aus.

Die beschriebenen Prozesse führen dazu, dass die Grundwässer der Hydrogeologischen Region Westalb, Hegaualb und Klettgaualb in den quartären Talablagerungen und dem Oberjura-Karst ebenso wie auch die meisten schwebenden Grundwasservorkommen hydrochemisch entscheidend durch die Lösung von Karbonatgestein sowie durch flächige, möglicherweise anhaltende anthropogene Stoffeinträge charakterisiert sind.

Grundwasser gibt es in der Hydrogeologischen Region Westalb, Hegaualb und Klettgaualb im

- Quartär
- Tertiär
- Oberjura
- Oberen und Mittleren Muschelkalk

Die nachfolgende Beschreibung der hydrochemischen Inhaltsstoffe basiert auf Analysen von Grundwasserproben, die zwischen Juni und September 2024 vom Labor des LGRB entnommen und analysiert wurden. Die Ergebnisse exemplarisch ausgewählter Probenahmestellen sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Käss (2021) hat die hydrochemische Beschaffenheit des Karstwassers im Donau-Aach-Gebiet beschrieben.



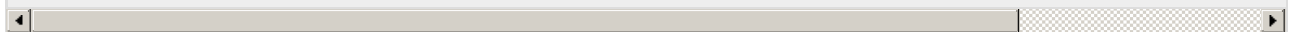
Charakterisierung der Grundwässer der Region Westalb, Hegaualb und Klettgaualb im PIPER-Diagramm nach Furtak & Languth (1967), (Grafik: LGRB, 2025; Datenquelle: Labordatenbank LGRB-RPF)

- Grüne Punkte: Quartär
- Gelbe Punkte: Obere Meeresmolasse
- Rote Punkte: Obere Süßwassermolasse
- Pinkfarbene Punkte: Untere Süßwassermolasse
- Blaue Quadrate: Oberjura

Hauptinhaltsstoffe in Grundwässern der Region Westalb, Hegaualb und Klettgaualb (Datenquelle: Labordatenbank LGRB-RPF) (Auswahl aus der Beprobungskampagne Juni bis September 2024)

Lfd. Nr.	Probenahmedatum	Aquifer	Hydrogeol. Bezug	el. LF (bei 25°C) [µS/cm]	Temp [°C]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Fe [mg/l]	Mn [mg/l]	HCO3 [mg/l]
1	17.09.2024	q (joLB)	s. ST.	515	10,3	97	14,50	5,27	0,633	0,00188	0,000054	342
2	29.07.2024	q	s. ST.	517	10,5	119	2,93	6,84	1,560	< 0,000033	< 0,000024	336
3	29.07.2024	q	s. ST.	476	11,0	106	2,67	6,98	0,750	< 0,000033	0,0000517	317
4	16.09.2024	tOM	s. ST.	609	11,9	143	1,39	2,46	0,693	0,00139	0,000064	397
5	30.09.2024	tOM(?)	s. ST.	696	11,3	157	4,08	4,19	0,880	0,000954	0,0000514	403
6	29.07.2024	tOS (tJN2)	s. ST.	531	10,6	126	1,96	3,86	0,580	0,00277	0,000238	348
7	13.08.2024	tOS	s. ST.	583	10,2	138	1,55	3,80	0,600	0,000799	0,000138	384
8	27.08.2024	tOS	s. ST.	672	13,3	122	15,60	17,60	1,030	0,000832	0,0000594	421
9	16.09.2024	tOS	s. ST.	616	11,1	144	6,13	1,37	0,530	0,00553	0,000288	427
10	17.09.2024	tOS	s. ST.	571	10,9	93	22,10	9,63	1,110	0,000439	0,000034	342
11	16.09.2024	tOS (tJN2)	s. ST.	650	10,9	149	3,52	4,27	1,340	0,000846	0,00012	409
12	27.08.2024	tUS	s. ST.	721	12,3	129	28,40	3,65	0,740	0,000648	0,0000702	476
13	17.09.2024	tUS (tOS, tOB)	s. ST.	611	11,8	117	18,20	3,28	1,210	0,00128	0,000098	422
14	18.06.2024	jo	S. K.	483	8,2	112	3,81	0,97	0,350	0,00168	0,000102	348
15	17.06.2024	jo	S. K.	514	9,1	110	3,87	4,82	0,700	0,00273	0,00014	342
16	18.06.2024	jo	T. K.	527	9,0	119	2,38	3,78	0,400	0,00189	0,000109	342
17	06.08.2024	jo (joMK)	T. K.	567	10,2	123	1,85	7,47	0,850	< 0,000033	< 0,000024	342
18	12.08.2024	jo (joFO/joFU, joMK)	T. K.	548	15,0	124	2,59	4,77	0,720	0,00119	0,000135	366
19	05.08.2024	jo (joI, joW)	S. K. / T. K.	506	9,4	111	2,90	4,99	0,680	0,000659	< 0,000024	329
20	18.06.2024	jo (joLO)	S. K.	480	8,2	111	2,04	1,05	0,340	0,00226	0,000158	329
21	18.06.2024	jo (joMK)	T. K.	467	9,5	101	1,49	2,98	0,360	0,00172	0,0000742	293
22	06.08.2024	jo (joMK)	T. K.	577	9,7	123	1,95	14,10	1,420	< 0,000033	< 0,000024	342
23	09.09.2024	jo (joMK)	T. K.	474	15,4	81	7,36	18,10	3,110	0,00943	0,000505	220
24	06.08.2024	jo (joMK, joLO)	T. K.	516	9,7	115	2,43	4,09	0,720	< 0,000033	< 0,000024	336
25	18.06.2024	jo (joMK, joLO)	T. K.	537	9,4	112	3,26	6,75	0,550	0,00126	0,00015	323
26	12.08.2024	jo (joW)	S. K.	564	12,2	125	2,48	4,97	0,880	0,13	0,122	366
27	12.08.2024	jo (joW)	S. K.	532	12,2	120	2,46	3,66	0,310	0,0239	< 0,000024	354
28	05.08.2024	joW	S. K.	531	13,7	109	3,49	16,60	0,550	0,000718	0,000132	342

