

Altersbestimmung von Grundwasser durch Tritium/Helium-Methode und hydraulische Altersberechnungen

Ergebnisse aus den Untersuchungen 2020, 2021 und 2022

Erläuterungsbericht



BjörnSEN Beratende Ingenieure Erfurt GmbH
Niederlassung Leipzig
Dohnanyistraße 28, 04103 Leipzig
Telefon +49 341 962759-0, bce-leipzig@bjoernsen.de

Dezember 2022, NT, JH, 2021391.65

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungsbericht

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung	1
2	Datengrundlage	1
3	Grundwassermessstellen	2
3.1	Lage der Grundwassermessstellen (Beprobung 2022)	2
3.2	Beprobung der Grundwassermessstellen	3
4	Methodik	4
4.1	Laboruntersuchungen	4
4.1.1	Vor-Ort- und Standardparameter	4
4.1.2	Edelgase und Tritium	4
4.2	Hydraulische Altersbestimmung	4
4.2.1	Ermittlung der Strombahnen	5
4.2.2	Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone	7
4.2.3	Exponential-Ansatz	8
4.2.4	Darcy-Ansatz	9
4.3	Altersbestimmung durch die Tritium-Helium-Methode	11
5	Ergebnisse - Datensatz 2022	12
5.1	Hydrochemische Charakterisierung	12

5.1.1	Vor-Ort-Parameter	12
5.1.2	Hauptionen	13
5.2	Hydraulische Alter	14
5.3	T/He-Altersdatierung	16
6	Gesamtdatensatz	21
6.1	Vergleich der Datensätze	22
6.1.1	Strombahnen	23
6.1.2	Vergleich der hydraulischen Altersberechnungen mit Datensatz 2020	24
6.1.3	Vergleich der Methodik und der T/He-Alter für Datensatz 2020	25
6.2	T/He-Altersdatierung Gesamtdatensatz	25
6.3	Hydrogeologische Parameter im Bezugsraum GWK	27
6.4	Vergleich T/He-Alter und hydraulische Alter	29
6.5	Korrekturansatz für die hydraulische Altersberechnung (Exponential-Ansatz)	30
6.6	Multiple-Regressionsanalyse (PLS-Modell) zur Berechnung des Grundwasseralters	32
6.7	Zusammenhang zwischen Nitratabbau (N_2/Ar -Methode) und T/He-Alter	34
7	Zusammenfassung und Fazit	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage der Grundwassermessstellen innerhalb der Grundwasserkörper und den Grundwasserbilanzgebieten	3
Abbildung 2:	Strombahnen zu den GWM. Im gelb hinterlegten Überlappungsbereich zwischen den Datensätzen der Länder Sachsen-Anhalt und Brandenburg wurden die Isohypsen entfernt und die GW-Höhen durch Interpolation ermittelt.	6
Abbildung 3:	Querschnitt durch den Grundwasserleiter und Fließpfadkonzept nach dem Exponentialmodell (aus [14]).	8
Abbildung 4:	Schematisches Beispiel für die Berechnung der hydraulischen Alter anhand von drei Abschnitten entlang einer Strombahn. Links: Gleichverteilte Grundwasserneubildung führt zu einem mittleren Alter von 27,3 Jahren. Rechts: Bei einer variablen Grundwasserneubildung ändert sich sowohl die Aufenthaltszeit in der ungesättigten Zone (UZ) als auch im Grundwasser, da Abschnitte mit höherer GWN stärker gewichtet werden.	11
Abbildung 5:	Vor-Ort-Parameter während der Beprobung der GWM.	13
Abbildung 6:	Anteil der Ionen am Gesamtionenäquivalent.	14
Abbildung 7:	Strombahnlängen für den Datensatz 2022	15
Abbildung 8:	Sickerwasseralter in der ungesättigten Zone unter Verwendung der ArcEGMO-Grundwasserneubildungsraten (oben), hydraulisches GW-Alter in der gesättigten Zone (Mitte) nach der Exponential-Methode, Filtertiefe wird berücksichtigt. Unten: Gesamtalter des Grundwassers.	16
Abbildung 9:	Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium.	17
Abbildung 10:	Mittleres Grundwasseralter nach der T/He-Methode für den Datensatz 2022.	18
Abbildung 11:	Anteile von jungem Grundwasser (< 75 Jahre)	18
Abbildung 12:	Räumliche Darstellung der T/He-Alter für die GWK EN 1 und EN 2 sowie den Strombahnen zu den GWM.	19

Abbildung 13:	Diagramm zur Veranschaulichung dominanter He-Einträge in den untersuchten Messstellen: Ne/He-Konzentrationsverhältnisse vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse in Bezug zu frischem, luftgesättigtem Grundwasser (hellblauer Kreis). Aus T-1.	20
Abbildung 14:	Detailansicht der GWM Pechau und Gübs/Güte und Lage der tektonischen Störungen (Tektonische Übersichtskarte [17]).	21
Abbildung 15:	Übersicht über den Gesamtdatensatz innerhalb der Grundwasserkörper	22
Abbildung 16:	Vergleich der ermittelten Fließlängen nach der Studie von GEO-data / Fugro [3] und BCE [4]	23
Abbildung 17:	Vergleich der Strombahnen aus der Studie aus dem Jahr 2020 (rechts) mit den Ergebnissen nach der Methode dieser Studie (links)	24
Abbildung 18:	Vergleich der hydraulischen Alter mit den in der Studie 2020 ermittelten T/He-Alter	25
Abbildung 19:	Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium für den Gesamtdatensatz (oben), T/He-Alter für den Gesamtdatensatz (unten).	27
Abbildung 20:	Boxplots zu Parametern, die das Grundwasseralter in einer Grundwassermessstelle beeinflussen, sowie das analytische T/He-Alter (unten rechts).	29
Abbildung 21:	Vergleich zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter mit Exponential-Ansatz (links) und Darcy-Ansatz (rechts).	30
Abbildung 22:	Links: Residuen (Differenzen zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter) mit logarithmischer Regression ($R^2 = 0,20$), rechts: Korrigiertes hydraulisches Alter unter Anwendung der logarithmischen Regression (blau) im Vergleich zum hydraulischen Alter nach dem Exponential-Ansatz (grau).	31
Abbildung 23:	Links: Vergleich der T/He-Alter mit den prognostizierten Grundwasseraltern mit vier Parametern Filterunterkante, Redox-Potential, elektrische Leitfähigkeit und Strombahnlänge. Rechts: mit zwei Parametern Filterunterkante und Redox-Potential	33
Abbildung 24:	Vergleich zwischen Nitratabbau (abgeleitet aus der N_2/Ar -Methode) und dem T/He-Alter als Anteil der Nitrat-Ausgangskonzentration (links) und dem absoluten Nitratabbau in mg/l (rechts).	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	PLS-Modell Parametrisierung mittels Koeffizienten und Wichtigkeit der Variablen (VIP)	34
Tabelle 2:	Zusammenstellung der Altersbestimmungen für den Gesamtdatensatz (T/He-Alter, Hydraulische Alter (Exp.-Modell), PLS-Modell.	36

Anlagen

Reihe A: Übersichten und Zusammenstellungen

A-1	Protokolle der Messstellenbeprobung 2022
A-2	Ergebnisse der Analysen der Vor-Ort und Standard-Parameter Studie 2022
A-3	Gesamtdatensatz (MST-Eigenschaften, Hydrogeologische Parameter, T/He-Alter, hydraulische Alter und Korrektur, PLS-Alter, Hydrochemie, N/Ar-Daten)

Teilberichte

T-1	Erläuterungsbericht zur Altersbestimmung mittels T/He (Isodetect GmbH)
-----	--

Verwendete Unterlagen

- [1] Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) et al.: Merkblatt Grundwasserprobennahme, Halle (Saale), 2004.
- [2] Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW): Daten zu Hydroisohypsen, Online-Ressource: <https://gld-sa.dhi-wasy.de/GLD-Portal/>, Zugriff am 20.04.2021.
- [3] GEO-data im Auftrag des LHW: Grundwasseruntersuchungen 2020 auf 3H-(Tritium) und 3He-(Helium) in Sachsen-Anhalt – Vergleich analytische und hydraulische Altersbestimmung, Garbsen, 2021.
- [4] Björnßen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH im Auftrag des LHW: Altersbestimmung von Grundwasser durch 3H/He-Methode und hydraulische Altersberechnungen, Leipzig, 2021.
- [5] Fugro im Auftrag des LHW: Aktualisierung bodenkundlich-hydrogeologischer Datengrundlage im Rahmen der Fortschreibung Nährstoffmodellierung mit GROWA-WEKU-MEPHOS, Torgau, 2017.
- [6] ESRI: ArcGIS Dokumentation zum Toolset „Grundwasser“, Online-Ressource: <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-groundwater-tools.htm>, Zugriff am 22.07.2021.
- [7] GEOS im Auftrag des LHW: Aufbereitung von Datengrundlagen zur Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung für Sachsen-Anhalt (2018/2019), Halsbrücke, 2019.
- [8] Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt: Digitales Geländemodell 5x5 m, Online-Ressource: <https://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/dgm5.html>, Zugriff am 20.04.2021.
- [9] Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) und BAH: Ermittlung hydrologischer Bemessungs-/Bewirtschaftungsgrundlagen für das Land Sachsen-Anhalt auf der Basis des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO, Berlin 2015. Daten aus der Überarbeitung/Fortschreibung des Projektes (2017/2018).

- [10] Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hydrogeologische Übersichtskarte 1:250.000 (HUEK250), Hannover 2013.
- [11] Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland, Rasterdatensatz 250 x 250 m, Hannover 2014.
- [12] Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB): GEOBROKER – Der Internetshop des LGB (abgerufen am 14.04.2022): <https://geobroker.geobasis-bb.de>.
- [13] Förderprogramm der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie; Ermittlung von Verweilzeiten und Denitrifikation in der ungesättigten und gesättigten Zone; Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten, 2018.
- [14] Jurgens, B. C. , J. K. Böhlke, L. J. Kauffman, K. Belitz, und B. K. Esser: A partial exponential lumped parameter model to evaluate groundwater age distributions and nitrate trends in long-screened wells. *Journal of Hydrology*, Bd. 543, S. 109–126, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.011.
- [15] Van Stempvoort, D. R., J. W. Roy, S. J. Brown, und G. Bickerton: Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments. *Journal of Hydrology*, Bd. 401, Nr. 1–2, S. 126–133, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.013.
- [16] Sültenfuß, J. und G. Massmann: Datierung mit der ³He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. *Grundwasser*, Vol.9, Nr.4, S. 221-234, 2004.
- [17] Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB): Tektonische Übersichtskarte 1:400.000.
- [18] GeoDienste GmbH im Auftrag des LHW: N2/Ar-Untersuchungen an Grundwassermessstellen in Sachsen-Anhalt – Endbericht zur Messkampagne 2021, Garbsen, 2021.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Derzeit ist in Deutschland zu beobachten, dass trotz der ergriffenen Maßnahmen zur Verminderung der Nährstoffeinträge durch die Landwirtschaft nur geringe Verbesserungen im Grundwasser beobachtet werden können. Als eine der Ursachen hierfür wird angenommen, dass die Maßnahmen aufgrund der langen Verweilzeiten und Fließzeiten im Grundwasser noch nicht feststellbar sind. Zur Beurteilung dieser Zusammenhänge sollen im Zuge der aktuell geführten Diskussion zur Umsetzung der DüV das Alter von flachem Grundwasser mit teils erhöhten Nährstoffkonzentrationen ermittelt werden.

Die BjörnSEN Beratende Ingenieure Erfurt GmbH (BCE) wurde vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) beauftragt mittels der Tritium/Helium-Datierungsmethode (T/He) eine Altersbestimmung für 20 Messstellen in Sachsen-Anhalt durchzuführen.

Des Weiteren sollen die Ergebnisse der Kampagnen aus den Jahren 2020 (GEO-data und Fugro [3]) und 2021 (BCE [4]) mit dem aktuellen Datensatz zusammengeführt werden.

Mit dem Gesamtdatensatz soll eine Berechnung des Grundwasseralters, basierend auf hydraulischen und hydrogeologischen Parametern erfolgen und mit den T/He-Altern verglichen werden.

2 Datengrundlage

Vom LHW wurden folgende Daten an BCE übergeben:

- Stammdaten zu den Messstellen: Koordinaten, Tiefenlagen, Ausbaudaten, geol. Einheit
- Hydrochemische Analysen der Messstellen
- Probenahmeprotokolle der bisherigen Beprobungen
- Kartenwerke mit Anstrombahnen zu den Messstellen
- Schichtverzeichnisse der Messstellen
- Grundwasserhöhenraster aus dem Grundwasserkataster des LHW
- Daten des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO zur Grundwasserneubildung [9]

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

- Studie zur Grundwasseruntersuchungen 2020 auf ^3H -(Tritium) und ^3He -(Helium) in Sachsen-Anhalt – Vergleich analytische und hydraulische Altersbestimmung, Abschlussbericht und Daten der Firmen GEO-data und Fugro sowie der Universität Bremen
- Studie zur N_2/Ar -Untersuchungen an Grundwassermessstellen in Sachsen-Anhalt – Endbericht zur Messkampagne 2021 GeoDienste GmbH im Auftrag des LHW, 2021

Im Rahmen eines Nachtrags mussten im Grenzbereich zu Brandenburg und Thüringen Grundwasserhöhendaten an das Raster des LHW angefügt werden, da die Strombahnen grenzüberschreitend sind. Die benötigten Daten wurden aus frei nutzbaren Datenportalen durch BCE bezogen:

- Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB): GEOBROKER – Der Internetshop des LGB – Grundwassergleichen, Stichtag Herbst 2015 (abgerufen am 25.03.2022)
- Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN): Kartendienst ANTARES, Grundwasserisohypsen 10-Meter-Abstand, Jena-Göschwitz (abgerufen am 01.04.2022)

3 Grundwassermessstellen

3.1 Lage der Grundwassermessstellen (Beprobung 2022)

Die 20 Grundwassermessstellen (GWM) befinden sich zwischen Magdeburg und Dessau in den Grundwasserbilanzgebieten Bg21-Ehle, Nuthe und Elbtal und Bg36_Südfläming_Elbtal (Abbildung 1). Die Bilanzgebiete überschneiden sich mit den Grundwasserkörpern EN 1 - Westfläming und Elbtal (Ehle) und EN 2 - Leitzkauer Moränenplatte und Elbtal (Nuthe). Die Verbreitung von EN 1 und EN 2 entspricht dabei in etwa dem Bilanzgebiet Bg21- Ehle, Nuthe und Elbtal.

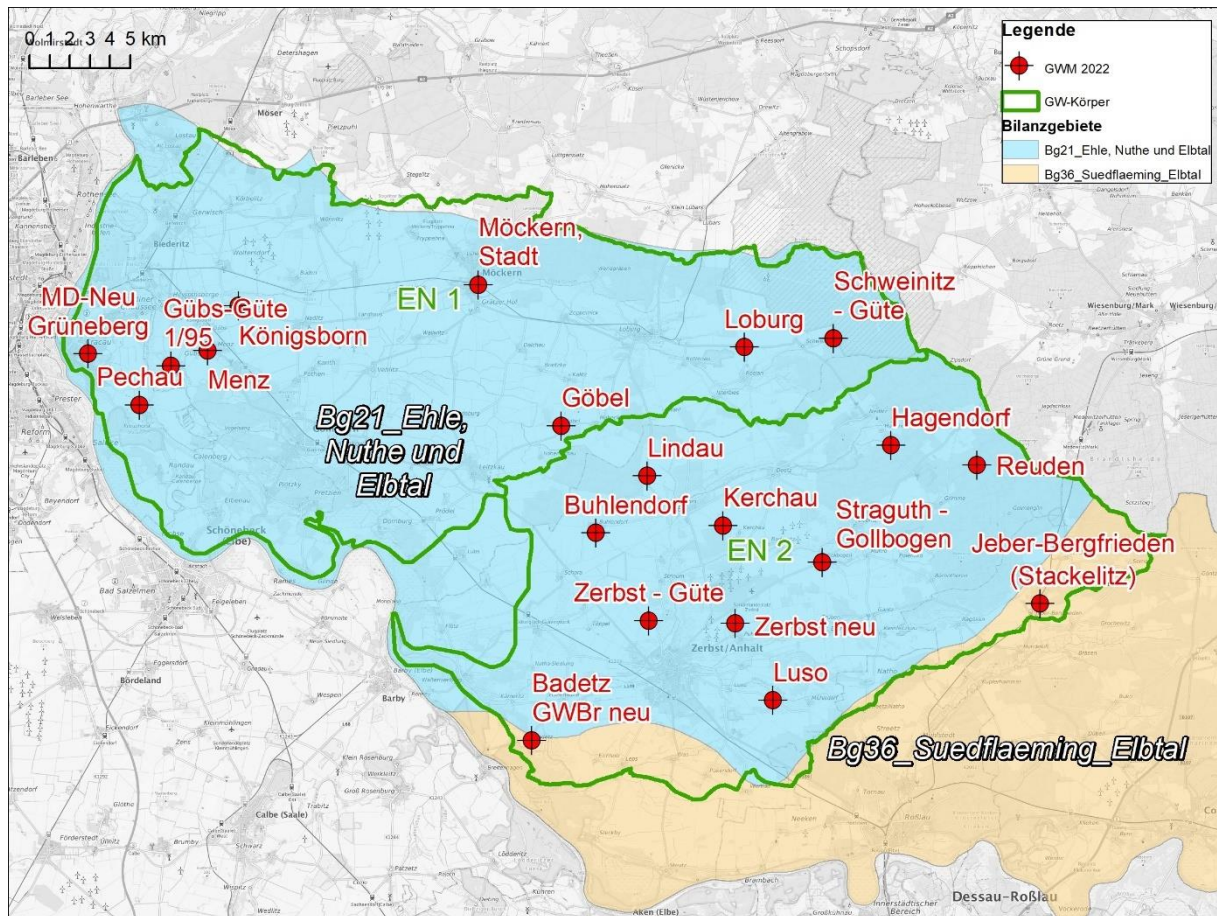


Abbildung 1: Lage der Grundwassermessstellen innerhalb der Grundwasserkörper und den Grundwasserbilanzgebieten

Die GWM sind im oberen Porengrundwasserleiter verfiltert und umfassen die stratigraphischen Einheiten Tertiär (1 GWM), die Pleistozänen Hochflächen (14 GWM) sowie Flussauen mit Auenlehmdecken (5 GWM).

3.2 Beprobung der Grundwassermessstellen

Die Beprobung der Grundwassermessstellen wurde durch die Fa. LUS GmbH, Magdeburg durchgeführt und fand im Zeitraum vom 14.02.2022 bis 01.03.2022 statt. Die Beprobung richtete sich nach dem Merkblatt zur Grundwasserprobennahme des LHW [1]. Es wurde mit der Tauchpumpe MP1 bis zum Erreichen des hydraulischen und hydrochemischen Kriteriums gepumpt. Die Vorortparameter wurden während des Abpumpens kontinuierlich erfasst und protokolliert. Es wurden Grundwasserproben für folgende Analysen entnommen:

- Vorortparameter: Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoff
- Standardparameter: Anionen, Kationen, Eisen, Mangan, DOC, o-Phosphat

- Tritium
- Edelgaskonzentration

Die Proben für die Standardparameter und Tritium wurden in entsprechende Flaschen gefüllt, während für die Analytik der Edelgaskonzentrationen eine spezielle Probenahmetechnik angewendet wurde. Hierbei wird das Grundwasser durch ein Kupferrohr geleitet und nach ausreichender Spülung und Sicherstellung auf blasenfreies Wasser mit Klemmen verschlossen. Somit ist die Probe bis zur Analyse luftdicht verschlossen. Es wurden pro Messstelle zwei Kupferrohre befüllt, um eine Backup-Probe zu erhalten.

4 Methodik

4.1 Laboruntersuchungen

4.1.1 Vor-Ort- und Standardparameter

Die Analysen wurden durch die Fa. LUS GmbH durchgeführt. In der Anlage A-1 sind die Probenahme- und Analysenprotokolle aufgeführt. In Anlage A-2 sind die Ergebnisse der Analysen in tabellarischer Form aufgelistet.

4.1.2 Edelgase und Tritium

Die Analysen der Proben für Tritiumkonzentrationen erfolgten durch das Labor Isodetect GmbH, Leipzig. Die Edelgaskonzentrationen wurden durch die Firma Isotoptech Zrt. in Debrecen, Ungarn gemessen.

4.2 Hydraulische Altersbestimmung

Das Alter von Grundwasser an einem bestimmten Punkt im Grundwasserleiter setzt sich aus folgenden Zeitkompartimenten zusammen:

- die Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone von Geländeoberkante bis zum Grundwasser
- Fließzeit im gesättigten Grundwasserleiter
- direkter Eintrag von jungem Oberflächenwasser z. B. über Fließgewässer in das Grundwasser
- direkter Eintrag von älterem Grundwasser aus tieferen Grundwasserstockwerken

Weiterhin ist der Messstellenausbau (Filterstrecke) sowie die Probenahmetiefe für das Grundwasseralter relevant.

Im Folgenden werden nur die Alter in der ungesättigten Zone und der Fließzeit im Grundwasserleiter bestimmt. Die direkten Einträge aus dem Oberflächenwasser oder tiefem Grundwasser können in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Diese Einträge sind allerdings potentielle Ursachen für die Abweichung zwischen hydraulischem Alter und dem durch die T/He-Methode berechneten Alter. Für alle Berechnungsmethoden werden vorab die Strombahnen und Fließlängen zu den GWM in GIS ermittelt (4.2.1). Die Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone wird nach der LAWA-Arbeitshilfe berechnet (Abschnitt 4.2.2). Für die Berechnung der hydraulischen Alter wurden zwei Ansätze verwendet. Zum einen wurden die Fließzeiten abschnittsweise für jede Strombahn nach dem Gesetz von Darcy berechnet (Abschnitt 4.2.3). Des Weiteren erfolgt eine Berechnung nach dem sog. Exponentialansatz nach [14] (Abschnitt 4.2.3).

Hinweis:

Für einen Vergleich zwischen hydraulischem Alter und dem durch die T/He-Methode bestimmten Alter ist nur die Fließzeit im Grundwasser geeignet. Erst nach vollständigem Luftabschluss, d. h. also ab dem Eintreten des Sickerwassers aus der ungesättigten Zone in die gesättigte Zone, findet kein Austausch mehr mit atmosphärischen Gasen statt und das Alter kann über den Zerfall von Tritium zu ^3He berechnet werden. Das Alter in der ungesättigten Zone wird hier ausschließlich über die bodenhydrologischen Zusammenhänge ermittelt, eine isotopenhydrologische Bestimmung erfolgt nicht.

4.2.1 Ermittlung der Strombahnen

Auf Grundlage des Rasters der Grundwasserhöhen aus dem Grundwasserkataster des LHW wird mittels des ArcGIS-Toolsets „Grundwasser“ [6] für jede Messstelle mit dem Werkzeug „Darcy-Geschwindigkeit“ ein Richtungs- und ein Geschwindigkeitsfeld der Grundwasserströmung berechnet (das Geschwindigkeitsfeld wird nur von den ArcGIS-Toolsets benötigt, es wird später nicht mehr benötigt). Anschließend wird das Werkzeug „Partikelverfolgung“ genutzt, um die Strombahn und hieraus die gesamte Fließlänge von der Messstelle zum höchsten Punkt des Grundwassereinzugsgebiets zu ermitteln.

Die Strombahnen einiger GWM im Osten des Gebiets überqueren die Grenzen zwischen den Bundesländern Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Damit auch die Strombahnen in Brandenburg möglichst realistisch ermittelt werden können, wurde das Grundwasserhöhenraster aus Brandenburg an das Raster des LHW angefügt. Damit sich keine abrupten Änderungen im Grenzgebiet ergeben, wurden im Bereich von überlappenden Isohypsen die Grundwasserhöhen durch lineare Interpolation ergänzt. Die finalen Strombahnen zeigen

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

durch diese Methodik einen stufenfreien Übergang zwischen Brandenburg und Sachsen-Anhalt (Abbildung 2).

