

Uran im Grundwasser

Endbericht zum DaFNE-Forschungsprojekt Nr. 101204



Im Auftrag von:



LAND  KÄRNTEN



Uran im Grundwasser

Endbericht zum DaFNE-Forschungsprojekt Nr. 101204

Wien, 2019

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus

Stubenring 1, 1010 Wien

bmnt.gv.at

Autorinnen und Autoren: Franko Humer (Projektleitung) und Uta Wemhöner

(Umweltbundesamt); Rudolf Philippitsch (vormals BMNT); Daniel Elster, Gerhard Schubert,

Eva-Florina Kaminsky, Gerhard Hobiger, Christian Benold, Philipp Legerer und Rudolf Berka

(alle Geologische Bundesanstalt); Michael Waitzinger und Friedrich Finger (Universität

Salzburg); Stephan Krämer, Kyle Chardi und Walter Schenkeveld (alle Universität Wien); Lisa

Fischer und Stephan Hann (Universität für Bodenkultur Wien); Georg Dersch (Österreichische

Agentur für Ernährungssicherheit)

Gesamtumsetzung: Franko Humer (Umweltbundesamt)

Fotonachweis: Elisabeth Stadler, Umweltbundesamt (Titelseite); Rudolf Philippitsch:

Vorwort; Geologische Bundesanstalt: Abb. 5, 6, 33-36, 38-54, 58-59, 62-67, 70-81, 83-94;

Universität Wien: Abb. 7; Franko Humer, Umweltbundesamt: S. 64, S. 67

Wien, 2019. Stand: November 2019

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger

Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums für

Nachhaltigkeit und Tourismus und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und

können der Rechtssprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an

service@bmnt.gv.at.

Inhalt

1 Einleitung	12
2 Inhalt und Ziele	14
2.1 Ziele.....	14
2.2 Vorgangsweise	15
3 Methodik	17
3.1 Grundwasseruntersuchungen.....	17
3.1.1 Grundwassermonitoring	17
3.1.2 Ultrapurenanalytik	17
3.2 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen.....	18
3.2.1 Bodenanalytik.....	18
3.2.2 Beschreibungen des Mineralbestands der kristallinen Gesteine.....	18
3.2.3 RFA- und ICP-MS-Gesteinsanalysen, Rasterelektronenmikroskopie.....	23
3.2.4 Leachingversuche: Sequentielle Extraktion der Uran-Phasen.....	25
3.2.5 Messung von Radon-222 in Grundwässern.....	26
3.2.6 Bestimmung der Radon-222-Emanation des Sediments.....	27
3.3 Säulenexperimente zum Verhalten von Uran an Redox-Fronten	30
3.3.1 Probenahme und Charakterisierung	30
3.3.2 Materialien und Analytik	30
3.3.3 Batch-Experimente	30
3.3.4 Säulenexperimente	31
3.3.5 Modellierung.....	33
4 Ergebnisse der Untersuchungen an den Porenaquifer-Standorten im Burgenland und in Niederösterreich	34
4.1 Seewinkel	34
4.1.1 Überblick.....	34
4.1.2 Grundwasseruntersuchungen	37
4.1.3 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen	41
4.1.4 Fazit	47

4.2 Retz	49
4.2.1 Überblick.....	49
4.2.2 Grundwasseruntersuchungen	52
4.2.3 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen	56
4.2.4 Säulenexperimente zum Verhalten von Uran an Redox-Fronten	63
4.2.5 Fazit	81
5 Ergebnisse der Untersuchungen an den Kristallinstandorten in Kärnten, der Steiermark und Tirol	85
5.1 Übersicht zur Geologie der untersuchten Gebiete sowie den Gesteinsproben, Präparaten und Gesamtgesteinsanalysen und weitere Hinweise	85
5.2 Kärnten.....	92
5.2.1 Flattach (Zentralgneis des Sonnenblickkerns).....	92
5.2.2 Zentralgneis des Hölltor-Rotgülden-Kern bei Mallnitz/Kärnten	99
5.2.3 Grundwasseruntersuchungen	116
5.2.4 Fazit	119
5.3 Steiermark.....	120
5.3.1 Überblick.....	120
5.3.2 Grundwasseruntersuchungen	125
5.3.3 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen	128
5.3.4 Fazit	136
5.4 Tirol	137
5.4.1 Ahorngneis bei Mayrhofen/Tirol.....	137
5.4.2 Orthogneis Silz/Öztaler Alpen	153
5.4.3 Grundwasseruntersuchungen	167
5.4.4 Fazit	171
6 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	173
7 Tabellenverzeichnis	177
8 Abbildungsverzeichnis	179
9 Literaturverzeichnis.....	184

Vorwort



MR Dr. Rudolf Philippitsch

Für die wasserwirtschaftliche Planung bei Bund und Ländern hat jene der Trinkwasserversorgung für die heimische Bevölkerung mit qualitativ hochwertigem Wasser besonders hohe Priorität. Neben den technischen und budgetären Herausforderungen für eine gesicherte Versorgung treten bereichsweise mitunter aber auch qualitative Probleme mit dem Eintrag sowohl von menschlich verursachten Schadstoffen als auch von unerwünschten natürlich gelösten Inhaltsstoffen aus Böden und Gesteinen im Grundwasser auf.

Dank eines ausgezeichneten, bundesweiten Überwachungssystems zur Erhebung der Wassergüte in Österreich seit 1991 zum einen und den verpflichtenden laufenden Trinkwasseruntersuchungen der Wasserversorger zum anderen, liegen bundesweit gute Detailkenntnisse über organische und anorganische Substanzen der Grundwasservorkommen vor. Damit werden gleichzeitig auch die Rechtsvorgaben des Wasserrechtsgesetzes 1959, der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG sowie der Trinkwasserverordnung umgesetzt.

Das gilt auch für das Schwermetall Uran, ein natürlich vorkommendes radioaktives Element in vornehmlich Granit- und Gneisgesteinen sowie deren Abtragungsprodukten in den Tal- und Beckenlagen, welches gelöst im Wasser auf Lebewesen in erhöhten Konzentrationen gesundheitsschädliche Auswirkungen haben kann. Weiters ist zumindest gebietsweise auch ein menschlich bedingter Eintrag über den Einsatz von Phosphatdüngemittel mitzubedenken. Vor allem die chemische Toxizität dieses Elements war im Jahr 2012 Anlass für die Festlegung eines Grenzwertes in der Trinkwasserverordnung.

So gut der bisherige Kenntnisstand Österreichweit über regelmäßige Wasseranalysen betreffend die Verteilung der Urangehalte in den Grundwässern auch ist, wurde gleichzeitig erkannt, dass für detailliert abgesicherte Aussagen über die genaue Herkunft des Urans, dessen Eintragspfade und die komplizierten chemischen Wechselwirkungen zwischen Boden, Gestein und Wasser noch reichlich Forschungsbedarf besteht. Insbesondere in Wassermangelgebieten sind solche Grundlagenformationen für die Trinkwasserwirtschaft als Planungsinstrument bei der Auswahl von Versorgungsbrunnen von großer wirtschaftlicher Bedeutung, um teure Aufbereitungsanlagen zu vermeiden bzw. im Bedarfsfall rechtzeitig geeignete Maßnahmen ergreifen zu können. Mit den neugewonnenen Ergebnissen soll zudem auch die besorgte Bevölkerung mit grundlegenden Informationen über Uran im

Grund- und Trinkwasser, dessen Gefährdungspotential und über die daraus abzuleitenden Lösungsmöglichkeiten ausreichend informiert werden können.

Das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), Sektion Wasser, hat daher gemeinsam mit den wasserwirtschaftlichen Planungsorganen der Bundesländer Burgenland, Kärnten, Niederösterreich, Steiermark und Tirol das vorliegende DaFNE-Forschungsprojekt („Datenbank für Forschung zur Nachhaltigen Entwicklung“) initiiert.

Mit der Koordination und Durchführung des Projektes wurde das Umweltbundesamt beauftragt, das seit Jahrzehnten das Bundesministerium mit Fachexpertisen zur Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes 1959 und der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG erfolgreich unterstützt.

Aufgrund der überaus herausfordernden fachübergreifenden, naturwissenschaftlichen Fragestellungen wurden dazu auch erfahrene Expertenteams der geowissenschaftlichen Universitätsinstitute aus Salzburg und Wien, der Universität für Bodenkultur, der Agentur für Ernährungssicherheit und der Geologischen Bundesanstalt in das Forschungsprojekt miteinbezogen.

Um eine möglichst effiziente und auch kostensparende Umsetzung zu gewährleisten, musste eine gezielte Auswahl der Untersuchungslokalitäten in den unterschiedlichen geologischen Einheiten Österreichs vorgenommen werden. Großes Augenmerk dabei wurde auf bereits bekannt belastete Trinkwasservorkommen gelegt, wobei die Probleme der betroffenen Wasserversorger mitberücksichtigt wurden. Mit dieser Vorgangsweise sollen die Ergebnisse gleichzeitig auch auf andere belastete Gebiete im Bundesgebiet umlegbar sein, zumal nicht jede einzelne Grundwasserentnahme in Österreich untersucht werden kann.

Bei den nunmehr vorliegenden geowissenschaftlichen Forschungsergebnissen gilt es besonders hervorzuheben, dass diese zu wesentlichen Neuerkenntnissen über Herkunft, Auftreten und Verhalten in unterschiedlichen Grundwasserkörpern geführt haben und bislang lediglich vermutete Annahmen wissenschaftlich bestätigt oder auch widerlegt haben. Darüber hinaus gewinnen dadurch die bereits veröffentlichten Karten und Berichte des BMNT mit dem Umweltbundesamt „Uran in Grundwässern in Österreich, Wien 2015“ sowie Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs, Wien 2016“ mit der Geologischen Bundesanstalt, zusätzlich an Stellenwert, da die Urananalysen entsprechend besser interpretiert werden können.

Für die Grundwasserwirtschaft im Allgemeinen und die Trinkwasserwirtschaft im Speziellen stellt dieses Projekt einen wichtigen Meilenstein über die Kenntnis von Uran im Grundwasser

in unseren heimischen Grundwasserkörpern dar. Durch diese Untersuchungen haben sich – wie auch in vielen Forschungsbereichen – naturgemäß nicht alle Fragen in gleicher Weise abschließend lösen lassen, dazu bedarf es für die Zukunft weiterer gemeinsamer Aktivitäten.

Die hervorragende Abwicklung des Forschungsprojektes durch das Umweltbundesamt, der intensive Einsatz der Forschungsteams bei den Universitäten, der Agentur für Ernährungssicherheit und der Geologischen Bundesanstalt, deren enge Zusammenarbeit sowohl untereinander als auch mit den Auftraggebern bei Bund und Ländern und den Wasserwerken, war höchst professionell und verdient ein herzliches Dankschön!

Zusammenfassung

Ergebnisse eines bundesweiten Messprogramms im Rahmen der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung im Jahr 2013 zeigten, dass Uran in einigen Bereichen in Österreich im Grundwasser auftritt. Überschreitungen des Parameterwertes der Trinkwasserverordnung von 15 µg/l sind im Wesentlichen aber auf Einzelfälle beschränkt. Da jedoch auch Trinkwasserversorgungsanlagen betroffen sind, besteht lokal ein Problem für die Versorgung der Bevölkerung und somit Handlungsbedarf für die wasserwirtschaftliche Planung.

In einigen Regionen können erhöhte Urangehalte im Grundwasser aufgrund des geologischen Untergrundes natürliche Ursachen haben. In Porengrundwassergebieten lassen sich erhöhte Urangehalte im Grundwasser aber nicht unmittelbar auf natürliche Ursachen zurückführen. Welche Ursachen das sein können und weitere offene Fragen, wie z.B. ob bzw. wo Verhältnisse vorherrschen, die den Eintrag ins Grundwasser begünstigen, sollten daher im gegenständlichen Forschungsprojekt geklärt werden. Damit sollten Grundlagen für allenfalls erforderliche Maßnahmen geschaffen werden.

Dazu wurden in Kristallinstandorten in Kärnten, Steiermark und Tirol ausgewählte Quellwässer ein Jahr lang beprobt und auf milieuspezifische Parameter, Hauptionen, Metalle und Ultrapurenelemente analysiert. In den Einzugsgebieten der Quellen wurden Gesteinsproben entnommen und deren Mineralogie bzw. Geochemie bestimmt, mit dem Ziel, die geogenen Quellen von Uran im Grundwasser zu identifizieren.

An Porengrundwasserstandorten im Burgenland und in Niederösterreich wurden Grundwässer mit gleicher zeitlicher Auflösung auf dieselben Parameter analysiert, an ausgewählten Sedimenten wurden eine Reihe unterschiedlichster Gesteins- und mineralchemischer Untersuchungen durchgeführt. Zusätzlich wurden in Säulenexperimenten die relevanten Prozesse zum Verhalten von Uran im Untergrund modelliert, die zu einer Anreicherung im Grundwasser führen können.

Die gesteins- und mineralchemischen Untersuchungen zeigten, dass die Lage von natürlich vorkommenden Uranmineralen im Korngefüge und deren Zustand von entscheidender Bedeutung ist, ob Uran aus dem Gestein ins Grundwasser gelangen kann.

In keinem der untersuchten Standorte konnten signifikante jahreszeitliche Schwankungen der Urangehalte beobachtet werden, Uran liegt im Wesentlichen in gelöster Form vor. Ausgehend davon ergibt sich kein Anpassungsbedarf für das GZÜV-Monitoringprogramm.

Anhand der experimentellen Säulenversuche konnte gezeigt werden, dass erhöhte Urangehalte im Grundwasser an bestimmte physikochemische Milieus gekoppelt sein kann (z.B. Redoxfronten), wodurch bereits geringe, unauffällige Urankonzentrationen in Boden/ungesättigter Zone ausreichen, um Grenzwertüberschreitungen im Grundwasser zu verursachen. Da die Uranoxidation besonders effizient an die Nitratreduktion gekoppelt ist, kann Nitrat im Grundwasser eine besondere Rolle in der Ausbildung solcher lokalen Urananreicherungen spielen.

Summary

Results of a nationwide measurement programme within the framework of the Ordinance on the Monitoring of the Quality of Water Bodies ("Gewässerzustandsüberwachungsverordnung", "GZÜV") in 2013 revealed that in some areas in Austria uranium occurs in groundwater. Exceedances of the parameter value of 15 µg/l of the Drinking Water Ordinance are, however, essentially limited to individual cases. However, since drinking water supply facilities are also affected, there is a local problem for the supply of the population and therefore need for action in water management planning.

In some regions, increased uranium concentrations in groundwater may have natural causes due to the geological underground. In porous groundwater areas, however, increased uranium concentrations in groundwater cannot directly attributed to natural causes. What reasons and other open questions, such as whether and where conditions prevail which facilitate the input into groundwater, should be estimated in this research project. This should provide the basis for any necessary measures.

For this purpose selected spring waters were sampled for one year at crystalline sites in Carinthia, Styria and Tyrol and were analyzed for environment-specific parameters, major ions, metals and ultratrace elements. In the catchment areas of the springs rock samples were taken and their mineralogy and geochemistry were determined with the aim of identifying the geogenic sources of uranium in groundwater.

In porous groundwater areas in Burgenland and Lower Austria groundwaters with the same temporal resolution were analysed for the same parameters and a number of different rock and mineral chemical investigations were carried out on selected sediments. In addition, column experiments were conducted to model the relevant processes for the behaviour of uranium in subsoil, which can lead to higher concentrations in groundwater.

The rock and mineral chemical measurements showed that the location of naturally occurring uranium minerals in the grain structure and their condition are of utmost importance for whether uranium can escape from the rock into the groundwater.

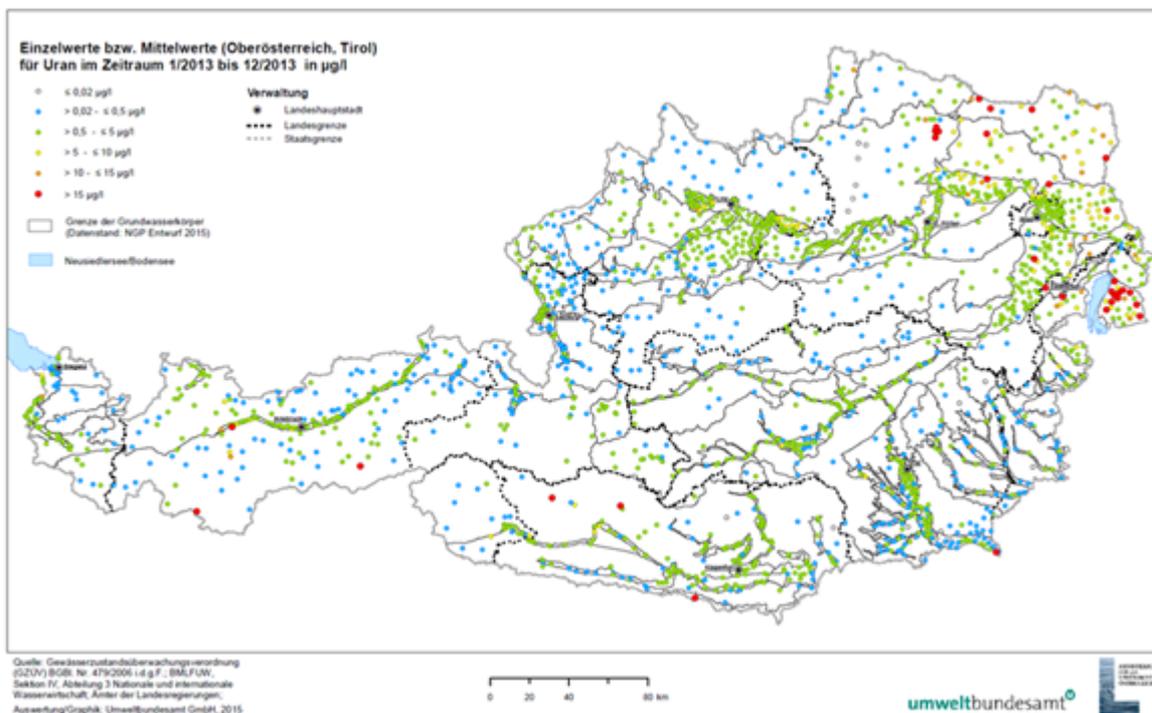
In none of the investigated sites significant seasonal variations of uranium were be observed, uranium occurs essentially in dissolved form. Based on this, there is no need to adapt the national GZÜV monitoring programme.

The experimental column tests showed that increased uranium concentrations in groundwater can be linked to certain physicochemical environments (e.g. redox fronts), whereby even small, inconspicuous uranium concentrations in the soil/unsaturated zone are sufficient to cause limit value exceedances in groundwater. Since uranium oxidation is particularly efficiently linked to nitrate reduction, nitrate in groundwater can play a special role in the formation of such local uranium enrichments.

1 Einleitung

Ausgehend von den in den Jahren 2013 und 2014 bundesweit durchgeführten Untersuchungen der Urangelhalte im Grundwasser im Rahmen der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV; BGBl. II Nr. 479/2006 i.d.g.F.) gibt es massive punktuelle Überschreitungen v.a. in den Bundesländern Burgenland, Niederösterreich, Kärnten, Steiermark und Tirol. Im Burgenland und in Niederösterreich treten sogar regional Häufungen von Urangelhalten $> 15 \mu\text{g/l}$ auf.

Abbildung 1: Uran im Grundwasser – Ergebnisse der GZÜV-Untersuchungen im Jahr 2013



Quelle: BMLFUW 2015

Es sind davon auch Trinkwasserversorgungsanlagen betroffen. Im niederösterreichischen Retz muss das Trinkwasser beispielsweise seit Jahren über eine Uranentfernungsanlage aufbereitet werden. In einer Trinkwasserversorgungsanlage im burgenländischen Seewinkel wird der Grenzwert für Uran im Rohwasser ebenfalls deutlich überschritten. Damit besteht lokal ein Problem für die Versorgung der Bevölkerung und somit Handlungsbedarf für die wasserwirtschaftliche Planung.

Hinsichtlich der Herkunft von Uran im Grundwasser ist eine Reihe potenzieller Eintragspfade denkbar. Es ist durchaus möglich, dass geogene Einträge in das oberflächennahe Grundwasser zum einen aufgrund aufsteigender uranhaltiger Tiefengrundwässer erfolgen können, zum anderen ist auch eine Mobilisierung des Urans durch den im Wasser gelösten Sauerstoff aus Matrixkomponenten des Aquifers selbst vorstellbar.

Hinsichtlich anthropogener Quellen liegt der Fokus auf dem Einsatz von Phosphatdüngern in der Landwirtschaft und dem damit verbundenen potenziellen Eintrag von Uran in das Grundwasser. Jüngste Untersuchungen mineralischer Düngemitteln in Österreich ergaben Gehalte in einem Bereich zwischen 0,2 und 208 mg Uran pro Kilogramm Dünger, bezogen auf den Phosphatgehalt lagen die Gehalte zwischen 2 und 517 mg U/kg P₂O₅. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen für Urangelhalte in P-Düngern, den Aufwandsmengen und den Gehalten in Sickerwässern wurde festgestellt, dass derzeit nicht von einer Gefährdung des Grundwassers oder der Nahrungsmittel durch Uran in Phosphatdüngemitteln auszugehen sei, eine mögliche Anreicherung geringer Mengen im Boden konnte jedoch nicht ausgeschlossen werden (Baumgarten et al., 2015).

Eine Zwischenstellung nimmt eine mögliche Überlagerung anthropogener und geogener Prozesse ein. Uran kann auch in Folge von menschlicher Tätigkeit eingetragener Oxidationsmittel (z.B. Nitrat aus mineralischen oder organischen Düngemitteln) aus dem Untergrund gelöst werden.

Komplexe hydrochemische Prozesse steuern die Spezifizierung und damit die Mobilität von Uran, das in jedem Umweltkompartiment ein anderes Verhalten aufweist. Anzunehmen ist ein komplexes System mit verschiedenen Eintragspfaden, in dem sich natürliche und anthropogene Prozesse überlagern, die gegenwärtig nicht differenziert werden können, die in ihrer Gesamtheit jedoch offensichtlich zu einer (zumindest temporären) Mobilisierung von Uran aus der Feststoffphase beitragen und langfristig dessen Akkumulation bewirken.

Redoxfronten nahe der Oberfläche können aufgrund wechselnder Mobilisierungs- und Festsetzungsprozesse erhöhte Konzentrationen bzw. Peaks und letztlich eine Akkumulation von Uran bewirken. So können auch niedrige Urangelhalte im Wasser über längere Zeiträume hinweg in einer deutlichen Anreicherung von Uran resultieren. Denkbar ist aber auch, dass über Phosphatdünger lediglich sehr geringe Mengen Uran eingetragen werden, deren Gehalte im Boden sich im Rahmen natürlicher Hintergrundgehalte bewegen, aufgrund spezieller, natürlich ablaufender Prozesse jedoch eine Anreicherung in bestimmten Zonen des Untergrundes stattfindet (BMLFUW, 2015).

2 Inhalt und Ziele

2.1 Ziele

In jenen Gebieten, in denen erhöhte Urankonzentrationen im Grundwasser festgestellt wurden, gibt es nur wenige oder gar keine Daten zur mineralogischen Zusammensetzung bzw. zum Gesteinschemismus, aufgrund dessen eine Beurteilung möglich wäre, ob bzw. wo Verhältnisse vorherrschen, die den Eintrag von Uran ins Grundwasser begünstigen. Außerdem gibt es fast keine Informationen über die Urangelhalte in unterschiedlichen Tiefenbereichen der jeweiligen Grundwasserleiter oder allfällige jahreszeitliche Schwankungen der Urankonzentrationen im Grundwasser.

Die Datenlage reichte also nicht aus, um seriös feststellen zu können, ob Uran geogener oder anthropogener Herkunft ist bzw. welche Konzentrationen auf die beiden möglichen Quellen zutreffen.

Im gegenständlichen Vorhaben sollten offene Fragen hinsichtlich geogener bzw. anthropogener Herkunft von Uran im Grundwasser geklärt werden und abgeschätzt werden, ob bzw. wo Verhältnisse vorherrschen, die den Eintrag von Uran ins Grundwasser begünstigen:

- Sind die Urankonzentrationen im Grundwasser jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen und ergibt sich daraus Handlungsbedarf für das GZÜV-Beobachtungsprogramm?
- Ergeben sich neue Erkenntnisse bei einer Verdichtung von Bodenuntersuchungen im unmittelbaren Einzugsgebiet von Grundwassermessstellen?
- Kommt es zur Akkumulation von Uran in bestimmten Sedimentschichten?
- Liegt Uran im Untergrund mobilisierbar vor, an welche Minerale ist Uran gebunden?
- Sind unterschiedliche Gehalte in unterschiedlichen Tiefenbereichen feststellbar?
- Ist im unmittelbaren Einzugsgebiet von Grundwassermessstellen geogenes Potential im Untergrund vorhanden, über das Urangelhalte im Grundwasser $> 15 \mu\text{g/l}$ auftreten können? Ist dieses im Vergleich zu anderen Standorten erhöht?
- Sind die erhöhten Urangelhalte im Grundwasser an bestimmte physikochemische Milieus gekoppelt (Redoxfronten) und können bereits geringe, unauffällige Urankonzentrationen in Boden/ungesättigter Zone ausreichen um Grenzwertüberschreitungen im Grundwasser zu verursachen?

2.2 Vorgangsweise

Insgesamt wurden fünf Standorte in Porengrundwasser- und Kristallingebieten ausgewählt, bei denen im Rahmen der GZÜV oder anderer Voruntersuchungen erhöhte Urankonzentrationen festgestellt wurden:

Porengrundwassergebiete:

- Burgenland: Raum Podersdorf/Frauenkirchen im Seewinkel
- Niederösterreich: Retz im Weinviertel

Kristallingebiete:

- Kärnten: Kaiser Franz Josefquelle bei Mallnitz, Puffquelle bei Innerfragant
- Steiermark: Hagenbachquellen und Hochreichartquelle im Hagenbachtal, Schönebenquelle in den Seckauer Tauern
- Tirol: Schwöbbrunnen oberhalb Silz, Arbesseitenquelle bei Mayrhofen

Den Auftakt des Forschungsvorhabens bildeten hydrogeologische Standortbeschreibungen aller Untersuchungsgebiete um lokale Systemzusammenhänge ableiten zu können. Für die Porengrundwassergebiete wurde damit zudem die Grundlage für die Positionierung und Errichtung zusätzlicher Grundwassermessstellen sowie von Schürfen in den Einzugsgebieten der Messstellen geschaffen.

Im Hinblick auf die Bestimmung der Urangelhalte und die Verteilung des Urans in Boden und Sediment in unterschiedlichen Tiefenstufen erfolgten mineralogisch-petrologische Feststoffuntersuchungen, um den Gesamtgesteinschemismus, d.h. Mineralogie und Spuren- bzw. Schwermetallspektrum, zu erfassen. Zur Untersuchung des potenziellen Einflusses der Phosphatdüngung auf die Urangelhalte des Grundwassers wurden in den Einzugsgebieten der Grundwassermessstellen in den Porengrundwasserstandorten Bodenuntersuchungen vorgenommen.

Zur Abklärung jahreszeitlicher Schwankungen der Urangelhalte in Abhängigkeit vom Grundwasserstand sowie zur Erfassung der Urangelhalte in unterschiedlichen Tiefenbereichen erfolgten tiefengestufte Grundwasserprobenahme bei den ausgewählten bzw. errichteten Grundwassermessstellen in den Porengrundwasserkörpern und Probenahmen an den ausgewählten Quellen der Kristallingebiete. In zweimonatlichem Abstand wurden über ein Jahr hinweg milieuspezifische Parameter, die Hauptkationen und -anionen sowie ausgewählte Spurenelemente erfasst.

Anhand von Säulenversuchen mit Sedimenten eines Porengrundwasserstandortes wurde die Mobilisierung und der Transport von Uran an einer Redoxfront modelliert bzw. simuliert. Mittels der Modellierung des Urantransportes wurden die Bedingungen, die den Eintrag von Uran ins Grundwasser begünstigen, ermittelt. Daraus sollte abgeleitet werden, ob vorrückende Redoxfronten zur Akkumulation von Uran in der Festphase und hohen Konzentrationen von löslichem Uran im Bereich einer derartigen Front führen können.

Die Untersuchung der Radon-222-Emanation von Sedimenten aus Tiefenbereichen des Porengrundwasserstandortes Retz sollte Hinweise auf den Einsatz von Phosphatdüngern als potenzielle Quelle für höhere Urangehalte im Grundwasser geben.

Untergliedert nach den einzelnen Untersuchungsgebieten werden die Ergebnisse in den folgenden Kapiteln standortbezogen dargestellt.

3 Methodik

3.1 Grundwasseruntersuchungen

3.1.1 Grundwassermonitoring

Im Zeitraum Jänner 2018 bis März 2019 wurden an allen Standorten im Abstand von etwa zwei Monaten milieuspezifische Parameter, die Hauptkationen und -anionen sowie ausgewählte Spurenelemente erfasst. Im Seewinkel und in Retz erfolgten jeweils fünf Probenahmen, die Quellen in Kärnten und Tirol wurden jeweils sechsmal beprobt, jene in der Steiermark siebenmal.

Die Probenahmen sowie die Analytik erfolgten dabei für die Messstellen im Burgenland und in Niederösterreich durch das Umweltbundesamt. In Kärnten wurde die Probenahme und die Analytik durch das Amt der Kärntner Landesregierung durchgeführt. Die steirischen Quellstandorte wurden durch das Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz beprobt und vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung analysiert. Die Tiroler Messstellen wurden durch die Chemisch-Technische Umweltschutzanstalt (CTUA) des Amtes der Tiroler Landesregierung beprobt und analysiert. Im Herbst 2018 erfolgten von denselben Probenehmern zudem die Probenahmen für die ICP-SFMS Ultrapurenanalytik der BOKU.

Das Grundwassermonitoring umfasste entsprechend der GZÜV den Parameterblock 1 für Probenahme, Vor-Ort-Parameter und chemisch-analytische Parameter sowie den Parameterblock 2.1 (Metalle gelöst), der um Uran ergänzt wurde. Jene Parameter, die im Wesentlichen an allen Standorten untersucht wurden, sind einschließlich der Mindestbestimmungsgrenzen im Anhangsband Kapitel 1.1 angeführt. Die Metalle wurden hinsichtlich der gelösten Fraktion analysiert. Uran wurde sowohl in der gelösten Phase als auch in der Gesamtphase analysiert. Die Wässer der steirischen Quellen wurden zudem hinsichtlich folgender Parameter analysiert: Strontium, Kobalt, Molybdän und TOC.

3.1.2 Ultrapurenanalytik

Die Spuren- und Ultrapurenelementanalytik von 15 Proben, die im Herbst 2018 genommen wurden, wurde vom Department für Chemie, Abteilung für Analytische Chemie der Universität für Bodenkultur durchgeführt.

Durch den Einsatz hochauflösender Induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-SFMS) unter Reinraumbedingungen konnten Daten (Totalgehalte der Analyten) erfasst werden, welche in den vorliegenden niedrigen Konzentrationsbereichen bisher nicht zugänglich waren. Durch den Einsatz der ICP-MS zur Multielementanalytik konnte ein breites Spektrum an Elementen des Periodensystems erfasst werden. Im Anhangsband Kapitel 7 sind die gemessenen Elemente sowie Details zur Methodik enthalten.

3.2 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

3.2.1 Bodenanalytik

Bodenuntersuchungen wurden in den ausgewählten Porengrundwasserstandorten durchgeführt an jenem Material, das aus Bohrkernen und Schürfen aus verschiedenen Horizonten gewonnen wurde, um die Urangehalte und der Verteilung des Urans in Boden und Sediment in unterschiedlichen Tiefenstufen zu bestimmen. Die Bodenanalysen wurden von der AGES durchgeführt.

Die Proben wurden getrocknet, gesiebt und der Grobanteil > 2 mm bestimmt. Für den Feinboden wurde die Korngrößenverteilung (Gehalte an Sand, Schluff und Ton) ermittelt. Bestimmt wurden der pH-Wert, der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium im CAL-Auszug als Hinweis auf Phosphat-Düngung, der Humusgehalt, die Kalkaktivität sowie die elektrische Leitfähigkeit. Die Gesamtgehalte von Phosphor, Cadmium und Uran im Königswasserauszug gemäß ÖN L 1085 wurden mittels ICP-MS analysiert.

Die dabei ermittelten Untersuchungsergebnisse bildeten die Basis für die Auswahl der Sedimentproben für die weiterführenden Sediment- bzw. Gesteinsanalysen.

3.2.2 Beschreibungen des Mineralbestands der kristallinen Gesteine

Kapitel 5 und Kapitel 6 sowie der Anhangsband enthalten auch die makroskopischen und mikroskopischen Gesteinsbeschreibungen der für das gegenständliche Forschungsprojekt näher untersuchten Gesteine. Die angegebenen modalen Mineralbestände wurden unter dem Mikroskop geschätzt und sollten mit einem Fehlerpotential von etwa +/- 10 % betrachtet werden. Zudem wurden zum Vergleich die in Tabelle 20 wiedergegeben Röntgenfluoreszenzanalysen in Hinblick auf den normativen Mineralbestand ausgewertet. Die Berechnung basiert dabei auf den Komponenten SiO₂, Al₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, Fe₂O₃, SO₃, F, H₂O und CO₂. Sie erfolgte mit Hilfe des Werkzeugs GCDkit (GeoChemical Data ToolKIT), welches in „R“ (freie Software für Computer und Graphik

Analysen) eingebunden wurde. In der gängigen CIPW-Norm werden nur wasserfreie Minerale berücksichtigt, weshalb sie für metamorphe oder glimmerreiche Gesteine nicht geeignet ist. Aus diesen Gründen wurde für die hier vorliegenden Gesteinsproben die Norm „Improved Mesonorm for granitoid rocks“ (eine überarbeitete Norm von Mielke & Winkler, 1979, für granitischen Gesteine) und die Norm „Catanorm“ (berechnet die Niggli's Molekular Norm mit Algorithmen von Hutchison (1974) verwendet. Letztere eignet sich auch für metamorphe Gesteine.

Darüber hinaus wurden die Röntgenfluoreszenz-Analysen nach Debon & Le Fort (1983) in einem P-Q-Diagramm ($P = K - (Na + Ca)$; $Q = Si / 3 - (K + Na + 2 * Ca / 3)$) diskriminiert und die auf Basis der Mesonorm errechneten Mineralbestände in ein Q'-ANOR-Diagramm (Abbildung 2) nach Streckeisen & Le Maitre (1979) dargestellt. Frost et al. (2001) klassifizierte granitische Gesteine zur Unterscheidung zwischen „ferroan und magnesian“, „alkalic, alkali-calcic, calc-alkalic und calcic“ und „peralkaline, metaluminous und peraluminous“. Peraluminous Gesteine sind z. B. mit einem $A/CNK > 1$ ($Al_2O_3 / CaO + Na_2O + K_2O$) definiert (Clarke, 1981).

Abbildung 2: Klassifizierung der Proben nach den Kationen-Verhältnissen von Quarz, Plagioklas und Kalifeldspat in einem P-Q Diagramm (Debon & Le Fort, 1983)

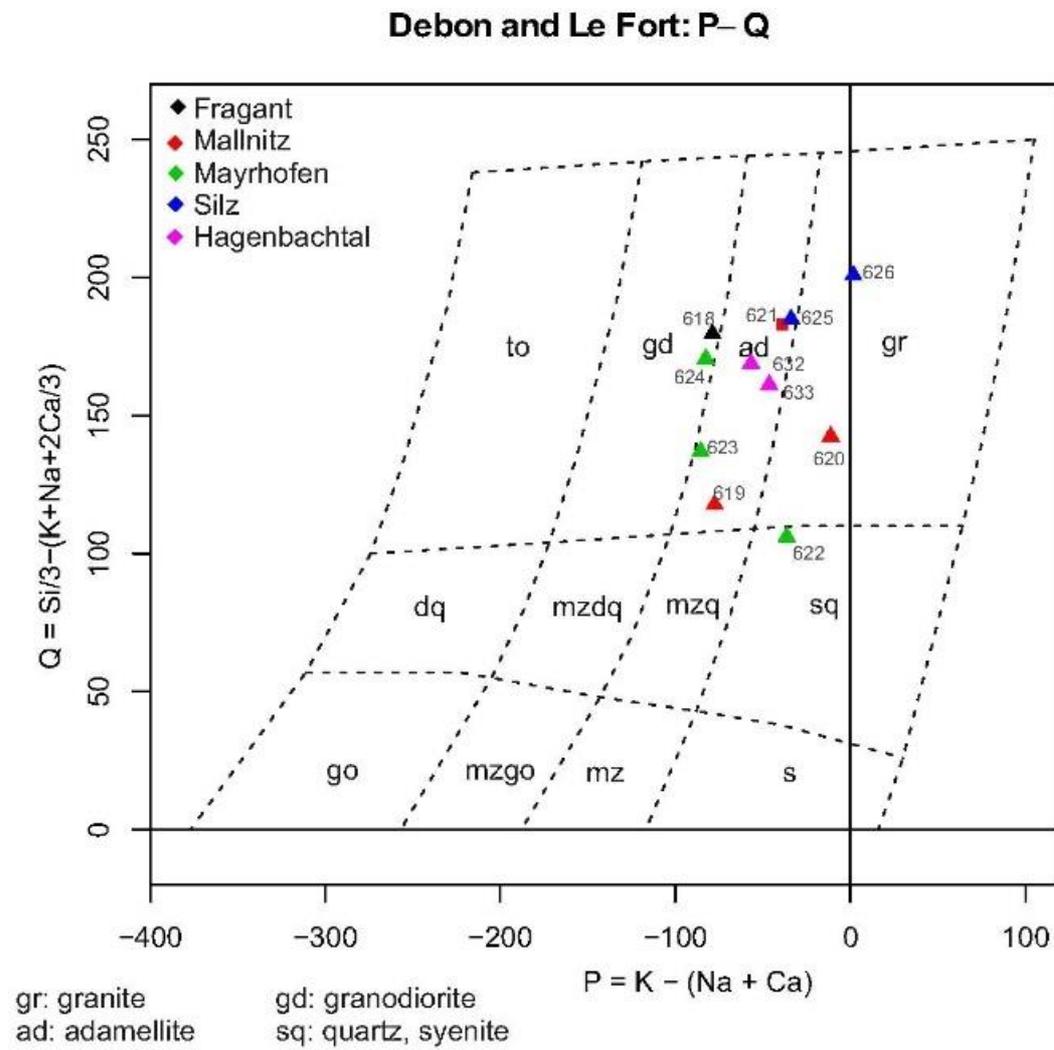


Abbildung 3: Klassifizierung von granitoidischen Gesteinen nach der Mesonorm in einem Q-ANOR Diagramm; $Q = 100 * (Qtz / (Qtz + Ab + Or + An))$ und $ANOR = 100 * An / (An + Or)$ (Streckeisen & Le Maitre, 1979)

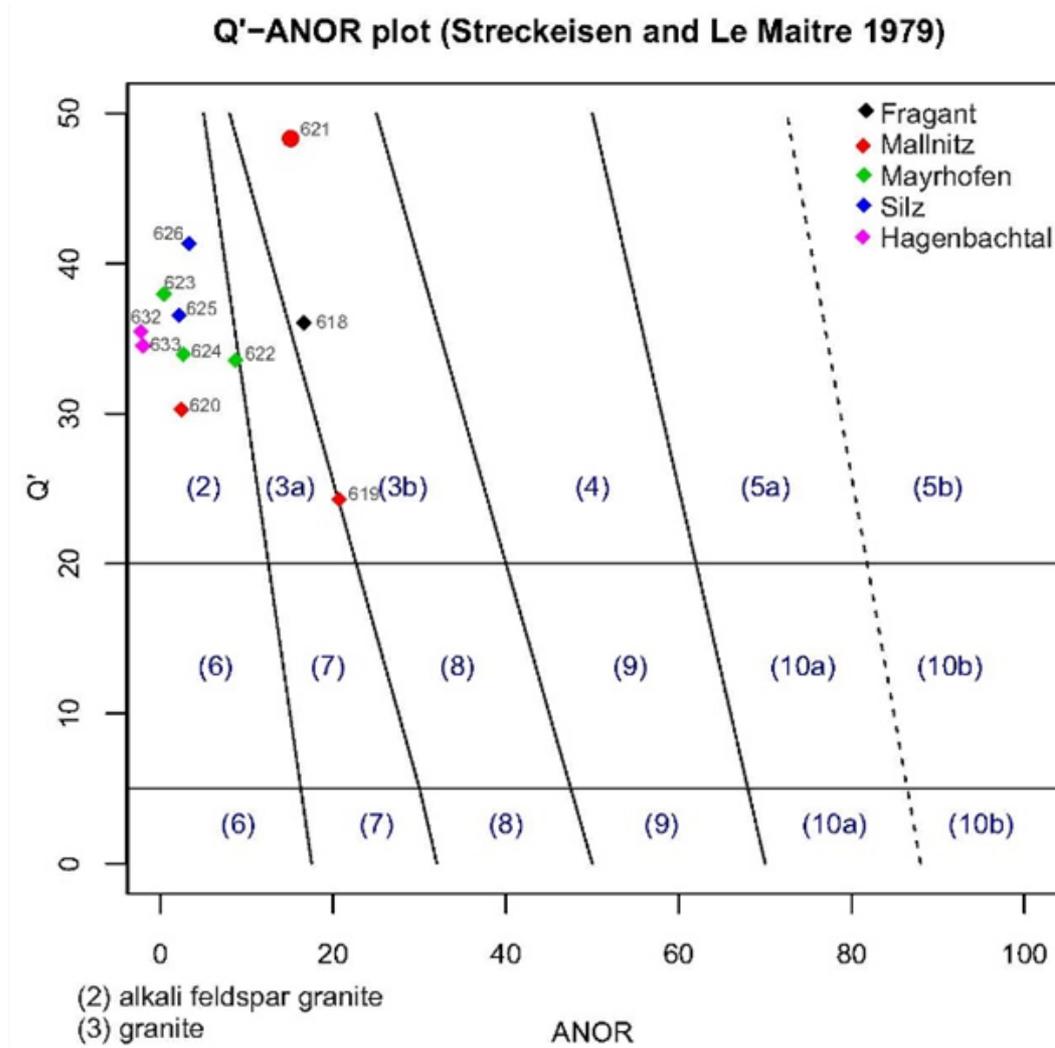
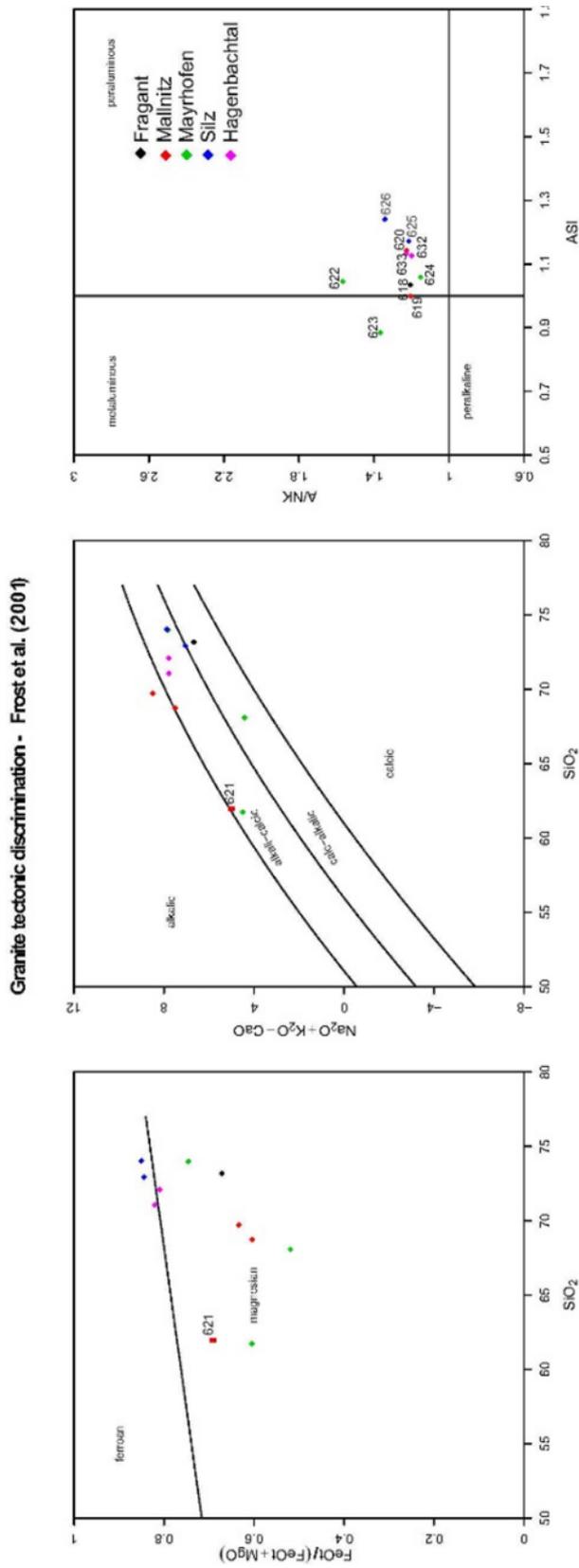


Abbildung 4: Klassifizierung der Proben nach Frost et al. (2001)



3.2.3 RFA- und ICP-MS-Gesteinsanalysen, Rasterelektronenmikroskopie

Die Probenaufbereitung stellte die Grundlage für die weiteren Untersuchungen der Bohrkerne dar. Es wurden repräsentative Probenmengen von ausgewählten Bohrkernebenen genommen und zunächst für eine Woche bei 33 °C getrocknet. Es folgte die Aufteilung der Proben mit einem 8-fach Probenteiler. Hierbei wurde ausschließlich die Fraktion < 6 mm (Trockensiebung) berücksichtigt. Dieses Material wurde mit folgenden Methoden untersucht: Geochemie per Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) (Geologische Bundesanstalt, FA Geochemie), Urangehalt per Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP MS) (Geologische Bundesanstalt, FA Geochemie), Bodenuntersuchungen (AGES) (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht zu den untersuchten Horizonten und angewandten analytischen Methoden

Gebiet	Bezeichnung	Beprobte Horizonte (von-bis m u. GOK)	RFA Analysen	ICP-MS Analysen	Erstellung von Streupräparaten	XRD Analysen (Fraktion 0,063-2 mm)	ICP-MS Analysen der Fraktion < 0,063	ICP-MS Analysen der Fraktion 0,063-2 mm	Sequentielle Extraktions-versuche der Uran-Phasen	Radon-222 Emanationsversuche
Retz	Kernbohrung IHB-5	7,00-7,50	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
		12,25-12,75	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
		13,00-13,50	ja	ja						
		15,25-15,75	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		17,00-17,50	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		20,25-20,75	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		21,50-22,00	ja	ja						
	25,00-25,50	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Retz Keller-system	Schmiedgasse	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
	Hauptkeller	ja	ja						ja	
See-winkel	Kernbohrung KB2	0,00-0,50	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
		0,50-1,00	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		2,00-2,50	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		4,50-5,00	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		6,25-6,75	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
		9,50-10,00	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die ausgewählten Bohrkernhorizonte wurden per Röntgenfluoreszenzanalytik (PANalytical-type Epsilon 5 auf die Hauptelemente SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 und SO_3 und auf die Spurenelemente As, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, La, Li, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Sr, Tb, U, V, Y, Zn, Zr untersucht. Die Nachweisgrenzen liegen hierbei bei 0,05 bis 1 Gew% bei den Hauptelementen und im ppm Bereich bei den Spurenelementen. Der Urangehalt wurde zusätzlich per Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) untersucht, die Nachweisgrenze liegt hierbei bei 0,1 ppm.

