

Altersdatierung des Grundwassers an Brunnen I für die Neu- ausweisung des Trinkwasserschutzbereichs in Bad Feilnbach



[Quelle: Google Earth]

Auftraggeber: Gemeinde Bad Feilnbach
Rathausplatz 1
83075 Bad Feilnbach

Bearbeiter: Florian Heine (M.Sc. Ingenieur- und Hydrogeologe)

Schweitenkirchen, 07.07.2021



Dr. F. Eichinger

E:\Gemeinde Bad Feilnbach\360249_Bericht.docx

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Vorbemerkung.....	3
2 Hydrochemische Beurteilung.....	3
3 Stabile Isotope Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$) und Deuterium ($\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$)	4
3.1 Grundlagen	4
3.2 Ergebnisse mit Interpretation.....	5
4 Tritium in Kombination mit Schwefelhexafluorid	6
4.1 Grundlagen der Methodik	6
4.2 Ergebnisse mit Interpretation.....	8
5 Zusammenfassung.....	11

Verzeichnis der Abbildungen und Anlagen

Abbildung 1 Darstellung der Hauptionen im Schoeller-Diagramm an Brunnen I.	4
Abbildung 2 Gemeinsame Darstellung der stabilen Wasserisotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$	6
Abbildung 3 Gemeinsame Darstellung der Tritium- und der SF_6 -Gehalte der Grundwasserproben aus dem Brunnen I.	10
 Tabelle 1 Übersicht der Anteile von Wasserkomponenten < 10 und < 5 Jahre mit mittleren Verweilzeiten zwischen 9 und 15 Jahren.	 9
 Anlage 1: Übersicht der unterschiedlichen Fließmodelle	 12
Anlage 2: Prüfbericht Nr. 360249	13

1 Vorbemerkung

Die Fa. Hydroisotop GmbH wurde von der Gemeinde Bad Feilnbach über Crystal Geotechnik GmbH beauftragt, an einer Grundwasserprobe aus dem Brunnen I in Bad Feilnbach hydrochemische, isotopehydrologische und gasphysikalische Untersuchungen durchzuführen.

Die Untersuchungen sollen im Rahmen der Neuausweisung des Trinkwasserschutzgebiets für die Brunnen I und II in Bad Feilnbach Aussagen über die Altersstruktur des untersuchten Grundwassers geben. Dafür ist vor allem der Anteil an jungem, tritiumhaltigem Grundwasser und dessen mittlerer Verweilzeit im Brunnen, die > 10 Jahre sein sollte, von großem Interesse.

Der Brunnen I nördlich des Ortsgebietes von Bad Feilnbach im oberbayerischen Landkreis Rosenheim liegt zusammen mit dem Brunnen II in einem Trinkwasserschutzgebiet. Der durch den Brunnen I in einer Teufe von 18 bis 26 m u. GOK erschlossene Grundwasserleiter wird durch die gut durchlässigen Kiese der Schwemmkegelsedimente des Jenbaches aufgebaut. Das Grundwasser ist aufgrund der auflagernden gering durchlässigen tonigen Beckensedimente stark gespannt. Die allgemeine Grundwasserfließrichtung im bestehenden Trinkwasserschutzgebiet ist ungefähr von Süd-Südwest nach Nord-Nordost gerichtet. Die mächtige den Grundwasserleiter überlagernde Tonschicht keilt nach Süd-Südwest allerdings aus, sodass im Anstrom und wohlmöglich im Neubildungsgebiet höher durchlässige Murschuttsedimente anstehen.

Der Brunnen I wurde seitens der Crystal Geotechnik GmbH am 06.04.2021 gegen 12:30 bis 13:15 Uhr beprobt. Zur Auswertung wurden der Fa. Hydroisotop zusätzlich Übersichtslagepläne, ein Grundwassergleichenplan, geologische Schnitte durch das Untersuchungsgebiet sowie eine Grundwasseranalyse am Brunnen I von 2019 (Prüfbericht 1497266 – 224121 Agrolab Dr. Blasy - Dr. Busse) und Vergleichsmessungen aus den Jahren 2008 bis 2019 an Brunnen I und II zur Verfügung gestellt.

Die aktuellen Analysenergebnisse sind im Prüfbericht Nr. 360249 aufgeführt und in den folgenden Abbildungen grafisch dargestellt.

2 Hydrochemische Beurteilung

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit ist mit 812 $\mu\text{S}/\text{cm}$ typisch für moderat mineralisierte Wässer und der pH-Wert von 7,1 zeigt weitgehend neutrale Verhältnisse an. Die Messung des gelösten Sauerstoffs war nach Angaben des Probennehmers nicht plausibel, liegt aber bei den Vergleichsmessungen der letzten Jahre in der Regel bei $\pm 5 \text{ mg/l}$ (2019 bei 4,5 mg/l O_2), also im noch oxischen Bereich.

Die hydrochemische Beschaffenheit der Probe am Brunnen I wird von den dominierenden Kationen Calcium (120 mg/l) und Magnesium (21 mg/l) sowie dem Anion Hydrogenkarbonat (450 mg/l) geprägt. Damit entspricht es einem Ca-Mg- HCO_3 Wassertyp (Abbildung 1). Die hydrochemische Charakteristik des Grundwassers am Brunnen I dieser Untersuchung entspricht demnach der Analyse aus dem Jahr 2019. Eine wesentliche Veränderung kann im Vergleich nicht festgestellt werden.

Die Kationen Natrium (12 mg/l) und Kalium (6,8 mg/l) sowie Anionen Chlorid (30 mg/l) und Sulfat (16 mg/l) sind nur stark untergeordnet vertreten. Aufgrund der Verteilung der Äquivalenzprozentanteile von Natrium (7 meq%) und Chlorid (10 meq%) können Ionenaustauschprozesse,

in denen Calcium und Magnesium gegen Natrium ausgetauscht werden, weitgehend ausgeschlossen werden.

Der Nitratgehalt mit 12 mg/l NO_3 ist ebenfalls sehr gering und lässt mit den in der Probe unter der Nachweisgrenze liegenden Gehalten von Ammonium ($< 0,05$ mg/l NH_4) und Nitrit ($< 0,01$ mg/l) sowie den oxidischen Bedingungen auf eine geringe Beeinflussung von anthropogenen Tätigkeiten durch z.B. Düngemaßnahmen schließen.

Die gemessenen Gehalte von Eisen (0,15 mg/l Fe_{ges}) und Mangan (0,01 mg/l Mn_{ges}) im Grundwasser der Probe aus Brunnen I sind sehr niedrig und weisen keine besonderen Auffälligkeiten auf.

