

**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWEERTES
ÖSTERREICH**

bmlfuw.gv.at

**GRUNDWASSERALTER
2015–2017
AUSGEWÄHLTE
GRUNDWASSERKÖRPER**

IMPRESSUM



Medieninhaber und Herausgeber:
BUNDESMINISTERIUM
FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT,
UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT
Stubenring 1, 1010 Wien
www.bmlfuw.gv.at

Projektkoordination: R. Philippitsch (BMLFUW); J. Grath und F. Humer (Umweltbundesamt)

Text und Redaktion: H. Brielmann, U. Wemhöner, C. Schartner, F. Humer

Gestaltung: E. Stadler

Bildnachweis: Rudolf Philippitsch: Preberkessel bei Tamsweg (Titelseite), Karstgestein (S. 22), Enzian (S. 39), Garnitzenklamm (S. 57), Winterimpression (S. 78); Elisabeth Stadler: Salzabach (S. 44); H. Schreiner (S. 23): Luftbild aus dem Machland; Archiv Presseabteilung/Land Oberösterreich (S. 33): Luftbild Welser Heide; Franz Goldschmidt (S. 46): Drautal; coopNATURA, Seite Land Oberösterreich (S. 59): Flyschzone; Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abt. Raumplanung (S. 70): Pfänder; www.region-dreiklang.at (S. 80): Düns; Gemeinde Mittelberg (S. 81): Mittelberg
Gestaltungskonzept: WIEN NORD Werbeagentur

Alle Rechte vorbehalten.
Wien, September. 2017

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM.....	2
1 EINLEITUNG.....	8
2 METHODIK.....	10
2.1 MITTLERE VERWEILZEIT.....	10
2.2 BESTIMMUNG VON MITTLEREN GRUNDWASSERVERWEILZEITEN.....	12
2.3 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM (² H).....	13
2.4 TRITIUM (³ H).....	16
2.5 TRITIUM/HELIUM-3.....	18
2.6 UMFANG UND ART DER UNTERSUCHUNGEN.....	21
3 MACHLAND [DUJ].....	23
3.1 ÜBERBLICK.....	23
3.2 ERGEBNISSE.....	25
3.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM.....	25
3.2.2 TRITIUM/HELIUM-3.....	26
3.3 DISKUSSION - ERGEBNIS.....	28
4 WELSER HEIDE [DUJ].....	33
4.1 ÜBERBLICK.....	33
4.2 ERGEBNISSE.....	35
4.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM.....	35
4.3 DISKUSSION - ERGEBNIS.....	38
5 DRAUTAL [DRA] (KÄRNTNER ANTEIL).....	46
5.1 ÜBERBLICK.....	46
5.2 ERGEBNISSE.....	48
5.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM.....	48
5.2.2 TRITIUM/HELIUM-3.....	49
5.3 DISKUSSION - ERGEBNIS.....	51
6 FLYSCHZONE [DUJ].....	59
6.1 ÜBERBLICK.....	59
6.2 ERGEBNISSE.....	62
6.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM.....	62
6.2.2 TRITIUM/HELIUM-3.....	63
6.3 DISKUSSION - ERGEBNIS.....	64
7 MOLASSE UND NÖRDLICHE FLYSCHZONE [RHE].....	70
7.1 ÜBERBLICK.....	70
7.2 ERGEBNISSE.....	72
7.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM.....	72
7.2.2 TRITIUM/HELIUM-3.....	72
7.3 DISKUSSION - ERGEBNIS.....	74
8 SÜDLICHE FLYSCHZONE [RHE] UND SÜDLICHE FLYSCHZONE [DBJ].....	78
8.1 ÜBERBLICK.....	80
8.1.1 SÜDLICHE FLYSCHZONE [RHE].....	80
8.1.2 SÜDLICHE FLYSCHZONE [DBJ].....	81
8.2 ERGEBNISSE.....	82

8.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM	82
8.2.2 TRITIUM/HELIUM-3	83
8.3 DISKUSSION -ERGEBNIS	84
9 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	88
10 LITERATURVERZEICHNIS	90
10.1 ALLGEMEIN.....	90
10.2 MACHLAND [DUJ].....	91
10.3 WELSER HEIDE [DUJ].....	91
10.4 DRAUTAL [DRA].....	91
10.5 FLYSCHZONE [DUJ].....	92
11 KONTAKTINFORMATIONEN ZU DEN AUTORINNEN	93
12 ANHANG: GEBIETSBESCHREIBUNGEN	94
12.1 MACHLAND [DUJ].....	94
12.1.1 ALLGEMEINES	94
12.1.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	95
12.1.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	96
12.1.3.1 Bodentypen	96
12.1.3.2 Deckschicht und Flurabstand	96
12.1.4 GRUNDWASSERLEITER	96
12.1.4.1 Druckverhältnisse.....	96
12.1.4.2 Aquifermächtigkeit	96
12.1.4.3 Grundwasserstauer	96
12.1.4.4 Mächtigkeiten des Grundwasserkörpers	96
12.1.4.5 Petrographie des Grundwasserleiters	97
12.1.4.6 Grundwasserabflussrichtungen	97
12.1.4.7 Hydraulische Leitfähigkeit und Abstandsgeschwindigkeiten	97
12.1.5 GRUNDWASSERBILANZ	97
12.1.5.1 Niederschlag.....	97
12.1.5.2 Interaktionen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser	97
12.1.5.3 Grundwasserneubildung.....	97
12.1.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	97
12.1.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	98
12.1.8 LITERATUR	100
12.2 WELSER HEIDE [DUJ].....	100
12.2.1 ALLGEMEINES	100
12.2.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	101
12.2.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	102
12.2.3.1 Bodentypen	102
12.2.3.2 Deckschicht und Flurabstand	102
12.2.4 GRUNDWASSERLEITER	102
12.2.4.1 Druckverhältnisse.....	102
12.2.4.2 Aquifermächtigkeit	102
12.2.4.3 Grundwasserstauer	102
12.2.4.4 Mächtigkeiten des Grundwasserkörpers	103
12.2.4.5 Petrographie des Grundwasserleiters	103
12.2.4.6 Grundwasserabflussrichtungen	103
12.2.4.7 Hydraulische Leitfähigkeit.....	103
12.2.5 GRUNDWASSERBILANZ	104
12.2.5.1 Niederschlag.....	104
12.2.5.2 Interaktionen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser	104
12.2.5.3 Grundwasserneubildung.....	104
12.2.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	104
12.2.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	104

12.2.8 LITERATUR	106
12.3 DRAUTAL [DRA].....	106
12.3.1 ALLGEMEINES	106
12.3.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	107
12.3.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	108
12.3.3.1 Bodentypen	108
12.3.3.2 Deckschicht und Flurabstand	108
12.3.4 GRUNDWASSERLEITER	108
12.3.4.1 Druckverhältnisse.....	108
12.3.4.2 Aquifermächtigkeit	108
12.3.4.3 Grundwasserstauer	108
12.3.4.4 Mächtigkeiten des Grundwasserkörpers	108
12.3.4.5 Petrographie des Grundwasserleiters	109
12.3.4.6 Grundwasserabflussrichtungen	109
12.3.4.7 Hydraulische Leitfähigkeit.....	109
12.3.5 GRUNDWASSERBILANZ	109
12.3.5.1 Niederschlag.....	109
12.3.5.2 Interaktionen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser	109
12.3.5.3 Grundwasserneubildung.....	110
12.3.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	110
12.3.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	110
12.3.8 LITERATUR	112
12.4 FLYSCHZONE [DUJ].....	112
12.4.1 ALLGEMEINES	112
12.4.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	114
12.4.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	115
12.4.3.1 Bodentypen	115
12.4.3.2 Deckschicht und Flurabstand	115
12.4.4 GRUNDWASSERLEITER	115
12.4.4.1 Druckverhältnisse.....	115
12.4.4.2 Aquifermächtigkeit	115
12.4.4.3 Grundwasserstauer	115
12.4.4.4 Mächtigkeiten des Grundwasserkörpers	115
12.4.4.5 Petrographie des Grundwasserleiters	116
12.4.4.6 Hydraulische Leitfähigkeit.....	116
12.4.5 GRUNDWASSERBILANZ	116
12.4.5.1 Niederschlag.....	116
12.4.5.2 Interaktionen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser	116
12.4.5.3 Grundwasserneubildung.....	116
12.4.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	116
12.4.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	117
12.4.8 LITERATUR	120
12.5 MOLASSE UND NÖRDLICHE FLYSCHZONE [RHE]	120
12.5.1 ALLGEMEINES	120
12.5.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	121
12.5.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	122
12.5.3.1 Bodentypen	122
12.5.3.2 Deckschicht und Flurabstand	122
12.5.4 GRUNDWASSERLEITER	122
12.5.4.1 Druckverhältnisse.....	122
12.5.4.2 Grundwasserstauer	122
12.5.4.3 Petrographie des Grundwasserleiters	122
12.5.5 GRUNDWASSERBILANZ	122
12.5.5.1 Niederschlag.....	122
12.5.5.2 Grundwasserneubildung.....	123
12.5.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	123
12.5.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	123
12.5.8 LITERATUR	125

12.6 SÜDLICHE FLYSCHZONE [RHE].....	125
12.6.1 ALLGEMEINES	125
12.6.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	126
12.6.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	127
12.6.3.1 Bodentypen	127
12.6.3.2 Deckschicht.....	127
12.6.4 GRUNDWASSERLEITER	127
12.6.4.1 Druckverhältnisse.....	127
12.6.4.2 Grundwasserstauer.....	127
12.6.4.3 Petrographie des Grundwasserleiters	127
12.6.4.4 Grundwasserabflussrichtungen	128
12.6.5 GRUNDWASSERBILANZ	128
12.6.5.1 Niederschlag.....	128
12.6.5.2 Grundwasserneubildung.....	128
12.6.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	128
12.6.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	128
12.6.8 LITERATUR	130
12.7 SÜDLICHE FLYSCHZONE [DBJ]	130
12.7.1 ALLGEMEINES	130
12.7.2 GRUNDWASSERKÖRPERGRENZEN.....	131
12.7.3 ÜBERLAGERENDE SCHICHTEN.....	132
12.7.3.1 Bodentypen	132
12.7.3.2 Deckschicht.....	132
12.7.4 GRUNDWASSERLEITER	132
12.7.4.1 Druckverhältnisse.....	132
12.7.4.2 Grundwasserstauer.....	132
12.7.4.3 Petrographie des Grundwasserleiters	132
12.7.5 GRUNDWASSERBILANZ	132
12.7.5.1 Niederschlag.....	132
12.7.5.2 Grundwasserneubildung.....	133
12.7.6 GRUNDWASSER – CHEMIE UND MONITORING	133
12.7.7 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE	133
12.7.8 LITERATUR.....	135
13 TABELLENVERZEICHNIS.....	136
14 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	137

1 EINLEITUNG

DURCH DIE VORGABEN DER EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG (WRRL, Art. 4) bzw. des Wasserrechtsgesetzes 1959 (WRG, § 30c), dass der gute Zustand des Grundwassers bis zum Jahr 2015 zu erreichen ist und in Folge laufend Maßnahmen zur Verschmutzungsreduzierung zu treffen sind, ist die Abschätzung jenes Zeithorizontes, innerhalb dessen Maßnahmen im Grundwasserkörper messbar werden können, von wesentlicher Bedeutung. Diese Fragestellung ist allerdings bereits auch im Zusammenhang mit der Evaluierung des „Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft“ (ÖPUL) und weiteren Gewässerschutzmaßnahmen von Interesse.

Bei zahlreichen Trinkwasserversorgungen mit landwirtschaftlich geprägtem Grundwassereinzugsgebiet steht die Nitratproblematik an erster Stelle. Nitrat gelangt durch Versickerung aus intensiv bewirtschafteten Böden oder in dicht besiedelten Gebieten in das Grundwasser und gegebenenfalls in das Trinkwasser. In vielen der betroffenen Gebiete werden seit längerer Zeit Anstrengungen im Sinne einer grundwasserschonenden Landbewirtschaftung unternommen, um die Nitratbelastung des Grundwassers zu reduzieren. Jedoch sind bisher in vielen Untersuchungsgebieten derartige Verbesserungen (noch) nicht festzustellen.

Die WRRL verlangt, dass die Verschlechterung des Zustands aller Grundwasserkörper verhindert wird und, wie bereits erwähnt, dass der gute Zustand bis zum Jahr 2015 zu erreichen ist. Des Weiteren sind alle signifikanten und anhaltend steigenden Belastungstrends umzukehren. Zu diesem Zweck und im Hinblick auf die einzuhaltenden Fristen sind von den Mitgliedstaaten erforderliche Maßnahmen zu setzen. Lassen die natürlichen Gegebenheiten keine rechtzeitige Verbesserung des Zustandes der Wasserkörper zu, so ist es in begründeten Fällen zulässig, die Fristen bis 2027 zu erstrecken.

Aber auch aus der Sicht der Maßnahmenpakete, wie sie derzeit im ÖPUL-Programm vorgesehen sind, stellt die Möglichkeit einer zeitlichen und inhaltlichen Zielprognose – wann können Maßnahmen wirksam werden? – eine wesentliche Argumentationshilfe bei der Überzeugungsarbeit hinsichtlich der politischen Umsetzung von Maßnahmen im Gewässerschutz (v. a. Nitrat) dar.

Eine Abschätzung der Mittleren Verweilzeit (MVZ) oder vereinfacht das Alter des Grundwassers bzw. die Erkundung der natürlichen Gegebenheiten der Grundwasserkörper im Hinblick auf ihre Reaktionsgeschwindigkeit bzw. -trächtigkeit ist mit Hilfe des Einsatzes von isotopenhydrologischen Messungen (Sauerstoff-18, Tritium/Helium-3 etc.) und Spurengasen (FCKW, SF6 etc.) in Kombination mit hydrogeologischen Untersuchungen möglich, falls nicht weit reichende anthropogene Tritium-Kontaminationen (z. B. aus Deponien, Kläranlagen) vorliegen.

Überdies liefert die Abschätzung der Mittleren Verweilzeiten eine Evaluierung der hydrogeologischen Konzepte der Grundwasserkörper, z.B. in Bezug auf die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser oder die Höhe von Einzugsgebieten, was wiederum eine Basis für praktische Umsetzungen wie Einrichtungen und Bemessungen von Wasserschutzgebieten, Festlegung von Entnahmekonsensmengen etc. darstellen kann.

Aufgrund unterschiedlich langer Verweilzeiten des Grundwassers im Untergrund kann die Wirksamkeit von Maßnahmen, die den chemischen Zustand des Grundwassers verbessern sollen, nicht sofort gemessen werden. Für die Evaluierung muss ein entsprechender Zeithorizont berücksichtigt werden. In den bisherigen Berichten zum Grundwasseralter gibt das Umweltbundesamt im Auftrag des BMLFUW - Sektion

Wasserwirtschaft einen statistisch flächenhaften Überblick über die Mittleren Verweilzeiten in den obersten genutzten Grundwasserstockwerken in Österreich.

Ausgehend von der wasserwirtschaftlichen Bedeutung der Grundwasserkörper wurden - unter Berücksichtigung der bereits im Rahmen der bisherigen Grundwasseralter-Projekte bearbeiteten Grundwasserkörper - die nachfolgend angeführten Grundwasserkörper in das gegenständliche Projekt aufgenommen. Die Probenahmen erfolgten im Zeitraum 2. Quartal 2015 bis einschließlich 1. Quartal 2016.

TABELLE 1: AUSGEWÄHLTE GRUNDWASSERKÖRPER

GWK-Nr.	GWK-Bezeichnung	Dominierender Aquifertyp
GK100019	Machland [DUJ]	Porengrundwasserleiter
GK100045	Welser Heide [DUJ]	Porengrundwasserleiter
GK100059	Drautal [DRA]	Porengrundwasserleiter
GK100153	Molasse und nördliche Flyschzone [RHE]	Kluftgrundwasserleiter
GK100155	Südliche Flyschzone [RHE]	Kluftgrundwasserleiter
GK100016	Südliche Flyschzone [DBJ]	Kluftgrundwasserleiter
GK100188	Flyschzone [DUJ]	Kluftgrundwasserleiter

Anmerkungen:

GWK Grundwasserkörper

Ein Gesamtüberblick über die Ergebnisse aus bisherigen Grundwasseralter-Studien und eine Grundwasseralter-Karte 1:500.000 mit Mittleren Verweilzeiten in ausgewählten Grundwasserkörpern ist in einem eigenen zusammenfassenden Bericht auf der Internetseite des BMLFUW unter: Wasserqualität und Gewässerschutz / [Grundwasseralter – Bericht und Karte](#) abrufbar. Details sind den jeweiligen Endberichten zu entnehmen.

2 METHODIK

VORAUSSETZUNG FÜR DIE RICHTIGE EINORDNUNG der erzielten Abschätzungen des Wasseralters an den untersuchten Grundwassermessstellen ist das Verständnis für das Konzept der Mittleren Verweilzeit (MVZ) sowie für die Aussagekraft und Einschränkungen der verwendeten Untersuchungsmethoden. Diese werden im Folgenden kurz dargelegt.

2.1 MITTLERE VERWEILZEIT

Als Mittlere Verweilzeit (MVZ) wird die mittlere Aufenthaltsdauer des Wassers im Untergrund vom Zeitpunkt der Infiltration bis zum Abfluss in einer Quelle oder der Förderung in einem Brunnen bezeichnet. Sie ist von

- den topographischen Gegebenheiten,
- der Durchlässigkeit des Untergrundes,
- den hydrologischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme und
- dem Ausbau der beprobten Messstelle abhängig.

Wegen der heterogenen Natur des Bodens, der ungesättigten Zone und des Grundwasserleiters und der Mischung von Wässern mit unterschiedlicher Verweildauer - insbesondere an Messstellen mit langen Filterstrecken - handelt es sich in der Regel um **Verweilzeitverteilungen** (siehe Abbildung 1).

Dieser Aspekt ist im Zusammenhang mit der Bewertung von Maßnahmenwirksamkeiten in Bezug auf die Grundwasserqualität, aber auch mit Blick auf wasserwirtschaftliche Fragen von besonderer Bedeutung, wenn man bedenkt, dass mit den etablierten Methoden zur Bestimmung Mittlerer Verweilzeiten in Grund- und Oberflächengewässern die jungen Komponenten tendenziell überrepräsentativ erfasst werden, die langfristigen Komponenten aber häufig „übersehen“ werden.

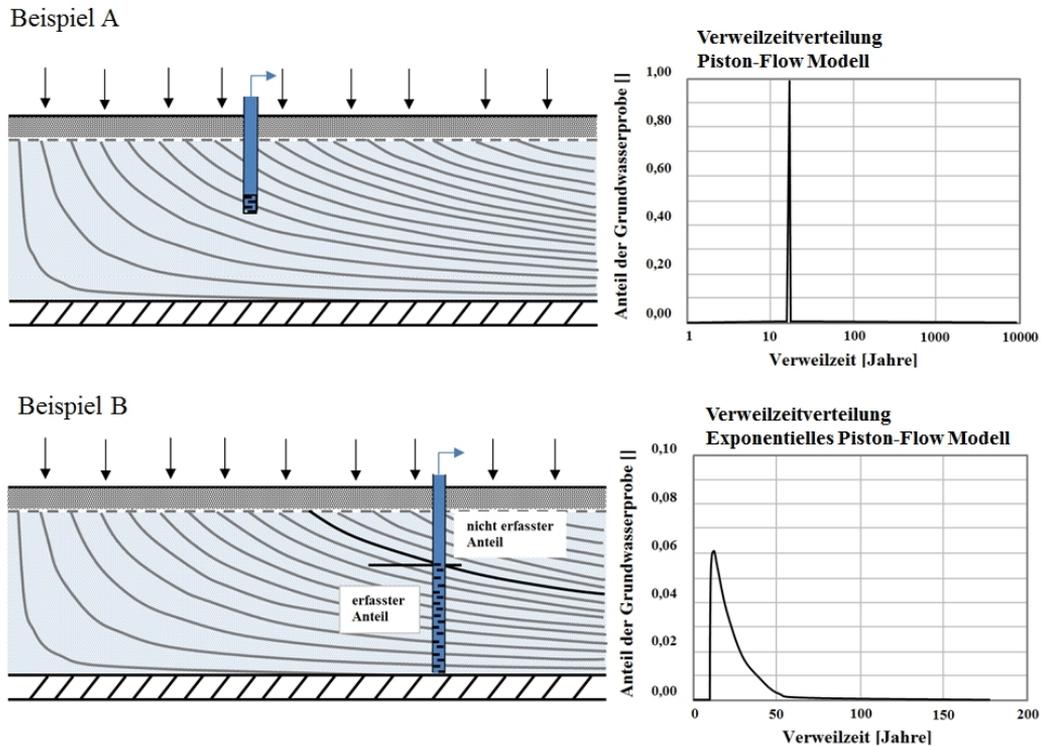


Abbildung 1: Schematisches Diagramm idealisierter Bedingungen in einem Grundwasserleiter mit den entsprechenden Transferfunktionen und erwarteten Verweilzeitverteilungen (verändert nach MALOSZEWSKI & ZUBER 1982, JUERGENS et al. 2012)

Anmerkung: Die eingezeichneten Fließlinien sind vereinfacht dargestellt und entsprechen nicht der korrekten Darstellung von Strömungslinien unter hydraulischen Gesichtspunkten.

Erläuterungen zu Abbildung 3:

- Beispiel A zeigt die idealisierte Situation eines flachen, ungespannten Grundwasserleiters, in dem ein Beobachtungsbrunnen mit einer kurzen Filterstrecke installiert wurde. Das Niederschlagswasser infiltriert im Grundwasserneubildungsgebiet vertikal in den Boden, durch die ungesättigte Zone und fließt dann lateral zum Brunnen. Geht man davon aus, dass das infiltrierende Niederschlagswasser ohne signifikante Beeinflussung durch Verteilungs- oder Mischungsprozesse entlang einer Grundwasserfließlinie quasi wie ein Paket vom Ort der Grundwasserneubildung zum kurzen Brunnenfilter transportiert wird, entspricht die Mittlere Verweilzeit nahezu dem Alter des Tracers (im Falle der Anwendung von Wasserisotopen also z.B. dem Tritium/Heliumalter).
- In Beispiel B ist im gleichen Grundwasserleiter ein Brunnen mit deutlich längerer Filterstrecke installiert. Die Filterstrecke erfasst in diesem Fall nur den unteren Teil des Grundwasserleiters. Diese Situation ist z.B. charakteristisch für Wasserversorgungsbrunnen. Wiederum infiltriert das Niederschlagswasser im Grundwasserneubildungsgebiet vertikal in den Boden, durch die ungesättigte Zone und fließt dann lateral zum Brunnen. Die Verweilzeiten nehmen im Grundwasserleiter mit der Tiefe zu. Der Filterstrecke fließen also Wässer zu, deren Infiltration unterschiedlich lange zurück liegt.
- Durch den Brunnenausbau im unteren Bereich des Grundwasserleiters wird erst kürzlich infiltriertes Wasser (= sehr kurzen Verweilzeiten) nicht erfasst, es dominieren kurze bis mittlere Verweilzeiten, der Anteil von vor langer Zeit infiltriertem Wasser (= sehr lange Verweilzeiten) nimmt exponentiell ab. Während die Mittlere Verweilzeit des Wassers an diesem Brunnen durchschnittlich etwa 15 Jahre beträgt, bedeutet das gleichzeitig, dass ein signifikanter Anteil des

an diesem Brunnen entnommenen Wassers deutlich jünger ist und ein nicht zu vernachlässigender Anteil deutlich älter.

Auch Beispiel B gibt eine idealisierte Situation wider. In der Realität haben wir es:

- mit einer Vielzahl von topographischen Gegebenheiten zu tun, die z.B. zu einer erheblichen Verlängerung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone führen können;
- mit äußerst heterogenen Durchlässigkeiten im Untergrund zu tun. So können z.B. gut durchlässige Schottergrundwasserleiter nahezu undurchlässige Tonlinsen enthalten; Karst- und Kluftgrundwasserleiter sind durch unterschiedliche Wegsamkeiten in Spalten, Klüften und der Gesteinsmatrix gekennzeichnet und
- mit wechselnden hydrologischen Bedingungen zu tun, die je nach Hoch- oder Niedrigwasserbedingungen zu jahreszeitlich völlig unterschiedlichen Verweilzeitverteilungen an einzelnen Grundwassermessstellen führen können.

Die mögliche Spannweite von Mittleren Verweilzeiten in Grundwassersystemen ist in Abbildung 2 dargestellt.

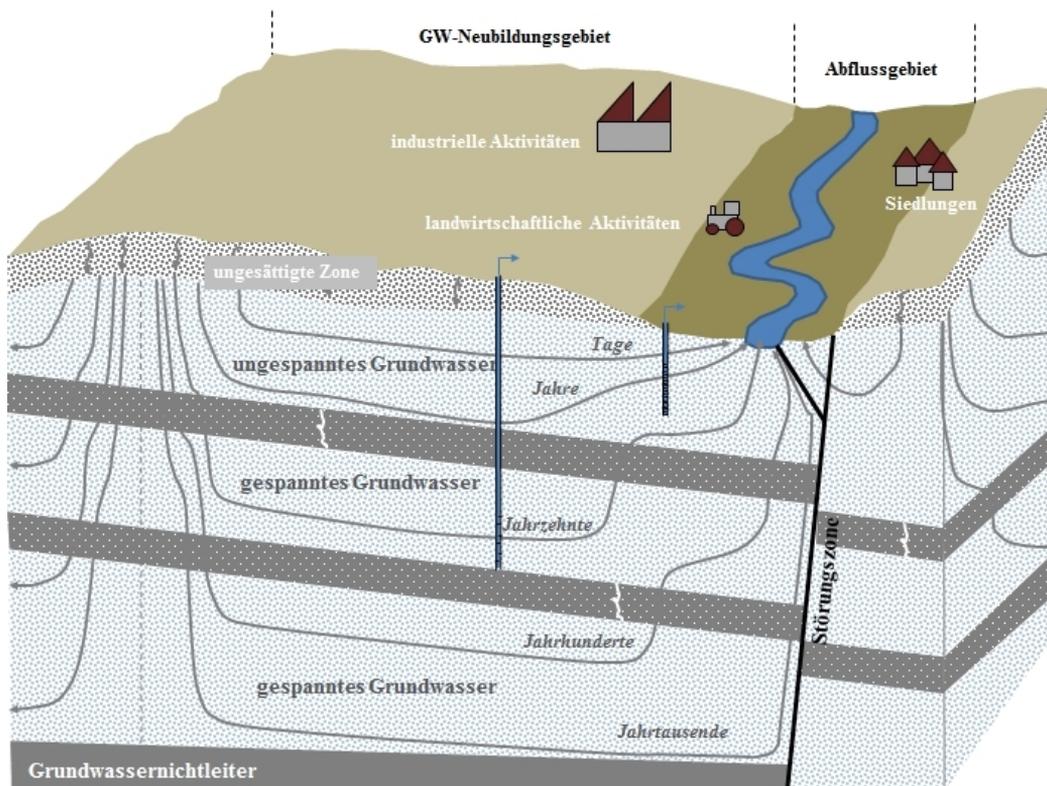


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Spannweite von Grundwasserverweilzeiten in einem hydrogeologischen System (verändert nach KAZEMI et al. 2006)

2.2 BESTIMMUNG VON MITTLEREN GRUNDWASSERVERWEILZEITEN

Eine etablierte Vorgehensweise zur Abschätzung von Mittleren Verweilzeiten in einem Grundwassersystem ist die Messung geeigneter Tracer im Niederschlags, Grund- und Oberflächengewässer. Tracer sind Wasserinhaltsstoffe oder künstlich hinzugegebene Markierstoffe, mit denen sich das Fließverhalten von Grund- und Oberflächengewässern untersuchen lässt.

Die Auswertung der im Wasser gemessenen Tracerkonzentrationen mittels empirischer Funktionen, den sogenannten **Lumped Parameter Modellen** (ZUBER 1986, AMIN & CAMPANA 1996, MALOSZEWSKI & ZUBER 1996), erlaubt die Abschätzung von Mittleren Wasserverweilzeiten. Dabei handelt es sich vereinfacht gesagt um Transferfunktionen, die alle Eigenschaften des Grundwasserleiters und deren Variationen zusammenfassen und mit deren Hilfe das Eingangssignal (die Tracerkonzentration im Niederschlag) und das Ausgangssignal (die Tracerkonzentration im Grund- oder Oberflächengewässer) über die „Stellschraube“ Mittlere Verweilzeit miteinander in Beziehung gesetzt wird. Anders gesagt, sind Eingangs- und Ausgangssignal in ausreichender Datenqualität verfügbar, kann die Mittlere Verweilzeit mit Hilfe dieser Transferfunktionen berechnet werden.

Die stabilen Wasserisotope Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^2H) sowie das Radionuklid Tritium (^3H) sind natürliche Bestandteile des Wassermoleküls und des Wasserkreislaufes und sind damit – mit allen bekannten Einschränkungen – sehr gut geeignete Tracer zur Bestimmung der Mittleren Verweilzeiten im Grundwasser.

Für umfassende Informationen zur Anwendung von Isotopen als Tracer in der Hydrosphäre wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (MOSEK & RAUERT 1980, KENDALL & MCDONNELL 1998, COOK & HERCZEG 2000, AGGARWAL et al. 2005).

Die Konzentrationen der Wasserisotope im Niederschlag werden österreichweit an zahlreichen Stationen im Rahmen des Isotopenmessnetzes ANIP (= Austrian Network of Isotopes in Precipitation) erfasst (ANIP, 2015). Das Isotopenmessnetz ist ein Sondermessprogramm entsprechend § 28 und Anlage 12 der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV 2006 i.d.g.F.). Damit steht österreichweit fast flächendeckend das Eingangssignal zur Abschätzung von Mittleren Verweilzeiten in Grund- und Oberflächengewässern zur Verfügung.

Die im Rahmen der GZÜV erhobenen Daten sind über das Wasser-Informationssystem Austria (WISA) auf der Homepage des Umweltbundesamtes (www.umweltbundesamt.at) über die [H₂O-Fachdatenbank](#) abrufbar.

Grundlagen der Isotopenhydrologie können dem Bericht zur Wasserisotopenkarte Österreichs entnommen werden, der auf der Homepage des BMLFUW unter Wasserqualität und Gewässerschutz (www.bmlfuw.gv.at) zur Verfügung steht.

Folgende Methoden kamen im vorliegenden Projekt im Einzelnen zur Anwendung:

2.3 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM (^2H)

Bei der Analyse von Sauerstoff-18 und Deuterium wird nicht der absolute Gehalt bestimmt, sondern das Verhältnis vom seltenen (schweren) zum häufigeren (leichten) Isotop ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ bzw. $^2\text{H}/^1\text{H}$) im Wassermolekül in Bezug auf einen international anerkannten Referenzstandard (Vienna Standard Mean Ocean Water: V-SMOW). Die Abweichung des Isotopenhäufigkeitsverhältnisses der Probe gegenüber dem Standard erfolgt als Delta-Notation und wird in Promille (‰) angegeben, d.h. als $\delta^{18}\text{O}$ ‰ V-SMOW und $\delta^2\text{H}$ ‰ V-SMOW.

Die charakteristische Saisonalität der stabilen Wasserisotope Sauerstoff-18 und Deuterium im Niederschlag erlaubt die Bestimmung kurzer Mittlerer Verweilzeiten im Bereich bis zu maximal fünf Jahren. Bei dieser Methode werden die saisonalen Schwingungen (Amplituden) des Isotopensignals von Sauerstoff-18 oder Deuterium im Niederschlag mit denen des Grundwassers verglichen (Abbildung 3). Die Dämpfung der Niederschlagsamplitude und die Zeitverschiebung des saisonalen Niederschlagssignals im Grundwasser erlaubt die Abschätzung einer Mittleren Grundwasserverweilzeit mittels empirischer Funktionen (AMIN & CAMPANA 1996, MALOSZEWSKI & ZUBER 1996) oder – wie im vorliegenden Projekt – über Näherungsformeln (STICHLER & HERMANN 1983).

Die Qualität der Ergebnisse hängt davon ab, ob das gewählte Probenahmeintervall und die gewählten Probenahmezeitpunkte die saisonalen Schwankungen im Grundwasser hinreichend genau abbilden. Im vorliegenden Projekt lässt sich die quartalsbezogene Grundwasserprobenahme für Sauerstoff-18 mit vertretbarem Aufwand realisieren und erlaubt zumindest eine qualitative Abschätzung des Vorliegens einer jungen Grundwasserkomponente.

Wird das saisonale Isotopensignal durch andere Effekte überlagert oder verfälscht (z.B. durch Mischung von Quellwässern mit unterschiedlichen Verweilzeiten in einer Quellfassung oder die Veränderung des Niederschlagsisotopensignals während der Schnee- oder Gletscherschmelze und vor Infiltration in den Untergrund), ist die dargestellte Methode für eine Abschätzung von Mittleren Verweilzeiten ungeeignet bzw. mit hohen Unsicherheiten behaftet.

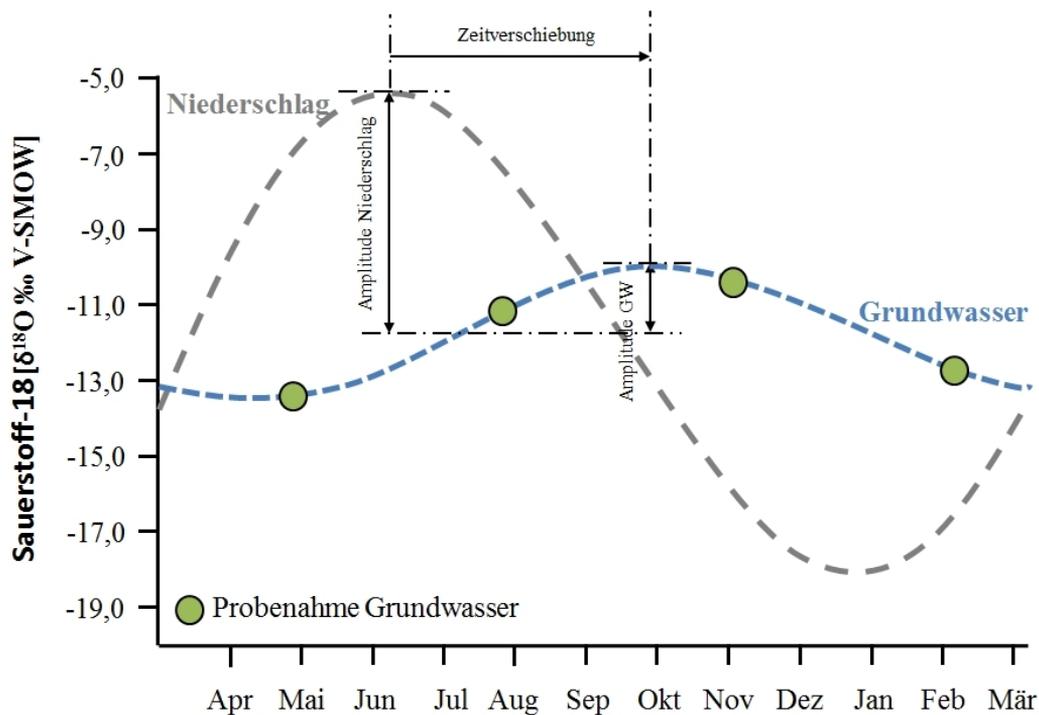


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den saisonalen Schwankungen der Sauerstoff-18-Konzentrationen im Niederschlag und im Grundwasser

Weitere Rückschlüsse in Bezug auf die Grundwasserneubildung lassen sich aus der Darstellung der stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium der Grundwasserproben im Vergleich zur Niederschlagsgeraden der stabilen Wasserisotope ziehen (Abbildung 4).

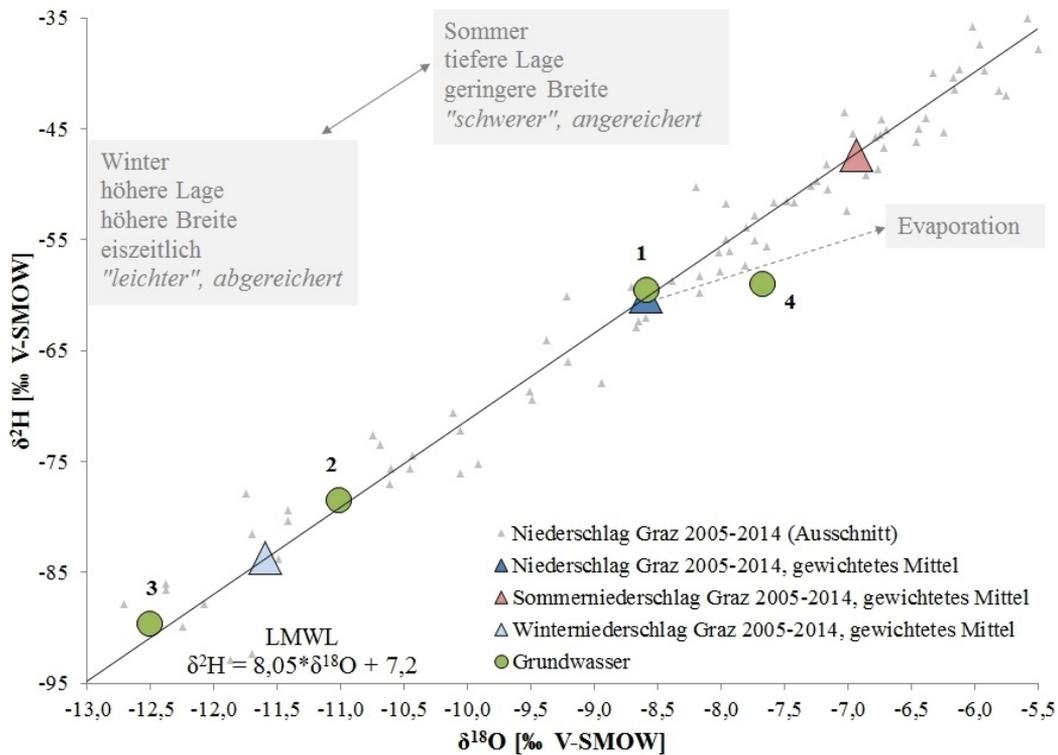


Abbildung 4: Sauerstoff-18- und Deuteriumwerte von Grundwasserproben im Vergleich zum Niederschlag in Graz (2005-2014)

Die lokale Niederschlagsgerade (Local Meteoric Water Line, LMWL) der Sauerstoff-18- und Deuteriumwerte spiegelt die Niederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet wider und dient als Referenzlinie. Die Lage von Grundwasserproben im Vergleich zur LMWL gibt Hinweise auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie auf Mischungs- und Verdunstungsprozesse.

In Abbildung 4 sind beispielhaft die Gehalte der stabilen Wasserisotope von vier Grundwasserproben im Vergleich zu der lokalen Niederschlagsgeraden von Graz dargestellt. Folgende Informationen lassen sich dieser Abbildung entnehmen:

Erläuterung zu Abbildung 6:

- Grundwasserprobe 1 liegt nahe dem mehrjährigen gewichteten Niederschlagsmittel von Graz. Winter- und Sommerniederschläge scheinen in gleichem Maße zur Grundwasserneubildung beizutragen. Die mittlere Einzugsgebietshöhe der Grundwassermessstelle entspricht in etwa der Höhenlage der Niederschlagsmessstelle von Graz.
- Grundwasserprobe 2 weist deutlich abgereicherte - man spricht auch von „leichteren“ - Isotopengehalte auf. Diese werden durch stärker negative $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte widergegeben. Entweder tragen hier isotopisch leichtere Winterniederschläge überproportional zur Grundwasserneubildung bei oder das Einzugsgebiet der Grundwassermessstelle liegt deutlich höher als die Niederschlagsmessstelle. Isotopengehalte nehmen aufgrund von Temperatureffekten im Allgemeinen mit der Höhe ab, d.h., Niederschläge in höheren Lagen sind isotopisch abgereichert („leichter“), weisen also stärker negative $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte auf.
- Grundwasserprobe 3 weist sogar deutlich „leichtere“ Isotopengehalte auf als das mehrjährige gewichtete Niederschlagsmittel im Winter. Dies kann z.B. ein Hinweis darauf sein, dass das Grundwasser aus eiszeitlicher Neubildung stammt, also zu Zeiten mit deutlichen niedrigeren

Durchschnittstemperaturen als derzeit in den Untergrund infiltriert ist. Ob es sich tatsächlich um sogenanntes „Paläowasser“ handelt, lässt sich allerdings nur durch die ergänzende Untersuchung entsprechender Alterstracer (z.B. ^{14}C , ^{36}Cl) abklären.