Die Fraktionen 0,063 mm bis 2 mm und < 0,063 mm wurde zudem mit ICP-MS auf Uran und ausgewählte Elemente untersucht, um die Unterschiede zu der Gesamtfraktion aufzuzeigen. Zur quantitativen Beschreibung der Hauptmineralphasen wurde die Fraktion 0,063 mm bis 2 mm per Röntgendiffraktometrie (XRD) untersucht.

Für die Streupräparate, diese wurden in Folge an der Universität Salzburg auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie untersucht (BSE-Imaging, EDX-REM, Universität Salzburg), wurde die Fraktion 0,063 mm bis 2 mm (Trockensiebung) verwendet. Nach der Behandlung mit Aceton wurden die Sedimentproben in ein Epoxidharz (EpoFix, Struers GmbH) eingebettet (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Polierter Anschliff eines Streupräparats, Durchmesser 4 cm.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Die mit Kohlenstoff bedampften Dünnschliffe/Streupräparate wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop Ultraplus der Firma Zeiss analysiert. Dieses ist mit einer Feldemissionskathode (FE-REM) und einem EDX-Großflächen-Silizium-Drift-Detektor (Oxford X-Max50) ausgestattet. Es wurde mit einer Beschleunigungsspannung von 15 kV (bei sehr kleinen Körnern 8 kV) und einer Messzeit von bis zu 5 Minuten gemessen. Dadurch

wurden Nachweisgrenzen für die wichtigen Elemente Uran und Thorium mit bis zu ~0,1 ppb erzielt. Für jeden untersuchten Dünnschliff wurde ein Rückstreuerelektronen-Übersichtsbild aus 24 Einzelbildern zusammengesetzt. Sowohl die Schliffe als auch die Streupräparate wurden zeilenweise unter hoher Vergrößerung abgesucht, um vorhandene Akzessorien und Uran-führende Minerale zu finden und analysieren zu können. Die Abschätzung des Mineralbestands (Hauptminerale) erfolgte in den Schliffen durch Kombinieren verschiedener Eingangsdaten, nämlich Gesamtgesteinschemie (RFA-Daten und Mesonorm-Berechnung), lichtmikroskopischer Befund, BSE-Bild mit Einbeziehung von EDX-Punktanalysen. Der Modalbestand der Streupräparate wurden durch Pulverröntgenbeugungsaufnahmen, Rietveldverfeinerung und durch Normberechnungen auf der Basis der Gesamtgesteinschemie kontrolliert.

3.2.4 Leachingversuche: Sequentielle Extraktion der Uran-Phasen

Zur Untersuchung der vorliegenden Uran-Phasen in den Sedimenten und deren Mobilitätsverhalten wurde das sequentielle Extraktionsverfahren nach Percival (1990) gewählt. Hierbei handelt es sich um ein fünfstufiges Extraktionsverfahren, bei dem eine Probe mit zunehmend aggressiveren Lösungen versetzt wird. Bei der Durchführung der Experimente wurde die Dissertation von Schönwiese (2007) berücksichtigt, bei der diese Methodik angewendet wurde.

Das Ziel ist die Bestimmung folgender Bedingungsformen von Uran: Austauschbare und karbonatische Phase, organisch-sulfidische Phase, leicht reduzierbare Phase, schwer reduzierbare Phase und Residualphase (siehe Tabelle 2). Es wurde repräsentatives Probenmaterial für die Versuche verwendet, siehe Kap. 3.2.3, die Bestimmung der Uran-Gehalte erfolgte mit ICP-MS.

Tabelle 2: Übersicht zu den bei der sequentiellen Extraktion nach Percival (1990) in Schönwiese (2007) verwendeten Reagenzien und erfassten Uran-Phasen

Nr. Extraktionsschritt	Reagenz Extraktionsschritt	Erfasste Uran-Phase	Bindungsform der erfassten Uran-Phase
1	1 M Na-Acetat (pH 5)	austauschbare und karbonatische Phase	adsorptiv gebunden, leicht löslich oder in Karbonaten (außer Siderit) enthalten Karbonate und adsorbierte Phasen

Nr. Extraktionsschritt	Reagenz Extraktionsschritt	Erfasste Uran-Phase		Bindungsform der erfassten Uran-Phase
2	H ₂ O ₂ (30 %); Na ₂ CO ₃ (2,5 %)	organisch-sulfidische Phase	in organischer Substanz oder in Sulfiden gebunden	Uraninit und organische Phasen
3	0,25M NH ₂ OH in 0,25M HCL	leicht reduzierbare Phase	an Fe-Oxid-Hydroxid gebunden (amorphe Substanzen)	amorphe Eisen-Phasen
4	0,68 M tri-Nacitrat-Dihydrat mit 16 g/l Na-Dithionit	schwer reduzierbare Phase	an Fe-Oxide gebunden (kristalline Substanzen)	kristalline Eisen-Phasen
5	Vollaufschluss mit HNO ₃ , HClO ₄ und HF	Residualphase	Uran in Silikaten und akzessorischen Mineralien	Residualphase

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Folgende Bereiche wurden untersucht:

- Retz IHB-5: 7-7,5; 12,25-12,75; 17-17,5; 20,25-20,75 und 25-25,5 m
- Retz Schmiedgasse
- Seewinkel KB2: 0-0,5; 0,5-1; 2-2,5; 4,5-5; 6,25-6,75 und 9,5-10 m

3.2.5 Messung von Radon-222 in Grundwässern

Zur Messung der Radon-222-Konzentration im Wasser wurden der Radondetektor AlphaGUARD sowie die AquaKIT-Messapparatur der Geologischen Bundesanstalt verwendet. Der Messbereich liegt zwischen 0,002 und 2.000 Bq/l. Das beim Radon-Zerfall entstehende Alpha-Teilchen hat eine Energie von 5,59 MeV. Diese spezifische Alphaenergie wird bei der Radon-Messung in der Ionisationskammer detektiert und digital aufbereitet (Legerer, 2018). Die Auswertung erfolgte mittels der Software DataViewPRO.

Für eine richtige und genaue Messung ist eine qualifizierte Probenahme entscheidend. Die Probenahme sollte direkt am Quellursprung erfolgen, um ein Entweichen des Radons aus dem Wasser möglichst zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, sollten alle Entgasungsmöglichkeiten (Wasserüberlauf, technische Gegebenheiten in der Quellstube etc.) erfasst werden, um entsprechend geringere Radon-Konzentrationen in der Probe zu dokumentieren.

Im September 2018 erfolgte eine Probenahme der Grundwässer im Seewinkel und in Retz durch das Umweltbundesamt, im Zuge dessen wurden diese Wässer von der Fachabteilung Hydrogeologie und Geothermie der Geologischen Bundesanstalt auch auf deren Radon-Gehalte hin untersucht. Die Probenahme an den Messstellen erfolgte auf drei unterschiedliche Arten, mittels mobiler Tauchpumpe, Schöpfsonde (PVC-Wasserprobenehmer) oder am Hahn. Die Vorteile der mobilen Pumpe sind die bekannten und kontrollierbaren Bedingungen der Wasserentnahme, während bei der Hahnentnahme die Auswirkungen auf den Radon-Gehalt des Rohwasser durch verschiedene vorgeschaltete technische Anlagen, Pumpenlaufzeit, etc. nur schwer abzuschätzen sind. Bei der Schöpf-Probenahme wurde das in der Messstelle befindliche Wasser entnommen, ohne dass ein Austausch mit frischem Wasser aus dem Aquifer erfolgte.

Bedingt durch die Art der Probenahme kann es zu unterschiedlichen Radon-Entgasungsprozessen kommen, dieser Aspekt sollte bei der Betrachtung der Radon-Konzentrationen berücksichtigt werden.

3.2.6 Bestimmung der Radon-222-Emanation des Sediments

Ziel der Radon-222 Leachingversuche war es nachzuweisen, ob Uran-238, Radium-226 und Radon-222 der Uran-Radium-Reihe in den untersuchten Tiefenbereichen der Bohrungen Retz IHB-5 und im Retzer Kellersystem im Gleichgewicht sind oder ob die gemessenen Urankonzentrationen gegenüber Radon-222 und Radium-226 vom Gleichgewicht abweichen.

Damit sollte das Alter bzw. die Quelle des mutmaßlich an den Oberflächen der Sedimentkörner sitzenden Urans näher beleuchtet werden. Dabei wird von folgender Hypothese ausgegangen: Damit der Uran-234-Gehalt (das ist ein Tochternuklid des Urans-238 und tritt mit diesem gemeinsam und im Normalfall mehr oder weniger im Gleichgewicht auf) mit Radium-226 in ein Zerfallsgleichgewicht kommt, d. h. die selbe Aktivität besitzt, bedarf es nach der Ausfällung am Sedimentkorn Hunderttausender Jahre, da die Halbwertszeit von Uran-234 $2,46 \cdot 10^5$ Jahre beträgt. Die folgenden Tochternuklide bis zum Radium-226 haben hingegen eine kürzere Halbwertszeit (siehe z. B. Ishimori et al., 2013) und sind hier nicht maßgeblich. Zudem ist zu erwarten, dass die Tochternuklide Thorium-230 und Radium-226 im vorliegenden Fall nicht mobil sind. Damit kann über den Vergleich des Uran-Gehalts des Sediments mit seinem Radium-226-Gehalt abgeschätzt werden, ob das Uran erst später in das Sediment eingetragen wurde bzw. wie hoch der Anteil des später eingetragenen Urans maximal sein kann.

Für diesen Zweck wurde versucht, den Radium-226-Gehalt in drei ausgewählten Sedimentproben über die Radon-222-Emanation des Sediments zu bestimmen. Dabei wurde folgende beiden vereinfachenden Annahmen getroffen:

- Jenes Uran, das bei den sequentiellen Leaching-Versuchen mit den Phasen 1 bis 4 gelöst werden konnte, und das daraus entstandene Radium-226 befinden sich in einer dünnen Haut auf der Oberfläche der Sedimentkörner.
- Diese Haut auf den Sedimentkörnern und das innere der Sedimentkörner besitzen unterschiedliche Emanations-Koeffizienten.

Nach Ishimori et al. (2013) ist für ein derart an der Oberfläche sitzendes Radium-226 ein Emanationskoeffizient von 50 % zu erwarten. Hierbei handelt es sich um einen modellierten Wert. Theoretisch könnte dieser Wert auch etwas niedriger sein, betrachtet man aber in Yellow Cake gemessene Emanationskoeffizienten (Ishimori et al., 2013), so darf erwartet werden, dass der Emanationskoeffizient für dünne Oberflächen nicht unter 30 % liegt. Für jenes Radium-226, das im Inneren der Sedimentkörner sitzt, wird hier nach Untersuchungen an einem sandigen Lehm ein Emanationskoeffizient von 11 % angenommen; dieser zweite Wert hat aber aufgrund seines geringeren Ausmaßes kaum eine Auswirkung auf die folgende Abschätzung. Die Wassersättigung des Sediments spielt im vorliegenden Fall bei der Bestimmung der Radon-222-Emanation kaum eine Rolle, da das Radium-226 über den mit dem Sediment im Gleichgewicht stehenden Radon-222-Gehalt im Wasser selbst bestimmt wurde, das den gesamten Porenraum des Sediments erfüllte und nicht die Exhalation in einer Porenluft.

Bei der Herstellung von Phosphatdüngern entsteht als Nebenprodukt in großen Mengen Phosphorgips. Dieser bindet fast zur Gänze Radium-226, somit gelten Phosphatdünger in Folge als frei von Radium-226 und infolge auch frei von Radon-222. Bei von Phosphatdüngern beeinflussten Grundwässern sind somit vernachlässigbare Radon-222 und Radium-226 Konzentrationen zu erwarten.

Für die Radon-222 Leachingversuche wurde in gasdicht verschlossenen Flaschen Sedimentmaterial von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrungen Retz IHB-5 mit radonfreien Wasser angesetzt (siehe Abbildung 6). Das Verhältnis von Feststoff zu Wasser betrug rund 1:1. Die Analytik von Radon-222 erfolgte wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben.

Für die Messung musste der Aufbau von Radon-222 bis zur Sättigung abgewartet werden. Nach Schubert et al. (2003) sollten deshalb zumindest drei Wochen kalkuliert werden, bei den gegenständlichen Untersuchungen erfolgten die Messungen nach jeweils vier Wochen.

Abbildung 6: Radon-222 Leachingversuche



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Die Umrechnungsfaktoren von Becquerel (SI-Einheit der Aktivität einer radioaktiven Substanz) in Gramm für Uran ist Tabelle 3 zu entnehmen. Somit lässt sich die gemessene Urankonzentration im Sediment in Becquerel umrechnen. Bei Gleichgewichtsbedingungen würde die Aktivität von Uran-238 der Aktivität von Radon-222 und Radium 226 entsprechen.

Tabelle 3: Umrechnungen von Masse (g) in Aktivität (Bq) für Uran (MERKEL, 2002)

U-Isotop	1 Bq = ? g	1 g = ? Bq	Molmasse	Halbwertszeit (T1/2) (Jahre)
U-238	$8,0382 \cdot 10^{-5}$	$1,244 \cdot 10^4$	238,0507	$4,468 \cdot 10^9$
U-235	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$7,99 \cdot 10^4$	235,0439	$7,038 \cdot 10^8$
U-234	$4,3335 \cdot 10^{-9}$	$2,3076 \cdot 10^8$	234,0409	$2,45 \cdot 10^5$
Natururan	$3,95 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^4$	-	-

Quelle: Geologische Bundesanstalt

3.3 Säulenexperimente zum Verhalten von Uran an Redox-Fronten

3.3.1 Probenahme und Charakterisierung

Proben wurden aus den Kernbohrungen in Retz (IHB-5, KB1-2017; Lage:siehe Abbildung 18) vor Ort genommen und sofort mit Stickstoff begast, um eine Oxidation der Sedimente zu minimieren. Die Proben wurden anschließend erdfeucht in eine Glove-Box eingebracht und unter anoxischen Bedingungen aufbewahrt. Für die weiteren Untersuchungen wurde Material der Bohrung KB1-2017 vom März 2017 aus einer Tiefe zwischen 13 und 13,5 m unter GOK ausgewählt. Die Festphasen wurden durch CHNS Analyse (VarioMacro, Elementar) und Röntgenfluoreszenzanalyse (Philips PW 24004) charakterisiert.

3.3.2 Materialien und Analytik

Reagentien

Alle Lösungen wurden mit Reinstwasser hergestellt (UPW; MilliQ Reference, EMD Millipore, $18,2 \text{ m}\Omega \text{ cm}^{-3}$). Alle Chemikalien hatten „reagent-grade“ oder höhere Qualität. Alle Säuren hatten „trace metal“ Qualität (EMD Millipore). Uranlösungen wurden aus angesäuerten (5 % vol HNO_3) $10,000 \text{ mg l}^{-1} \text{ U(VI)}$ Standardlösungen (SPEX Certiprep) hergestellt.

Allgemeine Analytik

Lösungs-pH-Werte wurden durch pH-Kombinationselektroden (Orion, Thermo-Scientific) bestimmt. Nitratkonzentrationen durch ionenspezifische NO_3 -Elektroden (Orion, Thermo-Scientific). Gelöstes Uran und andere gelöste Metalle wurden durch ICP-MS (7700x, Agilent) bestimmt.

3.3.3 Batch-Experimente

Alle Lösungen wurden unter anoxischen Bedingungen in einer Glove-Box hergestellt (mBraun). Sedimente aus der Bohrung Retz (siehe oben) wurden in einem Feststoff/Lösungs-Verhältnis (SSR) von 1:10 in 100 ml Serumflaschen suspendiert. Die Flaschen wurden mit Septen gasdicht verschlossen und in einem Überkopfschüttler bei konstanter Temperatur für die Dauer der Experimente geschüttelt. Proben wurden mit einer Spritze durch die Septen der Serumflaschen genommen und mit $0,45 \mu\text{m}$ Spritzenvorsatzfiltern filtriert. Nitratkonzentrationen wurden mit einer ionensensitiven Elektrode bestimmt. Uran, Mangan

und Eisen wurden in verdünnten und angesäuerten (auf 0,14 M HNO₃) Proben mit ICP-MS bestimmt.

Nitratreduktion

Nitratreduktion durch Azetat und Glukose wurde experimentell untersucht. Dazu wurde Sediment in synthetischem Retzer Grundwasser (AGW) suspendiert und 0,9 mM NaNO₃ zugegeben. Das synthetische Grundwasser enthielt 7,0 mM NaHCO₃, 2,0 mM CaCl₂ und 3,2 mM Na₂SO₄. Als Elektronenakzeptoren wurde entweder Azetat (1,8 mM NaAc) oder Glukose (1,8 mM C₆H₁₂O₆) zugesetzt.

Uranreduktion

Uranreduktion durch natürliche mikrobielle Gemeinschaften in Feldproben wurde untersucht und die Reduktion in Gegenwart verschiedener Elektronendonoren getestet. Dazu wurden den Batch-Experimenten jeweils 1,8 mM Azetat, Glukose, Pyruvat oder Succinat zugegeben. Sedimente wurden in AGW suspendiert, wie oben beschrieben.

3.3.4 Säulenexperimente

Glassäulen (006-25-10-AF, Omnifit) mit einem Durchmesser von 2,5 cm und einer Länge von 12 cm wurden mit 90 g Sediment unter Schutzgas trocken befüllt. Somit wurde eine Fließstrecke von 11 cm realisiert. Vor der Befüllung wurden die Sedimente in einem Mörser leicht gestoßen um größere Aggregate aufzubrechen. Die Sedimente wurden dann in 5 g Inkrementen eingefüllt, bei gleichzeitigem leichtem Schütteln der Säule. An beiden Enden wurde die Sedimentfüllung mit neuen 30 µm Fritten geschlossen. Bei Beginn der Experimente wurden die Säulen mit Aluminiumfolie umwickelt um photochemische Reaktionen oder das Wachstum phototropher Organismen auszuschließen.

Tabelle 4: Physikalische Parameter der Säulenexperimente

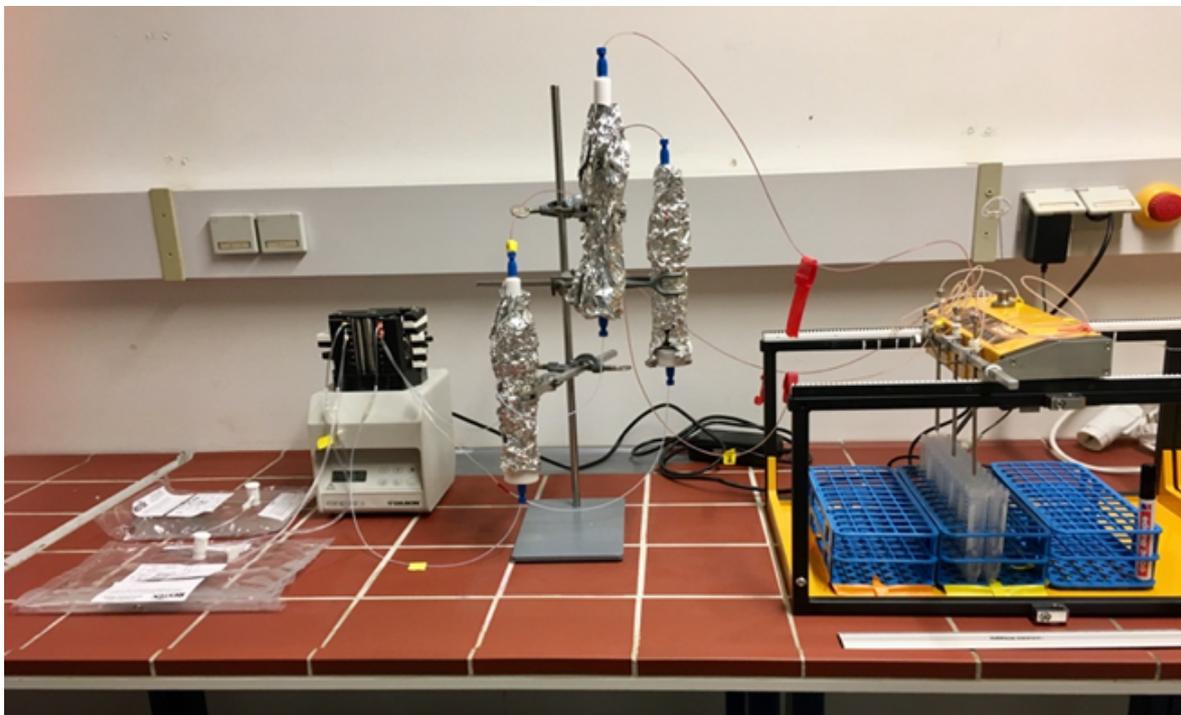
Physikalischer Parameter	
Schlauchgröße (mm)	0,38
Säulenlänge (cm)	11
Sediment (g)	90
Porenvolumen (ml)	18

Physikalischer Parameter	
Porosität	0,33
Durchflussrate (ml/h)	1,6
Abstandsgeschwindigkeit (cm/h)	23
Verweilzeit (h)	11,3

Quelle: Universität Wien

Die zuströmenden anoxischen Lösungen wurden zur Einstellung eines pH-Wertes von 7,1 mit CO₂ begast und anschließend in gasdichte Tedlar-Beutel gefüllt und mit einer Schlauchquetschpumpe (Minipuls 3, Gilson) bei einer Flußrate von 2,4 ml/h in die Säulen eingeführt. Zunächst wurden die Säulen von 10 Porenvolumen (PV) synthetischem Grundwasser durchströmt, um vollständige Wassersättigung des porösen Mediums zu erreichen und um den pH und die Ionenstärke in der Lösung zu stabilisieren.

Abbildung 7: Säulenversuchsaufbau mit zuströmender Lösung in gasdichten Tedlar-Beuteln, Schlauchquetschpumpe, Säulen und Fraktionssammler



Quelle/©: Universität Wien

Die einfließenden Lösungen wurden je nach Fragestellung innerhalb der Säulenexperimente sequentiell variiert (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Sequentiell einfließende Lösungen in Säulenexperimenten. Ein pH von 7,1 wurde in allen Lösungen durch CO₂-Begasung eingestellt.

Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
7,0 mM NaHCO ₃	7,0 mM NaHCO ₃	7,0 mM NaHCO ₃	7,0 mM NaHCO ₃
2,0 mM CaCl ₂	2,0 mM CaCl ₂	2,0 mM CaCl ₂	2,0 mM CaCl ₂
3,2 mM Na ₂ SO ₄	3,2 mM Na ₂ SO ₄	3,2 mM Na ₂ SO ₄	3,2 mM Na ₂ SO ₄
4,0 mM C ₆ H ₁₂ O ₆	4,0 mM C ₆ H ₁₂ O ₆		2,2 mM NaCO ₃
2,2 mM NaNO ₃	25 µM U		

Quelle: Universität Wien

Ausfließende Lösungen wurden über einen in-line-Filter (0,45 µm, Sartorius) einem Fraktionssammler (Omnicol, Lambda Instruments) zugeführt. In den Auffanggefäßen wurde HNO₃ vorgelegt, so dass eine Endkonzentration der Säure von 0,14 M erreicht wurde. Die Proben wurden bei 4° C bis zur Analyse durch ICP-MS gelagert. Abbildung 7 zeigt den Säulenversuchsaufbau.

3.3.5 Modellierung

Ein Reaktionsflussmodell wurde auf Basis des geochemischen Speziierungs-codes PHREEQC (US Geological Survey) Version 3.3.8.11728 (Parkhurst & Appelo, 2013) entwickelt. Input files, die bei der Modellierung mit dem Stoffflussmodell PHREEQC3 (Parkhurst & Appelo, 2013) verwendet wurden, sind im Anhangsband Kapitel 3.3 dokumentiert.

4 Ergebnisse der Untersuchungen an den Porenaquifer-Standorten im Burgenland und in Niederösterreich

4.1 Seewinkel

4.1.1 Überblick

Der Porengrundwasserkörper Seewinkel im nördlichen Burgenland umfasst eine Fläche von ca. 412 km². Die Nordbegrenzung wird durch den Terrassenabfall der Parndorfer Platte gebildet. Westlich wie auch im Südwesten bildet der Neusiedler See und im Süden der Einserskanal die Grundwasserkörpergrenze. Ausgehend von den Abstichdaten der GZÜV-Messstellen ist von einem Flurabstand des ersten Grundwasserhorizontes zwischen 0,5 und 4,7 m auszugehen. Darüber hinaus ist ein ausgedehnter zweiter Grundwasserhorizont vorhanden. Im Bereich des Seedammes zwischen Weiden und Podersdorf ist dieses gespannte und in Aufschlüssen meist bis über Gelände steigende Grundwasser schon in einer Tiefe von wenigen Metern unter Gelände anzutreffen. Im übrigen Seewinkel liegt dieser zweite Grundwasserhorizont zwischen ungefähr 30 und 100 m unter Gelände (Reitinger & Schmalfluss, 1993). Der obere Aquifer wird aus quartären Kiesen mit Sanden als Nebenanteil aufgebaut. Der Grundwasserstauer ist vermutlich durchgängig aus neogenen, möglicherweise geschlossenen Feinklastika des Pannon aufgebaut.

Der morphologisch einheitliche Grundwasserkörper ist hydrogeologisch sehr inhomogen aufgebaut (Rezabek, 1990). Es liegt ein mosaikartiges System von Wasserkörpern geringer horizontaler und vertikaler Ausdehnung vor, die infolge stark schwankender Durchlässigkeiten auf komplizierte Weise miteinander zusammenhängen und kommunizieren. Nicht immer besteht eine klare Trennung zwischen dem oberen und unteren Grundwasserstockwerk (Dreher et al., 1986).

Ausgehend von einem Bereich nahe bei Frauenkirchen erfolgt ein unterirdischer Grundwasserzufluss praktisch in den ganzen Westen, Süden und Osten des Seewinkels (Dreher 1986). Der unterirdische Abfluss nach Westen in Richtung Neusiedlersee erfolgt in einem sehr geringen Ausmaß. Bedeutender ist die Grundwasserströmung in Richtung Süden und größtenteils nach Südosten zum Entwässerungssystem Hansagkanäle (Reitinger &

Schmalfuß, 1993). Zudem wird eine Datation des quartären Seewinkelschotterkörpers aus dem Tertiär angenommen (Rezabek, 1990).

Durch ein zwischen 1900 und 1960 gebautes System aus Kanälen und Drainagerohren wird Grundwasser aus dem Gebiet abgezogen. Die Wasserverluste durch die künstliche Entwässerung übertreffen im langjährigen Durchschnitt die Neubildungsrate. Der seenahe Bereich weist extrem geringe Flurabstände auf, die einen äußerst starken Einfluss der Verdunstung auf das aus dem Zentralbereich des Seewinkels zuströmende Grundwasser bewirken. In Folge existiert lediglich ein sehr kleiner unterirdischer Zufluss zum Neusiedler See (Reitinger & Schmalfuß, 1993).

Ausgehend von den im Jahr 2013 im Rahmen eines Sondermessprogramms der GZÜV bundesweit durchgeführten Uranuntersuchungen zeigte sich vor allem im Grundwasserkörper Seewinkel eine auffällige Häufung von Gehalten $> 15 \mu\text{g/l}$. Hier wurden an 11 von 24 Messstellen Urankonzentrationen über dem Parameterwert der Trinkwasserverordnung ermittelt. Dies entspricht einem Drittel aller bundesweit beprobten Messstellen mit Uragehalten $> 15 \mu\text{g/l}$.

Während die Überschreitung des Parameterwertes der Trinkwasserverordnung in einigen Regionen Österreichs aufgrund des geologischen Untergrundes geogen bedingt sein kann, erscheint dies im Seewinkel nicht unmittelbar plausibel. Die Kenntnis, welche anderen Ursachen - wie beispielsweise anthropogene Aktivitäten - zu höheren Uragehalten im Grundwasser führen können, spielt jedoch im Hinblick auf die Umsetzung allfälliger Sanierungsmaßnahmen eine bedeutende Rolle.

Aus diesem Grund wurden im Seewinkel bereits im Rahmen des Forschungsprojektes Nr. 100960 „Verhalten von Uran aus Phosphat haltigen Düngern im System Boden-Wasser-Pflanze“ (Baumgarten et al., 2015) umfangreiche Bodenuntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden Proben auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit hohen Phosphatgehalten aus drei Tiefenstufen (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm) entnommen und hinsichtlich einer Reihe von Parametern (Schwermetalle, Nährstoffe, TOC, Humusgehalt etc.) analysiert. Die dabei ermittelten Urankonzentrationen bewegten sich im Bereich natürlicher Hintergrundgehalte zwischen 0,4 und 1,6 mg/kg. Ein Gradient hinsichtlich der Urankonzentration war nicht feststellbar, in allen Tiefenstufen lagen ähnliche Gehalte vor (Baumgarten et al., 2015).

Da bislang für das Gebiet des Seewinkels keine mineralogische Charakterisierung des Untergrundes für die ungesättigte Zone und den oberflächennahen Aquifer vorliegt und das geogene Potenzial für Uraneinträge somit unbekannt ist, wurden bereits in BMLFUW (2015) entsprechende mineralogische Untersuchungen (Analysen der Schwermineralfraktion

uranhaltiger Minerale) empfohlen. Der Grundwasserkörper Seewinkel war daher bereits von vornherein eines jener Gebiete, in denen im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes Detailuntersuchungen durchgeführt werden sollten.

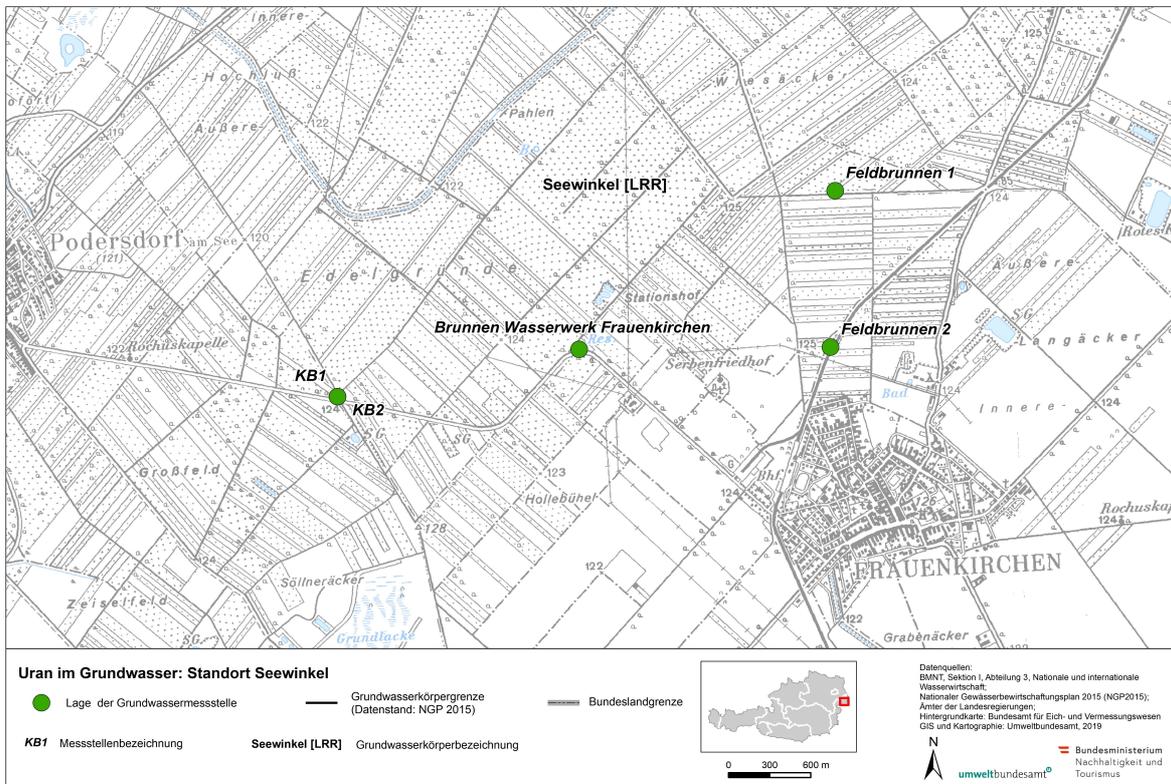
Im November 2017 wurden der Bereich der Gemeindegrenze Podersdorf/Frauenkirchen zwei Trockenkernbohrungen abgeteuft und in unterschiedlichen Teufenbereichen ausgebaut. Bei der tieferen Grundwassermessstelle KB1 wurde der erste Grundwasserstauer, der bei ca. 9,7 m angetroffen wurde, durchörtet und im Bereich der darunterliegenden wasserführenden, feinsandigen Sedimentabfolgen zwischen 18,5 und 24,5 m verfiltert. Die seichtere, unmittelbar daneben befindliche Grundwassermessstelle KB2 wurde ebenfalls als Trockenkernbohrung abgeteuft, jedoch nur bis zum ersten stauenden Horizont, der bei 9,8 m angetroffen wurde. Diese Grundwassermessstelle wurde im Bereich zwischen 1,0 und 4,0 m verfiltert. Die im Anschluss an die Errichtung durchgeführten Kurzpumpversuche zeigten, dass es zwischen den beiden ausgebauten grundwasserführenden Bereichen keine direkte hydraulische Beziehung gibt. Auch die analytischen Untersuchungsergebnisse des Grundwassermonitorings 2018 zeigten, dass sich die Chemie der jeweils erschoteten Wässer deutlich voneinander unterscheidet. Details zu beiden Messstellen (Bohrprofile, Ausbaupläne, Probenahme etc.) sind im ersten Zwischenbericht 2017 (BMLFUW, 2017) sowie im zweiten Zwischenbericht 2018 (BMNT, 2018) beschrieben.

Zusätzlich zu diesen beiden Grundwassermessstellen wurden nördlich von Frauenkirchen zwei Feldbrunnen, die im Randbereich auf Weinbauflächen für Bewässerungszwecke neu errichtet wurden, über das gesamte Beobachtungsjahr 2018 beprobt.

Gleichzeitig wurde beim Wasserwerk Frauenkirchen sowohl das obere als auch das darunter befindliche Grundwasserstockwerk untersucht.

Die Lage der im gegenständlichen Forschungsprojekt über das gesamte Jahr 2018 untersuchten Grundwassermessstellen im Seewinkel ist Abbildung 8 zu entnehmen.

Abbildung 8: Lageplan Untersuchungsgebiet zwischen Frauenkirchen und Podersdorf am See im Seewinkel mit den untersuchten Grundwasserprobenahmestellen



Quelle: BEV, Umweltbundesamt

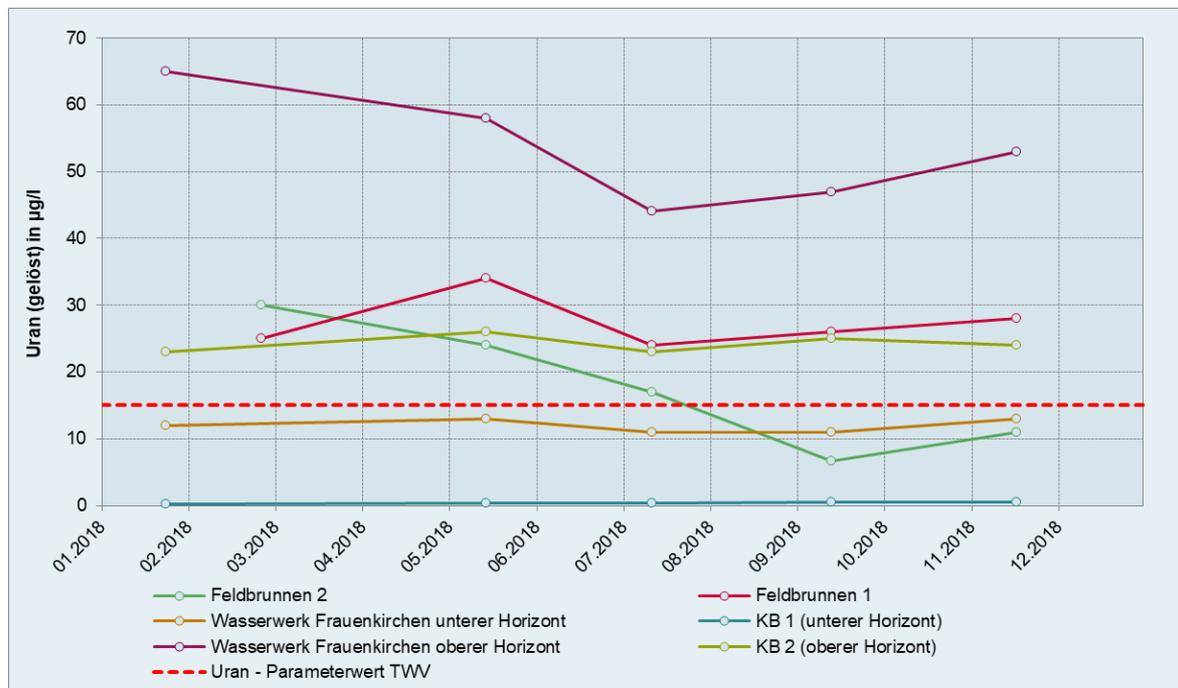
4.1.2 Grundwasseruntersuchungen

Die Trockenkernbohrungen KB1 und KB2, die beiden Feldbrunnen1 und 2 sowie Brunnen des Wasserwerkes Frauenkirchen wurden zwischen Jänner und November 2018 jeweils fünfmal beprobt. Die Probenahmen sowie die Analytik erfolgten durch das Umweltbundesamt. Die Feldbrunnen 1 und 2 wurden ausschließlich auf Uran untersucht, die Wässer der beiden Horizonte des Entnahmebrunnens des Wasserwerkes wurden im Jänner 2018 einmalig mit einem erweiterten Parameterumfang analysiert, bei allen folgenden Probenahmen wurde nur Uran untersucht. Bei KB1 und KB2 wurde stets der erweiterte Parameterumfang analysiert. Zusätzlich erfolgte im Herbst 2018 durch das Umweltbundesamt die Probenahme für die ICP-SFMS Ultraspurenanalyse der Universität für Bodenkultur Wien/Abteilung für Analytische Chemie.

4.1.2.1 Grundwassermonitoring

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings zeigten einen klaren Unterschied zwischen den Urangelhalten des oberen und unteren Grundwasserhorizontes an den beprobten Standorten im Seewinkel (Abbildung 9). Sowohl der obere Horizont des Entnahmepunktes des Wasserwerkes Frauenkirchen als die Messstelle KB2, die auch den oberen Horizont erschließt, zeigten deutlich höhere Urangelhalte als die unteren Horizonte an beiden Standorten. Für den Brunnen des Wasserwerkes waren Urangelkonzentrationen zwischen 44 und 65 µg/l im oberen Horizont zu verzeichnen, im unteren zwischen 11 und 13 µg/l. Die Analysen der beiden unmittelbar nebeneinander situierten Grundwassermessstellen KB1 und KB2 zeigten folgendes Ergebnis: Bei KB2 (oberer Horizont) lagen die Urangelhalte zwischen 23 und 25 µg/l, bei KB1 (unterer Horizont) zwischen 0,26 und 0,49 µg/l. Der Feldbrunnen 1 zeigte mit Urangelgehalten zwischen 24 und 34 mg/l ein mit KB2 vergleichbares Konzentrationsniveau, während für den Feldbrunnen 2 im Lauf der Probenahmen ein Rückgang von 30 auf 11 µg/l zu verzeichnen war (Abbildung 9). Die Zusammenschau der Daten des Grundwassermonitorings sowie der Voruntersuchungen zeigt, dass die gemessenen Urangelkonzentrationen keinen signifikanten jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen.

Abbildung 9: Urangelkonzentrationen (gelöste Fraktion) der untersuchten Grundwassermessstellen im Seewinkel

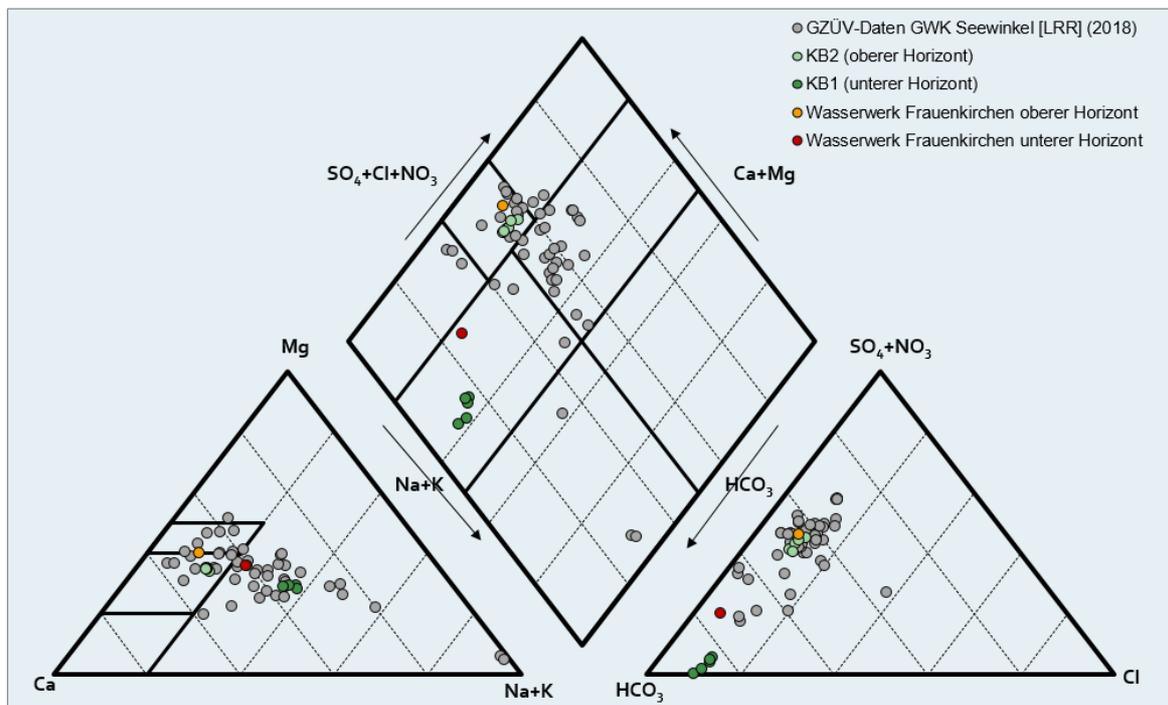


Quelle: Umweltbundesamt

Die Urankonzentrationen wurden sowohl in der Gesamtphase als auch in der gelösten Phase bestimmt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Phasen festgestellt werden. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass Uran nahezu vollständig gelöst vorliegt.