Hydrogeologischer Bezug: s. St.: schwebendes Stockwerk S. K.: Seichter Karst T. K.: Tiefer Karst



Probenahmestellen:

Lfd. Nr.	GW-Nummer	LGRB-Nr.	Probenbez.
1	0072/274-1	QU8416/1	QF Kalkofen-Qu., Guggenmühle, Hohentengen
2		BO8117/23	TB IV/74 ZV WV Unteres Aitrachtal
3		BO8117/100	TB III/71 ZV WV Unteres Aitrachtal
4		QU8118/14	Quelle Schopflocher Höfe gefasst
5		QU8118/10	QF Schoenaeckerquelle 2, Blumenfeld
6	0019/321-0	QU8117/3	QF Obere Schlauchquelle Nord, Riedöschingen
7	0601/370-7	QU8018/1	QF Bennenwiesquelle, Liptingen
8		BO8317/25	Brunnen 2 Jestetten
9		QU8118/17	QF 2 Hauserfohren-Quelle, WV Engen
10		BO8317/17	Tiefbrunnen Hardtwald Lottstetten
11		QU8118/28	QF Jägertal-Quelle 5, Anselfingen
12	0137/273-8	QU8316/23	QF Schwarzer Boden-Quelle, Dettighofen
13	0041/274-7	QU8416/3	QF 2 Pepperquelle, Lienheim
14	0001/418-0	QU7819/1	QS Galgenquelle Nusplingen ZV WV Hohenberggruppe
15		QU7819/18	Lochbrunnen
16		BO7919/209	Brunnen 1 Beuron (Biselli-Quelle)
17		QU7919/4	Roter Brunnen Leibertingen
18	0015/469-9	QU7920/6	QF Rainbrunnen Thiergarten Hausen i. T.
19		QU7919/35	Kesselbachquelle 3
20	13/419-0	QU7919/16	Ensisheimer Quelle ZV WV Hohenberggruppe
21	0018/469-5	QU7920/5	QF Neidinger Mühle Ost, Mitte und West Unterneidingen
22	2009/469-0	QU7920/7	Joergenbrunnen Thiergarten
23		QU8119/8	Aachquelltopf
24	2010/469-8	QU7920/9	QF Langenbrunnen Werenwag Hausen i. T.
25	7502/419-9	QU7919/23	QF Grossschmiedebrunnen II Hausen im Tal
26		QU7918/19	QF Papiermühle NE Tuttlingen
27		QU7918/23	QF Bleiche Quelle Tuttlingen
28		BO7919/75	TB I/51 Fridingen

Aquifer:

q	Quartär
tOS	Obere Süßwassermolasse
tOM	Obere Meeresmolasse
tOM (tJN2)	Obere Meeresmolasse (Jüngere Juranagelfluh)
tUS	Untere Süßwassermolasse
tOB	Obere Brackwassermolasse
joMK	Oberjura Massenkalk-Formation
joFO, joFU	Obere- und Untere-Felsenkalke-Formation
joW	Wohlgeschichtete-Kalke-Formation
joLO	Lochen-Formation
jo	Oberjura

Karstwasser im Oberjura

Hydrochemisch ist das Karstgrundwasser entscheidend durch die Lösung von Karbonatgestein charakterisiert und bei 430 bis 660 mg/l gelöstem Feststoffinhalt überwiegend dem Typ hydrogenkarbonatisch-erdalkalisches Süßwasser zuzuordnen. Die Karbonathärte beträgt meist zwischen 13 °dH und 17 °dH, die Gesamthärte zwischen 14 °dH und 17 °dH.

Darüber hinaus schwankt die Beschaffenheit des untersuchten Karstgrundwassers regional wenig und zwischen Seichtem und Tiefem Karst eher geringfügig. Das Wasser des Seichten Karsts hat Nitratkonzentrationen zwischen 4 und 11 mg/l. Die Na-Gehalte liegen zwischen 1 und 17 mg/l, die Cl-Gehalte zwischen 2 und 19 mg/l. Das Wasser des Tiefen Karsts hat Nitratkonzentrationen zwischen 9 und 21 mg/l. Die Na-Gehalte liegen zwischen 3 und 18 mg/l, die Cl-Gehalte zwischen 7 und 31 mg/l.

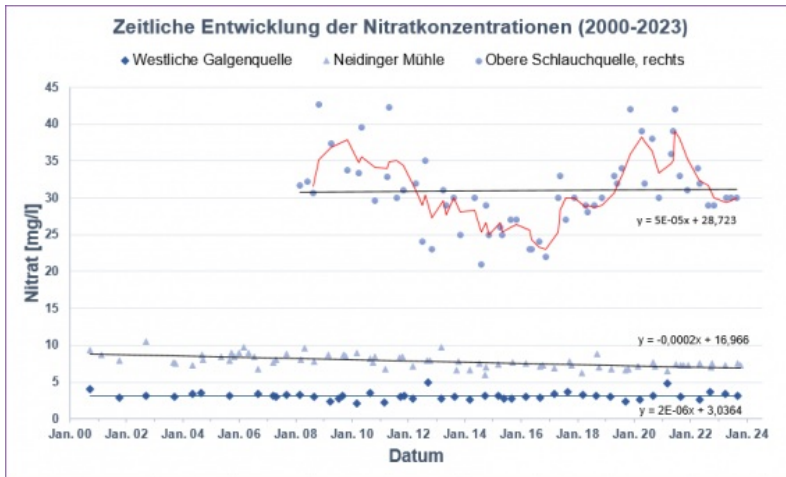
Die Magnesiumkonzentrationen von weniger als 7,4 mg/l sind u. a. darauf zurückzuführen, dass der durchströmte Karstgrundwasserleiter hauptsächlich aus Kalkstein und nur untergeordnet aus Dolomitstein besteht. Karstwässer mit sehr niedrigen Magnesiumgehalten sind nach Käss (2021) typisch für Wässer aus Massenkalken. Als Beispiel nennt er das Wasser der Karstquelle Roter Brunnen, das bei der damaligen Probenahme (18.09.1984) lediglich 0,24 mg/l Mg aufwies. Demgegenüber lag der Magnesiumgehalt der Quelle mit 1,85 mg/l am 06.08.2024 deutlich darüber. Auch die anderen Wässer aus der Massenkalk-Formation hatten im Jahr 2024 durchweg höhere Magnesiumgehalte.