- Probe 4 ist Grundwasser, welches vor der Infiltration in den Untergrund Verdunstungsprozessen unterlegen ist, die zu einer Anreicherung der stabilen Isotope im infiltrierenden Wasser geführt haben. Da diese Anreicherung proportional unterschiedlich für Sauerstoff-18 und Deuterium erfolgt, bilden durch Verdunstungsprozesse beeinflusste Wasserproben in der Regel entlang charakteristischer Evaporationslinien ab.

Die Daten sind natürlich im Kontext der geologischen bzw. hydrogeologischen Gesamtsituation zu interpretieren.

2.4 TRITIUM (^3H)

Neben den stabilen Wasserstoffisotopen Protium (^1H) und Deuterium (^2H) können Wassermoleküle auch das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium (^3H) enthalten. Aufgrund seiner Radioaktivität zeigt es in Wasser ein anderes Verhalten als die stabilen Isotope.

In der Hydrologie wird die Tritiumkonzentration in Tritium-Einheiten (TE) angegeben:

$$1 \text{ TE} = 1 \text{ Tritium-Atom } ({}^3\text{H}) \text{ pro } 10^{18} \text{ stabiler Wasserstoffatome } ({}^1\text{H} \text{ und } {}^2\text{H})$$

Als physikalische Maßeinheit für die Tritiumaktivität fungiert das Becquerel. Ein Becquerel (Bq) entspricht einem Zerfall (Kernumwandlung) pro Sekunde. Für Wasser gilt folgende Beziehung:

$$1 \text{ TE} = 0,118 \text{ Bq/kg} \quad (\text{bzw. } 1 \text{ Bq/kg} \text{ entspricht } 8,47 \text{ TE})$$

In einem Liter Wasser mit 1 TE erfolgen 7,1 Zerfälle pro Minute.

Erhöhte Tritiumfreisetzung durch die oberirdischen Kernwaffentests Anfang der 1960er Jahre und der anschließende Konzentrationsabfall von Tritium in der Atmosphäre führten zu einer charakteristischen Markierung von infiltrierendem Niederschlagswasser mit Tritium über die natürlichen Konzentrationen hinaus (siehe Abbildung 5, Niederschlag Innsbruck).

Durch den Vergleich des in einer Wasserprobe gemessenen Tritiumgehaltes (= Austragsfunktion) mit der Eintragsfunktion von Tritium im Niederschlag lässt sich unter Verwendung von Transferfunktionen, den sogenannten **Lumped Parameter-Modellen** (MALOSZEWSKI & ZUBER 1996), die Mittlere Verweilzeit des beprobten Grundwassers berechnen. Dazu werden Annahmen zur Altersverteilung an der untersuchten Messstelle aufgrund von hydrogeologischen Gegebenheiten getroffen (siehe Abbildung 1: Beispiel Piston-Flow Modell und Exponentielles Piston-Flow Modell und Abbildung 5) und der Zerfallsprozess von Tritium berücksichtigt.

Aufgrund der Abnahme der Tritiumgehalte im Niederschlag hin zu natürlichen Hintergrundkonzentrationen ($\sim 4\text{-}6 \text{ TE}$) ist diese Methode zunehmend mit Unsicherheiten behaftet. Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die derzeit im Grundwasser erhobenen Tritiumkonzentrationen für eine zuverlässige Bestimmung von Mittleren Verweilzeiten nicht ausreichen.

Für die Tritiumwerte der Grundwasserprobe 1 zum Beispiel lässt sich eine Vielzahl von Transferfunktionen anpassen, die Bestimmung der Mittleren Verweilzeit ist mehrdeutig. Liegen jedoch historische Messdaten

aus früheren Projekten vor (Grundwasserproben 1a, b und c), lassen sich die Mittleren Verweilzeiten des Grundwassers auf Basis von Tritium recht zuverlässig bestimmen.

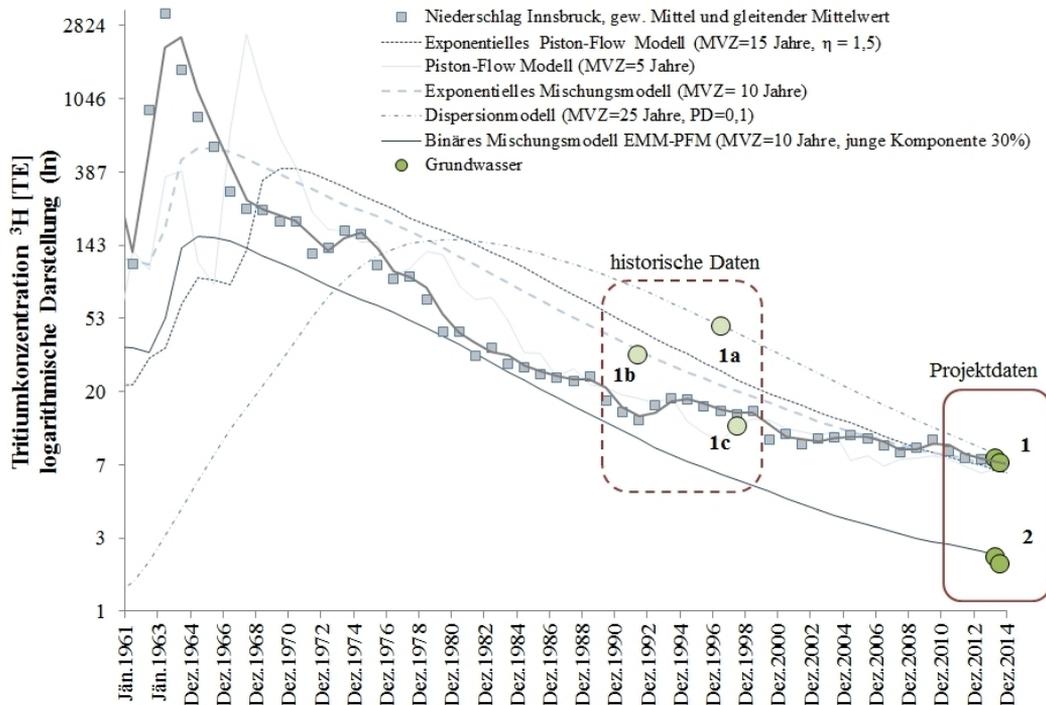


Abbildung 5: Vergleich der Zeitreihe von Tritium im Niederschlag von Innsbruck und verschiedener modellierter Verweilzeitverteilungen mit exemplarischen Tritiumgehalten im Grundwasser
 MVZ = Mittlere Verweilzeit, η und PD sind Parameter der jeweiligen Modelle

Erläuterungen zu Abbildung 7:

- Im vorliegenden Beispiel weist das durch die Proben 1 und 1b charakterisierte Grundwasser eine Mittlere Verweilzeit von 10 Jahren auf. Die hydrogeologischen Bedingungen an der Messstelle lassen sich durch ein Exponentielles Mischungsmodell beschreiben. Dabei nehmen die Grundwasseralter - einer logarithmischen Verteilung entsprechend - mit zunehmender Tiefe zu.
- Die Grundwasserprobe 2 kann durch ein Binäres Mischungsmodell beschrieben werden, bei dem die junge Grundwasserkomponente eine Mittlere Verweilzeit von 10 Jahren aufweist und ca. 30 Prozent des Wassers in der beprobten Messstelle ausmacht. Die anderen 70% des Grundwassers sind tritiumfrei und weisen damit eine Mittlere Verweilzeit unbekanntes Alters von zumindest > 60 Jahren auf.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Tritiumkonzentration des Niederschlags saisonalen Schwankungen unterliegt, mit niedrigen Tritiumkonzentrationen im Winter und höheren Tritiumkonzentrationen im Sommer.

Im vorliegenden Projekt wird aufgrund der genannten Einschränkungen bezüglich der Berechnung von Mittleren Verweilzeiten auf Basis von Tritium und dem überwiegenden Fehlen historischer Daten an den untersuchten Messstellen zusätzlich ^3He (Helium-3), das Zerfallsprodukt von Tritium, erfasst.

2.5 TRITIUM/HELIUM-3

Die Bestimmung des $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Isotopenverhältnisses einer Wasserprobe ermöglicht eine Altersabschätzung auf Basis von Einzelmessungen. Tritium zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren zu $^3\text{He}_{\text{trit}}$ (tritiogenem Helium), dem leichten und seltenen Heliumisotop (Abbildung 6, linke Seite).

Heliumgas bleibt im Wasser gelöst, ist chemisch inert bzw. träge und reichert sich mit der Zeit an. Die Anreicherung beginnt allerdings erst in der gesättigten Zone, da Helium in der ungesättigten Zone durch Gasaustausch und Diffusion verloren geht (Abbildung 6, rechte Seite). Aus der Kenntnis des bereits zerfallenen Tritiums (= tritiogenem Helium) in Relation zum noch in der Probe befindlichen Tritium lässt sich die Bildungsdauer von Helium-3 ermitteln und für Verweilzeitbewertungen verwenden.

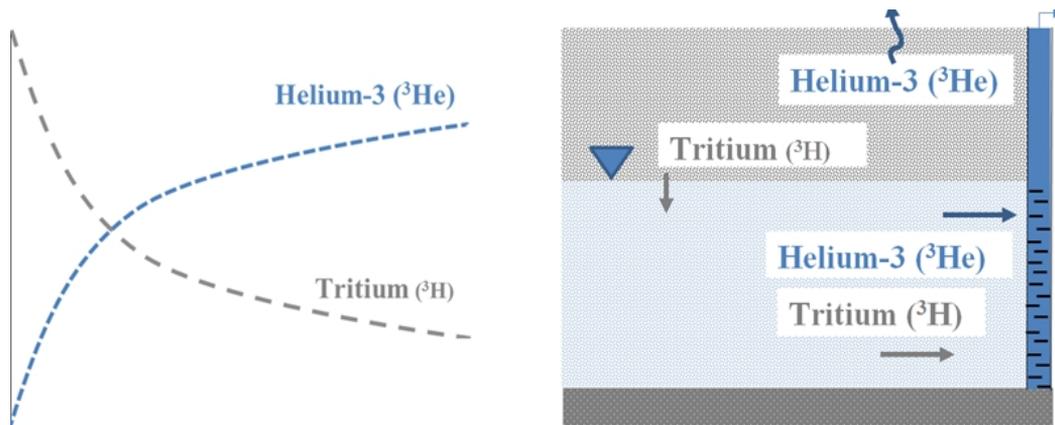


Abbildung 6: Tritium und sein Zerfallsprodukt Helium-3 (linke Seite). Verlust von Helium-3 in der ungesättigten Zone (rechte Seite)

Bei nennenswerten Mächtigkeiten der ungesättigten Zone (z.B. mehrere Zehnermeter) unterscheidet sich das Tritium-Helium-Alter deutlich von der Mittleren Verweilzeit, die auf Basis von Tritiummessungen (Kapitel 2.4) modelliert wird. Das ist bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen. Ebenso entspricht das Tritium-Helium-Alter bei Mischwässern nicht dem gewichteten Mittel der Verweilzeiten aller Grundwasserkomponenten.

Einige Unsicherheiten in Bezug auf die Tritium-Helium-Methode ergeben sich aus den möglichen zusätzlichen - unterschiedlich gut quantifizierbaren - Quellen von Helium im Grundwasser. Dabei handelt es sich um atmosphärische (1, 2) und geogene/terrigenen (3, 4) Quellen. Eine Grundwasserprobe kann demzufolge neben dem im Gleichgewicht mit der Atmosphäre gelösten Helium (1) einen Luftüberschussanteil (2) enthalten, ebenso wie Helium aus dem Zerfall von uran- und thoriumhaltigen Gesteinen z.B. aus dem Bereich der Erdkruste (3) oder aufsteigendes Helium aus dem Bereich des Erdmantel (4).

Um die Unterscheidung der verschiedenen Heliumkomponenten zu ermöglichen, werden in der Wasserprobe zusätzlich Neonisotope analysiert. Für eine genaue Darstellung der Methodik sei an dieser Stelle auf SCHLOSSER et al. (1988, 1989), AESCHBACH-HERTIG (1994) und SÜLTENFUSS & MASSMANN (2004) verwiesen. Eine grafische Gegenüberstellung der $^3\text{He}/^4\text{He}$ - und der Ne/He -Isotopenverhältnisse wie in Abbildung 7 erlaubt die Unterscheidung der verschiedenen Heliumquellen.

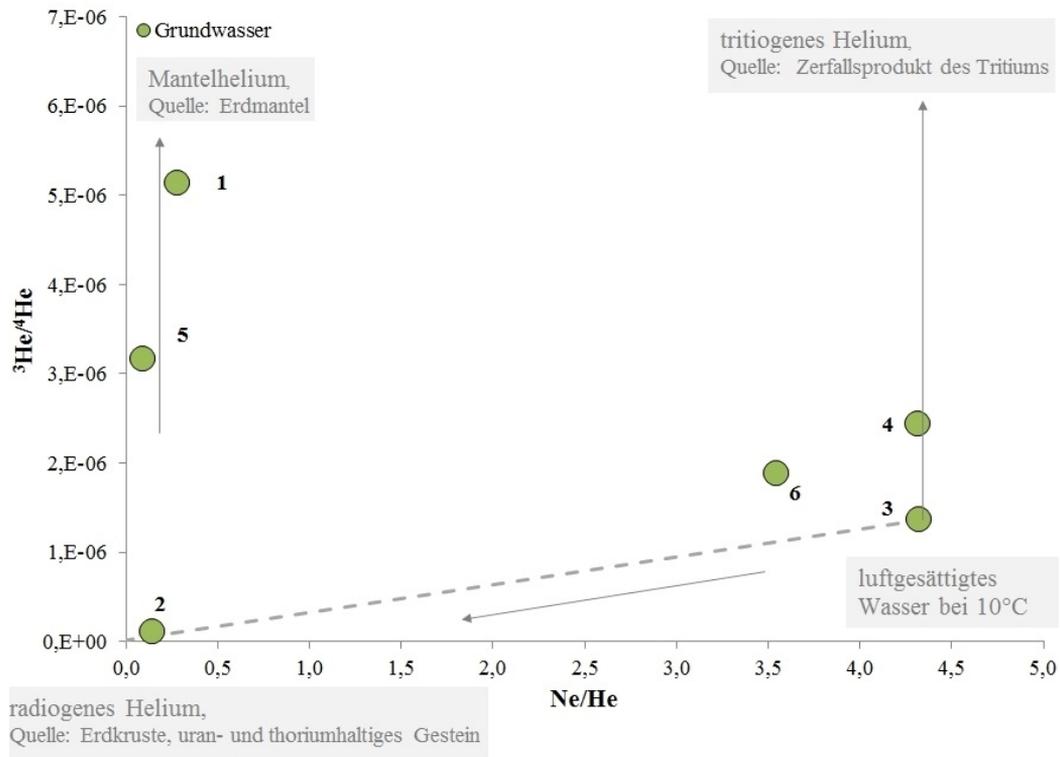


Abbildung 7: Heliumkomponenten exemplarischer Grundwasserproben

Die im vorliegenden Beispiel (Abbildung 7) dargestellten Isotopenverhältnisse sind wie folgt zu interpretieren:

- Das Grundwasser der Messstelle 1 ist durch eine Heliumkomponente aus dem Erdmantel beeinflusst. Mantelhelium ist z.B. im Bereich von vormals durch Basaltvulkanismus beeinflussten Gebieten zu erwarten.
- Das Grundwasser der Messstelle 2 ist durch eine radiogene Heliumkomponente beeinflusst. Radiogenes Helium stammt aus dem Zerfall von uran- und thoriumhaltigen Gesteinen z.B. im Bereich der Erdkruste und steigt entlang von Störungszonen mit entsprechenden Wegsamkeiten auf.
- Das Grundwasser der Messstelle 3 entspricht der Heliumzusammensetzung von Wasser im Gleichgewicht mit der Luft bei 10°C.
- Das Grundwasser der Messstelle 4 enthält eine hohe Menge tritiogenen Heliums, welches aus dem Zerfall von „Bomben“-Tritium stammt.
- Das Grundwasser der Messstelle 5 ist durch die Mischung einer radiogenen Heliumkomponente mit einer Heliumkomponente aus dem Erdmantel beeinflusst.
- Das Grundwasser der Messstelle 6 ist durch die Beimischung von Mantelhelium gekennzeichnet. Es kann sich aber auch um Grundwasser handeln, welches sowohl eine radiogene Heliumkomponente als auch signifikante Mengen tritiogenen Heliums enthält.

Auch hier sind die Daten wiederum im Kontext der geologischen bzw. hydrogeologischen Gesamtsituation zu interpretieren.

Die eigentliche Bestimmung des Tritium-Helium-Alters erfolgt auf Basis der in der Probe bestimmten Gehalte von Tritium und tritiogenem Helium mittels Transferfunktionen und unter Berücksichtigung des Zerfalls analog zur Berechnung auf Basis von Tritiumdaten (Kapitel 2.4).

Durch Kenntnis sowohl der Konzentrationen des Ausgangsproduktes (Tritium) als auch des Zerfallsproduktes (Helium) lassen sich mit der Tritium-Helium-Methode die Transferfunktionen auch auf Basis von Einzelmessungen hinreichend genau anpassen und Mittlere Verweilzeiten im Bereich < 50 Jahre zuverlässig bestimmen.

Die Qualität der Anpassung und Aussagekraft der auf diese Weise ermittelten Grundwasseralter kann anhand von Abbildung 8 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags dem (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechnetem) Infiltrationszeitpunkt des Grundwassers gegenüber gestellt. Gibt es starke Abweichungen zwischen den Grundwasserproben und der Tritiumzeitreihe des Niederschlags, müssen die getroffenen Annahmen zu den hydrogeologischen Bedingungen an der Messstelle (Mischungs- und Verteilungsprozesse oder sonstige Beeinflussungen) angepasst und die entsprechenden Transferfunktionen für die Bestimmung der Mittleren Verweilzeit gewählt werden.

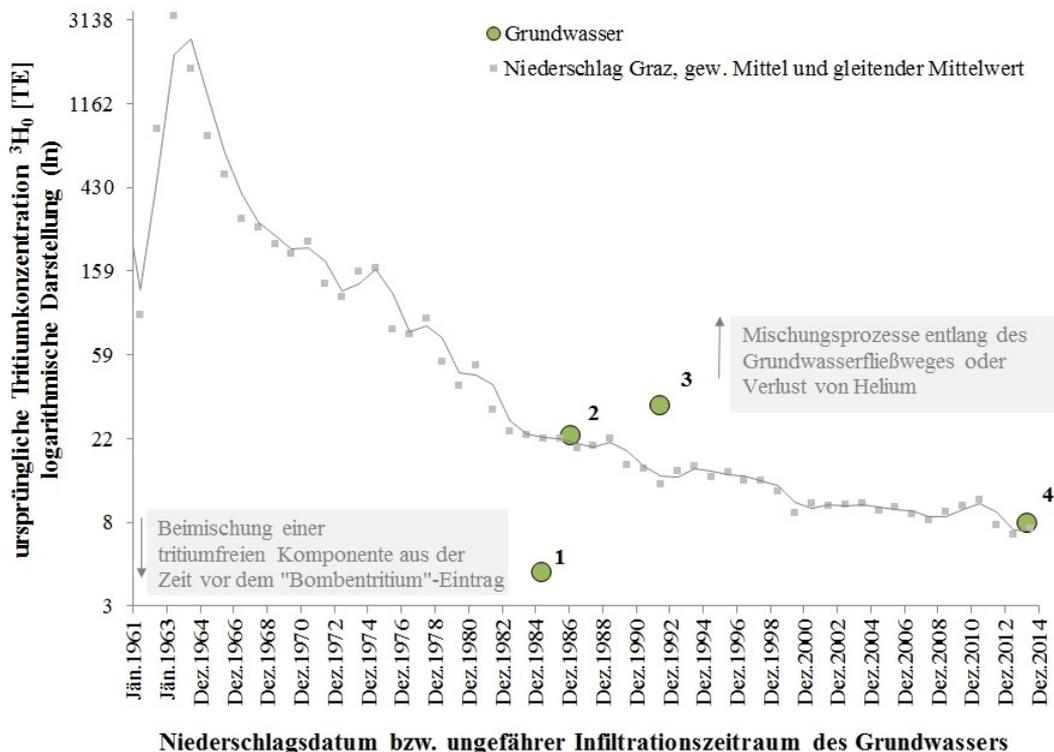


Abbildung 8: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Graz (1961-2014) im Vergleich zu den unter Annahme von Piston-Flow-Bedingungen berechneten Infiltrationszeitpunkten der exemplarischen Grundwasserproben.

Erläuterungen zu Abbildung 10:

- Die unter Annahme von Piston-Flow-Bedingungen berechneten Tritium-Helium-Alter bzw. Infiltrationszeiträume der Grundwasserproben 2 und 4 stimmen gut mit der Zeitreihe von Tritium im Niederschlag überein, d.h. die ermittelten Grundwasseralter sind zuverlässig.
- Für die Grundwasserprobe 3 ist entweder von Mischungs- und Verteilungsprozessen entlang des Grundwasserfließweges auszugehen oder vom Verlust des Heliums z.B. in der ungesättigten Zone.

Liegen ausreichende Informationen zu den hydrogeologischen Gegebenheiten im Umfeld der Messstelle vor, können entsprechende Annahmen zu den Fließbedingungen getroffen, geeignete Transferfunktionen ausgewählt und zuverlässige Mittlere Verweilzeiten berechnet werden.

- Das Grundwasser der Probe 1 ist durch die signifikante Beimischung einer tritiumfreien Grundwasserkomponente aus der Zeit vor dem „Bombentritium“-Eintrag gekennzeichnet. Da das Alter dieser Komponente in der Regel unbekannt ist, lässt sich die Mittlere Verweilzeit über die Größenordnung des Anteils der tritiumfreien Komponente abschätzen.

2.6 UMFANG UND ART DER UNTERSUCHUNGEN

Die Bewertung der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers erfolgte an jenen Messstellen, die im Rahmen der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV2006 i.d.g.F.) untersucht werden. Während bei jenen Grundwasserkörpern mit einer Messstellenanzahl kleiner 20 alle Messstellen ins Untersuchungsprogramm aufgenommen werden können, erfolgte bei jenen Grundwasserkörpern mit mehr als 20 Messstellen in Zusammenarbeit mit den KollegInnen der Ämter der Landesregierungen eine möglichst repräsentative Auswahl auf Basis der hydrogeologischen Rahmenbedingungen, hydrologischen Abschätzungen, Pegelwasserstände und der hydrochemischen Daten. Zusätzlich zu Grundwassermessstellen wurden für die Interpretation relevante Oberflächengewässer ausgewählt, an denen ebenfalls stichprobenartige Untersuchungen durchgeführt wurden.

Die Isotopenprobenahme erfolgte in Anlehnung an das Monitoringprogramm der GZÜV bis zu viermal pro Jahr durch die Probenehmer der GZÜV. Dadurch war es möglich, auf ressourcenschonendem Weg unterschiedliche hydrologische Bedingungen und die Dynamik der Grundwasserkörper in einem Untersuchungsjahr zu erfassen. Die ausgewählten Grundwassermessstellen wurden im Zeitraum 2. Quartal 2015 bis einschließlich 1. Quartal 2016 beprobt.

Ausgehend vom Pilotprojekt Grundwasseralter hat sich für die Berechnung der Mittleren Verweilzeiten des Grundwassers folgende Beprobungsmethodik bewährt:

- 4x pro Jahr stabile Wasserisotope (Sauerstoff-18, Deuterium)
- 2x pro Jahr Tritium
- 1x pro Jahr Edelgasisotope (Helium, Neon)

Insbesondere die Abschätzung Mittlerer Grundwasserverweilzeiten auf Basis der Tritium/Helium-3-Methode ist bei Karst- und Kluftquellen aufgrund der Eigenschaften der Quelfassung häufig nur eingeschränkt möglich. Brunnenstuben, in denen erst nach dem Überlauf beprobt werden kann, führen durch Gasaustausch des Wasser mit der Atmosphäre zu unbrauchbaren Ergebnissen.

Für die Interpretation der Isotopendaten wurde relevante Literatur von den ausgewählten Grundwasserkörpern erhoben, ausgewertet und entsprechend zusammengefasst. Die dabei erstellten Gebietscharakterisierungen wurden mit den jeweiligen ExpertInnen aus den Bundesländern diskutiert und abgestimmt.

In Zusammenschau mit messstellenbezogenen Daten (z.B. Informationen zum Messstellenaufbau, Bohrprofile, hydrochemische Messwerte) wurden die Mittleren Verweilzeiten der Grundwassermessstellen bestimmt und in Form folgender Alterskategorien wiedergegeben:

- < 5 Jahre
- 5-10 Jahre
- 11-25 Jahre
- 26-50 Jahre
- > 50 Jahre



Abbildung 9: Karstgestein aus den Karnischen Alpen / Plöcken, Kärnten

3 MACHLAND [DUJ]

3.1 ÜBERBLICK

DER GRUNDWASSERKÖRPER MACHLAND LIEGT eingebettet zwischen der Donau im Süden und der Böhmischem Masse im Norden. Er erstreckt sich von Mauthausen im Westen bis Ardagger im Osten. Die Landschaft ist geprägt durch ein ausgedehntes Auegebiet, das in eine landwirtschaftlich stark genutzte Niederterrasse übergeht. Der Grundwasserkörper liegt nahezu vollständig auf oberösterreichischen Landesgebiet.



Abbildung 10: Machland, Oberösterreich

Der geologische Aufbau macht das Machland zu einem hervorragenden Grundwasserspeicher. Der stark ausgewaschene Schotter, der in der Nacheiszeit diese Becken und Rinnen gefüllt hat, bietet mit seiner guten Durchlässigkeit ideale Voraussetzungen für die Regeneration und Speicherung des Grundwassers. Die stauende Basis für den Grundwasserleiter wird fast ausschließlich von Schlier (tertiäre Tonmergel) gebildet. Dieser verzahnt nach Norden mit tertiären Sanden. Nur bei Weinzierl bilden kristalline Gesteine den Grundwasserstauer.

Die Grundwasserneubildung findet hauptsächlich durch Grundwasserzuström vom kristallinen Hügelland des Mühlviertels her statt. Zusätzlich wird der Grundwasserkörper durch die aus Norden kommenden und auf der Niederterrasse versickernden Bäche sowie durch infiltrierende Niederschläge gespeist.

Der Flurabstand im Grundwasserkörper Machland liegt im Mittel bei 6 m. Seit den großen Talbodenentwässerungen mit Beginn vor ca. 200 Jahren kam es zu einer kontinuierlichen Grundwasserabsenkung (AMT D. OÖ. LANDESREGIERUNG 2007).

Knapp 80 % der Fläche des Grundwasserkörpers Machland wird landwirtschaftlich genutzt, wovon auch die größte Gefährdung der Wasserqualität ausgeht. Im Machland sind einige Brunnen für die zentrale

Wasserversorgung situiert, so auch das 6 km westlich von Perg gelegene Wasserwerk Zirking der Fernwasserversorgung Mühlviertel.

Im Grundwasserkörper Machland wurden alle 19 GZÜV-Messstellen in Hinblick auf die Mittleren Verweilzeiten des Wassers untersucht.

Eine detaillierte Beschreibung des Grundwasserkörpers ist im Anhang enthalten.

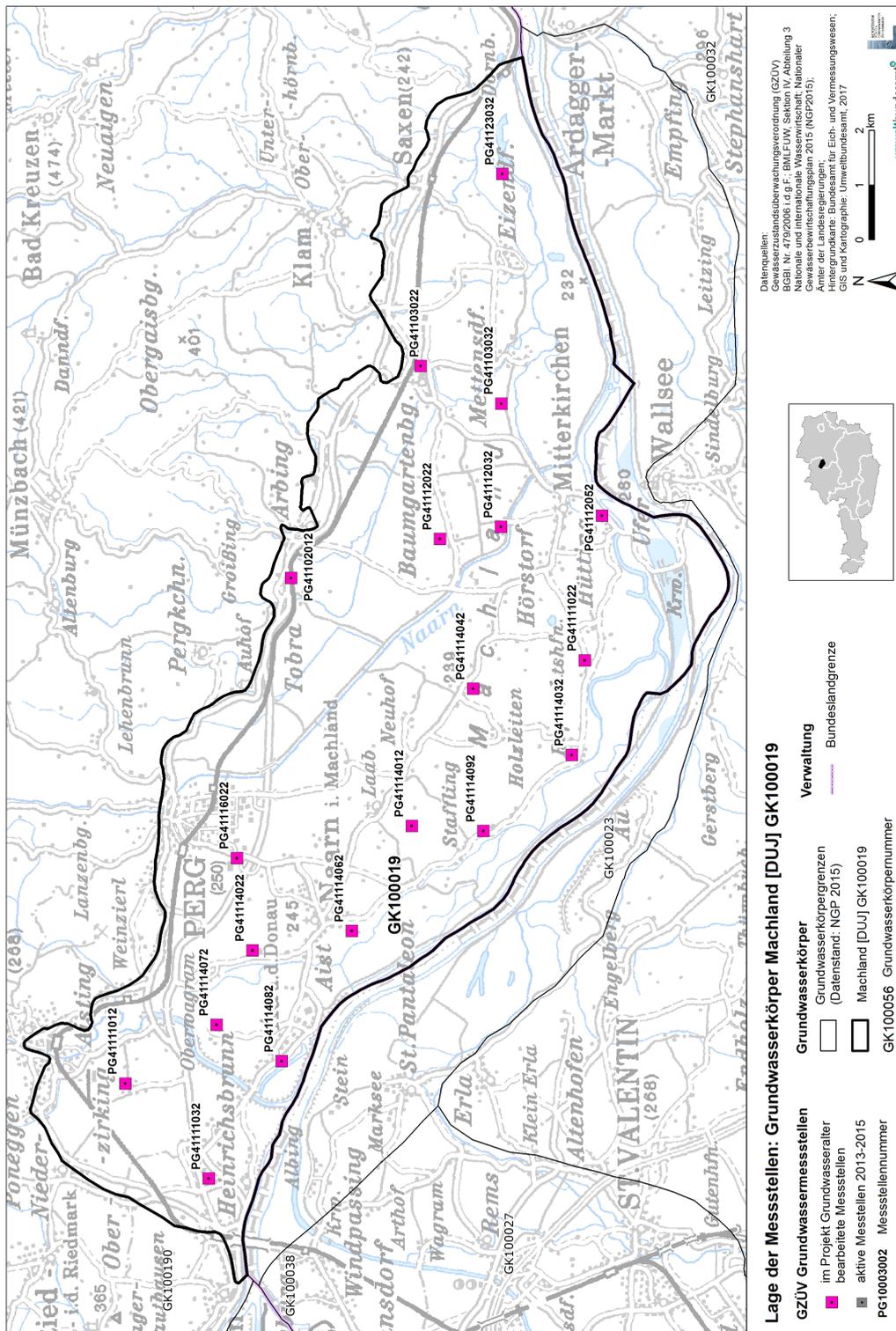


Abbildung 11: Übersichtskarte Grundwasserkörper Machland [DUJ] mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen.

3.2 ERGEBNISSE

3.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM

Die graphische Gegenüberstellung der Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen im Niederschlag, Grund- und Oberflächengewässern in Abbildung 12 erlaubt Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen und Mischungsprozesse der lokalen Grundwasservorkommen.

Die stabilen Isotopendaten der beprobten Niederschlagswässer in Braunau sowie der Grund- und Oberflächengewässer im Machland sind in Abbildung 12 dargestellt.

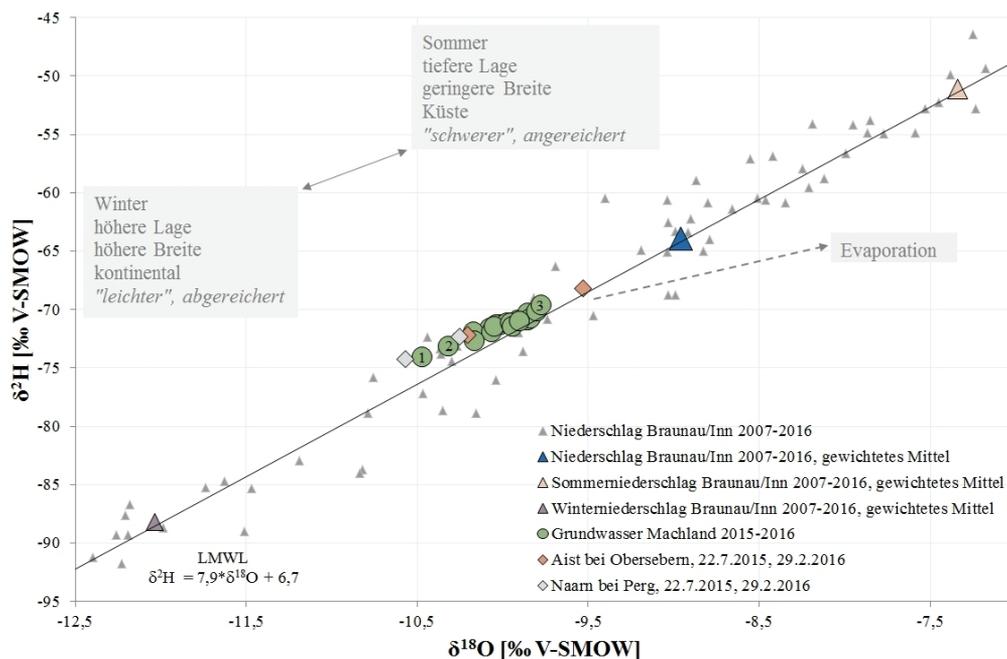


Abbildung 12: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen des Grundwasserkörpers Machland [DUJ] im Vergleich zu Oberflächengewässern (Aist, Naarn) sowie dem Niederschlag in Braunau (2007-2016)

Anmerkungen: (1) PG41114082 (Naarn im Machlande)
 (2) PG41112032 (Mitterkirchen im Machland)
 (3) PG41114072 (Naarn im Machlande)

Alle untersuchten Grundwassermessstellen sind isotopisch abgereichert im Vergleich zum Niederschlagsmittel von Braunau, d.h., die Messstellen erhalten entweder Grundwasserneubildung aus vergleichsweise höheren Lagen oder Winterniederschläge tragen anteilig höher zur Grundwasserneubildung bei. Auch der Einfluss von ins Grundwasser infiltrierenden Oberflächengewässern wie Naarn, Aist, Tobra sowie Rückstau der Donau in diese Gerinne bewirken eine Verschiebung hin zu leichteren Isotopenwerten.

Besonders auffällig ist der Oberflächenwassereinfluss für die beiden Messstellen PG41114082 (beeinflusst durch Donau und Aist) und PG41112032 (beeinflusst durch die Naarn) (Punkte 1 und 2 in Abbildung 12). Auch die Messstellen PG41123032 bei Saxendorf und PG4111012 in Schwertberg sind deutlich durch infiltrierende Oberflächengewässer (Naarn bzw. Aist) gekennzeichnet.

Für PG41114072 in der Gemeinde Naarn im Machlande (Punkt 3 in Abbildung 12) lässt sich eine stärkere Beeinflussung durch isotopisch „schwerere“ Sommerniederschläge ableiten.

Die beprobten Fließgewässer weisen saisonal variable Werte für $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ auf und sind gegenüber dem Niederschlagsmittel ebenfalls isotopisch angereichert. Aist, Naarn und Tobra bzw. ihre Zubringer entspringen in höheren Lagen der Böhmisches Masse. Desgleichen sind die $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Gehalte der Donau (nicht abgebildet) „isotopisch“ leichter als das Niederschlagsmittel für Braunau.

3.2.2 TRITIUM/HELIUM-3

Radiogene, tritiogene und Mantelkomponenten des Heliums im beprobten Grundwasser des Machlandes können anhand der 3-Komponenten-Darstellung in Abbildung 13 unterschieden werden. Diese Differenzierung erlaubt weitere Rückschlüsse auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie unterirdische Wasserwegsamkeiten.

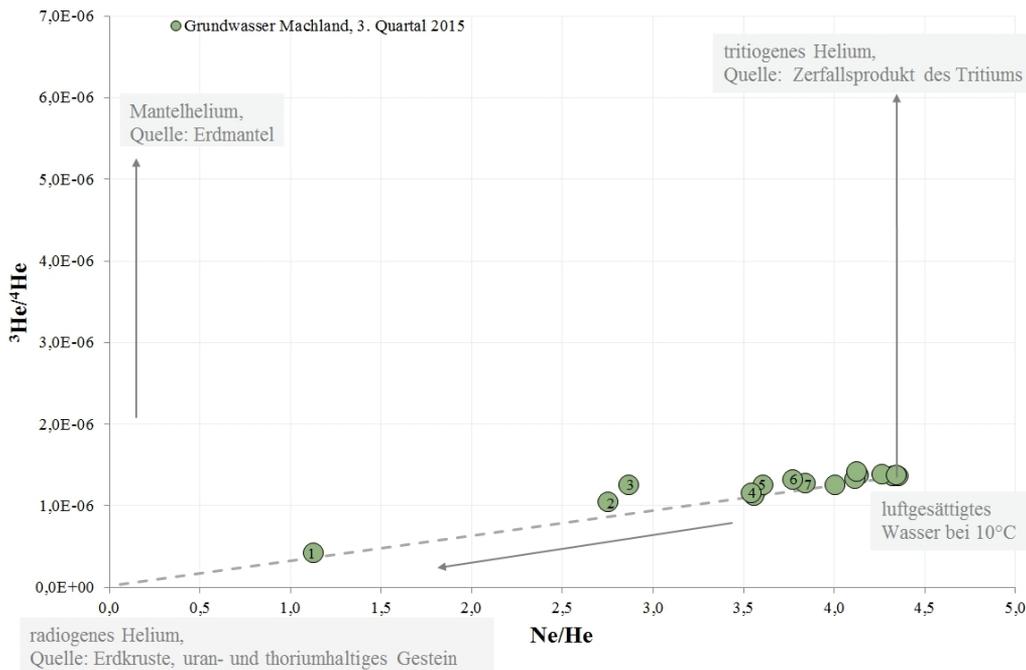


Abbildung 13: Heliumkomponenten des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Machland [DUJ]

- Anmerkungen: (1) PG41103022 (Baumgartenberg)
 (2) PG41114092 (Naarn im Machlande)
 (3) PG41102012 (Arbing)
 (4) PG41114042 (Naarn im Machlande), PG41112052 (verdeckt) (Mitterkirchen im Machland)
 (5) PG41114022 (Naarn im Machlande)
 (6) PG41114012 (Naarn im Machlande)
 (7) PG41111022 (Mitterkirchen im Machland)

Tritiogenes Helium-3 wurde an 14 von 16 diesbezüglich untersuchten Grundwassermessstellen nachgewiesen (Abbildung 13, Tabelle 2). Für drei Messstellen (PG41114062, PG41114082, PG41123032) liegen keine Heliumdaten vor. Zwei Messstellen - PG41102012 in Arbing (Punkt 3 in Abbildung 13) und PG41114092 in der Gemeinde Naarn im Machlande (Punkt 2 in Abbildung 13) - zeigen eine vergleichsweise große Beimischung von tritiogenem Helium-3. Tritiogenes Helium findet sich in Grundwässern, die in der Zeit des "Bombentritium"-Eintrags infiltriert sind.