Das Grundwasser der untersuchten Messstellen ist hoch mineralisiert, wobei die Mineralisierung der tieferen Grundwasserhorizonte niedriger ausfällt verglichen mit den oberen Grundwasserhorizonten. So beträgt die mittlere elektrische Leitfähigkeit für den unteren Horizont des Wasserwerkes Frauenkirchen sowie für KB1 ~ 840 bzw. ~730 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die mittlere elektrische Leitfähigkeit für den oberen Horizont des Wasserwerkes Frauenkirchen, KB2, Brunnen 1 sowie Brunnen 2 beträgt ~1260, ~1300, ~1080 bzw. ~1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Abbildung 10: Hauptionen des Grundwassers an den untersuchten Messstellen sowie den GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Seewinkel



Quelle: Umweltbundesamt

Die Messstellen zeigen deutliche Unterschiede im Hauptionen-Chemismus (Abbildung 10), wobei die markantesten Unterschiede zwischen jenen Messstellen ausgeprägt sind, die den tieferen oder den oberen Grundwasserhorizont erschließen. KB1 nimmt aufgrund des sehr niedrigen Sulfatgehaltes von < 25 mg/l (zum Vergleich: der mittlere Sulfatgehalt von KB2 beträgt ~340 mg/l) im Piper-Furtak-Diagramm eine Sonderstellung ein. Die übrigen

Messstellen liegen insgesamt betrachtet innerhalb jener Bandbreite, die durch die GZÜV-Messstellen im gesamten Grundwasserkörper aufgespannt wird.

Die Sauerstoffgehalte der beiden Feldbrunnen lagen bei allen Probenahmen im oxidischen Bereich. Die Sauerstoffgehalte von KB1 und KB2 lagen bei allen Probenahmen < 1 mg/l. In diesem Zusammenhang sind die hohen Eisen- und Mangankonzentrationen bei KB1 und KB2 hervorzuheben. Der Indikatorwert gemäß Trinkwasserverordnung von 50 µg/l für Mangan sowie von 200 µg/l für Eisen wurde bei beiden Messstellen stets überschritten.

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings können messstellenbezogen dem Anhangsband Kapitel 2.1 entnommen werden.

4.1.2.2 Ultraspurenanalytik

Signifikante Vorkommen an den Metallen der Seltenen Erden wurden bei KB1 und KB2 gemessen. Im Gegensatz zu den Proben aus Tirol und der Steiermark zeigen die im Seewinkel entnommenen Proben nur schwach ausgeprägte negative Cer- und Europium-Anomalien.

Schwefel, Silicium, Strontium, Antimon, Barium, Molybdän und Rubidium wurden in allen Proben nachgewiesen. Die Konzentrationen von Schwefel, Silicium und Strontium lagen in den im Seewinkel entnommenen Proben signifikant höher als bei den Probenahmestellen der Kristallinstandorte. Diese Verteilung konnte auch bei Barium, Lithium und Rubidium festgestellt werden.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Ultraspurenanalytik für die Metalle der Seltenen Erden, die Elemente der Platingruppe, Silber, Gold und eine Fülle weiterer Spurenelemente kann dem Anhangsband in Kapitel 7 entnommen werden.

4.1.2.3 Radon-222-Beprobungen von ausgewählten Brunnen

Die beprobten Brunnen im Seewinkel weisen Radon-Gehalte zwischen 0,1 und 44 Bq/l auf (Tabelle 6). Der untere Horizont bei der KB1 weist einen Radon-Wert von 44 Bq/l und der obere Horizont bei der KB2 einen Wert von 13 Bq/l auf, die Beprobung erfolgte mittels einer mobilen Tauchpumpe. Auch bei der Wasserversorgungsanlage in Frauenkirchen zeigt der untere Horizont mit 16 Bq/l eine höhere Radon-Konzentration als der obere Horizont mit 9 Bq/l, hierbei muss jedoch auf die erwähnte Problematik der Hahn-Probenahme hingewiesen werden. Außerdem wurden an zwei Feldbrunnen Schöpfprobenahmen durchgeführt, die extrem niedrigen Werte von 1,2 und 0,1 Bq/l, dürften auf eine bereits stattgefundene Entgasung hinweisen.

Tabelle 6: Radon-222 Analysen von beprobten natürlichen Wässern im Seewinkel

Probenahmeort	Bq/l	Unsicherheit	Uran (ppm) in Bohrkern
Seewinkel KB1 UH (unterer Horizont)	44	+/- 2	
Seewinkel KB2 OH (oberer Horizont)	13	+/- 2	0,7 bis 1,5
Seewinkel Brunnen 1 nördlich	1,2	+/- 0,8	
Seewinkel Brunnen 2 Bahn	0,1	+/- 0,5	

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Hydrogeologie & Geothermie

4.1.3 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

4.1.3.1 RFA- und ICP-MS-Gesteinsanalysen, Rasterelektronenmikroskopie

Die geochemischen Analysen der beprobten Horizonte weisen deutliche Unterschiede im Karbonatgehalt (CaO 6 ± 7 Gew%, CO₂ 6 ± 5 Gew%, Med \pm Stdv) auf (Tabelle 7). Es korrelieren erhöhte Siliziumgehalte (SiO₂ 73 ± 16 Gew%) mit niedrigen Karbonatkonzentrationen. Bei den Spurenelementen treten nennenswerte Unterschiede ohne eindeutige Korrelationen mit weiteren Elementen bei Kupfer (10 ± 11 ppm), Lithium (15 ± 35 ppm) und Zink (31 ± 23 ppm) auf.

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen (EDX) der Streupräparate (Fraktion 0,063 bis 2 mm) bestätigten unterschiedliche mineralogische Zusammensetzungen der beprobten Horizonte. So variiert der Modalbestand von Quarz zwischen 26 und 70 %, Kalzit von 10 bis 40 %, Kalifeldspat von 4 bis 11 %, Plagioklas von 4 bis 12 %, Biotit von 6 bis 14 %, Muskovit von 2 bis 9 %, Chlorit von 1 bis 3 %, Kaolinit von 1 bis 2 %, Ilmenit von 0,2 bis 1,1 % und Pyrit von 0,1 bis 0,4 %. Die Anteile der Hauptbestandteile werden im Wesentlichen auch mit den XRD-Analysen (siehe Tabelle 9) bestätigt. Hinsichtlich der akzessorischen Minerale wurde mit REM-EDX Monazit, Xenotim, Zirkon, Rutil und Apatit, sowie selten bis sehr selten Bleiglanz, Baryt, Allanit, Thorit, Bismuth und Bastnäsit nachgewiesen.

Uran tritt in den untersuchten Bereichen in niedrigen Konzentrationen zwischen 0,7 und 1,5 ppm ($1\pm 0,4$ ppm) auf. Die Maximalwerte von 1,5 ppm wurden in den Teufenbereichen 2 bis 2,5 m und 9,5 bis 10 m festgestellt. Es bestehen keine positiven bzw. negativen Korrelationen mit weiteren Haupt- und Spurenelementen. Die Untersuchungen der Fraktionen <0,063 mm und 0,063 bis 2 mm auf deren Urangelhalte zeigten zudem, dass Uran in der Feinfraktion angereichert ist (siehe Tabelle 8).

Mit dem REM (EDX) wurde Uran vorwiegend in Zirkon (0,4 bis 0,8 Gew.% UO₂; 0,007 bis 0,04 % Modalbestand), Monazit (0,8 bis 2,3 Gew.% UO₂; 0,003 bis 0,02 % Modalbestand) und untergeordnet Xenotim (0,2 bis 2,0 Gew.% UO₂; 0,001 bis 0,005 % Modalbestand) nachgewiesen. Ausschließlich in dem Horizont 4,5 bis 5 m wurde zudem Thorit mit erheblicher Uranführung (3-9 Gew.% UO₂; 0,0008 % Modalbestand) festgestellt. In keinem der Horizonte tritt Uraninit auf.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 2.2 enthalten. Neben Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 2.2 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährender Anteil
- UO₂-Gehalte (Gew.%) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- Bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

Tabelle 7: Geochemie der beprobten Tiefenbereiche der Bohrung Seewinkel KB2

Teufenbereich (m u. GOK)		0,00-0,50	0,50-1,00	2,00-2,50	4,50-5,00	6,25-6,75	9,50-10,00	
SiO ₂	RFA	68	42	54	78	79	81	
TiO ₂		0,5	0,4	0,6	0,2	0,2	0,1	
Al ₂ O ₃		11	6,6	11,9	4,1	4	2,2	
FeO		3,2	2,5	3,8	1,3	1,2	0,8	
MnO		0,09	0,05	0,11	0,02	0,02	0,01	
MgO		1,3	2,7	3,3	1,2	1,6	1,2	
CaO		3	24,8	11,7	7,3	7,1	7,1	
Na ₂ O		0,7	0,2	0,7	0,6	1	0,5	
K ₂ O		2,3	1,2	2,1	1,4	1,3	1,2	
P ₂ O ₅		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
SO ₃		0,04	0,08	0,04	0,03	0,03	0,44	
H ₂ O		0,9	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	
CO ₂		7,9	17,8	8,9	4,8	4,2	4,4	
Summe			99,1	99,7	99,6	99,2	99,9	99,1

Teufenbereich (m u. GOK)			0,00-0,50	0,50-1,00	2,00-2,50	4,50-5,00	6,25-6,75	9,50-10,00
As	RFA	ppm	10	7	<1	<1	<1	<1
Ba			341	237	373	311	254	237
Cd			<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ce			54	36	54	25	21	10
Co			9	6	9	5	4	4
Cr			58	76	70	30	44	48
Cs			6	5	7	4	4	4
Cu			33	12	21	7	7	6
Ga			<1	<1	<1	<1	<1	<1
La			31	20	29	14	13	5
Mo			<1	<1	<1	<1	<1	<1
Nb			12	9	12	6	6	4
Nd			27	15	24	12	11	5
Ni			25	34	30	10	8	7
Pb			18	6	19	9	9	6
Rb			80	53	84	49	43	36
Sb			1	5	3	2	2	2
Sc			9	6	11	8	8	7
Sr			95	291	209	138	117	95
Tb			10	7	11	6	6	5
V	61	63	75	30	29	24		
Y	23	16	22	10	9	6		
Zn	71	40	57	22	21	15		
Zr	200	152	192	69	61	35		
Li	ICP-MS	100	18	30	12	11	9	
U		1,4	1,2	1,5	0,7	0,7	1,5	

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

Tabelle 8: Urangelhalte der Fraktionen <0,063 und 0,063-2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung Seewinkel KB2

	Fraktion (mm)	U (ppm)	% der Fraktionen
SWKB2 0-0,5	<0,063	2,0	14
	0,063-2	1,2	77
	gesamt	1,4	
SWKB2 0,5-1	<0,063	1,7	19
	0,063-2	1,2	68
	gesamt	1,2	
SWKB2 2-2,5	<0,063	2,1	40
	0,063-2	1,4	49
	gesamt	1,5	
SWKB2 4,5-5	<0,063	2,4	8
	0,063-2	0,8	46
	gesamt	0,7	
SWKB2 6,25-6,75	<0,063	2,6	5
	0,063-2	0,8	77
	gesamt	0,7	
SWKB2 9,5-10	<0,063	2,7	3
	0,063-2	1,2	71
	gesamt	1,5	

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

Tabelle 9: XRD-Analysen der Fraktion 0,063-2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung Seewinkel KB2

Seewinkel KB ₂	0,00-0,50 m u. GOK	0,50-1,00 m u. GOK	2,00-2,50 m u. GOK	4,50-5,00 m u. GOK	6,25-6,75 m u. GOK	9,50-10,00 m u. GOK
Calcit	2	0	9	3	3	5
Dolomit	1	0	8	4	4	4
Quarz	66	75	52	69	72	79
Alkalifeldspat	4	11	6	5	4	4
Albit	12	10	14	13	11	6
Muskowit	9	2	7	4	3	1
Chlorit	3	0	4	2	1	1
Kaolinit	2	1	1	1	1	1
Karbonat	3	1	16	7	7	9

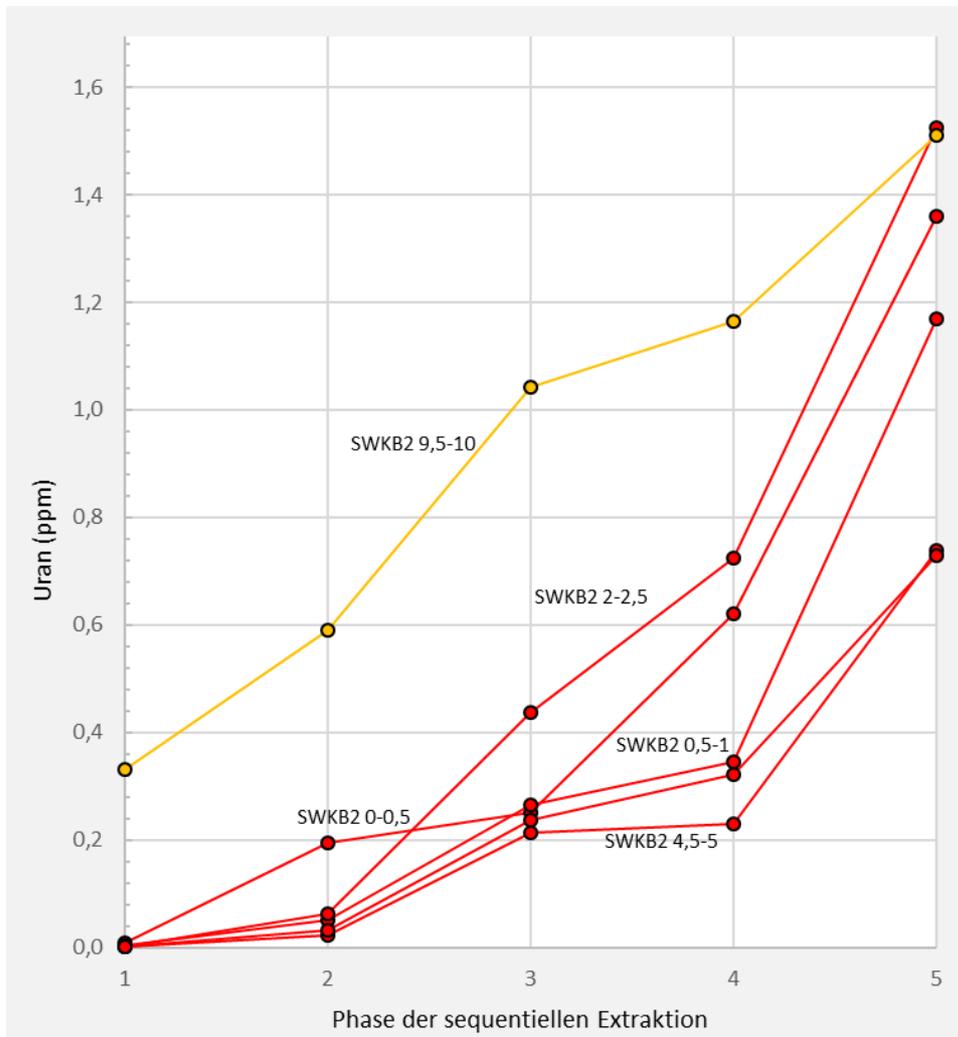
Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

4.1.3.2 Leachingversuche: Sequentielle Extraktion der Uran-Phasen

Die Tiefenbereiche 0,0 bis 0,5, 0,5 bis 1, 2 bis 2,5 und 4,5 bis 5 m der Bohrung KB2 2 zeigen ein vergleichbares Extraktionsverhalten (siehe Abbildung 11). So wurden 52 bis 70 % des Urans erst im Extraktionsschritt 5 mobilisiert, das entspricht 0,4 bis 0,8 ppm. Dementsprechend dürfte ein großer Anteil des Urans in schwer löslichen akzessorischen Mineralen gebunden sein. In den Extraktionsschritten 1 und 2 wurden meist vernachlässigbare Anteile des Urans im Bereich der Messunsicherheit gelöst (< 0,1 ppm) und bei den Extraktionsschritten 3 (4 bis 28 %; 0,1 bis 0,4 ppm) und 4 (2 bis 27 %; 0 bis 0,4 ppm) wurde ein variierendes Extraktionsverhalten festgestellt.

Der Teufenbereich 9,5 bis 10 m zeigt ein differenziertes Extraktionsverhalten. So wurden im Extraktionsschritt 5 nur 23 % des Urans (0,3 ppm) gelöst. In den Extraktionsschritten 1 und 2 wurden jeweils 0,3 ppm und im Extraktionsschritt 3 0,5 ppm gelöst.

Abbildung 11: Sequentielles kumulatives Extraktionsverhalten von Uran von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung Seewinkel KB2



Quelle: Geologische Bundesanstalt

4.1.3.3 Bestimmung der Radon-222-Emanation des Sediments

Im Seewinkel wurde die Probe KB2 aus einer Tiefe von 0,5–1 m u. GOK auf ihre Radon-222-Emanation untersucht. Bei der Probe wurde keine bzw. kaum eine Abweichung zwischen dem gemessenen und den erwarteten Radon-222-Gehalt festgestellt. Damit ist davon auszugehen, dass zumindest ein Großteil des in diesem Sediment vorliegenden Urans geogener Herkunft ist. Bezüglich des restlichen Urans an den Sedimentkörnern in dieser Probe ist keine abschließende Differenzierung möglich, ob eine geogene Herkunft als Verwitterungsprodukt aus dem Einzugsgebiet des Grundwassers oder möglicherweise eine anthropogene Herkunft aus der Phosphatdüngung vorliegt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Radon-220 Leachingversuche von der Bohrung Seewinkel KB2

	Rn-Konzentration Wasser [Bq/l]	Rn-Unsicherheit	entspricht Uran-238 (ppm)	Uran-238 (ppm in Probe)	Bei Emanationsrate von 10 %; Uran-238 (ppm)	Bei Emanationsrate von 15 %; Uran-238 (ppm)	Uran tatsächlich im Sediment (ppm)
Seewinkel KB2 0,5-1,0 m Messung 1	1,6	0,5	0,1	0,1	1,4	0,9	1,2
Seewinkel KB2 0,5-1,0 m Messung 2	2,2	0,4	0,2	0,2	1,9	1,3	1,2

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Hydrogeologie & Geothermie

4.1.4 Fazit

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings zeigten klare Unterschiede zwischen dem Chemismus und den Urangelhalten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Tiefenbereichen an den beprobten Standorten im Seewinkel. Für jene Messstellen, die den oberen Grundwasserhorizont erschließen (Wasserwerk Frauenkirchen OH, KB2, Feldbrunnen 1, Feldbrunnen 2), waren im Jahresmittel Urankonzentrationen zwischen ~22 und ~53 µg/l zu verzeichnen. Die Beprobungen des unteren Horizontes (KB1, Wasserwerk Frauenkirchen UH) ergaben im Jahresmittel Urangelhalte von 0,38 bzw. 12 µg/l.

Die Urankonzentrationen in der Gesamtphase und in der gelösten Phase zeigten keine signifikanten Unterschiede, d.h. das Uran nahezu vollständig gelöst im Grundwasser vorliegt. Die gemessenen Urankonzentrationen zeigten keine jahreszeitlichen Schwankungen.

Sämtliche Metalle der Seltenen Erden wurden im maximal zweistelligen ng/l-Bereich im Grundwasser nachgewiesen. Bei Berücksichtigung eines normierten Verteilungsmusters ist auffällig, dass die schweren Seltenen Erden nur geringfügig abgereichert vorliegen. Dies ist insofern erwähnenswert, da bei den beprobten Wässern eine Signatur der oberen Kruste (Abreicherung der schweren Seltenen Erden mit negativer Cer- und Europium-Anomalie) zu erwarten wäre. Zudem konnten Platingruppenelemente nicht nachgewiesen werden. Bei den weiteren Spurenelementen wurden, abgesehen von Uran, keine erhöhten Konzentrationen festgestellt.

Bei den im Seewinkel untersuchten Proben wurden im Sediment vergleichsweise geringe Urankonzentrationen gemessen. Bei der Bohrung Seewinkel KB2 tritt Uran in den untersuchten Horizonten zwischen 0 und 10 m in geringen Konzentration zwischen 0,7 und 1,5 ppm auf und korreliert nicht mit weiteren Elementkonzentrationen, ist jedoch in der Feinstfraktion (<0,063 mm) deutlich angereichert (max. 2,7 ppm). Diese Horizonte sind geochemisch und auch mineralogisch unterschiedlich beschaffen, dies ist bereits bei den Hauptkomponenten ersichtlich z.B. im Karbonatanteil und Quarzgehalt.

Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion für die Horizonte 0 bis 6,75 m zeigen auf, dass ein erheblicher Anteil des Urans, zumindest 50 %, aus schwer löslichen Akzessorien (Phase 5) stammen muss. Jedoch weicht der Horizont 9,5-bis 10 m dahingehend von weiteren Bereichen ab, dass 77 % des Urans an leichter mobilisierbare Phasen gebunden ist. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um adsorptive oberflächennahe Phasen, organische Phasen oder amorphe Eisen-Phasen. Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen korrelieren mit den Ergebnissen der sequentiellen Extraktion. So wurde festgestellt, dass mehr als 60 % des Urans in Akzessorien wie Zirkon, Monazit, untergeordnet Xenotim und vereinzelt in Allanit (Horizont 6,25 bis 6,75 m) und Thorit (Horizont 4,5 bis 5 m) vorliegen. Uraninit wurde hierbei in keinem Horizont nachgewiesen. Der untersuchte Bereich 9,5 bis 10 m differenziert sich dahingehend, dass lediglich 15 % des vorhandenen Urans mit dem REM-EDX detektiert wurde. Somit bestätigen sich die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion, dass in den Horizonten erhebliche Unterschiede bezüglich der Mobilisierbarkeit von Uran vorliegen.

Zusammenfassend dürfte der Großteil des wenigen Urans an schlecht lösliche Minerale gebunden sein. Allerdings dürfte in manchen Horizonten ein deutlicher Urangehalt an der Oberfläche der Sedimentkörner vorliegen - dies betrifft vor allem die Probe KB2 9,5-10 m u. GOK, wo aufgrund der Leaching-Ergebnisse über 1 ppm Uran in dieser Haut zu erwarten ist.

Die Radon-222 Analysen der Wässer von ausgewählten Brunnen und der Bohrung KB2 zeigten unterschiedliche, aber keine nennenswert erhöhten Konzentrationen (0,1 bis 44 Bq/l). Der ergänzende Versuch zur Radon-222 Emanation des Sediments vom Horizont 0,5 bis 1 m der Bohrung KB2 zeigte, dass der Erwartungswert dem Messwert entspricht. Somit ist von einem natürlichen Gleichgewicht zwischen Uran-238 und Radon-222 auszugehen. In Folge einer jüngeren Mobilisierung des Urans oder eines anthropogenen Eintrags wäre ein Ungleichgewicht zu erwarten.

Es ist jedoch auffällig, dass in den untersuchten Sedimentproben im Seewinkel – und diese werden in ihrer Zusammensetzung auch die anderen küstennäheren Sande repräsentieren –

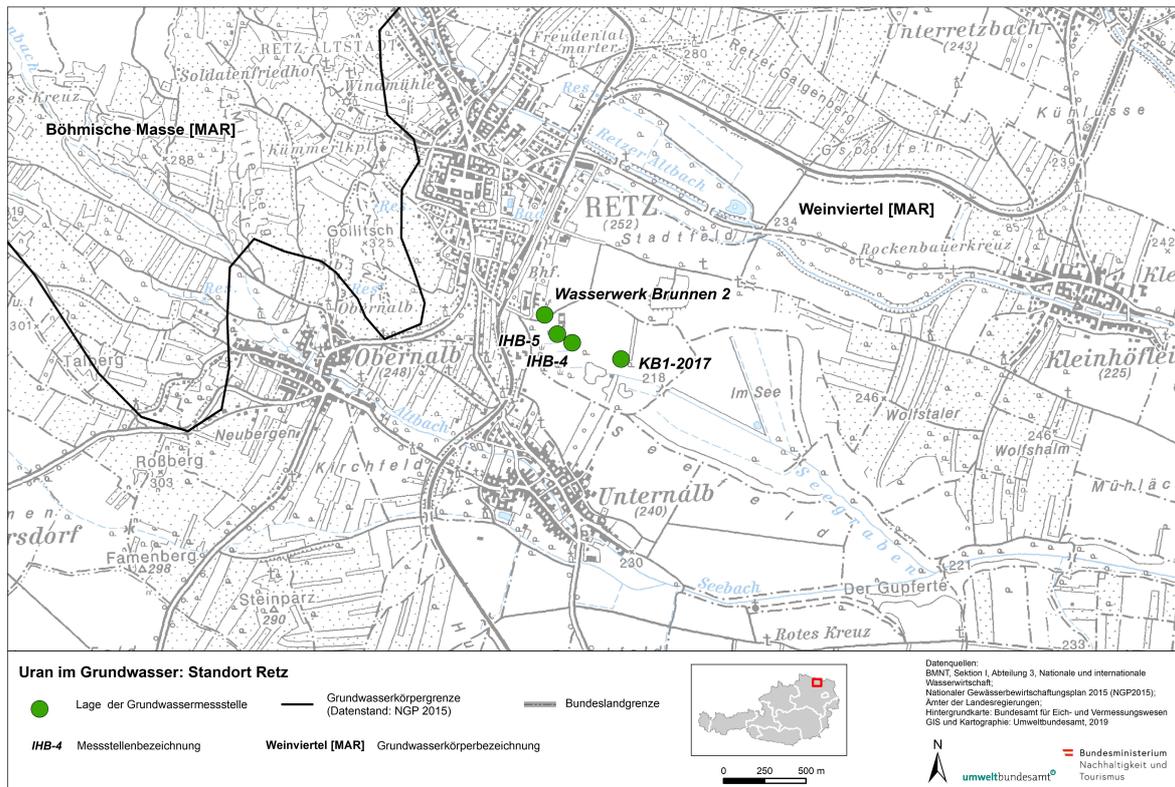
der Urangehalt mit etwa 1 ppm (= 1 mg/kg) sehr gering ist. Das Uran muss aus Verwitterungslösungen durch das Grundwasser aus der weiteren Umgebung eingetragen worden sein. Eine seriöse Bilanzierung des Uraneintrages aus Verwitterungslösungen im Verhältnis zu möglichen Einträgen aus der Phosphatdüngung ist nicht durchführbar.

4.2 Retz

4.2.1 Überblick

Die Gemeinde Retz befindet sich im nordöstlichen Teil des Weinviertels in Niederösterreich, welcher der Gruppe von Grundwasserkörpern Weinviertel [MAR] zuzuordnen ist. Im Westen grenzt das Kristallin der Böhmisches Masse (Granite des Thaya Batholits, Moravikum) an, das gegen Süden und Südosten unter die Molassezone absinkt. Der Raum Retz liegt in einem seichten Randbereich an der Ostseite der Böhmisches Masse. Das Kristallin wird durch Sedimente des Unteren Miozäns (Eggenburgium und Ottnangium) überlagert. Die Retz-Formation entspricht biostratigraphisch der Zogelsdorf-Formation, ist lithologisch jedoch großteils mit der Burgschleinitz-Formation vergleichbar (Schnabel, 2002). Die glimmerreichen Fein- bis Grobsande bildeten aufgrund ihres generell massigen Charakters und ihrer Standfestigkeit eine ausgezeichnete Basis für den Bau des Retzer Kellersystems. Die marinen Tone und Schluffe der Zellerndorf-Formation bauen den hangenden Horizont des Beckens auf, der von holozänen schluffig-tonigen Sedimententwicklungen überlagert wird.

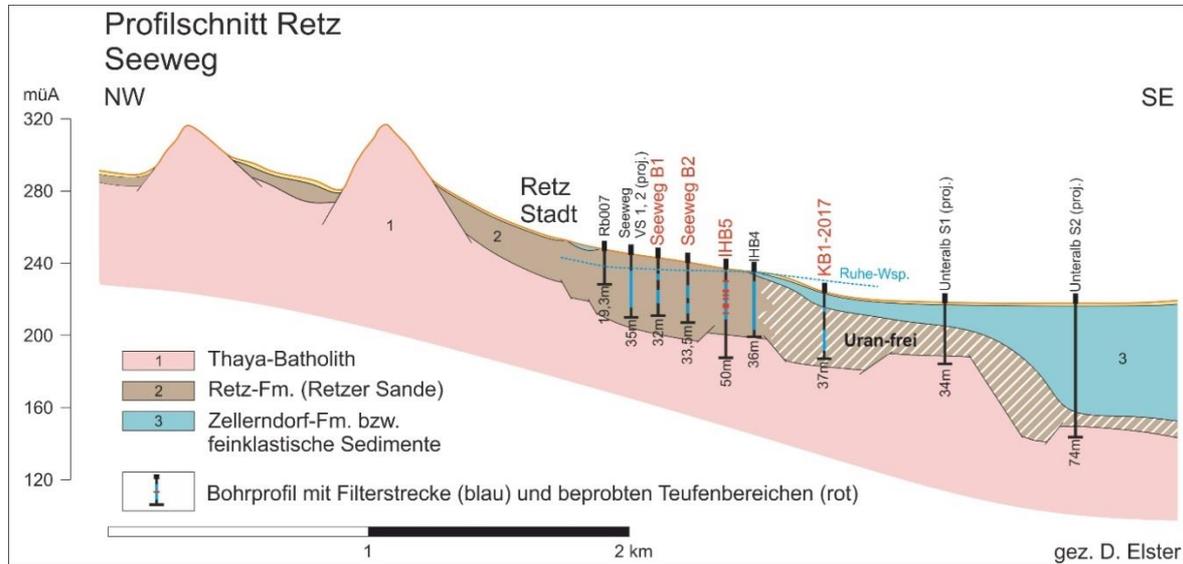
Abbildung 12: Lageplan Untersuchungsgebiet Retz



Quelle: BEV, Umweltbundesamt

Das Grundwasser im Einzugsgebiet der Wasserversorgungsanlage der Gemeinde Retz ist unter anderem durch hohe Urankonzentrationen gekennzeichnet. Die Urangelte liegen in den Entnahmebrunnen bei bis zu 120 µg/l und überschreiten somit den Trinkwassergrenzwert von 15 µg/l deutlich. Die Gemeinde Retz entschloss sich daher 2009 für den Bau einer Uranentfernungsanlage. 2015 war die Gemeinde mit dem Problem konfrontiert, dass sich die Zusammensetzung des Rohwassers ungünstig für die Uranentfernungsanlage entwickelte. Deshalb musste zusätzlich Wasser über eine Leitung der EVN-Wasser zugemischt werden, um den Grenzwert einhalten zu können. Da der Betrieb der Uranentfernungsanlage und die externe Zuleitung von Wasser erhebliche Kosten verursachen, wurde seitens der Gemeinde beschlossen, einen weiteren Brunnenstandort neben einem bereits bestehenden artesischen Brunnen südöstlich des Brunnenfeldes Seeweg zu erschließen. Im Frühjahr 2017 wurde daher eine Grundwassersonde errichtet. Diese Sonde (KB1-2017) führt ebenfalls artesisch gespanntes Wasser, die Urankonzentrationen liegen unterhalb der Nachweisgrenze.

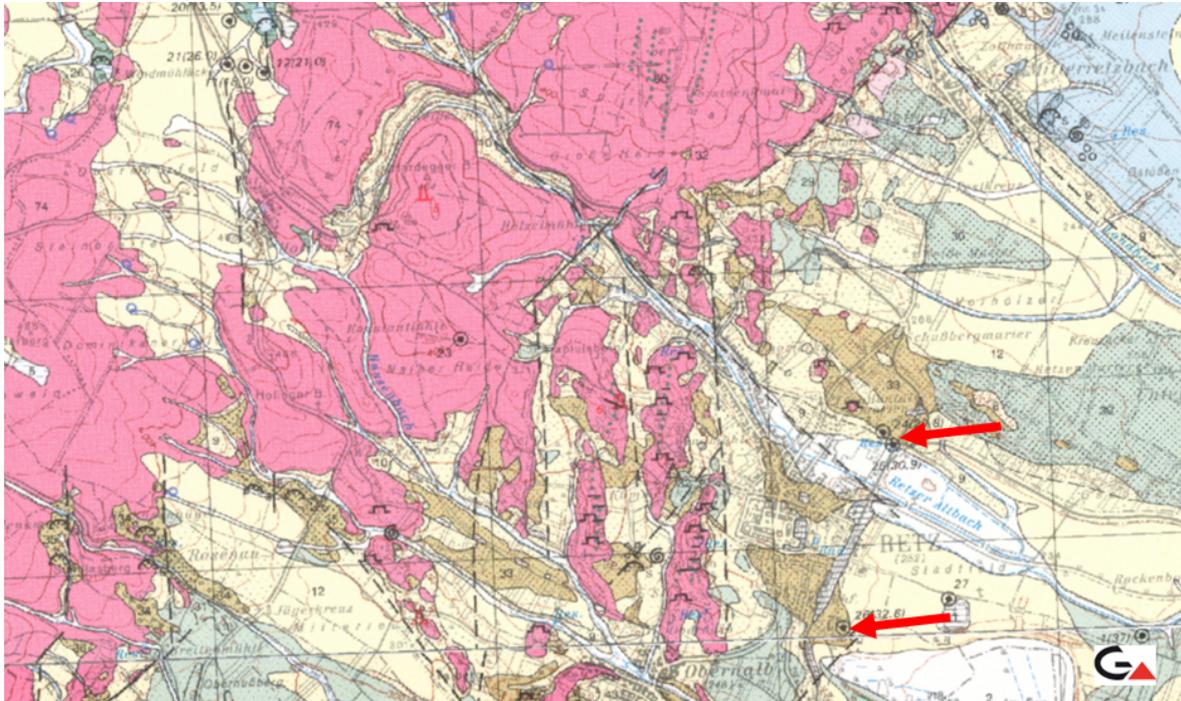
Abbildung 13: Geologischer Profilschnitt zum Raum Retz mit der Bohrung IHB-5 und den beprobten Teufenbereichen; Geologie nach der Geologischen Karte 1:50.000, Blatt 9 Retz (Roetzel, 1999) und Blatt 22 Hollabrunn (Roetzel, 1998), Bohrungen nach den Unterlagen im Archiv der Fachabteilung Hydrogeologie und Geothermie; Uran-frei bezieht sich auf den geringen Urangehalt im gespannten Grundwasser.



Quelle: D. Elster/Geologische Bundesanstalt

Aufgrund der besonderen hydrogeologischen Verhältnisse – das Brunnenfeld befindet sich im Randbereich der Böhmisches Masse, der Grundwasserleiter wird aus Retzer Sanden gebildet, zum Teil überlagert von bindigen Sedimenten der Zellerndorf-Formation (siehe Abbildung 14) –, der besonderen Bedeutung für die lokale Trinkwasserversorgung und der sich bietenden Synergien mit den aktuellen Untersuchungen der Gemeinde wurde Retz als ein Detailuntersuchungsstandort für das gegenständliche Forschungsprojekt ausgewählt. Zudem befindet sich das Brunnenfeld der Wasserversorgung in einem Übergangsbereich zwischen oxidischen Verhältnissen (Sande im Bereich der Retzer Keller) hin zu anoxischen Verhältnissen (neuer Arteser KB1-2017).

Abbildung 14: Ausschnitt aus der geologischen Karte 1:50.000 mit der Lage der beiden Brunnenfelder Sandweg (südlich) und Seeweg (nördlich) im Randbereich der Böhmisches Masse



Quelle: BEV, Geologische Bundesanstalt

4.2.2 Grundwasseruntersuchungen

Die Messstellen IHB-4, IHB-5, KB1-2017 sowie ausgewählte Entnahmebrunnen des Wasserwerkes Retz wurden zwischen Jänner und November 2018 jeweils vier- bis fünfmal beprobt. Die Probenahmen sowie die Analytik erfolgten durch das Umweltbundesamt. IHB-4 und IHB-5 wurden fünfmal vollumfänglich untersucht, bei den anderen Untersuchungsstellen wurden ein- bis zweimal eine Vollaufnahme durchgeführt, bei allen weiteren Probenahmen wurde nur Uran analysiert. Zusätzlich erfolgte im Herbst 2018 die Probenahme für die ICP-SFMS Ultraspurenanalyse der Universität für Bodenkultur Wien/Abteilung für Analytische Chemie.

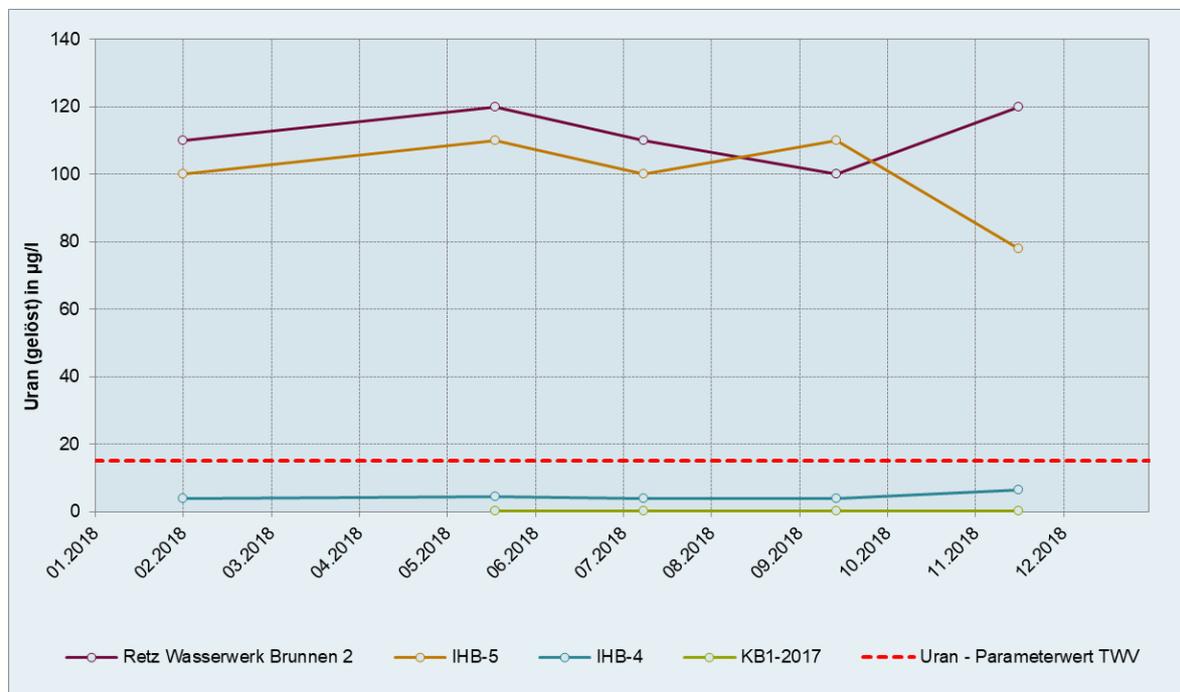
Darüber hinaus wurden im Jahr 2017 durch die Geologische Bundesanstalt die Brunnenwässer im Raum Retz hydrochemisch und insbesondere auf Uran untersucht. Im Jahr 2019 wurden entsprechende Analysen auch an Quellwässern im Verbreitungsgebiet des Retzer Granits durchgeführt (Beprobungspunkte und Urangehalt siehe Abbildung 30).

4.2.2.1 Grundwassermonitoring

Alle untersuchten Brunnen bzw. Grundwassermessstellen erschroten Wässer aus den Retzer Sanden. Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings zeigten allerdings einen klaren Gradienten in den Urangelhalten der untersuchten Messstellen entlang des in Abbildung 13 ersichtlichen Profilschnittes. Die Urankonzentrationen für Brunnen 2 des Wasserwerkes Retz lagen zwischen 99 und 120 µg/l (Abbildung 15). Die Urangelhalte der nächstgelegenen Messstelle IHB-5 betrug 78 bis 100 µg/l. Für die weiter östlich gelegene IHB-4 waren nur noch Urankonzentrationen zwischen 3,8 und 6,5 µg/l zu verzeichnen. An der Messstelle KB1-2017, die artesisch gespanntes Grundwasser führt, wurden bei allen Probenahmen Urankonzentrationen < 1 µg/l detektiert. Die Zusammenschau der Daten des Grundwassermonitorings sowie der Voruntersuchungen zeigt, dass die gemessenen Urankonzentrationen keinen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen.

Die Urankonzentrationen wurden sowohl in der Gesamtphase als auch in der gelösten Phase bestimmt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Phasen festgestellt werden. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass Uran nahezu vollständig gelöst vorliegt.

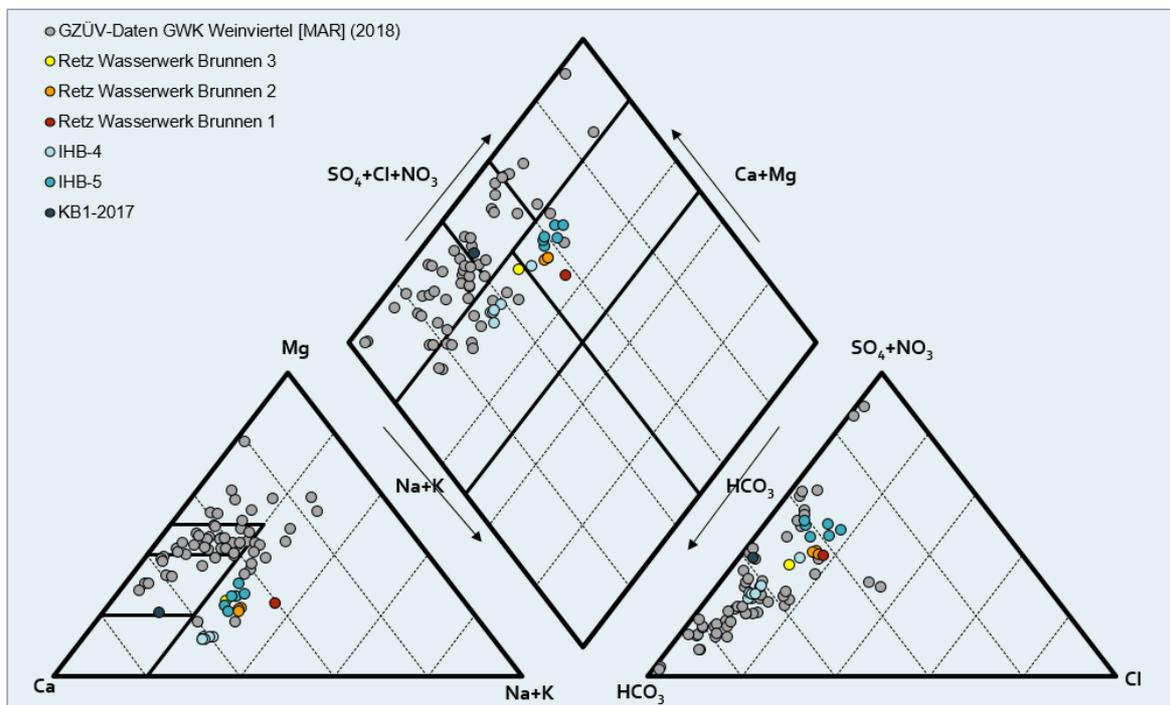
Abbildung 15: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der untersuchten Grundwassermessstellen in Retz



Quelle: Umweltbundesamt

Das Grundwasser der untersuchten Messstellen ist vergleichsweise hoch mineralisiert. Die mittlere elektrische Leitfähigkeit beläuft sich im Jahr 2018 auf ~850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei IHB-4, ~1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei KB1-2017, ~1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei Brunnen 2 sowie ~1420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei IHB-5. Die Messstellen zeigen leichte Unterschiede im Hauptionen-Chemismus (Abbildung 16), liegen insgesamt jedoch innerhalb der durch die GZÜV-Messstellen des Grundwasserkörpers aufgespannten Bandbreite.