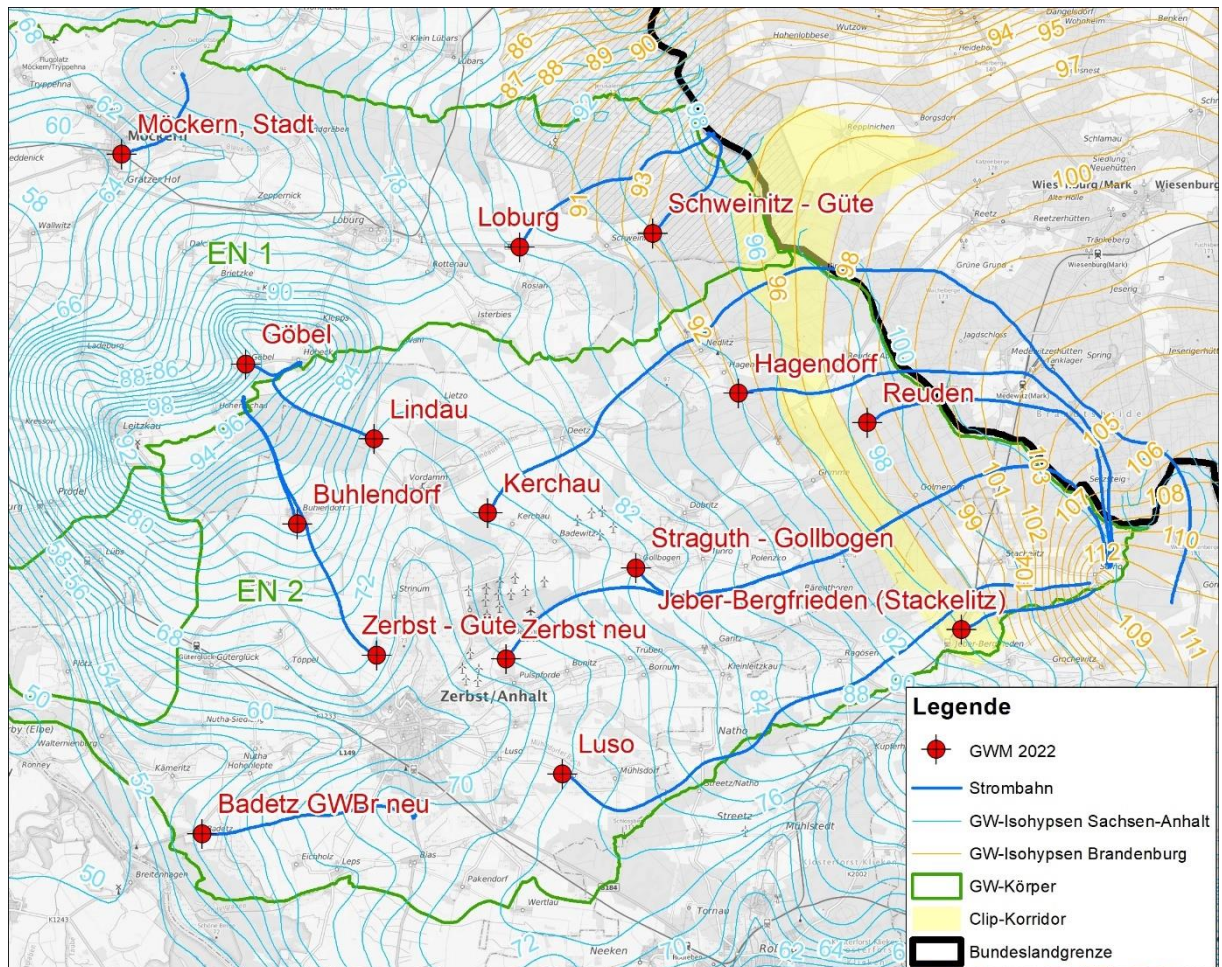


Abbildung 2: Strombahnen zu den GWM. Im gelb hinterlegten Überlappungsbereich zwischen den Datensätzen der Länder Sachsen-Anhalt und Brandenburg wurden die Isohypsen entfernt und die GW-Höhen durch Interpolation ermittelt.

Die jeweiligen Strombahnen wurden in 100-m-Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wurden folgende Flächendaten am Mittelpunkt der Polylinie abgegriffen:

- Grundwasserhöhe aus dem Grundwasserkataster des LHW
- nutzbare Feldkapazität (n_{FK}) [7]
- Grundwasserflurabstand (GfA) [7]
- hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) [7] und [10]
- Geländeoberkante (GOK) [8]
- Grundwasserneubildung (GWN) [9] und [10]

Für die Fließabschnitte in Brandenburg wurden für die nutzbare Feldkapazität die Bodendaten des BGR verwendet [10], sowie das DGM (10 x 10 m) des Landes Brandenburg [12] zur Berechnung des Grundwasserflurabstands. Die Daten zur Grundwasserneubildung des LHW [7] haben einen ausreichend breiten Puffer, der bis in das Land Brandenburg hineinreicht.

4.2.2 Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone

Die Sickerwasserzeit t_{UZ} in der ungesättigten Zone wurde für jeden Abschnitt entlang der Strombahnen berechnet: Es wird die Formel aus der LAWA-Arbeitshilfe [13] angewendet:

$$t_{UZ} = \frac{n_{FK} \cdot d}{GWN} \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

t_{UZ} :	Sickerwasserzeit in der ungesättigten Zone (UZ) [a]
n_{FK} :	nutzbare Feldkapazität [mm/dm]
GWN :	Grundwasserneubildung [mm/a]
d :	Schichtmächtigkeit ungesättigte Zone; Grundwasserflurabstand [dm]

Die Sickerwasserzeit kann sowohl abschnittsweise auf das Grundwasseralter aufaddiert werden, um dann anschließend das gesamte mittlere Alter inkl. Sickerwasserzeit und Grundwasserfließzeit zu erhalten (Darcy-Ansatz) oder auch als Mittelwert dem mittleren Grundwasseralter zugeschlagen werden (Exponential-Ansatz).

4.2.3 Exponential-Ansatz

Das mittlere Grundwasseralter ergibt sich aus theoretischen Gesetzmäßigkeiten zum Volumenstrom innerhalb eines Grundwasserleiters. Dabei wird angenommen, dass sich das durch die Grundwasserneubildung eingebrachte Wasser entlang von exponentiellen Fließbahnen durch den Grundwasserleiter bewegt (Abbildung 3). Hierzu werden folgende Annahmen getroffen: Der Grundwasserleiter ist ungespannt, homogen, mit gleichbleibender Mächtigkeit und gleicher Neubildungsrate.

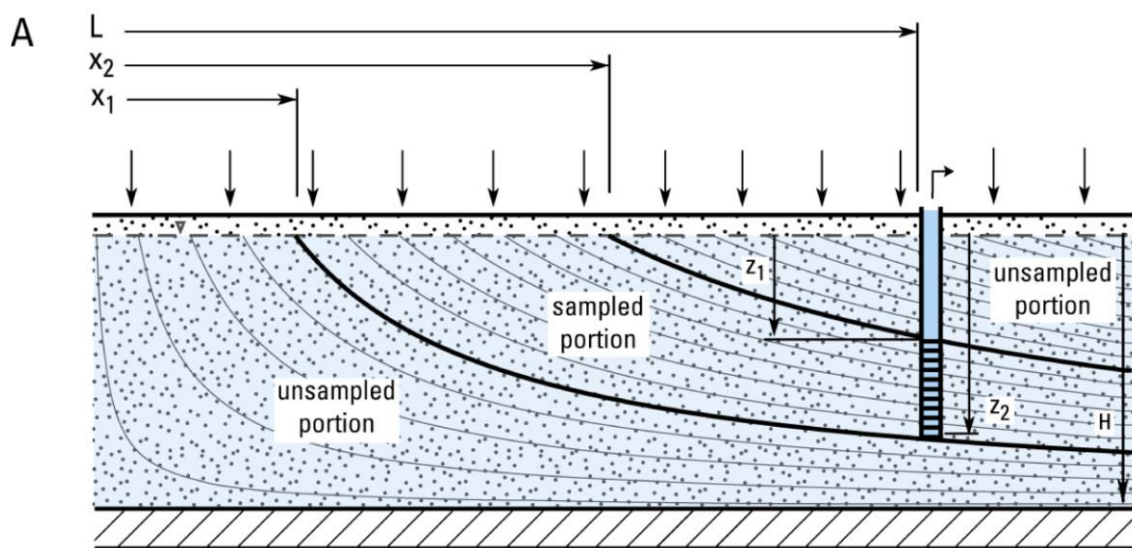


Abbildung 3: Querschnitt durch den Grundwasserleiter und Fließpfadkonzept nach dem Exponentialmodell (aus [14]).

Die grundlegende Formel für das mittlere Alter über die gesamte wassergesättigte Tiefe des Grundwasserleiters nach dem Exponentialmodell lautet:

$$t = \left(\frac{Hn}{R} \right) \quad \text{Gl. 2}$$

mit:

t : Alter über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters [a]

R : Grundwasserneubildung [mm/a]

H : Gesättigte Grundwassermächtigkeit [m]

n : Porosität [-]

Das Grundwasseralter nimmt generell mit der Tiefe zu. Daher kann die Lage der Filterstrecke eine große Rolle spielen, weil meist nur ein Teil der gesamten Mächtigkeit des Grundwasserleiters beprobt wird. Aus dem Gesamtalter aus Gl. 2 kann das Alter des beprobten Horizonts über folgende Formel berechnet werden [14]:

$$t_{Filter} = t \cdot \left(\frac{H}{z_2 - z_1} \right) \cdot \left[\left(\frac{H - z_2}{H} \right) \cdot \ln \left(\frac{H - z_2}{H} \right) - \left(\frac{H - z_2}{H} \right) - \left(\frac{H - z_1}{H} \right) \cdot \ln \left(\frac{H - z_1}{H} \right) + \left(\frac{H - z_1}{H} \right) \right] \quad \text{Gl. 3}$$

mit:

t_{Filter} :	Alter für den Filterabschnitt [a]
t :	Alter über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters [a]
H :	Gesättigte Grundwassermächtigkeit [m]
z_1 :	Tiefe Filteroberkante unter Grundwasserstand [m]
z_2 :	Tiefe Filterunterkante unter Grundwasserstand [m]

Die Filtertiefen der Messstellen und die Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurden aus den Schichtenverzeichnissen und den Ausbaudaten zu den Messstellen entnommen (Übergabe erfolgte durch das LHW). Falls die Schichtunterkante des Grundwasserleiters nicht verzeichnet ist, wurde diese aus den geologischen Schnitten entnommen.

In die Berechnung nach diesem Ansatz gehen Mittelwerte der Grundwasserneubildung entlang der Strombahn sowie die gesättigte Grundwassermächtigkeit an der GWM ein. Für die Porosität wird für alle Berechnungen ein Wert von 0,1 verwendet. Das Gesamalter (ungesättigt und gesättigt) ergibt sich durch Addition des hier berechneten Grundwasseralters und der mittleren Sickerwasserzeit über die gesamte Strombahn.

Die LAWA-Arbeitshilfe [13] schlägt zur Ermittlung des hydraulischen Alters das sog. Teufe-Neubildungsverfahren vor. Dieses ist ähnlich zu dem hier vorgestellten Exponential-Ansatz, jedoch entspricht die gesättigte Grundwassermächtigkeit H im Teufe-Neubildungsverfahren der jeweiligen Filterober- und -unterkante (z_1 und z_2) unter Grundwasseroberfläche. Aus beiden Tiefenstrecken werden jeweils die hydraulischen Alter über Gl. 2 berechnet und hieraus das arithmetische Mittel gebildet.

4.2.4 Darcy-Ansatz

Die Berechnungen der hydraulischen Alter nach dem Darcy-Ansatz umfasst folgende Arbeitsschritte:

- (1) Die Fließzeit im Grundwasser t_{GW} wird für jeden Abschnitt über das Gesetz von Darcy, umgestellt nach der Zeit, berechnet:

$$t_{GW}(s) = \frac{L}{-i \cdot k_f \cdot \frac{1}{n}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

- t_{GW} : Fließzeit im Grundwasser [a]
- L : Abschnittslänge [m]
- i : Gradient; Grundwassergefälle [-]
- k_f : hydraulische Leitfähigkeit [m/a]
- n : Porosität [-]

Für jede Strombahn wird das Grundwassergefälle, der Gradient i aus dem Quotienten zwischen Grundwasserstandsdifferenz zwischen zwei Abschnitten und der Abschnittslänge L bestimmt. Die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) wird aus [7] und [10] für jeden Abschnitt bestimmt, die Porosität n wird als konstanter Wert angenommen (identisch zum Exponential-Ansatz: 0,1).

- (2) Zwischen jedem Abschnitt und der Messstelle wird ein separater Fließpfad mit seinem jeweiligen Alter bestimmt. Hierfür wird für jeden dieser Fließpfade die Fließzeit im GW für alle durchströmten Abschnitte aufaddiert. Zusätzlich wird das Alter in der ungesättigten Zone des Abschnitts, wo der Fließpfad beginnt, hinzuaddiert (Abbildung 4).
- (3) Gewichtung der Fließzeit durch die Grundwasserneubildung (GWN): Die GWN entlang einer Strombahn zur Messstelle variieren teilweise stark (von hohen Raten in den Hochlagen bis zu den Flusstälern). Hieraus ergibt sich, dass anteilig mehr Wasser aus den Bereichen mit höherer GWN in der Messstelle zu erwarten ist, d. h. das Alter dieses Wassers ist stärker zu gewichten. Die Gewichtung wird über die Abweichung von der gemittelten GWN über die gesamte Strombahn ermittelt und mit dem Gesamalter jeder Strombahn verrechnet (Abbildung 4, rechts).
- (4) Aus dem jeweiligen Alter der Fließpfade einer Strombahn wird ein Mittelwert gebildet. Dieser gibt das mittlere Alter des Wassers in der Messstelle über den gesamten Grundwasserleiter wieder.
- (5) Berücksichtigung der Filtertiefe: Das Alter in der Filtertiefe wird analog zum Exponential-Ansatz nach Gl. 3 berechnet.

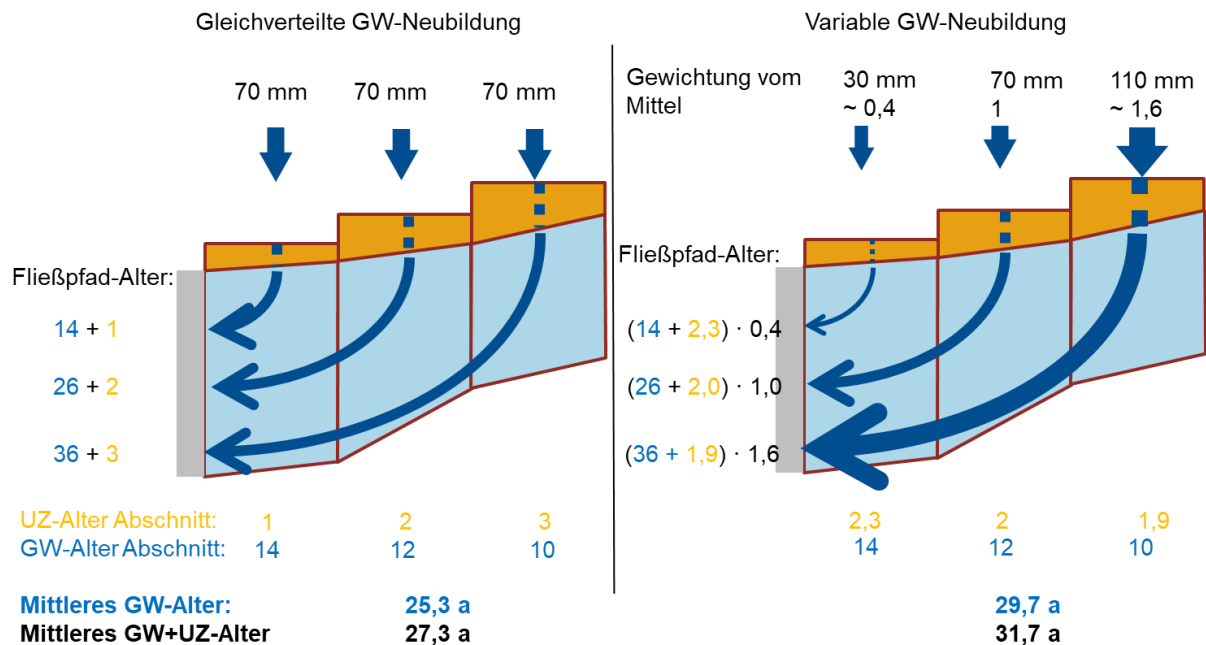


Abbildung 4: Schematisches Beispiel für die Berechnung der hydraulischen Alter anhand von drei Abschnitten entlang einer Strombahn. Links: Gleichverteilte Grundwasserneubildung führt zu einem mittleren Alter von 27,3 Jahren. Rechts: Bei einer variablen Grundwasserneubildung ändert sich sowohl die Aufenthaltszeit in der ungesättigten Zone (UZ) als auch im Grundwasser, da Abschnitte mit höherer GWN stärker gewichtet werden.

4.3 Altersbestimmung durch die Tritium-Helium-Methode

Durch den Zerfall von Tritium (^3H) wird als Zerfallsprodukt ^3He gebildet, welches sich im Grundwasser anreichert, da es ein stabiles Isotop ist [15]. Es eignet sich daher zur Bestimmung der mittleren Verweilzeiten von Grundwässern. Die Altersdatierung kann rechnerisch über eine Massenbilanzierung von Tritium und ^3He erfolgen, wobei jedoch zusätzliche Einträge von Helium berücksichtigt werden müssen [16]. Die gemessene ^3He -Konzentration setzt sich zusammen aus Anteilen der Atmosphäre, dem Erdmantel, einer sog. „excess-air“-Komponente und dem Zerfall aus Tritium. Als „excess air“ wird die Übersättigung an gelösten Gasen im Grundwasser bezeichnet. Sie wird vorwiegend durch Wechselwirkungen zwischen Bodenluft und Wasser nahe des Grundwasserspiegels hervorgerufen. Kleine Luftblasen, die in Bodenporen gefangen sind, werden bei Schwankungen des Grundwasserspiegels im Grundwasser eingeschlossen. Der hierbei erzeugte hydrostatische Überdruck erzwingt einen Gasaustausch, der zu einem Überschuss von gelösten Gasen führen kann. Zur Quantifizierung der Helium-Komponente über „excess-air“ dient der Neongehalt des Grundwassers, der als konservativer Tracer von Zerfallsprozessen unbeeinflusst ist. Die Quantifizierung des durch den Zerfall gebildeten ^3He kann anhand bekannter Tracer- und Temperaturverhältnisse berechnet werden. Der Eintrag aus dem Erdmantel kann über das Verhältnis von ^4He und ^3He bestimmt werden. Weiterhin können aus den ^3He -/ ^4He -Isotopenverhältnissen die Anteile von jungem und altem Grundwasser bestimmt werden, da sich ^4He aus dem

Erdmantel stammend umso mehr anreichert, je älter das Wasser ist. Details zur Methodik der T-He-Altersbestimmung und der Ergebnisinterpretation sind im Teilbericht T-1 zu finden.

5 Ergebnisse - Datensatz 2022

5.1 Hydrochemische Charakterisierung

5.1.1 Vor-Ort-Parameter

Die Temperaturen liegen für die beprobten GWM zwischen 10,0 und 13,1°C (Abbildung 5). Die höchsten Temperaturen mit über 12°C treten in den GWM Magdeburg-Neu Grüneberg und Menz auf. Der pH-Wert liegt bei den meisten GWM unter pH = 7, jedoch nicht niedriger als pH = 6. Auffallend sind die niedrigen pH-Werte in den GWM Luso und Zerbst (pH = 6,2). Das Redox-Potential liegt zwischen + 213 mV und - 160 mV, was auf reduzierende Bedingungen von Nitrat, Mangan, Eisen und auch Sulfat hinweist. Die gelöste Sauerstoffkonzentration liegt in dem Großteil der GWM bei 0,1 mg/l. Dies weist auf eine hohe aerobe mikrobiologische Aktivität hin. Unter dieser niedrigen Sauerstoffkonzentration setzt auch die anaerobe Denitrifikation ein, die durch die Oxidation von Kohlenstoff oder Eisensulfiden Nitrat reduziert. Nur in GWM Menz und Reuden werden Sauerstoffkonzentrationen über 2 mg/l bzw. 1 mg/l erreicht.

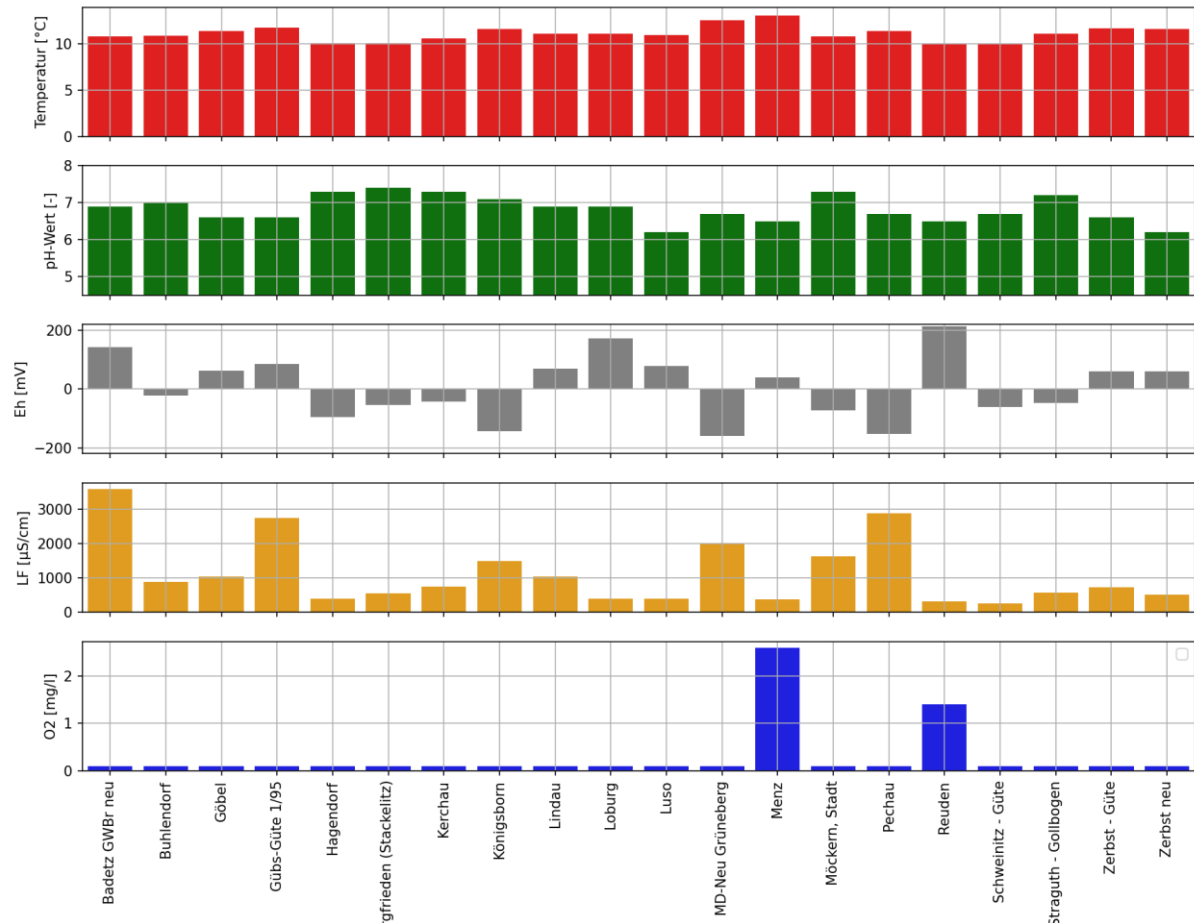


Abbildung 5: Vor-Ort-Parameter während der Beprobung der GWM.

5.1.2 Hauptionen

Das Grundwasser kann auf Grundlage der Ionenkonzentrationen generell als erdalkalisches, überwiegend sulfatisches, teils hydrogenkarbonatisch-sulfatisches Wasser charakterisiert werden. Bei einigen GWM im GWLK EN 1 liegt eher ein sulfatisch-chloridisches Wasser vor.

Calcium ist das dominierende Kation, während HCO_3^- oder SO_4^{2-} das dominierende Anion ist (Abbildung 6). Die Anteile von Nitrat am Gesamtionenäquivalent liegen bis auf GWM Loburg unter 2 %, was auch durch die sehr niedrigen Nitratkonzentrationen insgesamt zurückzuführen ist. In GWM Loburg mit der höchsten Nitratkonzentration von 89,4 mg/l liegt der Nitratanteil bei rd. 10 %. Bei den GWM Gübs-Güte, Pechau und Badetz ist der Chlorid-Anteil erhöht, einhergehend mit einer niedrigeren HCO_3^- - Konzentration. In GWM Menz, Badetz und Göbel sind insbesondere die Kalium-Konzentrationen stark erhöht. Erhöhte Kalium und Chlorid-Konzentrationen können auf einen Eintrag von Abwässern oder Gülle hinweisen. Die hydrochemischen Analysen der Grundwasserproben sind in Anlage A-2 zusammengestellt.