Drei Grundwassermessstellen in den Gemeinden Arbing, Baumgartenberg und Naarn im Machlande (Punkte 1 bis 3 in Abbildung 13) zeigen eine markante Beimischung der radiogenen Heliumkomponente. An weiteren Messstellen liegt eine geringfügige Beimischung radiogenen Heliums vor (Punkte 4 bis 7 in Abbildung 13). Der Nachweis von radiogenem Helium wird häufig mit dem Auftreten von Störungszonen und/oder tieferer Zirkulation von Grundwasserkomponenten sowie dem Kontakt mit uran- und

thoriumhaltigen Gesteinen in Verbindung gebracht. Bedingt durch die Lage des Machlandes am Südrand der Böhmisches Masse sind deren kristalline Gesteine, wie beispielsweise verschiedene Granite, als Hauptquellen für radiogenes Helium anzunehmen.

Ein Vergleich mit der Karte der LANDSAT-Bildlineamente von Österreich 1:500.000 (BUCHROITHNER 1984) sowie lokal bedeutsamer Lineamente 3. Ordnung (WOLFBAUER 1996) im DORIS Atlas 4.0 zeigt das Vorhandensein zahlreicher Störungszonen im Machland, die entsprechende unterirdische Wasserwegigkeiten für aufsteigende Gase und tief zirkulierende Grundwässer bieten.

Der überwiegende Teil der untersuchten Messstellen gruppiert sich nahe der Heliumzusammensetzung von Wasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre und verweist dementsprechend auf kürzlich infiltriertes Grundwasser ohne zusätzliche terrigene bzw. tritiogene Heliumkomponenten.

Zum Teil hohe Luftüberschüsse in den Proben – ausgedrückt durch hohe ΔNe -Werte in Tabelle 2 deuten auf schnelle Reaktionen des Grundwasserspiegels gegenüber Regen- und Hochwasserereignissen hin, bei denen es zum Einschluss von Luftblasen aus der ungesättigten Zone kommt.

Die Aussagekraft der ermittelten und in Kapitel 3.3 diskutierten Mittleren Verweilzeiten kann für MVZ < 50 Jahre anhand von Abbildung 14 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags der Station Braunau den (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechneten) ursprünglichen Tritiumkonzentrationen und Infiltrationszeitpunkten der untersuchten Grundwässer gegenübergestellt (siehe Kapitel 2.5).

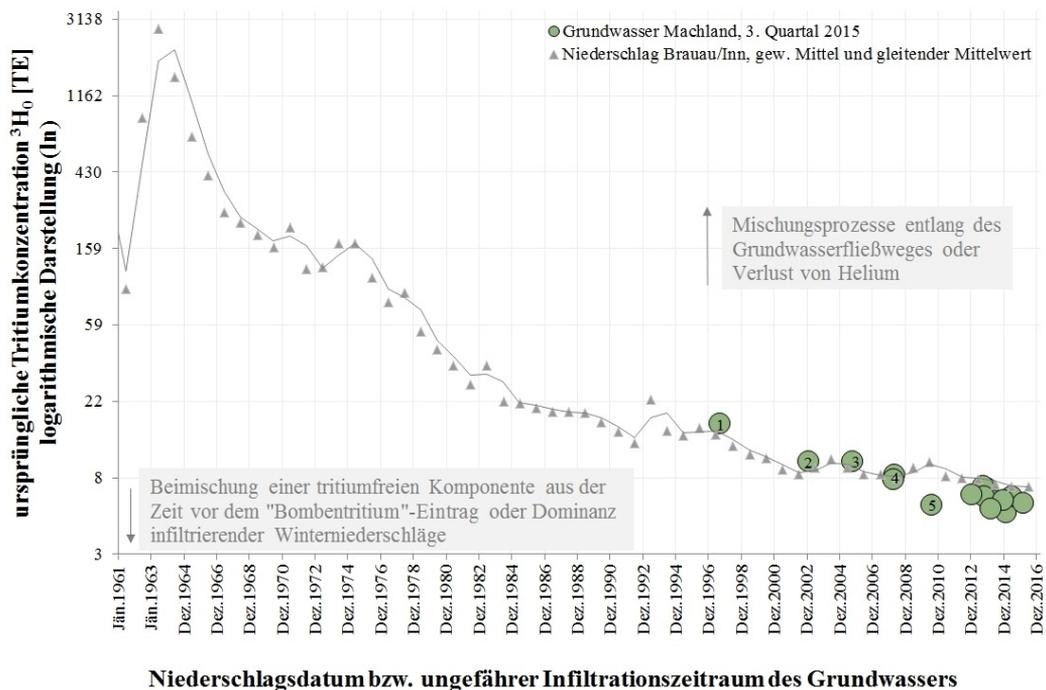


Abbildung 14: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Braunau (1961-2016) im Vergleich zu den rekonstruierten Tritiumkonzentrationen der ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Machland [DUJ]

- Anmerkungen: (1) PG41102012 (Arbing)
 (2) PG41114092 (Naarn im Machlande)
 (3) PG41103022 (Baumgartenberg)
 (4) PG41114022, PG41114012 (verdeckt) (Naarn im Machlande)
 (5) PG41116022 (Perg)

Die Grundwasserproben stimmen im Wesentlichen mit der Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen im Niederschlag überein. Der stärkere Einfluss infiltrierender Winterniederschläge oder tritiumfreier

Grundwasserkomponenten kann dazu führen, dass Proben etwas unterhalb der Niederschlagszeitreihe liegen. Bei der Messstelle PG41116022 in Perg (Punkt 5 in Abbildung 14) dürfte ein vermehrter Einfluss infiltrierender Winterniederschläge zur Abweichung von der Niederschlagszeitreihe führen.

3.3 DISKUSSION - ERGEBNIS

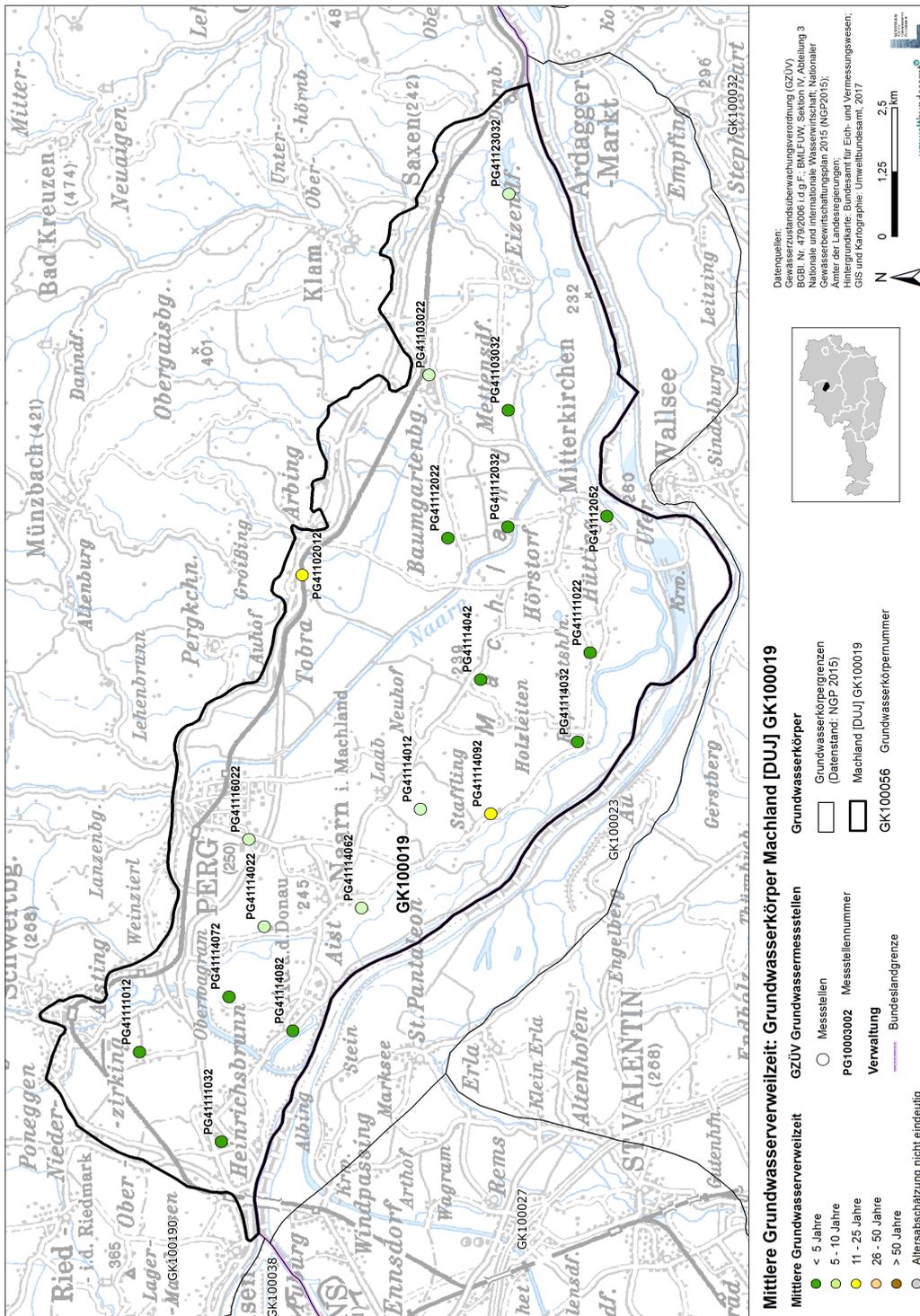


Abbildung 15: Mittlere Verweilzeiten der Grundwässer bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Machland [DUJ]

Der Einzelgrundwasserkörper Machland wird vorrangig durch stark durchlässige quartäre Sedimente aufgebaut. Als Grundwasserstauer fungiert im Wesentlichen das Schlierrelief. Maßgeblich für die

Grundwasserneubildung sind Grundwasserzuström aus der Böhmischer Masse aufgrund der der Einspeisung von Kluftwässern und Versickerung von kleinen Gerinnen am Südrand des Kristallins (LOHBERGER 1983) sowie die Versickerung von Niederschlägen. Darüber hinaus stehen die Fließgewässer des Machlandes, wie z.B. Aist und Naarn, in Interaktion mit dem Grundwasser. Die Donau ist gegenüber dem Grundwasser im Wesentlichen abgedichtet, die Vorflut für das Grundwasser bilden die Donaubegleitgräben (z.B. Aist-Mühlbach, Mitterwasser) (BREINER 1976). Die Wasserstände in diesem Grabensystem wirken sich flächenhaft auf das Grundwasser aus. So können u.a. Hochwasserereignisse und der damit verbundene Rückstau der Donau in die Gerinne des Machlandes einen langanhaltenden Einfluss auf die Grundwassersituation im Machland ausüben, das - wie das Tullnerfeld - als Retentionsraum für die Donau fungiert.

Entsprechend der hydrogeologischen Gegebenheiten des Machlandes sind für die untersuchten GZÜV-Grundwassermessstellen vorwiegend geringe Mittlere Verweilzeiten zu verzeichnen. Elf Messstellen weisen Mittlere Verweilzeiten von < 5 Jahren auf, für sechs Messstellen wurden Verweilzeiten von 5-10 Jahren ermittelt. Zwei Messstellen fallen in die Kategorie 11-25 Jahre. Bei keiner Messstelle wurden Mittlere Verweilzeiten von 26-50 Jahren bzw. > 50 Jahre ermittelt.

Aus hydrografischer Sicht fielen zwei der vier im Rahmen des Projektes durchgeführten Probenahmen (Oktober 2015, Februar 2016) in eine Phase niedriger Grundwasserstände im Grundwasserkörper Machland (siehe Abbildung 16). Ab Juli 2015 liegen die Grundwasserstände unter dem langjährigen Mittelwasserstand. Verursacht wurden die niedrigen Grundwasserstände durch die unterdurchschnittlichen bzw. ausbleibenden Niederschläge sowie überdurchschnittlichen Temperaturen im Sommer, Herbst und Winter des Jahres 2015 im Gebiet des Machlandes (siehe Hydrologische Charakteristiken des Landes Oberösterreich).

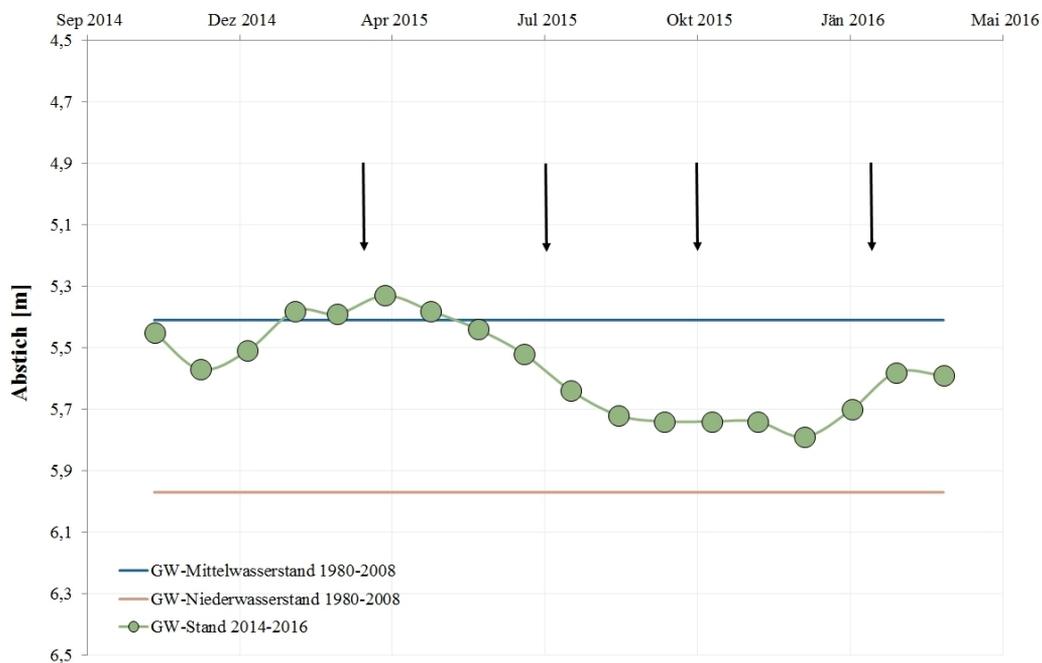


Abbildung 16: Grundwasserstand Brunnen Nördl. Machland, BR 92.15: Abstiche im Zeitraum 2014-2016 (Monatsmittelwerte) im Vergleich zum langjährigen Niedrig- und Mittelwasserstand im Zeitraum 1980-2008 (Quelle: Hydrographischer Dienst Oberösterreich)
Der langjährige Hochwasserstand (1980-2008) ist nicht dargestellt, er liegt bei 0,69 m.
Die Zeitpunkte der Probenahmen sind mit Pfeilen markiert.

Eine zuverlässige Abschätzung der Mittleren Verweilzeiten basierend auf der Tritium-Helium-Methode ist für 16 der 19 beprobten Grundwässer des Machlandes möglich. Für die der verbleibenden Messstellen ohne Analyse der Edelgasisotope wurde die Abschätzung der Mittleren Verweilzeiten auf Basis der $\delta^{18}\text{O}$ -, $\delta^2\text{H}$ -

und Tritiumwerte in Zusammenschau mit chemisch-physikalischen Parametern und hydrographischen Daten (Grundwasserstände, Pegel- und Niederschlagsdaten) vorgenommen (Tabelle 2).

Der überwiegende Teil der untersuchten Grundwassermessstellen weist keine bzw. lediglich geringfügige Mengen tritiogenen Heliums auf und indiziert somit aktuelle Grundwasserneubildung. Diese Messstellen fallen in die **MVZ-Kategorie < 5 Jahre**:

Die nahe der Mündung der Aist in die Donau gelegene Messstelle **PG41114082** in der Gemeinde Naarn im Machlande weist die leichtesten Sauerstoff-18-Gehalte aller untersuchten Messstellen auf. Zudem sind die Sauerstoff-18-Werte der Messstelle durch eine ausgeprägte Saisonalität gekennzeichnet und lassen darauf schließen, dass PG41114082 neben zuströmendem Grundwasser und Uferfiltrat der Aist markant durch rückstauendes Donauwasser dotiert wird. Die Nitratkonzentration beträgt ca. 10 mg/l.

Bei den Messstellen **PG41111012** in Schwertberg und **PG41112032** in Mitterkirchen spiegeln eine geringe Mineralisierung des Grundwassers und leichtere, saisonal variable Sauerstoff-18- und Deuteriumwerte den Einfluss von Oberflächengewässern (Aist bzw. Naarn) wider. Die mittleren Nitratkonzentrationen liegen entsprechend niedrig bei ~5 mg/l bzw. ~12 mg/l.

PG41114072 in der Gemeinde Naarn im Machlande ist durch eine Mischung aus lokal versickernden Niederschlägen und zu einem geringeren Anteil durch Infiltration von Wasser der Aist gekennzeichnet. Auffällig sind der erhöhte Orthophosphatgehalt (~0,34 mg/l) sowie eine hohe Mangankonzentration von ~0,17 mg/l bei gleichzeitig sehr niedriger Eisenkonzentration (~0,0025 mg/l). Obgleich das Grundwasser der Messstelle nahezu sauerstofffrei ist (~0,35 mg/l), beträgt der Nitratgehalt ~16 mg/l.

Die Messstellen **PG411103032** in Baumgartenberg und **PG41111032** in Mauthausen sind durch höher mineralisiertes Wasser gekennzeichnet. Sauerstoff-18- und Deuteriumwerte weisen geringfügige bzw. keine Saisonalität auf und indizieren lokale Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge bzw. zuströmendes Grundwasser. Die Nitratgehalte liegen bei ~16 mg/l bzw. ~27 mg/l.

Die beiden in der Gemeinde Mitterkirchen befindlichen Messstellen **PG41111022** und **PG41112022** erhalten Grundwasserneubildung durch infiltrierende Niederschläge sowie zuströmendes Grundwasser und fallen in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre. PG41111022 weist eine geringfügige Beimischung radiogenen Heliums auf. Der hohe ΔNe -Wert (25 %) deutet auf eine schnelle Reaktion des Grundwasserspiegels (Entnahmen, Regenereignisse) hin. Bei PG41112022 ist möglicherweise von saisonaler Infiltration aus einem Oberflächengewässer auszugehen. Auffällig bei dieser Messstelle ist der erhöhte Sulfatgehalt des Grundwassers (~55 mg/l).

Die Messstelle **PG41112052** in Mitterkirchen weist einen hohen Variationskoeffizienten für Sauerstoff-18 auf, beruhend auf einem sehr leichten Sauerstoff-18-Wert im April 2015, während bei allen folgenden Beprobungen wesentlich „schwerere“ Sauerstoff-18- und Deuteriumwerte ohne nennenswerte Variabilität ermittelt wurden. Analog besteht auch hinsichtlich der Mineralisierung des Grundwassers von PG41112052 ein wesentlicher Unterschied zwischen den genannten Quartalen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Messstelle vorrangig durch lokale Grundwasserneubildung durch von Nordwesten zuströmendes Grundwasser sowie infiltrierende Niederschläge gekennzeichnet ist, ereignisbezogen oder saisonal jedoch auch eine Dotierung durch Donauwasser über den Mitterwasser Zubringer erfolgt. Die landwirtschaftliche Nutzung des Einzugsgebietes der Messstelle spiegelt sich u.a. in einem Nitratgehalt von ~31 mg/l wider.

Zwei im Bereich der Niederterrasse situierte Messstellen in der Gemeinde Naarn im Machlande, **PG41114032** und **PG41114042**, zeigen eine höhere Gesamthärte und werden durch infiltrierende Niederschläge sowie aus nördlicher Richtung zuströmendes Grundwasser geprägt. Die Einzugsgebiete

beider Messstellen unterliegen landwirtschaftlicher Beeinflussung. Die Nitratkonzentrationen betragen ~52 mg/l bzw. ~28 mg/l.

Für sechs Messstellen wurden **Mittlere Verweilzeiten von 5-10 Jahren** bestimmt:

Die im Bereich der Niederterrasse auf 19 m abgeteufte Messstelle **PG41103022** in Baumgartenberg erschließt überwiegend aus der Böhmisches Masse zuströmendes Grundwasser bzw. infiltrierende Niederschläge. Die Messstelle erhält zumindest saisonal Infiltration aus dem Tobrakanal. Bei PG41103022 wurde der höchste Gehalt an radiogenem Helium ermittelt, der in Zusammenhang mit Zustrom von Wasser aus den kristallinen Gesteinen der Böhmisches Masse bzw. den in der näheren Umgebung verlaufenden lokalen Störungszonen und den damit verbundenen Wegsamkeiten für Gase und Wässer stehen dürfte. Auffällig ist die höhere Sulfatkonzentration (~58 mg/l).

Die Messstellen **PG41114012** und **PG41114022** in der Gemeinde Naarn im Machlande sowie **PG41116022** in Perg befinden sich im Bereich der Niederterrasse und sind durch Grundwasserneubildung aus lokalen Niederschlägen und zuströmendem Grundwasser gekennzeichnet. Auffällig sind die hohen Natrium- und Chloridkonzentrationen von ~39 bzw. ~80 mg/l des im Umfeld der Straßenmeisterei Perg gelegenen Brunnens PG41116022.

Die Messstelle **PG41114062** in der Gemeinde Naarn im Machlande fällt in die MVZ-Kategorie 5-10 Jahre und wird vorwiegend durch im Bereich des Oberes Hochflutniveau infiltrierende Niederschläge sowie zuströmendes Grundwasser geprägt. Die stabilen Isotope zeigen eine geringfügige Saisonalität, die auf Infiltration aus in der Nähe gelegenen Gerinnen (z.B. Aist-Mühlbach) zurückzuführen sein dürfte. Die untersuchten hydrochemischen Parameter zeichnen sich durch eine hohe Konstanz aus. Die Nitratkonzentration beträgt etwa ~16 mg/l.

PG41123032 in der Gemeinde Saxen liegt im Bereich der Jüngsten Austufe unmittelbar nördlich der Naarn und ist durch stagnierende Verhältnisse geprägt. Die Messstelle zeigt eine Mischung aus zuströmendem Grundwasser bzw. infiltrierenden Niederschlägen sowie infiltrierendem Naarnwasser. Die Mittlere Verweilzeit liegt bei 5-10 Jahren.

Zwei Messstellen sind durch hohe tritiogene Heliumkonzentrationen gekennzeichnet und dementsprechend in die **MVZ-Kategorie 11-25 Jahre** einzuordnen. Dabei handelt es sich zum einen um die in der Gemeinde Arbing im Bereich der Niederterrasse gelegene Messstelle **PG41102012**, zum anderen um die Messstelle **PG41114092** (Gemeinde Naarn im Machlande) im Bereich des Oberen Hochflutniveaus. Beide Messstellen weisen markante Beimischungen radiogenen Heliums auf, das auf die uran- und thoriumhaltige Gesteine der Böhmisches Masse zurückzuführen sein dürfte. Die Mittlere Verweilzeit von PG41114092 ist eher im unteren Bereich der Kategorie 11-25 Jahre einzuordnen. Die Nitratkonzentration beträgt ~28 mg/l. Maßgeblich für die Grundwasserneubildung bei PG41102012 dürfte der Zustrom von Wasser aus dem kristallinen Hügelland sein. Auffällig ist die höhere Orthophosphatkonzentration (~0,32 mg/l). Die Nitratkonzentration beträgt ~11 mg/l.

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Grundwassermessstellen im Machland als charakteristisch für lokale Grundwasservorkommen mit vorrangig kurzen Mittleren Verweilzeiten beschreiben. Dementsprechend ergibt sich eine **erhöhte Empfindlichkeit dieser Wasserressourcen** gegenüber Änderungen im Wasserhaushalt sowie bewirtschaftungsbedingten Änderungen der Wasserqualität.

TABELLE 2: GRUNDWASSERKÖRPER MACHLAND [DUJ]: ISOTOPENDATEN UND MITTLERE VERWEILZEITEN

Messstelle	Einheit	Teufe	$\delta^{18}\text{O}$	VarK $\delta^{18}\text{O}$	^3H 3. Quartal 2015	^3H 1. Quartal 2016	$^3\text{He}_{\text{trit}}$	$^4\text{He}_{\text{radio}}$	ΔNe	MVZ-Kategorie
			[m u. GOK]	[% V-SMOW]	[%]	[TE]	[TE]	[TE]	[Nml/kg]	[%]
PG41102012	Niederterrasse		-10,08	0,7	6,0	5,8	10,4	2,55E-05	14	11-25
PG41103022	Niederterrasse	19	-10,02	1,3	5,8	4,5	4,3	1,41E-04	8	5-10
PG41103032	Niederterrasse	8,1	-9,86	1,2	5,0	5,3	0,2	7,62E-21	11	<5
PG41111012	Niederterrasse	10	-10,18	1,2	6,5	5,3	0,6	2,54E-21	14	<5
PG41111022	Oberes Hochflutniveau		-9,91	0,4	5,6	4,4	0,4	4,96E-06	25	<5
PG41111032	Oberes Hochflutniveau	8	-9,86	0,5	6,6		0,7	8,55E-07	19	<5
PG41112022	Moor		-10,04	2,0	5,8	4,2	0,6	2,00E-06	9	<5
PG41112032	Niederterrasse	6	-10,32	4,5	6,4	4,4	0,0	0,00E+00	17	<5
PG41112052	Oberes Hochflutniveau	8,5	-10,07	5,1	6,1	7,1	0,0	1,03E-05	9	< 5
PG41114012	Niederterrasse	13	-9,98	0,5	5,6	4,4	2,8	6,75E-06	11	5-10
PG41114022	Niederterrasse	12	-10,05	0,5	5,3	4,6	2,7	9,45E-06	8	5-10
PG41114032	Niederterrasse	7	-9,84	0,1	5,9	5,2	0,2	4,04E-06	0	<5
PG41114042	Niederterrasse		-9,96	0,6	5,7	4,2	0,9	1,06E-05	8	<5
PG41114062	Oberes Hochflutniveau		-9,81	1,1	8,6	4,3				5-10*
PG41114072	Oberes Hochflutniveau	15	-9,78	2,3	5,0	5,1	0,4	0,00E+00	14	<5
PG41114082	Talfüllung		-10,47	4,8	8,3	3,7				<5*
PG41114092	Oberes Hochflutniveau	8	-9,95	0,5	5,0	3,8	5,1	3,22E-05	37	11-25
PG41116022	Niederterrasse	7,8	-9,91	0,7	4,3	5,0	1,4	2,83E-08	31	5-10
PG41123032	Jüngste Austufe	7,4	-10,17	0,6	4,8	4,9				5-10*

Anmerkung:

* Altersabschätzung mit höheren Unsicherheiten behaftet, da keine Helium-3-Messwerte für Altersberechnung verfügbar.

4 WELSER HEIDE [DUJ]

4.1 ÜBERBLICK

DIE WELSER HEIDE IST EINE EBENE am Unterlauf der Traun und reicht von Lambach bis Hörsching. Sie umfasst die Austufe und die daran angrenzenden Terrassenkörper des Trauntales, welche einst eine wenig fruchtbare Sand- und Schotterfläche war, die durch jahrhundertlange Schlierdüngung fruchtbar wurde. Heute ist die Welser Heide relativ dicht besiedelt.



Abbildung 17: Welser Heide, Oberösterreich

Der Grundwasserkörper Welser Heide wird im Nordwesten vom Schlierhügelland und im Südosten von der Traun-Enns-Platte begrenzt. Der Grundwasserleiter setzt sich aus unterschiedlich alten quartären Schottern zusammen.

Der Grundwasserstrom fließt vom Südwesten Richtung Nordosten und folgt dem Verlauf der Traun, die auch immer wieder Wasser in den Grundwasserkörper infiltriert. Das versickernde Niederschlagswasser und der Grundwasserzustrom spielen ebenfalls eine Rolle bei der Grundwasserneubildung.

Der Grundwasserleiter ist stark durchlässig und verfügt über Deckschichten mit einer mittleren Mächtigkeit von 3 m, die ca. die Hälfte der Gebietsfläche mit äolischen Sedimenten wie Löß oder Aulehm bedecken. Der mittlere Grundwasserflurabstand liegt bei 11 m.

In der Welser Heide gibt es zahlreiche Industrie- und Privatbrunnen, sowie auch das Wasserwerk Scharlitz der Linzer Stadtbetriebe, die das Grundwasser nutzen. Neben den Brunnenanlagen wird der Grundwasserstrom der Welser Heide auch durch die Flußkraftwerke beeinflusst (Welser Wehr, Kraftwerk

Marchtrenk, Kraftwerk Traun-Pucking, Kraftwerk Kleinmünchen etc.). Die Welser Heide ist außerdem stark durch landwirtschaftliche Bewirtschaftung geprägt.

Im Grundwasserkörper Welser Heide wurden 22 von 22 Messstellen ausgewählt, die für die Ermittlung der mittleren Verweilzeit des Wassers herangezogen wurden. Eine detaillierte Beschreibung des Grundwasserkörpers ist im Anhang enthalten.

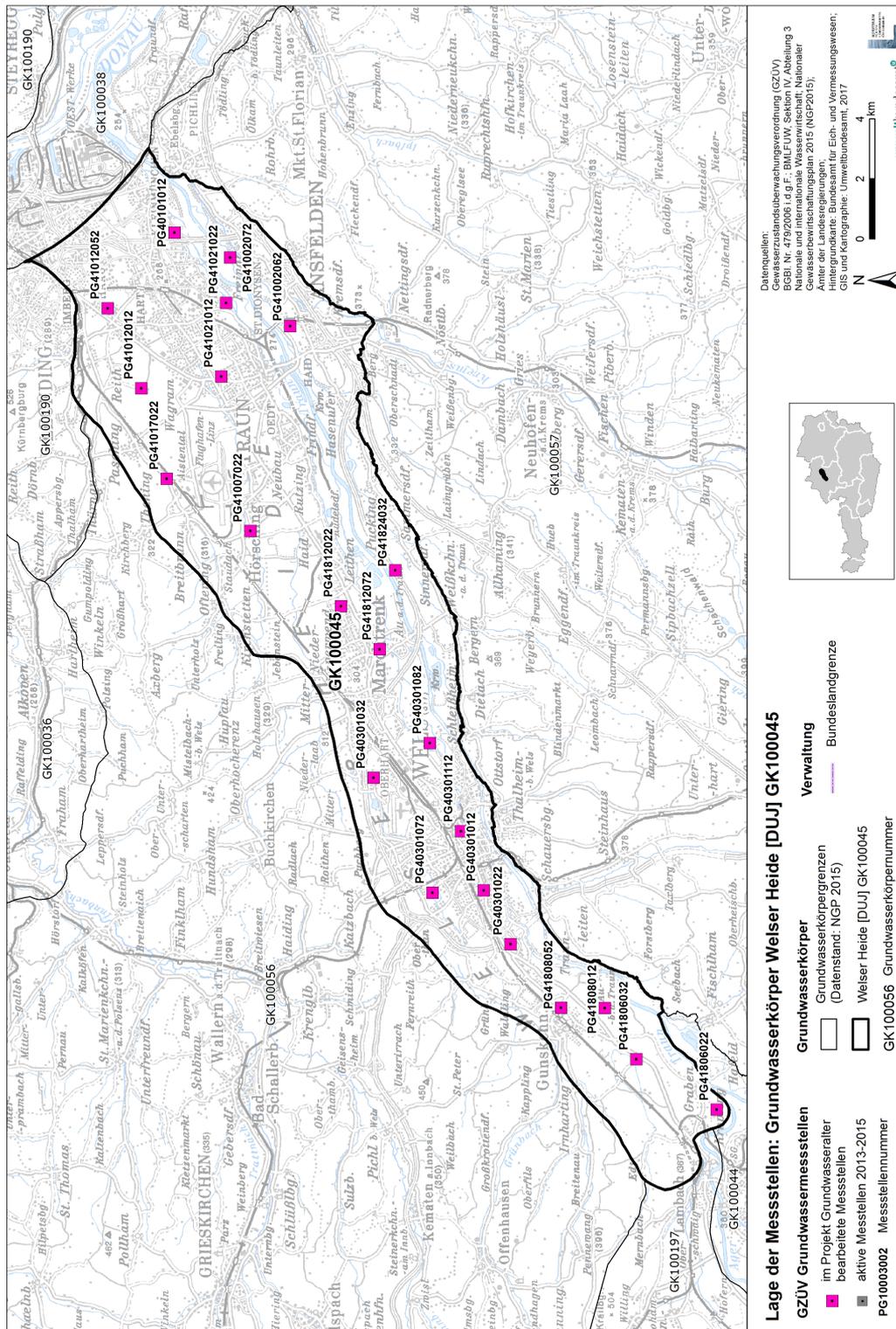


Abbildung 18: Übersichtskarte Grundwasserkörper Welser Heide [DUJ] mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen

4.2 ERGEBNISSE

4.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM

Die graphische Gegenüberstellung der Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen im Niederschlag, Grund- und Oberflächengewässer in Abbildung 19 erlaubt Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen und Mischungsprozesse der lokalen Grundwasservorkommen.

Die stabilen Isotopendaten der beprobten Niederschlagswässer in Braunau sowie der Grund- und Oberflächengewässer in der Welser Heide sind in Abbildung 19 dargestellt.

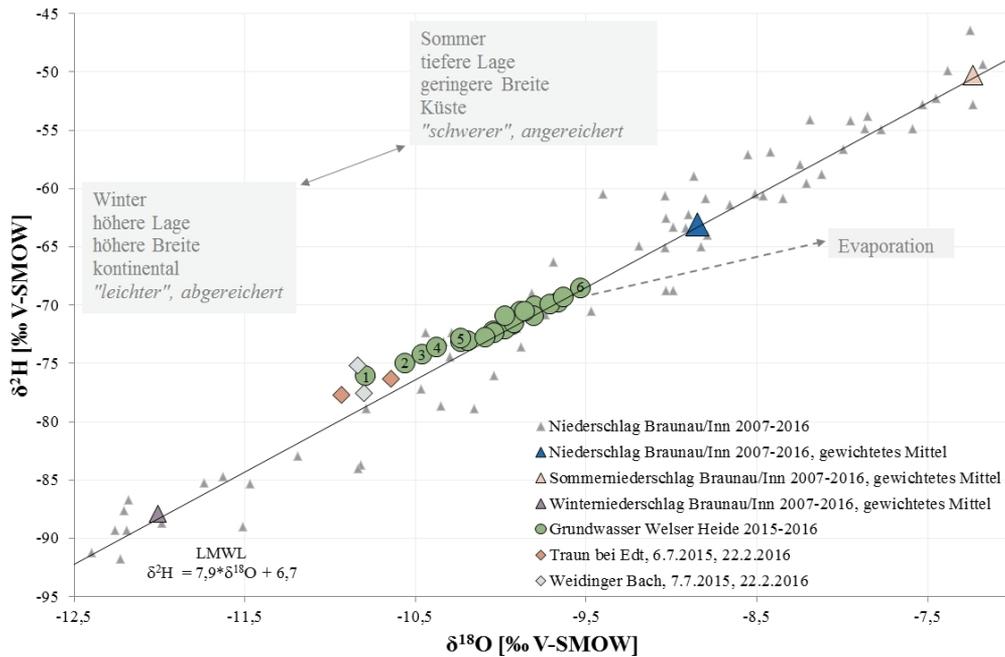


Abbildung 19: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen des Grundwasserkörpers Welser Heide [DUJ] im Vergleich zu Oberflächengewässern (Traun, Weidinger Bach) sowie dem Niederschlag in Braunau (2007-2016)

Anmerkungen: (1) PG41806022 (Edt bei Lambach)

(2) PG40301022 (Wels)

(3) PG41808012 (Gunskirchen)

(4) PG40301082 (Wels)

(5) PG41021022 (Traun)

(6) PG40301072 (Wels)

Die isotopische Zusammensetzung des Grundwassers im Grundwasserkörper Welser Heide weicht von der mittleren Zusammensetzung des Niederschlags an der Station Braunau ab (Abbildung 19). Das Grundwasser ist durch vergleichsweise abgereicherte, leichtere Werte gekennzeichnet. Dies liegt daran, dass ein Großteil des Grundwassers in den Wintermonaten neugebildet wird. Auch der Einfluss von ins Grundwasser infiltrierenden Oberflächengewässern bewirkt eine Verschiebung hin zu leichteren Isotopenwerten. Das Einzugsgebiet der Traun im Salzkammergut und die einiger ihrer Zuflüsse liegen deutlich höher als das Gebiet der Welser Heide, so dass die Oberflächengewässer durch entsprechend abgereicherte Isotopenwerte gekennzeichnet sind. Grundwassermessstellen, die in Abbildung 19 näher am gewichteten Niederschlagsmittel abbilden, sind stärker durch lokale Niederschläge, welche im Bereich der Hoch- und Niederterrassen der Welser Heide versickern, beeinflusst.

Das Grundwasser der Messstellen PG41806022 in Edt bei Lambach, PG40301022 in Wels, PG41808012 in Gunskirchen, PG40301082 in Wels und PG41021022 in Traun weist starke Einflüsse der Traun bzw. des Traun-Grundwasserbegleitstromes auf (Punkte 1 bis 5 in Abbildung 19).

Die am Nordrand von Wels situierte Messstelle PG40301072 (Punkt 6 in Abbildung 19) wird durch den Grünbach beeinflusst, dessen Einzugsgebiet im Schlierhügelland deutlich tiefer liegt.

4.2.2 Tritium/Helium-3

Radiogene, tritiogene und Mantelkomponenten des Heliums im beprobten Grundwasser der Welser Heide können anhand der 3-Komponenten-Darstellung in Abbildung 20 unterschieden werden. Diese Differenzierung erlaubt weitere Rückschlüsse auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie unterirdische Wasserwegsamkeiten.

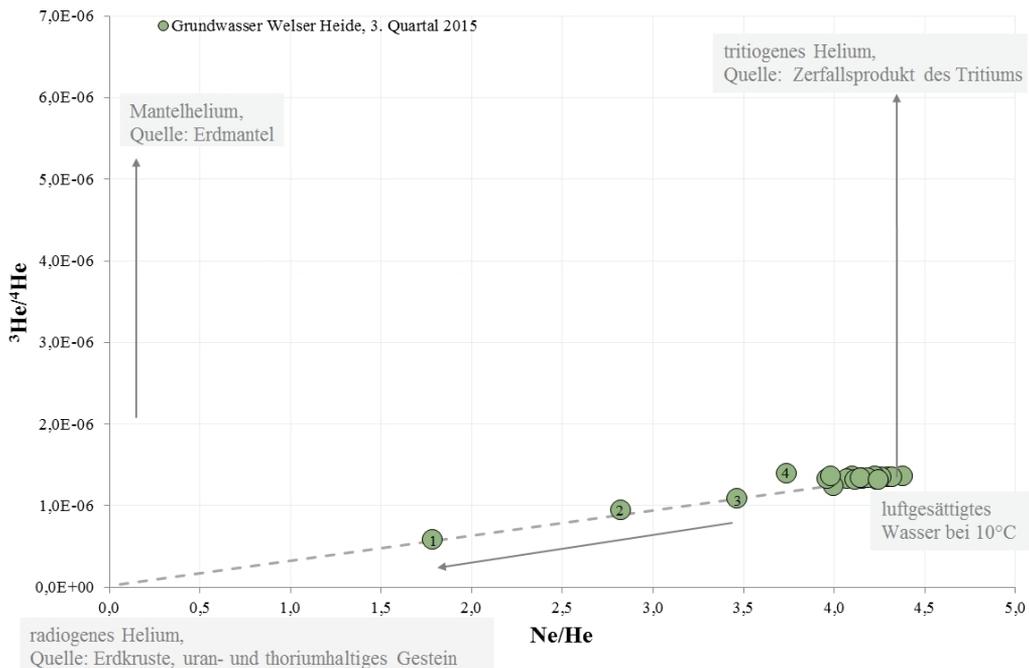


Abbildung 20: Heliumkomponenten des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Welser Heide [DUJ]

Anmerkungen: (1) PG41824032 (Weißkirchen an der Traun)
 (2) PG41012012 (Leonding)
 (3) PG40301112 (Wels)
 (4) PG41012052 (Leonding)

Vier Messstellen (PG41824032 in der Gemeinde Weißkirchen an der Traun, PG41012012 und PG41012052 in Leonding sowie PG40301112 in Wels) zeigen zum Teil hohe Anteile radiogenen Heliums. Der Nachweis von radiogenem Helium wird häufig mit dem Auftreten von Störungszonen und/oder tieferer Zirkulation von Grundwasserkomponenten sowie dem Kontakt mit uran- und thoriumhaltigen Gesteinen in Verbindung gebracht. Als Hauptquelle des Heliums kann im Bereich der Welser Heide das kristalline Grundgebirge vermutet werden.