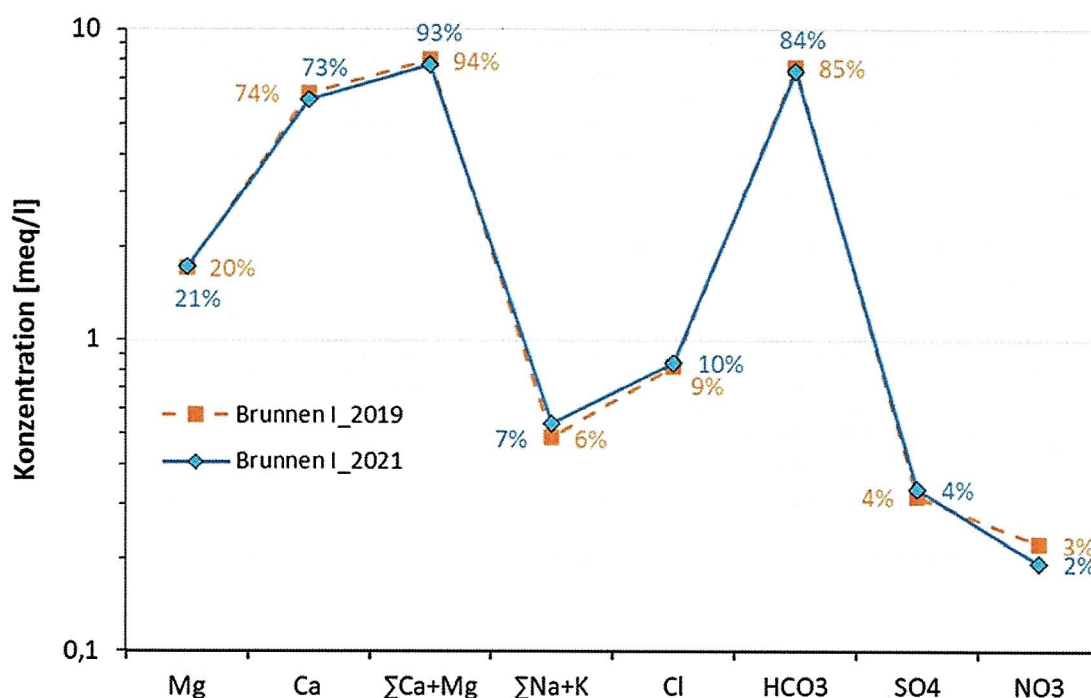


Abbildung 1 Darstellung der Hauptionen im Schoeller-Diagramm an Brunnen I mit Vergleich zu Messwerten in 2019 inklusive Angabe der Äquivalenzprozente (in meq%) der jeweiligen Kat- und Anionen zur Bestimmung des Wassertyps.

3 Stabile Isotope Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$) und Deuterium ($\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$)

3.1 Grundlagen

Die stabilen Isotope des Wassermoleküls Wasserstoff (^1H , ^2H) und Sauerstoff (^{16}O , ^{18}O) zeigen in verschiedenen Grundwasserproben typische Konzentrationsunterschiede. Diese lassen sich in den spezifischen Verhältnissen dieser stabilen Wasserisotope ausdrücken, die in Folge verschiedener physikalischer Prozesse sehr charakteristisch sind. In erster Linie gehen sie auf temperaturabhängige Effekte, wie z.B. die Verdunstung zurück.

Die Messergebnisse der Verhältnisse der stabilen Wasserisotope $^2\text{H}/^1\text{H}$ und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ werden auf den internationalen Standard des „Vienna Mean Ocean Water“ (VSMOW) bezogen und

als relative Abweichung davon in der so genannten δ -Notation angegeben. Die analytische Messgenauigkeit für natürliche Wasserproben liegt für $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$ bei $\pm 1 \text{ ‰}_{\text{VSMOW}}$ und für $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ bei $\pm 0,15 \text{ ‰}_{\text{VSMOW}}$.

Insbesondere kann die meteorische Herkunft von Grundwässern anhand der stabilen Wasserisotopen erkannt werden, da die $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$ und $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ Signaturen der Niederschläge und hieraus gebildeter Grundwässer auf der sogenannten globalen mittleren Niederschlagsgeraden liegen, die durch die Relation $[\delta^2\text{H} = (8 \times \delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}) + 10]$ erklärt ist. Winterniederschläge weisen gegenüber Sommerniederschlägen erheblich niedrigere Werte für $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$ und $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ auf. Zudem sind die Signaturen der stabilen Wasserisotopen von Grundwässern aus, relativ gesehen, höheren Einzugsgebieten oder kälteren Klimabedingungen (z.B. Kaltzeiten) ebenfalls niedriger als im Vergleich zu Grundwässern aus niedrigeren Einzugsgebieten oder wärmeren Klimabedingungen. Verdunstungseffekte, die z.B. an Oberflächengewässern oder bei Sommerniederschlägen auftreten, können über eine Verdunstungsgerade beschrieben werden, die eine Steigung von ungefähr 4 bis 5 aufweist.

Durch Vergleichsmessungen können auf diese Weise die Einzugsgebiete der beprobten Brunnen näher bestimmt oder sogar Anteile von sehr „alten“ Grundwässern aus dem Pleistozän identifiziert werden.

Vergleicht man anhand längerer Messreihen die Signaturen der stabilen Wasserisotopen im Grundwasser mit den Niederschlagsverhältnissen, so kann beim Auftreten von größeren Schwankungen im Grundwasser eine schnell abfließende Grundwasserkomponente nachgewiesen werden. In größeren, gut durchmischten Grundwasservorkommen ohne Beteiligung von schnell abfließenden Grundwasserkomponenten und allgemein höheren mittleren Verweilzeiten treten diese Schwankungen der stabilen Wasserisotopenwerte allerdings nicht bzw. nur geringfügig auf.

Da in diesem Bericht die stabilen Wasserisotope alle am H_2O gemessen wurden, wird in der Folge die Präzisierung dieser Angabe bei der δ -Notation weggelassen.