Abbildung 16: Retz: Hauptionen des Grundwassers an den untersuchten Messstellen sowie den GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Weinviertel [MAR]



Quelle: Umweltbundesamt

Auffällig sind die hohen Eisen- und Mangankonzentrationen. Der Indikatorwert gemäß Trinkwasserverordnung von 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ für Mangan wird mit Ausnahme von KB1-2017 an allen Messstellen überschritten. Der Indikatorwert von 200 $\mu\text{g}/\text{l}$ für Eisen wird an allen Messstellen zumindest zeitweise überschritten.

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings können messstellenbezogen dem Anhangsband Kapitel 3.1 entnommen werden.

4.2.2.2 Ultrapurenanalytik

Signifikante Vorkommen an den Metallen der Seltenen Erden wurden bei IHB-5 gemessen, beispielsweise für Cer, Neodym und Yttrium. Bei Brunnen 2 des Wasserwerkes Retz konnte keine der untersuchten Seltenen Erden detektiert werden, bei IHB-4 und KB1-2017 war dies für einige Elemente möglich. Im Gegensatz zu den Proben aus Tirol und der Steiermark zeigen die Proben aus Retz - analog zu den Proben aus dem Seewinkel - nur schwach ausgeprägte negative Cer- und Europium-Anomalien.

Schwefel, Silicium, Strontium, Antimon, Barium, Molybdän und Rubidium wurden in allen Proben nachgewiesen. Die Konzentrationen von Schwefel, Silicium und Strontium lagen in den Retzer Proben signifikant höher sind als bei den Probenahmestellen der Kristallinstandorte. Diese Verteilung konnte auch bei Barium, Lithium und Rubidium festgestellt werden.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Ultrapurenanalytik für die Metalle der Seltenen Erden, die Elemente der Platingruppe, Silber, Gold und eine Fülle weiterer Spurenelemente kann dem Anhangsband Kapitel 7 entnommen werden.

4.2.2.3 Radon-222-Beprobungen von ausgewählten Brunnen

In Retz wurden vier Messstellen untersucht, die artesische KB1-2017 weist eine Radon-Konzentration von 31 Bq/l auf, die gespannte IHB-4 einen Wert von 84 Bq/l und die IHB-5 mit 142 Bq/l den höchsten Wert. Die beiden letzten Messstellen wurden mittels der mobilen Pumpe beprobt. Der Brunnen 2 wurde am Hahn im Wasserwerk Retz beprobt und zeigt eine Radon-Konzentration von 61 Bq/l.

Tabelle 11: Radon-222 Analysen von beprobten natürlichen Wässern in Retz

Probenahmeort	Bq/l	Unsicherheit	Uran (ppm) im Bohrkern	Anmerkung
Retz Brunnen 2	61	+/- 4		Entgasungsmöglichkeit
Retz IHB-5	142	+/- 5	0,7-8,3	
Retz IHB-4	84	+/- 3		
Retz KB1-2017	31	+/- 1		

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Hydrogeologie & Geothermie

4.2.3 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

4.2.3.1 RFA- und ICP-MS-Gesteinsanalysen, Rasterelektronenmikroskopie

In Retz wurden ausgewählte Horizonte der Kernbohrung IHB-5 sowie zwei Bereiche des Retzer Kellersystems (Hauptkeller und Privatkeller in der Schmiedgasse) untersucht. Die Bohrung IHB-5 wurde im September 2017 bis auf 50 m abgeteuft und erreichte ab 34,5 m die Oberkante des Kristallins (Thaya-Batholith). Zuvor wurden Ablagerungen der Retzer Sande angetroffen, diese bestehen vorwiegend aus Feinsand bis Grobsand mit verfestigten Bereichen (im Bohrprofil als Sandgestein ausgewiesen). Sämtliche untersuchte Horizonte befinden sich in der gesättigten Zone, es ist ein Ruhewasserspiegel von ca. 3 m unter GOK zu erwarten.

Die geochemischen Analysen der beprobten Horizonte der Bohrung Retz IHB-5 weisen deutliche Unterschiede auf (Tabelle 12). Bei den Hauptelementen ist insbesondere der wechselnde Karbonatgehalt ($\text{CaO } 6\pm 7 \text{ Gew.}\%$; $\text{Med}\pm\text{Stdv}$) auffallend. Hierbei korrelieren erhöhte Siliziumgehalte ($\text{SiO}_2 \text{ } 80\pm 10 \text{ Gew.}\%$) mit niedrigen Karbonatkonzentrationen. Von den Spurenelementen verhält sich Strontium ($232\pm 222 \text{ ppm}$) analog zu Karbonat. Weitere nennenswerte Unterschiede ohne eindeutige Korrelationen mit weiteren Elementen treten bei Arsen ($2\pm 3 \text{ ppm}$), Chrom ($31\pm 70 \text{ ppm}$), Lanthan ($7\pm 6 \text{ ppm}$) und Cer ($14\pm 11 \text{ ppm}$) auf.

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen (EDX) der Streupräparate (Fraktion 0,063 bis 2 mm) bestätigten unterschiedliche mineralogische Zusammensetzungen der beprobten Horizonte. So variiert der Modalbestand von Quarz zwischen 33 und 71 %, Kalzfeldspat von 0,5 bis 25 %, Kalifeldspat von 8 bis 12 %, Plagioklas von 12 bis 18 %, Biotit von 1 bis 2 %, Muskowit von 1 bis 5 %, Chlorit von 1 bis 3 %, Kaolinit von 1 bis 2 %, Ilmenit von 0,2 bis 0,6 % und Pyrit von 0,7 bis 1 %. Die Anteile der Hauptbestandteile werden im Wesentlichen auch mit den XRD-Analysen, siehe Tabelle 14, bestätigt. Hinsichtlich der akzessorischen Minerale wurde mit REM-EDX Zirkon, Monazit, Baryt, Xenotim, sowie selten bis sehr selten Bleiglanz und Rutil nachgewiesen.

Die Untersuchungen der Fraktionen $< 0,063 \text{ mm}$ und $0,063 \text{ bis } 2 \text{ mm}$ auf deren Urangehalte zeigten, dass Uran in der Feinfraktion angereichert ist (siehe Tabelle 13). Die Konzentrationen von Uran ($5\pm 3 \text{ ppm}$) unterscheiden sich in den beprobten Horizonten erheblich und eine Korrelationsmatrix zeigt folgende Beziehungen auf: Positive Korrelationen mit einem Korrelationskoeffizienten von über +0,75 bestehen für Zink (+0,92), Schwefel (SO_3 +0,92), Nickel (+0,89), Karbonat (CO_2 +0,82; CaO +0,79), Eisen (FeO +0,80), Strontium (+0,76), Yttrium (+0,76) und Lanthan (+0,75). Eine eindeutige negative Korrelation liegt einzig bei

Silizium (SiO_2 -0,84) vor. Die positiven Korrelationen von Uran mit Zink, Nickel, Schwefel und Eisen könnten auf einen geochemischen Zusammenhang mit Eisen(II)sulfiden deuten.

Mit dem REM (EDX) wurde Uran vorwiegend in Zirkon (1,3 bis 2,4 Gew.% UO_2 ; 0,008 bis 0,03 % Modalbestand), Monazit (0,8 bis 1,7 Gew.% UO_2 ; 0,003 bis 0,01 % Modalbestand) und untergeordnet Xenotim (max. 0,6 Gew.% UO_2 ; max. 0,002% Modalbestand) nachgewiesen. Uraninite treten in keinem der Horizonte auf.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 3.2 enthalten. Neben Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 3.2 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährender Anteil
- UO_2 -Gehalte (Gew.%) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

Die beprobten Retzer Sande im Kellersystem weisen einen vernachlässigbaren Karbonatgehalt und einen dementsprechend hohen Quarzgehalt auf. Uran ist im beprobten Hauptkeller nicht nachweisbar und im Privatkeller in der Schmiedgasse gering konzentriert (0,6 ppm). Im Vergleich zu den untersuchten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 ähnelt die geochemische Zusammensetzung der Kellerproben dem Horizont 7,00 bis 7,50 m. Aufgrund der etwas rötlichen Verfärbung des Sediments ist in diesem Bereich ein oxidierendes Milieu anzunehmen.

Bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der Probe Schmiedgasse wurde Uran in Zirkon (max. 4,6 Gew.% UO_2 ; 0,008 % Modalbestand) und Monazit (2,5 Gew.% UO_2 ; 0,003 % Modalbestand) festgestellt.

Im Rahmen des Projekts wurde auch das kristalline Gestein im Einzugsgebiet des Retzer Sands, nämlich der Retzer Granit sowie der Thaya Batholith – zudem auch Quellen in dessen Verbreitungsgebiet – beprobt und geochemisch untersucht, um auch Informationen zu dessen Urangehalt und Uranmineralisationen zu erhalten.

Tabelle 12: Geochemie der beprobten Bereiche der Bohrung Retz IHB-5 und des Retzer Kellersystems

Teufenbereich (m u.GOK)		Bohrung Retz IHB-5							Kellersystem		Retzer Granit		
		7,00-7,50	12,25-12,75	13,00-13,50	15,25-15,75	17,00-17,50	20,25-20,75	21,50-2,002	25,00-25,50	Schmiedgasse	Hauptkeller	R-WK1	R-WK2
SiO ₂	RFA %	88	69	84	81	67	81,6	79	57	89	89	73,0	78,0
TiO ₂		0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,19	0,04
Al ₂ O ₃		6,1	5,8	5,9	6,6	6,3	6,6	5,8	6,5	5,1	4,9	14,9	12,5
FeO		0,8	1,4	0,8	0,9	1,1	1	0,7	1,1	0,7	0,6	1,4	0,3
MnO		<0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	<0,01	0,01	0,03	0,02
MgO		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,5	0,1
CaO		0,4	12,6	3,1	4,1	13,4	3	7,4	19,5	0,4	0,4	0,3	0,3
Na ₂ O		1,3	1,2	1,3	1,5	1,3	1,6	1,3	1,6	1,2	1,4	3,1	2,8
K ₂ O		2,2	1,7	2,1	2,2	2	2	1,7	1,9	2	2,2	4,6	4,9
P ₂ O ₅		<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
SO ₃		0,03	1,12	0,49	0,63	0,84	0,99	0,34	0,82	0,04	0,06	0,01	0,01
H ₂ O		0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	1,3	0,6
CO ₂		0,2	5,8	1,5	2	6,7	2,3	2,8	11	0,1	0,1	<0,1	<0,1
Summe		99,8	99,3	99,5	99,2	99,1	99,5	99,4	99,8	99,3	99,3	99,3	99,6
As	RFA ppm	<1	2	<1	<1	2	7	<1	<1	<1	<1	3	1
Ba		416	370	444	452	452	379	411	447	405	422	541	151
Cd		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,05	0,03
Ce		9	17	10	12	15	16	9	41	9	9	35	7
Co		4	5	4	4	4	5	4	4	4	4	2,5	1,0
Cr		15	34	18	53	30	16	222	31	14	11	17	14
Cs		5	6	6	7	6	6	4	6	5	5	1,2	1,3
Cu		2	5	3	3	4	4	5	4	3	3	2	2
Ga		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
La		4	11	4	6	7	9	5	23	3	2	20	5
Mo		<1	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1	0,2	0,1
Nb		5	6	5	5	5	6	5	4	5	5	13	12
Nd		4	9	6	8	7	8	6	18	6	6	21	4
Ni		3	10	6	6	7	8	7	11	5	7	66	65
Pb		16	5	8	8	7	14	4	7	33	11	11	14
Rb		68	71	69	70	84	66	62	84	61	64	154	165
Sb		<1	3	1	1	3	<1	2	3	<1	<1	2	1
Sc		5	9	6	7	8	6	7	7	5	5	6	4
Sr		88	372	160	167	414	189	274	781	90	91	156	115
Th		6	5	5	5	5	5	5	6	5	5	13	5
V		26	42	25	24	33	27	30	38	23	23	5	1
Y		6	8	5	7	9	7	4	8	5	5	13	15
Zn	16	31	18	19	24	26	19	28	16	20	40	16	
Zr	58	135	49	60	74	73	52	63	38	42	94	15	
Li	ICP -MS	12	13	12	13	13	15	11	11	11	10	15	5
U		0,7	7,2	3	4	7	6,8	3	8,3	0,6	<1	1,2	1,6

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

Tabelle 13: Urangelhalte der Fraktionen <0,063 und 0,063–2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 sowie des Retzer Kellersystems

	Fraktion (mm)	U (ppm) (ICP-MS)	% der Fraktionen
IHB-5 25-25,5 m	< 0,063	13,3	12
	0,063-2	7,0	82
	gesamt	8,3	
IHB-5 12,25-12,75 m	<0,063	14,6	14
	0,063-2	5,2	81
	gesamt	7,2	
IHB-5 17-17,5 m	<0,063	16,2	12
	0,063-2	5,2	87
	gesamt	7,0	
IHB-5 20,25-20,75 m	<0,063	12,2	14
	0,063-2	4,9	77
	gesamt	6,8	
IHB-5 7-7,5 m	<0,063	2,0	12
	0,063-2	0,54	88
	gesamt	0,7	
Retz Schmiedgasse	<0,063	1,3	1
	0,063-2	0,6	99
	gesamt	0,6	

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

Tabelle 14: XRD-Analysen der Fraktion 0,063-2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 sowie des Retzer Kellersystems

Retz IHB-5 und Kellersystem	7,00-7,50 m u. GOK	12,25-12,75 m u. GOK	17,00-17,50 m u. GOK	20,25-20,75 m u. GOK	25,00-25,50 m u. GOK	Schmied- gasse
Calcit	6	21	2	10	18	1
Dolomit	0	10	0	0	0	0
Quarz	71	46	71	61	50	72
Alkalifeldspat	9	6	8	12	11	9
Albit	11	8	13	11	16	12
Muskowit	2	5	3	2	2	3
Chlorit	1	3	0	1	1	0
Kaolinit	1	0	2	1	2	2
Karbonat	6	32	3	11	18	1

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

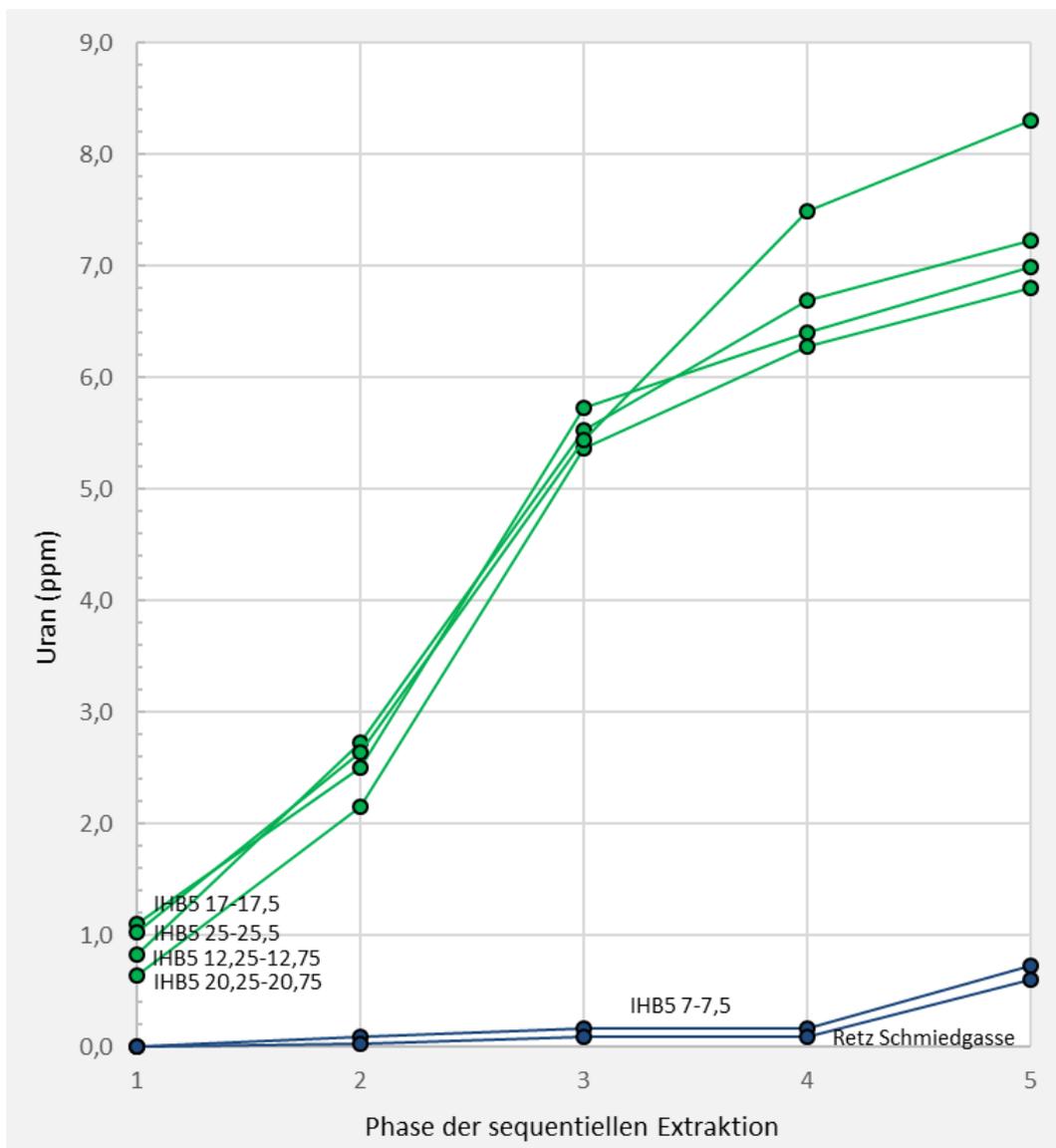
4.2.3.2 Leachingversuche: Sequentielle Extraktions der Uran-Phasen

Die Tiefenbereiche 12,25-12,75, 17-17,5, 20,25-20,75 und 25,00 bis 25,50 m der Bohrung IHB-5 zeigen ein vergleichbares Extraktionsverhalten (siehe Abbildung 17). In der ersten Phase werden 9 bis 16 % des gesamten Urans gelöst, in der zweiten Phase 19 bis 26 %, in der dritten Phase 34 bis 47 %, in der vierten Phase 0 bis 25 % und in der fünften Phase 7 bis 10 %. Somit ist nur ein geringer Anteil des Urans in akzessorischen Mineralen (z.B. Zirkonen) und schwer löslichen Silikaten vorhanden. Die Ergebnisse der geochemischen Untersuchungen deuten bereits auf einen Zusammenhang von Uran mit Eisen(II)sulfiden. Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion bestätigen dies, somit dürfte Uran teilweise mit Sulfiden auftreten. Bezüglich der Phase 2 ist anzumerken, dass Uraninite mit der Rasterelektronenmikroskopie im Sediment nicht nachgewiesen werden konnten. Ein großer Anteil des Urans dürfte an amorphe Eisen-Oxid-Hydroxide gebunden sein. Somit ist anzunehmen, dass Sorptionsprozesse die geochemische Mobilität von Uran im gegebenen Setting entscheidend beeinflussen.

Das Extraktionsverhalten von dem Tiefenbereich 7 bis 7,5 m weicht deutlich von den weiteren Horizonten ab. Abgesehen von dem deutlich niedrigeren Uran-Gehalt (0,7 ppm) ist das Extraktionsverhalten mit der Probe aus dem Retzer Kellersystem (Schmiedgasse; 0,6 ppm)

vergleichbar, so liegen 81 bzw. 84 % in der Phase 5 in Silikaten und akzessorische Minerale gebunden vor. Durchaus vergleichbar ist die Freisetzung von Uran der Phase ($0,5 \pm 0,1$ ppm; Median \pm Standardabweichung) von allen beprobten Tiefenbereichen inklusive der Probe aus dem Retzer Kellersystem. Die Konzentration von 0,5 ppm Uran kann als Hintergrundwert von Uran in den Retzer Sanden außerhalb des Einflussbereiches der vermuteten Redoxfront interpretiert werden.

Abbildung 17: Sequentielles kumulatives Extraktionsverhalten von Uran von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 und von einer Probe aus dem Retzer Kellersystem (Schmiedgasse)



Quelle: Geologische Bundesanstalt

4.2.3.3 Bestimmung der Radon-222-Emanation des Sediments

Die Bestimmung der Radon-222-Emanation der Sedimente hatte zum Ziel herauszufinden, ob das in den Sedimenten vorliegende Uran-238 im Zerfallsgleichgewicht mit dem Tochternuklid Radon-222 steht. Der Erwartungswert für die Emanation aufgrund des Urangehalts (und der damit einhergehenden Aktivitäten von Uran-238 und Uran-234) und die tatsächliche gemessenen Radonemanationen sind in Tabelle 15 dargestellt. Der Erwartungswert basiert dabei auf der Annahme, dass 50 % des gebildeten Radons emanieren, da sich das Uran mit seinen Tochternukliden auf der Kornoberfläche befindet.

Während bei den beiden Proben mit den geringen Urangehalten (Sand aus Retzer Kellern) der Erwartungswert dem Messwert gut entsprach, zeigte sich bei der Probe mit dem hohen Urangehalt (Probe IHB-5, 25-25,5 m u. GOK aus Retz) eine deutliche Abweichung des Erwartungswertes vom Messwert.

Tabelle 15: Vergleich der zu erwartenden Radon-222-Emanation der Sedimentproben mit dem Mittel der tatsächlichen gemessenen Emanation aus den Sedimentproben ins Wasser; die uranreiche Probe Retz, IHB-5 – 25-25 m u. GOK zeigt einen deutlich geringeren Wert als den erwarteten. Dies deutet auf ein starkes Ungleichgewicht in der Zerfallsreihe hin.

Probe	Uran-238-Gehalt im gesamten Sediment (ppm)	Uran-238-Gehalt innerhalb der Körnern des Sediments (ppm) (Leaching-Phase 5)	Uran-238-Gehalt an der Oberfläche der Körnern des Sediments (ppm) (Leaching-Phase 1 bis 4)	Zu erwartende Radon-222-Emanation aus dem Inneren der Sedimentkörner unter der Annahme eines Emanationskoeffizienten von 11 % (Bq/kg Sediment)	Zu erwartende Radon-222-Emanation von der Oberfläche der Sedimentkörner unter der Annahme eines Emanationskoeffizienten von 50 % (Bq/kg Sediment)	Zu erwartende gesamte Radon-222-Emanation des Sediments (Bq/kg Sediment)	Mittelwert des gemessenen Radon-222-Emanation im Porenwasser des Sediments (Bq/kg Sediment)
Retz, IHB-5 25-25,5 m u. GOK	8,30	0,80	7,50	1,1	46,7	47,7	13,8
Retz, Sand (Keller Schmiedgasse bzw. Hauptkeller*)	0,61	0,51	0,10	0,7	0,6	1,3	1,3

Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Hydrogeologie & Geothermie

4.2.4 Säulenexperimente zum Verhalten von Uran an Redox-Fronten

4.2.4.1 Einleitung

Zur Aufklärung von Mechanismen, die zur lokalen Anreicherung von Uran in Grundwässern führen können, wurde die Geochemie im Bereich der Wasserversorgungsanlage Retz interpretiert und in Zusammenhang mit der Entwicklung der Urankonzentrationen gebracht. Probennahmen der Aquifersedimente aus dem weiteren Bereich der beobachteten erhöhten Uran-Grundwasserkonzentrationen wurden anoxisch gewonnen und gelagert. Diese Proben wurden intensiv hinsichtlich der geochemischen Prozesse untersucht, die zur Festlegung bzw. Mobilisierung von gelöstem Uran führen können.

4.2.4.1.1 Analyse der geochemischen Verhältnisse am Standort Retz

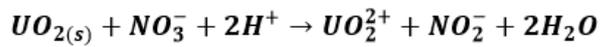
Die Überlegungen zu den relevanten geochemischen Prozessen, die zu hohen Urankonzentrationen in Grundwässern in Niederösterreich und im Burgenland führen, gehen zunächst von den Grundwasserprobennahmen aus, die im Rahmen der Voruntersuchungen durchgeführt wurden (siehe BMLFUW, 2017). Hier wurden erhöhte Urankonzentrationen in einem Brunnen der Wasserversorgung Retz beobachtet. Diese Urankonzentrationen sind gegenüber den Urankonzentrationen im anströmenden Grundwasser sowie im Abstrom des Brunnens erhöht. Eine lokale Kontaminationsquelle für Uran ist hier nicht bekannt. Es wurden dazu mehrere Brunnen im Bereich der Wasserversorgung Retz entlang eines hydraulischen Gradienten betrachtet (Abbildung 18). In Abbildung 19 (siehe auch Tabelle 16) werden die Konzentrationen von redox-aktiven gelösten Substanzen gezeigt (abfallende Grundwasserpegelhöhen von links nach rechts). So werden entlang des Grundwasserfließpfades abnehmende Nitratkonzentrationen von 100 ppm bis < 1 ppm beobachtet. Gleichzeitig bilden sich entlang des Fließpfades nacheinander Konzentrationsmaxima von Nitrit (bis 0,34 ppm in der Vorfeldsonde V3 = Pegel 3) und NH₃ (bis 0,1 ppm in IHB-4) aus. Diese geochemische Entwicklung deutet auf eine Redoxfront mit aktiver Nitratreduktion hin:



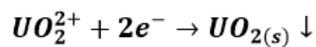
Mit abnehmender Nitratkonzentration erreichen Mangankonzentrationen ein Maximum im Bereich von Sonde IHB-4. Dies kann als Hinweis auf Manganreduktion im Bereich der Redoxfront dienen:



Schließlich wird eine Zunahme und anschließende Abnahme der Urankonzentration im Bereich der Redoxfront beobachtet, die gekoppelt mit der Nitratreduktion mit Rollfront-Prozessen an der Redoxfront konsistent ist, mit Oxidation vierwertigen Urans und erhöhten Urankonzentrationen auf der oxischen Seite:



und Rereduktion des löslichen Uranylions gefolgt von Ausfällung von amorphen U(IV)Oxidphasen auf der reduzierenden Seite:

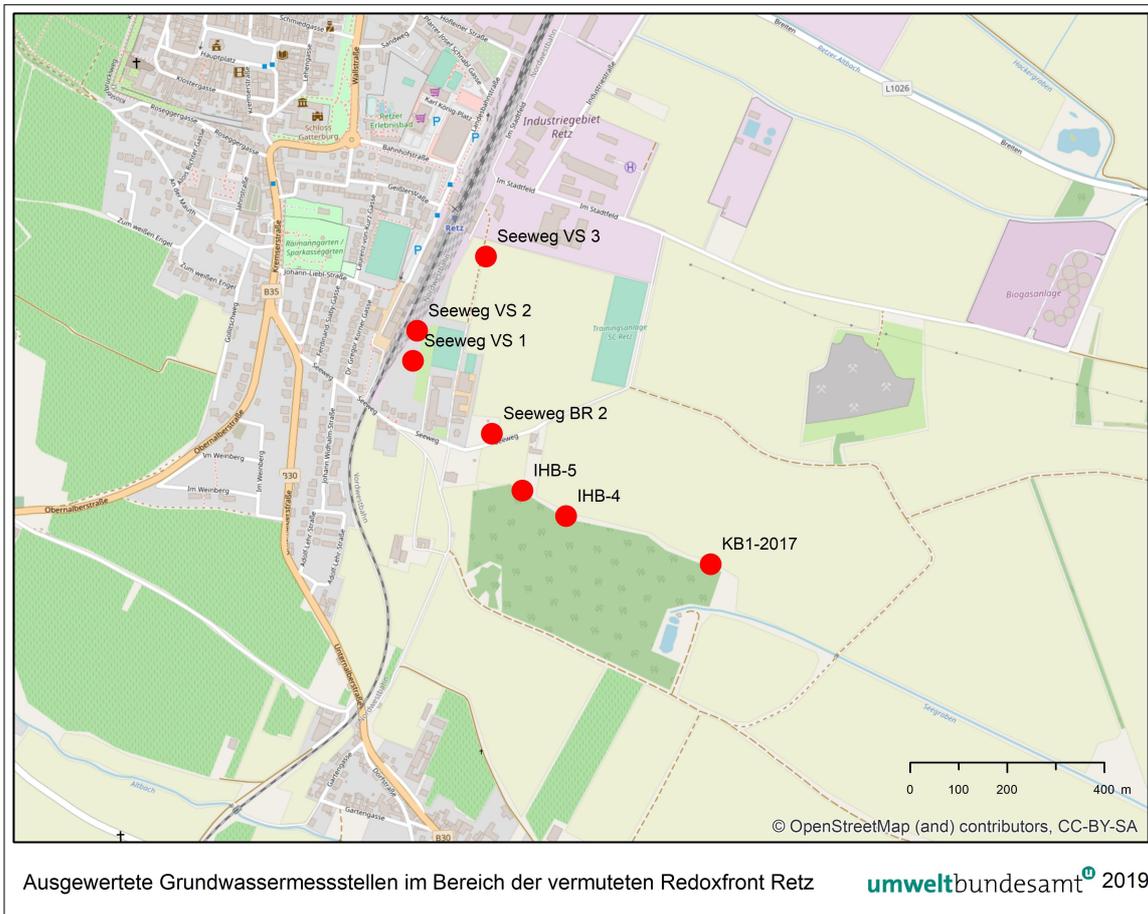


Da solche U(IV) Ausfällungen durch sehr niedrige Löslichkeiten gekennzeichnet sind, ist die Uranausfällung quantitativ. Dies ist konsistent mit der Beobachtung sehr geringer Urankonzentrationen im Abstrom der Redoxfront.



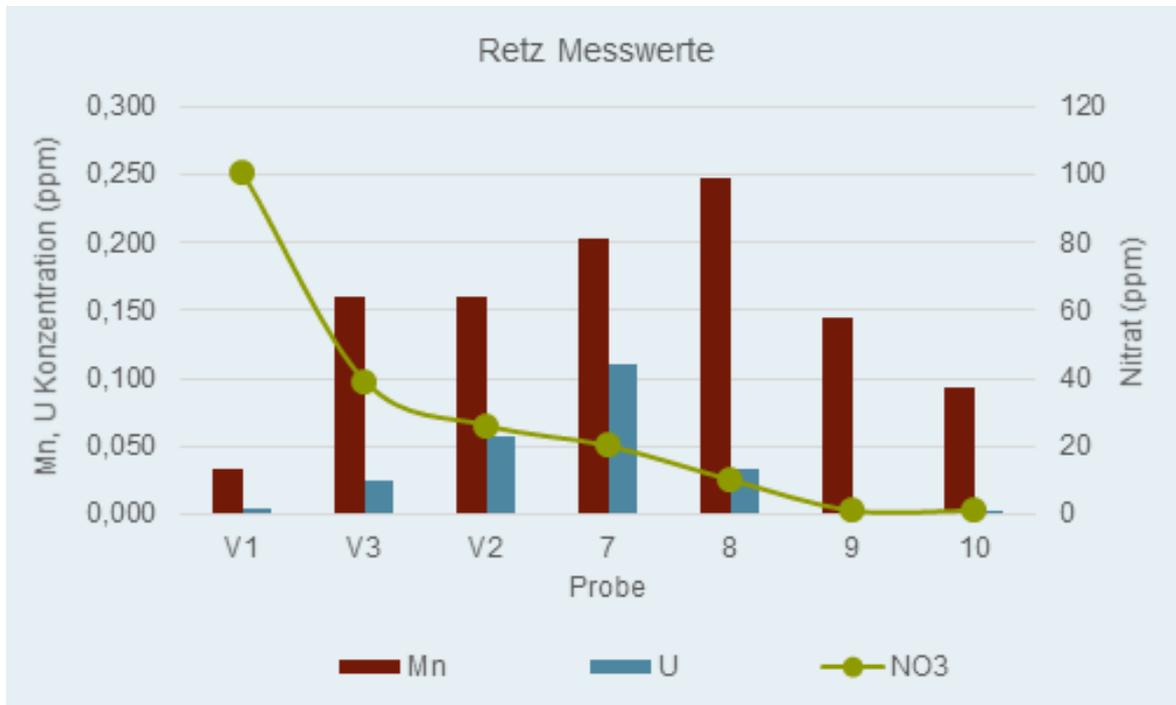
Probenahme © Franko Humer, Umweltbundesamt

Abbildung 18: Ausgewertete Grundwassermessstellen im Bereich der vermuteten Redoxfront Retz



Quelle: Umweltbundesamt

Abbildung 19: Konzentrationen von Nitrat, Uran und Mangan entlang eines Redoxgradienten, der durch abnehmende Nitratkonzentrationen und erhöhte Uran- und Mangankonzentrationen im Bereich der Redoxfront gekennzeichnet ist (Daten: Umweltbundesamt).



Quelle: Universität Wien

Tabelle 16: In Abbildung 19 berücksichtigte Grundwassermessstellen

Probe	Bezeichnung	Beschreibung
V1	Pegel 1	Vorfeldsonde 1 Seeweg
V2	Pegel 2	Vorfeldsonde 2 Seeweg
V3	Pegel 3	Vorfeldsonde 3 Seeweg
7	Brunnen 2	WVA Seeweg - Stadtgemeinde Retz
8	IHB-5	Sonde neu, Kernbohrung
9	IHB-4	Sonde neu
10	KB1-2017	artesisch

Quelle: Universität Wien

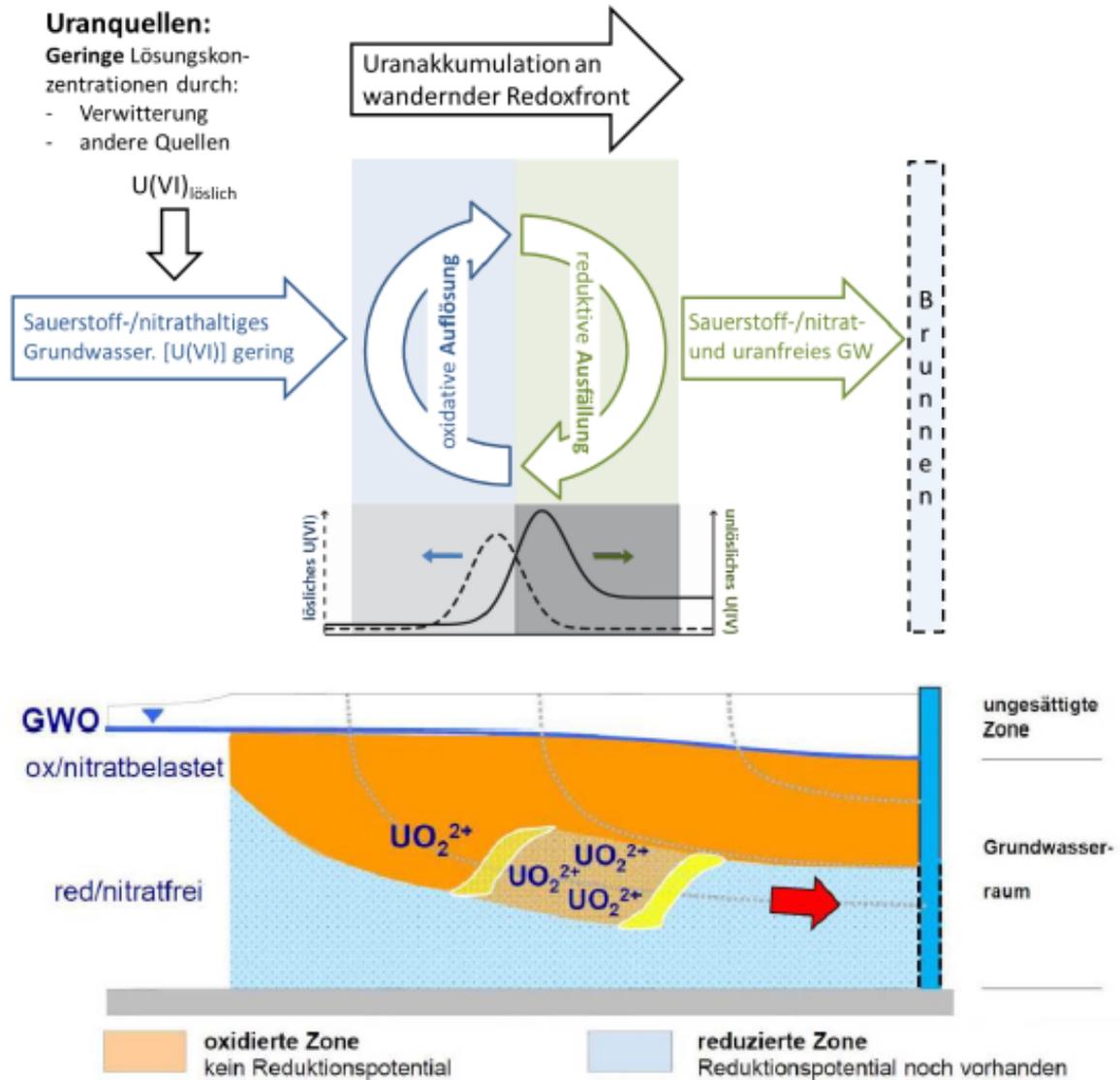
4.2.4.1.2 Forschungsansatz

Basierend auf der Analyse der Verhältnisse am Standort Retz wird die Hypothese getestet, ob sich im Bereich der Wassergewinnungsanlage eine Redoxfront entwickelt hat, die zu einem Uran-Redoxkreislauf führt. Hier wird Uran auf der Seite mit niedrigem Redoxpotential gefällt und auf der Seite mit höherem Redoxpotential mobilisiert (Abbildung 20). Diese Mobilisierung kann zu den beobachteten lokal erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser führen. Um diese Hypothese zu testen, werden wichtige Prozesse an Redoxfronten in Sedimenten aus dem Umfeld der Wassergewinnungsanlage Retz und im Seewinkel experimentell untersucht. Daraus werden allgemeine Schlussfolgerungen für Urananreicherungsprozesse in Porengrundwasserleitern gezogen. Hierfür wurden zunächst Proben anoxisch aus Bohrungen bei Retz (IHB-5, KB1-2017) gewonnen. Sedimentmaterial wurde charakterisiert. Batch-Versuche und Säulenexperimente wurden durchgeführt und durch ein Reaktionsflussmodell interpretiert.



Probenahme © Franko Humer, Umweltbundesamt

Abbildung 20: Vermutete geochemische Verhältnisse im Bereich der Wasserfassung Retz



Quelle: Universität Wien

4.2.4.2 Sedimentcharakterisierung und Batch-Experimente

4.2.4.2.1 Sedimentcharakterisierung

Der pH-Wert der Sedimente von 7,0 wurde in 10 mM $CaCl_2$ gemessen und stimmt mit dem vor Ort gemessenen pH-Wert des Grundwassers ungefähr überein. Aus CHNS Messungen wurde ein organischer Kohlenstoffgehalt von 11,47 ppm und ein $CaCO_3$ -Gehalt von 9,56 ppm und ein ebenfalls geringer Schwefelgehalt bestimmt (Tabelle 17).

Tabelle 17: CHNS-Analyse der Retzer Sedimente

Probe	N (ppm)	C (ppm)	S (ppm)	H (ppm)
Retz-10	4,4	32,6	29,1	1,4

Quelle: Universität Wien

Messungen durch Röntgenfluoreszenz weisen außerdem auf Eisen und geringe Mangankonzentrationen in der Festphase hin.

Tabelle 18: Röntgenfluoreszenzanalyse der Retzer Sedimente (Gehalte in %)

Probe	Retz-10
SiO ₂	72
TiO ₂	0,5
Al ₂ O ₃	12
Fe ₂ O ₃	2,1
MnO	0,023
MgO	1,2
CaO	3,4
Na ₂ O	1,8
K ₂ O	3
P ₂ O ₅	0,12
H ₂ O	1,98
Summe	98,123
F	0,11
SO ₃	2,1
Cl	0,017
Gesamt	100,35

Quelle: Universität Wien

4.2.4.2.2 Batch-Experimente

In Batch-Experimenten wurden folgende Fragen untersucht:

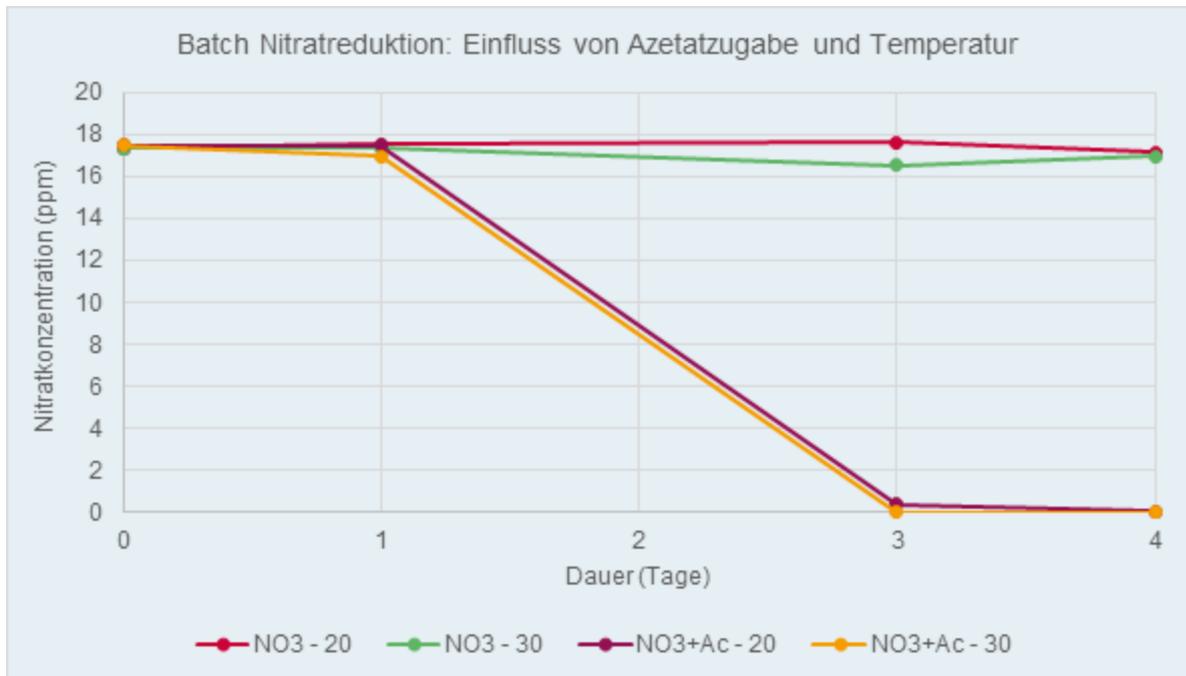
Liegen in den bei Retz gewonnenen Aquifersedimenten aus dem Abstrom der Redoxfront Retz mikrobielle Gemeinschaften vor, die Nitratreduktion katalysieren?

Liegen in den Aquifersedimenten mikrobielle Gemeinschaften vor, die die reduktive Uranfällung katalysieren können?

Mikrobielle Nitratreduktion

Mikrobielle Nitratreduktion ist ein Prozess, der mit der Uranoxidation gekoppelt zur Mobilisierung von Uran führen kann. Daher wurde zunächst geklärt, ob die in den Sedimenten (Retz) vorhandenen mikrobiellen Gemeinschaften zur Nitratreduktion in der Lage sind und mit welchen Elektronendonoren diese Reaktion gekoppelt werden kann. Es wurden Azetat und Glukose als Elektronendonoren getestet. Abbildung 21 zeigt die Lösungskonzentrationen von Nitrat als Funktion der Zeit in anoxischen Batch-Experimenten in Abwesenheit oder Gegenwart von Azetat und bei zwei verschiedenen Temperaturen. Nitratreduktion in Gegenwart von Azetat bei geringer Temperaturabhängigkeit wurde beobachtet. Die Kontrollexperimente (ohne Azetat) zeigten innerhalb des Beobachtungszeitraumes nur geringe Nitratreduktion.