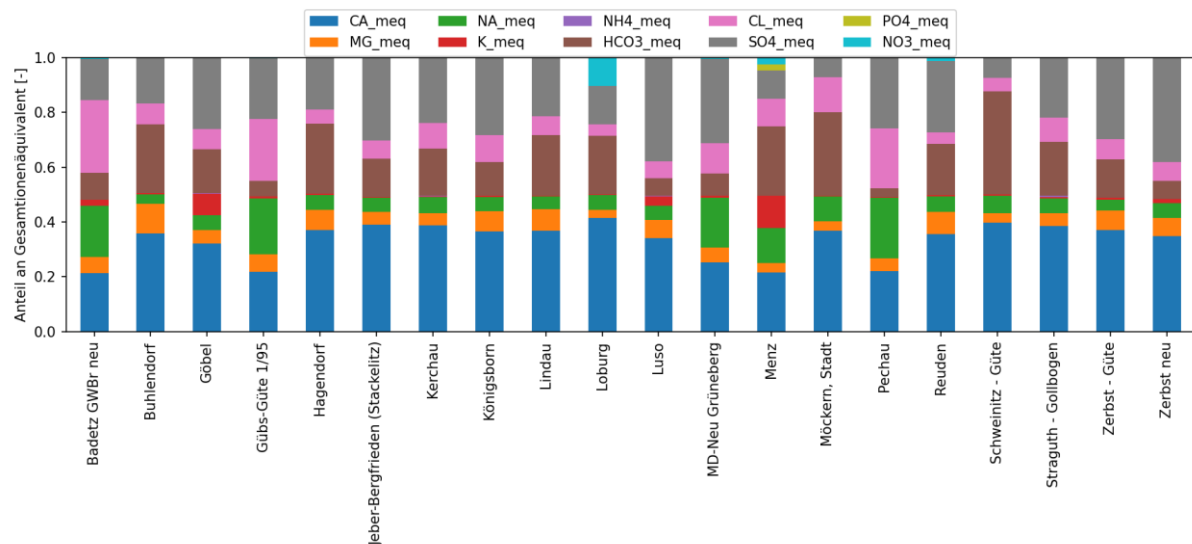


Abbildung 6: Anteil der Ionen am Gesamtionenäquivalent.

5.2 Hydraulische Alter

In Abbildung 8 werden die berechneten hydraulischen Grundwasseralter in der gesättigten Zone sowie die Gesamtzeit (ungesättigt + gesättigt) zu den GWM dargestellt. Hierfür wurden die folgenden Datengrundlagen genutzt:

- Sickerwasserzeitberechnung:
 - GW-Neubildung ArcEGMO
 - nutzbare Feldkapazität
 - Grundwasserflurabstand
- Exponential-Ansatz:
 - GW-Neubildung ArcEGMO
 - Filtertiefen
 - Porosität: 0,1
 - Aquiferdaten (Aquiferbasis, Grundwasserstände)

Die höchsten hydraulischen GW-Alter werden mit rd. 200 Jahren für die GWM Buhlendorf und Zerbst-neu ermittelt. Die jüngsten GW-Alter mit unter zehn Jahren sind für Menz, Badetz und Luso berechnet worden. Die Sickerwasserzeiten in der ungesättigten Zone erhöhen das GW-Alter der jeweiligen GWM um mehrere Jahre bzw. Jahrzehnte.

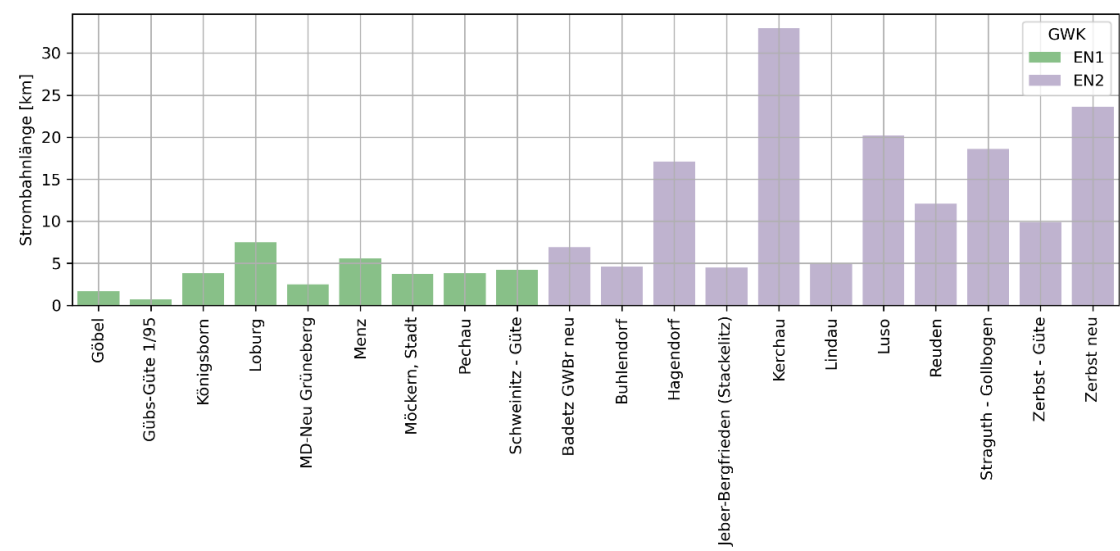


Abbildung 7: Strombahnlängen für den Datensatz 2022

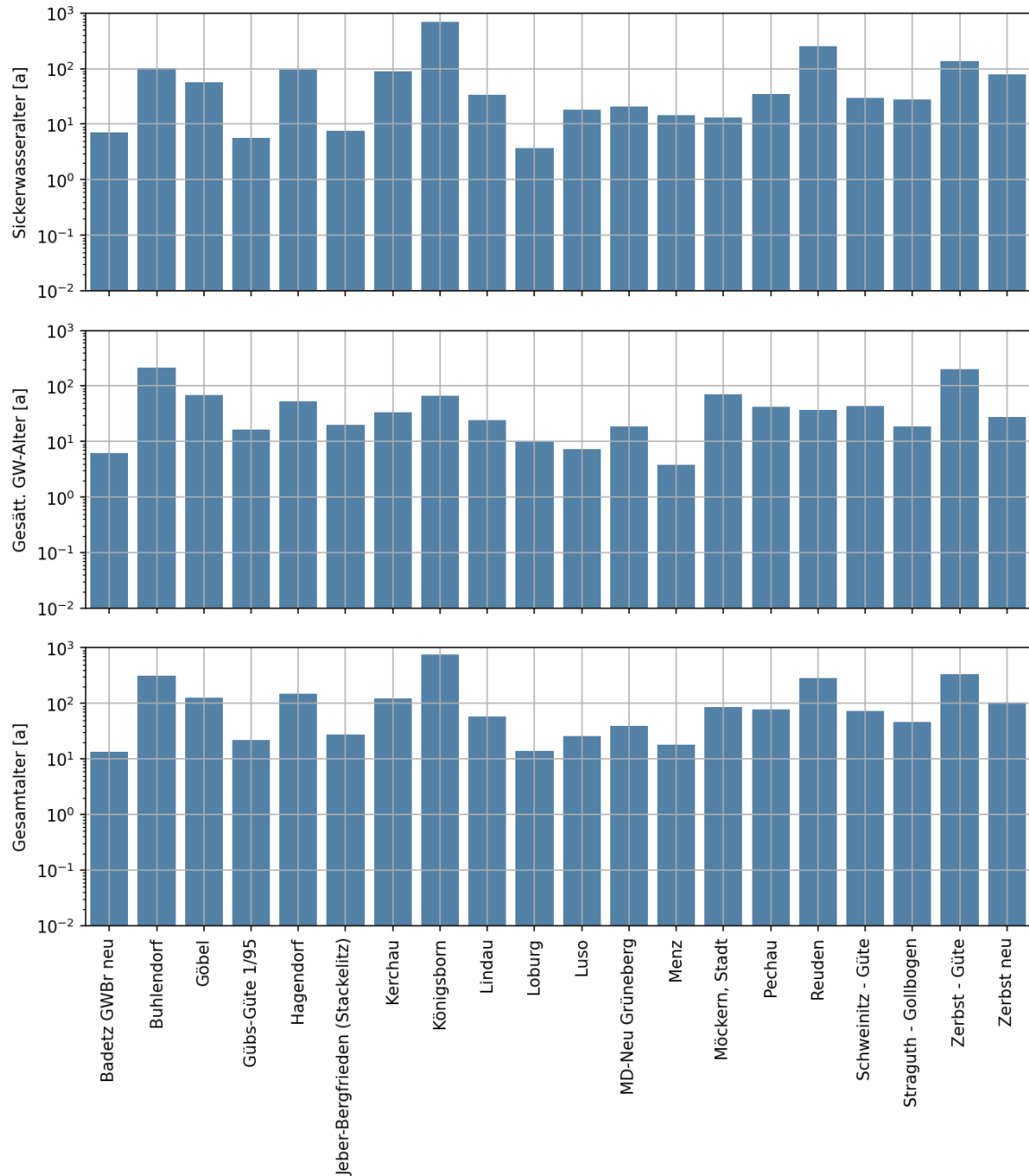


Abbildung 8: Sickerwasseralter in der ungesättigten Zone unter Verwendung der ArcEGMO-Grundwasserneubildungsraten (oben), hydraulisches GW-Alter in der gesättigten Zone (Mitte) nach der Exponential-Methode, Filtertiefe wird berücksichtigt. Unten: Gesamtalter des Grundwassers.

5.3 T/He-Altersdatierung

In 19 von 20 Grundwasserproben wurde sowohl rezentres Tritium als auch tritiogenes 3-Helium analysiert, wodurch eine Altersdatierung möglich ist (Abbildung 9). Nur in GWM Schweinitz ist

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

Tritium schon vollständig zerfallen, wodurch hier von einem sehr hohen Alter auszugehen ist. Die mittleren Alter in den Grundwasserproben liegen zwischen 2 und 62 Jahren (Abbildung 10), wobei in zwei Proben ein Alter mit über 75 Jahren berechnet wurde (Königsborn und Schweinitz / Güte). In diesen Proben traten jedoch auch höhere Gasverluste auf, wodurch die Datierung nur als Richtwert interpretiert werden kann. Im Mittel über alle Proben ist das Grundwasser knapp 40 Jahre alt. Der Anteil an jungem Grundwasser (jünger als 75 Jahre) ist in neun GWM höher als 50 %.

Grundwasseralter jünger als 75 Jahre aber ohne überwiegenden Anteil an sehr altem Grundwasser sind durch hohe Anteile von tritiogenem ^3He ($> 65\%$ des gesamten ^3He -Gehalts) gekennzeichnet. Dies trifft für die GWM Kerchau und Zerst-neu zu, was auf Grundwasser aus den 1970er bis 1980er Jahren hindeutet.

Sehr junges Grundwasser (hohe Tritium- und relativ dazu niedrige tritiogene ^3He -Konzentrationen) ist insbesondere in den GWM Loburg, Luso, Badetz GWBr neu, Menz, Möckern / Stadt und Jeber-Bergfrieden anzutreffen.

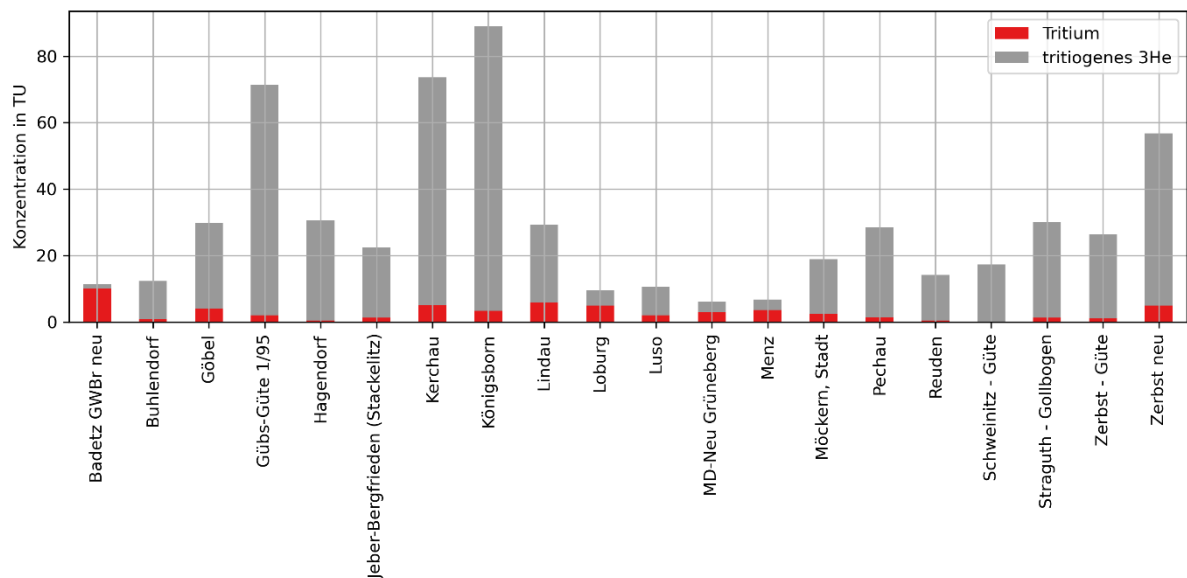


Abbildung 9: Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium.

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

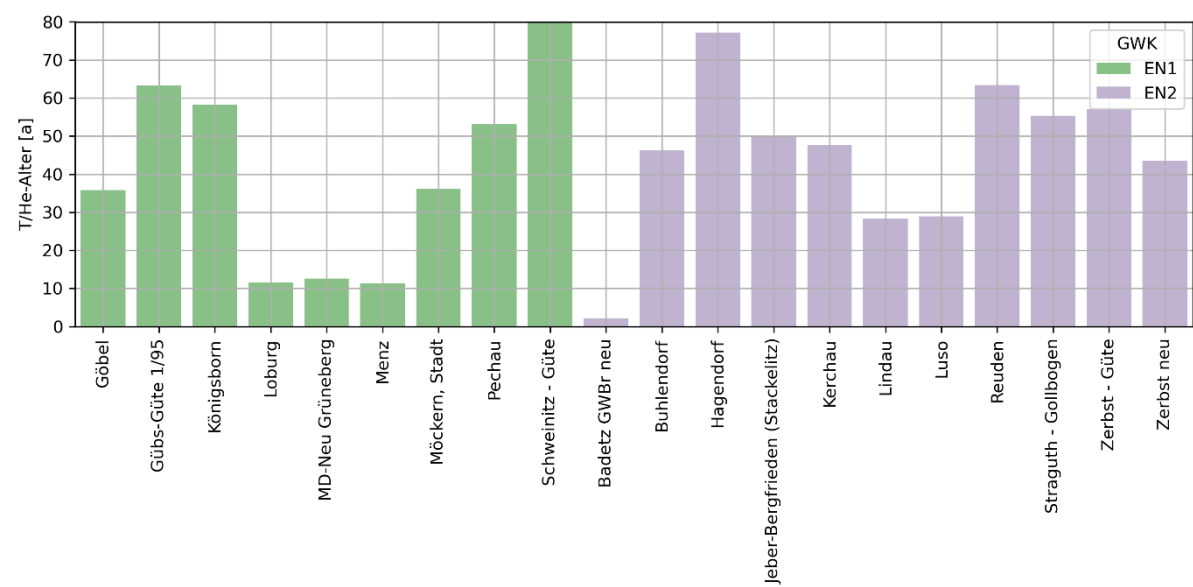


Abbildung 10: Mittleres Grundwasseralter nach der T/He-Methode für den Datensatz 2022.

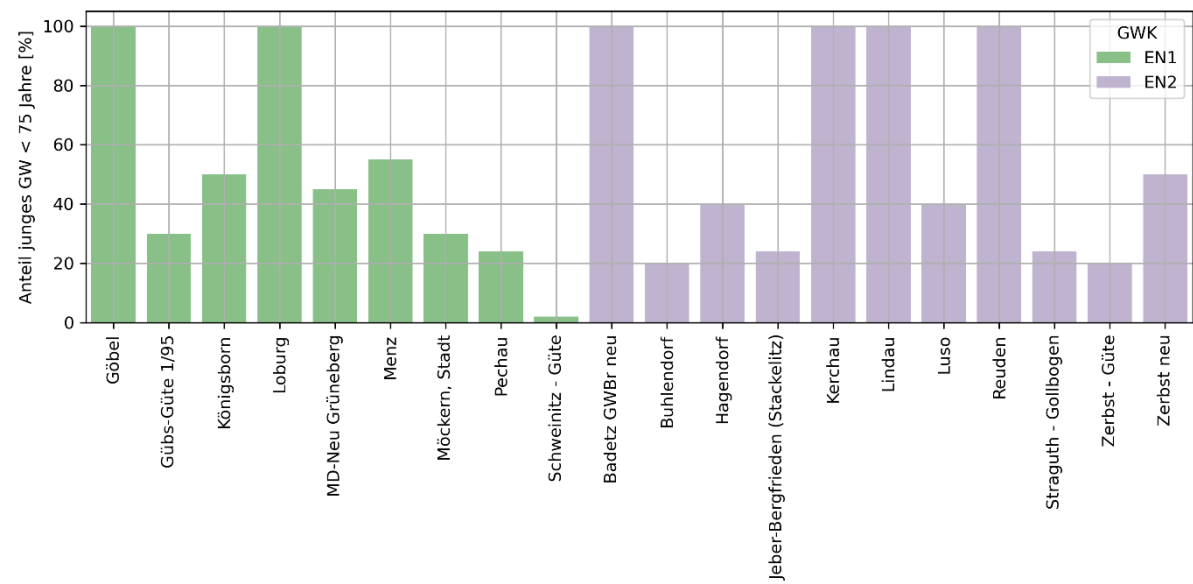


Abbildung 11: Anteile von jungem Grundwasser (< 75 Jahre)

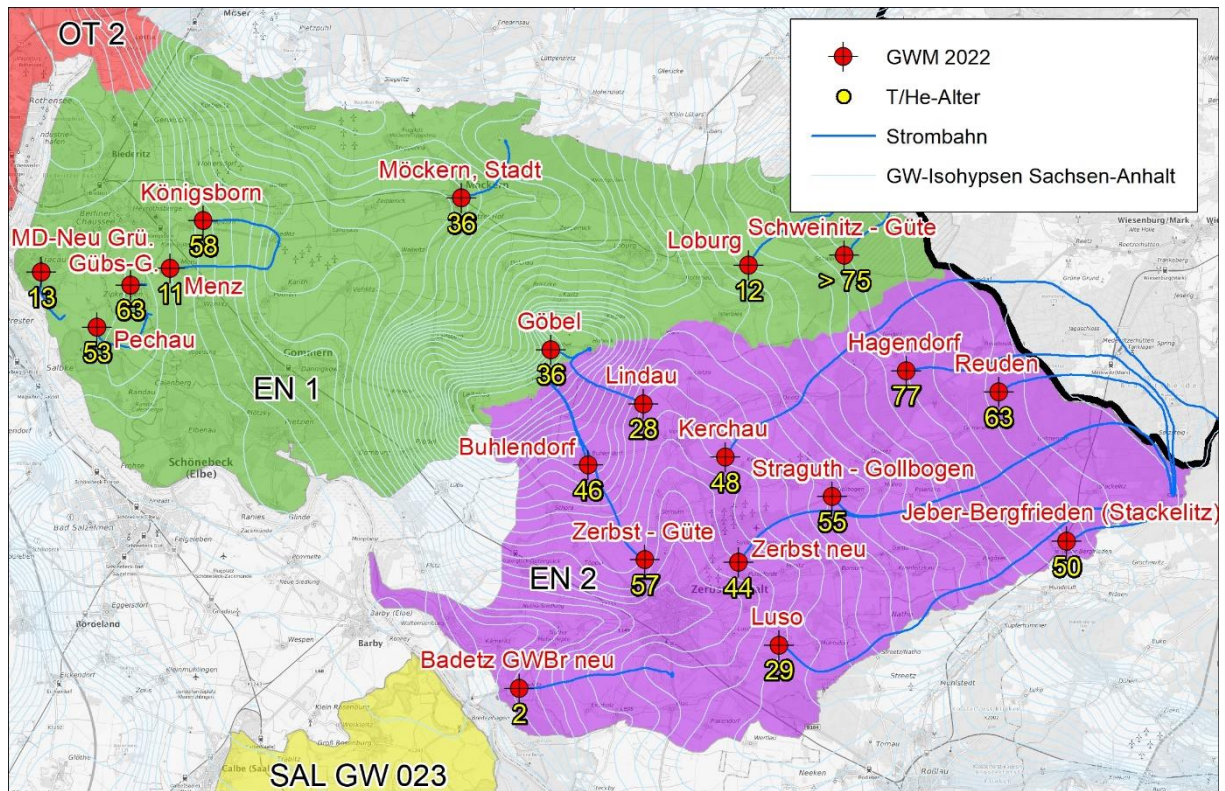


Abbildung 12: Räumliche Darstellung der T/He-Alter für die GWK EN 1 und EN 2 sowie den Strombahnen zu den GWM.

Aus den Verhältnissen der einzelnen Heliumkomponenten sowie der Neokonzentrationen kann auf die Helium-Einträge in das Grundwasser geschlossen werden. In Abbildung 13 ist der Datenpunkt für frisches Grundwasser, das unter Standardbedingungen im Lösungsgleichgewicht mit der Atmosphäre steht, hellblau hervorgehoben ($\text{Ne/He} = 4,34$; $^3\text{He}/^4\text{He} = 1,38 \cdot 10^{-6}$). Ein geringeres Ne/He -Verhältnis und zugleich ein geringeres $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis indizieren den Eintrag von radiogenem Helium, das hauptsächlich aus ^4He besteht (grün eingefärbtes Rechteck) und in sehr altem Grundwasser vorkommt. Ein zunehmendes $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis weist dagegen auf die Bildung von tritiogenem ^3He hin, was die Altersbestimmung über die T/He-Methode ermöglicht. Durch einen Heliumeintrag aus *excess air* kann ein Messpunkt nach links verschoben werden, da der Heliumeintrag stärker ist als derjenige von Neon.

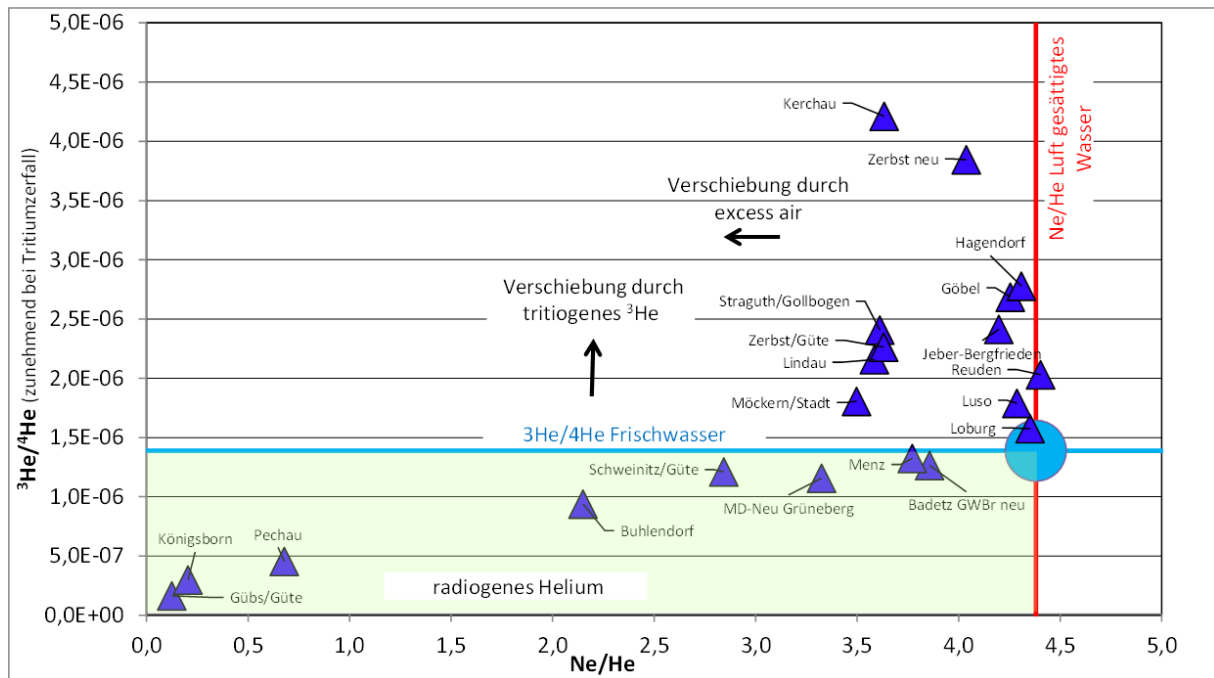


Abbildung 13: Diagramm zur Veranschaulichung dominanter He-Einträge in den untersuchten Messstellen: Ne/He-Konzentrationsverhältnisse vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse in Bezug zu frischem, luftgesättigtem Grundwasser (hellblauer Kreis). Aus T-1.