3.2 Ergebnisse mit Interpretation

Die stabilen Wasserisotopenwerte der untersuchten Grundwasserprobe liegen bei $-73,5 \text{ ‰}_{\text{VSMOW}}$ für $\delta^2\text{H}$ und $-10,22 \text{ ‰}_{\text{VSMOW}}$ für $\delta^{18}\text{O}$. Die Lage des Isotopenwertepaares des untersuchten Grundwassers auf der globalen Niederschlagsgeraden weist auf eine meteorische Herkunft durch Niederschlagswasser hin (Abbildung 2). Das Isotopenwertepaar liegt damit im typischen Wertebereich für holozän gebildete Grundwässer der Region. Ein besonderer Einfluss von schnell abfließenden Sommer- oder Winterniederschlägen ist anhand des einen Messwertepaares nicht erkennbar.

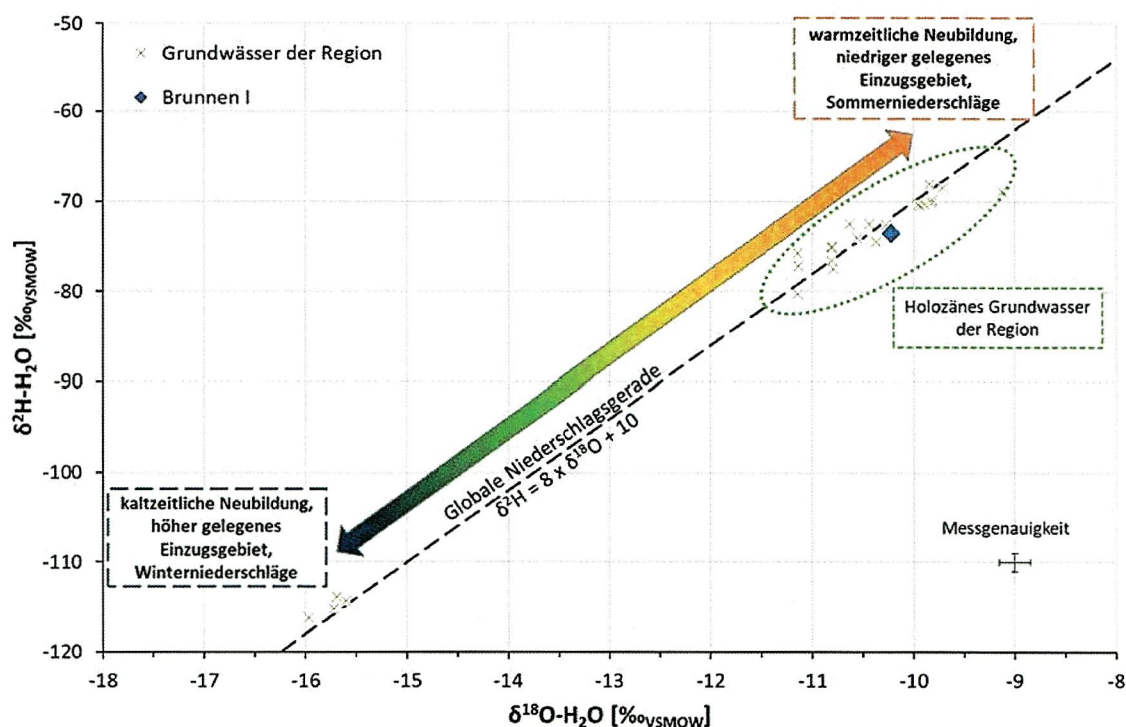


Abbildung 2 Gemeinsame Darstellung der stabilen Wasserisotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$. Mit dargestellt ist die mittlere globale Niederschlagsgerade sowie weitere Grundwässer der Region.

4 Tritium in Kombination mit Schwefelhexafluorid

4.1 Grundlagen der Methodik

Tritium (^3H) ist das radioaktive Isotop des Wasserstoffs (Halbwertszeit circa 12,3 Jahre). Tritium wird beständig in der Atmosphäre durch die Einwirkung von kosmischer Strahlung auf Stickstoffatome erzeugt. Gemessen werden Tritiumkonzentrationen in TU (tritium units). Der hierdurch entstehende ^3H -Gehalt der Niederschläge beträgt etwa 5 TU. Heute in der Hydrosphäre vorhandenes Tritium ist jedoch zum größten Teil aus Kernwaffenversuchen seit 1953 entstanden. Stiegen die Tritiumgehalte in den Niederschlägen von 1953 bis etwa 1963 auf mehr als das Tausendfache der natürlichen Konzentration an, so fallen die Konzentrationen im Niederschlag aufgrund der Einstellung der oberirdischen Kernwaffenversuche seit dieser Zeit kontinuierlich. Die aktuellen Niederschläge weisen als Spätfolge dieser und jüngerer Tests noch saisonal variierende Tritiumgehalte von etwa 5-12 TU mit stetig abnehmender Tendenz auf. Grundwässer, in denen Tritium nicht nachweisbar ist, enthalten keine Niederschlagsanteile aus dem Zeitraum nach 1953.

Das Tritium gelangt mit den Niederschlägen zur Erdoberfläche und dringt von dort mit dem Sickerwasser ins Grundwasser. Nachdem der tritiumhaltige Niederschlag in den Grundwasserleiter eingedrungen ist, nimmt der Tritiumgehalt des so neugebildeten Grundwassers im einfachsten Fall lediglich durch den radioaktiven Zerfall weiter ab.

Schwefelhexafluorid (SF_6) ist ein Spurengas, das seit ca. 60 Jahren zunehmend in die Atmosphäre gelangt. Der Stoff wird vor allem für den Einsatz von elektrischen

Hochspannungsschaltern, zur Schallschutzdämmung und zur Befüllung von Reifen verwendet. Er ist in der Atmosphäre sehr stabil. Im Vergleich mit Tritium, dessen Konzentrationen in der Atmosphäre und im Grundwasser kontinuierlich abnehmen, ist der SF_6 -Gehalt kontinuierlich ansteigend. Das gasförmige SF_6 löst sich im Niederschlagswasser bzw. Sickerwasser (Tritium ist dagegen im Wassermolekül enthalten) und gelangt bei der Neubildung in das Grundwasser. Dort kann die gemessene SF_6 -Konzentration zur Altersbestimmung herangezogen werden. Die Konzentrationen von SF_6 werden in fmol/l (femtomol/l (10^{-15} mol/l)) angegeben. Aktuell neu gebildete Grundwässer weisen, je nach Neubildungstemperatur und mittlerer Einzugsgebietshöhe, SF_6 -Gehalte von etwa 4 bis 5 fmol/l auf.