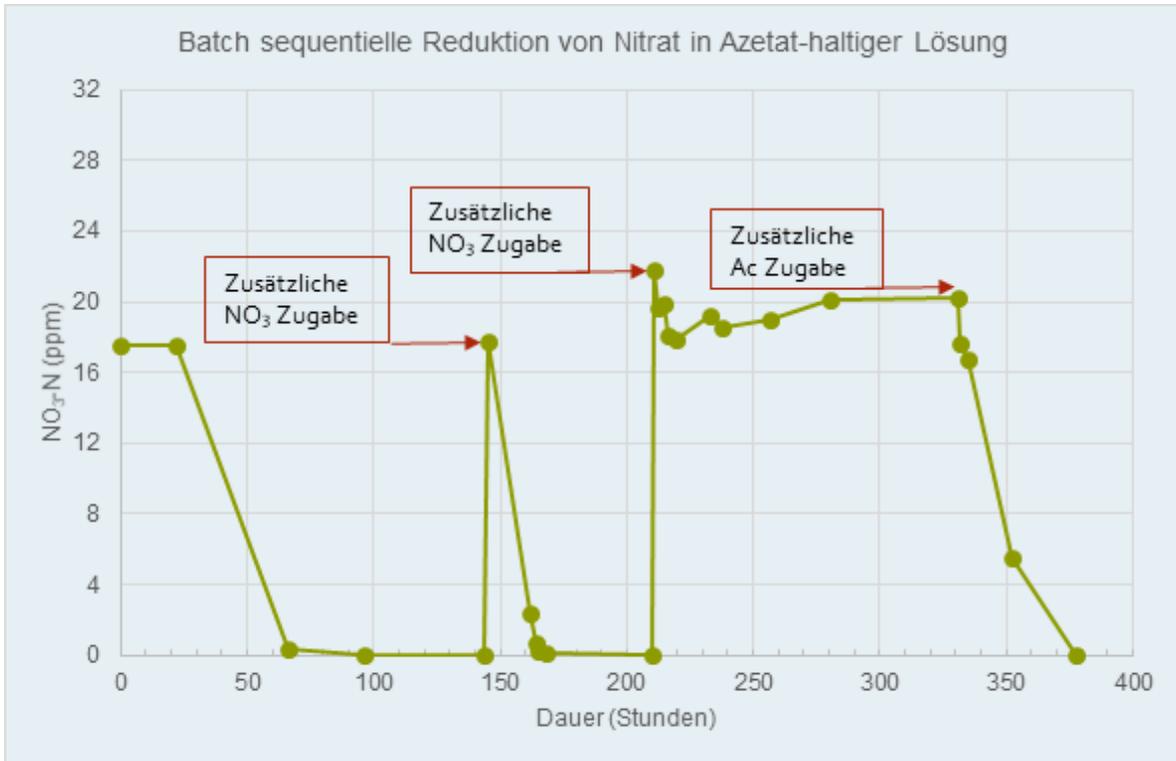
Abbildung 21: Nitratreduktion in Gegenwart von 1,8 mM Azetat bei 20 und 30 Grad Celsius. Kontrollexperimente (-Azetat) zeigen nur geringe Nitratreduktion.



Quelle: Universität Wien

Weitere Batch-Experimente zur Beobachtung von Reduktionsraten und Lag-Phasen (Abbildung 22) wurden durchgeführt. Zunächst wurde gleichzeitig Nitrat und Azetat zugegeben. Nach einer mindestens einen Tag dauernden Lag-Phase setzte die Nitratreduktion bis zur quantitativen Reduktion des Nitrats ein. Bei einer zweiten Zugabe gleicher Nitratkonzentration setzte die Nitratreduktion erwartungsgemäß ohne Lag-Phase sofort ein, und das Nitrat wurde innerhalb von 24 Stunden quantitativ aufgebraucht. Eine dritte Zugabe von Nitrat wurde nur partiell reduziert. Um zu testen, ob die zugegebene Azetatkonzentration die Nitratreduktion limitierte, wurde nach 331 h zusätzlich 1,8 mM Azetat zugegeben. Tatsächlich wurde daraufhin das Nitrat quantitativ reduziert. Die Experimente belegen, dass mikrobielle Nitratreduktion in den Aquifersedimenten stattfinden kann, dass die Reaktionsraten aber ohne Zugabe eines Elektronendonors sehr langsam sind. Daher wurden zur Beschleunigung der Reaktionsraten in allen späteren Experimenten ein Elektronendonator zugegeben.

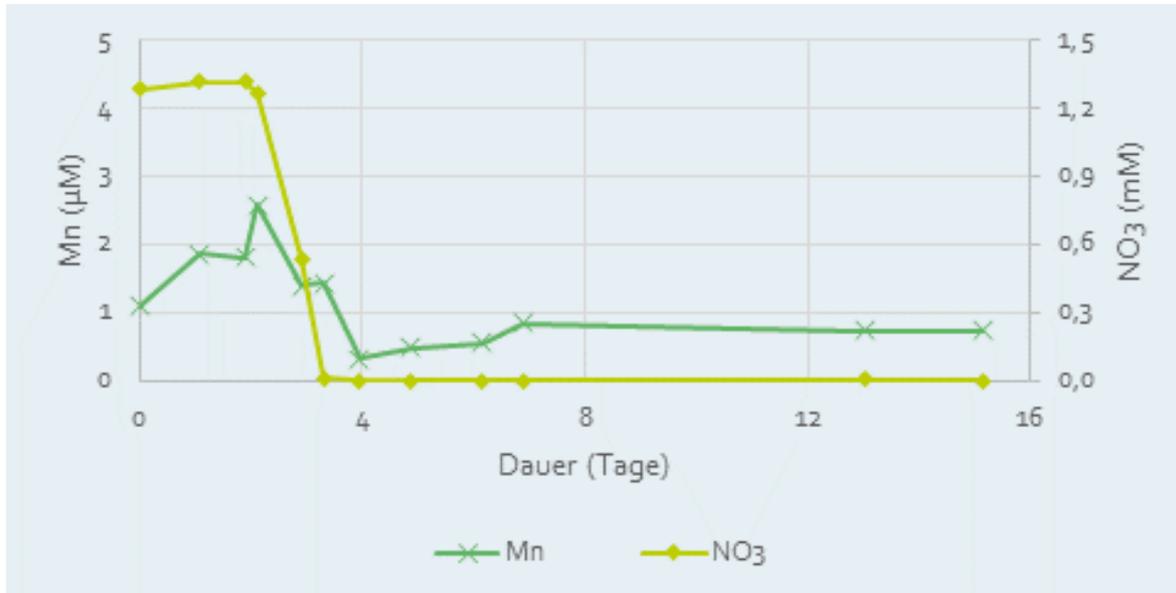
Abbildung 22: Nitratreduktion in Gegenwart von Azetat. Zunächst gleichzeitige Zugabe von Azetat und Nitrat. Es folgten zwei weitere Zugaben von Nitrat. Nach 210 Stunden folgte eine weitere Zugabe von Azetat.



Quelle: Universität Wien

Neben Azetat wurde auch Glukose als Elektronendonator für die Nitratreduktion getestet. Das Experiment zeigt, dass Glukose ebenfalls ein geeigneter Elektronendonator zur Nitratreduktion ist (Abbildung 23). Die gleichzeitig beobachtete Manganmobilisierung während der Nitratreduktionsphase entspricht ungefähr den gelösten Mangankonzentrationen in der beobachteten Redoxfront bei Retz.

Abbildung 23: Nitratreduktion nach Glukosezugabe im Batchexperiment

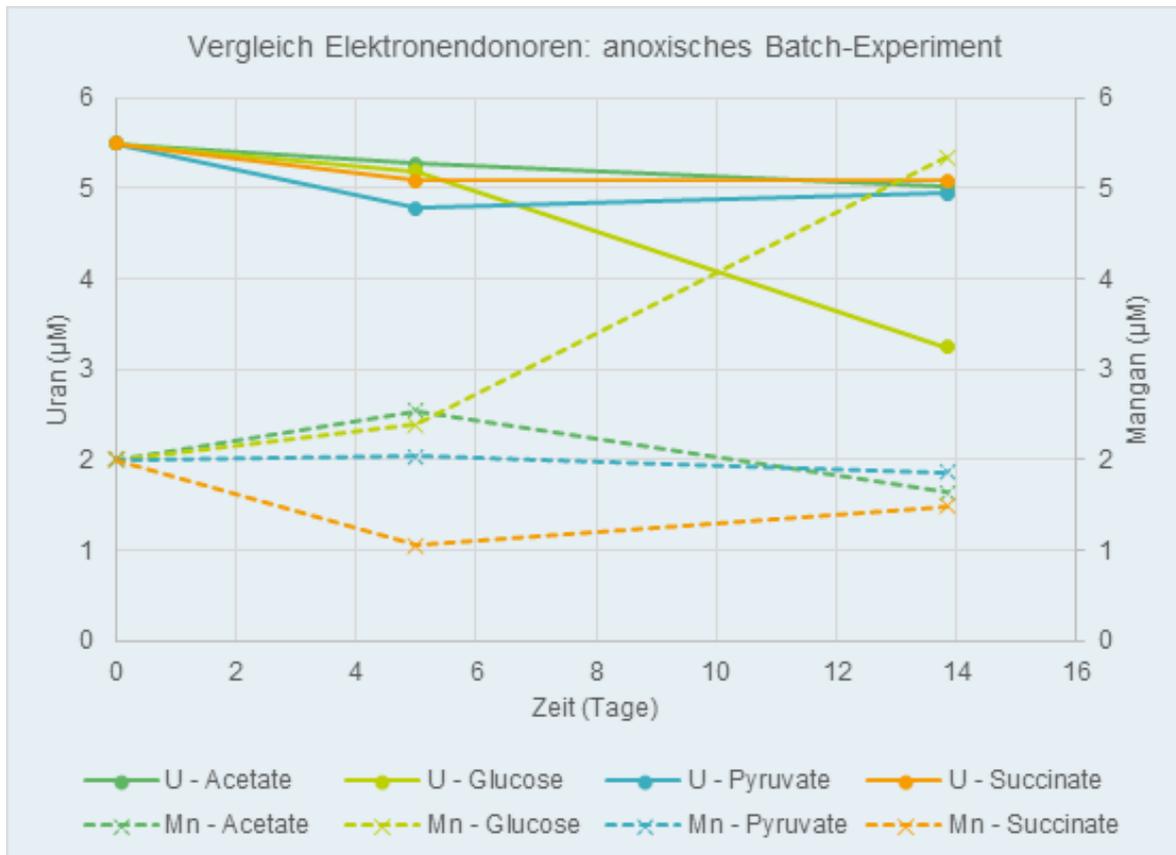


Quelle: Universität Wien

Mikrobielle Uranreduktion

Die mikrobielle Uranreduktion (Lovley et al., 1991) ist ein zentraler Prozess bei der lokalen Anreicherung von Uran an einer Redoxfront. Dieser Prozess führt zur Ausfällung vierwertigen Urans (vide supra). Daher wurden eine Reihe von organischen Substanzen getestet, die als potentielle Elektronendonoren bei der mikrobiellen Uranreduktion bekannt sind, und zwar Azetat, Glukose, Succinat und Pyruvat. So wurden zu anoxischen Sedimentsuspensionen in synthetischem Grundwasser (AGW) 5 μM Uran und jeweils 1,8 mM der Elektronendonoren zugegeben, Uran- und Mangankonzentrationen wurden über mehrere Tage gemessen. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in der Effizienz der Uranreduktion. Langsame Uranreduktion wurde in Gegenwart von Azetat, Succinat und Pyruvat beobachtet. Schnellere Uranreduktion bei gleichzeitiger reduktiver Manganmobilisierung wurde in Gegenwart von Glukose beobachtet (Abbildung 24).

Abbildung 24: Mikrobielle Uranreduktion und reduktive Manganmobilisierung in Gegenwart verschiedener potentieller Elektronendonoren in Batch-Experimenten.



Quelle: Universität Wien

In den mit Glukose versetzten Proben wurde dunkle Farbe und ein deutlicher Sulfidgeruch beobachtet, die auf mikrobielle Sulfatreduktion und die mögliche Bildung von Eisensulfiden (z.B. Mackinawit) hinwiesen.

4.2.4.3 Reduktion und Reoxidation von Uran in Säulenexperimenten

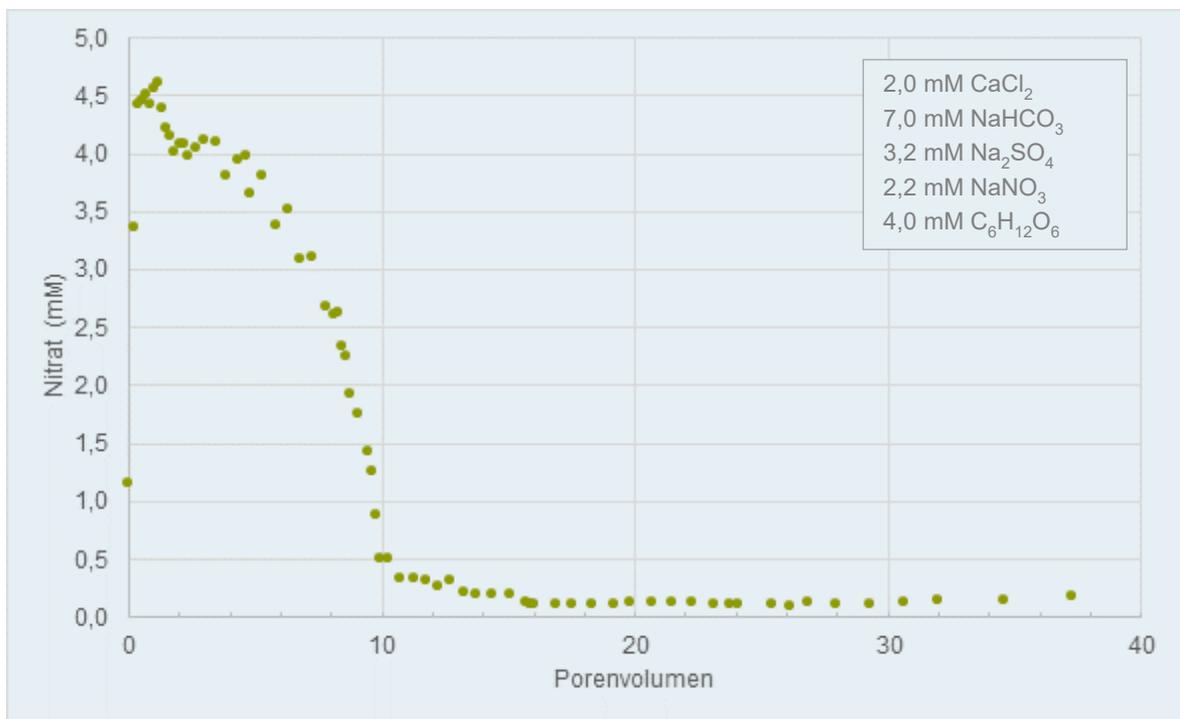
Nachdem die mikrobiell katalysierten Kernprozesse der Anreicherung von Uran an einer Redoxfront im Sinne einer „roll-front“ in Batch-Experimenten nachgewiesen werden konnten, wurden dieselben Prozesse entlang des Fließpfades in Säulenexperimenten untersucht.

4.2.4.3.1 Nitratreduktion und reduktive Uranausfällung auf der Fließstrecke

Zunächst wurde die Nitratreduktion mit Glukose als Elektronendonator untersucht. Die einfließenden Lösungen wurden je nach Fragestellung innerhalb der Säulenexperimente

sequentiell variiert (siehe Tabelle 5, Phase 1). Die Säulenexperimente wurden auch mit erhöhter Durchflussrate untersucht (nicht abgebildet, Daten im Anhang). Zunächst wurde ein Durchbruch von Nitrat mit geringer Retardation im Effluent der Säule beobachtet (Abbildung 25). Nach einer Lag-Phase von ca. vier Porenvolumen setzt Nitratreduktion ein, die nach 15 Porenvolumen die Nitratkonzentration im Effluent auf unter 0,2 mM reduziert.

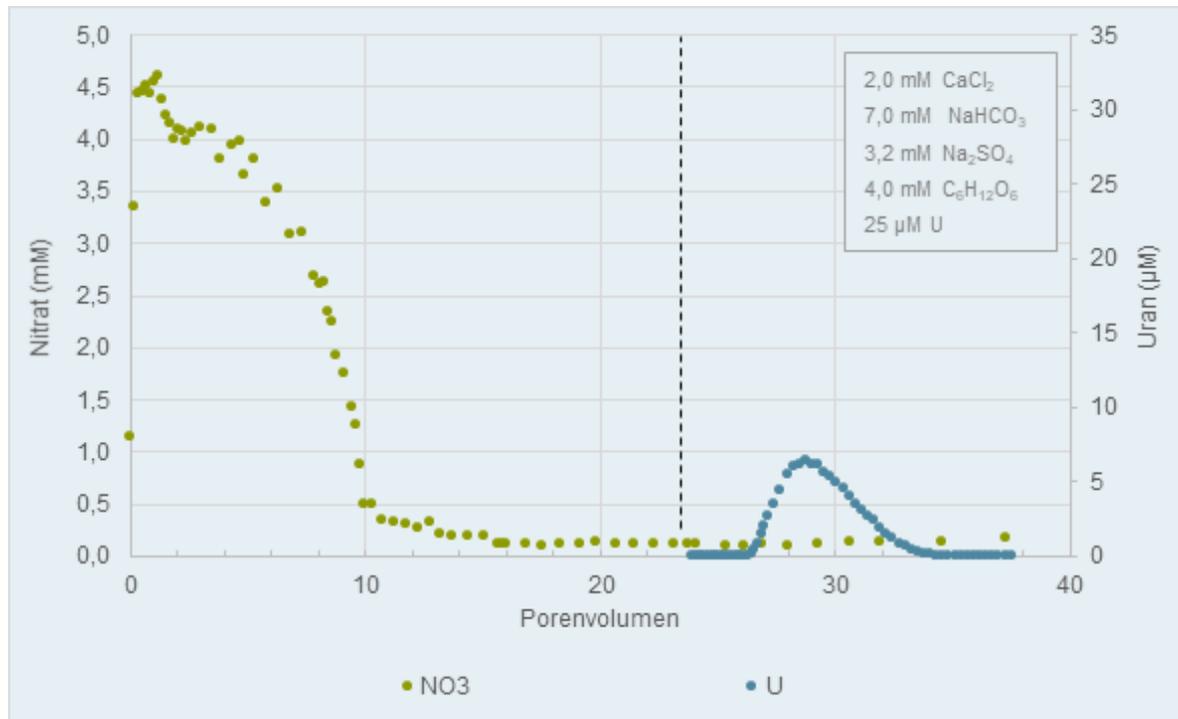
Abbildung 25: Nitratreduktion in Gegenwart von Glukose im Säulenexperiment (Phase 1, Tabelle 5). Die Nitratkonzentrationen werden als Funktion des Wasservolumens gezeigt, welches die Säule bereits durchströmt hat, normalisiert auf das gesamte Porenvolumen (18 ml).



Quelle: Universität Wien

Im selben Säulenexperiment wurde der einfließenden Lösung bei 24 PV 25 μM Uran(VI) zugesetzt (Influentlösung: siehe Tabelle 5, Phase 2). Abbildung 26 zeigt einen retardierten Durchbruch des Urans bei ca. 26 PV. Allerdings kommt es nicht zu einem vollständigen Durchbruch, da bei ca. 29 PV bereits eine maximale Urankonzentration von 6 μM erreicht wird, die danach wieder abnimmt und bei ca. 35 PV auf unter 0,1 μM sinkt. Diese Abnahme der Urankonzentration im Effluent bei konstanter Uran(VI)-Konzentration im Influent von 25 μM weist auf mikrobielle Uranreduktion hin, wie bereits in Batch-Experimenten beobachtet.

Abbildung 26: Uran(VI)-Durchbruch und anschließende reduktive Uran(IV)-Fällung im Säulenexperiment (Phase 2, Tabelle 5). Im Influent wurde ab 24 PV μM Uran(VI) zugegeben.



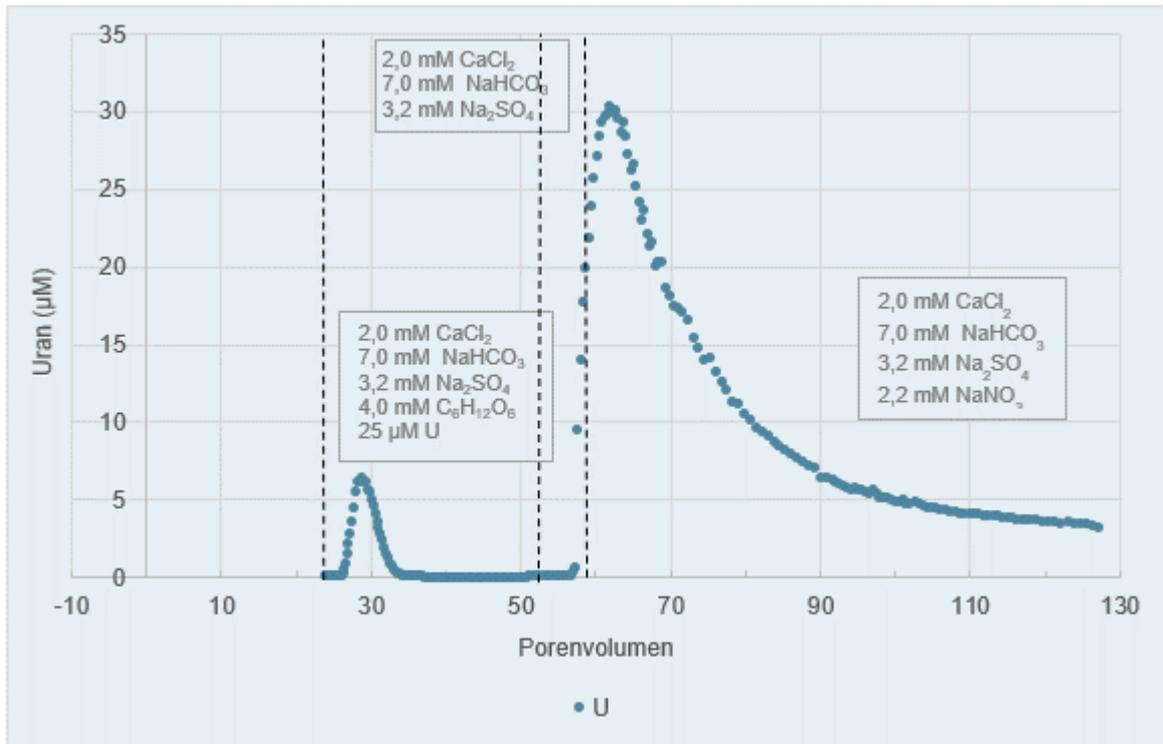
Quelle: Universität Wien

4.2.4.3.2 Oxidative Uranremobilisierung mit Nitratreduktion oder Sauerstoff als Elektronenakzeptor

Nachdem Uran bis 48 PV in der Säule durch reduktive Ausfällung akkumulierte, wurde die Säule mit ca. 7 PV Uran-, Glukose- und Nitrat-freier anoxischer Lösung durchströmt. Bei 55 PV wurde die einströmende Lösung mit 2,2 mM Nitrat versetzt. Nach kurzer Verzögerungsphase löste die Nitratzugabe ab 57 PV einen starken Anstieg der gelösten Urankonzentration im Effluent aus, mit Maximalkonzentrationen von $30 \mu\text{M}$ (Abbildung 27). In einer Säule mit erhöhten Durchflussraten kam es zu noch höheren Urankonzentrationen von $44 \mu\text{M}$ im Effluent (Daten im Anhang).

Offensichtlich wurde das in der Phase 2 des Säulenexperiments reduktiv gefällte Uran durch Nitrat als Elektronenakzeptor reoxidiert und somit mobilisiert. Durch die Mobilisierung an der Redoxfront kommt es zu einer lokalen und zeitlich begrenzten Aufkonzentration des Urans in der Lösungsphase, ähnlich der Vorgänge an einer „roll-front“ und ausgelöst durch die gleichen Prozesse.

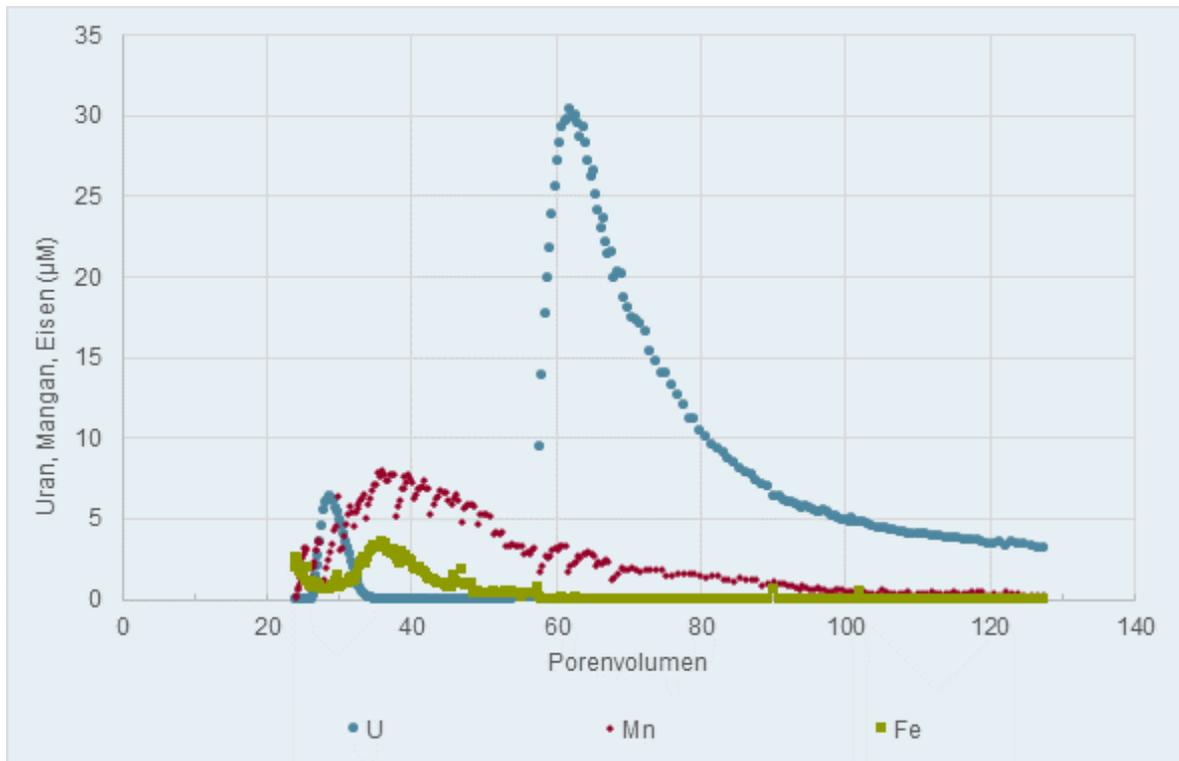
Abbildung 27: Oxidative Uran-Remobilisierung und -Durchbruch nach Zugabe von Nitrat im Zufluss (Phase 4, Tabelle 5).



Quelle: Universität Wien

Mangan und Eisen sind redoxaktive Elemente, die ebenfalls von Prozessen an den Redoxfronten in der Säule erfasst werden. Die Konzentrationen von Mangan und Eisen steigen nach einsetzender Uranreduktion (Abbildung 28). Diese Beobachtungen zeigen Mangan- und Eisenreduktion an. Obwohl wesentlich mehr Eisen als Mangan in den Festphasen der Säule vorliegen, steigt die Mangan(II)-Konzentration deutlicher und anhaltender als die Eisen(II)-Konzentration. Diese Beobachtung ist konsistent mit der Beobachtung von Sulfatreduktion unter reduzierenden Verhältnissen in Batch-Experimenten. Die Reduktion von Sulfat zu Sulfid führt zur Ausfällung von Eisensulfiden, die die Löslichkeit des zweiwertigen Eisens begrenzt.

Abbildung 28: Mangan- und Eisenreduktion werden durch erhöhte Mangan(II)- und Eisen(II)-Konzentrationen angezeigt.



Quelle: Universität Wien

Die Reoxidation von Uran(IV) durch gelösten Sauerstoff wurde ebenfalls im Säulenexperiment getestet. Das Säulenexperiment wurde analog der oben beschriebenen Experimente durchgeführt, allerdings wurde in Phase 4 kein Nitrat zugegeben, sondern die einfließende (nitratfreie) Lösung belüftet und so mit Luftsauerstoff ins Gleichgewicht gebracht. Allerdings wurde in der gesamten Dauer des Experiments (230 PV) keine oxidative Mobilisierung des Urans beobachtet. Es bleibt zu vermuten, dass die starke Redoxpufferung durch die Ausfällung von Eisensulfidphasen und die Reaktivität des Sauerstoffs gegenüber diesen Phasen zu einer Inhibition der Uranoxidation über die Zeitskalen der Säulenexperimente führte.

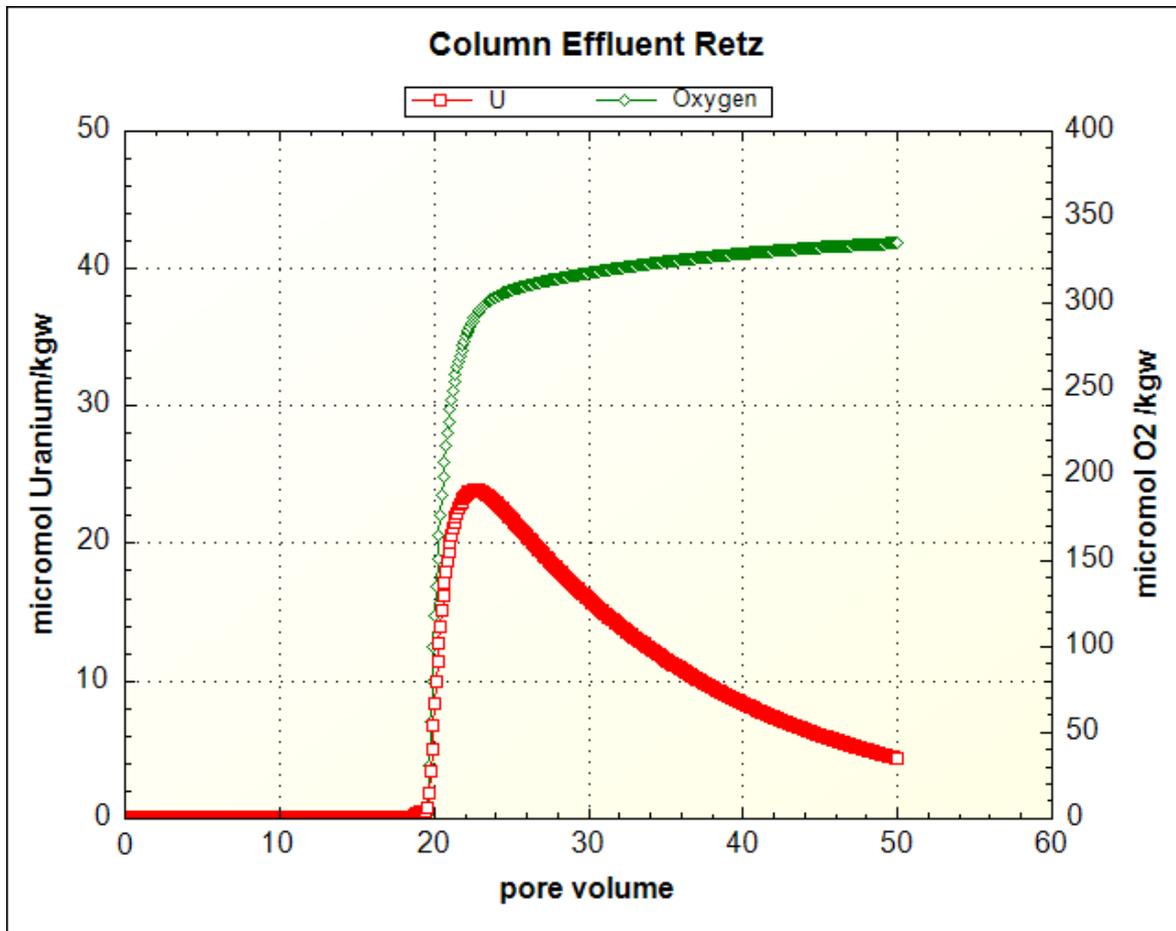
4.2.4.4 Modellierung der reduktiven Uranausfällung und oxidativen Remobilisierung in porösen Medien

4.2.4.4.1 Das reaktive Transportmodell

Ein reaktives Transportmodell wurde auf Basis des geochemischen Speziationsmodells PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 2013) entwickelt, dem publizierte thermodynamische Konstanten und kinetische Parameter zugrunde liegen. Hierbei wurde die oxidative Mobilisierung des Urans durch Sauerstoff modelliert. Dabei wurden alle berücksichtigten homogenen und heterogenen Reaktionen durch thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen behandelt, mit Ausnahme der Uran(IV)-Oxidation. Hier wurden Geschwindigkeitsgesetze (De Pablo et al., 1999) für die Auflösung von biogenem Uran(IV)O₂ parametrisiert (Ulrich et al., 2008). Es wurde weiterhin angenommen, dass es nach Sulfatreduktion zur Ausfällung von Eisensulfiden gekommen ist, die auf dem Fließweg vorliegen. Die Eisensulfidausfällungen wurden im Modell auf 0,012 Gew.% Pyrit abgeschätzt. Allerdings liegen keine gesicherten Daten zur Feststoffkonzentration und Spezierung des Sulfides vor. Unter den gegebenen Annahmen wird die Retardation der Uranmobilisierung und des Sauerstoffdurchbruchs im Wesentlichen von der Sulfidkonzentration im Feststoff bestimmt. Es wird deutlich, dass die oxidative Uranfreisetzung zu erhöhter Urankonzentration im Porenwasser führt, wie in den Säulenexperimenten beobachtet.

Analoge Modellrechnungen unter Einbeziehung der Reaktionskinetik der Uran(IV)-Oxidation gekoppelt mit dissimilatorischer Nitratreduktion sind gegenwärtig nicht möglich, da entsprechende Geschwindigkeitsgesetze bisher noch nicht publiziert wurden. Allerdings wurde die nitratgekoppelte oxidative Uranmobilisierung in langsam fließenden Grundwässern mit thermodynamischen Modellberechnungen erfolgreich modelliert (van Berk & Fu, 2017).

Abbildung 29: Die Festlegung von Uran in der Festphase und die anschließende oxidative Mobilisierung in der Modellrechnung.



Quelle: Universität Wien

4.2.4.5 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungen belegen klar, dass in den Aquifersedimenten im Abstrom der Wasserversorgungsanlage Retz mikrobielle Gemeinschaften vorliegen, die Kernprozesse der Anreicherung von Uran in der Festphase (Boyanov et al., 2011) und im Grundwasser an einer Redoxfront im Sinne einer „roll-front“ katalysieren (Plant et al., 1999). Diese Prozesse, die zu erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser führen, sind in der Literatur gut beschrieben (Moon et al., 2007; Bargar et al., 2013). Als Oxidationsmittel, das zur oxidativen Mobilisierung hoher Urankonzentrationen an Redoxfronten im Grundwasser führt, spielt Nitrat eine entscheidende Rolle (van Berk & Fu, 2017). So konnten in einer Untersuchung über urankontaminierte Aquifere in den USA eine Korrelation zwischen erhöhten Urankonzentrationen und Nitratkonzentrationen festgestellt werden (Nolan & Weber, 2015). Dies wurde auch in Säulenexperimenten gezeigt, bei denen Sauerstoff eher mit anderen

reduzierten Phasen (z.B. Eisensulfide) reagierte, während die dissimilatorische Nitratreduktion eher mit der Uranoxidation gekoppelt ist (Moon et al., 2007). Somit bestätigt die vorliegende Untersuchung den Stand des Wissens zur lokalen Urananreicherung an Redoxfronten im Grundwasser. Zusammengenommen mit den Beobachtungen von Urananreicherungen im Grundwasser bei gleichzeitiger Abnahme der Nitratkonzentration und Mobilisierung anderer redoxaktiver Elemente an einer Redoxfront, kann gefolgert werden, dass „roll-front“ Prozesse mit Nitrat als wesentlichem Oxidationsmittel für die erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser im Bereich der Wasserversorgungsanlage Retz verantwortlich sind.

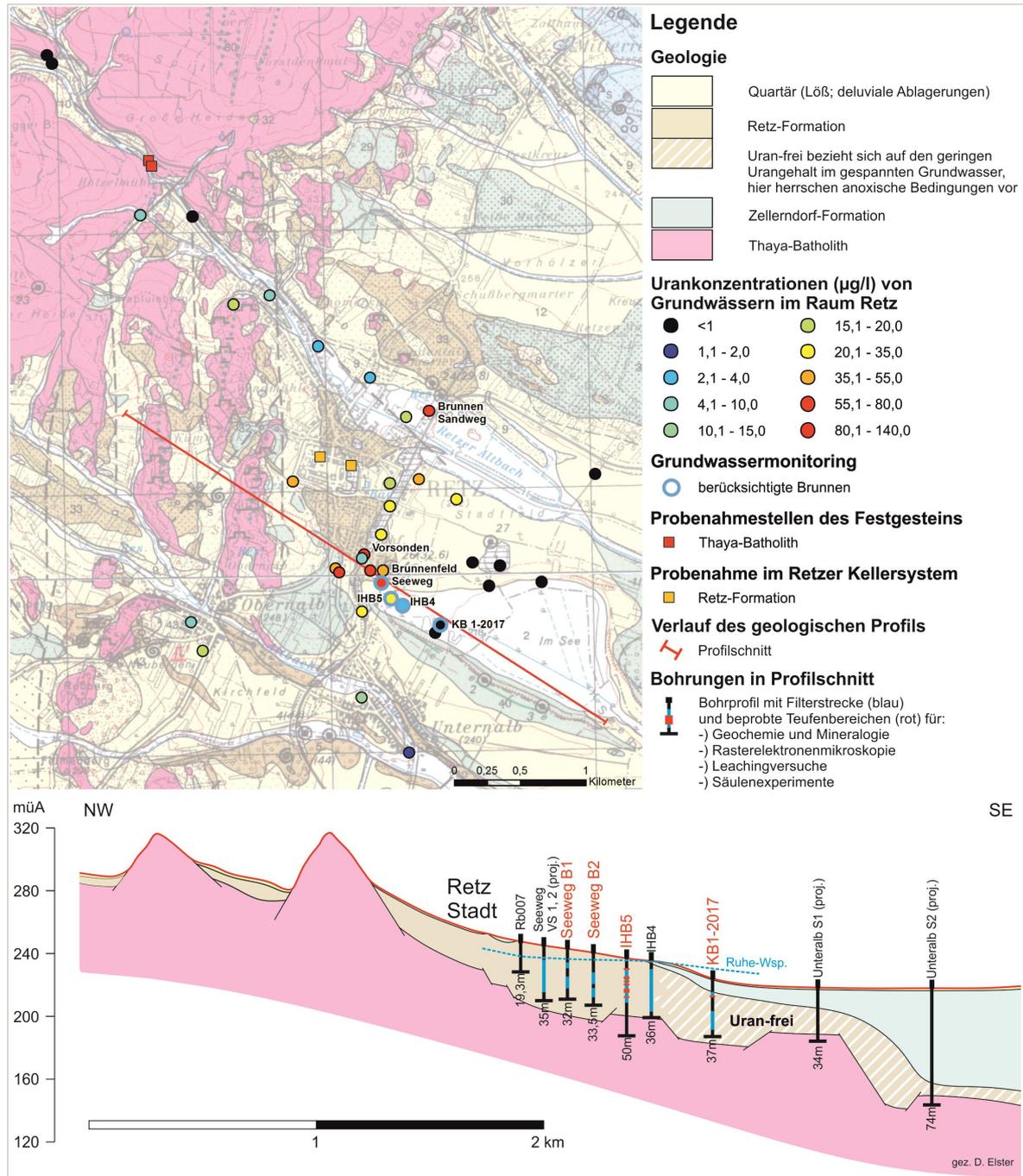
4.2.5 Fazit

Alle untersuchten Brunnen bzw. Grundwassermessstellen erschroten Wässer aus den Retzer Sanden. Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings zeigten einen klaren Gradienten in den Urangelhalten der untersuchten Messstellen entlang des in Abbildung 30 ersichtlichen NW–SE gerichteten Profilschnittes, der auf wesentliche kleinräumig ausgeprägte hydrochemische Unterschiede schließen lässt. Die Urankonzentrationen im Rohwasser des Brunnen 2 des Wasserwerkes Retz lagen mit bis zu 120 µg/l weit über dem Parameterwert der Trinkwasserverordnung von 15 µg/l. Die Gehalte der Richtung SE nächstgelegenen Messstelle IHB-5 betragen bis zu 100 µg Uran/l. Für die nächstgelegene IHB-4 waren nur noch Urankonzentrationen bis zu 6,5 µg/l zu verzeichnen. Bei KB1-2017 schließlich, die artesisch gespanntes Grundwasser führt, wurden stets Urankonzentrationen < 1 µg/l detektiert.

Die Urangelhalte in der Gesamtphase und in der gelösten Phase zeigten keine signifikanten Unterschiede, d.h. dass Uran nahezu vollständig gelöst im Grundwasser vorliegt. Die gemessenen Urankonzentrationen zeigten keine nennenswerten jahreszeitlichen Schwankungen. Direkte Korrelationen von Uran mit weiteren Inhaltsstoffen wie Haupt- und Nebenelementen inklusive Phosphat, Nitrat, TOC und DOC konnten nicht festgestellt werden.

Im Kristallin des Thaya Batholiths wurden zusätzlich Wässer von Quellaustritten ohne Weinbau im Einzugsgebiet untersucht. Deren Urankonzentrationen waren sehr gering bzw. lagen maximal bei 0,4 µg/l. Auch der Retzer Granit selbst weist niedrige Urangelhalte von rund 1,5 ppm auf, hierbei ist das Uran an die akzessorischen Minerale Zirkon und Monazit, aber auch an Uraninite gebunden. Somit ist eine leichtere Mobilisierung des vorhandenen Urans prinzipiell nicht auszuschließen.

Abbildung 30: Überblick zu den Untersuchungen im Raum Retz



Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die Modellierung der Urankomplexe zeigt, dass abhängig vom pH-Wert die Uranylcarbonatkomplexe $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ und $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ dominieren. Weitere mögliche Komplexbildner wie beispielsweise Sulfat sind nach der Modellierung zu vernachlässigen. Zudem sind die Grundwässer bis auf eine Ausnahme, nicht an Uraninit übersättigt. Gänzlich frei von Uran sind jene Brunnen die östlich von Retz im Bereich „im Stadtfeld“ gelegen sind.

Bei diesen deutlich älteren Wässern – nicht korrigierte Kohlenstoff-14-Alter von bis zu 11.740 Jahren – herrschen reduzierende Bedingungen und Uran liegt dementsprechend unlöslich als Uran(IV) vor. In der Übergangszone von oxidierenden zu reduzierenden Bedingungen bzw. zwischen den Förderbohrungen vom Seeweg und den Brunnen und Pegel des Bereichs „im Stadtfeld“ befinden sich die Bohrungen IHB-4 und IHB-5. Bei beiden wurde Uran nachgewiesen, der uranfreie Bereich ist knapp östlich von IHB-4 zu erwarten.

Die Ergebnisse der Geochemie, der sequentiellen Extraktionsversuche und der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen von den Horizonten der Bohrung IHB-5 und des Retzer Kellersystems zeigen auf, dass Uran in den Sedimentschichten unterschiedlich akkumuliert vorliegen muss. Ebenfalls sind erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Mobilisierbarkeit und die Bindung an Minerale offensichtlich. So sind die Retzer Sande, untersucht im Retzer Kellersystem, durch einen geringen Urangehalt (< 1 ppm) und eine Bindung des Urans an schwer lösliche akzessorische Minerale zu charakterisieren. Hierbei handelt es sich bevorzugt um Zirkon und Monazit. Bei dem Horizont 7,00 bis 7,50 m (Retz-Formation) der Bohrung IHB-5 sind die Ergebnisse mit den Sanden des Kellersystems vergleichbar. Es ist jedoch anzumerken, dass in diesem Horizont ein oxidierendes Milieu vorherrschen dürfte. Ein differenziertes Bild zeigt sich in den tieferen untersuchten Horizonten der Bohrung IHB-5 (12,25 bis 25,50 m). Hier wurden reduzierende Bedingungen und deutlich höhere Urankonzentrationen zwischen 6,8 und 8,3 ppm festgestellt.