Ein Vergleich mit der Karte der LANDSAT-Bildlineamente von Österreich 1:500.000 (BUCHROITHNER 1984) im DORIS Atlas 4.0 zeigt das Vorhandensein diverser Störungszonen mit potentiell erhöhten Wasser- und Gaswegigkeiten im Untersuchungsgebiet.

Tritogenes Helium-3 wurde an 6 von 21 Grundwassermessstellen nachgewiesen (Tabelle 3). Für eine Messstelle (PG41002062) liegen keine Heliumdaten vor. Zwei Messstellen (PG41012052 und PG41012012 in Leonding) zeigen vergleichsweise große Beimischungen von tritiogenem Helium-3. Tritogenes Helium-3 findet sich in Grundwässern, die während der Zeit des „Bombentritium“-Eintrags in den 1950er und 1960er Jahren infiltriert sind.

Der überwiegende Teil der untersuchten Messstellen gruppiert sich nahe der Heliumzusammensetzung von Wasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre und verweist dementsprechend auf kürzlich infiltriertes Grundwasser ohne zusätzliche terrigene bzw. tritiogene Heliumkomponenten.

Zum Teil hohe Luftüberschüsse in den Proben – ausgedrückt durch hohe ΔNe -Werte in Tabelle 3 deuten auf schnelle Reaktionen des Grundwasserspiegels gegenüber Regen- und Hochwasserereignissen hin, bei denen es zum Einschluss von Luftblasen aus der ungesättigten Zone kommt. Für eine Messstelle (PG41002072) ist einer negativer ΔNe -Wert zu verzeichnen, der auf Entgasungsprozesse (möglicherweise während der Probenahme) hindeutet.

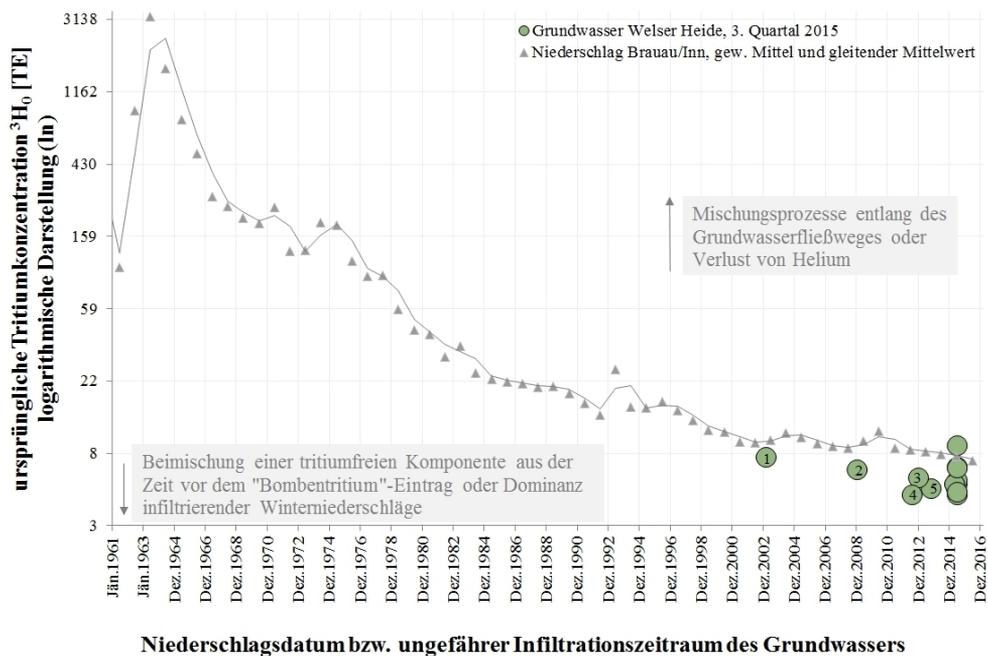


Abbildung 21: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Braunau (1961-2016) im Vergleich zu den rekonstruierten Tritiumkonzentrationen der ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Welser Heide [DUJ]

Anmerkungen: (1) PG41012052 (Leonding)
 (2) PG41012012 (Leonding)
 (3) PG41002072 (Ansfelden)
 (4) PG41824032 (Weißkirchen an der Traun)
 (5) PG40101012 (Linz)

Die Aussagekraft der ermittelten und in Kapitel 4.3 diskutierten Mittleren Verweilzeiten kann für $MVZ < 50$ Jahre anhand von Abbildung 21 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags der Station Braunau den (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechneten) rekonstruierten ursprünglichen Tritiumkonzentrationen und Infiltrationszeitpunkten der untersuchten Grundwässer gegenübergestellt (siehe Kapitel 2.5). Die Grundwasserproben liegen z.T. deutlich unterhalb der Niederschlagszeitreihe. Der starke Einfluss infiltrierender Winterniederschläge oder tritiumfreier Grundwasserkomponenten kann zu dieser Abweichung führen.

Die Tritiumgehalte des beprobten Grundwassers in der Welser Heide spiegeln im Wesentlichen die Isotopenzusammensetzung der lokalen Niederschläge wider. Im 3. Quartal 2015 zum Zeitpunkt der

Tritium-/Helium-Messungen dominierte aktuelle Neubildung des Grundwasser der beprobten Messstellen in der Welser Heide.

Im 1. Quartal 2016 weisen etwa 10 Messstellen Tritiumkonzentrationen < 4 TE und somit einen deutlichen Einfluss tritiumfreier Grundwasserkomponenten (mit MVZ > 50 Jahren) auf (Tabelle 3, Abbildung 21). Die Tritiummessungen in diesem Zeitraum korrespondieren mit sehr niedrigen Grundwasserständen im Grundwasserkörper Welser Heide, so dass an diesen Messstellen bei ausbleibender aktueller Grundwasserneubildung Wasser mit MVZ > 50 Jahren eine größere Beimischung im Grundwasser darstellt.

4.3 DISKUSSION - ERGEBNIS

Der Einzelgrundwasserkörper Welser Heide umfasst die Austufe und die daran angrenzenden Terrassenkörper des Unteren Trauntales zwischen Lambach im Südwesten und Linz im Nordosten. Der gut durchlässige quartäre Porengrundwasserkörper erstreckt sich über eine Fläche von 207 km². Das Schlierrelief wirkt als maßgebender Grundwasserstauer im Gebiet der Welser Heide. Die langfristige mittlere Jahresniederschlagssumme beträgt 875 mm mit einem Schwankungsbereich von 804 mm bis 972 mm (H₂O-FACHDATENBANK 2017).

Das Grundwasser fließt überwiegend parallel zur Traun in Richtung Nordosten. Abschnittsweise infiltriert auch Wasser der Traun und des Welser Mühlbaches in den Grundwasserkörper. Aus nordwestlicher Richtung versickern die das Tertiärhügelland (Grundwasserkörper Schlierhügelland) entwässernden Bäche, wie beispielsweise Zeilinger Bach, Grünbach, Perwendter Bach, Heidbach.

Einen wichtigen Faktor für die Grundwasserneubildung stellt vermutlich auch das infiltrierende Niederschlagswasser dar. Insbesondere auf den Schottern der Niederterrasse ist in der Regel nur eine dünne Bodenschicht ausgebildet. Aufgrund der geringmächtigen Deckschichten in diesen Bereichen ist allerdings auch mit rascher und häufiger Austrocknung zu rechnen.

Die Mittleren Verweilzeiten des Grundwassers im Schotterkörper der Welser Heide variieren im Bereich der MVZ-Kategorien von < 5 bis 11-25 Jahren (Tabelle 3), wobei junges Grundwasser der MVZ-Kategorie < 5 Jahre den Grundwasserkörper Welser Heide anteilmäßig dominiert. Allerdings variierte die Mittlere Verweilzeit an vielen Messstellen in Abhängigkeit von den hydrografischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme.

Zwei der vier durchgeführten Probenahmen fielen in eine Phase extrem niedriger Grundwasserstände im Grundwasserkörper Welser Heide (siehe Abbildung 22). Im Dezember 2015 und Jänner 2016 erreichten die Grundwasserstände den langjährigen Niedrigwasserstand bzw. lagen knapp darüber. Verursacht wurden die niedrigen Grundwasserstände durch die unterdurchschnittlichen bzw. ausbleibenden Niederschläge sowie überdurchschnittlichen Temperaturen im Sommer, Herbst und Winter des Jahres 2015 im Gebiet der Welser Heide (siehe Hydrologische Charakteristiken des Landes Oberösterreich).

Die unterschiedlichen hydrographischen Bedingungen zwischen den Probenahmen im Juli/August 2015 und Februar/März 2016 bewirken bei etlichen Messstellen des Grundwasserkörpers Welser Heide eine wesentliche Änderung der Anteile der einzelnen Alterskomponenten an der Verweilzeitenverteilung. Während bei der Beprobung der Messstellen im Sommer 2015 im Hinblick auf die Isotopendaten aktuelle Grundwasserneubildung dominierte und somit vorwiegend (sehr) junge Komponenten erfasst wurden, bewirkten Trockenheit und damit verbundenen Niedrigwasserstände im Grundwasser sowie in Oberflächengewässern im Herbst 2015 und Winter 2015/2016 eine deutliche Reduktion dieser jungen Anteile. Ältere Komponenten, die unter durchschnittlichen Bedingungen nur einen sehr geringen Anteil im beprobten Grundwasser aufweisen, stellen zu diesem Zeitpunkt den dominierenden Anteil im Grundwasser etlicher Messstellen.

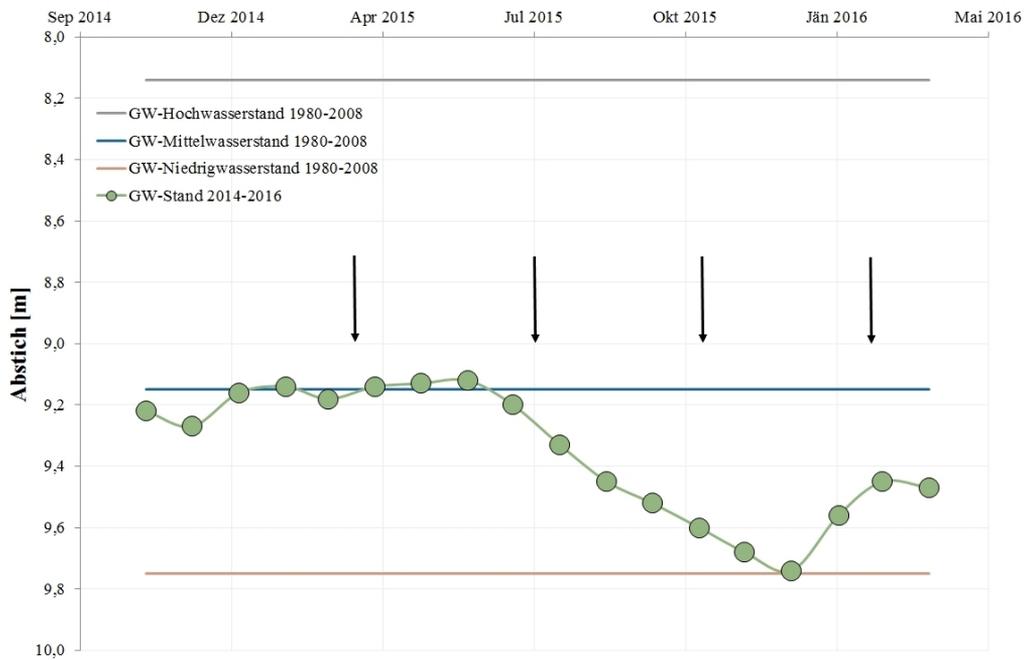


Abbildung 22: Grundwasserstand Brunnen Welser Heide BR 21.09: Abstiche im Zeitraum 2014-2016 (Monatsmittelwerte) im Vergleich zum langjährigen Niedrig-, Hoch- und Mittelwasserstand im Zeitraum 1980-2008 (Quelle: Hydrographischer Dienst Oberösterreich). Die Zeitpunkte der Probenahmen sind mit Pfeilen markiert.

Insgesamt 16 Messstellen des Grundwasserkörpers Welser Heide fallen in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre, fünf Grundwassermessstellen fallen in die MVZ-Kategorie 5-10. Eine Messstelle weist Mittlere Verweilzeiten im Bereich von 11-25 Jahren auf (Tabelle 3).

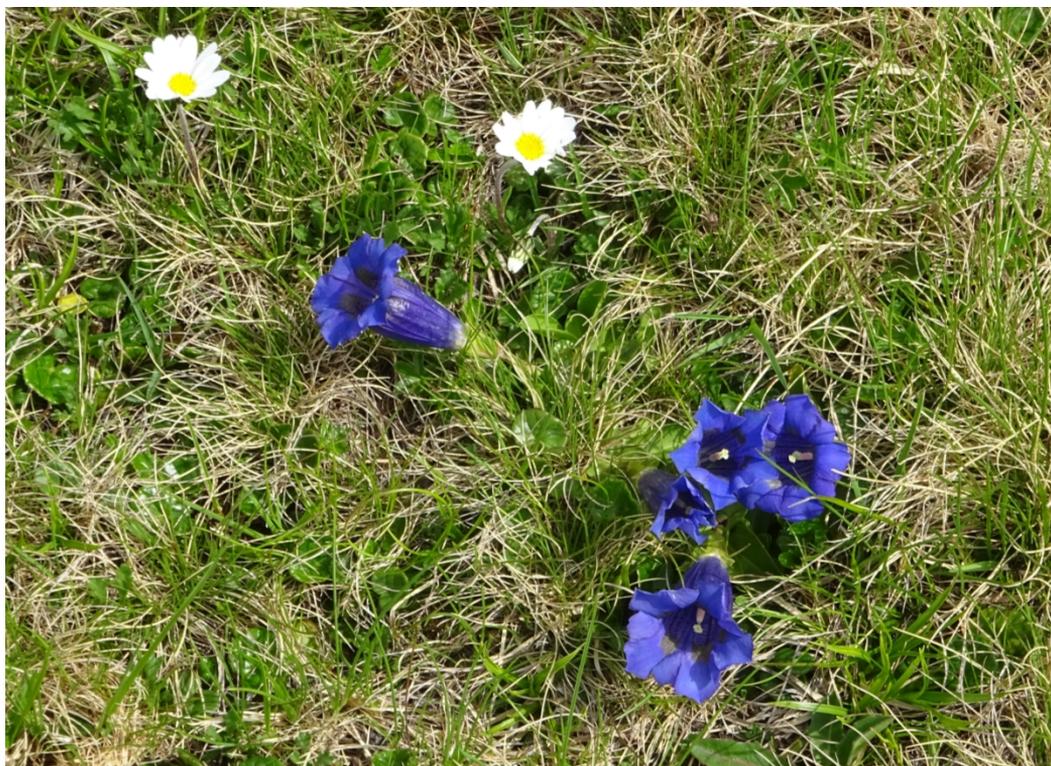


Abbildung 23: Enzian

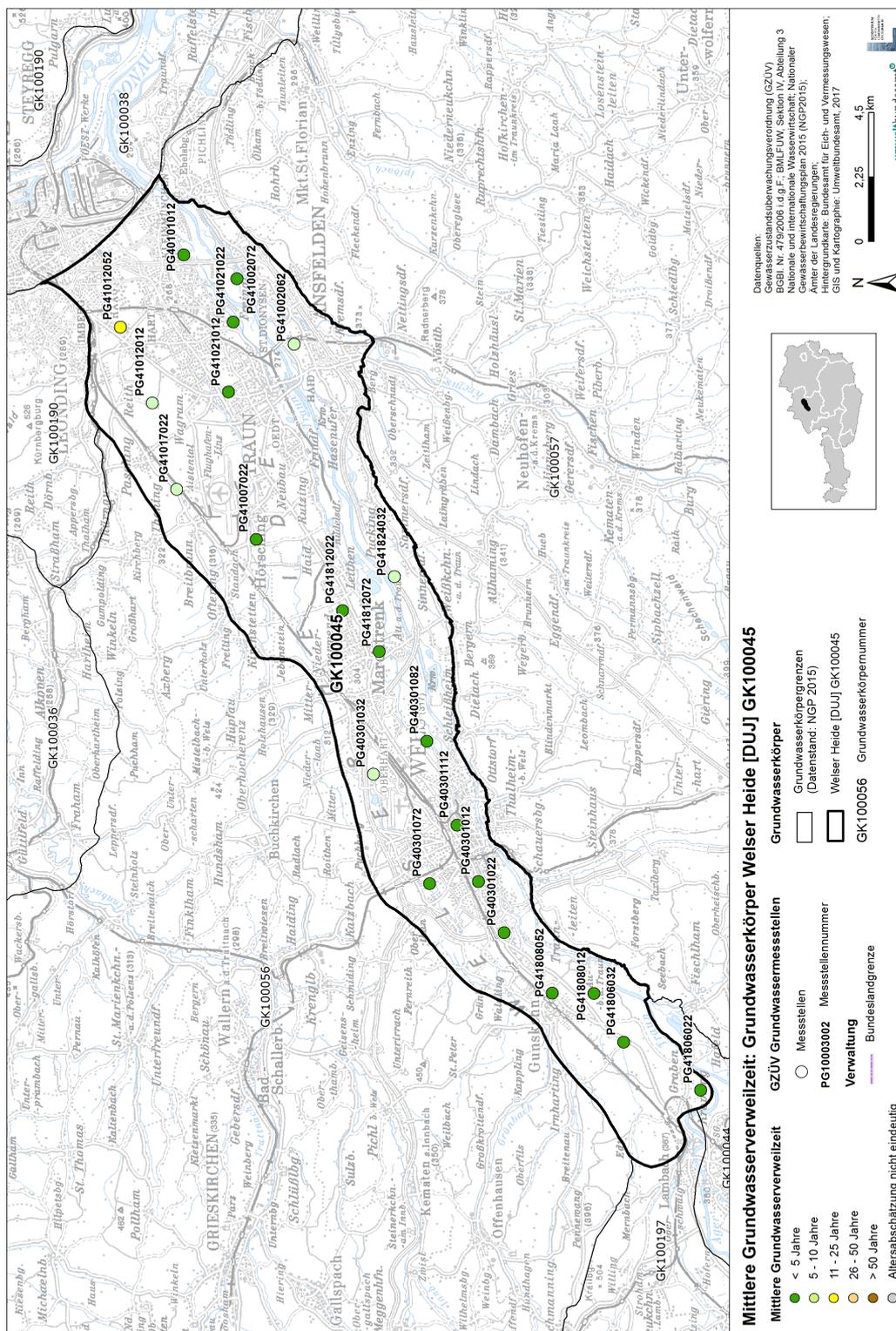


Abbildung 24: Mittlere Verweilzeiten der Grundwasser bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Welser Heide [DUJ]

Fünf Messstellen der MVZ-Kategorie < 5 Jahre, die überwiegend im Bereich von Talfüllung und Niederterrasse liegen, sind durch starke Interaktion mit der Traun und dem Welser Mühlbach gekennzeichnet. Die stabilen Isotopenwerte (siehe Abbildung 19) deuten hier auf überwiegende bzw. erhebliche Anteile von Uferfiltrat.

So weisen **PG41806022**, in der Gemeinde Edt bei Lambach in der Traunschleife und **PG41808012** in der Gemeinde Gunskirchen gelegen, vergleichsweise leichte Sauerstoff-18-Werte auf und werden primär durch infiltrierendes Wassers aus der Traun bzw. deren Grundwasserbegleitstrom beeinflusst. Die Messstellen **PG40301022** in Wels, **PG40301082** in Wels (Unteres Hochflutniveau/Welser Mühlbach) und **PG41021022** in Traun (Talfüllung/Welser Mühlbach) sind vorwiegend durch den von der Traun gespeisten Welser Mühlbach beeinflusst. Alle fünf Messstellen sind durch vergleichsweise geringe Konzentrationen an Nitrat (< 20 mg/l) und charakteristische Abnahmen der Chloridkonzentrationen ab September 2005 gekennzeichnet.

Zu diesem Zeitpunkt wurde die Sodaproduktion im Werk Ebensee der Solvay AG eingestellt, was zu verminderten Chloridkonzentrationen in der Traun und in der Folge im kommunizierenden Grundwasser führte. Diese Entwicklung ist in Abbildung 25 beispielhaft für die Messstelle PG41808012 in Gunskirchen dargestellt.

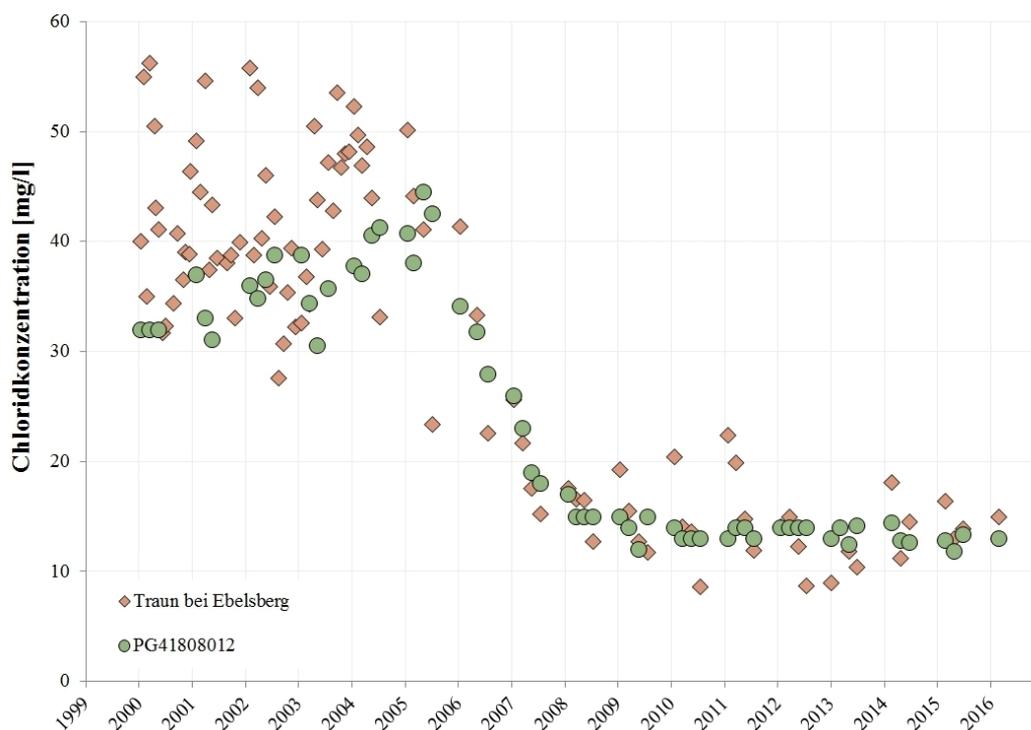


Abbildung 25: Chloridkonzentration der Traun bei Ebelsberg und an der Grundwassermessstelle PG41808012 im Zeitraum 2000-2016

Zwei im Bereich der Niederterrasse auf 28 m bzw. 26 m abgeteufte Brunnen - **PG41806032** in der Gemeinde Edt bei Lambach sowie **PG41808052** in Gunskirchen - erschließen überwiegend aus westlicher Richtung zuströmendes Grundwasser und erhalten möglicherweise saisonale Infiltration aus dem Zeilinger Bach bzw. seinen Nebengerinnen. Beide Messstellen unterliegen landwirtschaftlicher Beeinflussung. PG41806032 in der Gemeinde Edt bei Lambach weist im Beobachtungszeitraum zeitweilig Nitratkonzentrationen über dem Schwellenwert der QZV Chemie GW (45 mg/l) auf. Auch diese Messstellen fallen in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre.

Die im Stadtgebiet von Wels gelegenen Schachtbrunnen **PG40301012** und **PG40301112** sind durch eine Mischung aus infiltrierenden Niederschlägen und Grundwasser des Traunbegleitstromes gekennzeichnet. Beide Messstellen enthalten kein tritiogenes Helium und fallen in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre. Die Nitratkonzentrationen liegen im Bereich von 30 mg/l.

Die beiden möglicherweise zeitweilig durch den Grünbach beeinflussten Messstellen **PG40301072** und **PG40301032** in der Gemeinde Wels weisen MVZ im Bereich < 5 bzw. 5-10 Jahren und Nitratkonzentrationen im Bereich von 23 bis 34 mg/l auf.

Die in der Gemeinde Marchtrenk gelegene Messstelle **PG41812072** zeigt eine Mischung aus infiltrierenden Niederschlägen und Uferfiltrat des Welser Mühlbaches. Sie fällt in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre, auch wenn bei Grundwasserniedrigständen im 1. Quartal 2016 eine deutliche Beeinflussung durch tritiumfreies und damit älteres Grundwasser gegeben war. Die ebenfalls in der Gemeinde Marchtrenk gelegene Messstelle **PG41812022** wies im 1. Quartal 2016 ebenfalls einen hohen Anteil tritiumfreien Wassers auf, fällt aber auch in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre und wird überwiegend durch aktuelle Grundwasserneubildung aus Lokalniederschlägen geprägt. Die Nitratkonzentrationen an diesen Messstellen liegen im Bereich von 20 mg/l.

Der Schachtbrunnen **PG41021012** in der Gemeinde Traun fällt in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre und wird vorwiegend durch im Bereich der Niederterrasse infiltrierende Niederschläge geprägt. Die Nitratgehalte betragen etwa 33 mg/l.

Messstelle **PG40101012** in Linz zeigt eine saisonale Beeinflussung durch den Traun-Begleitstrom bzw. den Welser Mühlbach mit einer MVZ < 5 Jahre. Die Nitratkonzentration liegt auf niedrigem Niveau bei etwa 19 mg/l.

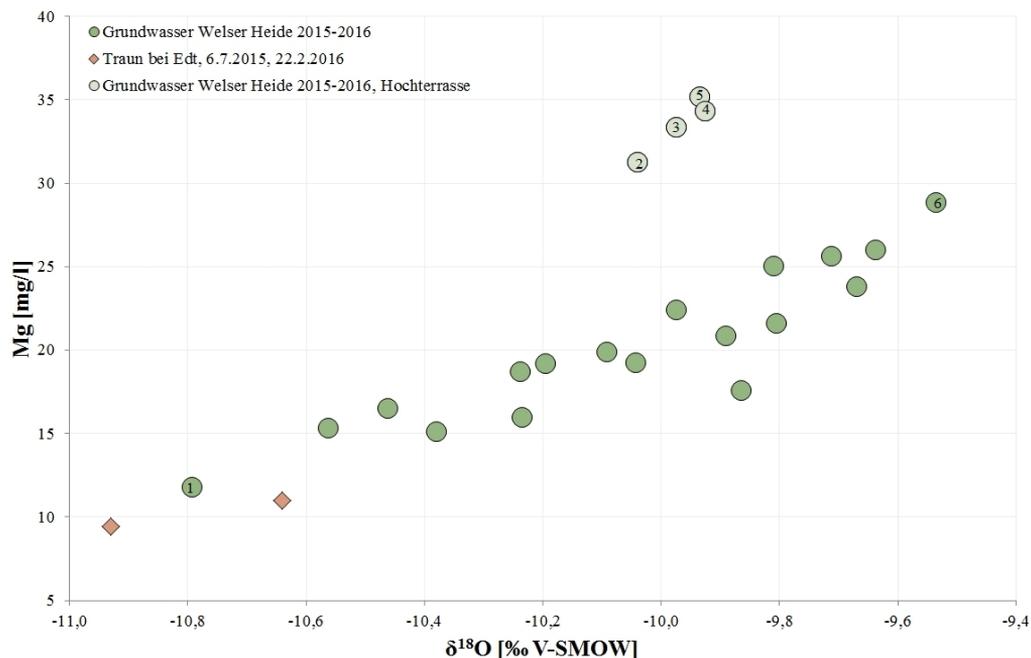


Abbildung 26: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Magnesiumkonzentrationen des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen des Grundwasserkörpers Welser Heide [DUJ]

Anmerkungen: (1) PG41806022 (Edt bei Lambach)

(2) PG41012052 (Leonding)

(3) PG41012012 (Leonding)

(4) PG41017022 (Pasching)

(5) PG41007022 (Hörsching)

(6) PG40301072 (Wels)

Vier Grundwassermessstellen - **PG41007022** in der Gemeinde Hörsching, **PG41012012** und **PG41012052** beide in der Gemeinde Leonding sowie **PG41017022** in der Gemeinde Pasching - liegen im Bereich der Hochterrasse. Die im Bereich der Hochterrasse infiltrierenden Grundwässer lassen sich vom übrigen Grundwasser im Untersuchungsgebiet durch die Gegenüberstellung der Magnesiumkonzentrationen und

Eine weitere Besonderheit an dieser Messstelle ist die erhebliche Saisonalität in Bezug auf die Parameter Chlorid, Natrium, Bor, Ammonium, Nitrit und DOC mit z.T. sehr hohen Konzentrationen der Grundwasserproben aus Juli und Oktober 2015. Hier ist gegebenenfalls von einem Abwassereinfluss auszugehen. Im Herbst 2015 liegen sowohl der Wasserstand der Traun als auch die Grundwasserstände in der Welser Heide nahe dem Bereich der langjährigen Niederwasserstände, die zu einer veränderten Zustromsituation an der Grundwassermessstelle führen können und in weiterer Folge möglicherweise die beobachteten Veränderungen im Chemismus des Grundwassers bewirken. Im Umfeld der Messstelle liegen mehrere kleinere Ortschaften und Gehöfte, auf der gegenüberliegenden Traunseite die Kläranlage Marchtrenk und die gesicherte Deponie Kappern.

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Grundwassermessstellen in der Welser Heide als charakteristisch für lokale Grundwasservorkommen mit überwiegend kurzen Mittleren Verweilzeiten beschreiben. Dementsprechend ergibt sich eine **erhöhte Empfindlichkeit dieser Wasserressourcen** gegenüber Änderungen im Wasserhaushalt sowie bewirtschaftungsbedingten Änderungen der Wasserqualität.

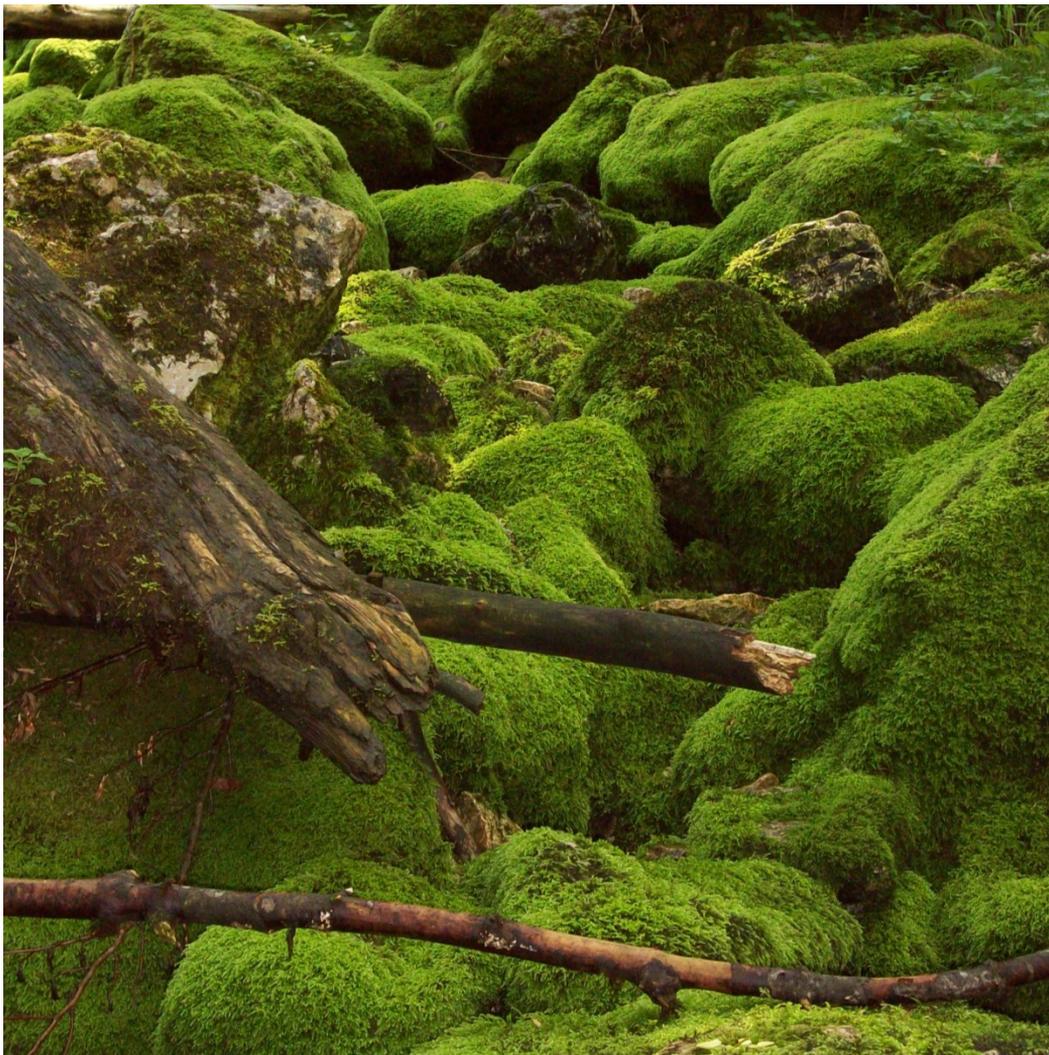


Abbildung 28: Zulauf zum Salzabach, © Elisabeth Stadler

TABELLE 3: GRUNDWASSERKÖRPER WELSER HEIDE [DUJ]: ISOTOPENDATEN UND MITTLERE VERWEILZEITEN

	Einheit	Teufe [m u. GOK]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰ V-SMOW]	VarK $\delta^{18}\text{O}$ [%]	^3H	^3H	$^3\text{He}_{\text{trit}}$ [TE]	$^4\text{He}_{\text{radio}}$ [Nml/kg]	ΔNe [%]	MVZ- Kategorie [Jahre]
					3. Quartal 2015 [TE]	1. Quartal 2016 [TE]				
PG40301022	Niederterrasse/Talfüllung	9,0	-10,56	1,7	6,5	5,6	0,0	9,2E-07	16	< 5
PG41806022	Niederterrasse/Talfüllung	16,0	-10,79	1,3	5,6	0,0	0,0	0,0E+00	53	< 5
PG41808012	Niederterrasse/Talfüllung	21,3	-10,46	1,9	4,5	7,0	0,0	0,0E+00	16	< 5
PG40301082	Unteres Hochflutniveau	10,1	-10,38	1,1	6,0	6,0	0,0	6,7E-07	19	< 5
PG41021022	Talfüllung	10,0	-10,24	2,2	5,9	6,4	0,0	0,0E+00	4	< 5
PG40301112	Niederterrasse	14,3	-9,89	1,8	5,6	5,5	0,0	1,2E-05	7	< 5
PG41812072	Niederterrasse	7,0	-10,20	0,6	5,0	1,9	0,0	6,0E-08	7	< 5
PG40101012	Oberes Hochflutniveau	7,0	-10,04	1,5	5,0	4,6	0,0	0,0E+00	6	<5
PG40301012	Niederterrasse/Talfüllung	12,0	-9,81	1,1	5,3	3,2	0,0	8,3E-07	30	<5
PG41812022	Niederterrasse	10,9	-9,67	1,6	4,6	0,9	0,0	3,2E-06	15	< 5
PG40301072	Niederterrasse	15,6	-9,54	1,2	5,6	3,5	0,0	7,3E-07	58	<5
PG41021012	Niederterrasse	10,1	-9,71	2,1	9,0	4,6	0,0	9,4E-07	22	<5
PG40301032	Niederterrasse	18,0	-9,81	1,2	5,2	0	0,1	2,8E-07	9	5-10
PG41007022	Hochterrasse	15,5	-9,94	0,9	6,7	4,6	0,0	0,0E+00	19	<5
PG41012012	Hochterrasse	k.A.	-9,98	1,2	4,4	0,0	2,1	3,5E-05	10	5-10
PG41012052	Hochterrasse	24,8	-10,04	1,1	3,8	5,0	3,9	5,0E-06	66	11-25
PG41017022	Hochterrasse	15,0	-9,93	0,9	4,5	3,5	0,5	7,6E-07	51	5-10
PG41002062	Talfüllung	k.A.	-9,64	3,7	4,8	4,6				5-10*
PG41002072	Talfüllung	k.A.	-9,87	3,6	5,0	1,1	0,8	2,0E-06	-4	<5
PG41806032	Niederterrasse	28,0	-9,98	1,5	6,6	3,1	0,0	0,0E+00	43	<5
PG41808052	Niederterrasse	26,0	-10,24	2,4	4,8	3,1	0,0	0,0E+00	15	<5
PG41824032	Talfüllung	17,5	-10,09	2,4	3,9	7,3	0,7	6,7E-05	3	5-10

Anmerkung:

* mit höheren Unsicherheiten behaftet, da keine Helium-3-Messwerte für Altersberechnung verfügbar

5 DRAUTAL [DRA] (KÄRNTNER ANTEIL)

5.1 ÜBERBLICK

DIE DRAU ENTSPRINGT IN SÜDTIROL, ITALIEN, und fließt dann über Osttirol nach Kärnten. Von ihrer Quelle bis Lienz durchfließt sie das Pustertal und mit ihrem Eintritt in Kärnten beginnt das Drautal, das als breites Trogtal das gebirgige Oberkärnten prägt.

Das Obere Drautal ist seit 2011 ein Europaschutzgebiet von überregionaler und internationaler Bedeutung. Dessen Talboden wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt und ist mit Ausnahme von der Stadtgemeinde Spittal a. d. Drau nur schwach besiedelt. Der Einzelgrundwasserkörper Drautal liegt im Oberen und im Unteren Drautal eingebettet zwischen dem Kristallin der Kreuzeckgruppe im Norden und den Karbonaten des Drauzugmesozoikums im Süden, das von den Lienzer Dolomiten im Westen bis zur Villacher Alpe im Osten reicht. Der Grundwasserkörper erstreckt sich mit einer Länge von ca. 130 km als schmales, langes Band von Lienz in Osttirol (Bundesland Tirol) über Spittal a. d. Drau bis nach Villach (Bundesland Kärnten).



Abbildung 29: Blick auf das Drautal, Kärnten

Mächtige Horizonte feinkörniger Sedimente mit grobkörnigen Einschaltungen prägen den sedimentären Aufbau des glazial übertieften Drautals. Das Schmelzwasser des Gletschers füllte das Tal, das rasch zusedimentiert wurde. Es wechseln mehrmals grobkörnige, gut durchlässige Schichten mit sandig-schluffigen Lagen. Wasserwirtschaftlich nutzbare Grundwasservorkommen sind auf die oberen 50 – 60 m beschränkt. Grundwasserstauend wirken Feinkornsedimente und das Grundgebirge, das vermutlich hauptsächlich aus kristallinen Gesteinen der Zentralzone besteht.

Die Grundwasserneubildung des oberflächennahen Porengrundwasserkörpers Drautal erfolgt dort, wo verkarstete Gesteine angrenzen, über unterirdische Anreicherung durch Karstwässer. Im restlichen Gebiet

wird das Grundwasser überwiegend durch versickerndes Niederschlagswasser erneuert. Die hydraulische Durchlässigkeit ist generell stark und der Grundwasserflurabstand liegt im Mittel bei 6,5 m.