Durch die Verwendung zweier unabhängiger Datierungstracer Tritium und Schwefelhexafluorid (SF_6) ist es möglich, die Zumischung von alten tritium- und spurengasfreien Grundwasserkomponenten zu erkennen. Zur Beschreibung von komplexeren Mischungsvorgängen verschieden alter, tritiumhaltiger Grundwasserkomponenten, wie sie z.B. durch die Grundwasserentnahme in Brunnen induziert werden, können hydrologische Fließmodelle (z.B. Piston-Flow-Modell, Exponentialmodell oder Dispersionsmodell) angewandt werden, um die Verweilzeit des Grundwassers zu bestimmen. Bei der Modellrechnung hat sich eine Kombination dieser beiden Modelle, das sogenannte EPM-Modell (Exponential-Piston-Flow-Modell), bereits vielfach in der hydrogeologischen Praxis bewährt und gibt somit Aufschluss über die Geschütztheit des Entnahmebrunnens bzw. des erschlossenen Grundwasserreservoirs. Eine grafische Übersicht der Anwendbarkeit der unterschiedlichen Modelle und deren mathematischen Beschreibung in Abhängigkeit der hydrogeologischen Gegebenheiten ist in Anlage 1 aufgeführt.

Sowohl der Anteil als auch die mittlere Verweilzeit (MVZ) der Jungwasserkomponente können graphisch in sogenannten Harfendiagrammen bestimmt werden. Dabei werden die zu erwartenden Konzentrationen beider Datierungstracer für verschiedene Verweilzeiten von 1 bis 70 Jahren berechnet und gegeneinander aufgetragen. Der äußerste Linienzug repräsentiert die sich für die verschiedenen Verweilzeiten ergebenden Gehalte der Datierungstracer. Grundwasser, welches nur aus einer Komponente besteht, kommt auf dieser Linie zu liegen. Ein tritiumfreies Grundwasser (älter als 70 Jahre) liegt auf dem Nullpunkt des Diagramms. Die Zumischung von alten tritium- und spurengasfreien Grundwasserkomponenten kann durch die Kombination erkannt werden.

Die Berechnungen der Harfen basieren auf bekannten Zeitreihen von Tritium- und Spurengasgehalten im Niederschlag bzw. in der Atmosphäre aus Niederschlags- und Atmosphären-Messstationen. Die Inputdaten für SF_6 werden hierbei für die mittlere Infiltrationshöhe des Untersuchungsgebietes sowie der Jahresdurchschnitts-temperatur angepasst.

Atmosphärische Überhöhungen von SF_6 -Gasen können, wie bei allen Gastracern, durch Kontakt des Grundwassers mit der Atmosphäre auftreten. Dies kann dazu führen, dass der Gasgehalt überschätzt wird und das Grundwasser zu „jung“ erscheint. Bei SF_6 sind anthropogene Überhöhungen selten und meist auf Deponiesickerwässer oder auch Umspannwerke zurückzuführen. Geogene Überhöhungen sind bei fluoridreichen Kristallingesteinen bekannt.

In manchen Fällen kann eine Grundwasserprobe auch rechts bzw. oberhalb der berechneten Linie der Kurven zum Liegen kommen. Dieses Phänomen wird bei jungen Grundwässern häufig durch den unterschiedlichen Eintragsmechanismus hervorgerufen: Tritium gibt die mittlere Grundwasserverweilzeit des Grundwassers in der ungesättigten Bodenzone und im Grundwasserleiter an, während die Spurengase wie SF_6 nur die Grundwasserverweilzeit im Untergrund angeben. Dieser Fall tritt z.B. häufig in Karstgebieten mit einem großen Grundwasserflurabstand auf.

4.2 Ergebnisse mit Interpretation

Der Tritiumgehalt der untersuchten Probe aus dem Brunnen I ist mit $6,3 \pm 0,7$ TU relativ hoch. Der Gehalt an Schwefelhexafluorid (SF_6) ist mit $3,70 \pm 0,40$ fmol/l ebenfalls deutlich nachweisbar. Damit liegen beide Jungwassertracer in einem typischen Wertebereich für junge Grundwässer (< 70 Jahre). Dies steht in Einklang mit der hydrochemischen Beschaffenheit und der stabilen Wasserisotopensignatur der untersuchten Probe Brunnen I.

Da bei der Modellierung Annahmen über die Bildungsbedingungen getroffen werden müssen und die mittlere Einzugsgebietshöhe sowie Bildungstemperaturen im Alpenvorland nur grob abgeschätzt werden können, sind in der gemeinsamen Harfendarstellung von Tritium und SF_6 zwei verschiedene Modellierungen mit unterschiedlichen Eingangsparametersätzen dargestellt. Die Berechnungen beider Harfen basieren auf der bekannten Zeitreihe der Tritium-Gehalte im Niederschlag (Station Kufstein). Für die Inputberechnung für Schwefelhexafluorid (SF_6) wurde in der ersten Modellierung eine mittlere Einzugsgebietshöhe von 650 m ü. NN und eine mittlere Neubildungstemperatur von 8 °C verwendet, die beide repräsentativ für den Ort Bad Feilnbach sind. In der zweiten Modellierung wurde ein etwas höher gelegenes Einzugsgebiet im Süden von Bad Feilnbach, entsprechend der Grundwasserfließrichtung Süd-Südwest nach Nord-Nordost, mit einer mittleren Höhe von 800 m ü. NN und einer etwas niedrigeren mittleren Neubildungstemperatur von 7,5 °C gewählt. Es wurden insgesamt drei hydrologische Modelle gerechnet, ein EMM-, ein EPM 90- und ein DM-Modell, um alle möglichen örtlichen hydrogeologischen und geologischen Gegebenheiten abzubilden (siehe Abschnitt 1). Mit den EPM 90- und DM-Modellen können auch vertikale Infiltrationsanteile durch die geringdurchlässigen Tonschichten berücksichtigt werden. Die Grundlagen dazu sind dem Abschnitt 4.1 und der Anlage 1 zu entnehmen. Die Ergebnisse der berechneten mittleren Verweilzeiten und die Anteile von Fließkomponenten mit Verweilzeiten von jeweils weniger als 10 und 5 Jahren sind in Tabelle 1 dargestellt.