Im Vergleich zu anderen Grundwässern aus dem Oberjura sind im Aachtopf (Probenummer 23) bei der Beprobungskampagne im Jahr 2024 und einer Nachbeprobung im Mai 2025 die Natrium- (18,1 mg/l), Chlorid- (30,6 mg/l) und Sulfatgehalte (40,1 mg/l) erhöht. Die Gegenüberstellung dieser Werte mit denen früherer Analysen zeigt, dass die Konzentrationen dieser Inhaltsstoffe im Aachtopf stark schwanken kann und wahrscheinlich von der variierenden Beteiligung unterschiedlicher Grundwasserkomponenten an der Zusammensetzung des Grundwassers im Aachtopf abhängt.

Batsche et al. (1970) weisen darauf hin, dass im Karstwasser südlich der Donau von Norden nach Süden die Mineralisierung zunimmt und sich der Anteil der Magnesiumionen erhöht. Ursache hierfür dürfte die zunehmende Verweilzeit des Karstwassers im Untergrund und die damit einhergehende Wechselwirkung zwischen dem Grundwasser und dem Karbonatgestein sein.

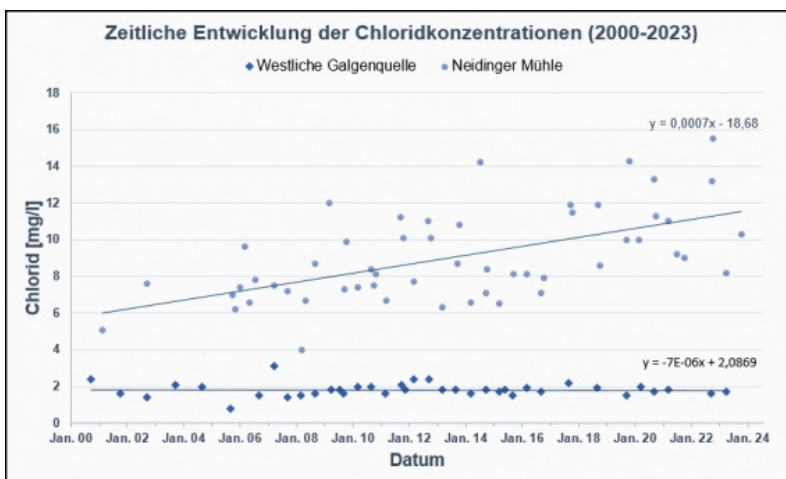
Käss (2021) verglich die hydrochemische Beschaffenheit des Donauwassers bei Immendingen mit der der Aachquelle. Dabei fielen in der Aachquelle insbesondere höhere Calcium- und Magnesiumgehalte sowie eine höhere Karbonathärte auf. Diese Zunahme im Grundwasser ist auf die Auflösung von Karbonatgestein im Zustrombereich der Aachquelle zurückzuführen. Käss (2021) bilanziert diese Lösung von Calzit und Dolomit auf jährlich 24 793 Tonnen. Unter Berücksichtigung von 3 % Nichtkarbonatgesteinen entspricht dies einer Hohlraumvergrößerung von 9 010 m³ pro Jahr.

Die Temperaturen des Karstgrundwassers und der Karstquellen schwanken im Allgemeinen im Jahresverlauf meist wenig und liegen vorherrschend zwischen ca. 8 °C und 12 °C. Der Temperaturgradient ist grundsätzlich im stark durchströmten Aquiferbereich infolge Konvektion sehr niedrig, steigt aber unterhalb des verkarsteten Gebirgsabschnittes deutlich an. Nur oberflächennahe Grundwässer und Quellwässer zeigen eine weitgehende Anpassung an den Jahresgang der Lufttemperatur.



Entwicklung der Nitratkonzentrationen (2000–2023) in drei Quellen der Westalb und der Hegaualb mit linearem Trend (schwarze Linien) bzw. gleitendem Durchschnitt (rote Linie bei der Oberen Schlauchquelle). Die Obere Schlauchquelle tritt aus der Jüngerer Juranagelfluh (tJN2, Obere Süßwassermolasse) aus, die Westliche Galgenquelle und die Quellen Neidinger Mühle (West und Ost) sind Karstquellen an der Grenze Impressamer gel-Formation zur Wohlgeschichtete-Kalke-Formation (Datenquelle: GWDB, 2024).

Die Nitratkonzentrationen zeigen in den beiden Oberjuraquellen Westliche Galgenquelle und Neidinger Mühle (West und Ost) seit dem Jahr 2000 einen leicht abnehmenden linearen Trend (schwarze Linien). In der Oberen Schlauchquelle, die aus der tertiären Jüngerer Juranagelfluh austritt, weisen die Nitratkonzentrationen im linearen Trend über den Zeitraum 2008 bis 2023 keine Tendenz aus. Der gleitende Durchschnitt (rote Linie) macht deutlich, dass die Nitratgehalte über den Zeitraum 2008 bis 2023 längerfristig schwanken. Die Zeiträume von ca. 2008 bis ca. 2012 und von ca. 2019 bis ca. 2022 sind durch deutlich höhere Werte gekennzeichnet, der Zeitraum von ca. 2013 bis ca. 2018 durch niedrigere Werte.



Entwicklung der Chloridkonzentrationen mit linearem Trend (schwarze Linien) (2000–2023) in zwei Karstquellen der Westalb und Hegaualb (Datenquelle: GWDB, 2024)

Die Chloridgehalte sind in der Westlichen Galgenquelle in den Jahren 2000 bis 2023 nahezu unverändert. In den Quelfassungen Neidinger Mühle (West und Ost) haben sie sich in der gleichen Zeit in der Tendenz von ca. 6 mg/l auf 12 mg/l ungefähr verdoppelt, wobei die Einzelwerte sehr stark schwanken.