Mithilfe der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen (EDX) wurde nachgewiesen, dass Uran nur in einem geringen Ausmaß, höchstens ca. 20 %, an akzessorische Minerale (Zirkon, Monazit und Xenotim) gebunden sein kann. Auch bei dem fünfstufigen sequentiellen Extraktionsverfahren nach Percival (1990) wurde bestätigt, dass Uran nur bedingt in schwer löslichen Akzessorien vorliegt. Stattdessen wurde der überwiegende Anteil in den ersten Phasen gelöst. Das bedeutet hinsichtlich der Bindungsformen der erfassten Uranphasen, dass das Uran an adsorbierte Phasen (Bindung an Korngrenzen), amorphe Fe-Oxid-Hydroxide, organische Phasen oder Uraninit gebunden sein dürfte. Es sei jedoch angemerkt, dass Uraninit bei den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen nicht nachgewiesen wurde. Somit wäre nur eine sehr feine Verteilung argumentierbar, die nicht detektierbar ist. Für eine sehr feine Verteilung spricht, dass Uran in der Feinstfraktion (< 0,063 mm) mit 12,2 bis 16,2 ppm erheblich angereichert vorliegt.

Säulen- und Batchexperimente zeigen klar, dass die Retzer Sedimente mikrobielle Gemeinschaften enthalten, die alle relevanten Prozesse der Anreicherung von Uran an einer Redoxfront katalysieren. Dies schließt die reduktive Ausfällung von Uran an der Redoxfront ein, (die zu einer Anreicherung von Uran in Sedimenten führt) und die oxidative Remobilisierung, die zu einer Anreicherung von Uran im Grundwasser führt. Die Experimente

haben gezeigt, dass die Uranoxidation besonders effizient an die Nitratreduktion gekoppelt ist. Somit spielt Nitrat im Grundwasser eine besondere Rolle in der Ausbildung solcher lokalen Urananreicherungen.

Die Grundwässer in Retz zeigen alle Anzeichen, die bei aktivem Ablaufen dieser Prozesse erwartet werden: eine Redoxfront liegt vor mit niedrigen Urangehalten und Nitratgehalten im zuströmenden Grundwasser und uran- und nitratfreiem Grundwasser im Abstrom. Es besteht kein säkulares Gleichgewicht des Urans mit den Tochterisotopen, was weiterhin bestätigt, dass die Prozesse an der Redoxfront rezent ablaufen.

Das Uran, das in niedriger Konzentrationen im Grundwasser die Redoxfront im Bereich Retz anströmt, wird in der Redoxfront ausgefällt und remobilisiert, kann aber die Redoxfront nicht verlassen und wird somit über sehr lange Zeiträume akkumuliert (frühestens nach der tertiären Sedimentation der Zellerndorf Formation). Da die möglicherweise schon sehr lange Akkumulationszeit des Urans an der Redoxfront und die dabei vorherrschenden Grundwasserfließgeschwindigkeiten und -urangehalte nicht bekannt sind, ist eine realistische Bilanzierung des Uraneintrags aus Verwitterungslösungen im Verhältnis zu möglichen Einträgen aus der Phosphatdüngung nicht durchführbar. Unabhängig von der Frage nach den Quellen des Urans kann somit festgestellt werden, dass vorhandene Redoxfronten in Grundwasserleitern zu Verstärkungseffekten führen, die für die lokale starke Anreicherung von Uran in diesen Aquiferen verantwortlich sind.

Bei der ergänzenden Ultraspurenanalytik wurden sämtliche Metalle der Seltenen Erden im maximal zweistelligen ng/l Bereich im Grundwasser nachgewiesen. Bei Berücksichtigung eines normierten Verteilungsmusters ist auffällig, dass die schweren Seltenen Erden nur geringfügig abgereichert vorliegen. Dies ist insofern erwähnenswert, da bei den beprobten Wässern eine Signatur der oberen Kruste (Abreicherung der schweren Seltenen Erden mit negativer Ce und Eu Anomalie) zu erwarten wäre. Zudem konnten Plattengruppenelemente nicht nachgewiesen werden. Bei den weiteren Spurenelementen sind abgesehen von den hohen Urangehalten die Konzentrationen von Germanium (0,13 bis 0,62 µg/l) – hier ist die Herkunft aus kristallinen Einheiten zu erwarten (vgl. Dobrzyński, 2018) – erwähnenswert.

5 Ergebnisse der Untersuchungen an den Kristallinstandorten in Kärnten, der Steiermark und Tirol

5.1 Übersicht zur Geologie der untersuchten Gebiete sowie den Gesteinsproben, Präparaten und Gesamtgesteinsanalysen und weitere Hinweise

Geologischer Überblick Untersuchungsgebiete im Bereich des Tauernfensters

Im Tauernfenster befinden sich Untersuchungsgebiete in den Gemeinden Flattach und Mallnitz (beide Kärnten) sowie in Mayrhofen (Tirol). Das Tauernfenster nimmt einen zentralen Teil der Ostalpen ein, das vom Brenner im Westen bis zum Katschberg reicht und üblicherweise als Zillertaler Alpen und Hohe Tauern bezeichnet wird. Vom geologischen Gesichtspunkt aus handelt es sich um ein tektonisches Fenster, in dem tiefere Einheiten, umrahmt von höheren ostalpinen Einheiten, an die Erdoberfläche herausgehoben wurden. Intern werden im Tauernfenster zwei Haupteinheiten unterschieden: Subpenninikum und Penninikum.

Das Subpenninikum bildet einen alten Krustenteil mit einer vielfältigen Gesteinsassoziation und dem Charakteristikum, dass im Zuge der Variszischen Gebirgsbildung im Jungpaläozoikum bevorzugt granitische Schmelzen in großen Ausmaß intrudiert sind. Auch erfolgte im Zuge dieser Gebirgsbildung eine metamorphe Überprägung dieser Gesteine, die heute meist als Paragneise, Amphibolite, Orthogneise, Migmatite oder metavulkanitische Phyllite vorliegen. Für die hochmetamorphen Anteile dieser Gesteinsabfolgen wird der Begriff der „Alten Gneise“ verwendet, wofür früher auch die Bezeichnung „Altes Dach“ stand, in das die granitischen Schmelzen eindringen. Nach dem Variszischen Zyklus (ab dem Oberkarbon) kam es zu einer neuerlichen Ablagerung von Sedimentfolgen, die bis in das frühe Paläogen andauerte. Aus paläogeographischer Sicht bildete das Subpenninikum damals ein Krustensegment am Südrand der Europäischen Platte. Die sogenannte Tauernmetamorphose im Zuge der Alpenbildung (Hauptkristallisationsphase/ Temperaturmaximum vor ca. 33 Ma) führte zu einer neuerlichen Überprägung der Gesteine, darunter auch die Umwandlung der Granite zu den „Zentralgneisen“. Das Subpenninikum wird in eine größere Anzahl von Decken und Schuppen unterteilt (Venediger-Deckensystem),

wobei die verschiedenen „Zentralgneiskerne“ die tiefsten Anteile bilden. Diese sind teils auch als Gneisdecken ausgebildet.

Über dem Subpenninikum lagern die penninischen Einheiten, die im Zuge der Alpenbildung auf jenes überschoben wurden. Tektonisch wird das Penninikum im Tauernfenster in das tiefere Glockner-Deckensystem und die höheren Einheiten der Nordrahmenzone sowie der Matreier Zone, am Südrand des Tauernfensters, untergliedert. Der Begriff Penninikum leitet sich von der Bezeichnung eines Ozeanbeckens ab, das sich als Seitenarm des atlantischen Ozeans ab dem Jura südlich der europäischen Platte bildete und mit der alpidischen Gebirgsbildung endgültig geschlossen (subduziert) wurde. In diesem Ozeanbecken kamen tonig-mergelig-kalkige Sedimentabfolgen zur Ablagerung, die die penninischen Einheiten zum überwiegenden Anteil aufbauen. Hauptbestandteile der Metasedimente sind die Kalkglimmerschiefer sowie kalkarme bis kalkfreie, dunkle Phyllite. Weiters finden sich in den penninischen Einheiten auch Abkömmlinge der ozeanischen Kruste und noch tieferer Bereiche: Grünschiefer (Prasinite), Amphibolite, Metagabbros, Serpentinite/Ultraschists, auch Eklogite. Permotriassische Gesteine, die den unterostalpinen Abfolgen vergleichbar sind und sich aus diesem Bereich am Südrand des penninischen Ozeans ableiten lassen, treten in den höheren Deckeneinheiten (Nordrahmenzone, Matreier Zone) auf. Die alpidische Metamorphose erfuhren die penninischen Einheiten gemeinsam mit dem Subpenninikum und zwar in Grünschiefer- bis Amphibolitfazies. Teile der Matreier Schuppenzone sowie die subpenninische Eklogitzone zeigen auch die Wirkung einer frühalpidischen Hochdruckphase (Blauschieferfazies).

Geologischer Überblick zu den Untersuchungsgebieten im Ostalpin

Geologische Einheiten des Ostalpins nehmen mit Ausnahme der oben beschriebenen Subpenninischen und Penninischen Teile im Tauernfenster den Alpenraum Österreichs weitgehend ein. Auf höherer Ebene werden die ostalpinen Einheiten in mehrere Deckensysteme des sogenannten Basements unterschieden. Innerhalb der Deckensysteme lässt sich wiederum zwischen dem Basement selbst und einer postvariszischen oder permomesozoischen Bedeckung unterscheiden. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungsbereiche liegen im Ötztal-Bundschuh-Deckensystem: Silz (Tirol); im Silvretta-Seckau-Deckensystem: Hohentauern, Kalwang-Umgebung (Steiermark), in der Wechsel-Decke: Rettenegg (Steiermark) und im Koralpe-Wölz-Deckensystem: St. Kathrein (Steiermark). Weitere geologische Beschreibungen erfolgen dort.

In Tabelle 19 sind alle im Rahmen des Projekts genommenen Gesteinsproben, gegliedert nach Bundesland und Untersuchungsgebiet angeführt. Von diesen 32 beprobten Gesteinseinheiten wurden zwanzig Proben ausgewählt und daraus analysefeine Pulver sowie

abgedeckte und auch polierte, petrographische Dünnschliffe für die weiteren geochemischen Untersuchungen hergestellt (das sind jene Proben, die in Tabelle 19 eine Dünnschliffnummer aufweisen). Die analysefeinen Gesteinspulver wurden auf die Hauptinhaltsstoffe und Spuren untersucht (Ergebnisse siehe Tabelle 20 und Tabelle 21). Die Dünnschliffe wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) auf uranführende Phasen – insbesondere Uraninit und Thorit – untersucht. Von den aufgezählten Proben und Schliffen wurden nicht alle einer petrographischen oder geochemischen Untersuchung unterzogen. Die nicht weiter untersuchten Proben und Präparate dienten als Rückstellproben.

Tabelle 19: Proben und Dünnschliffpräparate zu den in den Alpen untersuchten Kristallinstandorten, gegliedert nach den Bundesländern, mit Bezug zu den dauerbeobachteten Quellmessstellen; die genaue Lage der Probenahmestellen kann den folgenden Detailbeschreibungen entnommen werden.

Untersuchungsgebiet	Probenahmepunkt	Probenbezeichnung	Lithologie	Nr. polierter Dünnschliff	Nr. abgedeckter Dünnschliff	Probe repräsentiert das Einzugsgebiet dieser dauerbeobachteten Quellen
Flattach (K)	G-1	P	Orthogneis, hell, mittelkörnig	618	313	Puffquelle
Mallnitz (K)	G-2	FJ 1	Orthogneis, hell, feinkörnig	619	314	Kaiser-Franz-Josef-Quelle
Mallnitz (K)	G-3	FJ 2	Orthogneis, große Kalifeldspate	620	315	Kaiser-Franz-Josef-Quelle
Mallnitz (K)	G-4	FJ 3	Biotit-Plagioklas-Gneis	621	316	Kaiser-Franz-Josef-Quelle
Hagenbachtal (Stmk.)	G-19	H1	Orthogneis	632	327	Quellen im Hagenbachtal
Hagenbachtal (Stmk.)	G-20	H2	Phyllit			
Hagenbachtal (Stmk.)	G-21	H3	Orthogneis	633	328	Quellen im Hagenbachtal
Hohentauern (Stmk.)	G-13	WB1a	Quarzit	629	324	
Hohentauern (Stmk.)	G-14	WB1b	Quarzit			
Hohentauern (Stmk.)	G-15	WB1c	Quarzbkock mit schwarzen Erz			
Hohentauern (Stmk.)	G-16	WB1d	Phyllit	630	325	

Untersuchungs- gebiet	Probenahmepunkt	Probenbezeichnung	Lithologie	Nr. polierter Dünnschliff	Nr. abgedeckter Dünnschliff	Probe repräsentiert das Einzugsgebiet dieser dauerbeobachteten Quellen
Hohentauern (Stmk.)	G-17	WB1e	schwarzer Phyllit			
Kathrein am Hauenstein (Stmk.)	G-29	GSTK1	Grobgneis, geschiefert,	637	332	
Kathrein am Hauenstein (Stmk.)	G-30	GSTK2	Grobgneis, stark geschiefert,			
Kathrein am Hauenstein (Stmk.)	G-31	GSTK2	Grobgneis, phyllonitisiert			
Rettenbach (Stmk.)	G-22	R1'	Quarzit, Aufschluß	634	329	
Rettenbach (Stmk.)	G-23	R2'	Hellglimmer- reicher Quarzit, geschiefert	635	330	
Rettenbach (Stmk.)	G-24	R3'	Quarzitschiefer			
Rettenbach (Stmk.)	G-25	R4'	Quarzit			
Rettenbach (Stmk.)	G-26	R5'	Phyllit	636	331	
Rettenbach (Stmk.)	G-27	R6'	Quarzit			
Rettenbach (Stmk.)	G-28	R7'	Quarzit			
Wald am Schoberpass (Stmk.)	G-18	R1	dunkler Phyllit	631	326	
Schönebenalm (Stmk.)	SEA	SEA	Orthogneis	SEA	329-19	Schönebenalmquell e
Mayrhofen (T)	G-5	A1	Ahorngneis, grob	622	317	Arbesseitenquelle
Mayrhofen (T)	G-6	A2	Ahorngneis, helle Schliere	623	318	Arbesseitenquelle
Mayrhofen (T)	G-7	A3	Ahorngneis, feiner, heller Gang	624	319	Arbesseitenquelle
Silz (T)	G-8	S1	Orthogneis	625	320	Schwöbbrunnen
Silz (T)	G-9	S2	Gneis			Schwöbbrunnen
Silz (T)	G-10	S3	Gneis			Schwöbbrunnen
Silz (T)	G-11	S4	Orthogneis	626	321	Schwöbbrunnen
Silz (T)	G-12a	S5a	Quarzit	627	322	Schwöbbrunnen
Silz (T)	G-12b	S5b	Glimmerschiefer	628	323	Schwöbbrunnen

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Tabelle 20: Hauptelemente der kristallinen Gesteinsproben; H₂O und CO₂ wurde an der Geologischen Bundesanstalt bestimmt, die anderen angegebenen Konzentrationen wurden an der Universität Salzburg gemessen, lediglich die Analyse zu SEA wurde zur Gänze an der Geologischen Bundesanstalt bestimmt.

Probe	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	F (%)	H ₂ O (%)	CO ₂ (%)	Summe
P	73,17	13	0	0,8	1,2	4,2	3,6	0,3	0,1	1,8	0	0,1	1	0,2	99,58
FJ1	68,73	15	0	1,3	1,6	4,5	4,6	0,4	0,2	2,2	0	0,2	1	0,1	99,48
FJ2	69,72	15	0	1,1	0,7	3,6	5,6	0,3	0,2	2	0,1	0,1	1	0,3	99,5
FJ3	62,21	17	0,1	2,8	0,8	2,8	3	0,7	0,2	6,9	0	0,2	2	0,1	99,26
Aa	61,73	16	0,1	2,3	3,4	2,7	5,2	0,6	0,5	3,8	0,1	0,3	2	1,8	99,6
Ab	68,08	14	0,1	1,2	3,3	3,6	4,1	0,2	0,1	1,4	0	0,1	1	2,4	99,72
Ac	73,98	14	0	0,3	0,7	4,7	3,8	0,1	0,1	0,9	0,1	0,1	1	0,4	99,49
S1	74,03	14	0	0,2	0,5	3,8	4,6	0,1	0,2	1,3	0	0,1	1	0,1	99,76
S4	72,93	13	0	0,4	0,7	2,8	4,9	0,2	0,2	2,4	0	0,2	2	0,2	99,88
S5a	79,99	7,7	0	0,8	0,6	1,9	1,7	0,6	0,1	2,2	0	0,1	3	1,1	99,47
S5b	51,18	23	0,1	3,4	1,2	2,9	5,3	1,2	0,1	9,3	0	0,2	1	0,8	99,65
Wb1a	81,89	9,6	0	0,3	0,8	2,5	1,6	0,3	0,1	1,5	0	0,1	1	0,2	100,2
Wb1d	57,79	22	0	1,2	0,3	2	5,1	1	0,2	6,6	0	0,2	3	0,1	99,74
R1	52,85	23	0	4	0,3	1,3	6,1	1	0,2	6,8	0	0,2	4	0,1	99,46
SEA	66,00	15,5	0,1	1,6	1,3	2,7	4,5	0,6	<0,5	n.b.	0,3	n.b.	0,6	1,5	98,83
H1	72,09	14	0	0,6	0,6	4,2	4,2	0,4	0,1	2,9	0	0,1	1	0,4	99,97
H3	71,07	14	0	0,6	0,7	4	4,5	0,4	0,1	2,9	0	0,1	1	0,5	100,1
R1'	96,78	1,6	0	0,1	0	0,2	0,6	0,1	0	0,2	0	0	1	0,1	100,2
R2'	83,09	9,4	0	0,9	0	1	2,5	0,3	0,1	1,1	0	0,1	2	0,1	100,3
R5'	55,67	20	0	3,1	0,2	0,4	6,7	0,9	0,2	8,7	0	0,2	4	0,1	100,1
GStk1	70,77	16	0	0,5	0,7	4,9	3,1	0,2	0,2	1,9	0	0,2	1	0,1	99,86

Analytik: Geologische Bundesanstalt/Fachabteilung Geochemie; Universität Salzburg/Fachbereich Chemie und Physik der Materialien

Tabelle 21: Spurenelemente der kristallinen Gesteinsproben; mit Ausnahme des Urans und Lithiums, diese Werte sind ICP-MS-Analysen, wurden alle anderen Elemente mit der RFA bestimmt (Teil 1 + Teil 2)

	As (ppm)	Ba (ppm)	Cd (ppm)	Ce (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cs (ppm)	Cu (ppm)	Ga (ppm)	La (ppm)	Li (ppm)	Mo (ppm)
P	<1	745	<1	76	6	4	6	3	<1	n.b.	n.b.	<1
FJ1	<1	1153	<1	71	7	8	15	2	<1	n.b.	n.b.	<1
FJ2	<1	938	<1	76	7	8	10	3	<1	n.b.	n.b.	<1
FJ3	<1	426	<1	63	21	56	15	<1	<1	n.b.	n.b.	<1
A-a	<1	1003	<1	57	11	31	19	7	<1	n.b.	n.b.	<1
A-b	<1	955	<1	29	5	8	10	<1	<1	n.b.	n.b.	<1
A-c	<1	674	<1	31	4	4	6	5	<1	n.b.	n.b.	<1
S1	<1	103	<1	19	5	2	5	<1	<1	n.b.	n.b.	<1
S4	<1	359	<1	34	7	4	4	1	<1	17	112	<1
S5b	<1	966	<1	105	28	116	15	49	<1	51	85	<1
S5a	<1	500	<1	62	7	22	5	18	<1	32	20	<1
WB1a	<1	210	<1	23	5	8	6	1	<1	16	14	<1
WB1d	<1	752	<1	92	22	83	17	<1	<1	42	34	<1
R1	<1	876	<1	63	22	99	29	<1	<1	28	103	<1
H1	3	678	<1	66	9	4	7	4	<1	31	30	<1
H3	15	691	<1	66	9	5	9	3	<1	31	18	<1
R1'	4	42	<1	7	4	4	2	2	<1	5	3	<1
R2'	<1	477	<1	13	5	15	14	2	<1	5	20	<1
R5'	<1	449	<1	87	35	95	48	<1	<1	45	68	<1
GSTK1	<1	250	<1	44	6	5	8	<1	<1	27	22	<1
SEA	1	616	<1	62	16	34	12	10	<1	29	n. b.	<1

	Nd (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Rb (ppm)	Sb (ppm)	Sc (ppm)	Sr (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	V (ppm)	Y (ppm)	Zn (ppm)	Zr (ppm)
P	33	<1	12	124	<1	6	366	20	9,3	28	12	40	164
FJ1	37	5	36	192	<1	7	441	26	6,9	40	8	48	209
FJ2	34	5	32	224	<1	6	274	22	6,7	38	13	48	158
FJ3	31	32	29	110	<1	9	251	9	2	104	27	155	172
A-a	36	16	53	282	<1	9	201	17	4,4	70	18	89	197
A-b	20	5	20	176	<1	6	282	17	5	28	7	36	76
A-c	16	<1	28	137	<1	5	295	11	6,5	18	11	32	73
S1	8	<1	13	222	<1	4	52	12	5,7	17	23	22	65
S4	17	3	18	198	<1	5	92	12	1,6	26	26	28	100
S5b	45	53	69	205	2	13	209	17	4,2	132	41	133	268
S5a	31	11	11	64	<1	9	102	13	1,6	41	21	35	366
WB1a	13	6	<1	58	<1	6	41	9	0,8	32	11	9	102
WB1d	45	37	5	205	<1	11	81	16	1,6	115	38	21	300
R1	29	40	13	279	7	10	66	18	3,3	134	30	64	179
H1	36	3	18	148	<1	7	75	13	4	29	41	65	293
H3	38	4	13	160	1	7	83	14	3	28	43	48	268
R1'	4	<1	<1	18	<1	4	4	5	0,3	17	4	12	43
R2'	7	10	<1	101	<1	6	42	12	0,4	39	14	13	72
R5'	36	61	4	378	2	9	40	15	1,3	118	29	69	137
GSTK1	23	3	16	190	<1	6	54	15	4,4	25	18	55	106
SEA	34	40	39	147	3	9	71	13	4	59	42	148	214

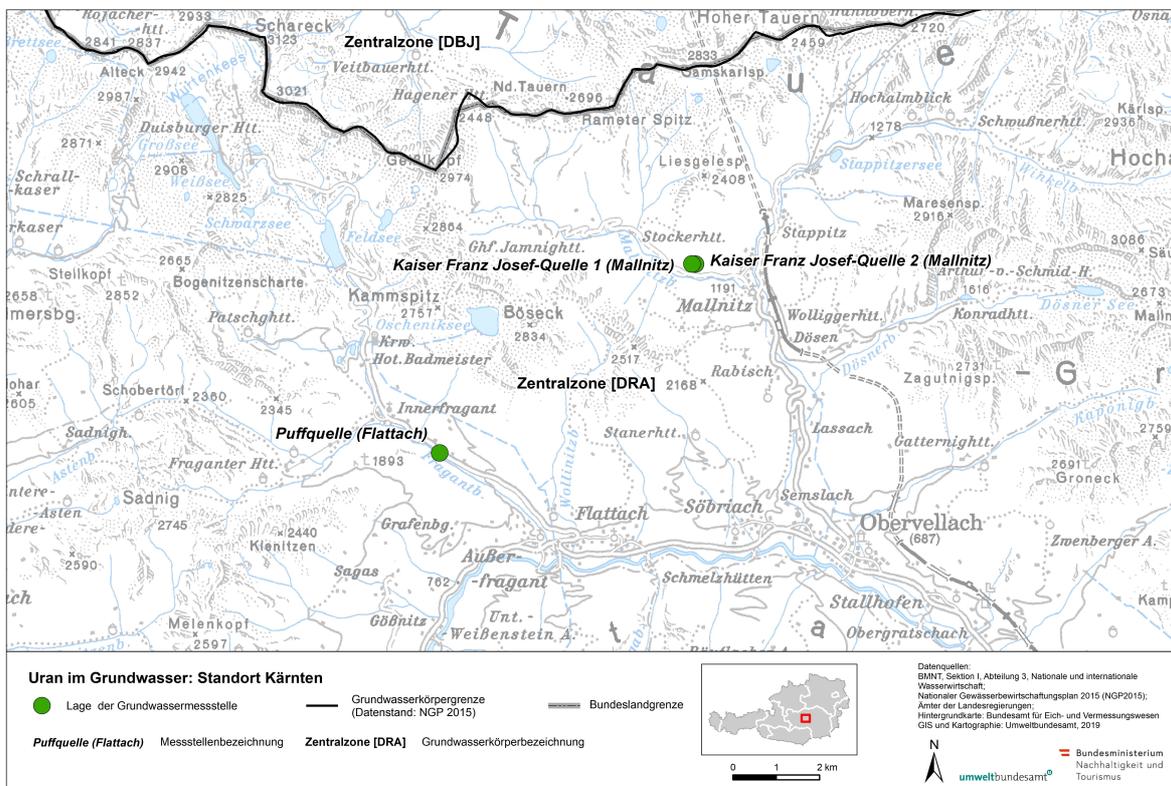
Analytik: Geologische Bundesanstalt/FA Geochemie

5.2 Kärnten

5.2.1 Flattach (Zentralgneis des Sonnenblickkerns)

5.2.1.1 Überblick

Abbildung 31: Lageplan Puffquelle und der beiden Quellläste der Kaiser Franz Josef Quelle

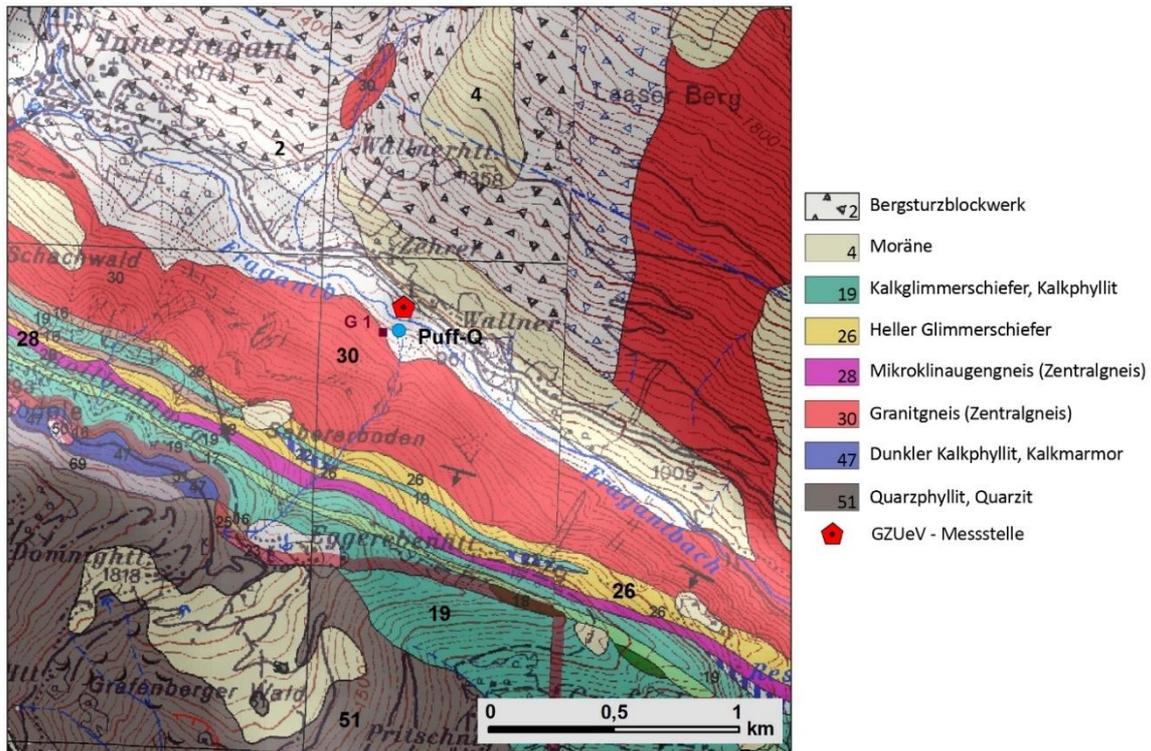


Quelle: BEV, Umweltbundesamt

In der Gemeinde Flattach wurde die Puffquelle (Lage: siehe Abbildung 31) und der dortige Orthogneis beprobt. Die Quelle liegt am Südrand des sogenannten Sonnenblickkerns, eines der großen Zentralgneisareale im Tauernfenster, das sich vom Sonnenblick im Nordwesten bis knapp ins Mölltal (Flattach/Obervellach) erstreckt und als Sonnenblicklamelle im Mölltal gegen Südost weiterzieht. Der Sonnenblickkern bildet eine Granitgneisaufwölbung, die im Nordosten von eingemuldeten Serien (Mallnitzer Mulde) aus Kalkglimmerschiefer und phyllitischen Bündnerschiefer des Glocknerdeckensystem begrenzt wird. An der Südwestflanke überlagern teils subpenninische Hüllserien (nach Exner, 1964) dunkle und helle

Glimmerschiefer, Schwarzphyllite), teils wiederum Kalkglimmerschiefer des Penninikum. In nächsthöherer Position liegt die meist phyllitisch ausgebildete Matreier Zone, die teils stark ausgedünnt ist. Darüber folgen Sericitschiefer, Quarzitschiefer, Quarzite und Glimmerschiefer des Unterostalpinen Stockwerks, bzw. Paragesteine des Oberostalpin.

Abbildung 32: Lage der Puffquelle und des Probenahmeorts G1.



Quelle: Geologische Bundesanstalt

In der näheren Umgebung der Puffquelle im unteren Fraganttal fällt der Granitgneis mittelsteil unter der oben genannten Gesteinsabfolge ein. Der Sonnblickkern besteht hauptsächlich aus grobkörnigen, oft porphyrischen Metagraniten (Pestal et al., 2009, S. 37). Exner (1964, S. 17) beschreibt aus der Umgebung der Quelle „annähernd regellos körnige Biotit-Gneisgranite“. Insgesamt taucht der Sonnblickkern gegen Südost unter den Deckenbau ab. Der porphyrische Sonnblickgranit weist einen durchschnittlichen Urangehalt von 10,7 ppm, feinkörnige Varietäten von 9,2 ppm auf (Berka et al., 2014, S. 73). Gemäß Ausschnitt aus der geologischen Karte (siehe Abbildung 32) überlagern den Granitgneis helle Glimmerschiefer und Schwarzschiefer mit Karbonateinschlüssen und einer Kalkglimmerschieferlamelle. Der in der dargestellte Mikroklinaugengneiszug (Nr. 28) kann nach neuerer Ansicht als Arkosegneis der Wustkogel-Fm betrachtet werden. Darüber folgt

die Glocknerdecke, teils wesentlich an Mächtigkeit reduziert, mit Kalkglimmerschiefer, Einlagerung von Grüngesteinen und von Schwarzphylliten. Die Matreier Schuppenzone ist geringmächtig (unter 100m) und laut Karte auch nicht vorhanden. Prey (1964, S. 132) beschreibt die Matreier Zone in einem nahegelegenen Gebiet: Es treten grüne quarzreiche Phyllite und diaphthoritische Schiefer auf, in denen Grünschiefer, Kalkphyllite, Dolomite, Rauhwacken und Kalkmarmore eingeschaltet sind. Bei der Eggereben (ca. 700 Höhenmeter oberhalb der Puffquelle) herrschen Serizit(Chlorit)phyllite vor (Prey 1964, S. 133). In diesem Bereich – und teils schon jenseits der Wasserscheide – ist der Übergang zum permisch- untertriassischen Alpenen Verrucano des Unterostalpin zu erwarten. Lithologisch dürften darin ebenso Serizitphyllite sowie Quarzitschiefer vorherrschen.

Abbildung 33: Quellfassung Puffquelle; der Gesteinsblock im Hintergrund wurde beprobt.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

5.2.1.2 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

Proben und Präparate: P (Handstück); 618 (polierter Dünnschliff); 313 (abgedeckter Dünnschliff)

Angaben aus der Literatur: Das Fragant-Tal schneidet tief in die Gneisgranite des Sonnenblick-Kerns ein. Exner (1964, S. 15-18) unterscheidet im gegenständlichen Bereich einen Biotit-Gneisgranit (1) und einen bereits durchbewegten, muskowitzierten und schachbrett-albitisierten Gneisgranit (2). Der Unterschied zwischen beiden Gneisen ist ein zunehmendes flächiges Parallelgefüge im muskowitziertem Gneisgranit, weniger scharfe Korngrenzen und das Auftreten von Muskowit neben Biotit.

Abbildung 34: Handstück P aus Fragant.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Handstücks P: Der hier vorliegende Glimmer-Granitgneis (Orthogneis) zeigt ein fein- bis mittelkörniges, deutlich geregeltes Gefüge aus Feldspat, Quarz und Glimmern mit bis zu 0,5 cm großen Kalifeldspat-Augen.

Beschreibung des Dünnschliffs 313:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (20 %), Plagioklas (40 %), Quarz (25 %) und Biotit (5-10 %), als Nebengemengeteile (5 %) (geschätzte Angabe) sind Orthit, Klinozoisit, Epidot, Chlorit, Muskowit und opake Minerale zu verzeichnen.

Tabelle 22: Modalbestand des Dünnschliffs 313

	Feldspat (ges.) (%)	Orthoklas (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	58,87	19,5	39,37	33,17	2,97	3,43	98,44
Catanorm	63,32	21,89	41,43	30,52	n.b.	6,16	100
Debon + Le Fort	59,46	n.b.	n.b.	32,35	8,18	-	99,99
Schätzung im Mikroskop	60	20	40	25	10	5	100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (1,26–1,77 %), Korund (0,8–1,2 %), Kalzit (0,4%) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (2,19 %) und Fluorit (0,4 %) zusammen.

Die ca. 2 bis 5 mm großen, hypidiomorphen Kalifeldspat-Augen sind von einer deutlich geregelten, feinkörnigen rekristallisierten Matrix aus Quarz, Feldspat und Biotit umgeben.

Die größeren Kalifeldspat-Augen (Orthoklas) zeigen durchwegs eine flauere Mikroklingitterung. Häufig weisen sie auch perithitische Entmischungen sowie Einsprenglinge aus Klinozoesit, Muskowit und opaken Anteilen auf. Selten sind Karlsbader Zwillinge erkennbar. Es gibt auch kleine Kalifeldspate, die selten verzwilligt und xenomorph sind. Die in den großen Kalifeldspat-Augen eingeschlossenen, hypidiomorphen Plagioklase

haben – im Unterschied zu jenen, die Teile der feinkörnigen, rekristallisierten Matrix wurden, ihre ursprüngliche Gestalt erhalten. Der ehemals anorthitreichere Kern wird durch poikiloblastische Einschüsse aus Klinozoisit und Muskowit nachgezeichnet.

Der Plagioklas in der Matrix ist zumeist in ein feinkörniges Pflaster aus Subkörnern umgewandelt, wobei die einzelnen Körner selten polysynthetische Zwillinge zeigen. Unter den Bedingungen der alpinen Metamorphose wurden die Plagioklase in Albit und Fülle umgewandelt. Die Plagioklas-Subkörner werden in der Regel von Klinozoisit und Sericit etc. begleitet. Durch die niedriggradigen bis mittelgradigen Bedingungen während der Metamorphose bildeten sich Zoisit durch Saussuritisierung der Plagioklase. Ein feinkörniges Gemenge aus Zoisit, Epidot, Klinozoisit und Sericit ist in verschiedenen Teilen der Plagioklase immer wieder poikiloblastisch vorzufinden.

Der Quarz ist feinkörnig in der Matrix enthalten und xenomorph als Überindividuen in den Fließstrukturen um die Kalifeldspat-Augen. Es handelt sich zumeist um etwa 0,025 bis 1,5 mm lange, leicht ausgedünnte Quarze, die aus unterschiedlich vielen 0,025 bis 0,8 mm großen Subkörnern bestehen, die unter dem Analysator eine undulöse Auslöschung zeigen. Die aus Quarzkörnern bestehenden Bereiche weisen – im Gegensatz zu den Plagioklasen – keine Anhäufung von Einschlüssen auf.

Der Biotit ist leicht eingeregelt mit einer Längsausstreckung von 0,04 mm bis 1,2 mm und zeigt einen starken Pleochroismus von Graugelb zu Braungrün bis Rotbraun was für einen Fe-reichen Biotit (Annit) spricht. Durch die mechanische Beanspruchung wurden die Biotite eingeregelt und größere Bruchstücke in Subkörner zerschert (Granulierung, Kornzerkleinerung).

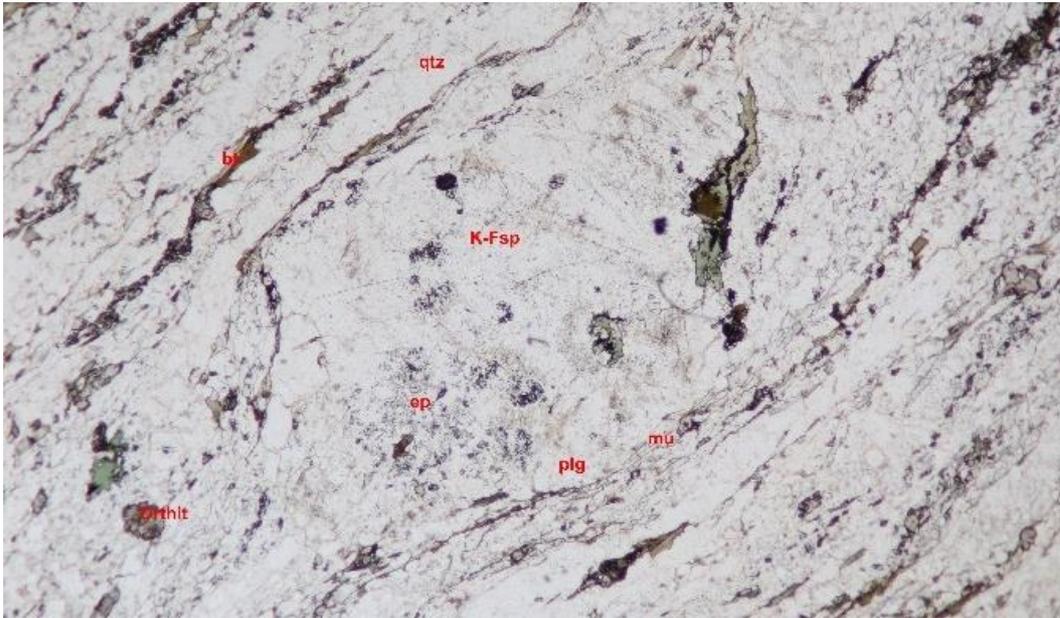
Chlorit tritt als weiteres Schichtsilikat sekundär mit anormalen blauen Interferenzfarben auf. Einige Chlorite sind sekundär aus Biotit hervorgegangen.

Der Muskowit ist überwiegend um die Kalifeldspat-Augen eingeregelt. Er könnte als Sericit sekundär während der Metamorphose entstanden sein.

Auffällig ist das häufige Auftreten von 0,008 bis 0,9 mm großen stark überprägten Orthiten. Sie zeigen Spuren einer starken Umwandlung und teilweise auch einen Klinozoisitrand.

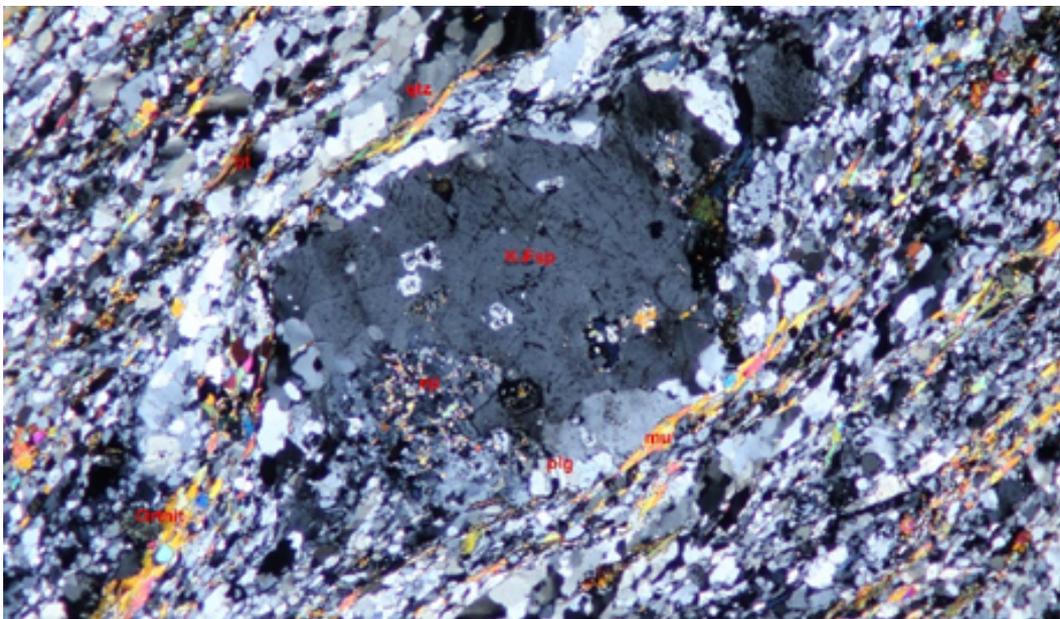
Abbildung 35 und Abbildung 36 (Schliff 313) zeigen ein Kalifeldspat-Auge in Quarz+Feldspat+Glimmer-Matrix, vereinzelt Orthit mit hohem Relief und niedrigen Interferenzfarben und Epidot mit anormalen Interferenzfarben, Chlorit mit leicht grünem Pleochroismus und blauen anormalen Interferenzfarben.