Auffallend sind die Proben Pechau und Gübs / Güte, die eine hohe Konzentration an radio-genem ^4He enthalten, was nur in sehr altem Grundwasser höher konzentriert vorkommt (in grünem Bereich in Abbildung 13). Die Proben weisen aber auch hohe Konzentrationen von tritiogenem 3-Helium auf, sodass hier eine Mischung von jungem (< 75 Jahre) und sehr altem Grundwasser (> 500 Jahre) angenommen werden kann. Das mittlere Grundwasseralter für diese Proben liegt zwischen 50 und 60 Jahren mit einem Anteil von nur 25 % bis 30 % jungem Grundwasser. Berücksichtigt man die sehr flachen Verfilterungen von 5 m bzw. 7 m bis 9 m u GOK sowie die Lage der GWM innerhalb der fluviatilen Ablagerungen der Elbe / Alten Elbe südlich von Magdeburg, erscheint dieses relativ hohe mittlere Alter zunächst nicht plausibel. Allerdings liegen die GWM laut tektonischer Karte des LAGB [17] in der Nähe der SE-NW- und SW-NE-verlaufenden Störungszonen Gräfenhainichen-Störung und Athensleben-Störung (Abbildung 14). Entlang von Störungszonen ist ein präferentieller Aufstieg von sehr altem Grundwasser möglich. Für eine Mischung von altem, meist höher mineralisiertem Grundwasser sprechen auch die für oberflächennahes Grundwasser ungewöhnlich hohen Ionenkonzentrationen in den Proben (Sulfat und Chlorid > 500 mg/l, Natrium und Calcium > 200 mg/).

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erscheint eine Mischung zwischen sehr altem und vergleichsweise jungem Grundwasser plausibel, was die berechneten mittleren Grundwasseralter in den flach verfilterten GWM Pechau und Gübs / Güte erklären kann.

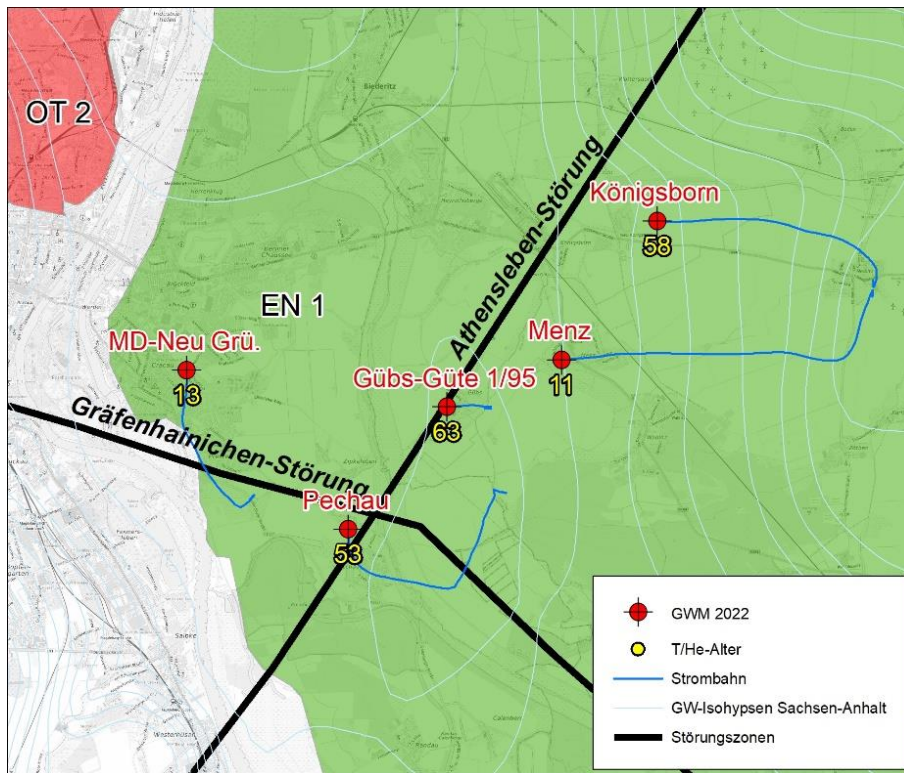


Abbildung 14: Detailansicht der GWM Pechau und Gübs/Güte und Lage der tektonischen Störungen (Tektonische Übersichtskarte [17]).

Weitere Details zu den Grundwasseraltern sind im Teilbericht T-1 der Firma Isodetect beschrieben.

6 Gesamtdatensatz

Der Gesamtdatensatz umfasst insgesamt 70 GWM aus Probennahmen der Jahre 2020 (GEO-data / Fugro [3]), 2021 (BCE, [4]) und 2022 (Abschnitt 5, dieser Studie).

Die GWM befinden sich in den folgenden Grundwasserkörpern (Abbildung 15):

- 2020 (GEO-data / FUGRO): SAL GW 020, SAL GW 022, SAL GW 023, SAL GW 041, VM 2-1
- 2021 (BCE): OT2, OT3
- 2022 (BCE): EN1, EN2

Die Daten der GWM in den räumlich eng zusammenliegenden Grundwasserkörpern SAL GW 020, -022, -023 und VM 2-1 werden zu einem Datensatz „SAL GW 02x“ zusammengefasst.

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

Das Ziel der Auswertung des Gesamtdatensatzes ist es, Zusammenhänge zwischen dem analytischen T/He-Alter, hydrogeologischen und messstellenspezifischen Parametern darzustellen. Für eine gemeinsame Auswertung der Datensätze 2020 sowie den Datensätzen 2021 / 2022 erfolgt zunächst ein Vergleich der Methodik zur hydraulischen Altersberechnung und der T/He-Altersberechnung. Der Gesamtdatensatz ist im Anhang A-3 zusammengestellt.

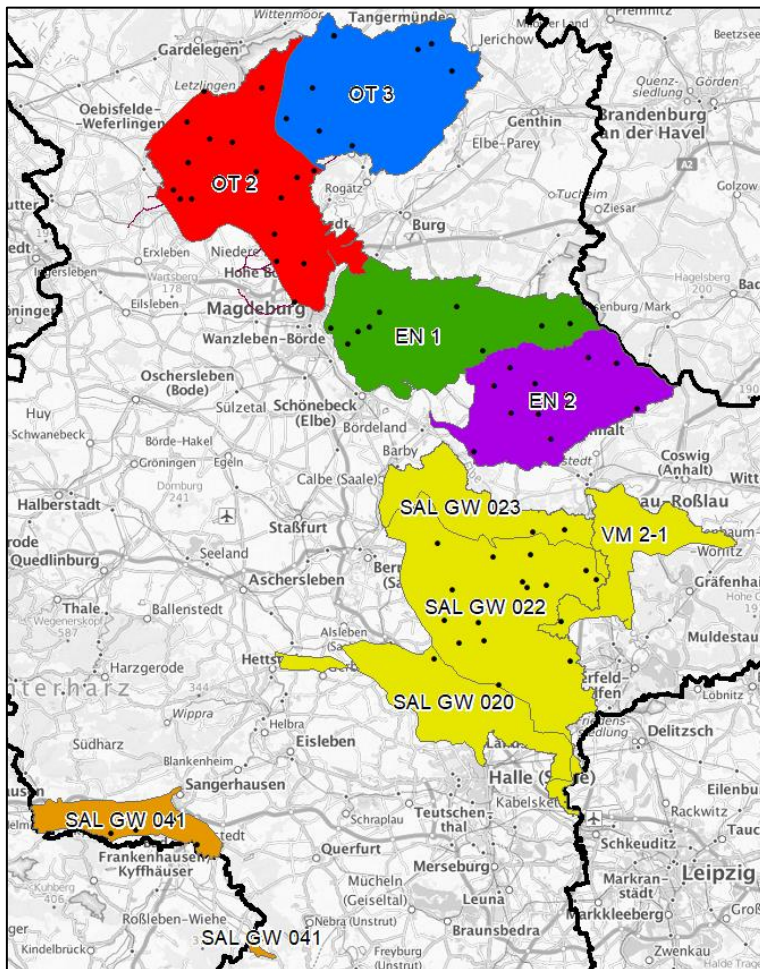


Abbildung 15: Übersicht über den Gesamtdatensatz innerhalb der Grundwasserkörper

6.1 Vergleich der Datensätze

Die von GEO-data / Fugro angewandte Methode aus dem Jahr 2020 [3] entspricht der Herangehensweise aus dem LAWA-Projekt nach dem Teufe-Neubildungsverfahren nach [13]. Für die im Jahr 2020 beprobten GWM wurde nach den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methoden die Strombahnen sowie die hydraulischen Alter bestimmt und im Folgenden mit den Ergebnissen aus dem Jahr 2020 verglichen.

6.1.1 Strombahnen

Die Längen der Strombahnen sind bis auf fünf GWM in der gleichen Größenordnung. Für Drosa, Forst Haideburg / Schierau, Klosterrohrbach, Lausigk und Tilleda sind die Abweichungen jedoch erheblich. Gründe für die Abweichungen sind kürzere Strombahnen in der Studie aus dem Jahr 2020 im Oberlauf der Strombahn (Abbildung 16 und Abbildung 17). Vermutlich geht dies auf eine unterschiedliche Verwendung der Auflösung der Grundwasserhöhenraster zurück. Auffallend ist der unterschiedliche Verlauf der Strombahn zur GWM Hackpüffel. Diese verläuft in der Studie 2020 von West nach Ost, während sie nach der Methode aus dieser Studie Grundwasser aus dem Süden erhält.

In Folge unterschiedlich langer Strombahnen ergibt sich auch eine unterschiedliche mittlere Grundwasserneubildung, die in die Berechnung der hydraulischen Grundwasseralter eingeht.

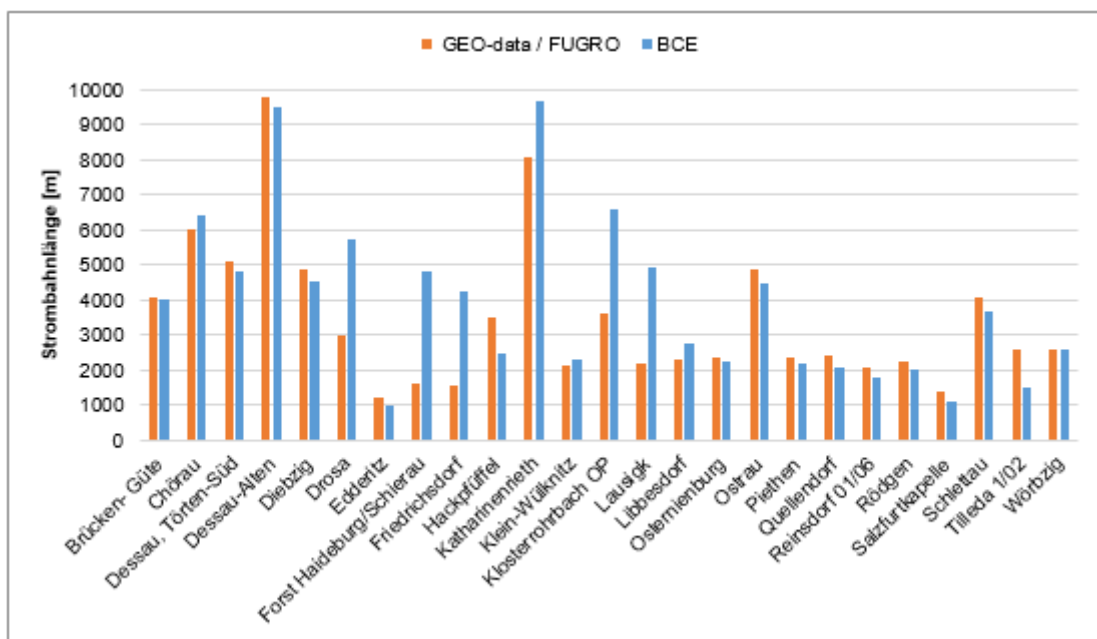


Abbildung 16: Vergleich der ermittelten Fließlängen nach der Studie von GEO-data / Fugro [3] und BCE [4]

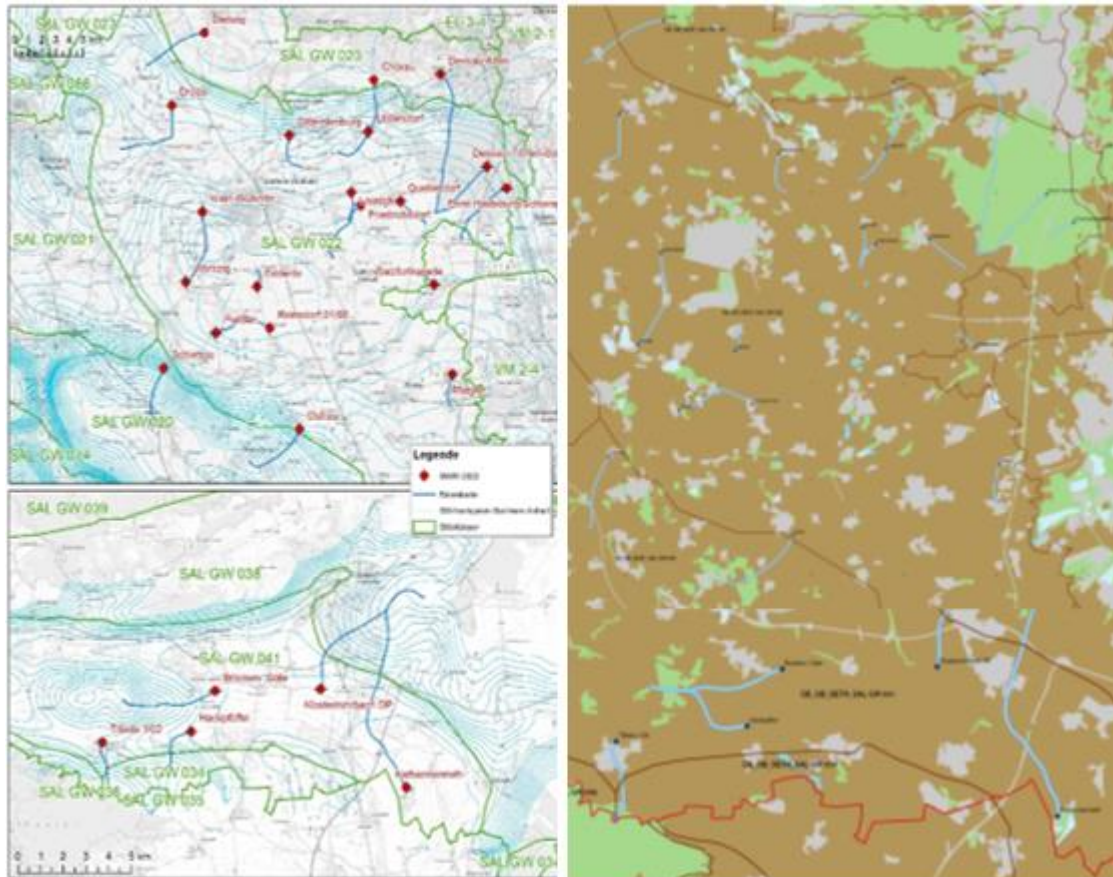


Abbildung 17: Vergleich der Strombahnen aus der Studie aus dem Jahr 2020 (rechts) mit den Ergebnissen nach der Methode dieser Studie (links)

6.1.2 Vergleich der hydraulischen Altersberechnungen mit Datensatz 2020

Die hydraulischen Alter der Studie 2020 sind in Abbildung 18 den hydraulischen Altern nach der Methodik dieser Studie gegenübergestellt. Die hydraulischen Alter nach dem BCE-Exponential-Ansatz sind in der gleichen Größenordnung wie die Alter nach dem Teufe-Neubildungsverfahren. Die hydraulischen Alter des Darcy-Ansatzes sind insgesamt über eine breitere Spanne verteilt und reichen auch weit über 100 Jahre hinaus. Für den Darcy-Ansatz wurden die k_f -Werte des BGR verwendet, da die sachsen-anhaltinischen k_f -Werte aus den bodenkundlichen Überarbeitungen [5] und [7] noch längere Fließzeiten bewirken. Die Strombahnen der dargestellten hydraulischen Alter umfassen nur Bereiche, die einen k_f -Wert größer als $1 \cdot 10^{-5}$ m/s aufweisen. Würde die gesamte Strombahn in die Auswertung einfließen, wären die Alter um ein Vielfaches größer, da insbesondere im Oberlauf der Strombahnen sehr niedrige k_f -Werte vorliegen.

Für einen Vergleich mit konsistenten Datensätzen wird die hydraulische Altersberechnung nach der Methode in 4.2 auch für die Messstellen der Studie 2020 angewendet.

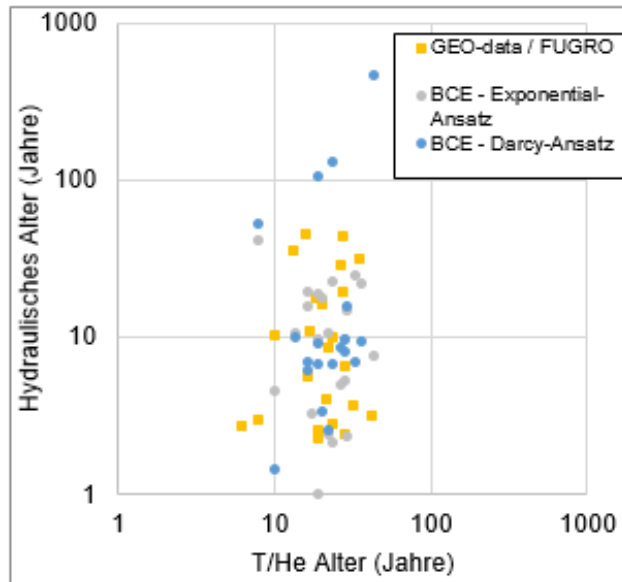


Abbildung 18: Vergleich der hydraulischen Alter mit den in der Studie 2020 ermittelten T/He-Alter

6.1.3 Vergleich der Methodik und der T/He-Alter für Datensatz 2020

Aus Teilbericht der Fa. Isodetect T-1 (weitere Details dort):

Die Gesamtbewertung der drei Datierungsstudien von 2020 bis 2022, die von zwei unabhängigen Institutionen bzw. Gutachtern durchgeführt wurden, zeigt reproduzierbare Berechnungen des tritiogenen Heliums und der entsprechenden zerfallsbasierten Datierung. Mit modellbasierten, quantitativen Datierungsansätzen können wichtige hydrologische Prozesse (Dispersion, Mischung von vormodernem & rezentem Grundwasser) berücksichtigt werden, wobei über Fehlerrechnungen die wahrscheinlichsten Szenarien ableitbar sind.

6.2 T/He-Altersdatierung Gesamtdatensatz

Die Altersbestimmung nach der T/He-Methode konnte für 65 GWM der insgesamt 70 GWM durchgeführt werden. Von den fünf Proben mit denen eine Altersdatierung nicht möglich war, wiesen vier Proben kein Tritium im Grundwasser auf ($< 0,4$ TU). Drei dieser GWM (Bülstringen, Samswegen, Lindhorst) befinden sich im GWK OT2 und eine GWM (Schweinitz) im GWK EN1. Das Alter dieser Grundwasserproben kann als vormodern (älter als 75 Jahre) eingestuft werden. Weiterhin konnte die Altersbestimmung nach der T/He-Methode nicht für die GWM Lausigk (GWK SALGW022) durchgeführt werden, da hier ein zu hoher Gasverlust vorlag [3].

Unsicherheiten bei der Altersbestimmung ergeben sich durch Gasverluste (berechnet über das Verhältnis zwischen Neon- und Heliumkonzentration) für 12 der 65 GWM in den folgenden GWK:

- EN1: Göbel, Gübs/Güte, Königsborn, Pechau,
- EN2: Jeber-Bergfrieden, Luso, Kerchau, Zerst-Güte, Zerst-neu,
- OT2: Meitzendorf
- OT3: Bölsdorf, Cröchern

Die Altersdatierung in diesen GWM kann nur als Richtwert interpretiert werden.

In Abbildung 19 ist Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium sowie die aus der Altersbestimmung ermittelten T/He-Alter für den Gesamtdatensatz dargestellt. Die Summe aus Tritium und tritiogenem Helium (höhe der Balken in Abbildung 19-oben) spiegelt die zur Zeit der Grundwasserneubildung eingetragene Tritiumkonzentration wider. Das Verhältnis zwischen noch vorhandenem Tritium und tritiogenem Helium ist im nördlichsten GWK OT2 am niedrigsten und in den südlicheren GWK SAL GW 041 und SAL GW 02x am niedrigsten. Dies führt generell zu einem höheren Grundwasseralter im Norden und einem jüngerem Alter im Süden der Untersuchungsgebiete.

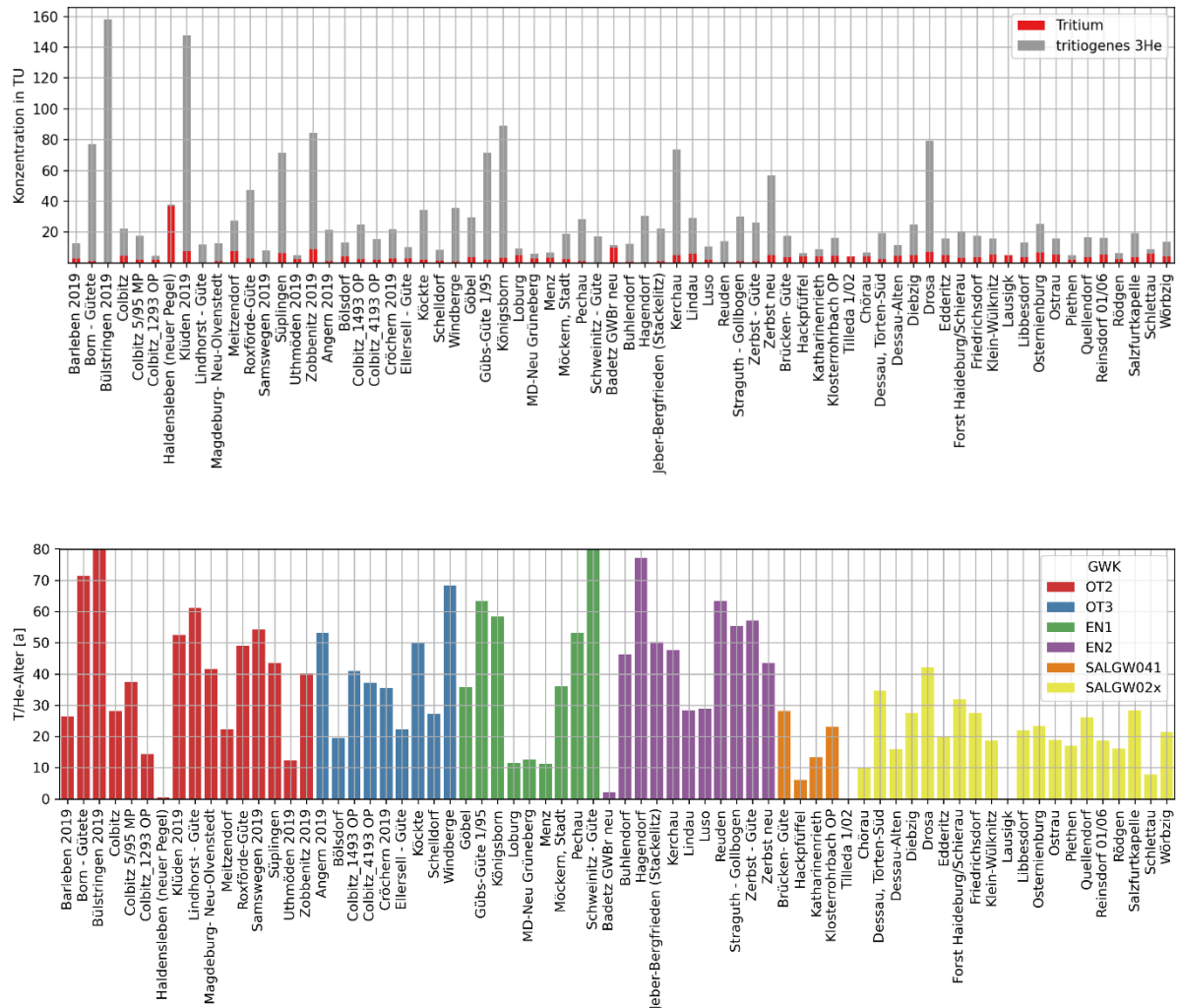


Abbildung 19: Tritium und durch dessen Zerfall gebildetes tritiogenes Helium für den Gesamtdatensatz (oben), T/He-Alter für den Gesamtdatensatz (unten).