Allgemein ist das Grundwasser des Offenen Karsts verbreitet durch episodische Trübungen sowie mikrobiologische Belastungen charakterisiert und für schadensfallbedingte punktuelle Stoffeinträge besonders anfällig. Dies gilt insbesondere im Bereich hoher Abstandgeschwindigkeiten des Grundwassers im direkten Zustrom zu den großen Karstquellen.

Grundwasser in quartären und tertiären Grundwasserleiter

Die Grundwässer aus dem Quartär unterscheiden sich nur wenig von denen aus dem Oberjura, die aus dem Tertiär bei einigen Inhaltsstoffen deutlicher.

Quartär

Das Grundwasser in den quartären Talablagerungen ist hydrochemisch nicht vom Karstgrundwasser des Oberjuras zu unterscheiden (hydrogenkarbonatisch-erdalkalisches Süßwasser), da der Randzustrom in den Porengrundwasserleiter aus dem benachbarten Oberjura erfolgt und die Füllung der Täler der Oberjura-Karstlandschaft überwiegend aus oberjurassischen Gesteinskomponenten besteht. Beispielhaft wurde das Grundwasser im Unteren Aitrachtal untersucht. Die Karbonathärten der untersuchten Wässer liegen zwischen 14 °dH und 19 °dH, die Gesamthärten zwischen 15 °dH und 21 °dH.

Tertiär

Auch beim Grundwasser aus den schwebenden Grundwasserstockwerken der tertiären Deckschichten handelt es sich überwiegend um hydrogenkarbonatisch-erdalkalisches Süßwasser.

Die Nitratgehalte der tertiären Wässer liegen mit Werten zwischen 5 und 37 mg/l meist über denen aus dem Oberjura und dem Quartär. Ebenso sind in den tertiären Grundwässern die Sulfatgehalte mit 10 bis 35 mg/l höher. Die Magnesiumwerte bewegen sich zwischen 1,4 und 28,4 mg/l und weisen demzufolge eine deutlich höhere Spannweite auf als in den Grundwässern des Oberjuras.

Grundwasser in weiteren, z. T. tiefer liegenden Festgesteinsgrundwasserleitern

In der 644,25 m tiefen Thermalwasserbohrung Tuttlingen wurde Thermalwasser aus dem Oberen Muschelkalk mit einer Temperatur von 48,4 °C am Auslauf erschlossen (Grimm et al., 2005). Hydrochemisch handelt es sich im Sinne der Begriffsbestimmung (Qualitätsstandards für die Prädikatisierung von Kurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen des Deutschen Heilbäderverbandes e. V. und des Deutschen Tourismusverbandes e. V. vom 13.10.1998) um ein fluoridhaltiges Calcium-Magnesium-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Mineral-Thermalwasser.

Das Mineral-Thermalwasser ist praktisch tritiumfrei (< 2,0 TU, Analyse vom 7.11.2002). Auf Grundlage von Edelgasmessungen im Grundwasser wird der Anteil der im Pleistozän neu gebildeten Komponente an der Grundwasserzusammensetzung auf deutlich über 70 % geschätzt. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25 °C) beträgt 1301 $\mu\text{S}/\text{cm}$, die Summe der gelösten Mineralstoffe 1100 mg/l (Analyse vom 09.11.1998).

Isotopenhydrologie und Altersstruktur

Isotopenhydrologische Untersuchungen liefern Informationen über die Neubildungsbedingungen und die Altersstruktur der Grundwässer. Dies beinhaltet die Identifikation unterschiedlich alter Grundwasserkomponenten und deren mengenmäßigem Anteil an der Gesamtzusammensetzung des Grundwassers. Daraus lassen sich Aussagen über den Gefährdungsgrad der Grundwässer durch aktuellen Stoffeintrag von der Geländeoberfläche sowie Prognosen über die zukünftige Entwicklung von bereits bestehenden Schadstoffbelastungen im Grundwasser ableiten (Bauer et al., 2002; Selg et al., 2005).

Bei isotopenhydrologischen Untersuchungen kommen häufig Analysen auf Sauerstoff-18 (^{18}O), Deuterium (^2H) und auf Tritium (^3H) zur Anwendung. Weiterhin werden Krypton-85 (^{85}Kr), Kohlenstoff-14 (^{14}C), Helium-3 (^3He) sowie der Spurenstoff Schwefelhexafluorid (SF_6) eingesetzt. In jüngster Zeit kam bei sehr alten Wässern das radioaktive Isotop Krypton-81 (^{81}Kr) hinzu (Heidinger et al., 2019). Ausführliche Erläuterungen der Grundlagen der isotopenhydrologischen Methoden finden sich u. a. bei Moser & Rauert (1980), Mook (2000) sowie Armbruster et al. (2008).

Die Ergebnisse der Isotopenmessungen werden i. d. R. gemeinsam mit den hydrochemischen Untersuchungsergebnissen des Grundwassers und unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen synoptisch ausgewertet und interpretiert.

In der Studie von Geyh & Groschopf (1978), die sich über die Mittlere Alb und die Ostalb erstreckt, wurde erstmals die Isotopenhydrologie der Karstwässer der Schwäbischen Alb systematisch und großräumig untersucht.

Sauerstoff/Deuterium ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$)

Das stabile Sauerstoffisotop ^{18}O und das stabile Wasserstoffisotop Deuterium ^2H kommen im Wasser in geringen Mengen vor. Als Teil des Wassermoleküls ist das stabile Sauerstoffisotop ^{18}O ein idealer Tracer. Es wird mit dem Niederschlag flächenhaft eingetragen. Die ^{18}O -Werte beziehen sich auf den internationalen Standard VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Sie weisen wegen der generellen Abweichung gegenüber dem Meerwasser negative Werte auf und werden als $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in Promille (‰) dargestellt.