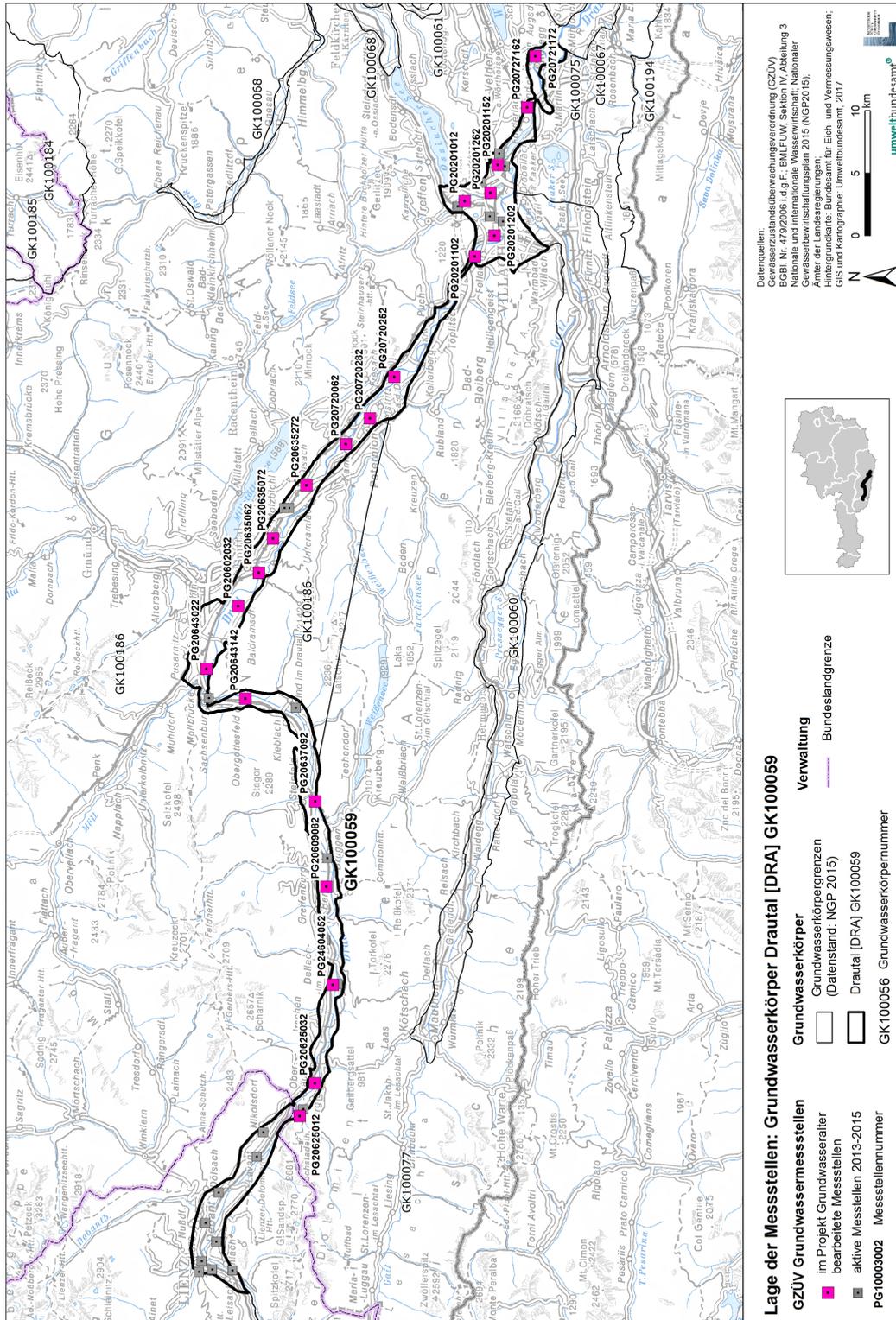


Abbildung 30: Übersichtskarte Grundwasserkörper Drautal [DRA] (Kärntner Anteil) mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen

Mögliche anthropogene Belastungen stellen unter anderem Wasserentnahmen, Bauwerke und Industrieanlagen sowie Deponien dar. Knapp 60 % der Fläche des Grundwasserkörpers werden landwirtschaftlich genutzt und 22,8 % der Fläche sind bebaut.

Insgesamt 21 GZÜV-Grundwassermessstellen im Kärntner Anteil des Grundwasserkörpers Drautal [DRA] wurden hinsichtlich der Mittleren Verweilzeiten des Grundwassers untersucht (Abbildung 30). Eine detaillierte Beschreibung des Grundwasserkörpers ist im Anhang enthalten.

5.2 ERGEBNISSE

5.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM

Die graphische Gegenüberstellung der Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen im Niederschlag, Grund- und Oberflächengewässer in Abbildung 31 erlaubt Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen und Mischungsprozesse der lokalen Grundwasservorkommen.

Die stabilen Isotopendaten der beprobten Niederschlagswässer in Sillian sowie der Grund- und Oberflächengewässer im Drautal sind in Abbildung 31 dargestellt.

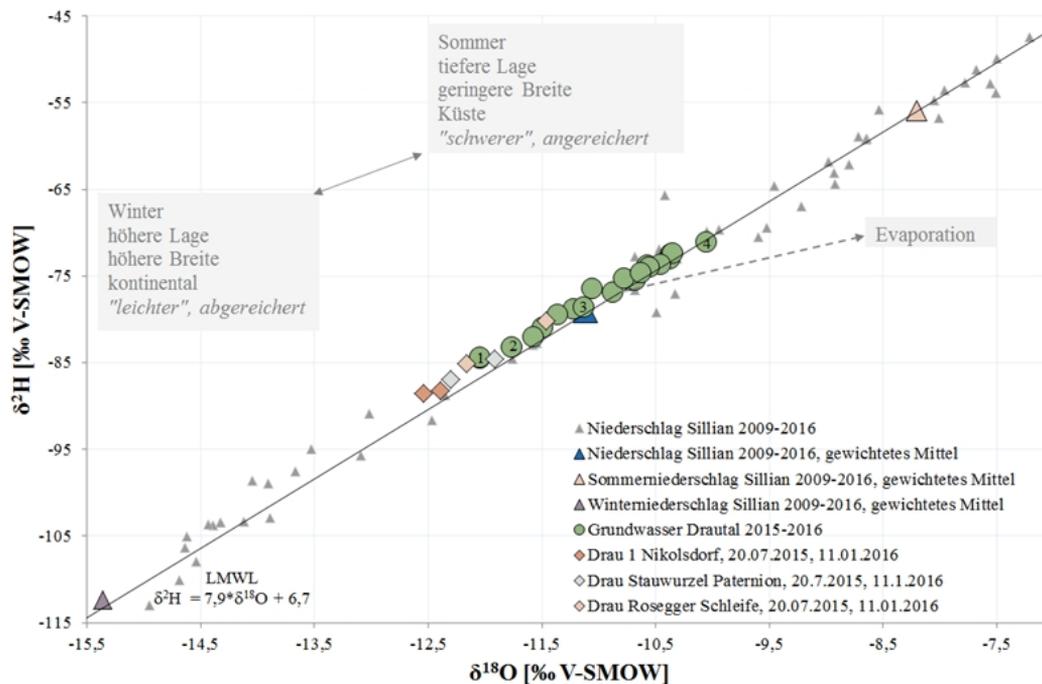


Abbildung 31: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen des Grundwasserkörpers Drautal [DRA] im Vergleich zur Drau sowie dem Niederschlag in Sillian (2009-2016)

Anmerkungen: (1) PG20625032 (Oberdrauburg), PG20637092(verdeckt) (Steinfeld)
 (2) PG20720062 (Paternion)
 (3) PG20635062 (Spittal)
 (4) PG20635272 (Spittal)

Überwiegend gruppieren sich die untersuchten Grundwässer des Drautales um das langjährige gewichtete Mittel des Niederschlags in Sillian. Die Isotopensignaturen des Grundwassers verweisen auf eine Mischung von Wässern aus alpinen Einzugsgebieten mit „leichteren“ Sauerstoff-18-Werten und versickernden lokalen Niederschlägen im Drautal mit „schwereren“ Sauerstoff-18-Werten. Im Vergleich zum gewichteten Niederschlagsmittel von Sillian in Osttirol sind die beprobten Grundwässer zum Teil abgereichert. Diese isotopisch „leichteren“ Werte sind Ausdruck eines Höheneffektes, da ein Teil des Grundwassers im Drautal

durch infiltrierendes Wasser der Drau bzw. deren Grundwasserbegleitstrom und Zustrom aus den angrenzenden höheren Lagen beeinflusst wird. Die tiefere Lage der Einzugsgebiete etlicher Messstellen im Vergleich zur ANIP-Station in Sillian (1.075 m) kann eine Verschiebung dieser Messstellen in Richtung des gewichteten Mittels der Sommerniederschläge bewirken.

Der Höheneffekt scheint durch den lokal wirksamen Einfluss von Sommerniederschlägen bzw. der im Herbst häufig auftretenden Südstaulagen, die mit großen Niederschlagsmengen verbunden sind, überlagert zu werden. Diese Sommerniederschläge sind durch „schwerere“, d.h. angereicherte Sauerstoff-18- und Deuteriumkonzentrationen gekennzeichnet.

Die Signaturen der stabilen Isotope des Drauwassers weisen aufgrund des alpinen Einzugsgebietes der Drau abgereicherte Isotopenverhältnisse auf. Bei ihrem Eintritt auf Kärntner Gebiet entwässert die Drau nahezu die gesamte Fläche Osttirols. Bis zur Mündung der Gail fungiert die Drau als Vorflut für die südlichen Abflüsse der Hohen Tauern und westlichen Nockberge (z.B. Isel, Möll, Lieser) (HOLZEIS et al. 2014). Neben saisonalen Veränderungen weist die Isotopensignatur der Drau - bedingt durch die Beimischung lokaler Niederschläge und Zubringer im Drautal selbst - auch einen räumlichen Gradienten auf. So sind bei Eintritt der Drau auf Kärntner Landesgebiet in Nikolsdorf die „leichtesten“ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zu verzeichnen, die mit zunehmender Fließstrecke der Drau in östliche Richtung „schwerer“ werden (siehe Abbildung 31).

In Abbildung 31 (Punkte 1 und 2) zeigen PG20625032 in Oberdrauburg und PG20637092 in Steinfeld sowie PG20720062 in Paternion die leichtesten Gehalte stabiler Isotope aller untersuchten Messstellen und indizieren die Infiltration isotopisch „leichten“ Drauwassers.

Punkt 3 bildet PG20635062 in Spittal ab. Diese Messstelle liegt nahe dem mehrjährigen gewichteten Niederschlagsmittel von Sillian und weist gut durchmischtetes Grundwasser auf. Winter- und Sommerniederschläge tragen in ähnlichem Maße zur Grundwasserneubildung bei.

PG20635272 in Spittal (Punkt 4 in Abbildung 31) zeigt die schwersten Gehalte stabiler Isotope und verweist auf Grundwasserneubildung aus lokalen Niederschlägen.

5.2.2 TRITIUM/HELIUM-3

Radiogene, tritiogene und Mantelkomponenten des Heliums im beprobten Grundwasser des Drautales können anhand der 3-Komponenten-Darstellung in Abbildung 32 unterschieden werden. Diese Differenzierung erlaubt weitere Rückschlüsse auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie unterirdische Wasserwegsamkeiten.

Für 20 von 21 im Rahmen des Projektes untersuchte Messstellen im Drautal konnten Probenahmen für die Tritium-/Heliumanalytik durchgeführt werden. An einer Messstelle konnte keine Probe entnommen werden. Fünfzehn Messstellen enthielten signifikante Mengen tritiogenen Heliums; die Infiltration des untersuchten Grundwassers liegt somit schon länger zurück (Abbildung 32). Drei weitere Messstellen enthielten geringfügige Mengen, zwei Messstellen kein tritiogenes Helium. Diese Messstellen sind durch aktuelle Grundwasserneubildung gekennzeichnet.

Drei Messstellen - PG20609082 in Greifenburg, PG24604052 in Dellach sowie PG20643022 in Lurnfeld - (Punkte 1 bis 3 in Abbildung 32) weisen eine markante Beimischung von radiogenem Helium-4 sowie die höchsten Gehalte tritiogenen Heliums auf. Auch bei PG20643142 in Sachsenburg und PG20201102 in Villach (Punkte 4 und 5 in Abbildung 32) ist die Beimischung der radiogenen Heliumkomponente evident. Der Nachweis von radiogenem Helium wird häufig mit dem Auftreten von Störungszonen und/oder tieferer Zirkulation von Grundwasserkomponenten sowie dem Kontakt mit uran- und thoriumhaltigen Gesteinen in Verbindung gebracht.

Neun der untersuchten Messstellen gruppieren sich nahe der Heliumzusammensetzung von Wasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre und verweisen dementsprechend auf kürzlich infiltriertes Grundwasser ohne zusätzliche terrigene bzw. tritiogene Heliumkomponenten.

Zum Teil hohe Luftüberschüsse in den Proben – ausgedrückt durch hohe ΔNe -Werte Tabelle 4 – deuten auf schnelle Reaktionen des Grundwasserspiegels gegenüber Regen- und Hochwasserereignissen hin, bei denen es zum Einschluss von Luftblasen aus der ungesättigten Zone kommt. Für eine Messstelle (PG20727162) ist einer negativer ΔNe -Wert zu verzeichnen, der auf Entgasungsprozesse hindeutet.

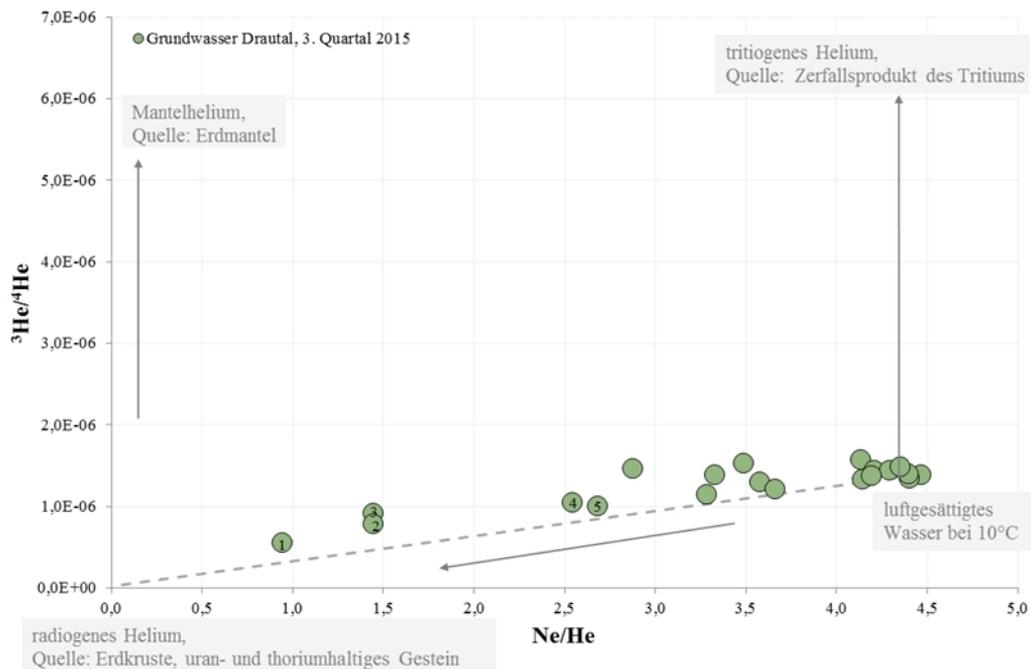


Abbildung 32: Heliumkomponenten des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Drautal [DRA]

- Anmerkungen: (1) PG20609082 (Greifenburg)
 (2) PG24604052 (Dellach)
 (3) PG20643022 (Lurnfeld)
 (4) PG20643142 (Sachsenburg)
 (5) PG20201102 (Villach)

Die Aussagekraft der ermittelten und in Kapitel 5.3 diskutierten Mittleren Verweilzeiten kann für MVZ < 50 Jahre anhand von Abbildung 33 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags der Station Sillian den (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechneten) ursprünglichen Tritiumkonzentrationen und Infiltrationszeitpunkten der untersuchten Grundwässer gegenübergestellt (siehe Kapitel 2.5).

Die Tritiumgehalte des beprobten Grundwassers im Drautal spiegeln im Wesentlichen die Isotopenzusammensetzung der lokalen Niederschläge vergangener Jahre wider. Keine Grundwassermessstelle weist Tritiumgehalte deutlich unterhalb der Niederschlagszusammensetzung auf. Bei einzelnen Messstellen kommt es zu Abweichungen. So liegt beispielsweise die rekonstruierte Tritiumkonzentration der im Bereich einer Störungszone gelegenen Messstelle PG20609082 in Greifenburg über der Zeitreihe von Tritium im Niederschlag, was ein Hinweis auf Mischungsprozesse entlang des Grundwasserfließweges sein kann. Darüber hinaus können auch lange Mittlere Verweilzeiten des Grundwassers in der ungesättigten Zone oder lokale Tritiumquellen zu diesen Abweichungen führen.

Generell ist anzumerken, dass die im Rahmen des österreichischen Isotopenmessnetzes ANIP erhobenen Tritiumgehalte des Niederschlags in den Stationen südlich des Alpenhauptkammes (z.B. Sillian, Villacher

Alpe) niedriger liegen als nördlich des Alpenhauptkammes, bedingt durch die unterschiedliche Herkunft der Luftmassen. Im Süden überwiegt der Einfluss mediterraner Luftmassen, im Norden der Einfluss atlantischen Ursprungs.

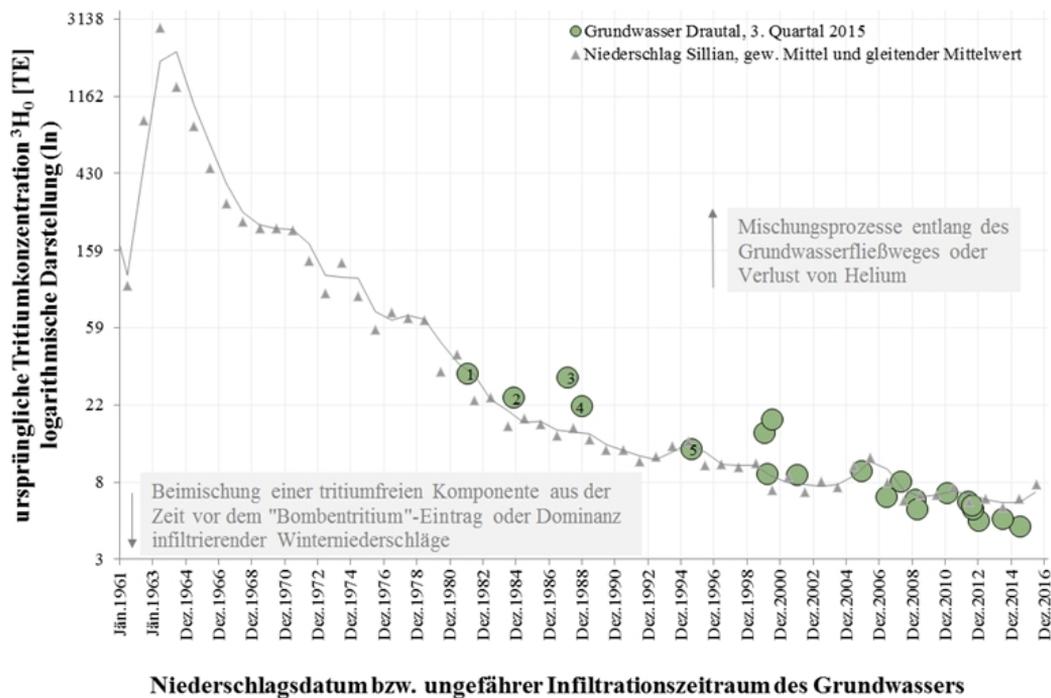


Abbildung 33: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Sillian (1961-2016) im Vergleich zu den rekonstruierten Tritiumkonzentrationen der ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Drautal [DRA]

Anmerkungen: (1) PG20643022 (Lurnfeld)
 (2) PG24604052 (Dellach)
 (3) PG20609082 (Greifenburg)
 (4) PG20635072 (Spittal)
 (5) PG20643142 (Sachsenburg)

5.3 DISKUSSION - ERGEBNIS

Der Einzelgrundwasserkörper Drautal erstreckt sich als schmales, langes Band über eine Länge von 130 km entlang der Drau von Lienz in Osttirol bis Villach. Der Porengrundwasserkörper ist stark durchlässig. Die Grundwasserneubildung erfolgt primär über die Versickerung von Niederschlagswässern. Im Grenzbereich zu verkarsteten Gesteinen erfolgt die Alimentation des Grundwassers auch unterirdisch über Karstwässer, im oberen Drautal auch durch versickernde seitliche Zubringer (FÜRST et al. 1993). Die langfristige Jahresniederschlagssumme variiert zwischen 928 und 1.280 mm (H₂O-FACHDATENBANK 2017). Weniger als 25 % der Grundwasserkörperfläche weisen Deckschichten auf.

Eine Vielzahl kleinerer Bäche entwässert aus dem nördlich der Drau gelegenen Kristallin (Kreuzeckgruppe, Goldeckmassiv) sowie den südlich angrenzenden Kalkalpen (Lienzer Dolomiten, Reißkofel, Jauken, Villacher Alpe) hin zur Drau. Im Bereich des Altkristallins und der Zentralgneise des Tauernfensters überwiegt oberirdischer Abfluss, die Karbonate südlich der Drau zeigen verkarstungsbedingt vorwiegend unterirdischen Abfluss (MOSER 2006). Die Gail, die nahe Villach in die Drau mündet, stellt den größten Zubringer dar.

Hinsichtlich der beobachteten Beimischung radiogenen Heliums können im Wesentlichen zwei Quellen in Betracht gezogen werden: Das rezente Drautal liegt im Einflussbereich verschiedener tektonischer Störungssysteme (Drau-Mölltal-Linie, Periadriatisches Lineament, Gegendtalstörung (ARNDT & BÄK

2005)), die entsprechende Wasserwegigkeiten für aufsteigende Gase und tief zirkulierende Grundwässer bieten. Des Weiteren wurden Grundgebirgsschwellen nachgewiesen (ARNDT & BÄK 2005). Im Becken von Oberdrauburg wölben sich Grundgebirgserhebungen bis zu 300 m unter Geländeoberkante auf, westlich von Sachsenburg erreicht eine Schwelle ein Niveau bis zu 150 m unter Geländeoberkante. Sowohl Störungssysteme als auch Grundgebirgsschwellen können ein Aufsteigen von radiogenem Helium-4 bewirken.

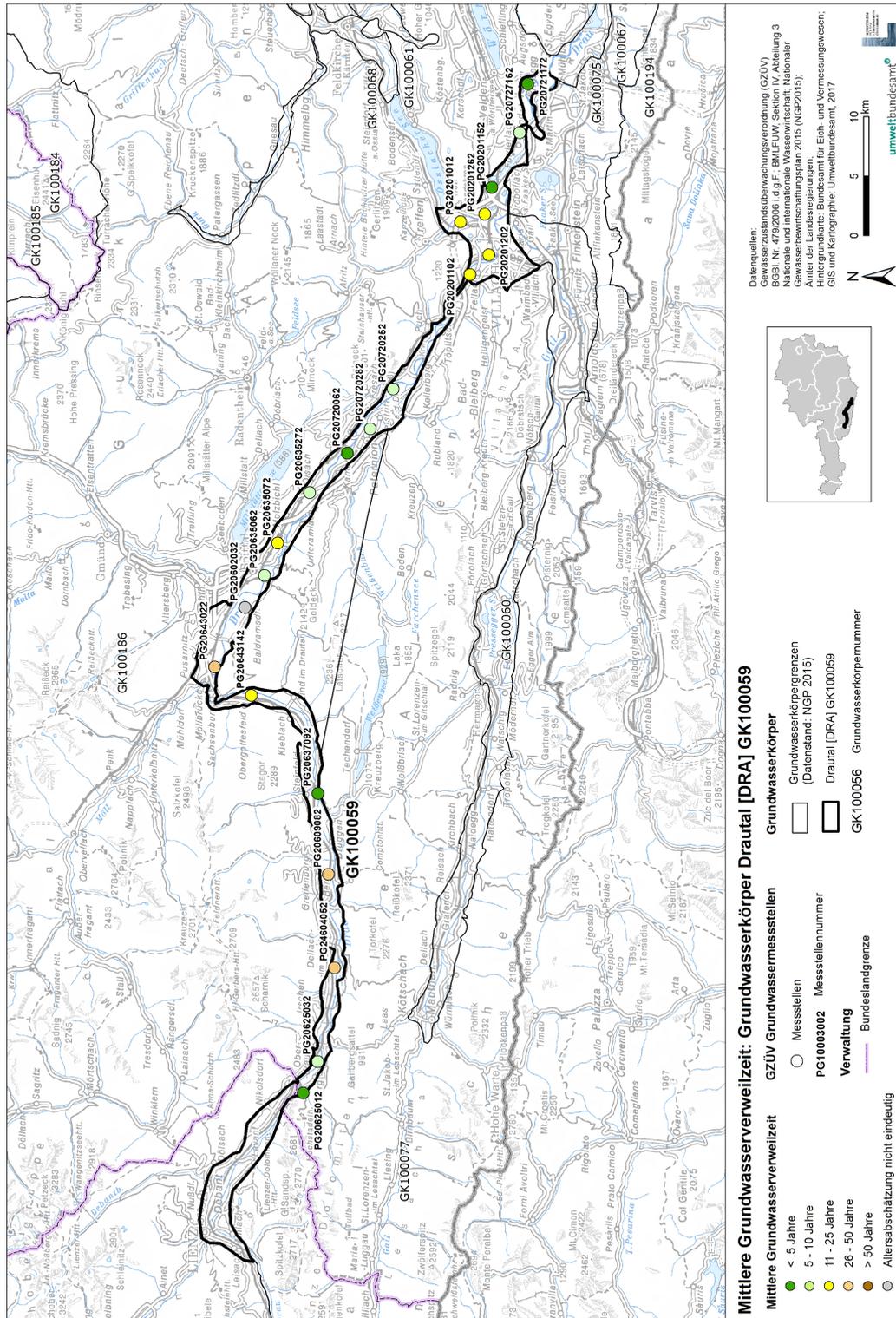


Abbildung 34: Mittlere Verweilzeiten der Grundwässer bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Drautal [DRA] (Kärntner Anteil)

Die Mittleren Verweilzeiten der 21 untersuchten GZÜV-Messstellen des Grundwasserkörpers Drautal umfassen ein weites Spektrum von < 5 Jahren bis hin zu 26-50 Jahren. Zusammenfassend stellt sich die Situation wie folgt dar: Fünf Messstellen weisen Mittlere Verweilzeiten von < 5 Jahren auf, für sechs Messstellen wurden Verweilzeiten von 5-10 Jahren ermittelt. Für sechs Messstellen sind Verweilzeiten von 11-25 Jahren und für drei Messstellen von 26-50 zu verzeichnen. Keine Messstelle wies Mittlere Verweilzeiten >50 Jahre auf.

Für eine Messstelle (PG20602032) konnte aufgrund fehlender Heliumanalysen und nicht eindeutiger Aussagekraft weiterer untersuchter Parameter keine Abschätzung der Mittleren Verweilzeiten vorgenommen werden.

Verteilt über das gesamte Drautal, sind fünf Messstellen durch **Mittlere Verweilzeiten < 5 Jahre** gekennzeichnet. Die Alimentierung des Grundwassers an diesen Messstellen folgt unterschiedlichen Prozessen, die von infiltrierendem Drauwasser über lokale Grundwasserneubildung aus versickernden Niederschlägen im Talboden bis hin zu unmittelbarem Bergwasserzufluss reicht:

Die Messstelle **PG20625012** in der Gemeinde Oberdrauburg erschließt unmittelbar aus den Lienzer Dolomiten zuströmendes sehr junges, gering mineralisiertes Wasser, dessen Einzugsgebiet tiefer liegt als der Drau.

PG20637092, in der Gemeinde Steinfeld gelegen, weist mit die leichtesten Sauerstoff-18-Werte aller untersuchten Messstellen auf und wird primär durch infiltrierendes Wasser der Drau bzw. deren Grundwasserbegleitstrom beeinflusst.

PG20720062 in der Gemeinde Paternion ist durch leichte Sauerstoff-18-Werte gekennzeichnet, die auf einen deutlichen Einfluss der Drau bzw. des Drau-Begleitstromes hinweisen, sowie durch sauerstoffarme bis sauerstofffreie Verhältnisse. Ein vergleichsweise hoher ΔNe -Wert von 29 % deutet auf eine schnelle Reaktion des Grundwasserspiegels auf Regen- und Hochwasserereignisse hin, die im Einschluss von Luftblasen aus der ungesättigten Zone resultiert.

PG20201152 ist nahe der Wernberger Drauschleife am Ostrand von Villach lokalisiert. Abweichend von den vier anderen Messstellen im Villacher Becken mit höheren Mittleren Verweilzeiten scheint das von dieser Messstelle erschlossene Grundwasser nicht im Zusammenhang mit dem unten beschriebenen Grundwasservorkommen im Bereich des Villacher Beckens zu stehen. Vielmehr ist von lokaler Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge und einem Einfluss der Wernberger Drauschleife auszugehen.

Die Isotopenverhältnisse der inmitten der Rosegger Drauschleife gelegenen Messstelle **PG20721172** verweisen auf den Einfluss der Drau bzw. des Grundwasserbegleitstroms der Drau in Verbindung mit einer lokalen Grundwasserkomponente.

Auch jene sechs Messstellen, die **Mittlere Verweilzeiten von 5-10 Jahren** aufweisen, verteilen sich über den gesamten Grundwasserkörper:

Die nahe Oberdrauburg lokalisierte Messstelle **PG20625032** scheint ausgehend von den Sauerstoff-18- und Deuteriumwerten wesentlich durch die Drau bzw. den Grundwasserbegleitstrom der Drau beeinflusst. Die Messstelle weist mit die „leichtesten“ Sauerstoff-18-Gehalte aller untersuchten Messstellen auf. Eine nennenswerte saisonale Variabilität ist nicht vorhanden, da die lokalen Gegebenheiten des Talbodens tendenziell stagnierende Verhältnisse und somit längere Fließzeiten begünstigen.

Die Mittlere Verweilzeit der in Spittal gelegenen Messstelle **PG20635062** ist dem oberen Bereich der MVZ-Kategorie 5-10 Jahre zuzuordnen. Ein unmittelbarer Einfluss durch Oberflächengewässer kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse weitgehend ausgeschlossen werden. Die stabilen Isotope verweisen auf eine Mischung lokaler Niederschläge mit dem Grundwasserbegleitstrom der Drau.

Die nahe Spittal situierte Messstelle **PG20635272** ist durch eine hohe Gesamtmineralisation (bis zu ca. 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$), die sich u.a. auf sehr hohe Chlorid- und Natriumkonzentrationen (111 mg/l bzw. 56 mg/l) zurückführen lässt, und vergleichsweise „schwere“ $\delta^{18}\text{O}$ -Werte gekennzeichnet. Die Sauerstoff-18-Werte weisen eine geringfügige Saisonalität auf und indizieren im Wesentlichen Grundwasserneubildung durch Wasser, das aus den westlichen Ausläufern der Mirnock-Gruppe zuströmt. Die Natrium- und Chloridgehalte dürften sich auf den Einsatz von Streusalz auf den unmittelbar angrenzenden Straßen zurückführen lassen. Die Mittlere Verweilzeit von PG20635272 ist im oberen Bereich der MVZ-Kategorie 5-10 Jahre einzuordnen.

Die bei Paternion gelegene Messstelle **PG20720252** wird durch die Drau bzw. deren Grundwasserbegleitstrom beeinflusst, dem lokal gebildetes Grundwasser beimischt. Der landwirtschaftliche Einfluss im Einzugsgebiet der Messstelle äußert sich u.a. in zeitweilig hohen Nitratkonzentrationen (bis zu 72 mg/l in den letzten Jahren).

Für **PG20720282** östlich von Paternion weisen die stabilen Isotope im Wesentlichen auf lokale Grundwasserneubildung hin. Auch bei dieser Messstelle liegen teilweise auffällig erhöhte Nitratkonzentrationen vor (bis zu 37 mg/l in den letzten Jahren).

Die Messstelle **PG20727162** in Förderlach wird überwiegend durch den Grundwasserbegleitstrom der Drau beeinflusst. Lokal gebildetes Grundwasser mischt in geringem Maße bei. Die Neon- und Heliumwerte verweisen auf die Ausgasung von Helium, unter Umständen besteht ein Zusammenhang mit dem im Anstrom der Messstelle gelegenen Schotterteich Förderlach.

Vier der sechs Messstellen mit **Mittleren Verweilzeiten von 11-25 Jahren** liegen im Villacher Becken, einem im Zuge der Seitenverschiebung der Drau-Mölltalstörung tektonisch angelegten Einbruchsbecken, das mit einer Beckentiefe von mindestens 600 m und mehr (POLTNIG 2004) den tiefsten Punkt im gesamten Grundgebirgsrelief der Drau darstellt (ARNDT & BÄK 2005). Im Villacher Becken laufen vier Grundwasserströme aus unterschiedlichen Richtungen zusammen (N: Treffner Tal, NW: Drautal, W: Bleiberger Tal, SW: Gailtal). Das oberflächennahe Grundwasservorkommen im Villacher Becken weist in südwestlich-nordöstlicher Richtung ein geringes Gefälle auf und entwässert in östliche Richtung über den von der Drau nahe der Wernberger Drauschlinge geschaffenen Durchbruch durch die Dobrawa (ANDERLE 1954). Entsprechend der beschriebenen Grundwasserverhältnisse des Villacher Beckens weisen die folgenden vier Messstellen mit 11-25 Jahren längere Mittlere Verweilzeiten auf:

PG20201102 ist am Westrand von Villach bzw. des Villacher Beckens im Bereich der Hochterrasse aus pleistozänen Schottern und Sanden lokalisiert. Die Messstelle ist durch die Beimischung radiogenen Heliums gekennzeichnet, dessen Vorkommen in Verbindung mit den bekannten Störungszonen des Drautals bzw. dem Randbruchsystemen des Villacher Beckens und den damit verbundenen unterirdischen Wegsamkeiten stehen könnte.

Bei **PG20201012** im Norden von Villach handelt es sich um eine auf 41 m abgeteufte Messstelle im Bereich alluvialer Ablagerungen (Verlandungsgebiet des Ossiacher Sees). Der zeitliche Verlauf hydrochemischer Parameter weist eine hohe Konstanz auf, ebenso wie die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, die erheblich angereicherter sind als jene $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte, die im nahegelegenen Abfluss des Ossiacher Sees (Seebach) erhoben wurden (SILMAS 2013) und die durch Verdunstungsprozesse geprägte Isotopensignatur des Ossiacher Sees widerspiegeln.

PG20201262 befindet sich im Nordosten Villachs in einer Toteislandschaft¹, die durch heterogene Grundwasserverhältnisse aufgrund eines starken Wechsels zwischen grobkörnigen Sedimenten (Schotter, Sande) und feinkörnigen Sedimenten (Bändertone) charakterisiert ist (ANDERLE 1954). Ausgehend von den Sauerstoff-18- und Deuteriumwerten sowie den untersuchten hydrochemischen Parametern ist kein unmittelbarer Einfluss der umgebenden Seen und Teiche auf das Grundwasser der Messstelle anzunehmen.

Bei **PG20201202** handelt es sich um eine Messstelle im Villacher Stadtgebiet im Bereich alluvialer Drau-Ablagerungen, die gemäß ANDERLE (1954) durch größere Grundwasserflurabstände und beträchtliche Schwankungen des Grundwasserspiegels charakterisiert sind. Die Messstelle weist einen mittleren Grundwasserflurabstand von rund 18 m sowie den weitaus höchsten Luftüberschuss aller untersuchten Messstellen auf ($\Delta N_e = 44 \%$) – ein Hinweis auf schnelle Reaktionen des Grundwasserspiegels auf Regen- und Hochwasserereignisse. Die geringfügige Variabilität der stabilen Isotope indiziert die Beimischung einer jungen Komponente, den dominierenden Anteil in der Altersverteilung bilden jedoch ältere Grundwasserkomponenten.

Zwei weitere Messstellen, die **Mittlere Verweilzeiten von 11-25 Jahren** aufweisen, liegen im mittleren Abschnitt des Drautales zwischen Lind und Spittal:

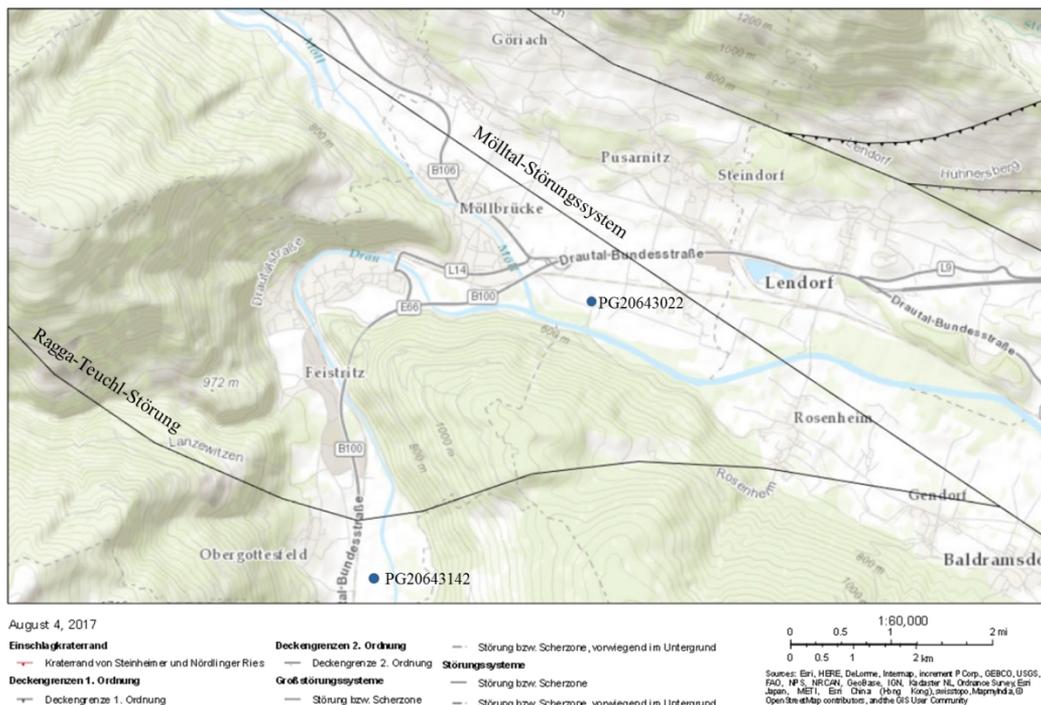


Abbildung 35: Verlauf des Mölltal-Störungssystems und der Ragga-Teuchl-Störung sowie Lage der GZÜV-Messstellen PG20643022 und PG20643142 (Quelle: Geologische Bundesanstalt – Multithematische geologische Karte von Österreich 1:1.000.000)

Die Sauerstoff-18- und Deuteriumwerte für **PG20643142** nahe Sachsenburg deuten vorrangig auf lokale Grundwasserneubildung. Hervorzuheben sind die hohe Magnesiumkonzentration (~40 mg/l) sowie die Beimischung radiogenen Heliums. Mit hoher Wahrscheinlichkeit besteht ein Zusammenhang mit der in

¹ Toteislöcher sind kleinräumige, abflusslose Hohlformen, die dem glazialen Formenschatz zugeordnet werden. Sie entstehen, wenn Eisblöcke während des Rückzugs bzw. Schmelzen eines Gletschers von diesem abgetrennt und in Moränen eingelagert werden. Aufgrund sedimentärer Überdeckung bleiben sie vor dem schnellen Abtauen geschützt. Mit dem Austauen des Eises sackt die Sedimentüberdeckung in den Bereich des ehemaligen Eisblocks nach und ein abflussloser Kessel entsteht. Dieser kann mit Wasser gefüllt sein, im Laufe der Zeit auch verlanden bzw. vermooren. In der Umgebung von Villach sind Toteislandschaften mehrfach zu finden, z.B. die Umgebung der St. Leonharder Seen im Norden und des Magdalensees im Osten der Stadt (ANDERLE 1954).