6.3 Hydrogeologische Parameter im Bezugsraum GWK

Das Grundwasseralter wird von hydrogeologischen Gegebenheiten sowie messstellenspezifischen Parametern beeinflusst. Daher werden in einem ersten Schritt die Parameter in Bezug auf deren Größe und Variationsbreite innerhalb der GWK dargestellt (Abbildung 20). Das Augenmerk liegt hierbei vielmehr auf generellen Zusammenhängen anstatt auf Aussagen zu einzelnen GWM.

Generell stehen **Grundwasserflurabstand**, die **Filterunterkante** sowie die **Strombahnlänge** in einem positiven Zusammenhang. D. h. je höher der Grundwasserflurabstand, desto höher ist die Filterunterkante und desto länger ist die Strombahnlänge (Abbildung 20, oberste Reihe). So sind insbesondere für OT2 und EN2 diese Parameter am höchsten,

wobei auch deren Streubreite am größten ist. Demgegenüber sind in den GWK SAL GW 41 und SAL GW 02x diese Parameter am niedrigsten und auch die Streubreite am geringsten.

Die **mittlere Grundwasserneubildung** entlang der Strombahnen (ArcEGMO-Datensatz) ist in den nördlichsten GWK OT2 und OT3 am höchsten und im zentral gelegenen EN 1 am niedrigsten. Ein positiver Zusammenhang zur Strombahnlänge ist erkennbar, was vermutlich auf die höher gelegenen Grundwasserneubildungsgebiete (und somit höheren Niederschläge) zurückzuführen ist, von wo aus längere Strombahnen ausgehen.

Die **k_f -Werte** (BGR-Datensatz) streuen erwartbar gering in den Bereichen zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ und $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ein offensichtlicher Zusammenhang der k_f -Werte mit den bisher beschriebenen Parametern ist nicht erkennbar.

Die **T/He-Alter** sind in den nördlichen und zentral gelegenen GWK am höchsten (Abbildung 19 und Abbildung 20). Die niedrigsten Grundwasseralter treten in SAL GW 041 und SAL GW 02x auf. Ein leichter positiver Zusammenhang zwischen den oben beschriebenen Parametern - ausgenommen dem k_f -Wert- ist zu erkennen.

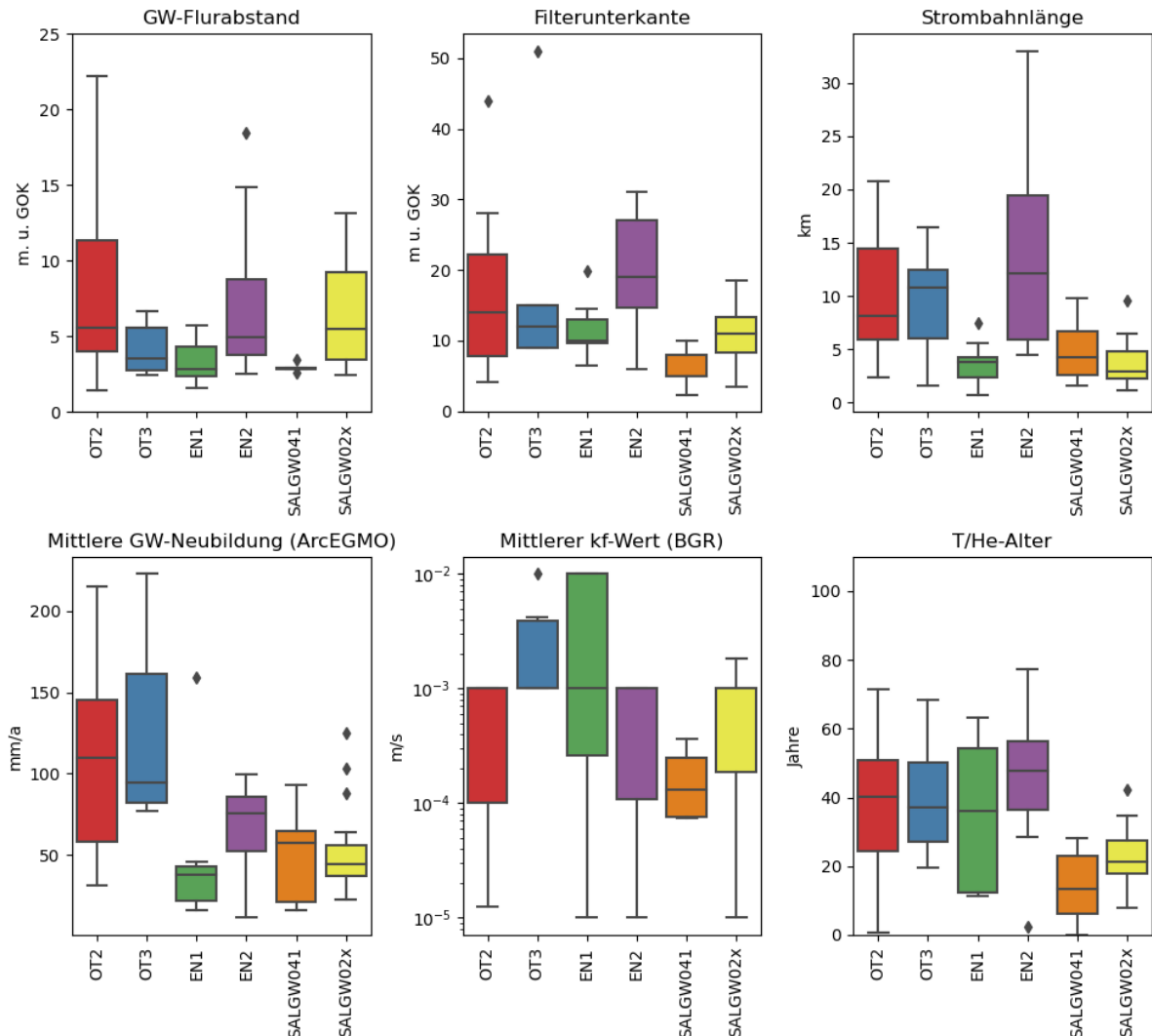


Abbildung 20: Boxplots zu Parametern, die das Grundwasseralter in einer Grundwassermessstelle beeinflussen, sowie das analytische T/He-Alter (unten rechts).

6.4 Vergleich T/He-Alter und hydraulische Alter

Die hydraulischen Alter umfassen im Vergleich zum analytischen T/He-Alter mehrere Größenordnungen. Die Streuung betrifft alle GWK, wodurch die Ursache hierfür nicht auf eine bestimmte Region oder Grundwasserleitereigenschaft zurückzuführen ist. Die hydraulischen Alter des Exponential-Ansatzes streuen von 0,1 bis 200 Jahren und für den Darcy-Ansatz von 0,01 bis über 1.000 Jahren (Abbildung 21). Für den Exponential-Ansatz ist ein positiver linearer Zusammenhang zum T/He-Alter erkennbar (T/He-Alter > 75 Jahre nicht berücksichtigt). Die mittlere absolute Abweichung (MAE) beträgt 20,5 Jahre, das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,10$ und der NSE = - 1,10 (Nash-Sutcliffe-Koeffizient). Für den Darcy-Ansatz ist der

lineare Zusammenhang schlechter ($R^2 = 0,02$; MAE = 84,9 Jahre; NSE = - 201). Eine detaillierte Betrachtung wird daher im Folgenden nur für den Exponential-Ansatz vorgenommen.

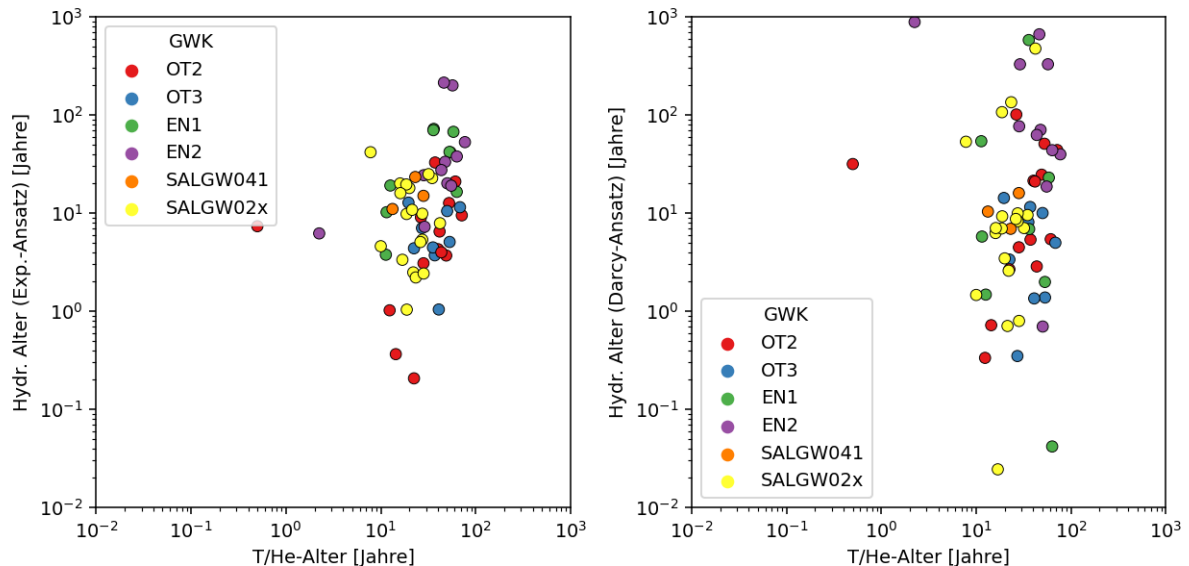


Abbildung 21: Vergleich zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter mit Exponential-Ansatz (links) und Darcy-Ansatz (rechts).

6.5 Korrekturansatz für die hydraulische Altersberechnung (Exponential-Ansatz)

Zur Bestimmung der Ursachen der Abweichungen zwischen den T/He-Altern und den hydraulischen Altern nach dem Exponential-Ansatz wurden deren Residuen (Differenzen zwischen hydraulischem Alter und T/He-Alter) auf Korrelationen mit messstellenspezifischen und hydrogeologischen Parametern untersucht. Es zeigt sich, dass die Residuen insbesondere mit der Grundwasserneubildung (Mittelwerte entlang der Strombahn aus ArcEGMO-Daten) korrelieren: Je höher die Grundwasserneubildung, desto mehr wird das hydraulische Alter überschätzt, was zu stärker negativen Residuen führt (Abbildung 22-links).

Durch eine Regressionsanalyse über die GWN (x) und die Residuen (y) lässt sich eine Logarithmus-Funktion anpassen (Abbildung 22, links). Daten mit T/He-Alter oder hydraulischem Alter über 75 Jahren werden nicht in die Regressionsanalyse miteinbezogen.

Mittels dieser Funktion kann ein Korrekturwert aus der GWN berechnet werden, mit dem das hydraulische Alter korrigiert werden kann (Gl. 5).

$$t_{Korr} = 13,3 \cdot \ln(GWN) - 38,5 \quad \text{Gl. 5}$$

Angewendet auf den vorliegenden Datensatz beträgt die mittlere Abweichung zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter MAE = 13,6 Jahre, $R^2 = 0,14$, NSE = - 0,01 (Abbildung

22-rechts). Zum Vergleich mit dem unkorrigierten Datensatz aus dem Exponential-Ansatz: 20,9 Jahre, $R^2 = 0,10$, NSE = - 1,10.

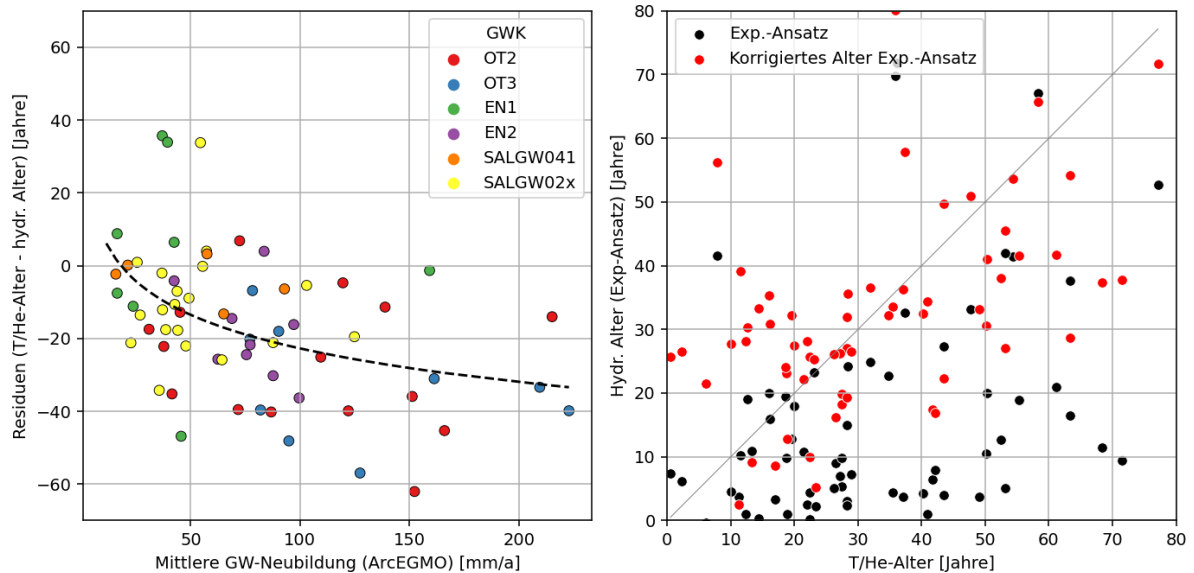


Abbildung 22: Links: Residuen (Differenzen zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter) mit logarithmischer Regression ($R^2 = 0,20$), rechts: Korrigiertes hydraulisches Alter unter Anwendung der logarithmischen Regression (blau) im Vergleich zum hydraulischen Alter nach dem Exponential-Ansatz (grau).

Es wird darauf hingewiesen, dass die Regression eine rein empirische Funktion zwischen den Residuen (Differenz zwischen hydraulischem Alter und T/He-Alter) und der Grundwassererneuerung darstellt und nicht durch physikalische Gesetzmäßigkeiten herzuleiten ist. Weiterhin gilt die Regression nur für den aktuellen Datensatz. Werden zukünftig weitere Daten erhoben, ist die Regression zu überprüfen und ggf. anzupassen. Bei ausreichender Datenverfügbarkeit kann eine Anwendung der Regressionsanpassung auf Sub-Gruppen (z. B. GWKs) sinnvoll sein.

Es wird deutlich, dass selbst nach Anwendung des Korrekturansatzes die Übereinstimmung zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter nicht zufriedenstellend ist, da die Abweichungen weiterhin hoch und die Gütekriterien (R^2 und NSE) niedrig sind. Auch weitere Parameterregressionen zur zusätzlichen Verbesserungen der Übereinstimmung der Alter sind für den vorliegenden Datensatz nicht zielführend, da keine Korrelationen zu den Residuen bestehen.

Insgesamt zeigt dies, dass die Altersbestimmung durch hydraulische Altersberechnungen sehr unscharf ist.

6.6 Multiple-Regressionsanalyse (PLS-Modell) zur Berechnung des Grundwasseralters

Zwischen dem T/He-Alter wurden Spearman-Korrelationskoeffizienten (ρ , p) für messstellenspezifische und hydrochemischen Parametern berechnet. Es liegen einige signifikante ($p < 0,05$) Korrelationen vor, die hydrogeologisch plausibel zu erklären sind:

- Filterunterkante: Je tiefer die Filterunterkante unter GOK, desto höher ist das T/He-Alter. Dies ist auf die Zunahme des Grundwasseralters mit der Tiefe zurückzuführen. Eine Berücksichtigung der Filtertiefe ist daher unbedingt erforderlich, wenn mit Grundwasseraltern gearbeitet wird.
- Je niedriger das Redox-Potential, desto älter ist das Wasser: Dies weist auf die klassische Redox-Zonierung hin, die durch mikrobiologische Prozesse entsteht. Je länger die Aufenthaltszeit des Grundwasser im Untergrund ist, desto mehr Zeit haben die andauernden biogeochemischen Prozesse.
- Strombahnlänge: Je länger die Strombahn, ausgehend vom höchsten Grundwasserstand, desto älter ist das Grundwasser.
- Elektrische Leitfähigkeit: Je höher die Ionenkonzentration im Grundwasser ist, desto höher ist das Grundwasseralter. Dies ist wahrscheinlich auf die lange Zeit des Grundwasser im Untergrund zurückzuführen, während es zu einer Lösung von Mineralien kommt. Auch die Verknüpfung zur Redox-Zonierungen ist möglich (z. B. höhere Konzentration an reduzierten Metallen).

Die Parameter korrelieren sowohl mit dem T/He-Alter als auch untereinander. Zur mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge kann die Methode der Multiplen Regression verwendet werden.

Hiermit ist es möglich die Zusammenhänge zwischen beliebig vielen Parametern auf die Zielvariable (hier: T/He-Alter) mathematisch zu beschreiben. Unter Verwendung einer Variante der Multiplen Regression, dem PLS-Modell (Partial-Least-Square-Regression) werden zudem die Wichtigkeit der Variablen ermittelt (sog. VIP, Variable Importance in Projection).

Für den vorliegenden Datensatz wurden aus den Spearman-Rangkorrelationen die Parameter ausgewählt, die den stärksten Zusammenhang zum T/He-Alter aufweisen. Dies sind die Filterunterkante, Strombahnlänge, Redox-Potential, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und die jeweiligen Ionenkonzentrationen von Sulfat, Kalium, Chlorid. Für die hydrochemischen Parameter wurden die jeweiligen Mittelwerte über die Analysen seit 2011 verwendet. Mit diesen Parametern wurde das PLS-Modell in sämtlichen Kombinationen (einzeln, 2-er, 3-er, ..., 8er-Kombinationen) mit der Zielvariable T/He-Alter parametrisiert (T/He-Alter > 75 Jahren

wurden nicht berücksichtigt). Das PLS-Modell liefert für jeden Parameter einen spezifischen Koeffizienten (x_i) sowie einen Wert, der dem y-Achsenabschnitt entspricht.

Mit den vier Parametern Filterunterkante, Strombahnlänge, Redox-Potential und elektrischer Leitfähigkeit kann das Grundwasseralter mit einer mittleren Abweichung von MAE = 9,8 Jahren ($R^2 = 0,53$; NSE = 0,52) bestimmt werden (Abbildung 23, links). Dabei wird deutlich, dass von diesen vier Parametern die Filterunterkante und das Redox-Potential die höchste Wichtigkeit ($VIP > 1,0$) aufweisen. Mit mehr als vier Parametern steigt die Anpassungsgüte an das T/He-Alter nicht mehr an. Werden nur Filterunterkante und das Redox-Potential zur Bestimmung des Grundwasseralter verwendet, liegt die mittlere Abweichung bei 10,0 Jahren ($R^2 = 0,51$; NSE = 0,51) (Abbildung 23, rechts). In Tabelle 1 sind die Koeffizienten für das PLS-Modell mit zwei und vier Parametern zusammengefasst, die in den Gl. 6 und Gl. 7 einfließen.

Die Anwendung der Ergebnisse des PLS-Modells ermöglicht eine Bestimmung von Grundwasseraltern unabhängig von den hydraulischen Altersbestimmungen und kann somit als Plausibilisierung verwendet werden. Allerdings ist auch hier zu beachten, dass das PLS-Modell anhand der derzeit verfügbaren Daten erstellt wurde. Werden weitere Daten erhoben, ist das PLS-Modell zu überprüfen, bzw. neu abzuleiten.

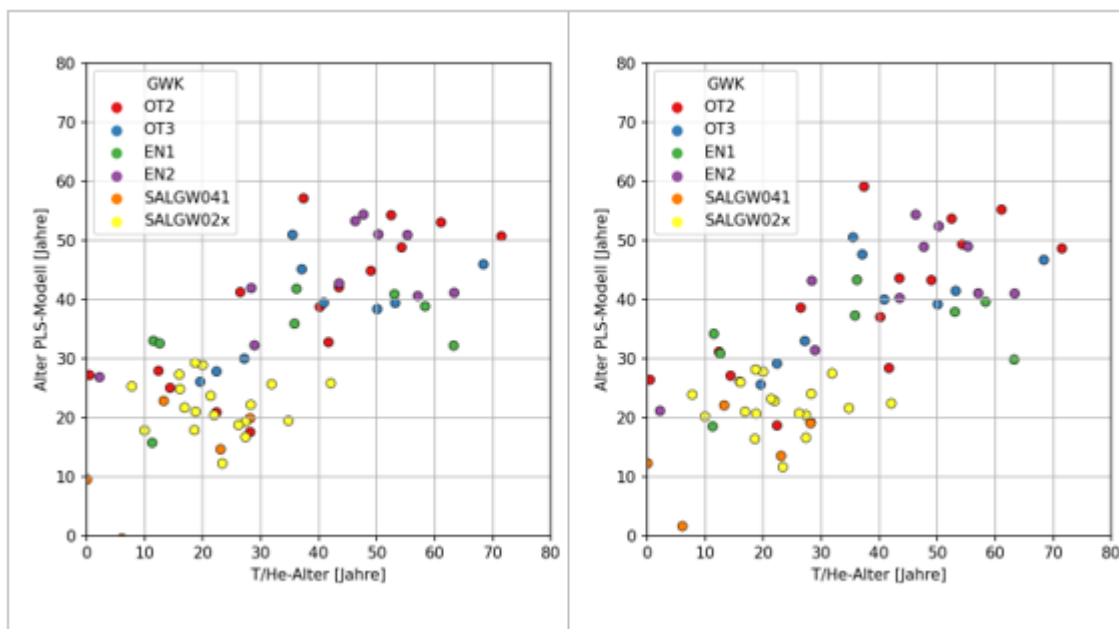


Abbildung 23: Links: Vergleich der T/He-Alter mit den prognostizierten Grundwasseraltern mit vier Parametern Filterunterkante, Redox-Potential, elektrische Leitfähigkeit und Strombahnlänge. Rechts: mit zwei Parametern Filterunterkante und Redox-Potential

$$t_{PLS_2} = x_1 \cdot \log_{10}(FiUK[m]) + x_2 \cdot Redox[mV] + b \quad \text{Gl. 6}$$

$$t_{PLS_4} = x_1 \cdot \log_{10}(FiUK[m]) + x_2 \cdot Redox[mV] + x_3 \cdot Strombahn[m] + x_4 \cdot EC[\mu S/cm] + b \quad \text{Gl. 7}$$

Tabelle 1: PLS-Modell Parametrisierung mittels Koeffizienten und Wichtigkeit der Variablen (VIP)

	2 Parameter:		4 Parameter:	
Parameter	Koeffizient	VIP	Koeffizient	VIP
log10(Filterunterkante [m])	x_1 27,29	0,92	x_1 29,89	1,09
Redox-Potential [mV] (langjährige Mittelwerte 2011-2022)	x_2 -0,07	1,07	x_2 -6,81E-02	1,28
Strombahnlänge [m]	x_3 -	-	x_3 2,67E-04	0,80
EC [μ S/cm] (langjährige Mittelwerte 2011-2022)	x_4 -	-	x_4 2,92E-03	0,73
y-Achse [-]	b 21,88		b 12,85	

6.7 Zusammenhang zwischen Nitratabbau (N₂/Ar-Methode) und T/He-Alter

Die Ergebnisse der landesweiten Bewertung des Nitratabbaus (Denitrifikation) über die N₂/Ar-Methode aus [18] liegen als Nitratabbau als Anteil der Ausgangskonzentration sowie als Absolutwerte vor. Der Zusammenhang zwischen diesen Datensätzen und dem T/He-Alter ist schwach positiv, was im Sinne der hydrogeologischen Annahmen (Fließpfadtheorie) plausibel erscheint (Abbildung 24): Je älter das Grundwasser ist, desto länger ist die Kontaktzeit zum Sediment und die mikrobiologischen Prozesse erzielen einen höhere Nitratabbau. Allerdings hängt die Rate des Nitratabbaus von weiteren Parametern ab, die die

mikrobiologischen Prozesse maßgeblich steuern. Hierzu zählen insbesondere die Verfügbarkeit von Reaktionspartnern (Nitrat, Kohlenstoff oder Eisensulfide) sowie ein anaerobes Milieu. Eine direkte Ableitung des Nitratabbaus über das Grundwasseralter ist daher nicht zweckmäßig.