Methodik

Aufgrund der leicht unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der geringfügig schwereren Wassermoleküle führen Verdunstungs- und Kondensationsprozesse zu unterschiedlichen Gehalten der stabilen Isotope in der Wasser- und Gasphase (Isotopenfraktionierung). Dabei reichern sich die schweren Wassermoleküle in der verbleibenden flüssigen Phase an. Dieser Fraktionierungsprozess wird maßgebend durch die Temperatur beeinflusst (Temperatureffekt).

Mit Hilfe der Isotopenmarkierung des Wassermoleküls kann beurteilt werden, ob eine Grundwasserprobe Direktabflüsse von der Geländeoberfläche (z. B. nach einem Niederschlagsereignis), zwischengespeichertes Grundwasser (z. B. aus dem Epikarst oder aus Klüften) bzw. langfristiges Grundwasser enthält. Hierzu sind Informationen über die ^{18}O -Verteilung im Niederschlagswasser erforderlich. Sie unterliegt Schwankungen, die auf die Genese und Herkunft der Niederschläge zurückzuführen sind. Besonders bedeutend für die Interpretation ist die Tatsache, dass die Niederschläge im Sommerhalbjahr isotopisch schwerer sind als im Winterhalbjahr. Die ^{18}O -Isotopenverteilung im Niederschlag weist demzufolge einen typischen Jahresgang auf.

Der Vergleich von längeren Zeitreihenmessungen des ^{18}O -Gehaltes im Grundwasser und im Niederschlag erlaubt es i. d. R., sowohl kurzfristige (innerhalb von Tagen bis Wochen stattfindende) als auch saisonale Variationen bei der Grundwasserneubildung qualitativ und quantitativ zu identifizieren.

Bei altem Grundwasser deuten stark abgereicherte $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Isotopengehalte (isotopisch leichtere Grundwässer) auf eine Neubildung unter kälteren Klimabedingungen (z. B. klimatische Kaltzeiten im Pleistozän) hin.

Ergebnisse

Im untersuchten Grundwasser der Hydrogeologischen Region Westalb, Hegaualb und Klettgaualb lagen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Zeitraum 26.04.2005 bis 06.12.2005 mit Ausnahme des TB Oberholz/Altenburg auf der Klettgaualb (LGRB-Archiv-Nr. BO8317/19) in einem Bereich zwischen -10,49 und -9,06 ‰ (Interreg IIIA, 2008). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Aachquelle variierten im Zeitraum Mai bis September 2005 (8 Werte) zwischen -9,72 und -9,06 ‰, mit einer geringen Schwankung von 0,71 ‰.

Die $\delta^2\text{H}$ -Werte aller Grundwässer mit Ausnahme des TB Oberholz/Altenburg lagen zwischen -76,1 und -65,50 ‰. Der vergleichsweise niedrige $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von -11,30 und $\delta^2\text{H}$ -Wert von -81,30 ‰ im Grundwasser des Brunnen Oberholz/Altenburg geht auf Uferfiltratanteile aus dem Rhein zurück (Interreg IIIA, 2008). Der Brunnen ist in tertiären Molassesedimenten verfiltert.

Die untersuchten Grundwasserproben aus den Aquiferen des Oberjuras, Tertiärs und Quartärs wurden nach den Ergebnissen unter heutigen klimatischen Bedingungen (Holozän) neu gebildet.

Tritium (^3H)

Tritium im Grundwasser wird oft als idealer Tracer bezeichnet. Die Konzentration wird in Tritiumeinheiten (tritium units: TU) angegeben. Das Verhältnis von einem tritiierten Wassermolekül zu 10^{18} nicht tritiierten Wassermolekülen entspricht einem TU oder ca. 0,119 Bq/l.

Tritium als radioaktives Wasserstoffisotop mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren nimmt als Bestandteil des Wassermoleküls am globalen Wasserkreislauf teil. Natürliches Tritium wird in den höheren Luftschichten der Atmosphäre durch die Einwirkung von kosmischer Strahlung auf Stickstoffatome natürlich erzeugt. Tritiiertes Wasser gelangt über den Niederschlag in das Grundwasser. Niederschlag in Europa enthält heute etwa 8 bis 10 TU natürlich entstandenes Tritium.

Neben dem natürlichen Tritium wurden zwischen 1953 und 1963 große Mengen an Tritium durch oberirdische Kernwaffentests in die Stratosphäre freigesetzt. Dies führte zu extrem hohen Tritiumkonzentrationen von mehreren tausend TU im Niederschlagswasser. Mit dem Ende der Tests im Jahr 1963 nahmen die Tritiumgehalte schnell wieder ab. Dieser Tritiumpeak kann dazu führen, dass die Tritiumwerte nicht immer eindeutig interpretiert werden können. In solchen Fällen kann die Bestimmung der $^{85}\text{Krypton}$ -Konzentration weiterhelfen. Heute liegen die Gehalte im Niederschlag wieder in der Größenordnung der natürlichen atmosphärischen Tritiumproduktion.

Im Gebiet der Westalb, Hegualb und Klettgaualb ist das Karstgrundwasser im Rahmen des Interreg IIIA-Projekts Hegau Schaffhausen (Interreg IIIA, 2008) an einigen Quellen und Brunnen auf Tritium untersucht worden. Anhand der Tritiumgehalte und unter Verwendung geeigneter Speicher-Durchfluss-Modelle können mittlere Verweilzeiten für das Grundwasser bestimmt sowie Mehrkomponentensysteme identifiziert werden.