Das reine EMM-Modell, das eine flächenhafte Grundwasserneubildung in ungespannten Grundwasserleitern voraussetzt, liefert nach Interpretation der Harfen (Abbildung 3) ein mathematisch plausibles Ergebnis. Da das Messwertepaar außerhalb der Harfen liegt, aber im Rahmen der Messunsicherheit innerhalb der Harfen zu liegen kommt, bestätigt sich, dass das Grundwasser einen sehr hohen Anteil von Jungwasser mit geringen mittleren Verweilzeiten besitzt. Da dieses Modell aber die hydrogeologischen Gegebenheiten durch die deckende Tonschicht und gespannten Grundwasserverhältnisse in Bad Feilnbach eigentlich nicht abbilden kann, wurde zusätzlich ein EPM 90-Modell, also eine Reihenschaltung von 90 % Exponentialmodell (EM) und 10 % Piston-Flow-Modell (PFM) verwendet. Das EPM 90 beschreibt damit sowohl den Grundwasseranteil in der untersuchten Probe aus der (flächigen) Grundwasserneubildung, als auch den Anteil, der bei der anschließenden Migration im gespannten Grundwasserleiter, in dem keine Neubildung stattfindet, fließt. Da

eine Erhöhung des PFM-Anteils, und somit ein höherer Anteil der Grundwassermigration unter gespannten Verhältnissen, zu einer deutlichen Verschlechterung der Modellierungsergebnisse geführt hat, kann daraus geschlossen werden, dass der Grundwasseranteil mit einer Migration im (überwiegend gespannten) Grundwasserleiter ohne Neubildung sowie die Infiltration durch die tonigen Deckschichten relativ gering ist. Von daher wurde als dritte Möglichkeit ein Dispersionsmodell (DM) gerechnet, das in (halb-)gespannten Grundwasserleitern anwendbar ist und ebenfalls sehr plausible Ergebnisse liefert, da das Messwertepaar vor allem bei einer mittleren Einzugsgebietshöhe von 800 m und 7,5 °C Neubildungstemperatur sehr nahe der Harfe zu liegen kommt. Allerdings kann dieses Modell aufgrund der Annahme des Dispersionsparameters P_D von 0,5 auch nur eine grobe Näherung darstellen.

Aus der Kombination des gemessenen Tritium- und Schwefelhexafluoridgehaltes wird demnach über alle berechneten Modelle EMM, EPM 90 und DM ein sehr hoher Anteil von Jungwasser, der über 80 bis zu 100 % liegt, bestimmt. Unter Berücksichtigung aller Modelle, die ein fast identisches Ergebnis liefern, liegt die mittlere Verweilzeit der Jungwasserkomponente zwischen ca. 8 und 16 Jahren. Ein Anteil von Grundwässern mit mittleren Verweilzeiten unter 10 Jahren in der Probe aus Brunnen I ist demnach sehr hoch und liegt modelliert, je nach mittlerer Verweildauer und betrachtetem Modell, zwischen ca. 46 und 74 % (Tabelle 1). Schnell abfließende Jüngstwasserkomponenten mit Verweilzeiten von < 5 Jahre, deren modellierten Anteile zwischen ca. 20 und 46 % liegen, sind anhand der Grundwasseraltersstruktur ebenfalls noch nennenswert erhöht.

Anhand der Ergebnisse der drei verwendeten Modelle, die in jeweils sehr ähnliche Jungwasseranteile und mittlere Verweilzeiten resultieren, können Rückschlüsse auf die hydrogeologischen Gegebenheiten im Anstrom zum Brunnen I in Bad Feilnbach und der Grundwasserneubildung gezogen werden. Da das Grundwasser unter gespannten Verhältnissen erschlossen wurde, eine Erhöhung des PFM-Anteils im EPM allerdings zu einer Verschlechterung der Modellierungsergebnisse geführt hat, kann abgeleitet werden, dass ein hoher Grundwasserumsatz im ungespannten Grundwasserleiter vorhanden ist. Das steht im Einklang damit, dass die Grundwasserneubildung des Wasserschutzgebietes wohlmöglich nahebei südlich stattfindet, da die allgemeine Grundwasserfließrichtung mit verhältnismäßig geringen Potentialunterschieden von Süd-Südwest nach Nord-Nordost gerichtet ist (vgl. Lageplan mit Grundwassermessstellen, Brunnen und Grundwassergleichen v. Crystal Geotechnik 29.01.2021). An GWM 20/02 (Geologischer Schnitt C-C' v. Crystal Geotechnik 22.06.2020) ist die schützende Tonschicht bereits ausgekeilt, sodass dort eine relativ schnelle Infiltration möglich wäre. Die hohen gemessenen Sauerstoffgehalte um die 5 mg/l, die ebenfalls einen geringen Anteil von Grundwasserneubildung über die mächtigen Tone im Hangenden implizieren, stützen diese Überlegungen, die auch einen möglichen Einfluss von versickernden Fließgewässern, wie dem Feilnbach in dieser Region, andeuten könnten.

Tabelle 1 Übersicht der Anteile von Wasserkomponenten < 10 und < 5 Jahre mit mittleren Verweilzeiten zwischen 9 und 15 Jahren.

Modell	EMM		EPM 90		DM 0,5	
Mittlere Verweilzeit	8a	16a	8a	15a	8a	15a
Anteil Verweilzeit < 10a	71%	46%	72%	47%	74%	49%
Anteil Verweilzeit < 5a	46%	28%	44%	23%	45%	20%