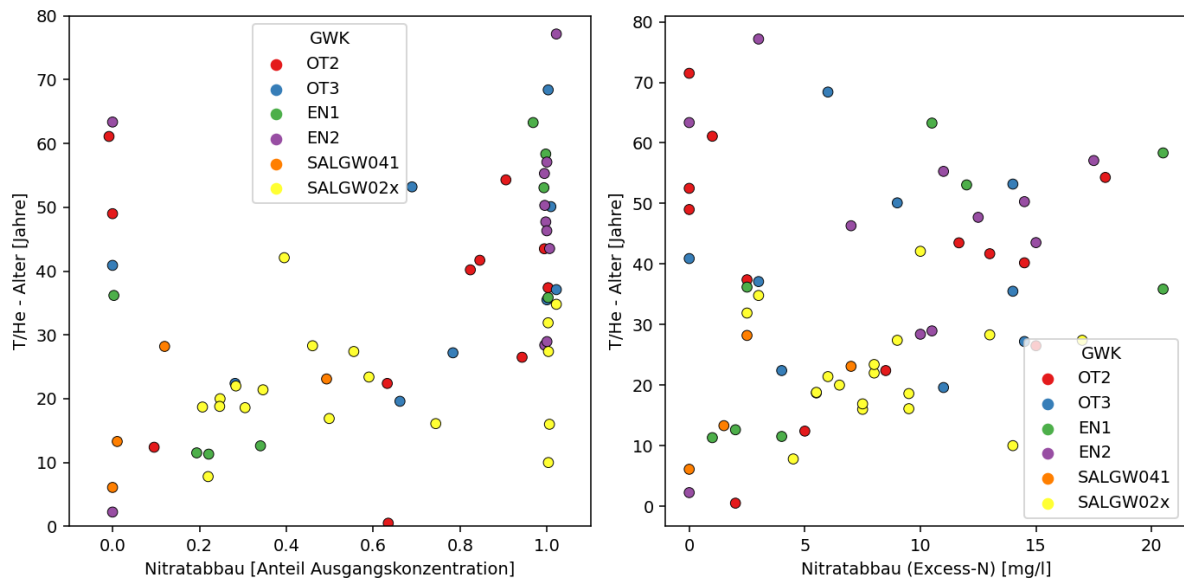


Abbildung 24: Vergleich zwischen Nitratabbau (abgeleitet aus der N_2/Ar -Methode) und dem T/He-Alter als Anteil der Nitrat-Ausgangskonzentration (links) und dem absoluten Nitratabbau in mg/l (rechts).

7 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Studie wurden zum Einen die im Jahr 2022 beprobten 20 GWM hinsichtlich ihrer Grundwasseralter über die T/He-Methode bestimmt. Zum Anderen erfolgte eine Auswertung des Gesamtdatensatzes über 70 GWM aus den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Die Altersbestimmung nach der T/He-Methode konnte für 65 GWM der insgesamt 70 GWM durchgeführt werden. Das aktuell vorhandene Tritium ist im Verhältnis zum tritiogenen Helium in den nördlichsten Grundwasserkörpern generell am niedrigsten und in den südlicheren Grundwasserkörpern höher. Dies führt verallgemeinert zu einer Abnahme des Grundwasseralters von Norden nach Süden in den betrachteten Untersuchungsgebieten.

Die T/He-Alter wurden mit Ergebnissen aus hydraulischen Altersberechnungen verglichen (Darcy- und Exponential-Ansatz). Der Exponential-Ansatz ist dabei besser geeignet das Grundwasseralter abzuschätzen. Zur weiteren Verbesserung der hydraulischen Altersberechnung wurde ein Korrekturansatz mittels einer Regressionsanalyse über die Abweichung zwischen T/He-Alter und hydraulischem Alter und der Grundwasserneubildung erarbeitet. Es zeigt sich hierbei jedoch, dass selbst nach Anwendung des Korrekturansatzes die

hydraulische Altersbestimmung sehr unscharf bleibt (Verbesserung des mittleren Fehlers von 20,9 auf 13,6 Jahre).

Die Korrelationen zwischen dem T/He-Alter und messstellenspezifischen sowie hydrochemischen Parametern wurde genutzt, um ein Multiples-Regressionsmodell (PLS-Modell) aufzusetzen. Dieses kann unabhängig von der hydraulischen Altersbestimmung und der T/He-Methode zur Bestimmung des Grundwasseralters genutzt werden.

Die verschiedenen Altersberechnungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Altersbestimmungen für den Gesamtdatensatz (T/He-Alter, Hydraulische Alter (Exp.-Modell), PLS-Modell).

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
445259	Angern 2019	53,2	5,1	27,1	41,4	39,4
2494003	Badetz GWBr neu	2,2	6,2	26,5	21,1	26,8
445273	Barleben 2019	26,5	9,0	16,2	38,6	41,2
445250	Bölsdorf	19,6	12,7	32,2	25,6	26,0
440004	Born - Gütete	71,5	9,5	37,8	48,6	50,7
341445	Brücken- Güte	28,2	14,9	32,0	19,0	19,8
2494015	Buhlendorf	46,3	213,0	207,2	54,3	53,3
445253	Bülstringen 2019	106,3	14,6	38,3	63,5	74,1

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
2464012	Chörau	10,0	4,6	27,7	20,1	17,8
445150	Colbitz	28,2	3,1	27,0	19,2	17,5
2494901	Colbitz 5/95 MP	37,4	32,7	57,8	59,1	57,1
2494903	Colbitz_1293 OP	14,4	0,4	33,3	27,1	25,0
2494904	Colbitz_1493 OP	40,9	1,0	34,4	40,0	39,4
2494910	Colbitz_4193 OP	37,1	3,7	36,3	47,6	45,1
445271	Cröchern 2019	35,5	4,5	33,5	50,5	50,9
2434017	Dessau, Törten- Süd	34,8	22,7	32,2	21,6	19,4
2434012	Dessau-Alten	16,0	20,0	35,3	26,0	27,3
2464011	Diebzig	27,4	9,8	19,9	16,5	16,7
2464016	Drosa	42,1	7,9	16,9	22,4	25,8
2464019	Edderitz	20,0	18,0	27,4	27,7	28,9
440001	Ellersell - Güte	22,4	4,4	25,7	29,1	27,8

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
2421108	Forst Haide- burg/Schierau	31,9	24,9	36,6	27,4	25,6
2463011	Friedrichsdorf	27,4	5,3	18,2	20,4	19,3
2494016	Göbel	35,9	69,8	80,1	37,3	35,9
440007	Gübs-Güte 1/95	63,3	16,4	28,7	29,8	32,2
342240	Hackpfüffel	6,1	-0,3	21,5	1,6	-0,5
2491004	Hagendorf	77,2	52,7	71,7	54,3	55,2
445119	Haldensleben (neuer Pegel)	0,5	7,3	25,8	26,4	27,2
2471009	Jeber-Bergfrie- den (Stackelitz)	50,3	20,1	41,0	52,4	51,0
341475	Katharinenrieth	13,3	11,0	9,1	22,0	22,8
2494007	Kerchau	47,7	33,2	51,0	48,9	54,3
2461005	Klein-Wülknitz	18,7	9,8	23,1	28,1	29,3

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
340920	Klosterrohrbach OP	23,1	23,2	25,4	13,5	14,6
445269	Klüden 2019	52,5	12,6	38,0	53,6	54,2
445040	Köckte	50,1	10,5	30,5	39,2	38,3
445129	Königsborn	58,3	67,1	65,8	39,6	38,8
2461006	Lausigk	k.A.	12,0	25,6	23,7	22,6
2464022	Libbesdorf	22,0	2,5	28,2	22,8	20,4
2494011	Lindau	28,4	24,2	35,6	43,1	41,9
440036	Lindhorst - Güte	61,1	20,9	41,8	55,2	53,0
2494010	Loburg	11,5	10,2	39,1	34,2	33,0
2494012	Luso	29,0	7,2	26,5	31,4	32,2
445153	Magdeburg- Neu- Olvenstedt	41,7	6,5	17,5	28,4	32,7
341505	MD-Neu Grüne- berg	12,6	19,0	30,4	30,8	32,5

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
445019	Meitzendorf	22,4	0,2	10,0	18,6	20,9
445000	Menz	11,3	3,8	2,4	18,5	15,7
445117	Möckern, Stadt	36,2	71,9	81,4	43,3	41,8
2464017	Osternienburg	23,4	2,2	5,2	11,6	12,2
340825	Ostrau	18,8	1,0	12,9	20,6	21,0
445130	Pechau	53,1	41,9	45,5	37,9	40,9
445245	Piethen	16,9	3,3	8,6	21,0	21,7
2464021	Quellendorf	26,2	5,1	26,0	20,7	18,7
2464015	Reinsdorf 01/06	18,6	19,5	24,1	16,4	17,9
2494006	Reuden	63,4	37,7	54,1	41,0	41,1
2421011	Rödgen	16,1	15,9	30,8	26,0	24,8
440024	Roxförde-Güte	49,0	3,7	33,2	43,2	44,8
2523103	Salzfurkapelle	28,3	2,4	19,3	24,0	22,1

LHW Sachsen-Anhalt

Altersbestimmung im Grundwasser 2020-2022

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
445254	Samswegen 2019	54,3	41,5	53,6	49,3	48,8
445140	Schelldorf	27,2	7,0	26,3	32,9	30,0
341700	Schlettau	7,8	41,6	56,2	23,9	25,3
2491005	Schweinitz - Güte	173,5	43,5	65,1	48,5	45,6
2494009	Straguth - Gollbo- gen	55,3	19,0	41,6	48,9	50,9
445201	Süplingen	43,5	4,0	22,3	43,6	42,0
340964	Tilleda 1/02	0,0	3,2	18,6	12,2	9,5
445270	Uthmöden 2019	12,4	1,0	28,1	31,1	27,9
445136	Windberge	68,4	11,4	37,4	46,7	45,9
2414012	Wörbzig	21,4	10,8	22,2	23,1	23,7
2491006	Zerbst - Güte	57,1	199,6	193,4	41,0	40,6
2494018	Zerbst neu	43,5	27,4	49,7	40,2	42,7

MST-Nr.	Name	T/He- Alter [a]	Hydr. Al- ter (Exp.- Modell) [a]	Korrigier- tes Alter (Exp.-Mo- dell) [a]	PLS-Mod- ell 2 Parame- ter [a]	PLS-Mod- ell 4 Parame- ter [a]
445268	Zobbenitz 2019	40,2	4,3	32,5	37,0	38,7

In weiteren Untersuchungen können die folgenden Methoden helfen das Grundwasseralter und die Nitrataufenthaltszeit bzw. -herkunft besser zu charakterisieren:

- Zutritte von älterem Grundwasser können zum Einen über Isotope, die eine ältere Zeitskala, wie z. B. ^{14}C oder $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ abdecken, bestimmt werden. Darüber hinaus können auch $^{18}\text{O}/\text{T}$ – Analysen herangezogen werden, um z. B. einen Zutritt von älterem pleistozänen Wasser in ein jüngeres Grundwasser zu detektieren, was auf die unterschiedliche Bildungstemperatur mit spezifischer Fraktionierung zurückzuführen ist. Zutritte von hoch mineralisierten Grundwässern, die meist auch älter sind, können durch typisch vorkommende Ionen und Ionenverhältnisse erkannt werden (z. B. Na^+ , Cl^- , Sr^{2+} und Br^-).
- Messung von stabilen Nitratisotopen (^{15}N und ^{18}O). Hiermit kann die Herkunft des Stickstoffs besser charakterisiert, sowie eine eventuell vorhandene Denitrifikationsaktivität bewertet werden kann.

Aufgestellt:

Dr.-Ing. Nico Trauth

Leipzig, Dezember 2022

Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH

Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH



Isotopenhydrologische Untersuchungen zur Datierung und Zusammensetzung von Grundwasserproben aus Sachsen-Anhalt mittels Tritium- und Heliumanalysen

Probenahmekampagne 2022 und vergleichender Überblick seit 2020



Isodetect
Umweltmonitoring GmbH

Bearbeiter: Dr. Heinrich Eisenmann, Michael Stöckl

09.11.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Untersuchungskonzept und Probenahme	1
3	Ergebnisse der isotopehydrogeologischen Analysen	1
4	Interpretation	3
4.1	Tritium	3
4.2	Helium-3 (^3He) und Helium-4 (^4He)	4
4.3	Mischungsrechnung und Grundwasserdatierung	8
5	Bewertung früherer Untersuchungen	11
6	Zusammenfassung	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prozentuale Anteile von atmosphärischem (Heeq = blau), excess air (Heexc= rot), terrestrischem (Hera = grün) und tritiogenem (Hetr = violett) Helium an den jeweiligen Isotopenkonzentrationen (^3He , ^4He) abgeleitet aus dem unveränderlichen atmosphärischen Lösungsgleichgewicht des Neons (Neeq = blau; Neexc = rot; NeGasverlust = grau); *Proben mit Ne-Gasverlust >10%; **aufgrund von Ne-Gasverlust >60% nur bedingt interpretierbar; #aufgrund von Ne-Gasüberschuss >50% nur bedingt interpretierbar	6
Abbildung 2:	Diagramm zur Veranschaulichung dominanter He-Einträge in den untersuchten Messstellen: Ne/He-Konzentrationsverhältnisse vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse in Bezug zu frischem, luftgesättigtem Grundwasser (hellblauer Kreis)	8
Abbildung 3:	Stabiler Tritiumeintrag zusammengesetzt aus tritiogenem Helium-3 und rezentem Tritium	9
Abbildung 4:	Zeitlicher Verlauf des ^3H -Gehalts in Niederschlägen in Mitteleuropa (Datenbank der International Atom Energy Agency IAEA)	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse der Analysen	1
Tabelle 2:	Mittlere Verweilzeiten (Alter) von jüngerem Grundwasser mit Anteilen von vormodernem Wasser berechnet aus Tritium bzw. tritiogenem Helium mittels einfacher Zerfallsrechnung sowie zwei fließmodellbasierten Annahmen (Dispersionsmodell für einen homogenen bzw. zwei verschiedenen alte Grundwasserleiter). Die vom Modell ausgegebene kleinere, aussagekräftige Fehlerwahrscheinlichkeit ist jeweils eingefärbt. Ausgangsdaten wurden korrigiert nach Neon-Gasverlust (durch Beprobung) bzw. Überschuss (Excess Air); Gasveränderungen >60% (**Verlust, #Überschuss) nicht korrigierbar	11

Anhang

- A Grundlagen - Isotopenmethoden zur Grundwasserdatierung
- B Literatur
- C Probenahme, Präparations- und Messverfahren

1 Veranlassung

Die Firma Isodetect GmbH wurde von der Firma BjörnSEN Beratende Ingenieure Erfurt GmbH, Niederlassung Leipzig, mit isotoPenhydrologischen Untersuchungen beauftragt, die vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) für das Jahr 2022 ausgeschrieben waren. Aus der Analyse von Tritium, Heliumisotopen und Neon soll an 20 Messstellen (GWM) eine Altersbestimmung des Grundwassers erfolgen. Insbesondere sollten die Grundwasserproben auf eine mögliche Zumischung von Jungwasseranteilen untersucht werden. Zusätzlich ist eine vergleichende methodische Bewertung mit den Untersuchungskampagnen aus 2020 und 2021 durchzuführen.

2 Untersuchungskonzept und Probenahme

In Zusammenarbeit mit zertifizierten Probenehmern der GLU mbH (Gesellschaft für Lebensmittel- und Umweltconsulting mbH, akkreditiert nach ISO/IEC 17025) erhielt die Isodetect GmbH insgesamt 20 Proben von GWM des Landes Sachsen-Anhalt, an welchen die Konzentrationen der Tracer Tritium (eigene Analysen), Helium-3, Helium-4 und Neon (Analyselabor Isotoptech Zrt.; Debrecen, Ungarn; akkreditiert nach ISO/IEC 17025:2018) bestimmt wurden. Die Probenahmen erfolgten im Zeitraum vom 14.02.2022 bis 25.02.2022.

3 Ergebnisse der isotoPenhydrogeologischen Analysen

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der isotoPenhydrogeologischen Analysen zusammengestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Analysen

GWM	GWM-Nr.	Entnahmedatum	Tritium	Ne	³ He	⁴ He	³ He/ ⁴ He
			(TU)	(ccSTP/g)	(ccSTP/g)	(ccSTP/g)	
Badetz GWBr neu	2494003	24.02.22	10,06	2,40E-07	7,87E-14	6,23E-08	1,3E-06
Buhlendorf	2494015	25.02.22	0,91	2,39E-07	1,04E-13	1,11E-07	9,4E-07



GWM	GWM-Nr.	Ent-nahme-datum	Tri-tium	Ne	³He	⁴He	³He/⁴He
			(TU)	(ccSTP/ g)	(ccSTP/ g)	(ccSTP/ g)	
Göbel	2494016	25.02.22	3,97	1,68E-07	1,06E-13	3,96E-08	2,7E-06
Gübs-Güte 1/95	440007	15.02.22	2,03	1,52E-07	2,01E-13	1,22E-06	1,7E-07
Hagendorf	2491004	21.02.22	2,21	2,27E-07	1,47E-13	5,28E-08	2,8E-06
Jeber-Berg- frieden (Sta- ckelitz)	2471009	01.03.22	1,33	1,40E-07	8,06E-14	3,34E-08	2,4E-06
Kerchau	2494007	25.02.22	5,03	1,31E-07	1,52E-13	3,60E-08	4,2E-06
Königsborn	445129	14.02.22	3,34	7,29E-08	1,06E-13	3,56E-07	3,0E-07
Lindau	2494011	25.02.22	5,94	1,69E-07	1,02E-13	4,70E-08	2,2E-06
Loburg	2494010	21.02.22	4,98	2,23E-07	8,07E-14	5,12E-08	1,6E-06
Luso	2494012	24.02.22	2,09	1,12E-07	4,68E-14	2,61E-08	1,8E-06
MD-Neu Grüneberg	341505	14.02.22	3,00	2,32E-07	8,08E-14	6,99E-08	1,2E-06
Menz	445000	14.02.22	3,56	2,12E-07	7,43E-14	5,62E-08	1,3E-06



GWM	GWM-Nr.	Ent-nahme-datum	Tri-tium	Ne	³ He	⁴ He	³ He/ ⁴ He
			(TU)	(ccSTP/g)	(ccSTP/g)	(ccSTP/g)	
Mö-ckern/Stadt	445117	15.02.22	2,47	1,76E-07	9,09E-14	5,03E-08	1,8E-06
Pechau	445130	14.02.22	1,44	1,39E-07	9,29E-14	2,04E-07	4,5E-07
Reuden	2494006	21.02.22	3,59	2,24E-07	1,03E-13	5,09E-08	2,0E-06
Schweinitz/ Güte	2491005	15.02.22	<0,4	3,92E-07	1,67E-13	1,38E-07	1,2E-06
Straguth - Gollbogen	2494009	24.02.22	1,34	2,01E-07	1,34E-13	5,55E-08	2,4E-06
Zerbst/Güte	2491006	24.02.22	1,06	1,71E-07	1,07E-13	4,72E-08	2,3E-06
Zerbst neu	2494018	24.02.22	4,90	1,38E-07	1,31E-13	3,42E-08	3,8E-06

Einheiten: TU = tritium units; ccSTP/g = 10⁻³ NmL/kg = Gasvolumen pro Wassermasse bei Normalbedingungen.

Die allgemeinen Messunsicherheiten der Analyseergebnisse betragen:

Tritium ± 0,4; Ne ± 1%; ³He ± 1%; ⁴He ± 1%; ³He/⁴He ± 1,3%;

4 Interpretation

4.1 Tritium

Tritium ist ein instabiles Isotop des Wasserstoffs mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren (Unterweger et al. 2010). Der natürliche atmosphärische Tritium-Hintergrund im Niederschlag in Mitteleuropa liegt bei etwa 6 TU (tritium units). Kernwaffentests in den 1960er



Jahren erhöhten die Tritiumkonzentration in der Atmosphäre und schließlich über den Niederschlag auch die des Grundwasser (Anhang A.1). Der aktuelle Tritiumgehalt im Niederschlag in Europa liegt derzeit mit ca. 6-10 TU noch über dem natürlichen Hintergrund. Für die qualitative Interpretation des Tritiumgehaltes zur Bestimmung der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers kann heute folgende Faustregel gelten (modifiziert nach Clark & Fritz 1997):

<0,4 TU	Wasser älter als 1952 (vormodern)
0,4 - ~3 TU	zumeist Mischung aus vormodernem und jungem Wasser (<15 Jahre)
3 - 10 TU	zumeist jünger als 15 Jahre (sehr jung)
10 - 20 TU	markanter Anteil von Wasser aus den 60er/70er Jahren
>30 TU	Wasser aus den 60er/70er Jahren dominierend oder Kontamination
>50 TU	zusätzliche Kontamination mit Tritium

Nach dieser Faustformel wäre nur das Grundwasser der GWM Schweinitz/Güte ausschließlich vormodern. Der rezente Tritiumwert aller Proben liegt zwischen 0,4 TU und 10 TU. Demnach ist nach obiger Faustformel flächendeckend entweder eine Mischung von vormodernem und jungem Wasser oder eine alleinige Dominanz von jungem Grundwasser festzustellen.

Mit einem Tritiumwert zwischen 3 und 10 TU müssten die GWM Badetz GWBr neu, Göbel, Kerchau, Königsborn, Lindau, Loburg, MD-Neu Grüneberg, Menz, Reuden und Zerbst neu vorwiegend junges Wasser (<15 Jahre) enthalten. Höhere Anteile von älterem Grundwasser (<3 TU) scheinen in den GWM Buhlendorf, Gübs-Güte, Hagen-dorf, Luso, Möckern/Stadt, Pechau, Straguth/Gollbogen und Zerbst/Güte vorzukommen.

Eine Validierung dieser Aussagen ist jedoch erst nach Einbeziehung des bereits erfolgten Tritiumzerfalls möglich, welcher einen erhöhten Gehalt an ^3He -Isotopen nach sich zieht.

4.2 Helium-3 (^3He) und Helium-4 (^4He)

Im Moment der Grundwasserneubildung setzt durch den Zerfall von Tritium zu ^3He eine Anreicherung dieses stabilen Isotops ein, die prinzipiell eine Rückrechnung des Bildungszeitpunkts ermöglicht. Die Altersdatierung kann rechnerisch über eine Massenbilanzierung von Tritium & tritiogenem ^3He erfolgen, wobei jedoch zusätzliche He-Einträge ausgeklammert werden müssen (Sültenfuß & Massmann 2004, Sültenfuß et al. 2011, Neukum et al. 2020).

Die ^3He -Konzentration im Grundwasser besteht in der Regel größtenteils aus atmosphärischen Anteilen ($^3\text{He}_{\text{eq}}$). Sie kann aber auch Helium aus unterirdischen Kompartimenten stammen (radiogener Uran-Thorium-Zerfall in Gesteinen $^3\text{He}_{\text{rad}}$), wobei aufgrund der regionalen Geologie sog. primordiales "Urknall"-Helium aus dem Erdmantel ($^3\text{He}_{\text{prim}}$) weitgehend auszuschließen ist. Dagegen ist eine sog. excess-air¹ Anreicherung durch hydrostatische Rücklösungseffekte im Boden (Heaton and Vogel 1981, $^3\text{He}_{\text{exc}}$) häufig der Fall. Excess-air-Effekte können stellenweise den Eintrag der Edelgase um bis zu 30% des überhöhen, was ohne Korrekturrechnung (über den konservativen Tracer Neon) eine Unterschätzung des GW-Alters zur Folge hätte. Vereinzelt finden sich Proben mit einem besonders hohen Gasüberschuss (Schweinitz/Güte 49 %), an welcher dieser Effekt nur bedingt rückrechenbar ist. Hier wurde der Edelgasüberschuss (Ne_{Luft}) möglicherweise auch durch einen Probenahmeartefakt (Lufteintrag) verursacht.