Methodik

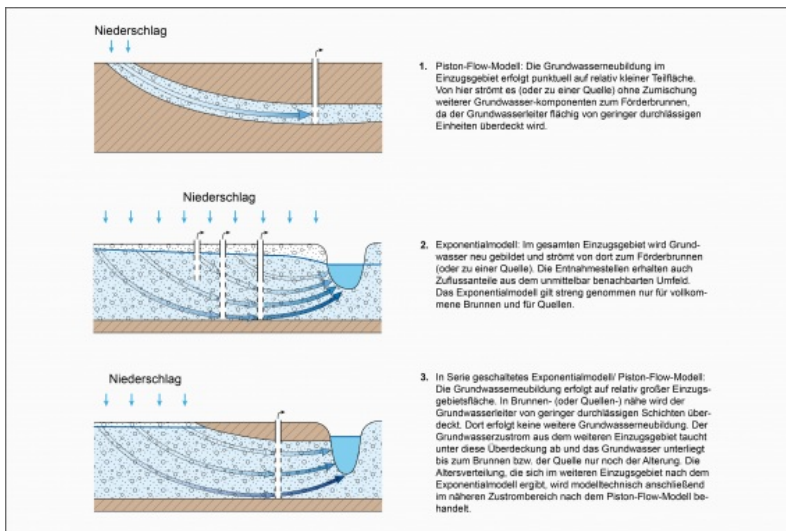
Für die Bestimmung der mittleren Verweilzeit im Oberjura der Schwäbischen Alb sind die Lage zur Wasserscheide, d. h. die Größe des Einzugsgebiets, und der Grundwasseranschluss der Quelle oder des Brunnens an hochdurchlässige Abflussbahnen maßgebliche Einflussgrößen. Sind diese Parameter bekannt, lassen sich die mittleren Verweilzeiten relativ zuverlässig abschätzen (Armbruster et al., 2008).

Bei der Auswertung wurde von einer ganzjährigen Grundwasserneubildung, d. h. einem ganzjährigen Eintrag von Tritium ausgegangen. Die Annahme beruht darauf, dass Klüfte, Spalten und Dolinen auch im Sommerhalbjahr ihre Drainagefunktion nicht verlieren und eine rasche Versickerung eines Teils der Niederschläge ermöglichen (HGK, 2002).

Bei der Wahl des Modelltyps, der der Auswertung zugrunde gelegt wird, sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- die Komplexität der Strömungsvorgänge im Karstgrundwasserleiter mit gebietsweise wechselnder Intensität von Klüftung und Verkarstung sowohl in der gesättigten als auch in der ungesättigten Zone,
- die faziesabhängigen Porositätsunterschiede,
- die unterschiedliche Überdeckung durch schluff- und tonreiche, z. T. mergelige Schichten,
- die Speicherfunktion des Epikarsts.

Standardmodelle beschreiben solche Verhältnisse nur in Ausnahmefällen zufriedenstellend. Bei einer Karstquelle ist z. B. die Zusammensetzung der verschiedenen alten Wasserkomponenten in Trockenwetterzeiten anders als in einer Zeit mit starken Niederschlägen, bei einem Tiefbrunnen in der Überdeckten Zone des Tiefen Karsts anders als bei einer Karstquelle in der Offenen Zone des Seichten Karsts.



Schematische Schnitte durch hydrogeologisch unterschiedlich aufgebaute Brunneneinzugsgebiete (verändert nach Maloszewski & Zuber, 1996).

Für Karstquellen mit ständiger Schüttung wird bei Trockenwetter meist das Exponentialmodell zutreffen. Diesem Modell liegt die Vorstellung zugrunde, dass die Anteile der einzelnen Wasserkomponenten mit zunehmendem Alter exponentiell abnehmen. Sofern jedoch die Schüttung bei einem Niederschlagsereignis stark zunimmt und dabei ein schneller Zufluss von Niederschlagswasser über Karstgerinne erfolgt, wird die Exponentialverteilung von einer zusätzlichen jungen Komponente überlagert. Diese Situation kann durch eine Parallelschaltung von Exponential- und Piston-Flow-Modell simuliert werden.

Karstgrundwasser in der Überdeckten Zone des Tiefen Karsts erhält infolge der gering durchlässigen Überdeckung des Grundwasserleiters keinen nennenswerten Zufluss von jungem Niederschlagswasser, so dass es letztlich auf dem Fließweg zur Vorflut nur noch altert. Hier trifft als Modellansatz eine Reihenschaltung von Exponential- und Piston-Flow-Modell zu.

Bei der dauerhaften Entnahme des Karstgrundwassers durch Tiefbrunnen können sich je nach der Entnahmetiefe und den Pumpbedingungen die Anteile der verschieden alten Wasserkomponenten ändern. Dies hat zur Folge, dass der gewählte Modellansatz dann möglicherweise nicht mehr zutrifft. Variationen in den Tritiumgehalten können in solchen Fällen entnahmebedingt sein und müssen nicht auf natürliche Änderungen der Isotopengehalte im Karstgrundwasser zurückgehen.

Diese grundsätzlichen Überlegungen zeigen, dass es für einen Karstaquifer kein allgemein gültiges Standardmodell gibt.

Aus der beobachteten geringeren Variationsbreite der Tritiumkonzentrationen im Grundwasser im Vergleich zum Niederschlag ist abzuleiten, dass im Karstgrundwasserleiter eine Durchmischung des infiltrierten Niederschlagswassers erfolgt. Diese ist unterschiedlich stark und von den jeweiligen hydraulischen Verhältnissen abhängig. Treten im Karstgrundwasser trotzdem einzelne hohe Tritiumwerte auf, so sind sie als Hinweis auf eine schnell abfließende Karstgrundwasserkomponente anzusehen („kurzfristiges Karstwasser“, Villinger, 1972).

Grundsätzlich fällt im Karstaquifer der Schwäbischen Alb die Diskrepanz zwischen den aus den Tritiummessungen ermittelten vergleichsweise hohen mittleren Verweilzeiten (MVZ) und den aus den Markierungsversuchen ermittelten hohen Fließgeschwindigkeiten (Abstandsgeschwindigkeiten) des Grundwassers auf.

Diese scheinbar widersprüchlichen Befunde sind darin begründet, dass der Karstaquifer als Doppel-Porositätsmedium ausgebildet ist. Dieses kann vereinfacht als ein Gitter aus engen und weiten miteinander kommunizierenden Hohlräumen betrachtet werden. Die hohen MVZ gehen auf die feinere Gesteins-, und Kluftporosität zurück, während die hohen Fließgeschwindigkeiten die Folge von hochdurchlässigen, gerinneartigen Karststrukturen sind, die sich besonders in Richtung der Austrittstellen großer Karstquellen entwickelt haben.