Abbildung 35: Schliff 313 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 36: Schliff 313 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Im Raum Flattach wurde der Orthogneis im Einzugsgebiet der Puffquelle beprobt. Die Probe P wies 9,3 ppm Uran auf (siehe Tabelle 21). Im REM stellte sich bei der Untersuchung

des Präparats 618 heraus, dass der Großteil des Urans hier an die Minerale Epidot und Thorit sowie Zirkon gebunden ist. Daneben tritt Uran auch in der Kristallstruktur von Monazit, Allanit und Titanit auf. Die Epidote sind gleichmäßig im Gestein verteilt, oft liegen sie an Schieferungsflächen. Die höchsten Urankonzentrationen waren im Thorit zu finden (bis 20 Gew. %). Die Hauptmasse des Thorits tritt in Form von auffälligen, großen Körnern im Allanit auf, die von kleineren Thorit-Sprenkeln umgeben sind. Vereinzelt sind Thorite auch an metamikte Zirkone gebunden.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 4.2 enthalten. Neben Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 4.2 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährender Anteil
- UO₂-Gehalte (Gew. %) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

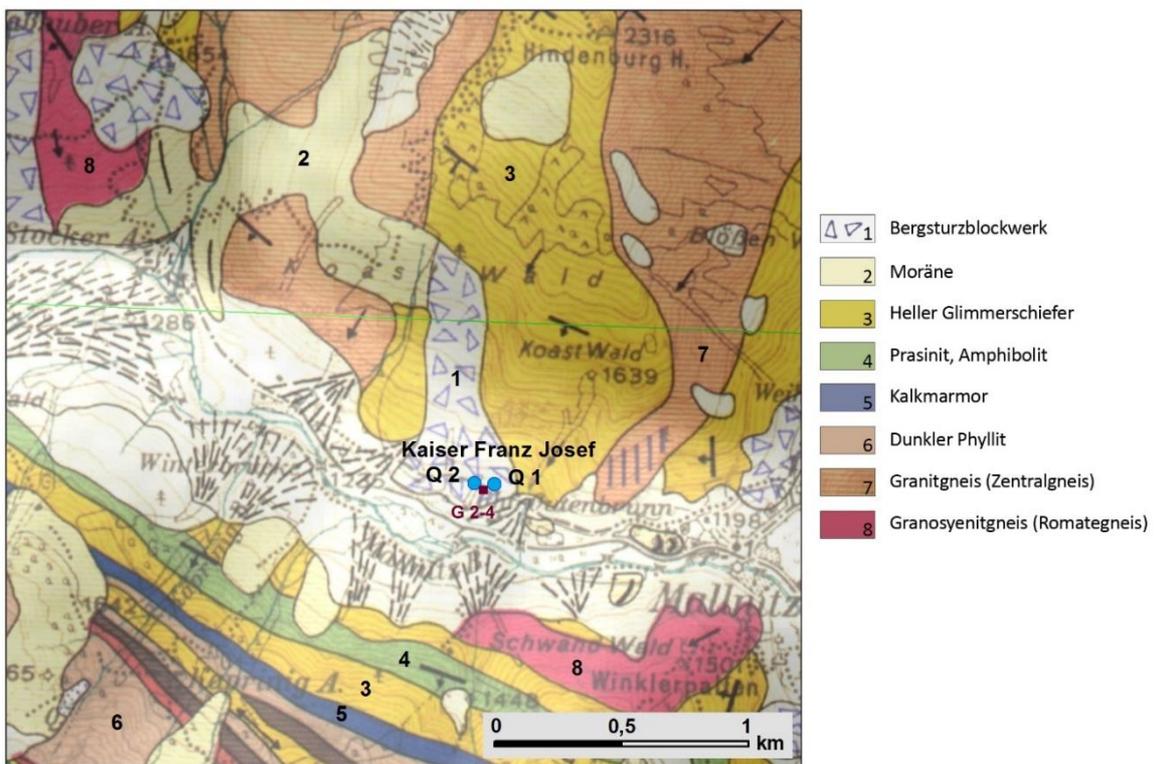
5.2.2 Zentralgneis des Hölltor-Rotgülden-Kern bei Mallnitz/Kärnten

5.2.2.1 Überblick

Die beiden Kaiser Franz Josef Quellen bei Mallnitz liegen im untersten Hangbereich des Mallnitzer Tauerntales (Lage: siehe Abbildung 31). Dieses verläuft in der Streichrichtung der die südlichen Hänge aufbauenden Hüllserien des Hölltor-Rotgülden-Zentralgneiskernes. Der Zentralgneis tritt in den nördlichen Abhängen bis knapp an den Talboden heran, wo er von Blockwerk und Hangschutt überdeckt ist. Der Hölltor-Rotgülden-Kern wird von Nord-Süd bis Nordost-Südwest streichenden Quermulden begleitet, die sich aus den Hüllserien aufbauen (im Kartenausschnitt in Abbildung 37 als helle Glimmerschiefer bezeichnet). Diesen Mulden folgen das untere Seebachtal bei Mallnitz bzw. der Woisgenbach (Mündung bei Stocker Alm). Nach dem genannten Woisgental wird auch ein Gesteinstypus der Hüllserien der östlichen Zentralgneiskerne benannt. Exner (1957, S. 74) charakterisiert sie als Biotit- und Chloritporphyroblastenschiefer. Bei Pestal et al. (2009) werden diese Glimmerschiefer zu einer „abwechslungsreich ausgebildete(n) lithologische(n) Einheit“ gestellt, deren häufigster Gesteinstyp „ein dunkler, lagenweise graphithaltiger Biotitblastenschiefer mit wechselndem,

aber durchwegs hohem Quarz- und Feldspatgehalt“ ist. In den Hüllgesteinen der Woisgenzone treten nach Exner (1964, S. 77) weiters Ablitporphyroblastenschiefer und geringermetamorphe Graphitphyllite, Quarzite, Phyllite und Glimmerschiefer auf. Das gewöhnliche Gestein des Hölltor-Rotgülden Kernes nennt Exner (1957, S. 76) einen flasrigen, porphyrischen Granitgneis mit Vorherrschaft des Kalifeldspates. Neben dem Granitgneis des Hölltor-Rotgüldenkernes tritt in der weiteren Umgebung der Quelle auch der Romategneis auf, ein granosyenitischer Granitgneis, der schon früh als das stärkste radioaktive Gestein im Raume Gastein erkannt wurde (Exner 1957, S. 124). Berka et al. (2014, S. 73) führen einen Maximalwert des Urangehalts von 37 ppm an. Die Quellen selbst liegen im Bereich mit Hangschutt und Blockwerk, wobei granitisches Blockwerk zu dominieren scheint.

Abbildung 37: Lage der Kaiser Franz Josef-Quellen und der Probenahmestelle der Gesteinsproben.



Quelle: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 38: Quellfassung Kaiser Franz Josef-Quelle 1. Die Umgebung zeigt Blockwerk aus Paragneisen und Granitgneisen.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 39: Quellstube der Kaiser Franz Josef-Quelle 2.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

5.2.2.2 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

Proben und Präparate: FJ1, FJ2, FJ3 (Handstück); 619, 620, 621 (polierter Dünnschliff); 314, 315, 316 (abgedeckter Dünnschliff)

Angaben aus der Literatur: Nach Exner ist das gewöhnliche Gestein des Hülltor-Rotgülden-Kernes ein flaseriger, porphyrischer Granitgneis mit Vorherrschaft des Kalifeldspates (Exner, 1957, S. 76).

Beschreibung des Handstücks FJ1: Der hier vorliegende Biotit-Granitgneis (Orthogneis) zeigt ein feinkörniges nicht eingeregelt Gefüge aus Feldspat, Quarz und Biotit. Die Kalifeldspat-Augen sind im Durchschnitt 3 mm groß.

Abbildung 40: Handstück FJ1 aus Mallnitz.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 314:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (25 %), Plagioklas (35 %), Quarz (20 %) und Biotit (15 %), als Nebengemengeteile (5%) sind Chlorit, Titanit, Orthit, Epidot, Zoisit, Klinozoisit, Apatit und opake Minerale zu verzeichnen. Die Matrix ist nicht eingeregelt und besteht aus fein verteiltem Quarz, Plagioklas und Biotit.

Tabelle 23: Modalbestand des Dünnschliffs 314

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	24,01	44,64	22,01	4,78	3,26	98,7
Catanorm	27,33	45,89	19,19		7,52	99,93
Debon + Le Fort	67,23 (Kalifeldspat + Plagioklas)		21,22	11,5	-	99,95
Schätzung im Mikroskop	25	35	20	15	5	95

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle 23 gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (1,5-2,2 %), Korund (0,2-0,7 %), Kalzit (0,3 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (3,5 %) und Fluorit (0,7 %) zusammen.

Das Gefüge ist feinkörnig bis mittelkörnig mit porphyrischer Struktur. Bei dem Kalifeldspat handelt es sich überwiegend um durchschnittlich 0,2 mm große porphyrische Orthoklase mit perthitischen Entmischungen und Einschlüssen von Epidot, Zoisit, Rutil und Albit. Teilweise sind die metastabilen Orthoklase zu Mikroklin umgewandelt (siehe Abbildung 41 und Abbildung 42). An vereinzelt Bereichen haben sich mehrere Subkörner zu bis zu 2,5 mm großen Kalifeldspatdomänen vereinigt.

Myrmekit ist bis zu 1 mm groß vorzufinden. Die schnurförmige Verwachsung des Quarzes in Plagioklasen tritt häufig an der Grenze zu Kalifeldspäten auf. Der Plagioklas zeigt teilweise leichte polysynthetische Verzwilligungen und Saussuritisierung (feinkörniges Gemenge aus Mineralen der Epidotgruppe, Albit, Serizit).

Der Quarz ist hypidiomorph und durchschnittlich ca. 0,4 mm groß. Unter gekreuzten Polarisatoren hat er gelb/gräuliche Interferenzfarben. Ähnlich wie beim Kalifeldspat wurde auch der Quarz durch Stressbeanspruchung in Subkörner zerlegt. Dies erkennt man an bis zu 2,5 mm großen undulösen Quarzdomänen.

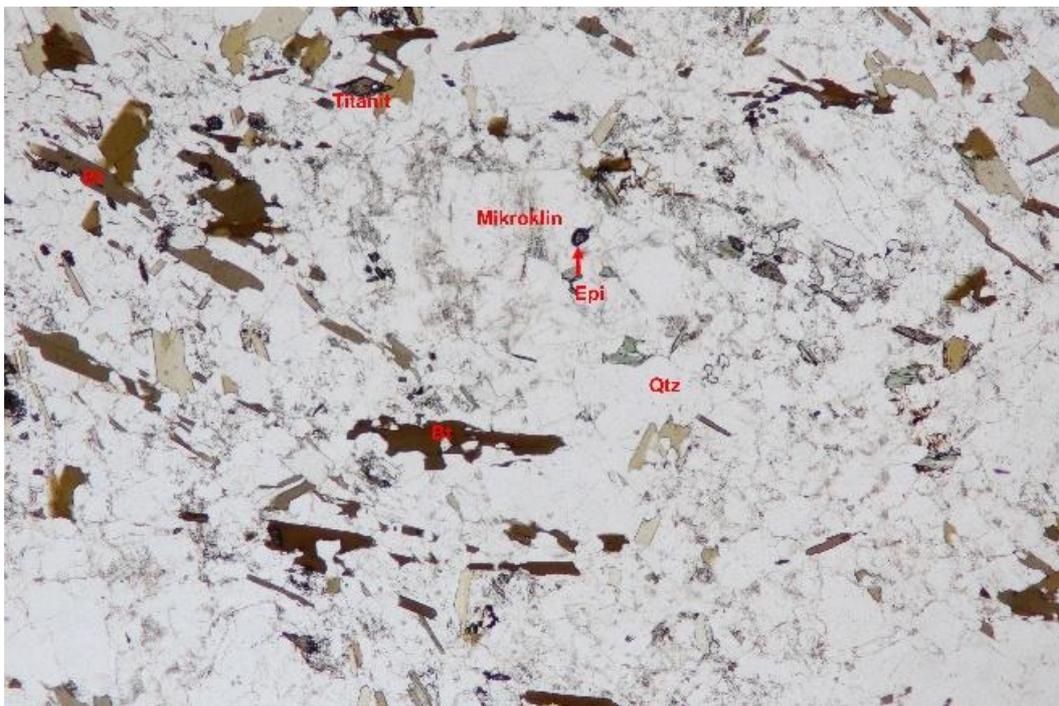
Idiomorpher bis hypidiomorpher Biotit ist uneingeregelt in der Matrix vorhanden und teilweise chloritisiert. Der Pleochroismus ist hellgrün/grün bis dunkelbraun und die durchschnittliche Längsstreckung beträgt 0,5 mm. Der Chlorit zeigt einen hellgrün/grünen

Pleochroismus und bräunlich/blau Interferenzfarben. Chlorit tritt häufig in Vergesellschaftung mit Biotit auf.

Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen eine feinkörnige Matrix aus Quarz (Qtz), Plagioklas (Plg) und Kalifeldspat (Kfs) mit Mikroklin und perthitischen Kalifeldspat-Porphyroblasten (rechts vom Mikroklin); Biotit (Bt, braune Eigenfarbe) und Chlorit (Chl, grünliche Eigenfarbe) sowie Akzessorien wie Epidot und Titanit sind zu sehen.

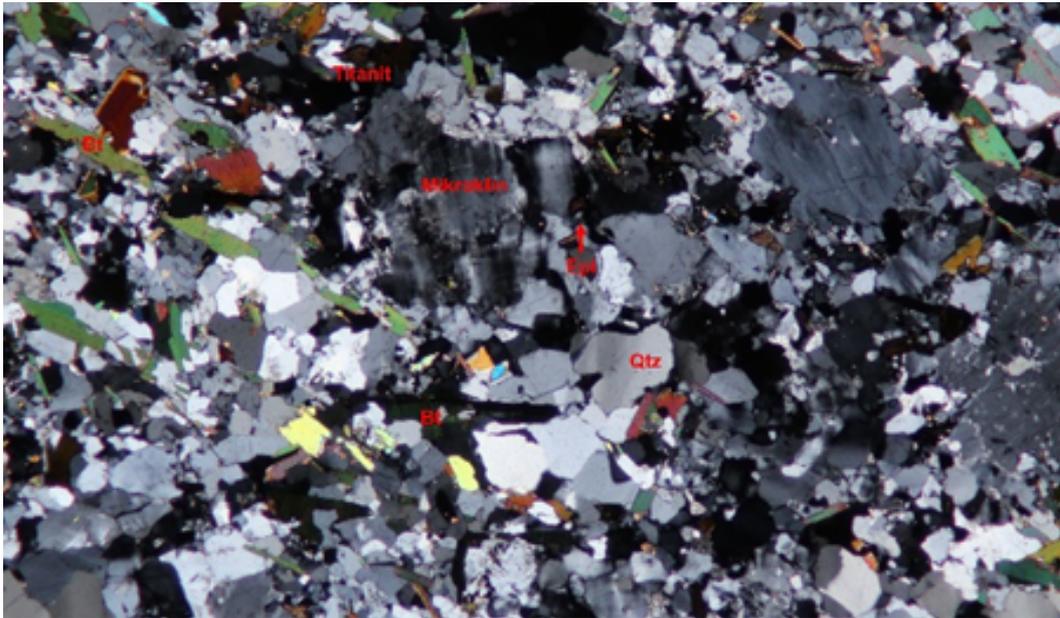
Besonders auffällig ist das häufige Auftreten von Titanit und mäßige Auftreten von weiteren Akzessorien wie Epidot, Klinozoesit und Orthit. Klinozoisit und Epidot treten unter anderem um den Orthit auf.

Abbildung 41: Schliff 314 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 42: Schliff 314 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



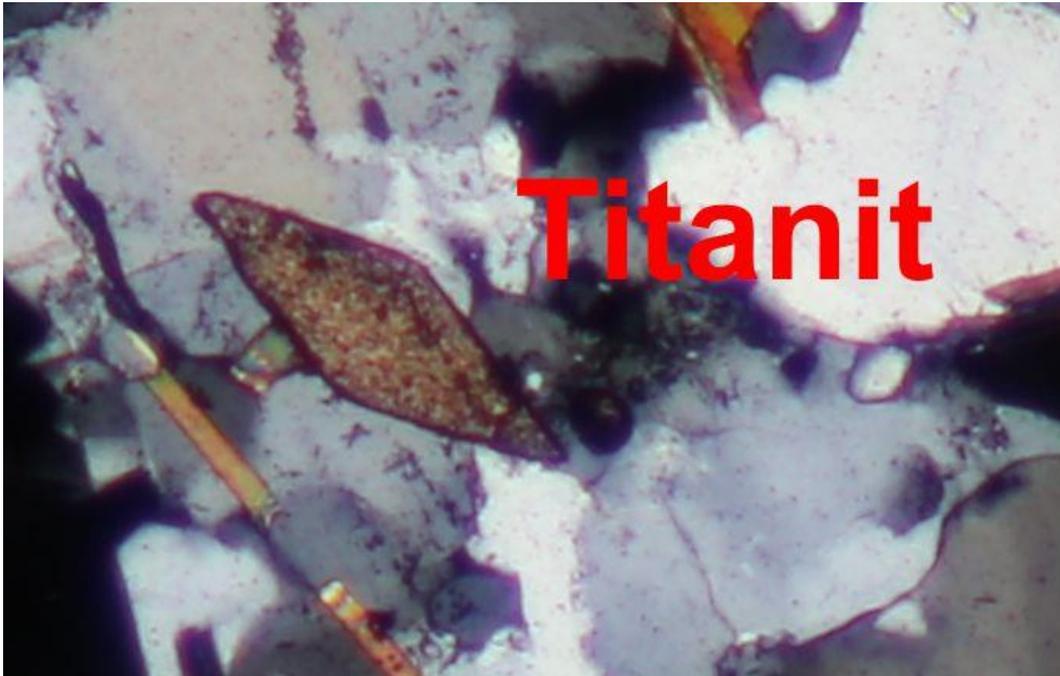
Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 43: Schliff 314 (PPL); idiomorpher Titanit in Matrix, Größe Titanit: 0,32 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 44: Schliff 314 (XPL); idiomorpher Titanit in Matrix, Größe Titanit: 0,32 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Handstücks FJ2: Der hier vorliegende Granitgneis (Orthogneis) zeigt ein grobkörniges, leicht eingeregelttes Gefüge aus Biotit, Quarz und Feldspäten mit 2 mm bis 2 cm großen Kalifeldspat-Augen.

Abbildung 45: Handstück FJ2 aus Mallnitz



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 315:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (30 %), Plagioklas (20 %), Quarz (25 %), und Muskowit (15 %), Biotit (5 %) als Nebengemengeteile (5 %) sind Zirkon, Epidot, Chlorit, Pyrit, Apatit und opake Minerale zu verzeichnen. Die Matrix ist nicht eingeregelt und besteht aus fein verteiltem Quarz, Plagioklas und Biotit.

Tabelle 24: Modalbestand des Dünnschliffs 315

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Muskowit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	30,38	31,51	26,86	3,93		5,64	98,29
Catanorm	33,55	33,17	24,11			9,16	99,99
Debon + Le Fort	64,23 (Kalifeldspat + Plagioklas)		25,67	9,98		-	99,88
Schätzung im Mikroskop	30	20	25	5	15	5	100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (1,4-2 %), Korund (2,5-3 %), Kalzit (0,6 %), Apatit (0,4 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (2,9 %) und Fluorit (0,4 %) zusammen.

Das mikroskopische Bild zeigt gegenüber den vorherigen Dünnschliffen signifikante Unterschiede. Zum einen ist die Mikrolithenfüllung (Anteil der Einschlüsse) im Plagioklas viel größer, es sind vergleichsweise weniger Akzessorien vorzufinden, die Kalifeldspäte sind größer, der Biotitanteil ist geringer während der Muskowit überwiegt. Die Kornzerkleinerung der Plagioklase und Quarze in Rissen und um den Kalifeldspat ist gut zu erkennen.

In dem grobkörnigen Gefüge sind 1 mm bis 15 mm großen perithitische Kalifeldspat-Augen (Orthoklas), mit vielen Einschlüssen vom Nebengemengeanteil und einem hohen Prozentanteil von Plagioklas (Albit) und Epidot, vorhanden. Die Kalifeldspat-Augen sind am Rand granuliert und Muskowit umfließt die Augen.

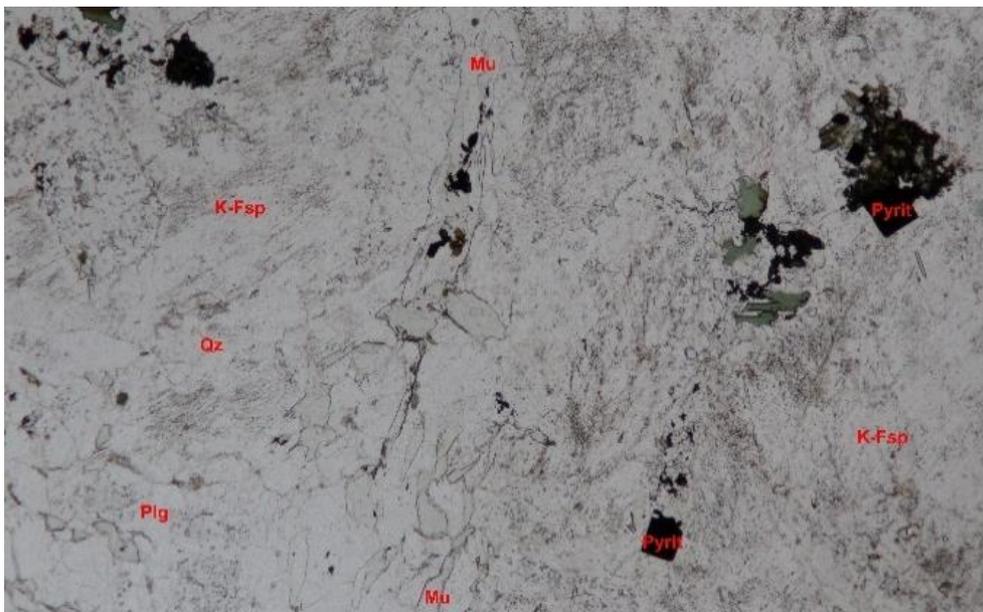
Die Plagioklase sind durchschnittlich 0,5 mm groß, idiomorph bis hypidomorph, poikiloblastisch mit einfachen und polysynthetischen Zwillingslamellen nach dem Albitgesetz. Die poikiloblastische Struktur, die bereits in den vorangegangenen Schliffen beschrieben wurde, ist hier weiter fortgeschritten. Bei der Fülle der Einschlüsse (Mikrolithenfüllung) handelt es sich überwiegend um Muskowit und Epidot. Plagioklas tritt häufig als Einschluss in den Kalifeldspat-Augen oder granuliert mit Quarz am Randsaum der Kalifeldspat-Augen auf.

Quarz ist feinkörniger mit einer durchschnittlichen Größe von 0,15 mm in der Matrix vorhanden. Vereinzelt sind 2,4 mm große Quarzdomänen in kleine undulös auslöschende Subkörner zerkleinert.

Die Muskowit-Blättchen sind im Durchschnitt 0,8 mm lang. Ein undulöses Auslöschchen zeigt, dass der Muskowit teilweise „gequält“ ist. Die erhöhte Menge an Muskowit kann als „Verglimmerung der Feldspäte“ im Zuge der Gesteinsdurchbewegung interpretiert werden (Exner, 1964, S. 17).

Auffällig ist das häufige Auftreten von Pyrit, der bräunlich schimmert, quadratisch und opak ist (siehe Abbildung 46 und Abbildung 47).

Abbildung 46: Schliff 315 (PPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm.

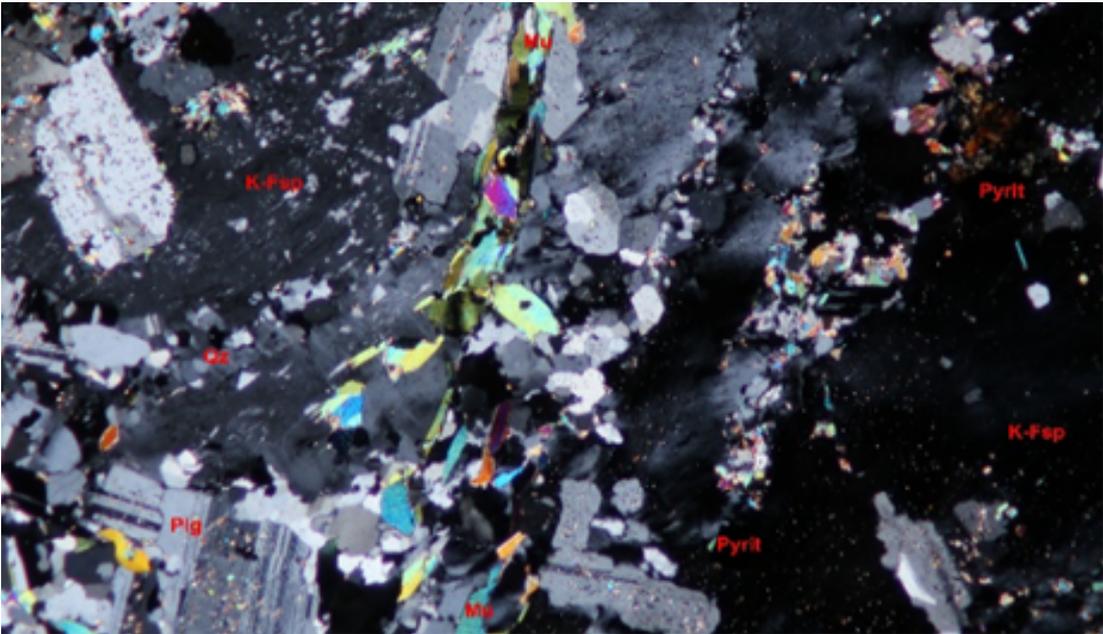


Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen perthitische Kalifeldspäte mit hypidiomorphen Plagioklas-Einschlüssen (links oben); an Rissen sowie an Korngrenzen treten zu Subkörnern zerkleinerte Quarze, Serizit und Epidot auf (oben rechts); in den Zwischenräumen und der Matrix ist polysynthetisch verzwilligter Plagioklas und hypidiomorpher Muskowit zu sehen.

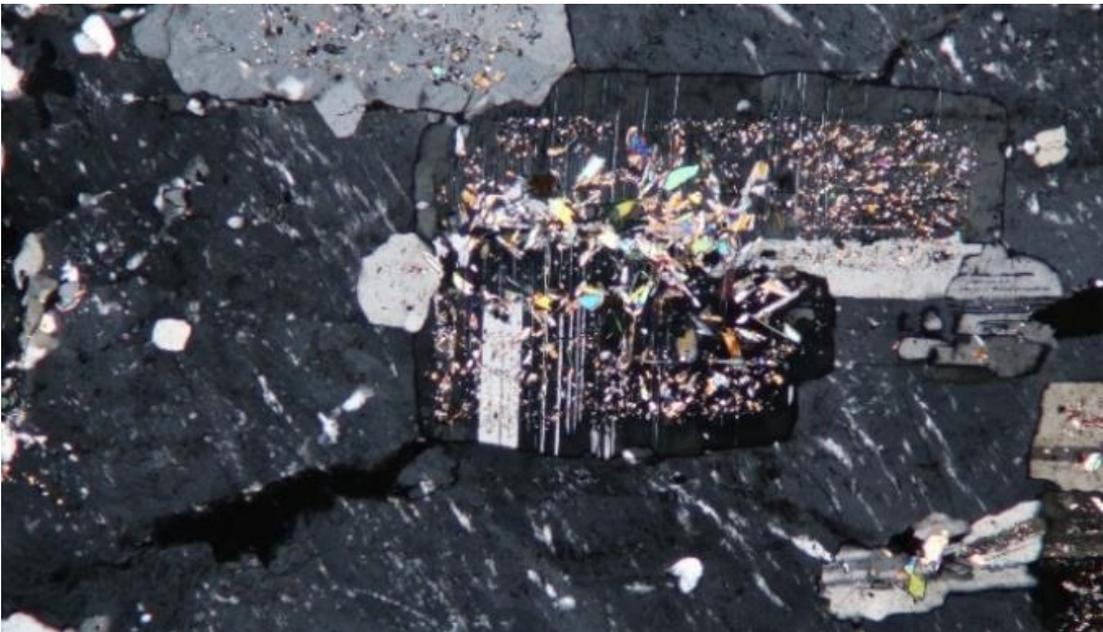
Der Plagioklas in Abbildung 48 zeigt einen deutlichen magmatischen Zonarbau. Der Rand ist ohne Einschlüsse, während der Ca-reiche Kern durch die vielen Einschlüsse nachgezeichnet wird. Der Plagioklas ist im perthitisch entmischten Kalifeldspat eingeschlossen.

Abbildung 47: Schliff 315 (XPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

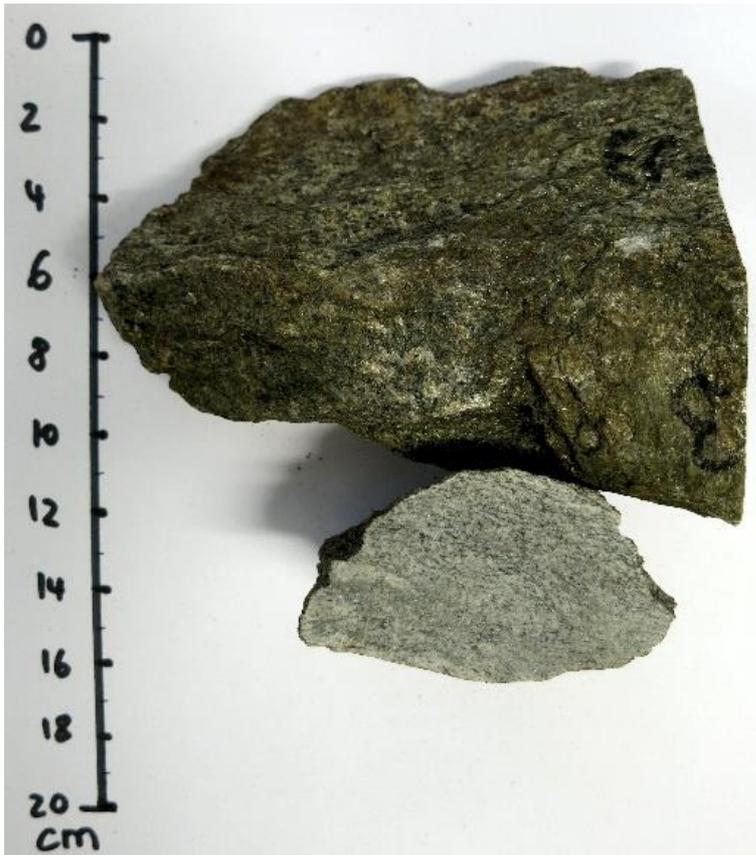
Abbildung 48: Schliff 315 (XPL), 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Handstücks FJ3: Der hier vorliegende Glimmer-Plagioklas-Gneis (Paragneis) zeigt ein feinkörniges, leicht eingeregelttes Gefüge mit größeren Muskowit- und Biotit-Lagen.

Abbildung 49: Handstück FJ3 aus Mallnitz.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 316:

Hauptbestandteile sind Plagioklase (25 %), Quarz (25 %), Muskowit (15 %), Biotit (15 %), Chlorit (15 %) und Granat (5 %). Als Nebengemengeteile (5 %) sind Akzessorien wie Epidot, Zoisit, Turmalin, Klinozoisit, Apatit und opake Minerale zu verzeichnen.

Tabelle 25: Modalbestand des Dünnschliffs 316

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit + Chlorit (%)	Muskowit (%)	Granat (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	10,92	25,23	33,8	10,3			16,52	96,77
Catanorm	18,63	26,55	29,22				25,78	100,18
Debon + Le Fort	37,4 (Kalifeldspat + Plagioklas)		32,98	29,63				100,01
Schätzung	10	20	20	30	15	5		100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (5-7 %), Ilmenit (0,2-0,7 %), Korund (8,7-10,4 %), Kalzit (0,3 %), Apatit (0,4 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (8,2 %), Rutil (0,4 %) und Fluorit (0,8 %) zusammen. Die Normen sind für Plutonite und Vulkanite sowie ihre metamorph überprägten Gesteine gemacht. Hier handelt es sich aber um einen Paragneis, daher sind die Werte kritisch zu betrachten.

Das Gefüge ist eine feinkörnig bis mittelkörnige Matrix aus Feldspat (Kalifeldspat und Plagioklas), Quarz und Glimmermineralen, welche teilweise Cluster bilden. Der Quarz löscht undulös aus und ist in der Matrix mit einer durchschnittlichen Größe von 0,4 mm. Oftmals ist der Quarz in Subkörner unterteilt und wirkt durch die leicht gräulich/gelben Interferenzfarben „schmutzig“.

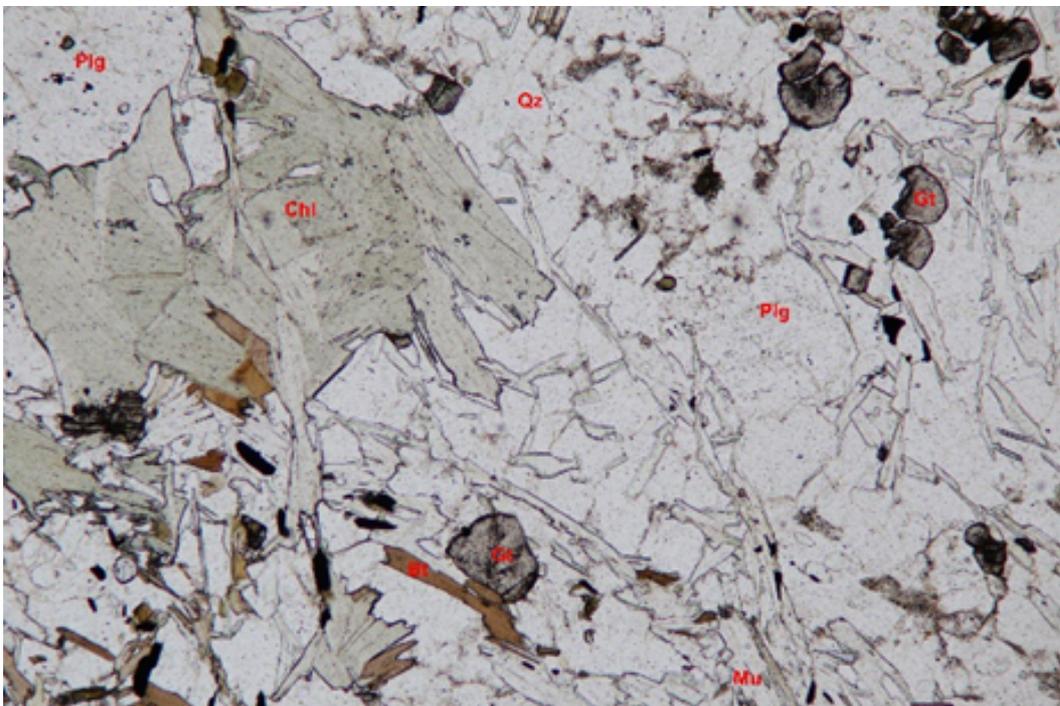
Der Plagioklas ist poikiloblastisch mit überwiegend vielen kleinen Epidot-, Klinozoesit-, Granat- und Apatit-Einschlüssen. Verzwillingung tritt beim Plagioklase selten auf, wobei sie zumeist einfach und selten polysynthetisch ist. Teilweise sind Zonierungen und Rand-Säume zu erkennen. Die Plagioklase bestehen im Kern aus Oligoklas und am Saum aus Albit.

Der Biotit ist leicht eingeregelt, wohingegen Muskowit und Chlorit sekundär gebildet sind. Die pleochroitische Eigenfarbe von dunkelrot/braun zu hellbraun/gelb lässt den Biotit eindeutig identifizieren. Der Chlorit ist eindeutig durch seine grünliche Eigenfarbe und anormal blaue Interferenzfarbe vom Muskowit und Biotit zu unterscheiden. Die Chlorit-Körner sind teilweise zu bis 1 mm großen Klustern (richtungslose sperrige kristallisierte Nester) vereinigt. Der Biotit und Chlorit ist vermutlich präalpidisch.

Die Granate sind zwischen 0,05 und 0,1 mm groß mit häufigen Einschlüssen im Kern. Einige zeigen eine Zonierung und Säume am Rand (epidotisch/zoisitisch). Das Vorhandensein von dem feinkörnigen Granat spricht für einen Paragneis. Ca-reiche Granate sprechen ebenfalls für eine Entstehung während der alpidischen Überprägung.

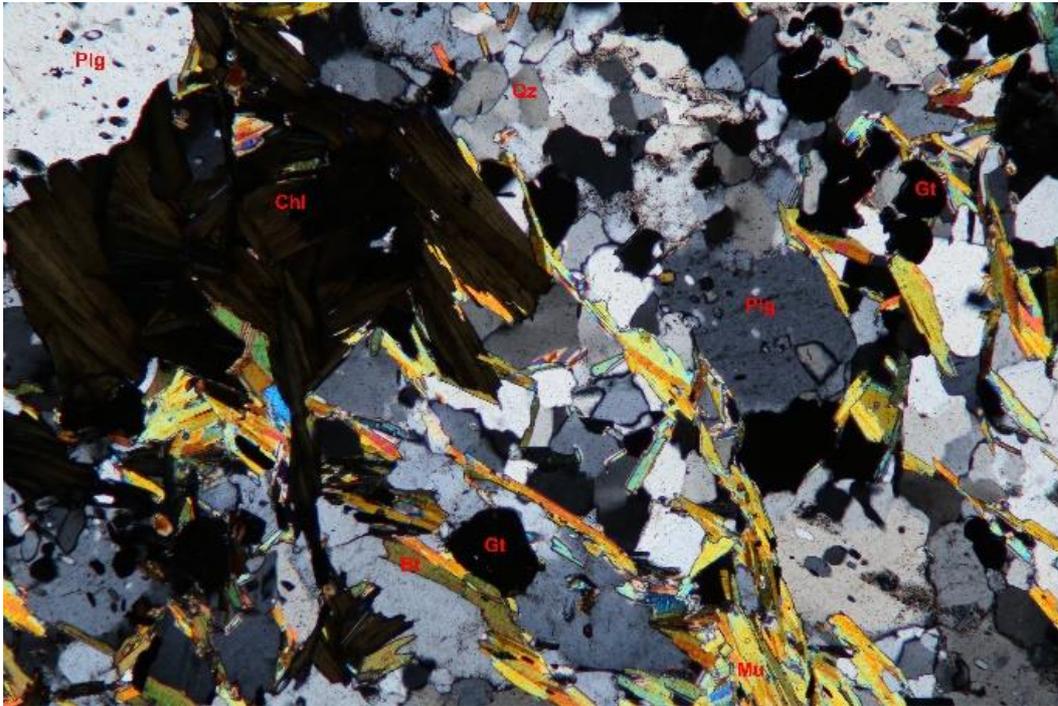
Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die ungleichkörnige Matrix aus feinkörnigem Plagioklas, Quarz und Kalifeldspat mit mittelkörnigem Glimmer sowie Chlorit; Chlorit ist verclustert und Granat (Gt) ist häufig vertreten.

Abbildung 50: Schliff 314 (PPL), 5 x vergrößert; Bild: 2 x 3 mm.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 51: Schliff 314 (XPL), 5x vergrößert; Bild: 2 x 3 mm.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Zusammenfassung: Die Gneise aus dem Bergsturzblockwerk nahe der Kaiser Franz Josef-Quelle bei Mallnitz zeigen signifikante Unterschiede: Die Orthogneise (314, 315) sind fein bis mittelkörnig. Auffällig ist, dass der Schliff 315 stärker überprägt wirkt durch das Vorhandensein von mehr (sekundärem) Muskowit und poikiloblastischen Plagioklasen, wohingegen der Schliff 314 auffällig viel Titanit als Akzessorium enthält. Bei beiden Proben liegt der K_2O -Gehalt (314: 4,64 %, 315: 5,59 %) leicht über dem Na_2O -Gehalt (314: 4,53 %, 315: 6,63 %). Der Bt-Plg-Gneis (316) ist ein Paragneis. Typisch und signifikant sind für diesen Schliff die Granate und der relativ hohe Chlorit-Anteil. Der TiO_2 -Gehalt ist bei dem Paragneis leicht höher (0,7 %) im Vergleich zu den beiden Orthogneisen (0,32-0,41 %).

Im Umfeld von Mallnitz wurden ein feinkörniger Orthogneis (Präparat 619) und ein grobkörniger Orthogneis (620) sowie ein Paragneis (621) näher untersucht. Die Urankonzentration dieser Gesteine betrug 6,9 ppm, 6,7 ppm und 2,0 ppm (siehe Tabelle 21). Im REM zeigte sich dazu folgendes Bild: Bei den beiden Orthogneisen ist das Uran zu einem erheblichen Teil an die Minerale Thorit, Epidot/Allanit und Zirkon, in Präparat 620 auch an Monazit gebunden. Untergeordnet tritt es im Titanit sowie im Uraninit bzw. Coffinit auf. Im Präparat 619 weist der Thorit bis 34 Gew.% U und der Coffinit etwa 55 Gew.% U auf. Im Präparat 621 enthält der Thorit eine geringere Urankonzentration (bis 10 Gew.%, aber bei Einschlüssen im Titanit 23 Gew.%. Der Uraninit enthält 80 bis 85 Gew.% U. Im Präparat 620

sind die Zirkone besonders stark metamikt und weisen gehäuft Einschlüsse von Thorit auf. Wie in Probe 618 (vgl. oben) gibt es auch in 620 Anhäufungen im Allanit/Epidot. Im Paragneis (621) ist hingegen Thorit sehr selten. Das wenige Uran in 621 ist vor allem an die Minerale Zirkon, Allanit und Epidot, untergeordnet an Thorit (bis 25 Gew.% U), Titanit und Xenotim gebunden.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 4.2 enthalten. Neben Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 4.2 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährender Anteil
- UO₂-Gehalte (Gew. %) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

5.2.3 Grundwasseruntersuchungen

Die Kaiser-Franz-Josef-Quelle bei Mallnitz sowie die Puffquelle nahe Flattach (Lage: siehe Abbildung 31) wurden zwischen Februar und Dezember 2018 jeweils sechsmal beprobt. Die Probenahme und die Analytik erfolgten durch das Amt der Kärntner Landesregierung. Zusätzlich erfolgte im Herbst 2018 durch das Amt der Kärntner Landesregierung die Probenahme für die ICP-SFMS Ultraspurenanalyse der Universität für Bodenkultur Wien/Abteilung für Analytische Chemie.

Die Kaiser-Franz-Josef-Quelle umfasst zwei Quellläste. Bei den Beprobungen am 26. Februar 2018 sowie am 16. Mai 2018 wurde eine Mischprobe entnommen. Bei allen weiteren Beprobungen wurde jeder Quellast einzeln beprobt. Da die Analysen der Wässer beider Quellläste keine nennenswerten Unterschiede zeigten, wird in den Datentabellen im Anhangsband der Maximalwert aus den parallelen Analysen angegeben.

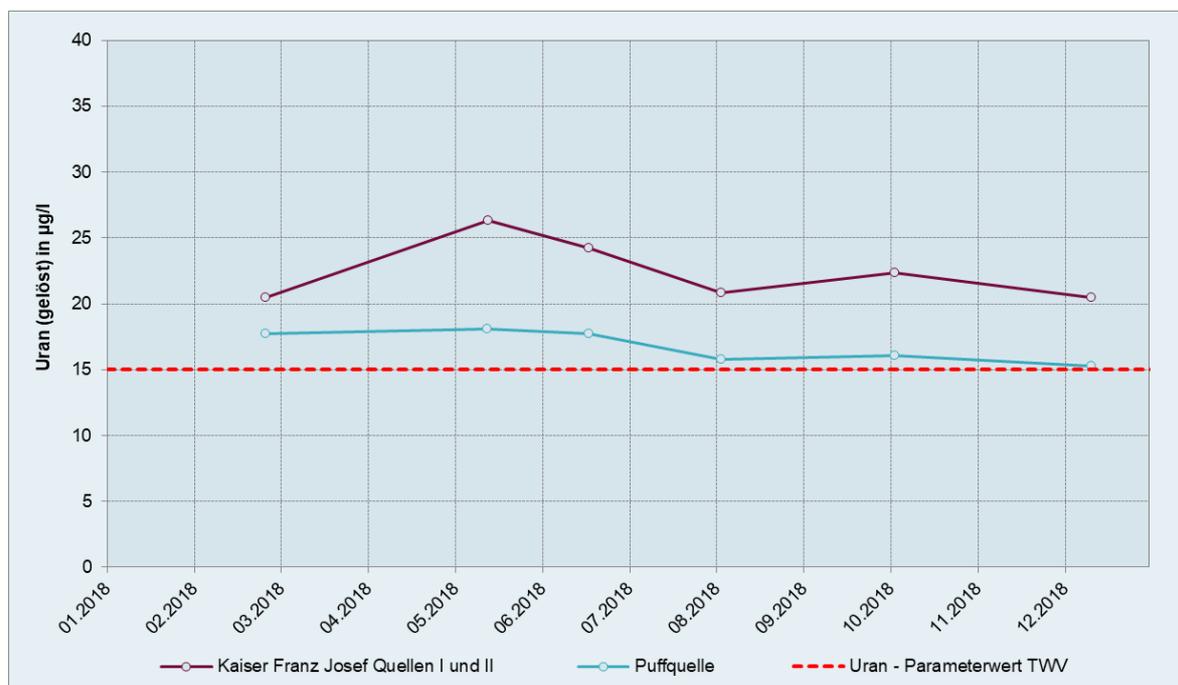
5.2.3.1 Grundwassermonitoring

Die Urankonzentrationen der Kaiser-Franz-Josef-Quelle bewegten sich zwischen 20,5 und 27 µg/l (Abbildung 52). Aluminium ist das einzige Metall, das bei allen Beprobungen in sehr geringen Konzentrationen quantifiziert werden konnte, mit maximal 19 µg/l. Vereinzelt

wurden Kupfer, Quecksilber, Nickel und Zink in Konzentrationen knapp über den jeweiligen Bestimmungsgrenzen detektiert. Das Wasser der Kaiser-Franz-Josef-Quelle wies eine sehr geringe Mineralisierung auf, die elektrische Leitfähigkeit lag zwischen 86 und 108 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Die Puffquelle weist einen abweichenden Chemismus sowie eine höhere Mineralisierung auf. Die elektrische Leitfähigkeit variierte zwischen 238 und 265 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die ermittelten Urankonzentrationen bewegten sich zwischen 15,3 und 18,1 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Abbildung 52) und lagen somit etwas niedriger als jene der Kaiser-Franz-Josef-Quelle. Aluminium und Zink sind die einzigen Metalle, die mitunter in Konzentrationen knapp über den jeweiligen Bestimmungsgrenzen detektiert werden konnten.