Obergottesfeld situierten und als Heilbad genutzten Quelle, die eine hohe Magnesiumkonzentration aufweist (38,3 mg/l, KAHLER 1978 in ZÖTL & GOLDBRUNNER 1993). Möglicherweise mischt dieser Messstelle Grundwasser bei, das in der Kreuzeckgruppe infiltriert und relativ tief zirkuliert, bevor es an der Ragga-Teuchl-Störung (Abbildung 35), die weitestgehend die Grenze zwischen dem Drauzug-Gurktal- und dem Koralpe-Wölz-Deckensystem bildet, wieder aufsteigt.

PG20635072 in Spittal, eine vergleichsweise tiefe Messstelle (Endteufe 26 m), ist im Wesentlichen durch Infiltration lokaler Niederschläge geprägt, die von Norden her aus den westlichen Ausläufern der Mirnock-Gruppe zuströmen. Die Nitratkonzentration liegt etwas höher (2015: ~16,5 mg/l). Die Mittlere Verweilzeit von PG20635072 ist im oberen Bereich der MVZ-Kategorie 11-25 Jahre einzuordnen, womöglich darüber.

Die drei Messstellen mit den höchsten **Mittleren Verweilzeiten von 26-50 Jahren** sind im Oberen Drautal (PG24604052, PG20609082) bzw. im Lurnfeld (PG20643022) situiert. Diese Messstellen zeigen die höchsten Gehalte an tritogenem Helium-3 und radiogenem Helium-4 aller untersuchten Messstellen im Drautal und scheinen demnach einem stärkeren Einfluss tiefer zirkulierender Wässer zu unterliegen:

Bei **PG24604052** westlich von Dellach handelt es sich um eine auf 58 m abgeteufte Messstelle, die insbesondere Grundwasserneubildung aus den nördlich angrenzenden Hangbereichen des Kolm mit seinen guten Wasserwegigkeiten aufweisenden zerklüfteten Muschelkalk- und Dolomitschichten erhalten dürfte (SUSSMANN 1901). Die Messstelle ist durch gering mineralisiertes, sauerstoffarmes Wasser mit markanter Beimischung von tritogenem Helium-3 und radiogenem Helium-4 gekennzeichnet. Die Beimischung der radiogenen Heliumkomponente dürfte sich auf den Aufstieg von Helium entlang vorhandener Wegsamkeiten aufgrund der in der Nähe verlaufenden Iseltal-Störung zurückzuführen lassen (Abbildung 36).

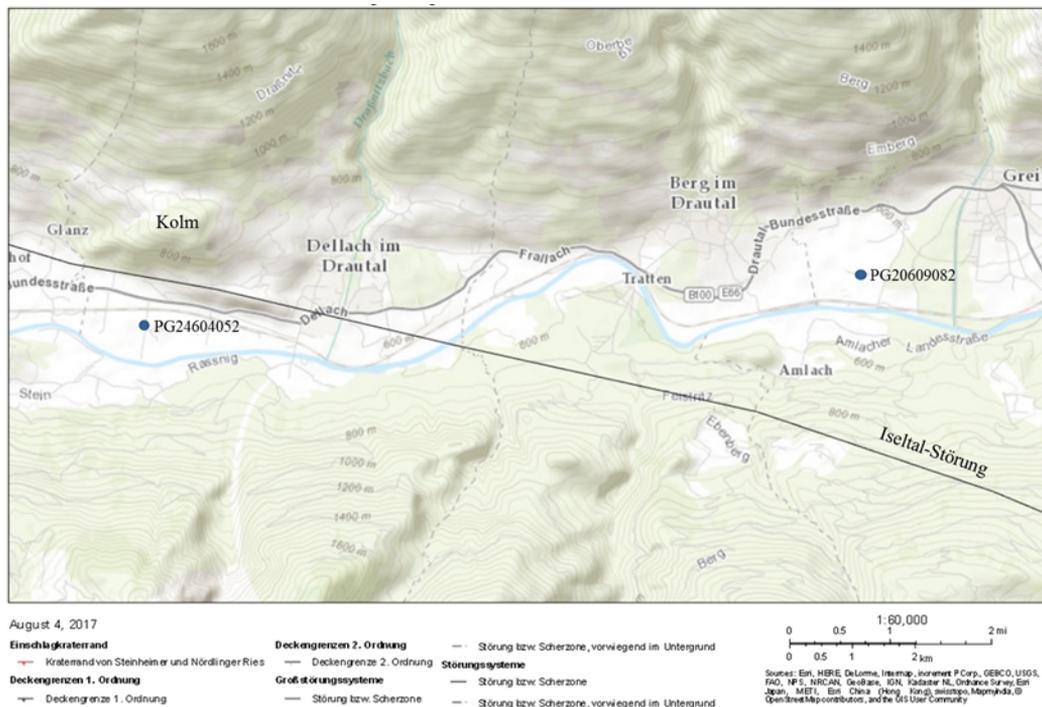


Abbildung 36: Verlauf der Iseltal-Störung im Bereich von Dellach sowie Lage der GZÜV-Messstellen PG20609082 und PG24604052 (Quelle: Geologische Bundesanstalt – Multithematische geologische Karte von Österreich 1:1.000.000)

Die Messstelle **PG20609082** bei Greifenburg zeigt den höchsten Anteil der radiogenen Heliumkomponente aller untersuchten Messstellen, deren Beimischung in Zusammenhang mit bestehenden Wegsamkeiten entlang der südlicher der Messstelle verlaufenden Iseltal-Störung stehen dürfte (Abbildung 36). Die Untersuchungsergebnisse deuten vorwiegend auf lokale Grundwasserneubildung.

Die Messstelle **PG20643022** am Südrand des Lurnfeldes ist durch den höchsten Anteil tritiogenen Heliums aller untersuchten Messstellen (27,8 TE) sowie einen hohen Anteil radiogenen Heliums gekennzeichnet (Abbildung 32). Es ist davon auszugehen, dass dem Grundwasserbegleitstrom der Drau neben lokal gebildetem Grundwasser sowie aus dem Mölltal zuströmenden Grundwasser zudem radiogenes Helium-4 beimischt, das entlang des Mölltal-Störungssystems aufsteigt (Abbildung 35).

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Grundwassermessstellen im Drautal als charakteristisch für lokale Grundwasservorkommen mit sowohl kurzen als auch etwas längeren Mittleren Verweilzeiten beschreiben. Dementsprechend ergibt sich bereichsweise eine **erhöhte Empfindlichkeit dieser Wasserressourcen** gegenüber Änderungen im Wasserhaushalt sowie bewirtschaftungsbedingten Änderungen der Wasserqualität.



Abbildung 37: Garnitzenklamm bei Hermagor, Kärnten

TABELLE 4: GRUNDWASSERKÖRPER DRAUTAL [DRA] (KÄRNTNER ANTEIL): ISOTOPENDATEN UND MITTLERE VERWEILZEITEN

Messstelle	Lithologische Einheit	Teufe [m u. GOK]	$\delta^{18}\text{O}$ [%o V-SMOW]	VarK $\delta^{18}\text{O}$ [%]	^3H	^3H	$^3\text{He}_{\text{trit}}$ [TE]	$^4\text{He}_{\text{radio}}$ [Nml/kg]	ΔNe [%]	MVZ- Kategorie [Jahre]
					3. Quartal 2015 [TE]	1. Quartal 2016 [TE]				
PG20201012	jüngste Flussablagerungen	41,0	-10,58	0,5	3,8	4,6	5,2	6,9E-07	23	11-25
PG20201102	jüngste Flussablagerungen	14,0	-11,22	0,7	4,1	4,9	4,7	3,0E-05	12	11-25
PG20201152	jüngste Flussablagerungen	11,3	-10,37	1,9	4,3	7,5	0,7	0,0E+00	21	< 5
PG20201202	jüngste Flussablagerungen	22,0	-10,72	2,4	6,3	6,2	8,9	1,5E-05	44	11-25
PG20201262	jüngste Flussablagerungen	16,3	-10,38	0,5	7,8	5,9	10,4	1,1E-05	15	11-25
PG20602032	jüngste Flussablagerungen	13,0	-10,36	1,4	-	5,9	-	-	-	-*
PG20609082	jüngste Flussablagerungen	7,0	-10,88	1,3	6,6	5,8	24,4	2,0E-04	28	26-50
PG20625012	jüngste Flussablagerungen	20,3	-11,06	5,0	4,8	6,7	0,0	0,0E+00	8	< 5
PG20625032	jüngste Flussablagerungen	7,0	-12,05	0,8	5,4	6,9	2,7	1,5E-05	14	5-10
PG20635062	jüngste Flussablagerungen	6,3	-11,13	0,7	4,5	6,2	1,9	0,0E+00	22	5-10
PG20635072	jüngste Flussablagerungen	26,0	-10,46	0,8	4,8	6,5	16,7	2,5E-05	13	11-25
PG20635272	jüngste Flussablagerungen	8,0	-10,06	2,3	5,4	7,3	3,9	1,0E-05	14	5-10
PG20637092	jüngste Flussablagerungen	8,0	-12,05	6,3	5,5	6,5	1,6	8,8E-06	6	< 5
PG20643022	jüngste Flussablagerungen	11,5	-11,50	0,6	5,0	6,9	27,8	1,0E-04	15	26-50
PG20643142	jüngste Flussablagerungen	7,0	-10,56	0,4	4,0	4,5	8,4	3,8E-05	26	11-25
PG20720062	jüngste Flussablagerungen	7,0	-11,77	3,1	5,4	5,7	0,0	4,7E-07	29	<5
PG20720252	jüngste Flussablagerungen	11,0	-11,58	0,9	4,0	5,5	1,7	1,4E-07	9	5-10
PG20720282	jüngste Flussablagerungen	17,0	-10,68	0,9	4,8	5,4	0,9	0,0E+00	13	5-10
PG20721172	jüngste Flussablagerungen	11,0	-10,79	1,9	5,1	7,1	0,9	9,1E-07	12	<5
PG20727162	jüngste Flussablagerungen	13,0	-11,36	1,1	4,2	5,1	2,5	3,3E-07	-4	5-10
PG24604052	jüngste Flussablagerungen	58,0	-10,63	0,6	4,3	6,0	19,8	1,0E-04	20	26-50

Anmerkung:

* keine Altersabschätzung möglich

Lithologische Einheiten gemäß Geologischer Karte Kärntens 1:400.000 (Quelle: KAGIS)

6 FLYSCHZONE [DUJ]

6.1 ÜBERBLICK

DIE FLYSCHZONE IST GEPRÄGT durch sanfte Hügel und Kuppen, die hauptsächlich aus Sandstein, Mergel und Kalkmergel bestehen und sich im Mittel auf 507 m. erheben. Die Grundwasserkörpergruppe erstreckt sich über ca. 240 km und ist ca. 10-15 km breit, wobei die größte Breite im Wienerwald mit rund 20 km erreicht wird. Diese Gruppe von Grundwasserkörpern erstreckt sich mit einer Fläche von knapp 2.600 km² hauptsächlich über nieder- und oberösterreichisches Landesgebiet. Kleine Teile liegen auch in Wien und in Salzburg. Die Grundwasserkörpergruppe wird durch querende Talfluren in fünf nicht zusammenhängende Bereiche unterteilt.

Die Bezeichnung „Flysch“ wurzelt in der Schweizer Mundart und bedeutet „fließen“. Die Flyschzone wurde so benannt, da das Relief, das durch ton- und sandartige Sedimente geprägt ist, vermehrt zu Rutschungen neigt.



Abbildung 38: Flyschzone in Oberösterreich: Oberwäng

Es handelt sich um einen oberflächennahen Grundwasserkörper, der vorwiegend als Kluftgrundwasserkörper und nachrangig als Porengrundwasserkörper auftritt. Für die Grundwasserführung sind im Wesentlichen die Klüfte im Sandstein von Bedeutung. Im Norden grenzen mehrere Grundwasserkörper des Alpenvorlandes an und im Süden wird die Gruppe von Grundwasserkörpern durch die Nördlichen Kalkalpen begrenzt.

Die Grundwasserneubildung erfolgt hauptsächlich über die flächenhafte Versickerung aus Niederschlag und zu einem kleineren Teil wird der Grundwasserkörper auch durch Oberflächengewässer gespeist. Die mittlere Jahresniederschlagssumme über das Gebiet beträgt 1.148 mm.

Der Grundwasserkörper wird knapp zur Hälfte von landwirtschaftlich genutzten Flächen bedeckt, was auch einen Risikofaktor für das Grundwasser darstellt. Die andere Hälfte wird nahezu ausschließlich von Wäldern und naturnahen Flächen eingenommen.

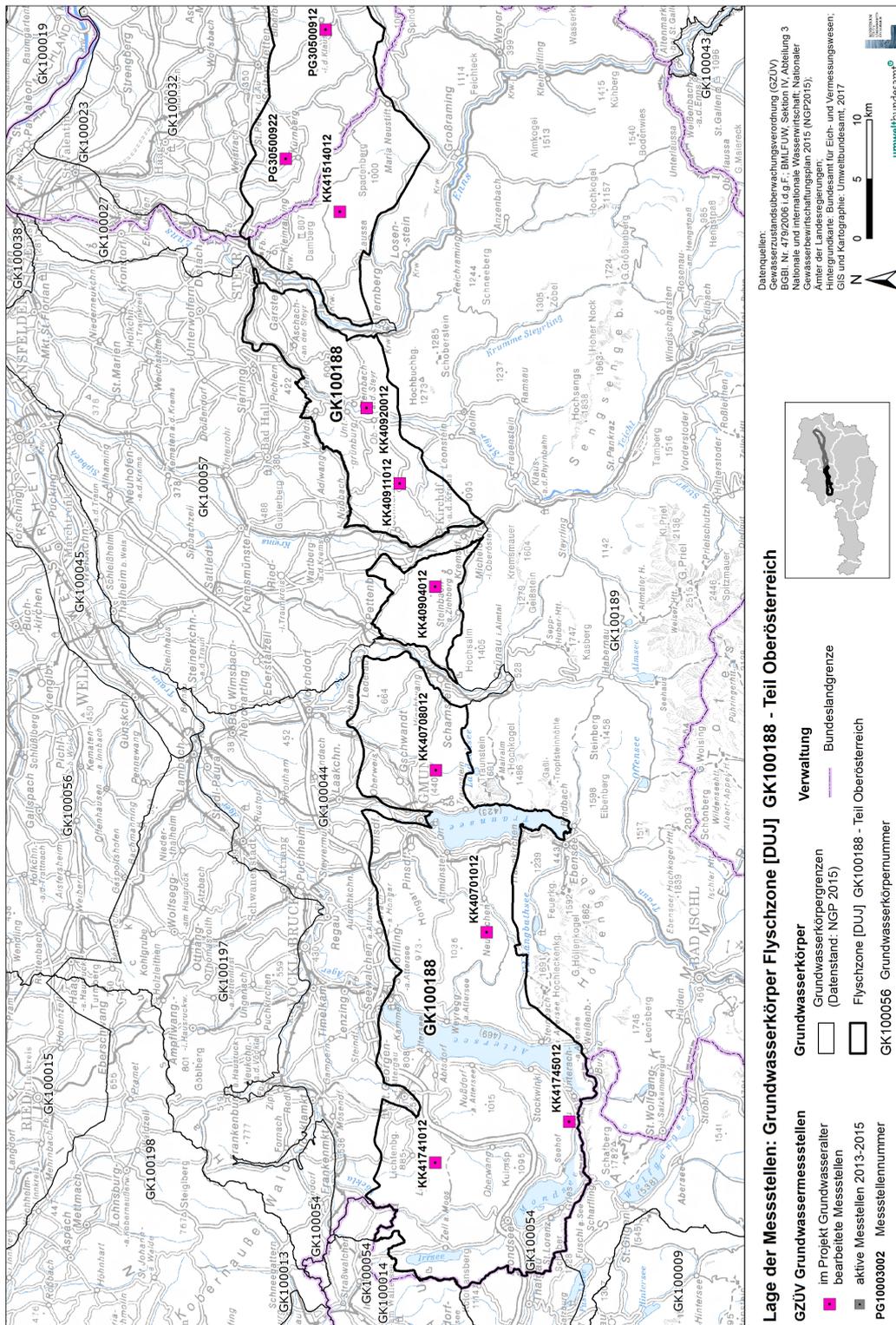


Abbildung 39: Übersichtskarte Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ] mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen (Oberösterreichischer Anteil)

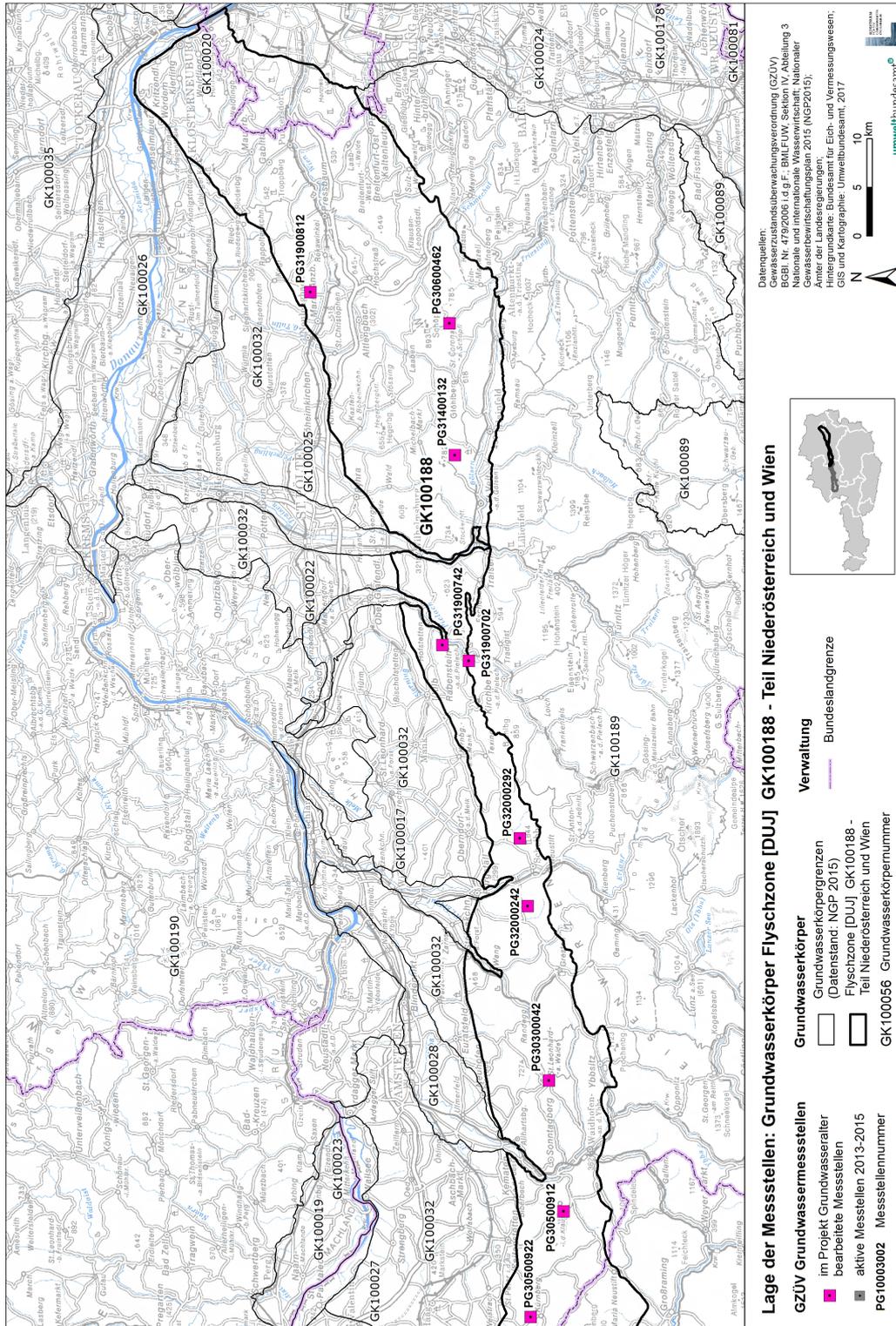


Abbildung 40: Übersichtskarte Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ] mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen (Niederösterreichischer und Wiener Anteil)

Im Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ] wurden alle 18 GZÜV-Messstellen in Hinblick auf die Mittleren Verweilzeiten des Wassers untersucht.

Eine detaillierte Beschreibung der Grundwasserkörpergruppe ist im Anhang enthalten.

6.2 ERGEBNISSE

6.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM

Die graphische Gegenüberstellung der Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen im Niederschlag und in Grundwässern in Abbildung 41 erlaubt Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen und Mischungsprozesse der lokalen Grundwasservorkommen.

Die Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen der untersuchten Quell- und Grundwässer in der Flyschzone weisen im Vergleich zum gewichteten Niederschlagsmittel von Breitenau deutlich abgereicherte, d.h. „leichtere“ Isotopenwerte auf (Abbildung 41). Dies ist vor allem auf den dominierenden Einfluss der Winterniederschläge auf die Grundwasserneubildung, z.T. aber auch auf die Höhenlage der Einzugsgebiete zurückzuführen.

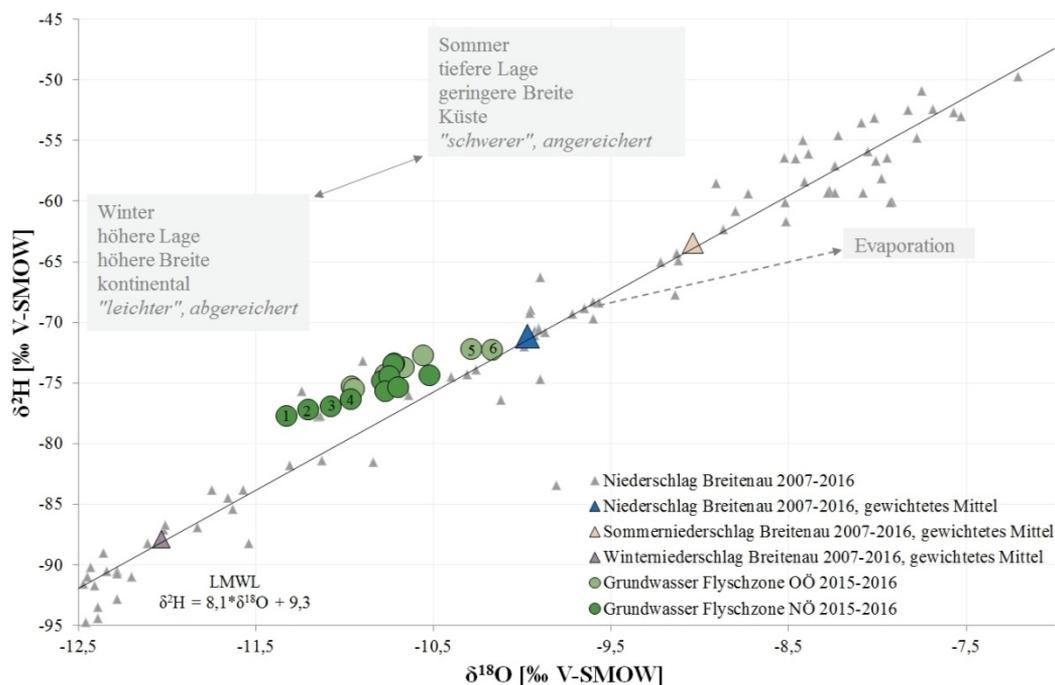


Abbildung 41: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen des Grundwasserkörpers Flyschzone [DUJ] im Vergleich zum Niederschlag in Breitenau (2007-2016)

Anmerkungen: (1) PG30600462 (Altenmarkt an der Triesting)

(2) PG31400132 (Rohrbach an der Günsen)

(3) PG31900702 (Rabenstein an der Pielach)

(4) PG30300042 (Waidhofen an der Ybbs)

(5) KK40708012 (Gmunden)

(6) KK40920012 (Steinbach an der Steyr)

Die „leichtesten“ Isotopenwerte in der niederösterreichischen Flyschzone wiesen PG30600462 unterhalb des Schöpfl (893 m), PG31400132 unterhalb des Großen Steinbergs (753 m), PG31900702 unterhalb des Reitbergs (547 m) sowie PG30300042 unterhalb des Schmiedbergs (790 m) auf.

Die Quellen PG32000242 unterhalb des Lampelsberg (818 m) und PG32000292 unterhalb des Blassenstein (842 m) spiegeln mit ihren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten ebenfalls die mittlere Höhe ihrer Einzugsgebiete wider.

In der oberösterreichischen Flyschzone wiesen KK40701012 (925 m) im Bereich der Traun- und Atterseer Flyschberge sowie KK41745012 unterhalb der Mondseer Flyschberge (bis 1.134 m) die abgereichertesten Werte für Sauerstoff-18 und Deuterium auf.

6.2.2 TRITIUM/HELIUM-3

Radiogene, tritiogene und Mantelkomponenten des Heliums im beprobten Grundwasser der Flyschzone können anhand der 3-Komponenten-Darstellung in Abbildung 42 unterschieden werden. Diese Differenzierung erlaubt weitere Rückschlüsse auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie unterirdische Wasserwegsamkeiten.

Für 11 von 18 Messstellen in der Flyschzone [DUJ] konnten Probenahmen für die Tritium-/Heliumanalytik durchgeführt werden. An sieben Messstellen war dies aufgrund des Messstellenausbaus nicht möglich. Zwei Messstellen in Niederösterreich – PG30300042 (Gemeinde Waidhofen an der Ybbs) und PG31900702 (Gemeinde Rabenstein an der Pielach) – enthielten signifikante Mengen tritiogenen Heliums; die Infiltration des untersuchten Grundwassers liegt somit schon länger zurück (Abbildung 43). Sechs weitere Messstellen enthielten geringfügige Mengen, zwei Messstellen kein tritiogenes Helium. Diese Messstellen sind durch aktuelle Grundwasserneubildung gekennzeichnet.

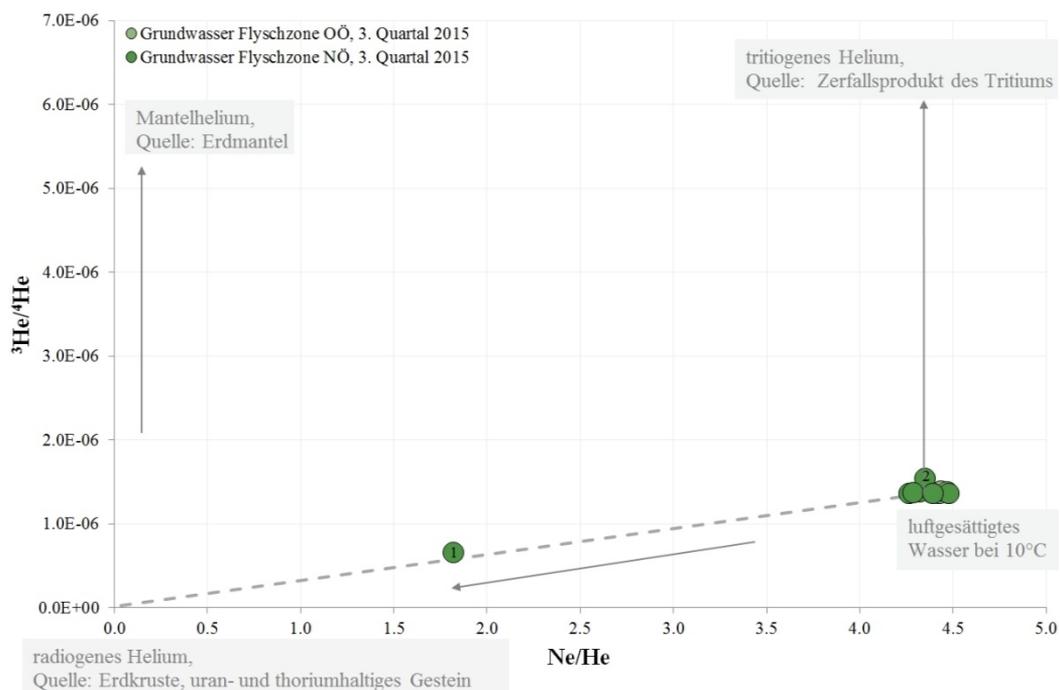


Abbildung 42: Heliumkomponenten des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ]

Anmerkungen: (1) PG30300042 (Waidhofen an der Ybbs)
(2) PG31900702 (Rabenstein an der Pielach)

Die Messstelle PG30300042 (Waidhofen an der Ybbs) ist zudem durch eine signifikante Beimischung einer radiogenen Heliumkomponente gekennzeichnet (Abbildung 42). Radiogenes Helium-4 stammt aus dem Zerfall von uran- und thoriumhaltigen Gesteinen und steigt entlang von Störungszonen mit entsprechenden Wegsamkeiten auf.

Diese Messstelle weist ferner einen hohen Luftüberschuss ($\Delta\text{Ne} = 46\%$) auf, ein Hinweis auf einen stark schwankenden Grundwasserspiegel in Folge von Regenereignissen unter Einschluss von Luftblasen aus der ungesättigten Zone.

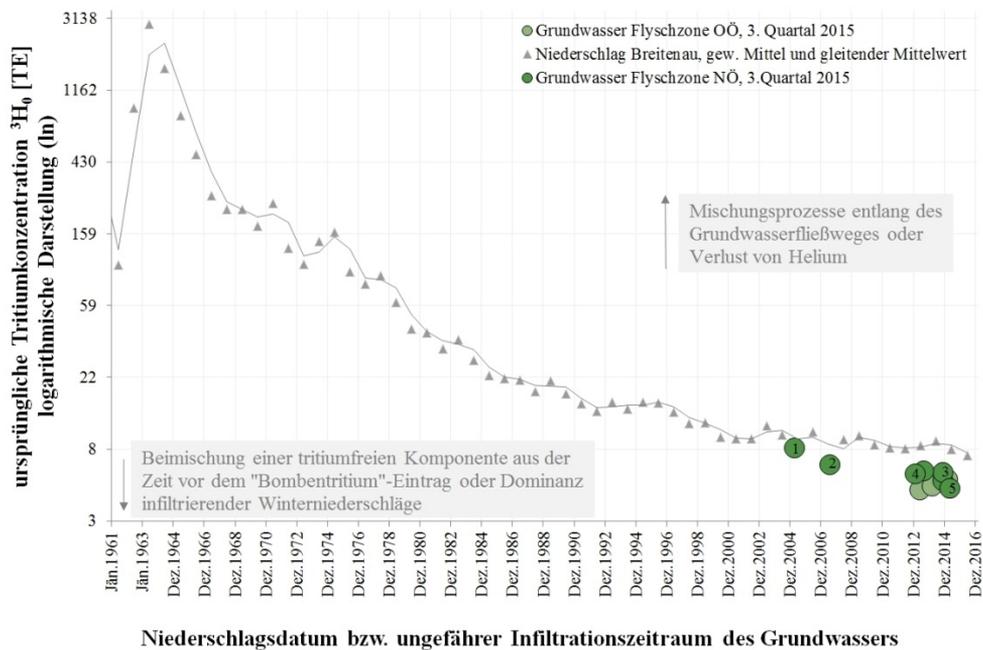


Abbildung 43: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Breitenau (1961-2016) im Vergleich zu den rekonstruierten Tritiumkonzentrationen der ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ]

Anmerkungen: (1) PG30300042 (Waidhofen an der Ybbs)
 (2) PG31900702 (Rabenstein an der Pielach)
 (3) PG32000242 (Purgstall an der Erlauf)
 (4) PG31400132 (Rohrbach an der Gölsen)
 (5) PG31900812 (Maria Anzbach)

Die Aussagekraft der ermittelten und in Kapitel 6.3 diskutierten Mittleren Verweilzeiten kann für MVZ < 50 Jahre anhand von Abbildung 43 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags der Station Breitenau den (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechneten) rekonstruierten ursprünglichen Tritiumkonzentrationen und Infiltrationszeitpunkten der untersuchten Grundwässer gegenübergestellt (siehe Kapitel 2.5). Die Grundwasserproben liegen z.T. deutlich unterhalb der Niederschlagszeitreihe. Der starke Einfluss infiltrierender Winterniederschläge oder tritiumfreier Grundwasserkomponenten kann zu dieser Abweichung führen.

Die Tritiumkonzentrationen der untersuchten Quell- und Grundwässer spiegeln überwiegend den mit saisonalen Schwankungen behafteten natürlichen Tritiumgehalt der Niederschläge wider. Generell lagen die Tritiumgehalte während der im 3. Quartal 2015 durchgeführten Probenahme im Bereich der Tritiumgehalte von Winterniederschlägen (~ 4-6 TE). Eine Beimischung von tritiumfreien, „älteren“ Wässern ist zumindest für die Messstellen PG30300042 (Waidhofen an der Ybbs) und PG31900702 (Rabenstein an der Pielach) nicht auszuschließen. Die Proben aus dem 1. Quartal 2016 zeigen höhere Tritiumkonzentrationen im Bereich von Frühjahrsniederschlägen (bis zu etwa 9 TE).

6.3 DISKUSSION - ERGEBNIS

Die Grundwasserkörpergruppe Flyschzone [DUJ] erstreckt sich mit einer Fläche von knapp 2.600 km² hauptsächlich über nieder- und oberösterreichisches Landesgebiet. Die Grundwasserkörpergruppe wird durch querende Talfluren in fünf nicht zusammenhängende Bereiche unterteilt. Es handelt sich dabei vorwiegend um Kluftgrundwasserkörper, nachrangig um Porengrundwasserkörper. Charakteristisch für das Gebiet sind „als Folge der geringen Wasserdurchlässigkeit der Flyschsedimente, die nach Niederschlägen wildbachartig anschwellenden Gewässer“ (THENIUS 1974).

Die Grundwasserneubildung erfolgt hauptsächlich über die flächenhafte Versickerung aus Niederschlag und zu einem kleineren Teil durch Oberflächengewässer. Die mittlere Jahresniederschlagssumme über das Gebiet beträgt 1.148 mm.

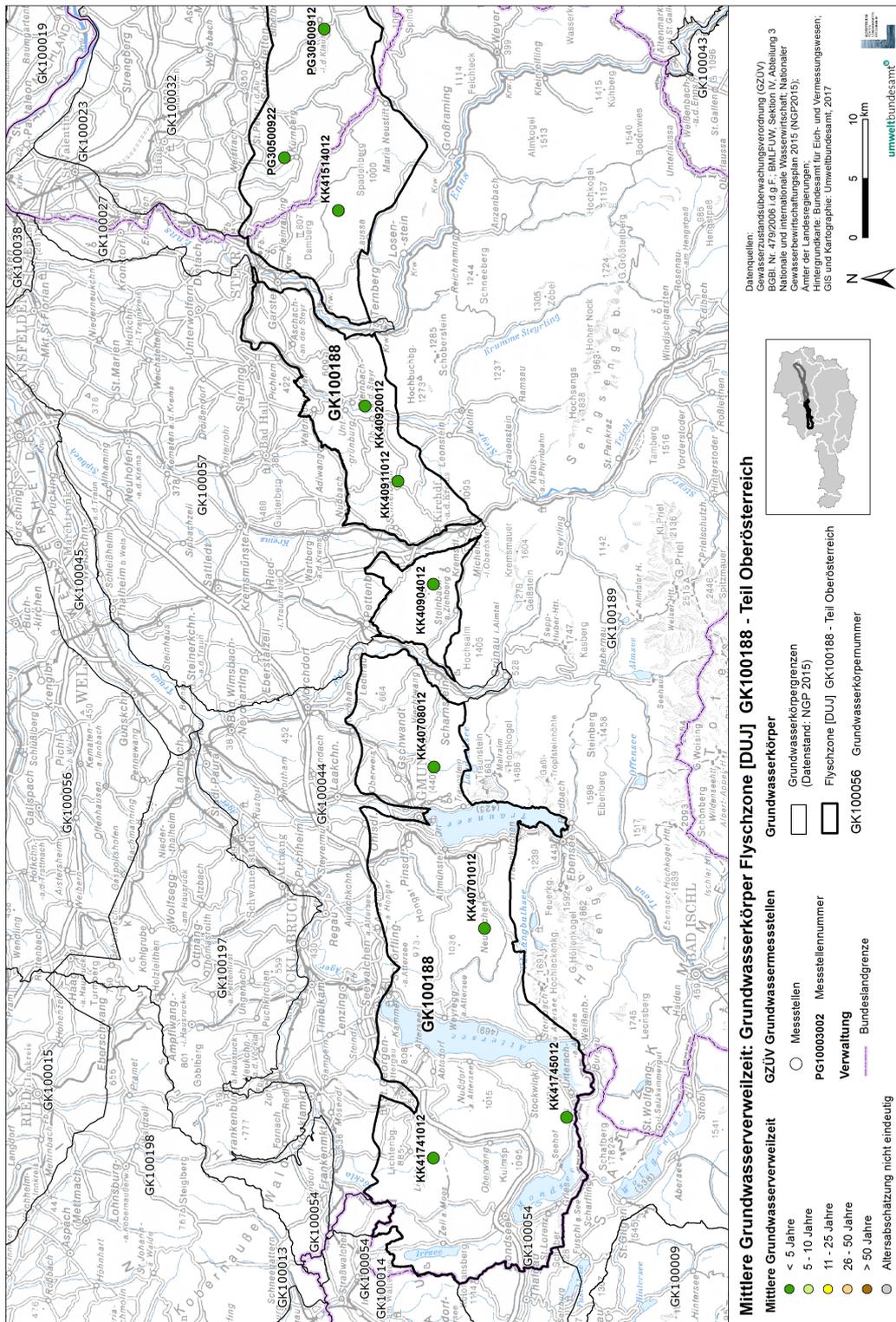


Abbildung 44: Mittlere Verweilzeiten der Grundwässer bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ] (Oberösterreichischer Anteil)

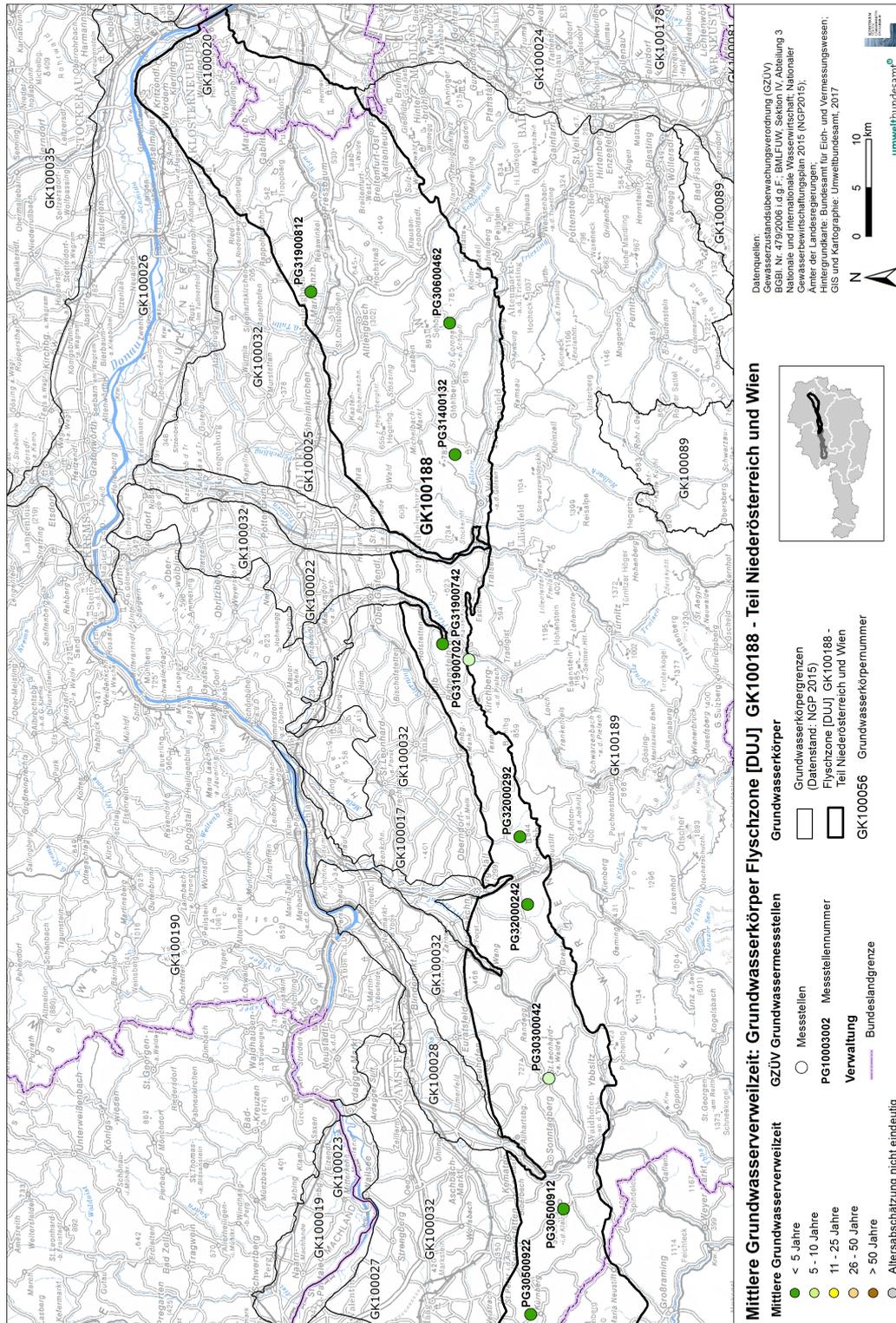


Abbildung 45: Mittlere Verweilzeiten der Grundwässer bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Flyschzone [DUJ] (Niederösterreichischer und Wiener Anteil)

Die Mittlere Verweilzeiten der untersuchten lokalen Grundwasservorkommen in der Flyschzone [DUJ] variieren im Bereich von < 5 bis 11-25 Jahren, wobei junges Grundwasser der MVZ-Kategorie < 5 Jahre an den Messstellen des Grundwasserkörpers Flyschzone [DUJ] überwiegt. Die Grundwasserneubildung an den untersuchten Messstellen erfolgt dabei ausschließlich durch Niederschläge.