Ergebnisse

Die Tritiumgehalte der im Interreg IIIA-Projekt untersuchten Grundwässer liegen mit Ausnahme der Messstelle Fridingen/Freibad Donauumleitung B3/82 (LGRB-Archiv-Nr. BO7919/47) zwischen 8,3 und 12,9 TU (Interreg IIIA, 2008, Probenahme in den Jahren 2005/2006). Sie fallen somit weitgehend in den Wertebereich der damaligen Niederschlagskonzentration für dieses Gebiet.

Grundsätzlich nehmen die mittleren Verweilzeiten (MVZ) des Grundwassers im Oberjura-Karstgrundwasserleiter der Schwäbischen Alb von Norden nach Süden zu (Armbruster et al., 2008). Diese Entwicklung wurde auch für die Westalb und Hegualb durch die kombinierte Auswertung der ^3H - und ^{85}Kr -Untersuchungsergebnisse bestätigt (Interreg IIIA, 2008).

Im Bereich des Seichten Karsts und der Offenen Zone des Tiefen Karsts betragen die mittleren Verweilzeiten in der Regel ca. 2 bis 6 Jahre (Armbruster et al., 2008). Für Brunnen und Quellen mit größeren Einzugsgebieten und damit großen Umsatzräumen liegen die mittleren Verweilzeiten bei 5 bis 15 Jahren. Am Südrand der Schwäbischen Alb im Grenzbereich zum Überdeckten Karst betragen die mittleren Verweilzeiten 10 bis 20 Jahre. Mit zunehmender Überdeckung nach Süden und längeren Fließwegen werden die Wässer wesentlich älter (Heidinger et al., 2019).

Bauer et al. (2002), Selg et al. (2005) sowie Bauer & Selg (2006) haben die am Fließsystem des Oberjuras der Mittleren Alb beteiligten Grundwässer im Hinblick auf ihre Altersstruktur, mittlere Verweilzeit und Komponentenzusammensetzung näher charakterisiert. Vergleichbare Verhältnisse liegen auch in der Westalb und Hegualb vor.

Das Karstgrundwasser der Tiefbrunnen setzt sich demnach aus mehreren Komponenten unterschiedlichen Alters zusammen (Bauer & Selg, 2006). Es besteht aus einer kurzfristigen Abflusskomponente mit mittleren Verweilzeiten von Tagen bis Monaten und einer langfristigen Grundwasserkomponente mit einer Verweilzeit von Jahren. Es unterscheidet sich dadurch deutlich von oberflächennah austretenden Karstquellen, an denen keine älteren tritiumfreien Komponenten beteiligt sind (LGRB/Hydroisotop, 2000; Bauer et al., 2002). Die jungen Komponenten in den vergleichsweise flachen Grundwasserzirkulationssystemen stehen meist mit Starkniederschlägen oder der Schneeschmelze in Zusammenhang.

Kohlenstoff-14/Kohlenstoff-13 ($^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$)

Das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C wird in den höheren Luftschichten ständig neu gebildet. Es nimmt als Kohlendioxid $^{14}\text{CO}_2$ am atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf teil. Die natürliche atmosphärische Gleichgewichtsaktivität von ^{14}C in der oberen Atmosphäre entsprach im Jahr 1950 ungefähr 13,6 dpm/g Kohlenstoff (dpm/g: Zerfälle pro 1 Gramm Kohlenstoff in 1 Minute) und wird international auf 100 pmC (percent of modern Carbon) bzw. 100 %-mod. festgelegt.

Mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren zerfällt das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C wieder zu Stickstoff.

Während der oberirdischen Kernwaffentests in den 1950er Jahren erhöhte sich der ^{14}C -Gehalt des atmosphärischen CO_2 im Jahre 1963 auf die doppelte Konzentration von 1950. Seither nimmt die ^{14}C -Aktivität wieder ab.

Methodik

Atmosphärisches ^{14}C wird in Form von $^{14}\text{CO}_2$ im Niederschlagswasser gelöst und gelangt in den Untergrund. In der gesättigten Bodenzone wird der Austausch mit der Atmosphäre unterbunden und die ^{14}C -Aktivität („ ^{14}C -Anfangsgehalt“) nimmt in der Folge durch den radioaktiven Zerfall ab.

Bei der Anwendung der ^{14}C -Methode muss berücksichtigt werden, dass es während der Passage des Grundwassers im Untergrund zu geochemischen Prozessen (Lösung und Ausfällung von Karbonaten) und Verlusten von ^{14}C durch Diffusion in das Wirtsgestein kommen kann. Zur Rekonstruktion der Kohlenstoffevolution (z. B. Karbonat-Kohlendioxid-Gleichgewicht) wird deshalb das stabile Kohlenstoffisotop ^{13}C bei der ^{14}C -Interpretation herangezogen (Interreg IIIA, 2008).

Ergebnisse

Für die Westalb und Hegualb wurde u. a. der Kohlenstoff-14-Gehalt der Karstwässer des Brunnen Altheim (LGRB-Archiv-Nr. BO8020/51) mit 87,80 %-mod. bestimmt (Interreg IIIA, 2008). Im Vergleich dazu liegen die Kohlenstoff-14 modern-Gehalte der meisten untersuchten Karstgrundwasserproben der Mittleren Alb zwischen 70 % und 90 %-mod. Es handelt sich also in beiden Fällen um typische Werte für junges Wasser (Geyh & Groschopf, 1978).

Krypton-85 (^{85}Kr)

Das radioaktive Kryptonisotop ^{85}Kr wird heute vorwiegend bei der Wiederaufbereitung von nuklearen Brennstäben in die Atmosphäre freigesetzt.

Die ^{85}Kr -Aktivität wird bei standardisierten Druck- und Temperaturbedingungen in Zerfälle pro Minute (dpm = decay per minute) für einen Milliliter Kryptongas angegeben. Seit den 1950er Jahren stieg der Konzentrationsverlauf von ^{85}Kr mit einer Halbwertszeit von 10,76 Jahren stetig an. In den letzten Jahren hat sich die atmosphärische Aktivität auf einem Niveau von ca. 90 dpm/ml $_{\text{Kr}}$ stabilisiert (Interreg IIIA, 2008).