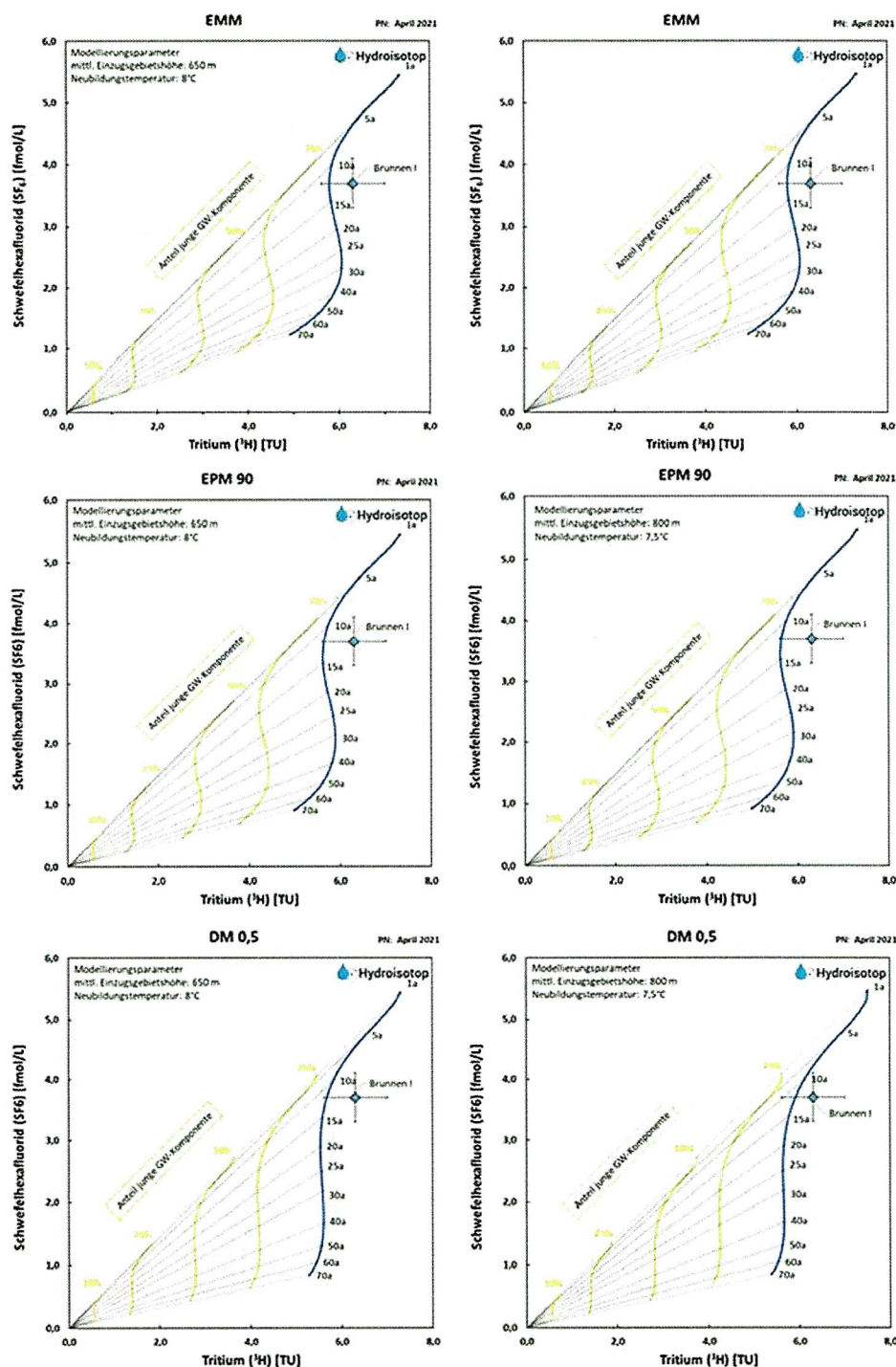


Abbildung 3 Gemeinsame Darstellung der Tritium- und der SF_6 -Gehalte der Grundwasserprobe aus dem Brunnen I in Bad Feilnbach für die Probenahme im April 2021. Die blaue Linie kennzeichnet die für ein junges Grundwasser zu erwartenden ^3H - und SF_6 -Gehalte, wobei die genaue Position auf der Linie von der mittleren Verweilzeit des Grundwassers abhängt. Die Linie wurde auf Basis eines reinen EMM-Modells, einer EPM 90-Kombination aus EMM (90 %) und PFM (10 %) und DM-Modell (P_D 0,5) berechnet. Die Spurengasgehalte wurden für eine Höhenlage des Neubildungsgebietes von rund 650 und 800 m NN sowie einer Jahresdurchschnittstemperatur von 7,5 und 8,0 °C angepasst.

Insgesamt erweist sich die Kombination der beiden Jungwassertracer Tritium und Schwefelhexafluorid (SF_6) sehr geeignet für die Bestimmung der Grundwasseraltersstruktur am Brunnen I. Unter Berücksichtigung der in den letzten Jahren gemessenen relativ hohen Sauerstoffgehalte im Brunnen kann allerdings ein Einfluss einer Luftübersättigung bei der Bestimmung des SF_6 -Gehaltes nicht ausgeschlossen werden. Unter der Annahme eines möglichen Einflusses durch Infiltration von Oberflächengewässern, wie z.B. dem Feilnbach, könnte ein Luftüberschuss von 20 bis 30 % im Grundwasser vorherrschen. Dies würde eine Überhöhung des gemessenen SF_6 Gehaltes implizieren und somit nach Korrektur zu einer nennenswerten Herabsenkung der mittleren Verweilzeiten des Grundwassers am Brunnen I in Bad Feilnbach führen. Somit wäre die hier bestimmte mittlere Verweilzeit der Jungwasserkomponente sowie die hohen Anteile der Grundwasserfraktionen mit mittleren Verweilzeiten < 10 und < 5 Jahre deutlich überschätzt.

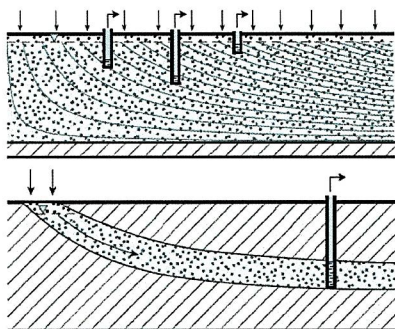
Da eine mittlere Verweilzeit < 10 Jahren in der Grundwasserprobe allerdings anhand der hier untersuchten Isotopenparameter nicht ausgeschlossen werden kann und die modellierten Anteile von Jüngstwasserkomponenten (< 5 Jahre) in dieser Betrachtung zwischen 20 und 46 % liegen, könnte man zusätzlich noch einen weiteren Jungwassertracer in Kombination mit Tritium und SF_6 , z.B. ^{85}Kr , einsetzen, um die Ergebnisse dieser Untersuchung zu bestätigen. Zudem wäre es ratsam, für einen gewissen Zeitraum eine Zeitreihe der stabilen Wasserisotopen in wöchentlichen Abständen zu erstellen, anhand derer dann ein möglicher Einfluss von schnell abfließenden Sommer- oder Winterniederschlägen in der Altersstruktur am Brunnen I und somit Veränderungen durch Grundwasserkomponenten mit Verweilzeiten $< 3-5$ Jahre abgeschätzt werden könnten.