Alle acht Messstellen der oberösterreichischen Flyschzone fallen in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre. Dabei konnten 5 von 8 Messstellen (siehe Tabelle 5) nur anhand der Variabilität der Sauerstoff-18- und Tritiumkonzentrationen beurteilt werden, was grundsätzlich zu höheren Unsicherheiten in Bezug auf die ermittelten Mittleren Verweilzeiten führt.

Für die Messstellen KK40701012, KK40708012, KK41741012, KK40904012 und KK40911012 bewegt sich die Differenz der Höhenlage der Quelle und der auf Basis der stabilen Isotope ermittelten mittleren Höhe des Quelleinzugsgebietes im Bereich ~ 100 m, so dass insgesamt relativ kurze Fließwege vorliegen.

Das Einzugsgebiet der Messstelle **KK40701012** in der Gemeinde Altmünster liegt im Bereich der Altlenzbach-Formation. Es handelt sich um ein niederschlagsgespeistes, lokales Grundwasservorkommen, bei der die Höhenlage der Quelle in etwa der mittleren Einzugsgebietshöhe entspricht. Die Tritiumgehalte von 5,2 und 5,8 TE verdeutlichen den Einfluss der Winterniederschläge auf die aktuelle Grundwasserneubildung.

Die Messstelle **KK40708012** in der Gemeinde Gschwandt ist durch hohe Saisonalität der Sauerstoff-18-Konzentrationen gekennzeichnet. Die hydrochemischen und Isotopendaten deuten auf ein niederschlagsgespeistes lokales Grundwasservorkommen aus rezenter Grundwasserneubildung.

Die im Kalkmergel situierten Quellen **KK41741012** (Gemeinde Straß im Attergau), **KK40911012** (Gemeinde Oberschlierbach) und die am Übergang von Kalkmergel/Sandstein der Altlenzbach-Formation und Kalkstein der Zementmergelerde gelegene Messstelle **KK40904012** (Gemeinde Inzersdorf im Kremstal) repräsentieren ebenfalls lokale, niederschlagsgespeiste, gering mineralisierte Grundwasservorkommen mit kurzen Verweilzeiten.

Das Einzugsgebiet der auf 603 m in einem Hangschuttswemmfächer in der Gemeinde Unterach am Attersee gelegenen Quelle **KK41745012** liegt deutlich höher (auf ~ 950 m) als der Quellaustritt am Südhang des Hochpletzspitzes. Die Quelle ist zudem durch Sulfatkonzentrationen (~ 22 mg/l) gekennzeichnet, die auf Kontakt mit gips- oder anhydritführenden Schichten hindeuten. Auch das Einzugsgebiet der Quelle **KK41514012** in der Gemeinde St. Ulrich bei Steyr liegt deutlich oberhalb des Quellaustritts auf 496 m im Bereich des Schwarzberges (~ 800 m).

Messstelle **KK40920012** (Gemeinde Steinbach an der Steyr) unterhalb des Kraberges ist durch einen erdalkalisch-karbonatischen Wassertyp (überwiegend Ca-Mg-Karbonat) und die höchste Gesamtmineralisation (~ 622 µS/cm) der untersuchten Messstellen in der oberösterreichischen Flyschzone gekennzeichnet.

Alle acht untersuchten Quellmessstellen der oberösterreichischen Flyschzone weisen geringe Nitratkonzentrationen im Bereich von 3 bis 9 mg/l auf.

Acht von zehn untersuchten Messstellen der niederösterreichischen Flyschzone wurden in die MVZ-Kategorie < 5 Jahre eingeordnet, zwei weitere Messstellen in die Kategorie 5-10 Jahre.

In letztere Kategorie fällt zum Beispiel Messstelle **PG30300042** in der Gemeinde Waidhofen an der Ybbs. Das an dieser Messstelle nachgewiesene radiogene Helium und die Nähe zu einer westlich gelegenen Störungszone deuten hier auf eine Beimischung von tiefer zirkulierendem Grundwasser hin. Das Grundwasser dieser Messstelle ist sauerstofffrei und zudem durch vergleichsweise hohe Natrium- und Borkonzentrationen gekennzeichnet, die ab 2007 einen überwiegend ansteigenden Verlauf aufweisen. Können hier anthropogene Verunreinigungen ausgeschlossen werden, deutet diese Entwicklung auf eine steigende Entnahme von Grundwasser mit längeren Verweilzeiten an dieser Messstelle.

Auch Messstelle **PG31900702** in der Gemeinde Rabenstein an der Pielach fällt in die MVZ-Kategorie 5-10 Jahre. Tritiogenes Helium deutet auf länger zurückliegende Infiltration des Grundwassers hin. Der dominierende Einfluss von Winterniederschlägen auf die Grundwasserneubildung wird durch die abgereicherten Werte der stabilen Isotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ widergespiegelt. Diese und auch die hydrochemischen Parameter weisen eine geringe Variabilität auf, ebenfalls ein Hinweis auf Grundwasser aus mehrjähriger Neubildung durch Winterniederschläge und deren gute Durchmischung. Das Mg/Ca-Verhältnis von 0,49 lässt auf Kontakt des Grundwassers mit Dolomit schließen.

Die verbleibenden 8 Messstellen der niederösterreichischen Flyschzone wurden der MVZ-Kategorie < 5 Jahre zugeordnet.

PG30500922, eine in der Gemeinde Weistrach am Nordwesthang unterhalb des Plattenberg (750 m) gelegene Messstelle, ist durch rezente Grundwasserneubildung, kurze Mittlere Verweilzeiten und geringe Mineralisierung des Grundwassers charakterisiert. Die Nitratkonzentrationen liegen im Bereich von 16 mg/l.

Die in der Gemeinde Seitenstetten gelegene Messstelle **PG30500912** mit ihrem Einzugsgebiet am Südwesthang des Faßberges ist ebenfalls durch rezente Grundwasserneubildung gekennzeichnet. Auffällig sind die seit 2005 steil ansteigenden Natrium- und Chloridkonzentrationen auf ein Niveau von derzeit 23 bzw. 88 mg/l. Hier liegt möglicherweise eine Beeinflussung durch Straßenabwässer der oberhalb der Quelle gelegenen Landesstraße vor.

Rezente Grundwasserneubildung aus Niederschlägen prägt auch die Messstellen **PG32000242** in der Gemeinde Purgstall an der Erlauf nördlich des Lampelsberges (~ 800 m), **PG32000292** in der Gemeinde St. Georgen an der Leys nördlich des Blassenstein (842 m) und **PG31900742** in der Gemeinde Hofstetten-Grünau.

Messstelle **PG31400132** in der Gemeinde Rohrbach an der Gölsen, deren Einzugsgebiet der Osthang des Großen Steinberges (753 m) darstellt, wird ebenfalls durch junges Grundwasser aus aktueller Neubildung geprägt. Die stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium zeigen eine hohe Saisonalität, tritiogenes Helium konnte nur in geringem Umfang nachgewiesen werden.

Auch die Messstelle **PG30600462** in der Gemeinde Altenmarkt an der Triesting im Bereich der Laab-Formation unterhalb des Mitterschöpl (881 m) gelegen, ist durch MVZ < 5 Jahre charakterisiert. Ebenso wie die Messstelle **PG31900812** in der Gemeinde Maria Anzbach, die seit Beginn der 2000er Jahre durch stetig fallende Nitratkonzentrationen auf ein niedriges Niveau von derzeit 14 mg/l gekennzeichnet ist.

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Grundwassermessstellen in der oberösterreichischen und niederösterreichischen Flyschzone als charakteristisch für lokale Grundwasservorkommen mit überwiegend kurzen Mittleren Verweilzeiten beschreiben. Dementsprechend ergibt sich eine **erhöhte Empfindlichkeit dieser Wasserressourcen** gegenüber Änderungen im Wasserhaushalt sowie bewirtschaftungsbedingten Änderungen der Wasserqualität.

TABELLE 5: GRUNDWASSERKÖRPER FLYSCHZONE [DUJ]: ISOTOPENDATEN UND MITTLERE VERWEILZEITEN

Messstelle	Geologische Einheit	Höhe	$\delta^{18}\text{O}$	VarK $\delta^{18}\text{O}$	^3H 3. Quartal 2015	^3H 1. Quartal 2016	$^3\text{He}_{\text{trit}}$	$^4\text{He}_{\text{radio}}$	ΔNe	MVZ- Kategorie
		[m]	[‰ V-SMOW]	[‰]	[TE]	[TE]	[TE]	[Nml/kg]	[‰]	[Jahre]
KK40701012	Altlenzbach-Fm.	925	-10,96	0,86	5,2	5,8	0,1	0,00E+00	8	< 5
KK40708012	Altlenzbach-Fm.	590	-10,29	1,98	5,5	6,5				< 5*
KK40904012	Altlenzbach/Zementmergel	900	-10,72	1,04	5,4	6,9				< 5*
KK40911012	Altlenzbach/Zementmergel	765	-10,56	3,96	4,6	6,0				< 5*
KK40920012	Altlenzbach-Fm.	414	-10,17	0,86	4,1	7,2	0,6	0,00E+00	5	< 5
KK41514012	Zementmergelerde	496	-10,77	0,95	4,5	7,5	0,4	0,00E+00	6	< 5
KK41741012	Altlenzbach-Fm.	758	-10,67	0,66	4,5	9,1				< 5*
KK41745012	Zementmergel/Hangschutt	603	-10,95	0,63	4,8	5,7				< 5*
PG30300042	Altlenzbach/Zementmergel	709	-10,97	0,88	4,1	7,4	2,4	8,29E-05	46	5-10
PG30500912	Altlenzbach/Zementmergel	542	-10,53	0,63	3,8	7,0				<5*
PG30500922	Altlenzbach/Zementmergel	654	-10,73	0,86	4,8	7,0				<5*
PG30600462	Laab-Fm.	620	-11,33	2,35	5,2	4,4	0,0	0,00E+00	0	<5
PG31400132	Altlenzbach-Fm.	622	-11,21	1,77	5,3	5,8	0,7	3,51E-07	4	<5
PG31900702	Opponitz-Fm./Hauptdolomit	375	-11,08	0,55	4,6	8,3	3,7	0,00E+00	12	5-10
PG31900742	Altlenzbach/Zementmergel	376	-10,77	0,65	5,0	7,2	0,8	9,44E-07	-4	<5
PG31900812	Altlenzbach-Fm.	318	-10,70	0,34	4,6	9,0	0,1	0,00E+00	3	<5
PG32000242	„Klippen“, Gresten-Fm	490	-10,79	0,59	5,3	7,9	0,0	0,00E+00	33	<5
PG32000292	Blassenstein-Fm.	520	-10,75	0,39	5,6	6,9	0,3	0,00E+00	5	<5

Anmerkung:

* mit höheren Unsicherheiten behaftet, da keine Helium-3-Messwerte für Altersberechnung verfügbar

7 MOLASSE UND NÖRDLICHE FLYSCHZONE [RHE]

7.1 ÜBERBLICK

DIE NATURRÄUMLICHE VIELFALT DES NÖRDLICHEN TEILES von Vorarlberg ist durch abwechslungsreiche geologische Bedingungen geprägt. Die leicht hochgestellte Molasse mit ihren Konglomeraten, Mergeln und Sandsteinen bildet den Pfänder und die angrenzenden Bergrücken des Leiblachtals. Etwas südlicher folgt die gefaltete Molasse mit einem stärker bewegten Relief. Die nördliche Flyschzone wird durch Sandstein- und Tonsteinabfolgen charakterisiert und weiter südlich vom Helvetikum abgelöst.

Die Gruppe von Grundwasserkörpern umfasst eine Fläche von 311 km² und liegt im nördlichen Vorarlberg, östlich des Bodensees. Es handelt sich hauptsächlich um Kluftgrundwasserkörper, aber auch Porengrundwasserkörper sind Bestandteil dieser Gruppe.



Abbildung 46: Lochau, Pfänder, Bregenz

Im Norden und im Osten bildet die Staatsgrenze die Abgrenzung der Grundwasserkörpergruppe, im Süden wird sie durch das Helvetikum und im Westen durch das Rheintal begrenzt.

Wasserwirtschaftlich relevant sind vor allem die Sandsteine der Molassezone und die mächtigen Konglomeratabfolgen der Nagelfluhbänke. Während die Sandsteine der Molassezone ausschließlich als Kluftgrundwasserleiter einzustufen sind, weisen die Nagelfluhbänke zusätzlich örtlich geringmächtige Verkarstungen auf. Es befinden sich auch Porengrundwasserkörper von untergeordneter Bedeutung in der Gruppe, wobei der Porengrundwasserleiter des Leiblachtals am bedeutendsten ist.

Die Grundwasserneubildung findet hauptsächlich durch Versickerung von Niederschlägen statt, wobei die mittlere Jahresniederschlagssumme bei 1.950 mm liegt. Ein geringerer Anteil entfällt auf die Speisung durch Oberflächengewässer.

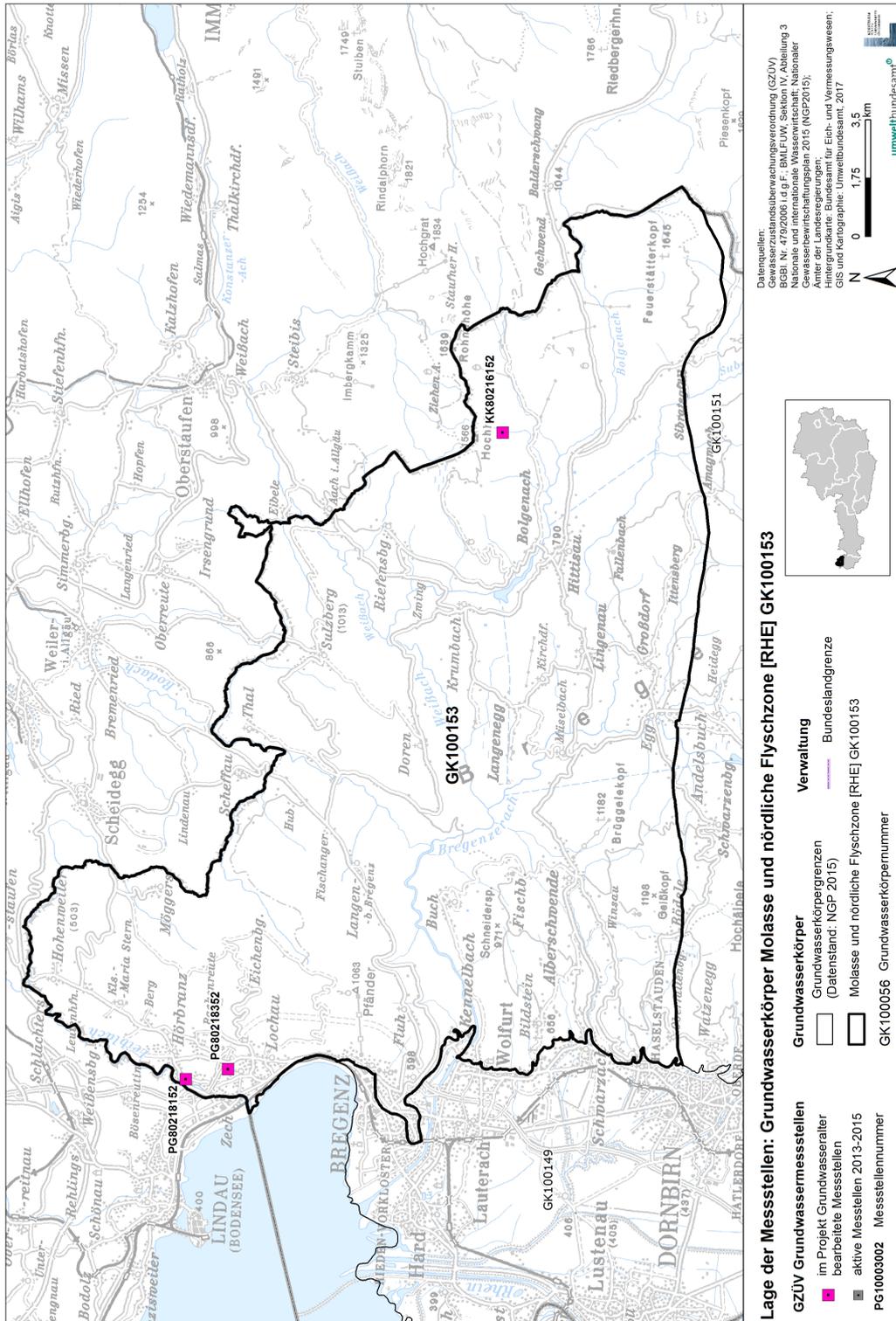


Abbildung 47: Übersichtskarte Grundwasserkörper Molasse und nördliche Flyschzone [RHE] mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen

Im Grundwasserkörper Molasse und nördliche Flyschzone [RHE] wurden alle drei GZÜV-Messstellen in Hinblick auf die Mittlere Verweilzeit des Wassers untersucht.

Eine detaillierte Beschreibung der Gruppe von Grundwasserkörpern ist im Anhang enthalten.

7.2 ERGEBNISSE

7.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM

Die graphische Gegenüberstellung der Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen im Niederschlag und in Grundwässern in Abbildung 48 erlaubt Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen und Mischungsprozesse der lokalen Grundwasservorkommen.

Die Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen der zwei untersuchten Porengrundwassermessstellen in der Molasse und nördlichen Flyschzone liegen nahe beim gewichteten Niederschlagsmittel in Bregenz (Abbildung 48). Das Grundwasser ist demnach eine ausgeglichene Mischung aus infiltrierten Sommer- und Winterniederschlägen. Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes der beiden Messstellen PG80218152 und PG80218352 (Gemeinde Hörbranz) im Leiblachtal entspricht in etwa in der Höhe der Niederschlagsstation Bregenz (~ 430 m).

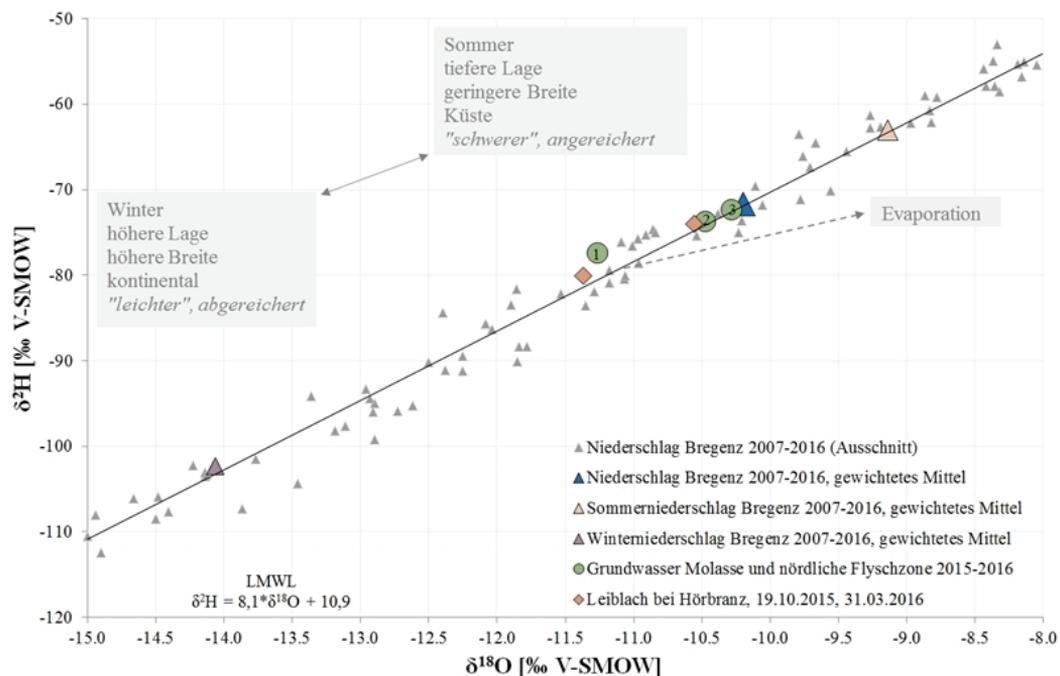


Abbildung 48: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen des Grundwasserkörpers Molasse und nördliche Flyschzone [RHE] im Vergleich zum Oberflächengewässer (Leiblach) und dem Niederschlag in Bregenz (2007-2016)

Anmerkungen: (1) KK80216152 (Hittisau)
 (2) PG80218152 (Hörbranz)
 (3) PG80218352 (Hörbranz)

Im Gegensatz dazu weist die Quelle KK80216152 auf 1.115 m in der Gemeinde Hittisau deutlich abgereicherte, d.h. „leichtere“ Isotopenwerte auf (Abbildung 48). Dies ist vor allem auf den Einfluss der Höhenlage der Quelle und ihres Einzugsgebietes auf die Grundwasserneubildung in dieser Quelle zurückzuführen.

7.2.2 TRITIUM/HELIUM-3

Radiogene, tritiogene und Mantelkomponenten des Heliums im beprobten Grundwasser der Molasse und nördlichen Flyschzone können anhand der 3-Komponenten-Darstellung in Abbildung 49 unterschieden

werden. Diese Differenzierung erlaubt weitere Rückschlüsse auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie unterirdische Wasserwegsamkeiten.

Für alle drei Messstellen der Molasse und nördlichen Flyschzone [RHE] konnten Probenahmen für die Tritium-/Heliumanalytik durchgeführt werden. Zwei Messstellen – PG80218152 und PG80218352 in der Gemeinde Hörbranz – enthielten tritiogenes Helium; die Infiltration des untersuchten Grundwassers liegt somit schon etwas länger zurück (Abbildung 50). Die Messstelle KK80216152 in Hittisau enthielt eine sehr geringe Menge tritiogenes Helium. Diese Messstelle ist durch aktuelle Grundwasserneubildung gekennzeichnet.

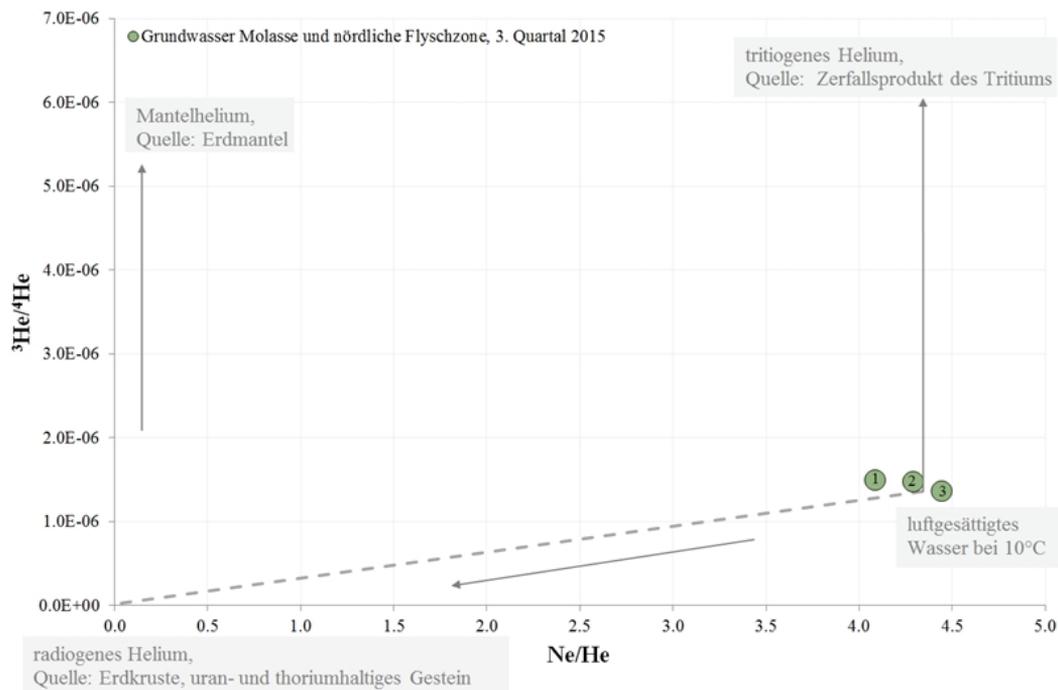


Abbildung 49: Heliumkomponenten des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Molasse und nördliche Flyschzone [RHE]

Anmerkungen: (1) PG80218352 (Hörbranz)
(2) PG80218152 (Hörbranz)
(3) KK80216152 (Hittisau)

Radiogenes Helium wurde in sehr geringfügiger Menge nur in Messstelle PG80218352 (Gemeinde Hörbranz) nachgewiesen. Radiogenes Helium-4 stammt aus dem Zerfall von uran- und thoriumhaltigen Gesteinen und steigt entlang von Störungszonen mit entsprechenden Wegsamkeiten auf.

Die Aussagekraft der ermittelten und in Kapitel 7.3 diskutierten Mittleren Verweilzeiten kann für MVZ < 50 Jahre anhand von Abbildung 50 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags der Station Bregenz den (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechneten) rekonstruierten ursprünglichen Tritiumkonzentrationen und Infiltrationszeitpunkten der untersuchten Grundwässer gegenübergestellt (siehe Kapitel 2.5). Für PG80218352 und PG80218152 (Gemeinde Hörbranz) ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen. Die Probe der Messstelle KK80216152 (Gemeinde Hittisau) liegt etwas unterhalb der Niederschlagszeitreihe. An dieser Messstelle ist von einer Mischung von Grundwässern mit deutlich unterschiedlichen Verweilzeiten auszugehen, wobei zum Zeitpunkt der Tritium/Helium-3-Probenahme der Einfluss von jungen Wässern (= Winterniederschläge) dominierte.

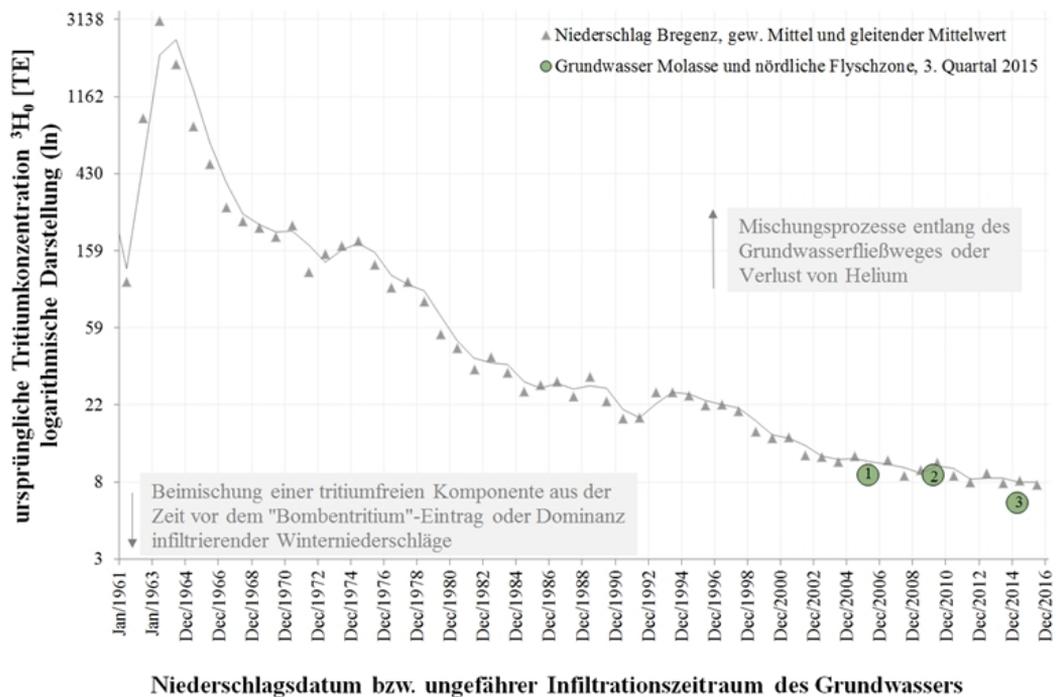


Abbildung 50: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Bregenz (1961-2016) im Vergleich zu den rekonstruierten Tritiumkonzentrationen der ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Molasse und nördliche Flyschzone [RHE]

Anmerkungen: (1) PG80218352 (Hörbranz)
 (2) PG80218152 (Hörbranz)
 (3) KK80216152 (Hittisau)

Die Tritiumkonzentrationen der untersuchten Quell- und Grundwässer spiegeln überwiegend den mit saisonalen Schwankungen behafteten natürlichen Tritiumgehalt der Niederschläge wider. Generell lagen die Tritiumgehalte während der im 3. Quartal 2015 durchgeführten Probenahme im Bereich der Tritiumgehalte von Winterniederschlägen (~ 5,2-6,5 TE). Messstelle KK80216152 weist im 1. Quartal 2016 eine deutlich niedrigere Tritiumkonzentration von 4,2 TE auf, die wahrscheinlich auf den Einfluss von Winterniederschlägen zurückzuführen ist.

7.3 DISKUSSION - ERGEBNIS

Die Molasse und nördliche Flyschzone [RHE], eine oberflächennahe Gruppe von Grundwasserkörpern im Bregenzer Wald, umfasst eine Fläche von 311 km² und besteht vorwiegend aus Kluffgrundwasserkörpern und nachrangig aus Porengrundwasserkörpern. Mergel, Sandsteine und Konglomerate der Molassezone sowie Sandstein- und Tonsteinabfolgen der Nördlichen Flyschzone bauen diese Grundwasserkörpergruppe auf. Die Grundwasserneubildung erfolgt im Wesentlichen durch flächenhafte Versickerung des Niederschlages. Ein geringerer Anteil entfällt auf die Speisung durch Oberflächengewässer.

Die Mittleren Verweilzeiten der untersuchten lokalen Grundwasservorkommen in der Molasse und nördlichen Flyschzone [RHE] variieren im Bereich von < 5 bis 5-10 Jahren, wobei die beiden Porengrundwassermessstellen im Leiblachtal die höheren Mittleren Verweilzeiten aufweisen.

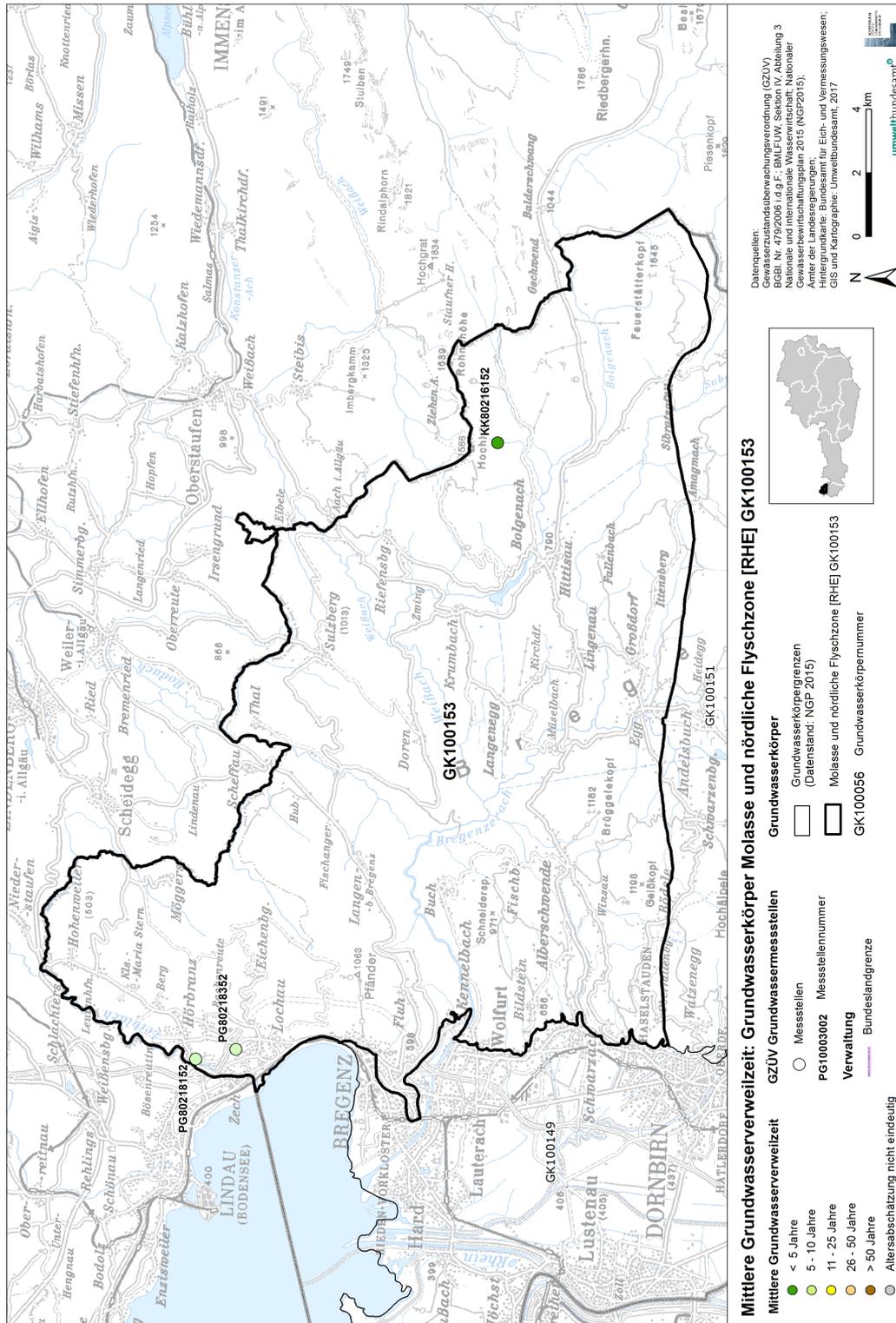


Abbildung 51: Mittlere Verweilzeiten der Grundwässer bei den ausgewählten Messstellen im Grundwasserkörper Molasse und nördliche Flyschzone [RHE]

Die **Quellmessstelle KK80216152** fällt in die MVZ-Kategorie **< 5 Jahre**. Die starke Variabilität der Sauerstoff-18- und Deuterium-, aber auch der Tritiumkonzentrationen sowie die geringe Menge tritiogenen Heliums in der Quellprobe indizieren, dass Grundwasser aus aktueller Neubildung den Quellabfluss dominiert. Die geringe Mineralisation des Wassers mit niedrigen Konzentrationen von Sulfat, Chlorid und Nitrat im Bereich von 1-3 mg/l widerspiegelt die Grundwasserneubildung aus Niederschlagswässern.

Die **Porengrundwassermessstellen PG80218152** und **PG80218352** in der Gemeinde Hörbranz weisen beide Mittlere Verweilzeiten im Bereich von **5-10 Jahren** auf. Dabei enthielt die Probe der Messstelle PG80218352 eine etwas höhere Konzentration an tritiogenem Helium (3,6 TE im Vergleich zu 2,3 TE in PG80218152), enthält also im Vergleich der beiden Messstellen „älteres“ Wasser. Die Nitratkonzentrationen von ~ 6 mg/l bzw. 15 mg/l für PG80218152 und PG80218352 reflektieren die urbane und landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet.

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Grundwassermessstellen in der vorarlbergischen Molasse und Flyschzone als charakteristisch für lokale Grundwasservorkommen mit überwiegend kurzen Mittleren Verweilzeiten beschreiben. Dementsprechend ergibt sich eine **erhöhte Empfindlichkeit dieser Wasserressourcen** gegenüber Änderungen im Wasserhaushalt sowie bewirtschaftungsbedingten Änderungen der Wasserqualität.

TABELLE 6: GRUNDWASSERKÖRPER MOLASSE UND NÖRDLICHE FLYSCHZONE [RHE]: ISOTOPENDATEN UND MITTLERE VERWEILZEITEN

Messstelle	Geologische Einheit	Höhe	$\delta^{18}\text{O}$	VarK $\delta^{18}\text{O}$	^3H 3. Quartal 2015	^3H 1. Quartal 2016	$^3\text{He}_{\text{trit}}$	$^4\text{He}_{\text{radio}}$	ΔNe	MVZ- Kategorie
		[m]	[‰ V-SMOW]	[‰]	[TE]	[TE]	[TE]	[Nml/kg]	[‰]	[Jahre]
KK80216152	Tertiärbecken	1.115	-11,27	7,51	6,1	4,2	0,1	0.0E+00	6.3	< 5
PG80218152	Quartär	411	-10,48	1,04	6,5	6,6	2,3	0.0E+00	15.6	5-10
PG80218352	Quartär	423	-10,29	0,24	5,2	6,5	3,6	1.2E-06	21.4	5-10

8 SÜDLICHE FLYSCHZONE [RHE] UND SÜDLICHE FLYSCHZONE [DBJ]

DIESES KAPITEL UMFASST ZWEI VERSCHIEDENE GRUPPEN von Grundwasserkörpern in Vorarlberg, zum einen die „Südliche Flyschzone [RHE]“, zum anderen die „Südliche Flyschzone [DBJ]“. Beide Gruppen von Grundwasserkörpern grenzen aneinander und sind dem Vorarlberg-Flysch als Teil der lithotektonischen Einheit des Rhenodanubischen Deckensystems zuzuordnen. Die Aufteilung in zwei Gruppen von Grundwasserkörpern ergibt sich aus der Lage in unterschiedlichen Planungsräumen: Der größere westliche Teil der südlichen Flyschzone entfällt auf den Planungsraum „Rhein“ [RHE] und umfasst zwei GZÜV-Messstellen, der kleinere östlichere Teil mit einer GZÜV-Messstelle liegt im Planungsraum „Donau bis Jochenstein“ [DBJ] (siehe Abbildung 53).

Beide Gruppen von Grundwasserkörpern werden im Folgenden separat vorgestellt. Die Darstellung der Untersuchungsergebnisse der insgesamt drei GZÜV-Messstellen sowie deren Diskussion erfolgt gemeinsam.