Methodik

Krypton wird wie andere Gase im Grundwasser gelöst. Aufgrund des Edelgascharakters nimmt es nicht an chemischen Reaktionen teil. Somit bestimmt nach der Passage der ungesättigten Zone und dem Eintrag ins Grundwasser allein der radioaktive Zerfall den relativen Gehalt an ^{85}Kr zu gelöstem Krypton.

Die ^{85}Kr -Methode wird oft mit der ^3H -Methode kombiniert. Als Folge des künstlichen ^3H -Eintrags („Bombenpeak“) in den 1960er Jahren ist eine eindeutige Altersinterpretation von Grundwässern anhand der ^3H -Werte manchmal nicht möglich. Da die atmosphärische ^{85}Kr -Aktivität stetig zunimmt können durch die Methodenkombination zweideutige Interpretationsmöglichkeiten ausgeschlossen werden.

Ergebnisse

Die ^{85}Kr -Gehalte wurden im Interreg IIIA-Projekt (Interreg IIIA, 2008) in der Westalb und Hegualb lediglich im Brunnen Altheim (LGRB-Archiv-Nr. BO8020/51; 61,7 dpm/ml $_{\text{Kr}}$ am 20.06.2006) und in der Messstelle B3/82 Fridingen Freibad Donauumleitung (LGRB-Archiv-Nr. BO7919/47; 0,4 dpm/ml $_{\text{Kr}}$ am 30.05.2005) bestimmt.

Literatur

- Armbruster, V., Bertleff, B., Plum, H., Prestel, R., Heinz, J., Binder, E., Heidinger, M. & Eichinger, L. (2008). *Verweilzeiten des Grundwassers in oberflächennahen Grundwasserleitern in Baden-Württemberg*. – LGRB-Fachbericht, 01/08, S. 1–31, Freiburg i. Br. (Regierungspräsidium Freiburg – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau), verfügbar unter https://produkte.lgrb-bw.de/docPool/c133_data.pdf.
- Batsche, H., Bauer, F., Behrens, H., Buchtela, K., Dombrowski, H. J., Geissler, R., Geyh, M. A., Hötzl, H., Hribar, F., Käss, W., Hairhofer, J., Maurin, V., Moser, H., Neumaier, F., Schmitz, J., Schnitzer, W. A., Schreiner, A., Vogg, H. & Zötl, J. (1970). *Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1966–1969*. – Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, 22, S. 5–165.
- Bauer, M. & Selg, M. (2006). *Altersstruktur und Mittlere Verweilzeit im Grundwasser des Blautopfs und anderer Quellen und Brunnen im Oberjura-Karst Süddeutschlands*. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C, 98, S. 18–44.
- Bauer, M., Selg, M. & Eichinger, L. (2002). *Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjuras in Baden-Württemberg*. – Abhandlungen LGRB, 15, S. 149–221.
- Furtak, H. & Langguth, H.-R. (1967). *Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen*. – Mem. IAH-Congress, S. 86–96, Hannover.
- Geyh, M. A. & Groschopf, P. (1978). *Isotopenphysikalische Studie zur Karsthydrogeologie der Schwäbischen Alb*. – Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, 8, S. 7–58.
- Grimm, B., Franz, M., Kilger, B.-M., Lorenz, G. & Schmidt-Witte, H. (2005). *Die Thermalwassererschließung im Muschelkalk von Tuttlingen*. – Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br., 95(1), S. 189–212.
- HGK (2002). *Ostalb*. – Hydrogeologische Karte Baden-Württemberg, 131 S., 10 Karten, 1 CD-ROM, Freiburg i. Br. (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg).
- Heidinger, M., Eichinger, F., Purtschert, R., Mueller, P., Zappala, J., Wirsing, G., Geyer, T., Fritzer, T. & Groß, D. (2019). *Altersbestimmung an thermalen Tiefenwässern im Oberjura des Molassebeckens mittels Krypton-Isotopen*. – Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 24, S. 287–294.

- Interreg IIIA (2008). *Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau–Schaffhausen*. – Interreg IIIA Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein, Abschlussbericht, 85 S.
- Käss, W. (2021). *Das Donau-Aach-System: Die Versickerung der Oberen Donau zwischen Immendingen und Fridingen (Südwestdeutscher Jurakarst)*. – Geologisches Jahrbuch, Reihe A, 165, 270 S., 2 Anl., Hannover.
- LGRB/HYDROISOTOP (2000). *Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasser des Oberjura - Bereich Lkr. Reutlingen*. 46 S., 40 Anl., Freiburg/Schweitenkirchen. [unveröff. Bericht]
- Maloszewski, P. & Zuber, A. (1996). *Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data*. – International Atomic Energy Agency (Hrsg.). Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology, S. 9–58, Vienna (Austria). [TECDOC-910]
- Mook, W. G. (2000). *Environmental isotopes in the hydrological cycle – Principles and applications*. – IHP-V, Technical Documents in Hydrology, No. 39, 1, 280 S.
- Moser, H. & Rauert, W. (1980). *Isotopenmethoden in der Hydrogeologie*. – Lehrbuch der Hydrogeologie, 8, 400 S., Berlin (Borntraeger).
- Plum, H., Dietze, G., Armbruster, V. & Wirsing, G. (2009a). *Natürliche geogene Grundwasserbeschaffenheit in den hydrogeologischen Einheiten von Baden-Württemberg*. – LGRB-Informationen, 23, S. 1–192, verfügbar unter https://produkte.lgrb-bw.de/docPool/c621_data.pdf.
- Selg, M., Bauer, M., Heinz, J. & Mair, C. (2005). *Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und ihre Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag*. – Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br., 95(1), S. 1–45.
- Villinger, E. (1972). *Seichter Karst und Tiefer Karst in der Schwäbischen Alb*. – Geologisches Jahrbuch, Reihe C, 2, S. 153–188.

Datenschutz

Cookie-Einstellungen

Barrierefreiheit

Quell-URL (zuletzt geändert am 24.03.26 - 13:31):<https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/hydrogeologie/regionalbeschreibung-westalb-hegualb-klettgaualb/grundwasserbeschaffenheit>