5 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der hydrochemischen, isotopehydrologischen und gasphysikalischen Untersuchungen in der untersuchten Grundwasserprobe aus dem Brunnen I in Bad Feilnbach zusammengefasst:

- Die hydrochemische Analyse der Probe aus Brunnen I weist das Grundwasser als Ca-Mg-HCO_3 Typ aus, welcher typisch für lokal und rezent gebildete Grundwässer ohne großen Ionenaustausch von Natrium gegenüber Calcium und Magnesium ist. Die Nitrat- und Chloridgehalte sind relativ gering und lassen auf keine nennenswerten Einflüsse von anthropogenen Tätigkeiten, z.B. Düngemittel schließen.
- Die stabilen Wasserisotopensignaturen weisen auf meteorische, warmzeitliche Grundwasserneubildungsbedingungen in der untersuchten Probe hin, die typisch für lokale Grundwässer sind.
- Auf Grundlage der Gehalte von Tritium und Schwefelhexafluorid (SF_6) in der untersuchten Probe aus Brunnen I wird ein hoher Anteil von über 80 % von einem jungen Grundwasseranteil abgeleitet. Die mittlere Verweildauer dieses jungen Grundwassers liegt zwischen ca. 8 und 16 Jahren, sodass eine Neubildung von Jungwasserkomponenten mit mittleren Verweilzeiten unter 10 Jahren, die modelliert je nach Modell zwischen 46 und 71 % liegen, nicht ausgeschlossen werden können.

Piston-flow Model (PFM)



$$PFM_{g(t-t')} = \delta(t-t' - \tau_s)$$

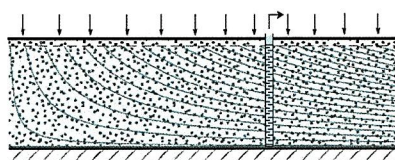
where

δ is Dirac delta function.

$$C_{out}(t) = C_{in}(t - \tau_s) e^{(-\lambda - \tau_s)}$$

for $t = \tau_s$; 0 for $t \neq \tau_s$

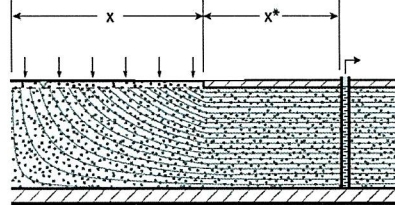
Exponential Mixing Model (EMM)



$$EMM_{g(t-t')} = \frac{1}{\tau_s} e^{\left(\frac{t-t'}{\tau_s}\right)}$$

$$C_{out}(t) = \sum_{t'=-\infty}^{t-\Delta t} C_{in}(t') \frac{1}{\tau_s} \frac{1}{\frac{1}{\tau_s} + \lambda} \left[e^{\left[-\left(\frac{1}{\tau_s} + \lambda\right)(t-t'-\Delta t)\right]} - e^{\left[-\left(\frac{1}{\tau_s} + \lambda\right)(t-t')\right]} \right]$$

Exponential Piston-Flow Model (EPM)



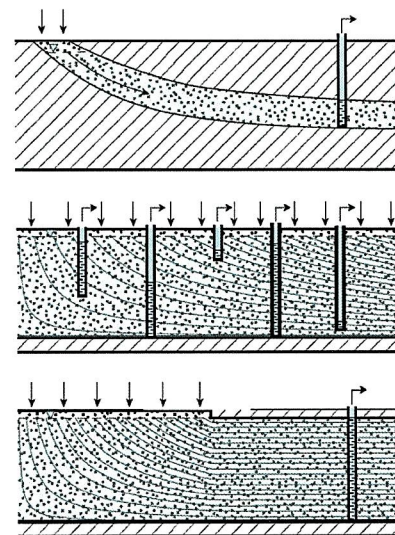
$$EPM_{g(t-t')} = \frac{n}{\tau_s} e^{\left[-\frac{n(t-t')}{\tau_s} + n - 1\right]}, \text{ for } t \geq \tau_s \left(1 - \frac{1}{n}\right); 0$$

where

$$n \text{ is } \frac{\text{total volume}}{\text{exponential volume}} = \frac{x^* + x}{x} = \frac{x^*}{x} + 1$$

= EPM ratio + 1

Dispersion Model (DM)



$$DM_{g(t-t')} = \frac{1}{\tau_s} \frac{1}{\sqrt{4\pi DP \frac{t-t'}{\tau_s}}} e^{\left(\frac{1-t-t'}{\tau_s}\right)^2 \frac{(-4DP \frac{t-t'}{\tau_s})}{\tau_s}}$$

where

$$DP = \text{dispersion parameter} = \frac{\text{Dispersion coefficient}(D)}{vx}$$

$$C_{out}(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi DP}} e^{\left(\frac{1}{2DP}\right)} \sum_{t'=-\infty}^{t-\Delta t} C_{in}(t') \int_{x_2}^{x_1} x^{\frac{3}{2}} e^{\left(-ax - \frac{b}{x}\right)} dx$$

where

$$a = \lambda \tau_s + \frac{1}{4DP}, \quad x = \frac{t-t'}{\tau_s}, \quad x_2 = \frac{t-t'-\Delta t}{\tau_s}$$

$$b = \frac{1}{4DP}, \quad x_1 = \frac{t-t'}{\tau_s}$$

Anlage 1 Übersicht der unterschiedlichen Fließmodelle mit mathematischer Beschreibung zur Modellierung der Grundwasseraltersstruktur und mittleren Verweilzeit (aus JURGENS et al. (2012))¹

¹ Jurgens, B.C., Böhlke, J.K., and Eberts, S.M., 2012, TracerLPM (Version 1): An Excel® workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Bericht 4-F3, 60 S.



Hydroisotop GmbH · Woelkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

Gemeinde Bad Feilnbach
Rathausplatz 1

83075 Bad Feilnbach

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 11.05.2021
Mr / CG

Prüfbericht Nr. 360249**Blatt 1 von 5**

Probenbezeichnung: **Brunnen I**

Projekt:	Auftrag Fe-6420.00; 8631.72 (H195083) Bad Feilnbach, Überarbeitung WSG Brunnen I + II		
Auftraggeber:	Gemeinde Bad Feilnbach		
Auftrag:	146-2021 / CG		
Labor-Nr.:	360249	Probenart:	flüssig
Probenahmedatum:	06.04.2021, 13:15	Probenahme:	Crystal Geotechnik
Laboreingang:	08.04.2021	Analytikbeginn:	08.04.2021
		Analytikende:	10.05.2021

Prüfparameter	Prüfergebnis	Einheit
PHYSIKALISCH-CHEMISCHE PARAMETER		
spez. el. Leitfähigkeit (25°C) Labor	812	µS/cm
pH Wert (24,5°C) Labor	7,1	
Sk-Wert (pH 4,3) Labor	7,38	mmol/l
KATIONEN		
Natrium (Na ⁺)	12	mg/l
Kalium (K ⁺)	6,8	mg/l

Hydroisotop GmbH
Woelkestraße 9
D-85301 Schweitenkirchen
Tel. +49 (0)8444 9289 0
Fax +49 (0)8444 9289 29
info@Hydroisotop.de
www.Hydroisotop.de