Abbildung 52: Wasserwinterimpression

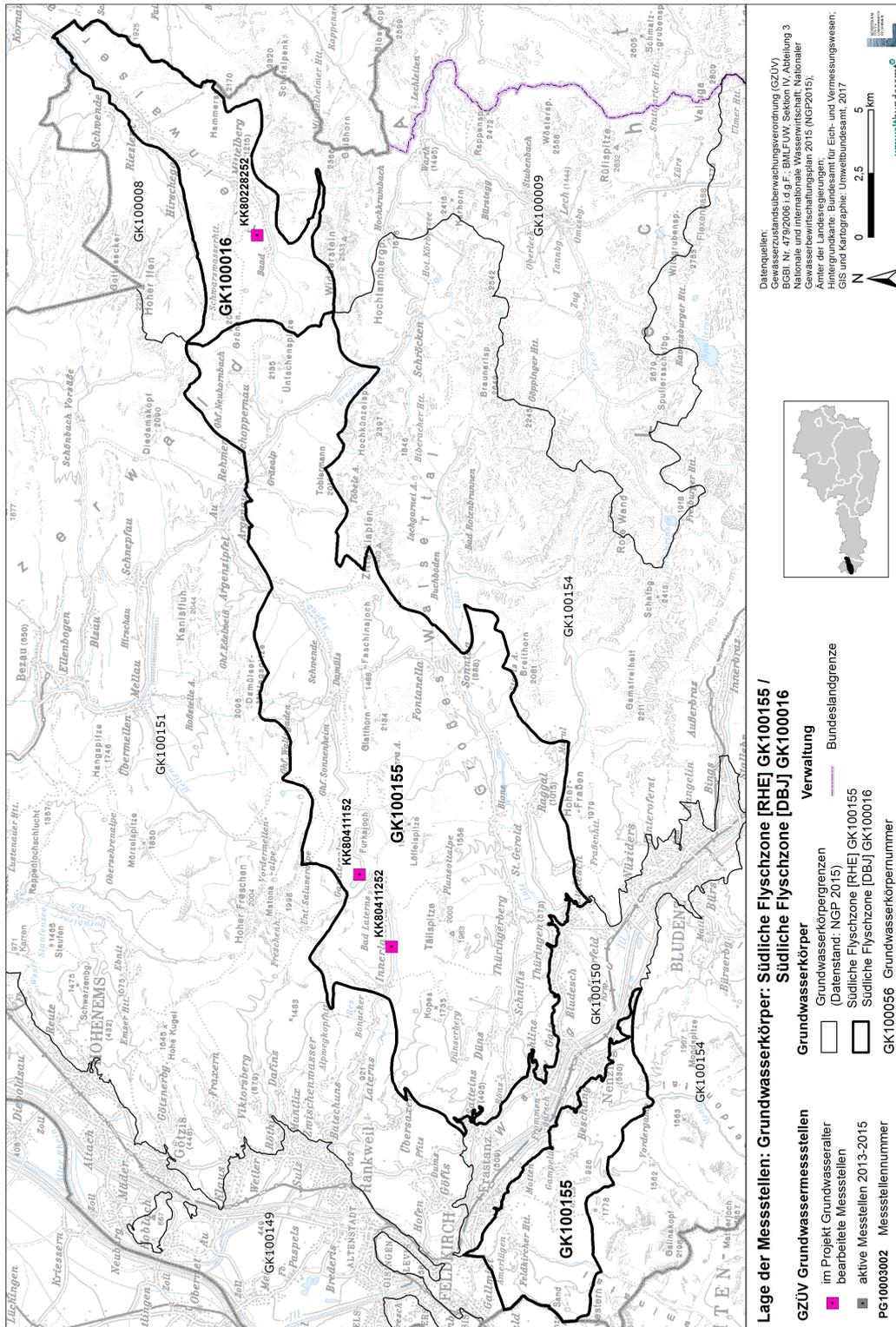


Abbildung 53: Übersichtskarte der Grundwasserkörper Südliche Flyschzone [DBJ] und Südliche Flyschzone [RHE] mit den ausgewählten GZÜV-Messstellen

8.1 ÜBERBLICK

8.1.1 SÜDLICHE FLYSCHZONE [RHE]

Die Grundwasserkörpergruppe Südliche Flyschzone (im Planungsraum Rhein) besteht hauptsächlich aus oberflächennahen Kluftgrundwasserkörpern und liegt zwischen dem Helvetikum im Norden und den nördlichen Kalkalpen im Süden. Die mittlere Seehöhe liegt bei 1.255 m, die Gebietsfläche beträgt 256 km². Der Einzelgrundwasserkörper Walgau trennt die Gruppe von Grundwasserkörpern in zwei nicht zusammenhängende Teile, wobei der kleinere Teil im Westen durch die Staatsgrenze begrenzt wird.



Abbildung 54: Düns, Vorarlberg

Die mächtigen Vorkommen von Reiselberger Sandstein sind für die Grundwasserführung in der Südlichen Flyschzone von Bedeutung, da die Ton- und Sandsteinwechselfolgen, die für diesen Bereich charakteristisch sind, generell schlechte Grundwasserleiter darstellen. Aus diesem Kluftgrundwasserkörper ist die Wasserführung an die mächtigen und weitreichenden Rutschungsmassen gebunden. Für den Wasserhaushalt spielen diese glazialen Sedimentabfolgen keine wesentliche Rolle. Lediglich mit der „Montjolaquelle“ tritt eine Quelle zutage, die aus einer Gleitmasse in den Bereich einer eiszeitlichen Lockergesteinsabfolge übertritt und dort dann entspringt.

Im Großen Walsertal gibt es ein kleines Porengrundwasserfeld, das auf ein sehr schmales Band von Bachschottern entlang der Lutz beschränkt ist.

Die Grundwasserneubildung erfolgt hauptsächlich über die Versickerung von Niederschlag. Lediglich im Bereich der Porengrundwasserfelder spielen Infiltration aus Bächen und Zusickerung von Hangwasser eine Rolle.

Im Grundwasserkörper Südliche Flyschzone [RHE] wurden beide GZÜV-Messstellen zur Abschätzung der Mittleren Verweilzeiten des Wassers herangezogen.

Eine detaillierte Beschreibung des Grundwasserkörpers ist im Anhang enthalten.

8.1.2 SÜDLICHE FLYSCHZONE [DBJ]

Die Gruppe von Grundwasserkörpern im Planungsraum „Donau bis Jochenstein“ weist Gebirgscharakter auf und erstreckt sich mit einer Fläche von knapp 50 km² auf einer mittleren Seehöhe von 1.468 m. Im Kleinwalsertal gelegen, wird sie im Norden durch die Grundwasserkörpergruppe Helvetikum Donau, im Osten durch die Staatsgrenze, im Süden durch die nördlichen Kalkalpen und im Westen durch die Grundwasserkörpergruppe Südliche Flyschzone Rhein begrenzt.



Abbildung 55: Mittelberg, Vorarlberg

Die südliche Flyschzone wird aus Sand- und Tonsteinwechselfolgen aufgebaut, die sehr schlechte Grundwasserleiter darstellen. Der Kluftgrundwasserleiter aus Reiselberger Sandstein, der aufgrund seiner geringen Verbreitung nur von lokaler Bedeutung ist, und die Gleitbahnen großflächiger Hangrutschungen stellen hydrologisch interessante Ausnahmen dar. Die glazial und tektonisch übertieften Talböden sind von nacheiszeitlichen Lockergesteinsabfolgen gefüllt und bilden im Bereich von Mittelberg einen leistungsfähigen Porengrundwasserkörper.

Die Fläche der Gruppe von Grundwasserkörpern ist zu rund 83 % mit Wäldern und naturnahen Gebieten bedeckt. Eine Gefährdung für das Grundwasser stellen Tourismus und Land- und Forstwirtschaft dar.

Die Grundwasserneubildung erfolgt größtenteils aus flächenhafter Versickerung aus Niederschlag, findet aber auch über Speisung aus Oberflächengewässern statt.

Die Gruppe von Grundwasserkörpern Südliche Flyschzone [DBJ] wird durch eine GZÜV-Messstelle repräsentiert - eine zur Trinkwassergewinnung genutzte Quelle.

Eine detaillierte Beschreibung des Grundwasserkörpers ist im Anhang enthalten.

8.2 ERGEBNISSE

8.2.1 SAUERSTOFF-18 UND DEUTERIUM

Die graphische Gegenüberstellung der Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen im Niederschlag und in Grundwässern in Abbildung 56 erlaubt Rückschlüsse auf Bildungsbedingungen und Mischungsprozesse der lokalen Grundwasservorkommen.

Die Sauerstoff-18 und Deuteriumkonzentrationen der drei untersuchten Karst- und Kluftgrundwassermessstellen in Südlichen Flyschzone [DBJ] und Südlichen Flyschzone [RHE] zeigen deutlich abgereicherte, d.h. „leichtere“ Isotopenwerte als das gewichtete Niederschlagsmittel der Station Bregenz. Dies ist in erster Linie auf den sogenannten Höheneffekt zurückzuführen, da die untersuchten Messstellen und ihre Einzugsgebiete zwischen 1.000 bis 1.500 m höher liegen als die Niederschlagsstation Bregenz.

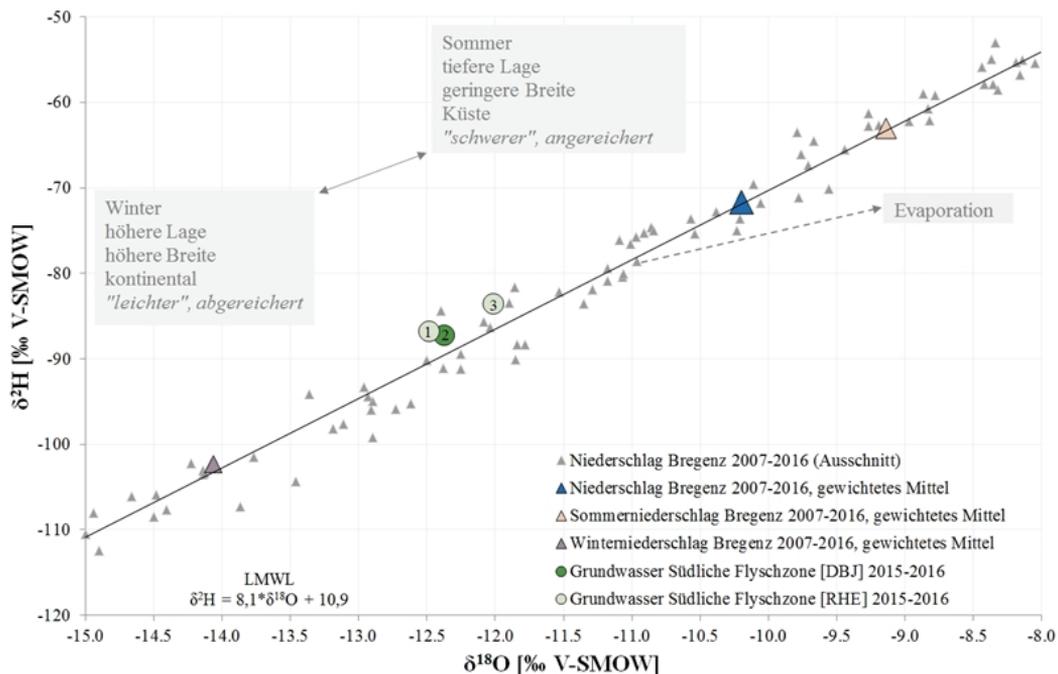


Abbildung 56: Mittelwerte der Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen in den Grundwasserkörpern Südliche Flyschzone [DBJ] und Südliche Flyschzone [RHE] im Vergleich zum Niederschlag in Bregenz (2007-2016)

Anmerkungen: (1) KK80411152 (Laterns)
(2) KK80228252 (Mittelberg)
(3) KK80411252 (Laterns)

Die abgereichertesten Werte zeigt die Messstelle KK80411152 in der Gemeinde Laterns auf 1.075 m gelegen. Sie entspringt im südwestlichen unteren Hangbereich des Gerenfalben (höchste Erhebung 1.938 m). Saisonal schwanken die Sauerstoff-18- und Deuteriumkonzentrationen in dieser gering mineralisierten Quelle ($\sim 174 \mu\text{S}/\text{cm}$) kaum und deuten auf eine gute Durchmischung des infiltrierenden Niederschlagswassers. Die Isotopenwerte der Quellmessstelle KK80411252, ebenfalls in der Gemeinde Laterns an der unteren Südflanke des Falbenstocks (1.793 m) gelegen, entsprechen der etwas geringeren Höhe des Quelleinzugsgebietes. Saisonal schwanken die Sauerstoff-18- und Deuteriumkonzentrationen kaum.

Messstelle KK80228252 in der Gemeinde Mittelberg liegt auf 1.325 m an der unteren Südflanke des Walmendinger Horn (1.990 m) und weist ebenfalls geringe saisonale Schwankungen der Sauerstoff-18- und Deuteriumkonzentrationen auf.

8.2.2 TRITIUM/HELIUM-3

Radiogene, tritiogene und Mantelkomponenten des Heliums im beprobten Grundwasser der Südlichen Flyschzone [DBJ] und Südlichen Flyschzone [RHE] können anhand der 3-Komponenten-Darstellung in Abbildung 57 unterschieden werden. Diese Differenzierung erlaubt weitere Rückschlüsse auf die Art und Weise der Grundwasserneubildung sowie unterirdische Wasserwegsamkeiten.

Für zwei Messstellen der Südlichen Flyschzone [DBJ] und Südlichen Flyschzone [RHE] - KK80411252 (Gemeinde Laterns) und KK80228252 (Gemeinde Mittelberg) - konnten Probenahmen für die Tritium-/Heliumanalytik durchgeführt werden. An der Messstelle KK80411252 war das aufgrund der Gegebenheiten vor Ort nicht möglich. Beide Messstellen enthielten kein tritiogenes Helium. Die Messstellen sind demnach durch aktuelle Grundwasserneubildung gekennzeichnet. Einschränkend muss vermerkt werden, dass aufgrund der Messstellensituation ein Austausch von Helium mit der Atmosphäre vor der Probenahme nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte. Die Folge wäre eine Unterschätzung des tatsächlichen Gehalts an tritiogenem Helium.

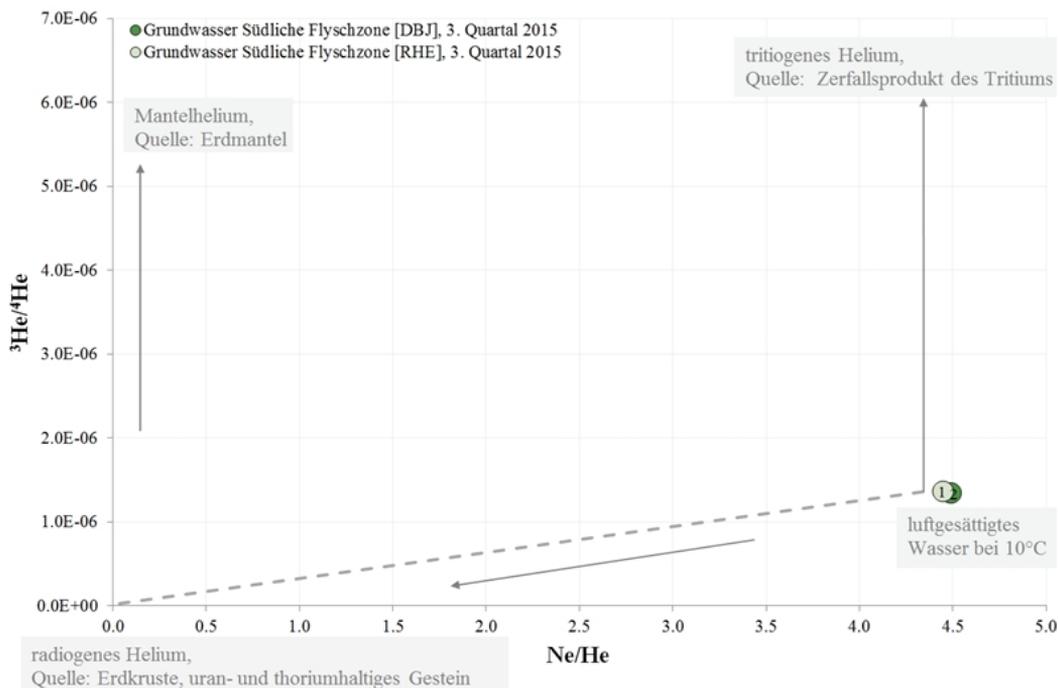


Abbildung 57: Heliumkomponenten des Grundwassers bei den ausgewählten Messstellen in den Grundwasserkörpern Südliche Flyschzone [DBJ] und Südliche Flyschzone [RHE]

Anmerkungen: (1) KK80411252 (Laterns)

(2) KK80228252 (Mittelberg)

Radiogenes Helium wurde in keiner der beiden Messstellen nachgewiesen (Abbildung 57). Radiogenes Helium-4 stammt aus dem Zerfall von uran- und thoriumhaltigen Gesteinen und steigt entlang von Störungszonen mit entsprechenden Wegsamkeiten auf.

Die Aussagekraft der ermittelten und in Kapitel 8.3 diskutierten Mittleren Verweilzeiten kann für $\text{MVZ} < 50$ Jahre anhand von Abbildung 58 überprüft werden. Hier wurden die Tritiumkonzentrationen des Niederschlags der Station Bregenz den (auf Basis der Tritium-Helium-Konzentrationen und des Piston-Flow Modells berechneten) rekonstruierten ursprünglichen Tritiumkonzentrationen und Infiltrationszeitpunkten der untersuchten Grundwässer gegenübergestellt (siehe Kapitel 2.5). Die Proben der beiden Messstellen KK80411252 und KK80228252 liegen beide etwas unterhalb der Niederschlagszeitreihe, was entweder auf

den Einfluss von Einzelereignissen/Winterniederschlägen oder einer „älteren“, tritiumfreien Grundwasserkomponente auf den Quellabfluss zum Zeitpunkt der Probenahme hindeutet.

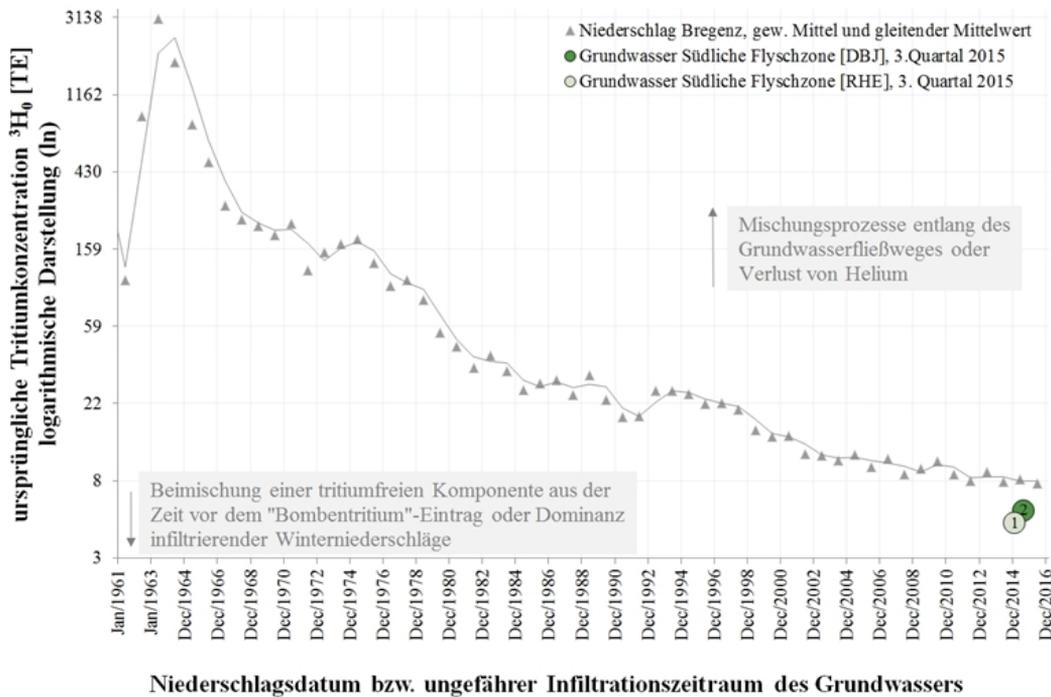


Abbildung 58: Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen des Niederschlags in Bregenz (1961-2016) im Vergleich zu den rekonstruierten Tritiumkonzentrationen der ausgewählten Messstellen in den Grundwasserkörpern Südliche Flyschzone [DBJ] und Südliche Flyschzone [RHE]

Anmerkungen: (1) KK80411252 (Laterns)

(2) KK80228252 (Mittelberg)

Die Tritiumkonzentrationen der untersuchten Quell- und Grundwässer spiegeln überwiegend den mit saisonalen Schwankungen behafteten natürlichen Tritiumgehalt der Niederschläge wider. Allerdings wies vor allem KK80411152 in der Gemeinde Laterns relativ niedrige Tritiumkonzentration von 2,9 bis 4,8 TE auf. Hier ist zumindest zeitweise von der Beimischung einer tritiumfreien Grundwasserkomponente auszugehen.

Für die Quelle KK80411252 liegen zudem Tritiummesswerte aus den Jahren 1996/1997 und 2013/2014 vor, diese betragen im Mittel $18,9 \pm 0,3$ TE und $8,9 \pm 1,0$ TE. Tritiumkonzentrationen in der Messstelle KK80411152 betragen in den Jahren 1996/1997 im Mittel $17,8 \pm 1,1$ TE. Diese Messwerte konnten für die Modellierung der Mittleren Verweilzeiten herangezogen werden.

8.3 DISKUSSION -ERGEBNIS

Die beiden vorarlbergischen Grundwasserkörpergruppen Südliche Flyschzone [DBJ] und Südliche Flyschzone [RHE] umfassen eine Fläche von 50 bzw. 256 km². Es handelt sich hauptsächlich um lokale Kluftwasservorkommen. Lokal, zum Beispiel im Bereich von Mittelberg, gibt es auch einen leistungsfähigen Porengrundwasserkörper. Die Grundwasserneubildung erfolgt im Wesentlichen durch flächenhafte Versickerung des Niederschlages. In geringem Umfang erfolgt Grundwasserneubildung durch Oberflächengewässer im Bereich der Porengrundwasserfelder.

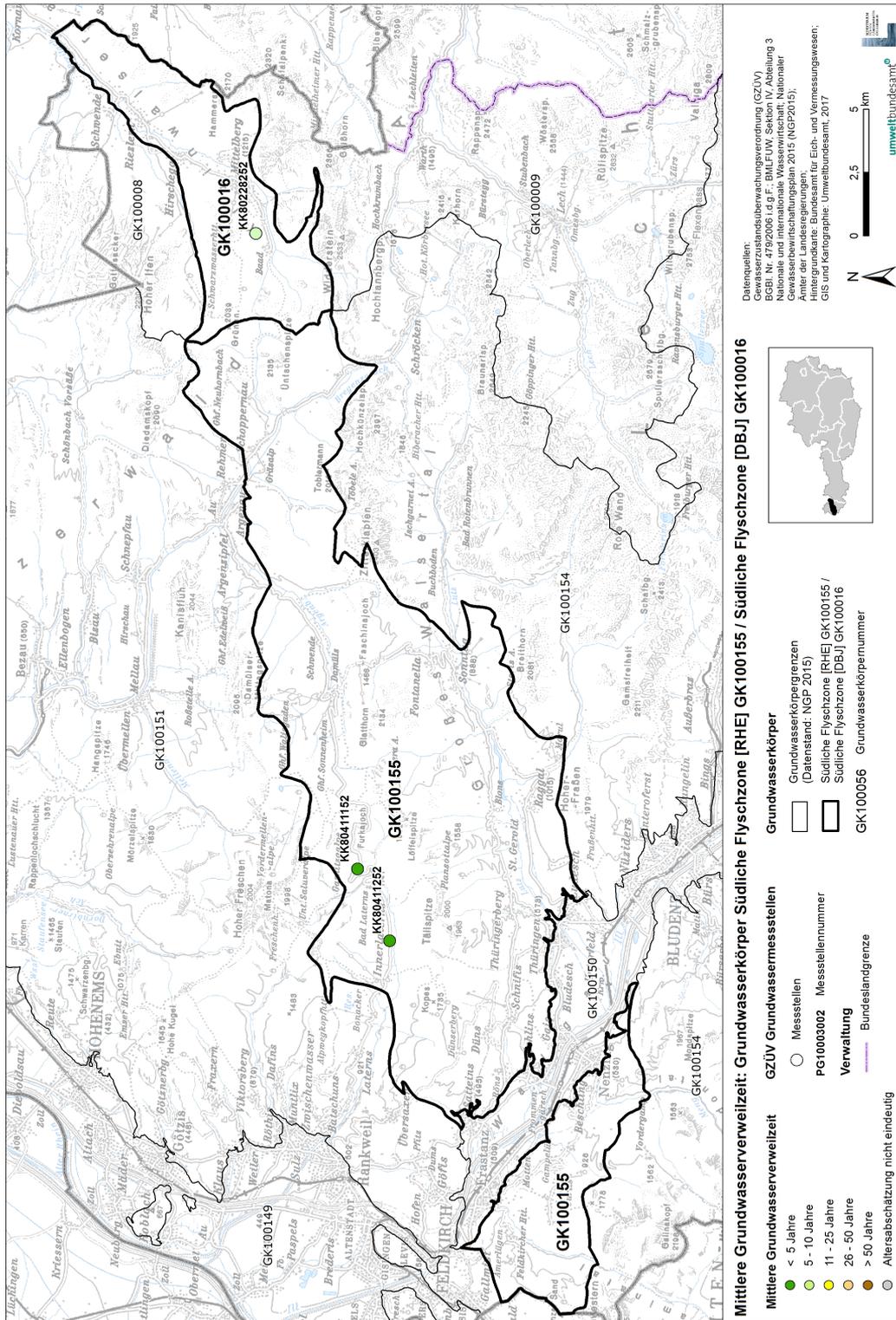


Abbildung 59: Mittlere Verweilzeiten der Grundwässer bei den ausgewählten Messstellen in den Grundwasserkörpern Südliche Flyschzone [RHE] und Südliche Flyschzone [DBJ]

Die Mittlere Verweilzeiten der untersuchten lokalen Grundwasservorkommen in der Südlichen Flyschzone [DBJ] und Südlichen Flyschzone [RHE] variieren im Bereich von < 5 bis 5-10 Jahren.

Die Kluftwassermessstelle **KK80228252** in der Gemeinde Mittelberg fällt in die MVZ-Kategorie **5-10 Jahre**. Zwar konnte an der Messstelle kein tritiogenes Helium nachgewiesen werden, jedoch sind die Bedingungen für die Tritium/Helium-3-Probenahme aufgrund des Messstellenausbaus nicht optimal

gewesen, so dass ein Austausch des Probenheliums mit der Atmosphäre nicht ausgeschlossen werden kann. Die geringen saisonalen Schwankungen der untersuchten Isotopenparameter deuten insgesamt auf ein gut durchmischtes, ergiebiges Grundwasservorkommen hin, in dem die jahreszeitlichen Schwankungen des Niederschlags signals bereits ausgemittelt sind. Das Grundwasser weist geogen erhöhte Sulfatkonzentrationen im Bereich von ~ 25 mg/l auf, während die Nitrat- und Chloridkonzentrationen die Niederschlagskonzentrationen widerspiegeln.

Für die dem Reiselsberger Sandstein aus einer Kluftspalte entspringende Messstellen **KK80411252** und **KK80411152** in der Gemeinde Laterns wurden mittels der mehrjährigen Tritiumdaten (1996/97, 2013/14 und 2015/16) Mittlere Verweilzeiten < **5 Jahre** bestimmt. Der überwiegende Anteil des Grundwassers stammt aus rezenter Neubildung. Allerdings lassen sich die beobachteten niedrigen Tritiumwerte zwischen 2,9 und 4,8 TE an diesen Messstellen am ehesten durch die mengenmäßig geringfügige Beimischung einer „älteren“, tritiumfreien Grundwasserkomponente (> 50 Jahre) bei Niedrigwasserbedingungen erklären. Den beiden Probenahmen für Tritium in diesem Projekt waren jeweils 1-3 Monate mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen vorausgegangen. Die beiden Quellwässer sind gering mineralisiert (195 bzw. 162 µS/cm) und reflektieren bezüglich Nitrat, Chlorid und Sulfat die Niederschlagsbedingungen.

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Grundwassermessstellen in der Südlichen Flyschzone [DBJ] und Südlichen Flyschzone [RHE] als charakteristisch für lokale Grundwasservorkommen mit überwiegend kurzen Mittleren Verweilzeiten beschreiben. Dementsprechend ergibt sich eine **erhöhte Empfindlichkeit dieser Wasserressourcen** gegenüber Änderungen im Wasserhaushalt sowie bewirtschaftungsbedingten Änderungen der Wasserqualität.

TABELLE 7: GRUNDWASSERKÖRPER SÜDLICHE FLYSCHZONE [DBJ] UND SÜDLICHE FLYSCHZONE [RHE]: ISOTOPENDATEN UND MITTLERE VERWEILZEITEN

Messstelle	Geologische Einheit	Höhe	$\delta^{18}\text{O}$	VarK $\delta^{18}\text{O}$	^3H 3. Quartal 2015	^3H 1. Quartal 2016	$^3\text{He}_{\text{trit}}$	$^4\text{He}_{\text{radio}}$	ΔNe	MVZ- Kategorie
		[m]	[‰ V-SMOW]	[‰]	[TE]	[TE]	[TE]	[Nml/kg]	[‰]	[Jahre]
KK80228252	Penninische Einheiten	1.325	-12,38	0,46	5,5	6,1	0,0	0.0E+00	14.2	5-10
KK80411252	Penninische Einheiten	1.590	-12,02	0,41	4,6	4,7	0,1	0.0E+00	10.9	< 5
KK80411152	Penninische Einheiten	1.075	-12,49	0,78	4,8	2,9				< 5

9 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNG	ERLÄUTERUNG
^2H	Deuterium (schwerer Wasserstoff)
^3H	Tritium (überschwerer Wasserstoff)
$^3\text{He} / ^3\text{He}_{\text{trit.}}$	Helium-3 / tritiogenes Helium-3
$^4\text{He} / ^4\text{He}_{\text{rad.}}$	Helium-4 / radiogenes Helium-4
^{18}O	Sauerstoff-18
$\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$	Delta-Notation (Abweichung des Isotopenhäufigkeitsverhältnisses der Probe gegenüber dem Referenzstandard, Angabe in ‰)
^{14}C	Kohlenstoff-14
^{36}Cl	Chlor-36
ANIP	Austrian Network of Isotopes in Precipitation (Österreichisches Messnetz für Isotope im Niederschlag und in Oberflächengewässern)
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Bq	Becquerel (Maßeinheit für Radioaktivität)
CORINE	Coordination of Information on the Environment (koordinierte Erfassung von Informationen über die Umwelt)
DBJ	Planungsraum „Donau bis Jochenstein“
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff
DRA	Planungsraum „Drau“
DUJ	Planungsraum „Donau unterhalb Jochenstein“
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWK	Grundwasserkörper
GWRL	EU Grundwasserrichtlinie
GZÜV	Gewässerzustandsüberwachungsverordnung

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

H	Wasserstoff
LMWL	Local Meteoric Water Line (lokale meteorische Wasserlinie)
MVZ	Mittlere Verweilzeit
Ne	Neon
O	Sauerstoff
ÖPUL	Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft
QZV Chemie GW	Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser
RHE	Planungsraum „Rhein“
TE	Tritium-Einheit
VarK	Variationskoeffizient
V-SMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water: Referenzstandard für stabile Isotope (^2H , ^{18}O)
WISA	Wasserinformationssystem Austria
WRG 1959	Wasserrechtsgesetz 1959
WRRL	EU Wasserrahmenrichtlinie

10 LITERATURVERZEICHNIS

10.1 ALLGEMEIN

- AESCHBACH-HERTIG, W. (1994): Helium und Tritium als Tracer für physikalische Prozesse in Seen (Doctoral dissertation, Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 10714, 1994).
- AGGARWAL, P. K., FROEHLICH, K. F., & GAT, J. R. (2005): Isotopes in the water cycle. Dordrecht: Springer.
- AMIN, I. E., & CAMPANA, M. E. (1996): A general lumped parameter model for the interpretation of tracer data and transit time calculation in hydrologic systems. *Journal of Hydrology*, 179(1), 1-21.
- ANIP – Austrian Network of Isotopes in Precipitation (2017): Österreichisches Netzwerk für Isotopen (^{18}O , ^2H , ^3H) in Niederschlägen und Oberflächengewässern. BMLFUW, Ämter d. Landesregierungen, ARC und Umweltbundesamt, Wien. <http://www.umweltbundesamt.at>
- COOK, P. & HERCZEG, A. L. (2000): Environmental tracers in subsurface hydrology. Kluwer Academic Publishers, London. 529 p.
- CORINE – Coordinated Information on the European Environment (2012): Umweltbundesamt GmbH. http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/raumordnung/rp_projekte/rp_corine/
- GEWÄSSERZUSTANDSÜBERWACHUNGSVERORDNUNG (GZÜV; BGBl. II Nr. 479/2006 i.d.g.F.): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Überwachung des Zustandes von Gewässern.
- H₂O-FACHDATENBANK (2017): Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV) BGBl. Nr. 479/2006 i.d.g.F.; BMLFUW, Sektion IV/Abteilung 3 Nationale und internationale Wasserwirtschaft; Ämter der Landesregierungen.
- KAZEMI, G. A., LEHR, J. H., & PERROCHET, P. (2006): Groundwater age. John Wiley & Sons.
- KENDALL, C. & McDONNELL, J. J. (Hrsg.). (2012): Isotope tracers in catchment hydrology. Elsevier.
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. (1996): Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. 9-58, IAEA-TECDOC-910, 207 S. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- MOSER, H., & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 8. Borntraeger. Berlin.
- SCHLOSSER, P.; STUTE, M.; DÖRR, H.; SONNTAG, C. & MÜNNICH, K.O. (1988): Tritium/ ^3He dating of shallow groundwater. *Earth and Planetary Science Letters* 89: 353–362.
- SCHLOSSER, P.; STUTE, M.; SONNTAG, C. & MÜNNICH, K.O. (1989): Tritogenic ^3He in shallow groundwater. *Earth and Planetary Science Letters* 94: 245–254.

STICHLER, W. & HERMANN, A. (1983): Application of environmental isotope techniques in water balance studies of small basins: In: New Approaches in Water Balance Computations, IAHS, Hamburg, IAHS-148: 93-112.

SÜLTENFUß, J. & MASSMANN, G. (2004): Datierung mit der ³He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. Grundwasser, 4, 221-234.

10.2 MACHLAND [DUJ]

AMT D. OÖ. LANDESREGIERUNG / Hydrographischer Dienst: Hydrologische Charakteristik.
<http://hydro.ooe.gv.at/#Startseite>

AMT D. OÖ. LANDESREGIERUNG / Direktion für Landesplanung, wirtschaftliche und ländliche Entwicklung / Abteilung Naturschutz (2007): Leitbilder für Natur und Landschaft. Band 7: Raumeinheit Machland. In Zusammenarbeit mit AVL Arbeitsgemeinschaft für Vegetationsökologie und Landschaftsplanung. Linz.

BREINER, H. (1976): Untersuchung Mauthausen – Ardagger. Siedlungswasserwirtschaftliche Regionalstudie für den Bereich der österreichischen Donaustricke. Bericht 6, November 1976. Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft Abteilung IV-1.

BUCHROITHNER, M.F. (1984): Karte der Landsat Bildlineamente von Österreich 1:500.000. Hrsg.: Geologische Bundesanstalt, Wien. Digitales Oberösterreichisches Raum-Informationssystem [DORIS Atlas 4.0](#)

LOHBERGER, W. (1983): Schongebietsentwurf Perg - Technischer Bericht, Dezember 1983. Im Auftrag des Amtes der OÖ Landesregierung UA. Wasserwirtschaft und hydrographischer Dienst.

WOLFBAUER, J. (1996): Arbeitskarten 1:100.000 - Geologie mit Lineamenten: Lineamente 3. Ordnung/Tektonische Elemente lokaler Bedeutung. Digitales Oberösterreichisches Raum-Informationssystem [DORIS Atlas 4.0](#)

10.3 WELSER HEIDE [DUJ]

AMT D. OÖ. LANDESREGIERUNG / Hydrographischer Dienst: Hydrologische Charakteristik.
<http://hydro.ooe.gv.at/#Startseite>

BUCHROITHNER, M.F. (1984): Karte der Landsat Bildlineamente von Österreich 1:500.000. Hrsg.: Geologische Bundesanstalt, Wien. Digitales Oberösterreichisches Raum-Informationssystem [DORIS Atlas 4.0](#)

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2017): [Multithematische geologische Karte von Österreich 1:1.000.000](#)

10.4 DRAUTAL [DRA]

AMT DER KÄRNTNER LANDESREGIERUNG, Kärntner Institut für Seenforschung, Verein für angewandte Gewässerökologie, Abteilung 15 – Umweltschutz und Technik (2003): Grundwasser in Kärnten, Beschreibung der Grundwasserkörper – Hydrochemische Auswertung.

AMT DER KÄRNTNER LANDESREGIERUNG (2017): [Kärnten Atlas V4](#)

ANDERLE, N. (1954): Zur Kenntnis der Grundwasserverhältnisse der Umgebung von Lienz, Villach, Klagenfurt und Wolfsberg. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt; 97 (1954), S.337-366. Wien.

ARNDT, R. & BÄK, R. (2005): Geophysik im Drautal – Ergebnisse und Erkenntnisse. Arbeitstagung 2005 der Geologischen Bundesanstalt Blatt 182 Spittal an der Drau, Gmünd/Kärnten 12.-16. Sept. 2005. Geologische Bundesanstalt, Wien.

FÜRST, J.; MAIR-GRUBER, J.; REICHEL, G. & NACHTNEBEL, H.P. (Projektl.) (1993): Modellstudie Grundwasserhaushalt westlich Sachsenburg Oberes Drautal: Endbericht. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Wien. Im Auftrag von Geocenter – Rohstoffforschung Kärnten. 151 S.

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2017): [Multithematische geologische Karte von Österreich 1:1.000.000](#)

HOLZEIS, F.; KOPEINIG, C.; MANDL, P. & MOSER, J. (2014): Wasser in Kärnten. Eine Hydrologische Bilanz. Teil 1 – Wasserhaushalt. Hrsg.: Amt der Kärntner Landesregierung, Abt. 8 Kompetenzzentrum Umwelt, Wasser und Naturschutz, Unterabteilung Wasserwirtschaft/Hydrographie. Klagenfurt.

KAHLER, F. (1978): Die natürlichen Heilvorkommen Kärntens. – Raumordnung in Kärnten, 10, Klagenfurt.

MOSER, J. (2006): Regionalisierung von hydrologischen Kennwerten in Kärnten. Amt der Kärntner Landesregierung. Abteilung 18 – Wasserwirtschaft / Hydrographie. 15 S.

POLTNIG, W. (2004): Detailstudie Geothermie Villacher Becken. Joanneum Research, Institut für Wasserressourcen-Management, Hydrogeologie und Geophysik. Graz. Auftraggeber: Amt der Kärntner Landesregierung.

SILMAS – Sustainable Instruments for Lakes Management in the Alpine Space (2013): Climate Change Impacts on Alpine Lakes. WP4, 208 S. Alpine Lakes Network.
http://www.ktn.gv.at/285697_DE--silmas_2013_climate_change_impacts_131031.pdf

SUSSMANN, O. (1901): Zur Kenntnis einiger Blei- und Zinkerzvorkommen der alpinen Trias bei Dellach im Oberdrautal. - Jb. d. Geologischen Reichsanstalt, Band LI, S. 265-300, 1 geol. Karte. Wien.

ZÖTL, J. & GOLDBRUNNER, J.E. (1993): Die Mineral- und Heilwässer Österreichs. Geologische Grundlagen und Spurenelemente. Springer-Verlag, Wien.

10.5 FLYSCHZONE [DUJ]

THENIUS, E. (1974): Geologie der Österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen, Niederösterreich. Geologische Bundesanstalt, Wien.

11 KONTAKTINFORMATIONEN ZU DEN AUTORINNEN

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5, 1090 Wien

Dr. Heike Brielmann

Tel.: +43-1-31304-3546

heike.brielmann@umweltbundesamt.at

Mag. Franko Humer

Tel.: +43-1-31304-3470

franko.humer@umweltbundesamt.at

Dipl. Geoök. Uta Wemhöner

Tel.: +43-1-31304-3592

uta.wemhoener@umweltbundesamt.at

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Abteilung IV/3: Nationale und internationale Wasserwirtschaft
Stubenring 1, 1010 Wien

Dr. Rudolf Philippitsch (Projektkoordination)

Tel.: +43-1-71100- 607118

rudolf.philippitsch@bmlfuw.gv.at