Die genannten He-Eintragsquellen (Atmosphäre, Excess-Air, Zerfall in bestimmten Gesteinen, Erdmantel) können quantitativ voneinander abgegrenzt werden, wobei Luftdruck, Grundwassertemperatur und Salzgehalt, die Neonkonzentration sowie bekannte $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Isotopenverhältnisse des Grundwassers in die Berechnungen eingehen. Zudem ist auch ein Gasverlust (falls <50%) rückrechenbar, welcher potenziell bereits bei der Grundwasserbildung, zumeist aber bei der Probenahme oder theoretisch auch bei präparativen Analyseschritten erfolgen kann. Bei diesen Proben ist die Korrektur eines potenziellen Excess-air-Effekts nicht möglich, weshalb sie eine etwas größere Datierungsunsicherheit aufweisen. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Heliumkomponenten und der Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung des tritiogenen Heliums findet sich im Anhang (A.2).

Die Säulendiagramme in Abbildung 1 zeigen hohe Anteile (>30%) von radiogenem ^4He (grüne Abschnitte in der jeweils mittleren Säule) in den Messstellen Buhlendorf, Schweinitz/Güte, Königsborn (m. Einschränkung wg. Gasverlust), Gübs/Güte und Pechau. Dies deutet auf vormodernes Grundwasser hin, das lange Zeit einem Eintrag von radiogenem, nahezu ^3He -freiem Helium aus Gesteinsquellen unterworfen war. Zugleich enthalten die meisten dieser Proben jedoch relevante Anteile (>25%) an tritiogenem He (violette Abschnitte in der jeweils linken Säule), welches auf jüngere Grundwasseranteile und somit auf eine Mischung verschiedener Grundwasserschichten hinweist. Tritiogenes Helium war an allen GWM nachweisbar. Lediglich in Badetz GWBr neu, MD-neu Grüneberg, Menz und

¹ Als "excess air" wird die Übersättigung an gelösten Gasen im Grundwasser bezeichnet. Sie wird vorwiegend durch Wechselwirkungen zwischen Bodenluft und Wasser nahe des Grundwasserspiegels hervorgerufen. Kleine Luftblasen, die in Bodenporen gefangen sind, werden bei Schwankungen des Grundwasserspiegels im Grundwasser eingeschlossen. Der hierbei erzeugte hydrostatische Überdruck erzwingt einen Gasaustausch, der zu einem Überschuss von gelösten Gasen führen kann.



Loburg blieb sein Anteil am gesamten ^3He -Gehalt unter 20%. Ein relevanter, jedoch korrigierbarer Gasverlust (graue Abschnitte in der jeweils rechten Säule) war für die Proben Jeber-Bergfrieden, Luso, Kerchau, Göbel, Gübs/Güte, Zerbst/Güte, Pechau und Zerbst neu erkennbar. Lediglich für die artifiziell beeinflussten GWM Königsborn (Gasverlust >60%) und Schweinitz/Güte (Excess Air fast 50%) kann die aktuelle T/ ^3He -Datierung nur als Richtwert interpretiert werden.

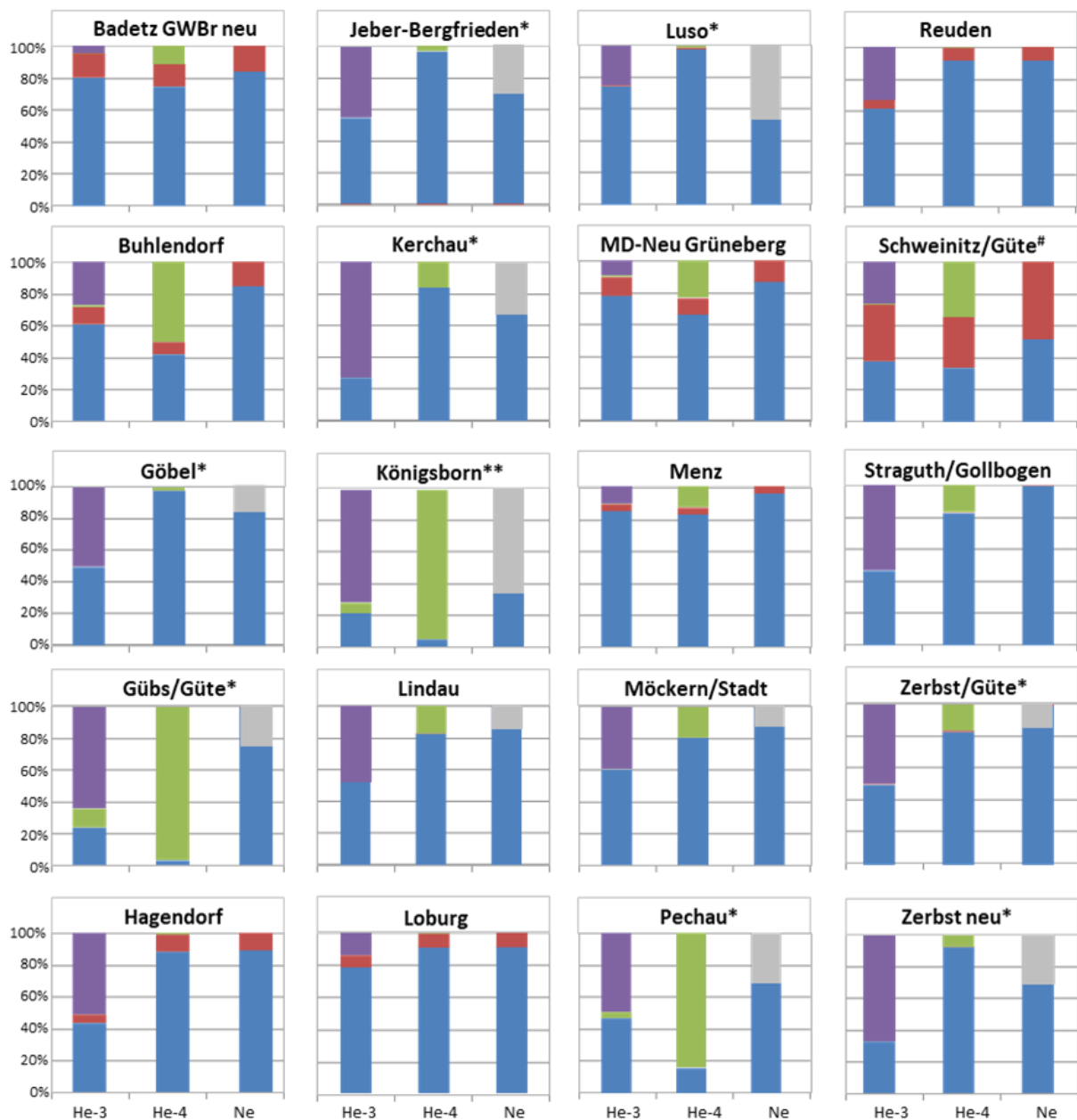


Abbildung 1: Prozentuale Anteile von atmosphärischem (Heeq = blau), excess air (Heexc= rot), terrestrischem (Herad = grün) und tritogenem (Hetrit = violett) Helium an

den jeweiligen Isotopenkonzentrationen (^3He , ^4He) abgeleitet aus dem unveränderlichen atmosphärischen Lösungsgleichgewicht des Neons (Ne_{eq} = blau; Ne_{exc} = rot; $\text{Ne}_{\text{Gasverlust}}$ = grau); *Proben mit Ne-Gasverlust >10%; **aufgrund von Ne-Gasverlust >60% nur bedingt interpretierbar; #aufgrund von Ne-Gasüberschuss $\square$ 50% nur bedingt interpretierbar

Aus der Abbildung 2 lässt sich die Bedeutung der oben genannten Heliumkomponenten in den einzelnen Messstellen ansehen. Der Datenpunkt für frisches Grundwasser, das im unter Standardbedingungen im Lösungsgleichgewicht mit der Atmosphäre steht, ist hellblau hervorgehoben ($\text{Ne}/\text{He} = 4,34$; $^3\text{He}/^4\text{He} = 1,38 \cdot 10^{-6}$). Ein geringeres Ne/He -Verhältnis und zugleich ein geringeres $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis indizieren den Eintrag von radiogenem Helium, das hauptsächlich aus ^4He besteht (grün eingefärbtes Rechteck). Ein zunehmendes $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis weist dagegen auf die Bildung von tritiogenem ^3He hin. Durch einen Heliumeintrag aus excess air kann ein Messpunkt nach links verschoben werden, da der Heliumeintrag stärker ist als derjenige von Neon.

Der für die Tritium/Helium-Datierung entscheidende Prozess des Tritiumzerfalls zeigt sich in Abbildung 2 in einem zunehmenden $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis. Die Datenpunkte werden dadurch nach oben verschoben. Alle genannten He-Eintragsprozesse können sich zwar überlagern, doch ihre Dominanz an den jeweiligen Messstellen ist im Diagramm gut erkennbar.

Drei Proben (Pechau, Gübs/Güte, ggf. Königsborn) zeigten eine deutliche Verschiebung zu sehr geringen Ne/He - und $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnissen. Hier ist anscheinend ein markanter Anteil von besonders altem Grundwasser mit hohem ^4He -Gehalt vorhanden. Die Proben weisen aber auch hohe Konzentrationen von tritiogenem ^3He auf ($\geq 50\%$ des gesamten ^3He -Gehalts), sodass hier eine Mischung von jungem (max. 50 Jahre) und sehr altem Grundwasser (>500 Jahre) angenommen werden kann. Zu berücksichtigen ist allerdings der hohe Gasverlust der drei Proben, der aufgrund der Korrekturrechnung eine höhere Unsicherheit der Isotopenwerte zur Folge hat. Dennoch kann hier ein bemerkenswerter Zufluss von altem Grundwasser angenommen werden.

Auffällig hohe Anteile von tritiogenem Helium ($\geq 65\%$ des gesamten ^3He -Gehalts) finden sich auch in Kerchau und Zerbst neu, was ebenfalls auf Grundwasser aus den 1970er bis 1980er Jahren hindeutet. Im Gegensatz zu den vorher genannten GWM entspricht das Ne/He -Verhältnis jedoch fast demjenigen von frischem, luftgesättigtem Wasser, d. h. der Einfluss von sehr altem Grundwasser ist hier eher vernachlässigbar.

Mit Ausnahme der GWM Buhlendorf, Schweinitz/Güte und MD-Neu Grüneberg, deren Ne/He -Verhältnis noch auf einen relevanten Anteil von radiogenem He (d. h. sehr altem Grundwasser) hindeutet, zeigen alle weiteren GWM eine große Ähnlichkeit mit neu gebildetem, sehr jungem Grundwasser, insbesondere die GWM Loburg, Luso, Badetz GWBr neu, Menz, Möckern/Stadt und Jeber-Bergfrieden. In Abbildung 2 befinden sich diese Messpunkte in der Nähe der $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Frischwasserlinie. Links-Verschiebungen oberhalb der Linie sind vor

allen Excess-Air-Effekten zuzuschreiben und haben keine Bedeutung für die Altersdatierung bzw. Mischungsrechnung.

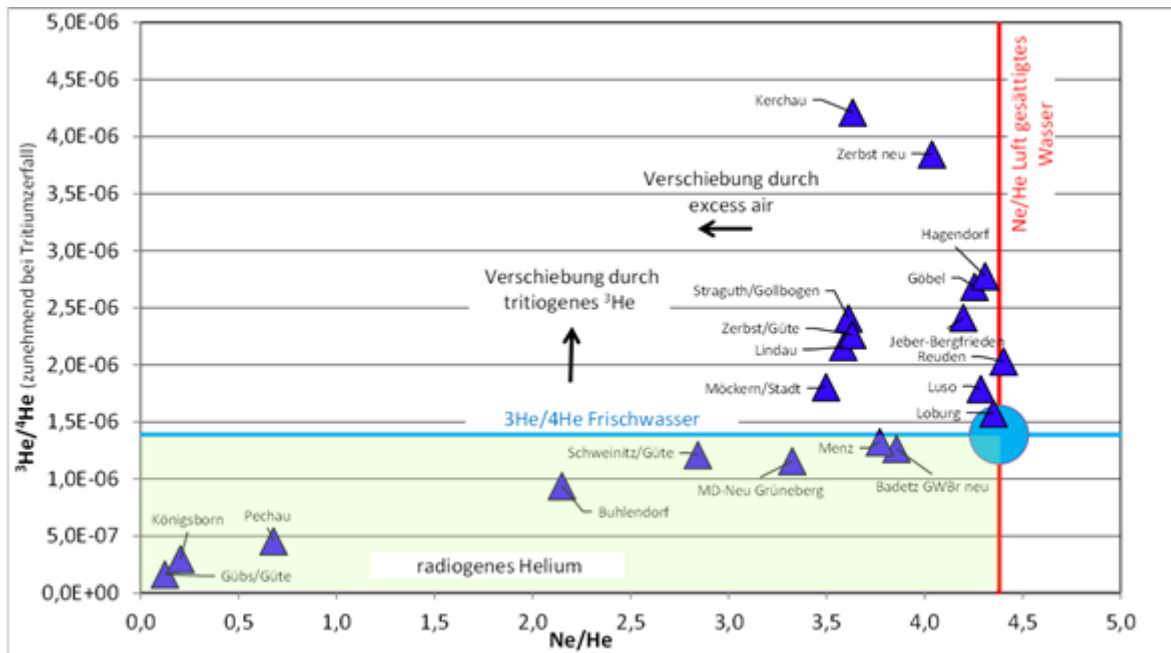


Abbildung 2: Diagramm zur Veranschaulichung dominanter He-Einträge in den untersuchten Messstellen: Ne/He-Konzentrationsverhältnisse vs. $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse in Bezug zu frischem, luftgesättigtem Grundwasser (hellblauer Kreis)

4.3 Mischungsrechnung und Grundwasserdatierung

Eine quantitative Abschätzung der ortsspezifischen Mischungsanteile von jungem und vor-modernem Grundwasser sowie der Datierung der jüngeren Grundwasserkomponente kann durch eine Bilanzierung des sog. stabilen Tritiumeintrags ($^3\text{He}_{\text{trit}} + ^3\text{H}$) und eine anschließende Zerfallsrechnung sowie hydrologische Fließmodellbetrachtungen erfolgen.

Alle untersuchten Proben zeigten plausible Tritiumeinträge, wobei in zwei Fällen (Königsborn, Schweinitz/Güte) potenzielle Artefakte wg. Gasverlust bzw. Luftkontamination berücksichtigt werden müssen. Trotz der undefinierten He-Daten verweist das fehlende rezente Tritium in Schweinitz/Güte als sehr aussagekräftiger direkter Tracer auf fast ausschließlich altes, vormodernes Grundwasser in dieser Probe.

In Abbildung 3 ist der gesamte Tritiumeintrag (sog. stabiles Tritium) in die Grundwasserproben dargestellt, welcher sich aus der berechneten tritiogenen Heliumkonzentration ($^3\text{He}_{\text{trit}}$) und dem direkt gemessenen, rezenten, noch nicht zerfallenen Tritium zusammensetzt. Grundsätzlich deutet ein $^3\text{He}_{\text{trit}}/^3\text{H}$ -Verhältnis <10 auf ein Grundwasseralter ≥ 40 Jahre hin (Badetz GWwBr neu, Göbel, Lindau, Loburg, Luso, MD neu Grüneberg, Menz,

Möckern/Stadt, Reuden) während höhere Verhältnisse eine vorwiegende Grundwasserbildung zwischen 1960 und 1980 annehmen lassen (Buhlendorf, Gübs/Güte, Hagendorf, Jeber-Bergfrieden, Kerchau, Königsborn, Pechau, Straguth/Gollbogen, Zerbst/Güte, Zerbst neu). Sehr niedrige Absolutwerte der beiden Parameter (< 3 TU) zeigen zudem einen hohen Anteil von vormodernem Grundwasser an (keine Probe).

In allen Proben (mit Ausnahme von Badetz GWBr neu) war der größte Teil des ursprünglich eingetragenen Tritiums bereits zerfallen, wobei ein Vielfaches des direkt messbaren Gehalts erreicht wurde. Nur in vier Proben (Badetz GWBr neu, Loburg, MD-Neu Grüneberg, Menz) war der Anteil des rezenten Tritiums höher als 20%. Zugleich enthielten diese Proben auch besonders niedrige Gehalte an tritiogenem Helium-3, was auf besonders junges Grundwasser verweist.

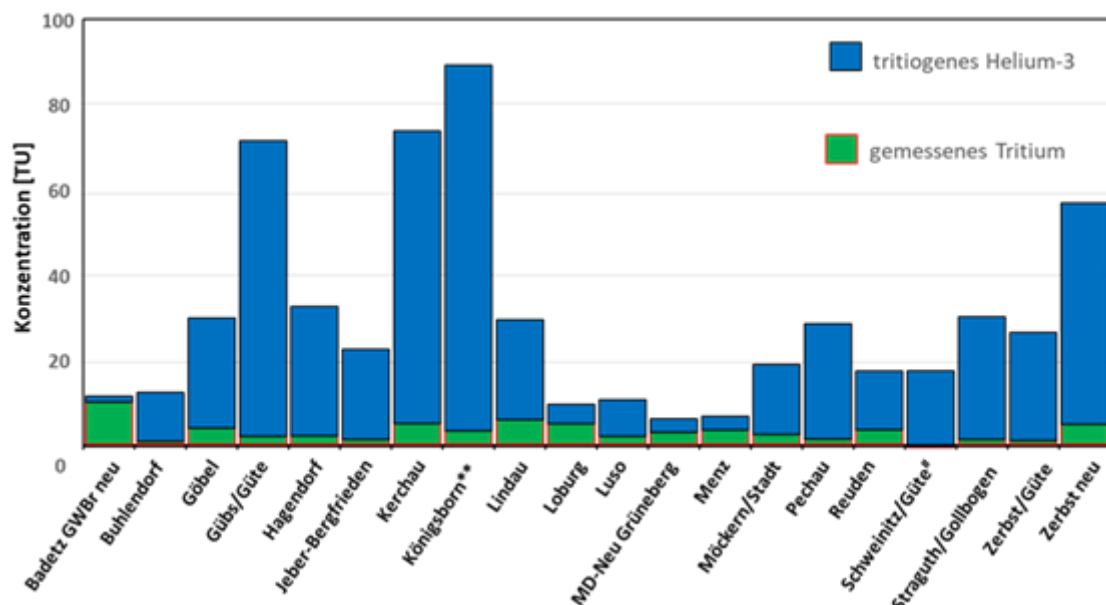


Abbildung 3: Stabiler Tritiumeintrag zusammengesetzt aus tritiogenem Helium-3 und rezentem Tritium

Eine rechnerische Altersdatierung der Grundwässer wurde über eine Massenbilanzierung von $^3\text{He}_{\text{trit}}$ und ^3H und eine anschließende Zerfallsrechnung im abgeschlossenen Grundwasserkörper (sog. piston-flow) durchgeführt (Tab. 2; Sültenfuß & Massmann 2004 & 2011). Dieser formelbasierte Ansatz (siehe Anhang) liefert ein scheinexaktes Ergebnis, bei dem die Messungenauigkeit der Helium- und Neon-Konzentrationen (ca. 1,5%), die Unsicherheiten bei der Berechnung der verschiedenen Heliumfraktionen und die komplexen Prozesse der Grundwasserströmung nicht berücksichtigt sind. Um Letzteres teilweise in die Altersdatierung einzubringen, wurden die Tracerdaten in ein vereinfachtes Dispersionsmodell (Jurgens

et al. 2012) eingearbeitet². Hierbei wurden zwei Szenarien durchgespielt (homogener Grundwasserleiter bzw. Mischung aus einem vormodernen und einem jüngeren Grundwasserleiter, sog. binary mixing Modell) und die jeweiligen Fehlerwahrscheinlichkeiten dieser Modellrechnungen berücksichtigt (Tab. 2). Unter Berücksichtigung aller Mess- und Modellunsicherheiten erreichen die Ergebnisse dieser Datierungen maximal eine Genauigkeit von +/- 5 Jahren.

Die formelbasierte Zerfallsrechnung und die jeweils wahrscheinlichste, modellbasierte Berechnung zeigen für die Mehrheit der Messstellen konsistente Ergebnisse (Badetz GWBr neu, Buhlendorf, Gübs/Güte, Lindau, Loburg, Möckern/Stadt, Pechau, Reuden, Schweinitz/Güte, Straguth/Gollbogen, Zerbst/Güte, Zerbst neu). In den anderen Fällen deutet die Mischungsrechnung mit dem Dispersionsmodell auf eine noch jüngere zweite Grundwasserkomponente hin (Göbel, Hagendorf, Jeber-Bergfrieden, Kerchau, Luso, MD-Neu Grüneberg, Menz, Pechau). Die Berücksichtigung der potenziellen dispersiven Mischung von jungem und vormodernem Grundwasser verweist somit häufig auf eine besonders junge Grundwasserkomponente mit einem Anteil von mindestens 20% (Zerbst/Güte).

Für 12 Messstellen erscheint ein homogener GWL wahrscheinlicher, da entweder das entsprechende Dispersionsmodell einen kleineren Fehler ergibt (Badetz GWBr neu, Buhlendorf, Gübs/Güte, Möckern/Stadt, Reuden, Schweinitz/Güte, Straguth/Gollbogen, Zerbst neu) oder die Mischungsrechnung einen Anteil von 100% jungem Grundwasser liefert (Göbel, Kerchau, Lindau, Loburg).

Die berechneten mittleren Verweilzeiten des jüngeren, oft dominierenden Grundwasseranteils lagen nur in 5 Fällen bei unter 20 Jahren (Badetz GWBr neu, Loburg, Luso, MD-neu Grüneberg, Menz). Wie bereits qualitativ abgeleitet (Abbildung 3) erfolgte der größte Teil der Grundwasserbildung vor 25 bis 60 Jahren (insgesamt 14 GWM). Zudem ist für einige Messstellen (Hagendorf, Jeber-Bergfrieden, Luso, MD-neu Grüneberg, Pechau, Schweinitz/Güte, Zerbst/Güte) zu mehr als 50% vormodernes Grundwasser anzunehmen.

Für die beiden Messstellen (Gübs/Güte, Pechau) mit einem gegensätzlichen Eintragsprofil von Heliumisotopen (hohe Anteile von tritiogenem ³He, aber auch von radio-genem ⁴He) liefern die Berechnungen für Pechau eine plausible Mischung (Fehler 0%) aus vormodernem (76%) und jüngerem (24%, 47 Jahre). Für Gübs/Güte ist die Datierung (1 GWL, 63 Jahre) dagegen fehlerbehaftet (20%). Hier ist somit ebenfalls ein hoher vormoderner

² Erratum! Im Isodetect-Gutachten von 2021 wurden die (ergänzend zur zerfallsbasierten Datierung) durchgeführten modellbasierten Datierungen als sog. Piston Flow Modellrechnungen bezeichnet. Nach nochmaliger Prüfung ist zu korrigieren, dass es sich hierbei um Dispersionsmodelle gehandelt hat. Die Ergebnisse der aktuellen Studie sind somit mit denen des Vorjahres gut vergleichbar



Grundwasseranteil (70%) möglich ist. Die Vermutung eines Zuflusses von sehr altem Grundwasser (siehe Kap. 4.2.) ist deshalb auch auf Basis der modellbasierten Datierungen noch gegeben.