Geschäftsführer
Dr. Lorenz Eichinger, Dr. Florian Eichinger
Amtsgericht Ingolstadt
HRB Nr. 190 354
VAT Nr. DE 128 953 441
St.-Nr. 124/128/90025
Zoll-Nr. DE 3063 496

Sparkasse Pfaffenhofen / Ilm
IBAN: DE20 7215 1650 0008 1123 28
BIC: BYLADEM1PAF

Raiffeisenbank Schweitenkirchen
IBAN: DE55 7216 0818 0001 3693 00
BIC: GENODEFIINP

Prüfbericht Nr. 360249**Blatt 2 von 5**Probenbezeichnung: **Brunnen I**

Projekt:	Auftrag Fe-6420.00; 8631.72 (H195083) Bad Feilnbach,		
	Überarbeitung WSG Brunnen I + II		
Auftraggeber:	Gemeinde Bad Feilnbach		
Auftrag:	146-2021 / CG		
Labor-Nr.:	360249	Probenart:	flüssig
Probenahmedatum:	06.04.2021, 13:15	Probenahme:	Crystal Geotechnik
Laboreingang:	08.04.2021	Analytikbeginn:	08.04.2021
		Analytikende:	10.05.2021

Prüfparameter	Prüfergebnis	Einheit
KATIONEN		
Calcium (Ca ²⁺)	120	mg/l
Magnesium (Mg ²⁺)	21	mg/l
Ammonium (NH ₄ ⁺)	< 0,05	mg/l
ANIONEN		
Hydrogenkarbonat (HCO ₃ ⁻)	450	mg/l
Chlorid (Cl ⁻)	30	mg/l
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	16	mg/l
Nitrat (NO ₃ ⁻)	12	mg/l
Nitrit (NO ₂ ⁻)	< 0,01	mg/l
IONENBILANZ		
Ionenbilanzfehler	1,99	%
METALLE		
Eisen ges.	0,15	mg/l
Mangan ges.	0,01	mg/l
SUMMEN- UND EINZELPARAMETER		
Gesamthärte berechnet	3,95	mmol/l
Gesamthärte berechnet	22,2	°dH

Prüfbericht Nr. 360249**Blatt 3 von 5**

 Probenbezeichnung: **Brunnen I**

Projekt:	Auftrag Fe-6420.00; 8631.72 (H195083) Bad Feilnbach, Überarbeitung WSG Brunnen I + II		
Auftraggeber:	Gemeinde Bad Feilnbach		
Auftrag:	146-2021 / CG		
Labor-Nr.:	360249	Probenart:	flüssig
Probenahmedatum:	06.04.2021, 13:15	Probenahme:	Crystal Geotechnik
Laboreingang:	08.04.2021	Analytikbeginn:	08.04.2021
		Analytikende:	10.05.2021

Prüfparameter	Prüfergebnis	Einheit	
SPURENGASE			
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	3,7 ± 0,4	fmol/l	*
ISOTOPE			
Sauerstoff-18 (δ ¹⁸ O)	-10,22	‰	
Deuterium (δ ² H)	-73,5	‰	
Deuterium-Exzess	8,26	‰	
Tritium (³ H)	6,3 ± 0,7	TU	

Prüfbericht Nr. 360249

Blatt 4 von 5

Projekt: Auftrag Fe-6420.00; 8631.72 (H195083) Bad Feilnbach,
Überarbeitung WSG Brunnen I + II

Auftraggeber: Gemeinde Bad Feilnbach

Prüfparameter	Prüfverfahren
Tritium (^3H)	QMA 504-2/1: 2011-09; Flüssigkeitsszintillationsspektrometrie (LSC) nach elektrolytischer Anreicherung, gemessen in Tritiumeinheiten (TU) mit zweifacher Standardabweichung (1 TU = 0,119 Bq/L); Ergebnis bezogen auf Messdatum (keine Halbwertszeitkorrektur)
pH Wert Labor	DIN EN ISO 10523 (C5): 2012-04
Temperatur	DIN 38404-C4: 1976-12
spez. el. Leitfähigkeit (25°C) Labor	DIN EN 27888 (C8):1993-11
Sk-Wert (pH 4,3) Labor	DIN 38409-H7:2005-12
Natrium (Na^+)	DIN EN ISO 14911 (E34): 1999-12
Kalium (K^+)	DIN EN ISO 14911 (E34): 1999-12
Calcium (Ca^{2+})	DIN EN ISO 14911 (E34): 1999-12
Magnesium (Mg^{2+})	DIN EN ISO 14911 (E34): 1999-12
Ammonium (NH_4^+)	Merck Spectroquant 1.14752: 2013-12
Hydrogenkarbonat (HCO_3^-)	berechnet über SK-Wert
Chlorid (Cl^-)	DIN EN ISO 10304-1 (D20): 2009-07
Sulfat (SO_4^{2-})	DIN EN ISO 10304-1 (D20): 2009-07
Nitrat (NO_3^-)	DIN EN ISO 10304-1 (D20): 2009-07
Nitrit (NO_2^-)	Merck Spectroquant 1.14776: 2017-01
Ionenbilanzfehler	berechnet
Mangan ges.	Merck Spectroquant 1.14770: 2017-02
Eisen ges.	Merck Spectroquant 1.14761: 2017-01
Deuterium-Exzess	berechnet
Gesamthärte berechnet	berechnet
Schwefelhexafluorid (SF_6)	Gaschromatographie GC-ECD *
Deuterium ($\delta^2\text{H}$)	QMA 504-2/23: 2012-02; Cavity-Ringdown-Spektrometrie (CRDS); bezogen auf VSMOW-Std.: $1\sigma = \pm 1,5 \text{ ‰}$
Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$)	QMA 504-2/23: 2012-02; Cavity-Ringdown-Spektrometrie (CRDS); bezogen auf VSMOW-Std.: $1\sigma = \pm 0,15 \text{ ‰}$

Prüfbericht Nr. 360249**Blatt 5 von 5**

Projekt: Auftrag Fe-6420.00; 8631.72 (H195083) Bad Feilnbach,
Überarbeitung WSG Brunnen I + II

Auftraggeber: Gemeinde Bad Feilnbach

Legende

*	Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
n.b.	nicht bestimmt, Konzentration zu gering
<	für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
-	nicht beauftragt
x	qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.

Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.

Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.


Dr. Eichinger
(Geschäftsführer)
11.05.2021