Tabelle 2: Mittlere Verweilzeiten (Alter) von jüngerem Grundwasser mit Anteilen von vormodernem Wasser berechnet aus Tritium bzw. tritiogenem Helium mittels einfacher Zerfallsrechnung sowie zwei fließmodellbasierten Annahmen (Dispersionsmodell für einen homogenen bzw. zwei verschiedenen alte Grundwasserleiter). Die vom Modell ausgegebene kleinere, aussagekräftige Fehlerwahrscheinlichkeit ist jeweils eingefärbt. Ausgangsdaten wurden korrigiert nach Neon-Gasverlust (durch Beprobung) bzw. Überschuss (Excess Air); Gasveränderungen >60% (**Verlust, #Überschuss) nicht korrigierbar

Bezeichnung	Gasverlust/ -überschuss	Ausgangsdaten			Zerfalls- rechnung	Dispersionsmodell 1 homogener GWL			Dispersionsmodell 2 verschiedene Grundwasserleiter		
		³ He _{trit}	³ H _{rezent}	³ H _{stabil}		Junges GW	Gesamtes GW	Fehler	Junges GW	Junges GW	Fehler
	ΔNe	[TU]	[TU]	[TU]	Alter [Jahre]	Alter [Jahre]	%	Alter [Jahre]	Anteil %	%	
Badetz GWBr neu	19	1,4	10,1	11,4	2,2	2	10	3	100	26	
Buhlendorf	18	11,4	0,9	12,3	46,3	46	10	10	20	55	
Göbel	-17	25,8	4,0	29,8	35,9	36	20	27	100	1	
Gübs/Güte	-25	69,3	2,0	71,4	63,3	63	20	62	30	38	
Hagendorf	13	30,3	2,0	32,3	77,2	77	10	31	40	0	
Jeber-Bergfrieden	-31	21,1	1,3	22,5	50,3	50	20	36	24	4	
Kerchau	-35	68,6	5,0	73,7	47,7	48	20	35	100	7	
Königsborn**	-64	85,8	3,3	89,1	58,3	58	20	70	50	13	
Lindau	-16	23,4	5,9	29,4	28,4	28	20	20	100	20	
Loburg	10	4,5	5,0	9,5	11,5	12	10	11	100	0	
Luso	-45	8,6	2,1	10,6	29,0	29	20	18	40	18	
MD-Neu Grüneberg	15	3,1	3,0	6,1	12,6	13	10	5	45	3	
Menz	5	3,2	3,6	6,7	11,3	11	10	5	55	3	
Möckern/Stadt	-13	16,5	2,5	18,9	36,2	36	10	28	30	41	
Pechau	-31	27,0	1,4	28,4	53,1	53	10	47	24	0	
Reuden	11	13,7	3,6	17,3	63,4	63	10	20	100	17	
Schweinitz/Güte*	94	17,4	<0,4	17,4	173,5	174	5	196	2	63	
Straguth/Gollbogen	-1	28,7	1,3	30,1	55,3	55	20	35	24	27	
Zerbst/Güte	-15	25,4	1,1	26,4	57,1	57	20	58	20	13	
Zerbst neu	-32	51,9	4,9	56,8	43,5	44	20	50	50	41	

5 Bewertung früherer Untersuchungen

Seit 2020 wurden in Sachsen-Anhalt jährliche Monitoringkampagnen zur $\text{T}/^3\text{He}$ -Datierung von jeweils 20 bis 25 Grundwasserproben durchgeführt. Die dabei erstellten Gutachten (Helis 2021, Isodetect 2021 und die vorliegende Studie) verwendeten dabei die in der Literatur angegebenen Berechnungsverfahren zur Ableitung des tritiogenen Heliums. Zur Ableitung der verschiedenen Fraktionen der Heliumisotopen sowie der anschließenden Zerfallsrechnungen wurden dabei individuelle Rechenwege verwendet. Nach persönlicher Rücksprache der jeweiligen Gutachter (Dr. Sültenfuß, Dr. Eisenmann) konnten die Ergebnisse des Gutachtens von 2020 mit den Berechnungsmethoden der Gutachten von 2021 und 2022

identisch nachvollzogen werden. Damit zeigt sich die Reproduzierbarkeit und Objektivität der in beiden Gutachten eingesetzten T/³He-Datierungsmethode.

Für die hydrogeologischen Voraussetzungen der Datierung sowie für die Abschätzung von Grundwassermischungen wurden in den vorangegangenen Gutachten allerdings unterschiedliche Ansätze für verwendet. Helis (2020) berechnete das Grundwasseralter der untersuchten Proben ausschließlich auf Basis einer einfachen Zerfallsrechnung der beiden Tritium-Pools (³Hetrit, ³H). Dies entspricht der Annahme eines sog. Piston Flow Modells, in dem es zu keinerlei Vermischungen zwischen Grundwasserkörpern oder stromfäden kommt. Iso-detect lieferte dieselbe Datierung, führte darüber hinaus aber noch Modellrechnungen (Jurgens et al. 2012) durch, bei denen Dispersionsprozesse berücksichtigt wurden. Dieser Berechnungsansatz ermöglicht Altersbestimmungen für einen homogenen Grundwasserleiter sowie für die Mischung aus einem vormodernen und einen jüngeren Grundwasserleiter. Die vom Modell gelieferten Fehlerwahrscheinlichkeiten der jeweiligen Ergebnisse erlauben fundierte Rückschlüsse auf das jeweils zutreffende Szenario.

Die genannten Modelle erlauben auch quantitative Angaben zur potenziellen Mischung von vormodernem und jungem Grundwasser. Demgegenüber nutzte Sültenfuß in Helis (2021) eine qualitative graphische Ableitung von Grundwassermischungen. Hier wurden die Grundwasseralter der Proben in einen historischen Datensatz des Grundwasser-Tritiumeintrags für Deutschland und Wien eingeordnet. Für einzelne Proben ergab sich eine eindeutige Unterschreitung des stabilen Tritiumgehalts, die durch eine Zumischung von vormodernem Grundwasser erklärbar war. Dieses deskriptive Verfahren erlaubt nur eine grobe Zuteilung in vier Mischungsklassen (Anteil vormodernes Grundwasser >0 %, 20-50%, 50-80%, >80%), hat aber den Vorteil einer eher konservativen Bewertung der Mischungsverhältnisse. Demgegenüber können die scheinbar präzisen quantitativen Angaben der Modellrechnungen eine Überinterpretation der Resultate zur Folge haben. Schlussendlich dürfte aber der zeitaufwändigere quantitative Ansatz eine höhere Aussagekraft haben, da er auch die Dispersion mitberücksichtigt und über die Fehlerrechnung ebenfalls Aussagen über die Datierungsunsicherheit liefert.

6 Zusammenfassung

An 20 Proben aus Sachsen-Anhalt wurde über eine Tritium/³He-Datierung die mittlere Verweilzeit von jungem Grundwasser (<~60 Jahre) sowie anhand eines Dispersions-Modells die Zumischungsanteile von vormodernem Grundwasser (>~70 Jahre) berechnet.

Mit einer Ausnahme (Schweinitz/Güte) fand sich in allen Proben rezentes Tritium, dessen Anteil im Vergleich zum zerfallenen Tritium (tritiogenes Helium) jedoch gering war (meist <20%). Daraus ist zu schließen, dass der größte Teil der Grundwasserneubildung vor 25 bis 60 Jahren erfolgte. Lediglich in fünf Fällen (Badetz GWBr neu, Loburg, Luso, MD-neu Grüneberg, Menz) lag die mittlere Verweilzeit des jungen Grundwassers unter 20 Jahren. Für etwa

die Hälfte der Messstellen ist eine Zumischung von vormodernem Grundwasser anzunehmen.

Die Gesamtbewertung der drei Datierungsstudien von 2020 bis 2022, die von zwei unabhängigen Institutionen bzw. Gutachtern durchgeführt wurden, zeigt reproduzierbare Berechnungen des tritiogenen Heliums und der entsprechenden zerfallsbasierten Datierung. Mit modellbasierten, quantitativen Datierungsansätzen können wichtige hydrologische Prozesse (Dispersion, Mischung von vormodernem & rezentem Grundwasser) zusätzlich berücksichtigt werden, wobei über Fehlerrechnungen die wahrscheinlichsten Szenarien ableitbar sind. Alternativ ist eine qualitative, graphische Interpretation der Zumischung von vormodernem Grundwasser möglich.

ANHANG

A. Grundlagen - Isotopenmethoden zur Grundwasserdatierung

A.1. Tritium (^3H):

^3H ist ein instabiles Isotop des Wasserstoffs und hat eine Halbwertszeit von 12,32 Jahren. Es eignet sich zur Altersbestimmung von relativ jungen Grundwässern. Tritium ist ein idealer Tracer im Grundwasser, da das ^3H -Atom in das Wassermolekül selbst eingebaut ist. Der natürliche atmosphärische Tritium-Hintergrund im Niederschlag in Mitteleuropa liegt bei etwa 6 TU (1 Tritium Unit = 3,2 pCi bzw. 0,118 Bq ^3H pro Liter Wasser bzw. 1 ^3H pro 10^{18} H-Atome). Durch die Kernwaffentests in den 1960er Jahren gelangte ein stark erhöhter Tritiumeintrag in die Atmosphäre und mit dem Niederschlag in das Grundwasser. In Abbildung 4 ist der zeitliche Verlauf des Tritiumgehalts in den Niederschlägen in Mitteleuropa zu sehen. Der aktuelle Tritiumgehalt im Niederschlag in Europa liegt deshalb mit ca. 8-10 TU noch über dem natürlichen Hintergrund.

Für die qualitative Interpretation des Tritiumgehalts im Grundwasser kann heute folgende Faustregel gelten (modifiziert nach Clark & Fritz 1997):

<0,5 TU	Wasser älter als 1952 (vormodern)
0,5 - ~3 TU	zumeist Mischung aus vormodernem und jungem Wasser (<15 Jahre)
3 - 10 TU	zumeist jünger als 10-15 Jahre (sehr jung)
10 - 20 TU	markanter Anteil von Wasser aus den 60er/70er Jahren (jung)
>30 TU	Wasser aus den 60er/70er Jahren dominierend oder Kontamination
>50 TU	zusätzliche Kontamination mit Tritium

Durch Mischungsmodelle, bei denen bestimmte Neubildungszeiträume und Mischungskonstanten angenommen werden, kann die mittlere Verweilzeit der verschiedenen Alterskomponenten eines Grundwasserkörpers genauer berechnet werden. Als Mischungsmodelle finden hauptsächlich das Binary Mixing Model (Jurgens et al. 2012) und das Dispersionsmodell (Maloszewski, P. and Zuber 1996, 2001) Verwendung.



Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des ^3H -Gehalts in Niederschlägen in Mitteleuropa (Datenbank der International Atom Energy Agency IAEA)

A.3 Helium-3/Helium-4 ($^3\text{He}/^4\text{He}$):

Helium hat 2 stabile Isotope, ^3He und ^4He . Es verhält sich als Edelgas sehr reaktionsträge und geht unter normalen Bedingungen keine chemischen oder biologischen Verbindungen ein. Als Zerfallsprodukt des radioaktiven Tritiums ist ^3He für eine Altersinterpretation von Grundwasser gut geeignet. Es kann allerdings auch aus weiteren Quellen ins Grundwasser gelangen, die zu diesem Zweck quantifiziert werden müssen (Weise 2002). Die gemessene ^3He -Konzentration setzt sich potenziell aus vier Komponenten zusammen:

$$^3\text{He}_{\text{ges}} = ^3\text{He}_{\text{eq}} + ^3\text{He}_{\text{exc}} + ^3\text{He}_{\text{rad\&prim}} + ^3\text{He}_{\text{trit}}$$

He_{eq}: Aus der Atmosphäre erfolgt ein Eintrag exakt definierbarer Anteile an $^3\text{He}_{\text{eq}}$ und $^4\text{He}_{\text{eq}}$ sowie von Neon. Das über die Henrykonstante ableitbare Lösungsgleichgewicht zwischen Atmosphäre und Wasser ist von Temperatur, Luftdruck und Salinität abhängig, deren Messwerte bei der Berechnung des Eintrags berücksichtigt werden. Die atmosphärische Heliumkonzentration wird in der Literatur mit 5,24 ppm V (Glückauf 1946) angegeben (Henrykonstante $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L/atm STP}^3$), diejenige von Neon mit 18,18 ppm V (Henrykonstante

³ Normbedingungen (N) = Standardbedingungen (STP): Gastemperatur: 0°C, Druck: 101,325 kPa

$4,5 \cdot 10^{-4}$ mol/L/atm STP). Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis beträgt in der Atmosphäre $1,38 \cdot 10^{-6}$ (Clarke et al. 1976) und erfährt bei der Lösung ins Grundwasser keine nennenswerte Fraktionierung. Dementsprechend sind daraus die Konzentrationen der Isotope im Grundwasser ableitbar. Bei den im Untersuchungsgebiet vorliegenden Umweltbedingungen (Grundwassertemperatur 10°C ; mittlere Geländehöhe 50 m; Salinität nahe 0%) wurde damit ein Lösungsgleichgewicht von $4,65 \cdot 10^{-5}$ NmL/kg (Norm-Milliliter² pro kg) für Helium und von $2,02 \cdot 10^{-4}$ für Neon errechnet.

Grundsätzlich müssten zur Ableitung von H_{eq} die Lösungsgleichgewichte während der Grundwasserneubildung verwendet werden. In der Praxis reichen jedoch rezente Umweltparameter aus, da deren Variabilität im Untersuchungsgebiet und -zeitraum für die zur Datierung verwendete Gaslöslichkeit vernachlässigbar ist.

He_{exc}: Eine Verschiebung der Heliumkonzentration kann durch „excess air“ Vorgänge erfolgen, die auf einer Übersättigung des Grundwassers mit Bodenluft beruhen (Heaton and Vogel 1981). Zur Quantifizierung dieser He-Komponente dient der Neongehalt des Grundwassers, der als konservativer Tracer von Zerfallsprozessen unbeeinflusst ist. Die zusätzlichen Anteile $^3\text{He}_{\text{exc}}$ und $^4\text{He}_{\text{exc}}$ können deshalb aus einem Abgleich der Neon/Helium-Konzentrationen in der Atmosphäre mit dem erhöhten Neongehalt des Grundwassers ermittelt werden: $\text{He}_{\text{exc}} = \text{Ne}_{\text{exc}} \cdot \text{He}_{\text{air}}/\text{Ne}_{\text{air}}$. Die Ableitung des isotopenspezifischen $^3\text{He}_{\text{exc}}$ erfolgt über das bekannte $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis. Neben excess air Effekten kann ein erhöhter Neongehalt auch durch unsachgemäße Probenahme (Luftkontamination, Ne_{Luft}) oder anthropogene Einträge (Packgas, Schweißgas, Kühlmittel) verursacht werden. Bei einer so verursachten Verdreifachung des natürlichen Neongehalts sind Grundwasserproben kaum mehr datierbar.

Ein erniedrigter Neongehalt in Grundwasserproben kann mehrere potenzielle Ursachen haben:

- Während der Grundwasserneubildung kann durch Gasbildung von CH_4 bzw. CO_2 oder eine besonders hohe Infiltrationstemperatur eine geringe Aufnahmekapazität des Wassers vorhanden gewesen sein.
- Während der Beprobung könnte sowohl in der Grundwassermessstelle selbst als auch im Entnahmeschlauch bzw. Kupferrohr eine Ausgasung erfolgt sein. Dieses Risiko versucht man durch die Klemmvorrichtung am Cu-Entnahmerohr zu verringern.
- Bei präparativen analytischen Schritten (z.B. Wasserentgasung, Fixierung auf Tieftemperaturfallen bzw. Aktivkohle, Desorption und spektrometrische Messung) kommt es zu einem Gasverlust, der in der Regel durch Kontroll- und Kalibriermessungen kompensiert wird. Dennoch sind bei Einzelmessungen größere Schwankungen nicht auszuschließen.

Sofern in einer Probe ein Gasverlust festgestellt wurde, kann dieser über die Rückrechnung auf den atmosphärischen Neoneintrag allgemein abgeglichen werden. Dabei wird jedoch ein potenzieller Ne-Überschuss, der durch Excess-Air-Effekte erfolgt sein könnte, vernachlässigt. Die Altersdatierung von Proben mit einem markanten Gasverlust (>30%) hat deshalb eine größere Unsicherheit.

He_{rad&prim}: Durch den Zerfall von Thorium und Uran in bestimmten Gesteinsarten (radiogenes Helium, Herad) steigen heliumhaltige (jedoch nicht neonhaltige) Gase in das Grundwasser auf, die vorwiegend 4Herad und nur minimale Mengen ³He_{rad} enthalten. Das Verhältnis der Heliumisotope (³He/⁴He), das aus der Erdkruste (5 bis 70 km Tiefe) aufsteigt, wird in der Literatur mit ca. $2 \cdot 10^{-8}$ angegeben. Freisetzungen von sog. primordialem Helium (Heprim) aus dem Erdmantel (70 bis 2900 km Tiefe) können in geologisch aktiven Zonen vorkommen und die Datierung ggf. verfälschen, da das ³He/⁴He-Verhältnis hier über $1 \cdot 10^{-5}$ erreichen kann. In diesem Fall steigt auch die Konzentration der ³He-Isotopen signifikant an, wird aber fälschlicherweise dem tritiogenen Helium zugeschrieben. Im Untersuchungsgebiet ist dieser Effekt jedoch weitgehend auszuschließen. Anhand eines potenziellen Überschusses von ⁴He lässt sich der radiogene He-Anteil im Grundwasser ableiten und über dessen ³He/⁴He-Verhältnis auch die ³He_{terr}-Komponente bestimmen: ${}^4\text{He}_{\text{ges}} = {}^4\text{He}_{\text{eq}} + {}^4\text{He}_{\text{exc}} + {}^4\text{He}_{\text{rad\&prim}}$.

Eine grobe Datierung von besonders altem Grundwasser (>500 a) ist auf Basis der ⁴He-Konzentration möglich, da sich Helium-4 (aus Erdkruste bzw. -mantel) in einer linearen Funktion zur Aufenthaltszeit des Grundwassers im Sediment anreichert (Aeschbach-Hertig et al. 2000).

He_{trit}: Die Helium-3 Konzentration im Grundwasser wird außerdem durch den Zerfall von Tritium, bei dem Helium-3 entsteht (³He_{trit}), bestimmt.

Zerfallsrechnung: Der ³He-Anteil aus dem Tritiumzerfall (³He_{trit}) wird für die Altersdatierung jüngeren Grundwassers (<70 Jahre) herangezogen. Die „Uhr“ der zusätzlichen Heliumbildung durch Tritiumzerfall beginnt erst mit der Grundwasserneubildung zu laufen. Dabei erhöht sich bei einem vollständigen Zerfall von 1 TU Tritium der ³He-Gehalt um $2,5 \cdot 10^{-12}$ Norm-Milliliter pro kg Wasser (Zerfallskonstante $\lambda = 0,05626 \text{ s}^{-1}$). Der tritiogene Heliumanteil wird für die Bilanzierung des Tritiumeintrags schließlich in TU umgerechnet mit der Formel: $1 \text{ cm}^3 \text{ STP}^2/\text{g } {}^3\text{He}_{\text{trit}} = 1,019 \times 10^{14} \text{ TU}$. Eine einfache rechnerische Grundwasserdatierung aus Tritium und ³Helium-Messungen wurde bereits von Weise & Moser (1987) und Schlosser et al. (1988) mit folgender Formel dargestellt:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} * \ln \left(1 + \frac{{}^3\text{He}(\text{tritium})}{3\text{H}} \right)$$



Darüber hinaus werden die Parameter dieser Formel in der Regel in Fließmodelle eingespeist, die kluftige Grundwasserverhältnisse (Piston Flow Model) oder poröse bzw. heterogene Grundwasserleiter annehmen (Binary Mixing Model, Jurgens et al. 2012) annehmen. Unter Berücksichtigung aller Mess- und Modellunsicherheiten erreichen die Ergebnisse dieser Datierungen maximal eine Genauigkeit von +/- 5 Jahren.

B. Literatur

1. Fachgutachten zur Tritium/Helium-Datierung in Sachsen-Anhalt:

HELIS 2021. Beurteilung der Analysen zur Grundwasserdatierung LHW Sachsen-Anhalt Juni 2020. Verfasser: Sültenfuß, Jürgen; Universität Bremen, 17 S.

ISODETECT 2021. Isotopenhydrologische Untersuchungen zur Datierung und Zusammensetzung von Grundwasserproben aus Sachsen-Anhalt mittels Tritium- und Heliumanalysen. Verfasser: Eisenmann, Heinrich & Stöckl, Michael; München, 16 S.

2. Wissenschaftliche Referenzen:

AESCHBACH-HERTIG, W., PEETERS, F., BEYERLE, U., KIPFER, R. 2000. Palaeotemperature reconstruction from noble gases in ground water taking into account equilibration with entrapped air. *Nature* 405: 1040-1044.

CLARKE, W.B., JENKINS, W.J., TOP, Z. 1976. Determination of tritium by spectrometric measurement of ^3He . *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 27: 515-525.

CLARK, I. UND FRITZ, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA. 328 pp.

GLÜCKAUF, E. 1946. A micro-analysis of the helium and neon contents of air. *Proceedings of the Royal Society A*, 185: 98-119.

HEATON, T.H.E. UND VOGEL, J.C. 1981. "Excess air" in groundwater. *J. Hydrol.* 50: 201–216.

JURGENS, B.C., BÖHLKE, J.K., EBERTS, S.M. 2012. TracerLPM (Version 1): An Excel® workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data: U.S. Geo-logical Survey Techniques and Methods Report 4-F3, 60 p.

MALOSZEWSKI UND P., ZUBER, A. 2001. Lumped-parameter models. In: *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle*, Vol. VI, Modelling.

MALOSZEWSKI, P. UND ZUBER, A. 1996. Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data, chap. 2 in International Atomic Energy Agency, ed., *Manual on mathematical models in isotope hydrogeology*, TECDOC-910: Vienna, Austria, International Atomic Energy Agency Publishing Section, p. 9–58.

PAPP, L., PALCSU, L., MAJOR Z., RINYU, L., TOTH, I. 2012. A mass spectrometric line for tritium analysis of water and noble gas measurements from different water amounts in the range of microlitres and millilitres. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 48(4): 494-511.

SCHLOSSER ET AL. 1992. Tritium/ ^3He dating of waters in natural systems. In: *Isotopes of Noble Gases as Tracers in Environmental Studies*, 123-145. IAEA, Vienna.

SÜLTENFUSS, J. UND MASSMANN, G. 2004. Datierung mit der ^3He -Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. *Grundwasser* 9 (4): 221-234.

SÜLTENFUSS, J., R. PURTSCHERT, P., FÜHRBÖTER, J.F. 2011. Age structure and recharge conditions of a coastal aquifer investigated with ^{39}Ar , ^{14}C , ^3H , He isotopes and Ne. *Hydrogeology Journal* 19: 221-236.

UNTERWEGER, M.P, HOPPES, D.D., SCHIMA, F.J., AND COURSEY, J.S. 2010. Radionuclide Half-Life Measurements. National Institute of Standards and Technology (NIST). www.nist.gov/pml/data/half-life.html.cfm.

WEISE, S.M. 2002. ^3He und ^{85}Kr - Erfahrungen und Anwendungsbeispiele. Workshop Isotope und Tracer in der Wasserforschung, TU Bergakademie Freiberg, Wissenschaftliche Mitteilungen: 63 – 70.

WEISE, S.M. UND MOSER, H. 1987. Groundwater dating with helium isotopes. International Atomic Energy Agency, IAEA; International symposium on the use of isotope techniques in water resources development, Vienna (Austria), Proceedings Series IAEA-SM-299/44:105-126.

C. Probenahme, Präparations- und Messverfahren

Tritium:

Die Probennahme und Aufbewahrung bis zur Analyse erfolgte in 1 L Glasbehältern. Zur Messung von Tritium in H₂O wurden die Proben elektrolytisch angereichert (Verfahren ES 400) und nach Zugabe eines Szintillationscocktails (Ultima Gold LLT) spektrometrisch (liquid scintillation counting, LSC) analysiert. Jede Probe wurde zehnmal jeweils 100 min gemessen und anschließend der Mittelwert bestimmt. Zur Auswertung der Daten wurden zusätzlich Standards und Nullwertproben eingesetzt. Die Ungenauigkeit des gesamten Messverfahrens beträgt ca. $\pm 0,4$ TU (Standardabweichung) für niedrige Tritiumgehalte (<7 TU) und ca. 10 % für höhere Tritiumgehalte >7 TU. Der Wert von einer Tritiumeinheit (1 TU) bedeutet ein Isotopenverhältnis von einem Tritium-Isotop auf 10^{18} ¹H-Atome und eine Zerfallsaktivität von 0,119 Bq/L.

Helium-3/Helium-4/Neon:

Die Probenahme zur Bestimmung von Edelgasen erfolgt mit 70 cm langen Kupferrohren (Durchmesser ca. 7 mm), die mit Grundwasser durchströmt und dabei mit Schraubklemmen gasdicht verschlossen werden.

Die Präparation von Helium-3/Helium-4/Neon erfolgte in einem mehrstufigen kryogenen Separationssystem (Papp et al. 2012). Alle Grundwassergase wurden in einem Vakuum aus den Proben extrahiert, auf Tieftemperaturfallen (Heliumkühler Coolpak 400, Leybold) aufgefangen und bei 25 K (Ar/Kr/Xe) bzw. 10 K (nur He und Ne) separiert. In einem anschließenden Separationsschritt wurden Helium und Neon auf Aktivkohle festgelegt und getrennt freigesetzt (He bei 42 K; Ne bei 90 K). Anschließend wurden die Gaskonzentrationen von He und Ne ebenso wie das Isotopenverhältnis von ³He und ⁴He mit einem Sektorfeld Edelgas-Massenspektrometer bestimmt (VG 5400 Fisons Instruments, jetzt Thermo Scientific bzw. Thermo Scientific Helix SFT). Zur Kalibrierung dienten atmosphärische Luft und ³He angereichertes, hochreines Helium. Die typische Messgenauigkeit beträgt für die ³He/⁴He- und He/Ne-Verhältnisse 1,3% und für die Konzentrationsbestimmungen ca. 1 %.