Abbildung 52: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der Puffquelle und der Kaiser Franz Josef Quelle

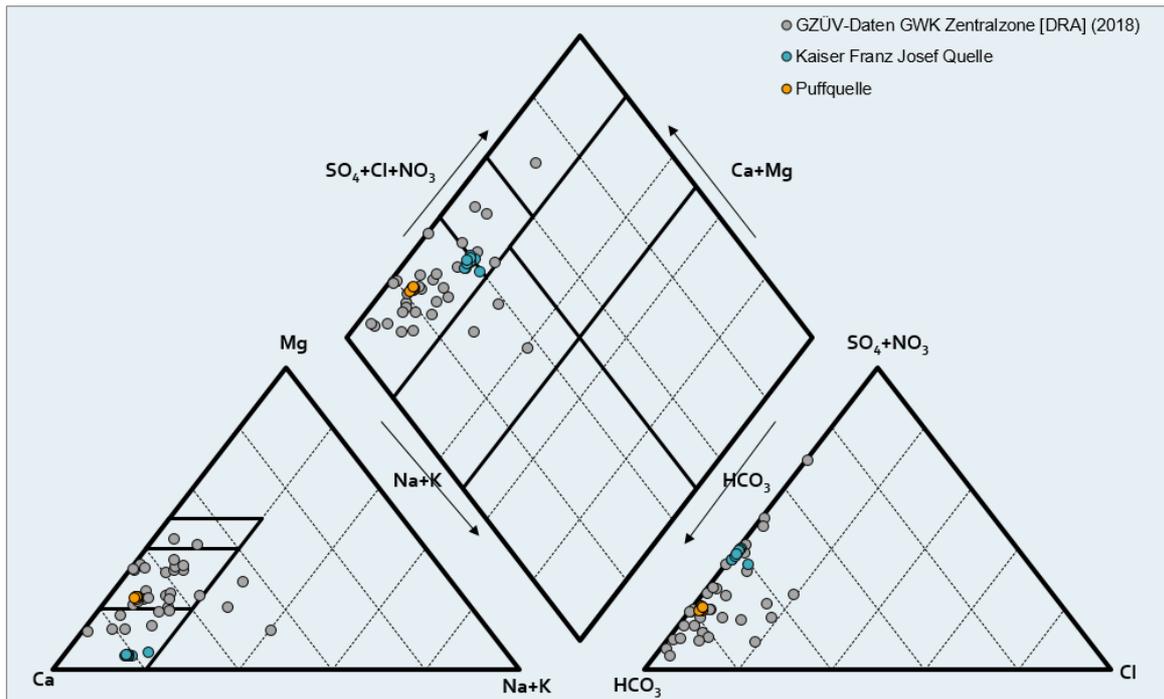


Quelle: Umweltbundesamt

Die Zusammenschau der Daten des Grundwassermonitorings sowie der Voruntersuchungen zeigt, dass die gemessenen Urankonzentrationen keinen nennenswerten jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Die Urankonzentrationen wurden sowohl in der Gesamtphase als auch in der gelösten Phase bestimmt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Phasen festgestellt werden. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass Uran nahezu vollständig gelöst vorliegt.

Die Messstellen zeigen Unterschiede im Hauptionen-Chemismus (Abbildung 53), liegen im Wesentlichen jedoch innerhalb jener Bandbreite, die durch die GZÜV-Messstellen des Grundwasserkörpers aufgespannt wird.

Abbildung 53: Hauptionen des Grundwassers für die Puffquelle, Kaiser Franz Josef Quelle und die GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Zentralzone [DRA]



Quelle: Umweltbundesamt

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings können messstellenbezogen dem Anhangsband Kapitel 4.1 entnommen werden.

5.2.3.2 Ultrapurenanalytik

Die Metalle der Seltenen Erden konnten weder bei der Kaiser-Franz-Josef-Quelle noch bei der Puffquelle detektiert werden. Dies gilt auch für die Platingruppenelemente, Gold und Silber. Schwefel, Silicium, Strontium, Antimon, Barium, Molybdän, Lithium und Rubidium wurden in allen Proben nachgewiesen. Die Konzentrationen von Schwefel, Silicium und Strontium lagen signifikant niedriger verglichen mit den Probenahmestellen der Porengrundwasserstandorte.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Ultraspurenanalytik für die Metalle der Seltenen Erden, die Elemente der Platingruppe, Silber, Gold und eine Fülle weiterer Spurenelemente kann dem Anhangsband in Kapitel 7 entnommen werden.

5.2.4 Fazit

Im Zuge des Grundwassermonitorings im Jahr 2018 an der Kaiser Franz Josef Quelle I und II sowie der Puffquelle wurden Urankonzentrationen von maximal 27 µg/l bzw. 18,1 µg/l gemessen. Die Urangehalte in der Gesamtphase und in der gelösten Phase zeigten keine signifikanten Unterschiede, d.h. dass Uran nahezu vollständig gelöst im Grundwasser vorliegt. Die gemessenen Urankonzentrationen zeigten keine nennenswerten jahreszeitlichen Schwankungen. Für die weiteren untersuchten Parameter lagen keine Auffälligkeiten vor.

Gesteinsuntersuchungen mit dem Elektronenmikroskop zeigen bei beiden Kärntner Standorten das Vorkommen von Mikro-Uranmineralisationen auf, die ursächlich mit den erhöhten Urangehalten in den Quellwässern in Zusammenhang zu sehen sind. So ist das Uran bei dem Orthogneis von Flattach an Epidot, Thorit und Zirkon gebunden, untergeordnet an Monazit, Allanit und Titanit. Der Urangehalt im Gestein liegt hierbei bei 9,3 ppm und die erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser dürften hauptsächlich auf die Freisetzung aus Epidot und Thorit zurückzuführen sein. Bei den Gneisen aus Mallnitz ist Uran neben Epidot und Thorit an metamikte Zirkone, Monazit, Allanit und untergeordnet Titanit, Uraninit, Coffinit und Xenotim gebunden. Hierbei wurden im Gestein Urangehalte zwischen 2,0 und 6,9 ppm festgestellt. Im Grundwasser sind die hohen Urankonzentrationen auf Freisetzung aus metamikten Zirkonen, die oft an Rissen in Hauptmineralen liegen, und Thorite mit auffällig hohen Urangehalten zurückzuführen.

Bei der ergänzenden Ultraspurenanalytik wurden keine Metalle der Seltenen Erden und Platingruppenelemente nachgewiesen. Bei den weiteren Elementen sind erhöhte Konzentrationen von Molybdän (10,6 bis 16,6 µg/l) zu erwähnen. Höchstwahrscheinlich ist das Molybdän im gegebenen hydrogeologischen Setting auf die Lösung aus Sulfiden zurückzuführen (vgl. Smedley & Kinniburgh, 2017).

5.3 Steiermark

5.3.1 Überblick

Zur Geologie im Raum Hohentauern und Kalwang

Im Gebiet von Hohentauern sowie in der Umgebung von Kalwang treten Gesteine der Rannachserie auf. Die Auswahl dieses Gebietes als Untersuchungsraum beruht darauf, dass in diesem Gebiet mehrfach Vorkommen von U-Cu-haltigen Mineralen aufgefunden wurden, die an die Serizitquarzite gebunden sind (Weber, 1997, S. 385). Diese Gesteine sind eine sedimentäre Abfolge, die postvariszisch auf dem Basement des Silvretta-Seckau-Deckensystems abgelagert wurden. Die Rannachserie lässt sich mit wenigen Unterbrechungen vom Raum Rottenmann bis Bruck an der Mur als Bedeckung dieses Basements verfolgen. Im Abschnitt der Triebener und Seckauer Tauern liegen die Metasedimente zumeist auf Orthogneisen, untergeordnet auf Paragesteinsserien des Basements. Im Rennfeld-Mugel-Zug der Gleinalpe unterlagern Paragneise. Die größte Verbreitung erreicht die Rannachserie im Gebiet vom Schoberpass bis Mautern im Liesingtal.

In der Rannachserie treten folgende Gesteine auf: Serizit-Quarzschiefer, Serizit-Quarzite, Quarzite, Phyllite und Quarzkonglomerate. Der Ablagerungszeitraum wird als permisch-untertriassisch betrachtet. Die Gesteine sind grünschieferfaziell überprägt. Die unterlagernden Orthogneise zeigen eine inhomogene Typenvielfalt. Es treten biotitreiche Flasergneise, Granodioritgneise, Muskowitfführende Gneise sowie allgemein teils intensiv verschieferte/vergneiste Gneise auf (Scharbert, 1980, S. 369 f). Nach Metz (1976, S. 157) ist eine „eigentliche Kernmasse“ im Sinne eines „massigen Plutonkörpers“ nicht vorhanden. Die eintönigen Paragesteine sind bevorzugt Biotitschiefer, Plagioklasgneise und quarzitisches Gneise.

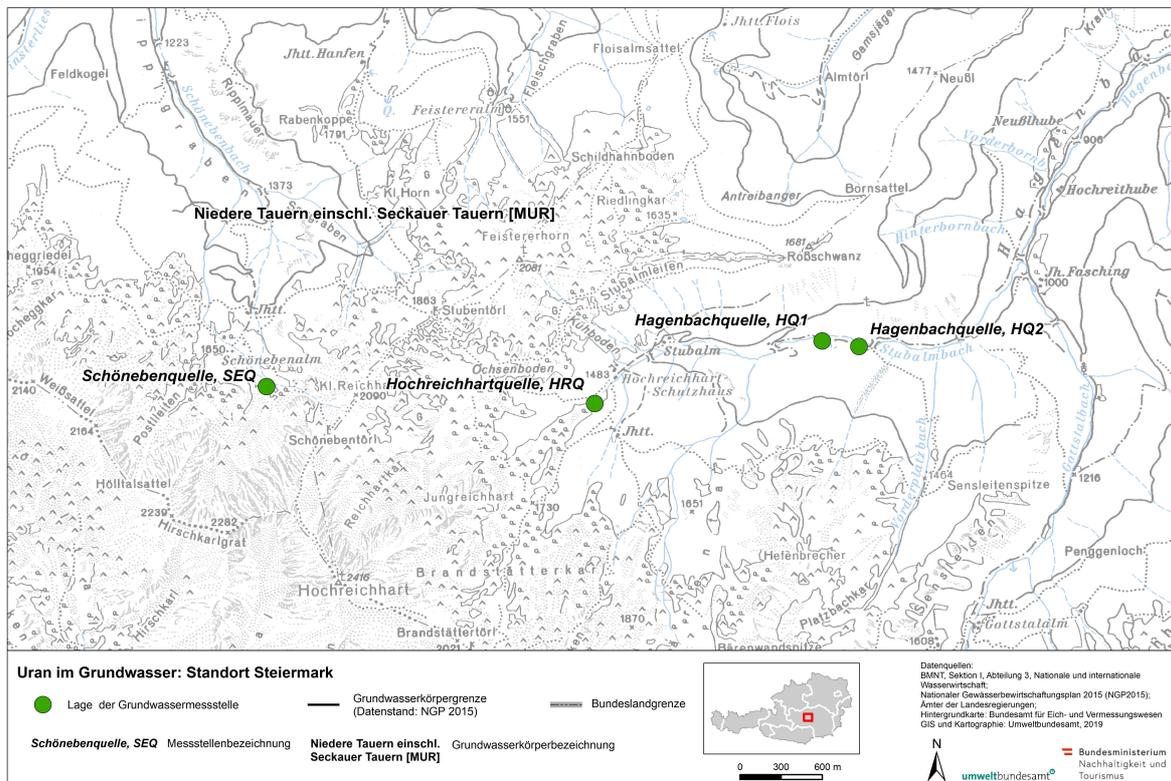
Hagenbachtal/Seckauer Tauern

Das Hagenbachtal durchquert die Rannachserie in einer Breite von ca. 3,5 km. Die Rannachserie lagert in diesem Gebiet „auffallend flach über den Seckauer Gneisen“ (Metz, 1980, S. 2). Im Bereich des Stubenbachgrabens grenzt die Rannachserie an den Granitgneis. Metz (1980, S. 3) beschreibt die diskordant den Gneisen auflagernde Transgressionsserie von einem nahegelegenen Gebiet. Darin treten über dunklen Schiefen mit Cu-Vererzungen reichlich Konglomerate, karbonatführende Quarzite und dunkelgraue Serizitschieferlagen auf. Die Gneise sind jene, die auch den Gipfel des Hochreichart (2416 m) aufbauen und bestehen aus Biotitgraniten, Gneisgraniten und grobkristallinen Kalifeldspat führenden Flasergneisen. Schermaier et al. (1997, S. 325) klassifizieren den Hochreichartgneis als

porphyritischen Augengneis von grandioritischer Zusammensetzung mit einem Kalifeldspatanteil von 20 % und von Quarz mit 37 %. Der SiO₂-Gehalt liegt zwischen 68 und 70 %. Neben dem Hochreichtgneis treten auch helle, biotitarne Gneise auf, die Metz als R Gneise bezeichnete und ursprünglich noch zur Rannachserie zählte, heute jedoch zu den Granitgneisen zu stellen sind (Scharbert 1980, S. 370). Paragesteine in Form von Biotitschiefer sind in diesem Abschnitt der Seckauer Tauern nur vereinzelt zu finden.

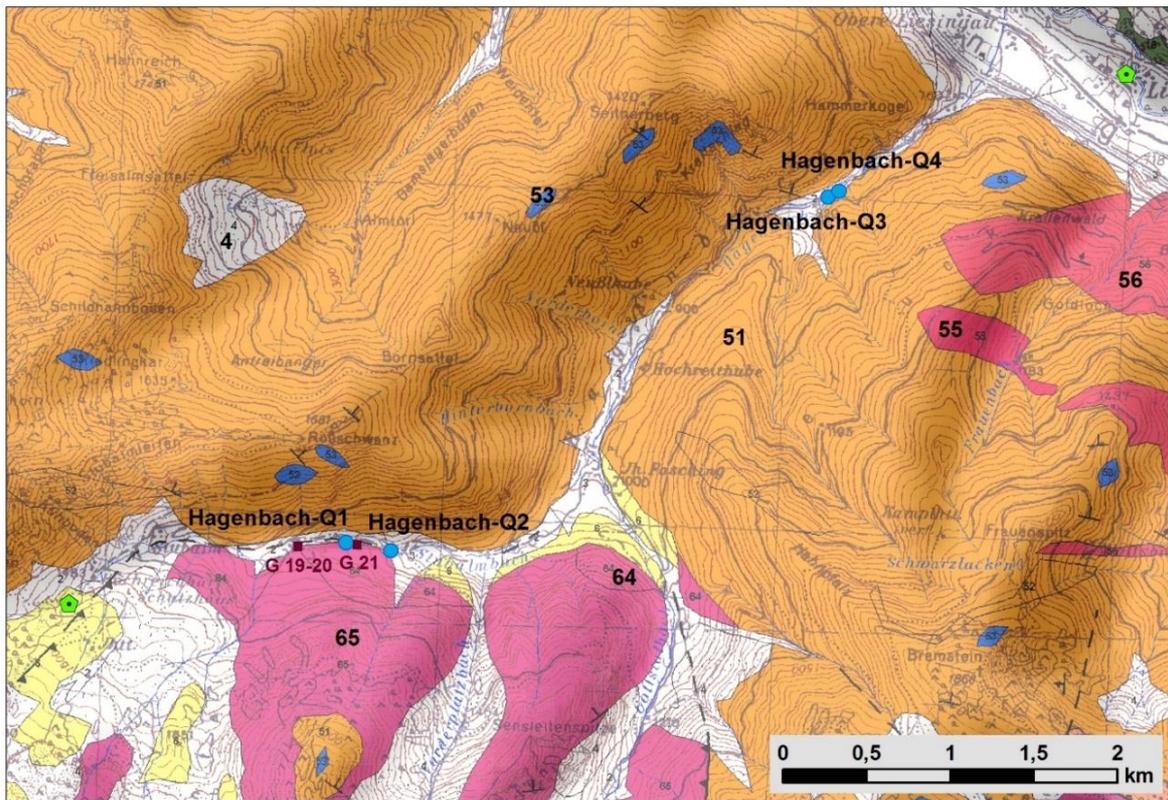
Ebner & Göd (1997, S. 385) nennen als Uranträger in der Rannachserie eine große Zahl von sekundären Uran- und Kupfermineralen, die grundsätzlich an die Serizitquarzite gebunden sind, aber auch in den Konglomeraten auftreten können. Aus Schermaier et al. (1997, S. 329) ergibt sich der Medianwert des Urangelhalts von 7 granitoiden Gesteinen aus dem Seckau-Bösenstein-Massiv mit 3,2 ppm und einem Maximalwert von 8,8 ppm.

Abbildung 54: Lageplan Untersuchungsgebiet Hagenbachtal/Seckauer Alpen mit den Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, Hochreichtquelle HRQ1 und Schönebenquelle SEQ in der Steiermark



Quelle: BEV, Umweltbundesamt

Abbildung 55: Geologie im Hagenbachtal mit Lage der Probenahmestellen Hagenbachquellen HQ1 und HQ2

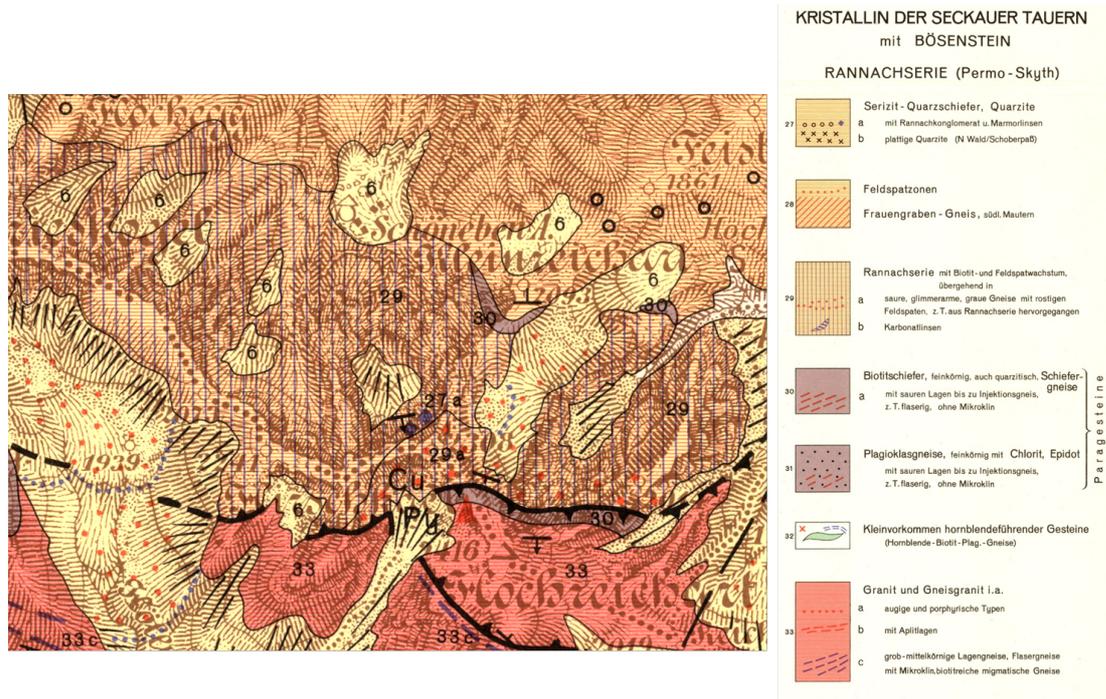


<table border="0"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: white; text-align: center; line-height: 20px;">4</td> <td>Hangschutt, Schutthalde (teilweise Würm)</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: orange; text-align: center; line-height: 20px;">51</td> <td>Rannach-Serie i.a., Quarzite, Serizitquarzit, Serizitphylit</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: blue; text-align: center; line-height: 20px;">53</td> <td>Marmorlinsen</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: red; text-align: center; line-height: 20px;">55</td> <td>Saure, glimmerarme Gneise mit feldspatreichen Zonen</td> </tr> </table>	4	Hangschutt, Schutthalde (teilweise Würm)	51	Rannach-Serie i.a., Quarzite, Serizitquarzit, Serizitphylit	53	Marmorlinsen	55	Saure, glimmerarme Gneise mit feldspatreichen Zonen	<table border="0"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: pink; text-align: center; line-height: 20px;">56</td> <td>Frauengraben-Gneis, südlich Mautern</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: magenta; text-align: center; line-height: 20px;">64</td> <td>Granit und Gneisgranit i.a. (Kristallin der Seckauer Tauern)</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; background-color: darkpink; text-align: center; line-height: 20px;">65</td> <td>Granit und Gneisgranit, Lagengneise und Flasergneise (Kristallin der Seckauer Tauern)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td>GZÜV-Messstelle</td> </tr> </table>	56	Frauengraben-Gneis, südlich Mautern	64	Granit und Gneisgranit i.a. (Kristallin der Seckauer Tauern)	65	Granit und Gneisgranit, Lagengneise und Flasergneise (Kristallin der Seckauer Tauern)		GZÜV-Messstelle
4	Hangschutt, Schutthalde (teilweise Würm)																
51	Rannach-Serie i.a., Quarzite, Serizitquarzit, Serizitphylit																
53	Marmorlinsen																
55	Saure, glimmerarme Gneise mit feldspatreichen Zonen																
56	Frauengraben-Gneis, südlich Mautern																
64	Granit und Gneisgranit i.a. (Kristallin der Seckauer Tauern)																
65	Granit und Gneisgranit, Lagengneise und Flasergneise (Kristallin der Seckauer Tauern)																
	GZÜV-Messstelle																

Quelle: Geologische Bundesanstalt

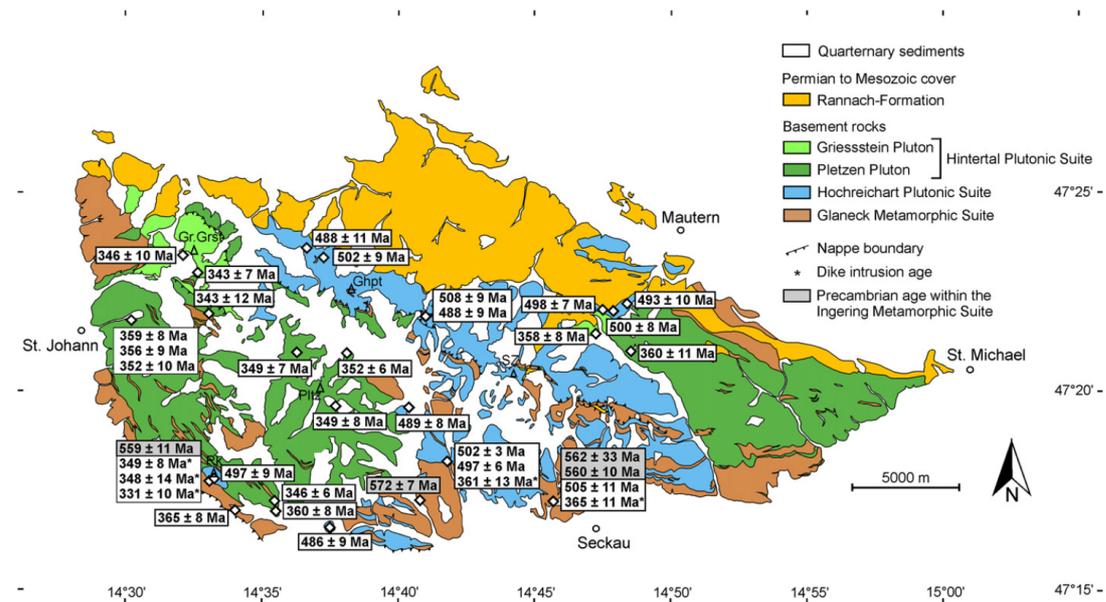
Aus dem Blockgletscher bei der Schönebenalm entspringt die Schönebenquelle, die im Rahmen des Projekts "RGHeavyMetal" (Wagner et al., 2019) mehrfach beprobt wurde und in der leicht erhöhte Urangelhalte festzustellen waren. Daher und aufgrund der direkten Nachbarschaft zum Hagenbachtal wurde dieser Standort nachträglich in die Betrachtungen mitaufgenommen (Lage: siehe Abbildung 54). Ein Lokalaugenschein im Rahmen des gegenständlichen Projekts ergab, dass dieser Blockgletscher aus einem Orthogneis besteht. Dieser wurde von Metz (1967) noch nicht als solcher erkannt, sondern als metamorphe Rannachserie mit Biotit- und Feldspatwachstum eingeschätzt (siehe Abbildung 56). Mandl et al. (2018) stellten diesen Orthogneis zur Hochreichart Plutonic Suite (siehe Abbildung 57).

Abbildung 56: Geologische Karte Blatt Oberzeiring-Kalwang (Metz, 1967)



Quelle: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 57: Geologische Übersichtskarte zu den Seckauer Alpen (Mandl et al., 2018)



Quelle: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 58: Aufschluß Rannachserie im Hagenbachtal.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 59: Granitgneis Stubenbachgraben (G21)



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

5.3.2 Grundwasseruntersuchungen

Die beiden Hagenbachquellen, die Hochreichartquelle sowie die Schönebenquelle (Lage: siehe Abbildung 54) wurden zwischen März 2018 und März 2019 siebenmal bzw. sechsmal beprobt. Die Beprobungen erfolgten durch das Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz, die Analysen durch das Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Zusätzlich erfolgte im Herbst 2018 durch das Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz die Probenahme für die ICP-SFMS Ultraspurenanalyse der Universität für Bodenkultur Wien/Abteilung für Analytische Chemie.

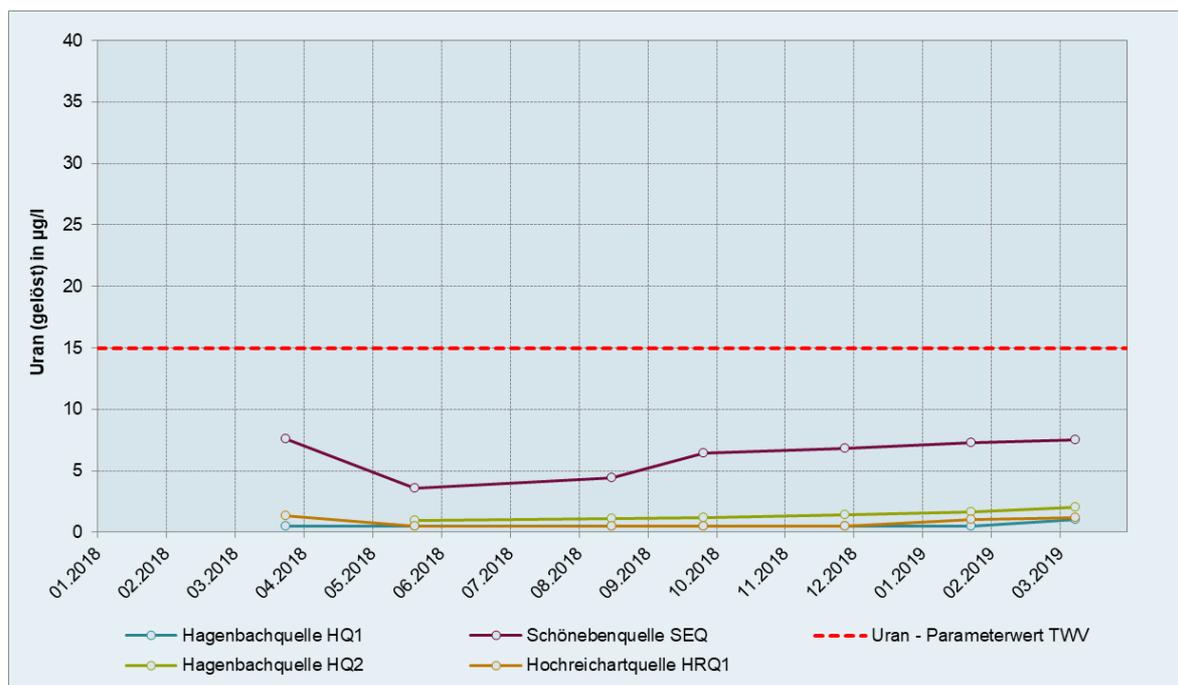
5.3.2.1 Grundwassermonitoring

Die vier untersuchten steirischen Quellen zeichneten sich durch eine sehr geringe Mineralisierung aus. Die elektrische Leitfähigkeit betrug maximal $100 \mu\text{S}/\text{cm}$. Der Chemismus der Quellen zeigte geringfügige Unterschiede (Abbildung 61). Insgesamt lagen die

Quellwässer jedoch innerhalb jener Bandbreite, die durch die GZÜV-Messstellen des Grundwasserkörpers aufgespannt wird.

Die Urankonzentrationen der Quellen lagen durchwegs deutlich unterhalb des Parameterwertes der Trinkwasserverordnung (Abbildung 60). Die mit 3,62 bis 7,61 µg/l höchsten Urangelhalte wurden an der Schönebenquelle (SEQ) erhoben. An der Hagenbachquelle 2 (HQ2) wurden Urangelhalte zwischen 1 und 2,02 µg/l gemessen. An der Hagenbachquelle 1 (HQ1) wurde Uran einmalig 1,01 µg/l detektiert, alle anderen Messungen lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 1 µg/l. An der Hochreichtquelle (HRQ1) konnten bei drei Messungen Uran in Konzentrationen zwischen 1,06 und 1,35 µg/l quantifiziert werden, die übrigen Messungen lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Abbildung 60: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, der Hochreichtquelle HRQ1 und der Schönebenquelle SEQ



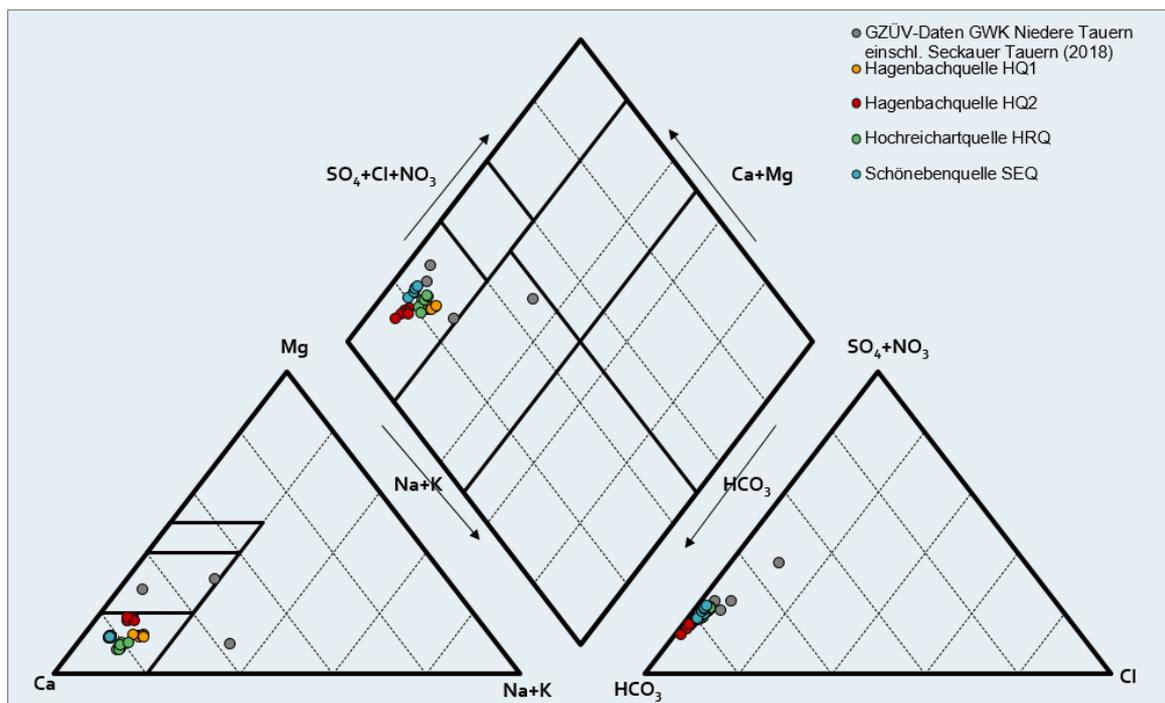
Quelle: Umweltbundesamt

Für die Schönebenquelle (SEQ) waren nicht nur die höchsten Urangelhalte zu verzeichnen, sondern auch auffällige Arsenkonzentrationen, die mit Werten zwischen 11,0 und 14,5 µg/l den Schwellenwert der QZV Chemie Grundwasser für Arsen von 9 µg/l überschreiten. Die Arsenkonzentrationen der Hagenbachquelle 1 (HQ1) sowie Hagenbachquelle 2 (HQ2)

erreichen maximal 1,13 µg/l bzw. 1,8 µg/l. An der Hochreichtartquelle (HRQ1) wurde ein maximaler Arsengehalt von 4,4 µg/l detektiert.

Die Zusammenschau der Daten des Grundwassermonitorings sowie der Voruntersuchungen zeigt, dass die gemessenen Urankonzentrationen keinen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Die Urankonzentrationen wurden sowohl in der Gesamtphase als auch in der gelösten Phase bestimmt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Phasen festgestellt werden. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass Uran nahezu vollständig gelöst vorliegt.

Abbildung 61: Hauptionen des Grundwassers für die Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, Hochreichtartquelle HRQ1, Schönebenquelle SEQ und die GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Niedere Tauern einschl. Seckauer Tauern [MUR]



Quelle: Umweltbundesamt

In den Quellwässern wurden mitunter stark variierende Eisenkonzentrationen (Gesamtgehalte) gemessen, die sich auf jahreszeitliche Schwankungen bzw. unterschiedliche Quellschüttungen zurückführen lassen. Die Gesamtgehalt der Eisenkonzentrationen lagen im Bereich von <2–8,07 µg/l (Hagenbachquelle HQ1), <2–232 µg/l (Hagenbachquelle HQ2), <2–8,74 µg/l (Hochreichtartquelle) und <2–40,9 µg/l (Schönebenquelle SEQ). Der Indikatorwert

der Trinkwasserverordnung für Eisen von 200 µg/l wurde an der Hagenbachquelle HQ2 bei der Beprobung im Februar 2019 überschritten.

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings können messstellenbezogen dem Anhangsband Kapitel 5.1 entnommen werden.

5.3.2.2 Ultrapurenanalytik

Signifikante Vorkommen an den Metallen der Seltenen Erden wurden bei der Hagenbachquelle HQ1 sowie der Hochreichtquelle gemessen. Die Chondriten-normalisierten Häufigkeiten zeigen für beide Quellen eine stark negative Cer- und Europium-Anomalie und tendenzielle Abreicherung der schweren Seltenen Erden.

Schwefel, Silicium, Strontium, Antimon, Barium und Molybdän wurden in allen Proben nachgewiesen.

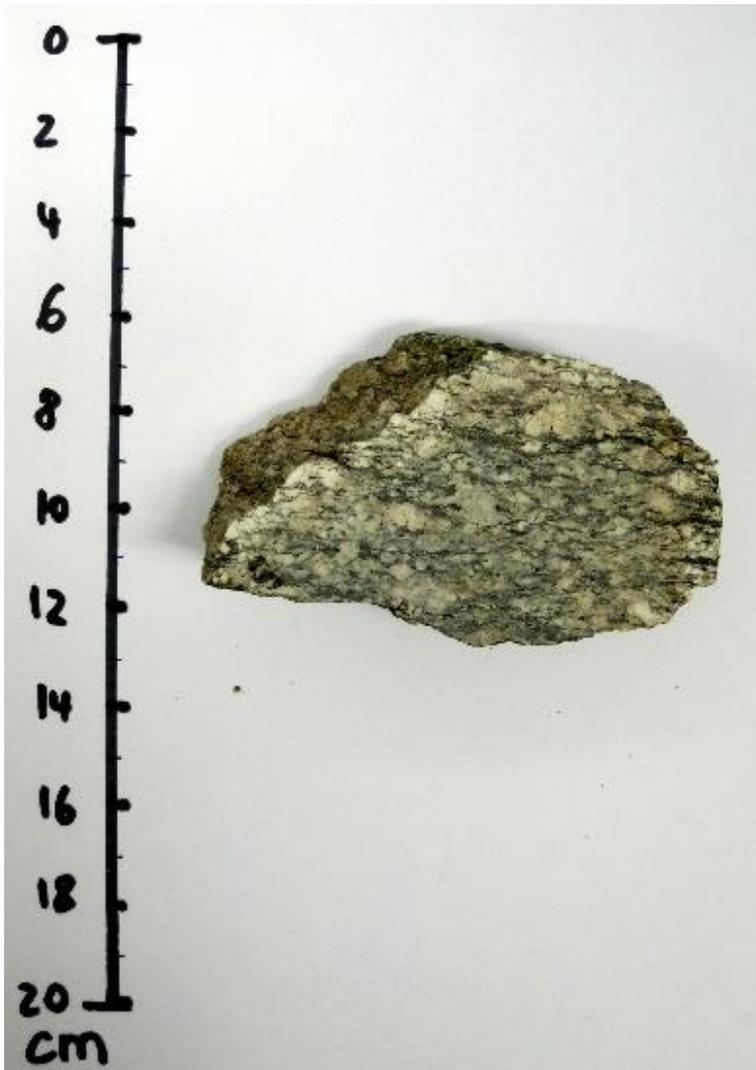
Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Ultrapurenanalytik für die Metalle der Seltenen Erden, die Elemente der Platingruppe, Silber, Gold und eine Fülle weiterer Spurenelemente kann dem Anhangsband Kapitel 7 entnommen werden.

5.3.3 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

Proben und Präparate: H1, H3 (Handstücke); 632 (Rückstellprobe), 633 (polierter Dünnschliff); 327, 328 (abgedeckter Dünnschliff)

Beschreibung des Handstücks H1: Das Handstück H1 aus dem Hagenbachtal ist ein granitischer Gneis. Das Gefüge ist grobkörnig mit vielen Feldspat-Augen mit einem durchschnittlich 1 mm bis 5 mm und vereinzelt bis 1 cm großem Durchmesser. Die Biotitlagen sind leicht um die Feldspäte eingeregelt.

Abbildung 62: Handstück H1 aus dem Hagenbachtal



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 327:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (25 %), Plagioklas (30 %), Quarz (20 %), Muskowit (10 %), Biotit (10 %), und als Nebengemengeteile (5 %) sind Granat, Klinozoesit, Chlorit, Serizit und Kalzit zu verzeichnen.

Tabelle 26: Modalbestand des Dünnschliffs 327

Schätzung	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Bioitit (%)	Muskowit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	23,07	34,98	31,88	2,48		5,93	99,25
Catanorm	25,04	36,96	39,27			7,71	110,54
Debon + Le Fort	59,39 (Kalifeldspat + Plagioklas)		30,41	10,2			100
Schätzung	25	30	20	10	10	5	100

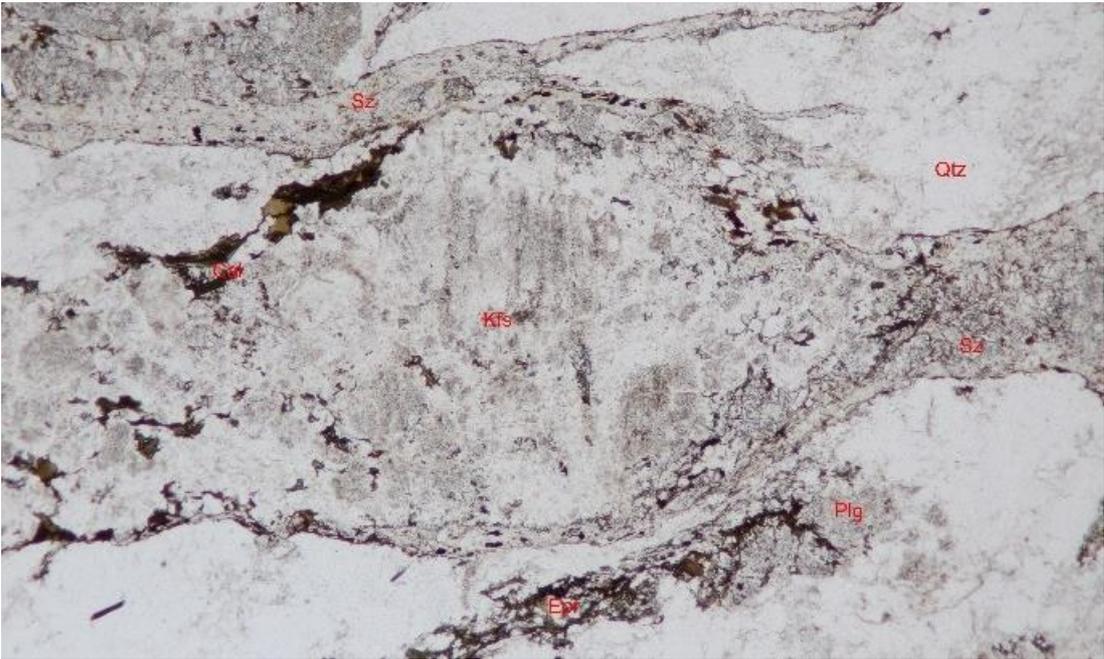
Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die Matrix aus Plagioklas, Quarz und Kalifeldspat mit etwas Muskowit und Biotit ist feinkörnig und leicht eingeregelt. Große Kalifeldspat-Augen, teilweise mit Karlsbader Zwillingen und Plagioklas-Einsprenglinge treten häufig mit einer Größe bis zu 5 mm auf. Der Kalifeldspat ist perthitisch, mit Einschlüssen und liegt oft in Vergesellschaftung mit Plagioklas vor. Teilweise bildet Kalifeldspat zusammen mit Quarz und Plagioklas Linsen, die von Glimmermineralen umdrungen sind.

Der Quarz tritt mikroskopisch in Form polykristalliner Aggregate auf. Teilweise sind undulöse Quarzlinsen mit granoblastischer Textur in das Gefüge eingeregelt. Man kann daraus schließen, dass der Quarz während der alpidischen Metamorphose zerkleinert wurde und anschließend rekristallisiert ist. Plagioklas enthält viele Einschlüsse und mehrfach Verzwilligungen. Nicht selten tritt Plagioklas als fast komplett sericitisierte Pseudomorphose auf (siehe Abbildung 63).

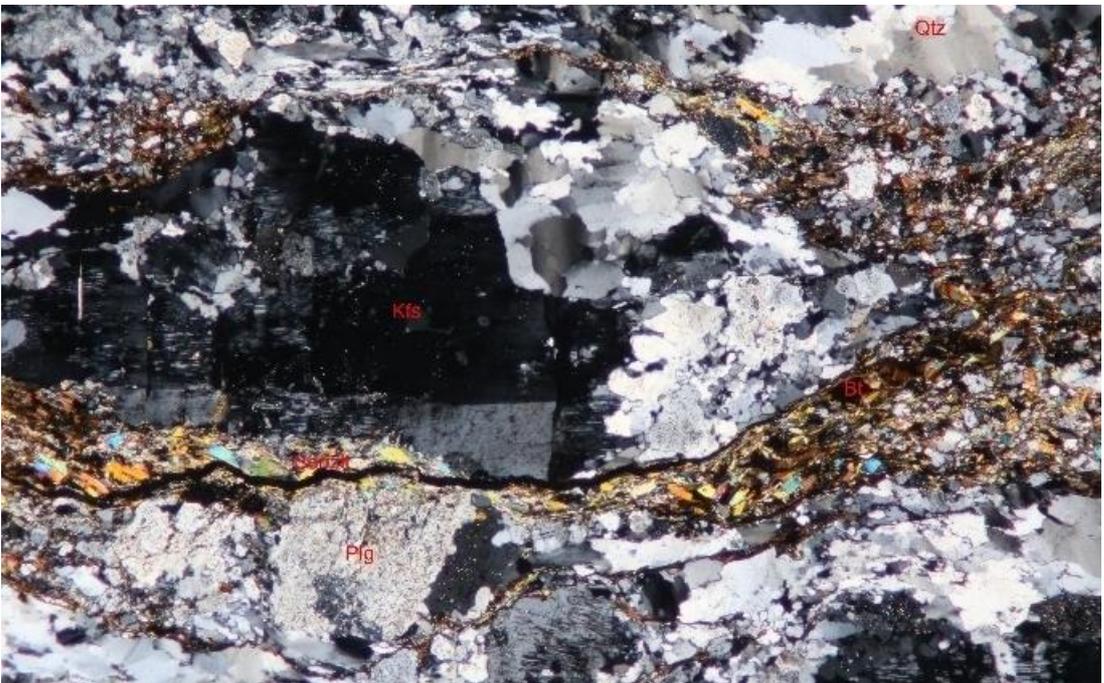
Biotit ist teilweise chloritisiert. Muskowit, Serizit, teilweise Epidot und weiteren Akzessorien (Apatit) durchziehen in Bändern eingeregelt die Matrix. Leukoxen ist ebenfalls vorhanden (Gemenge aus eisen- und titanhaltigen Mineralen: Hämatit, Titanit, Rutil usw.).

Abbildung 63: Schliff 327 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 64: Schliff 237 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Glimmerminerale und Serizit sind um ein Kalifeldspat-Auge eingeregelt (siehe Abbildung 63 und Abbildung 64).

Der Quarz ist amöbenartig oft in Subkörner zerkleinert (u.a. am Rand der Linsenförmigen Struktur neben dem Kalifeldspat); Plagioklas enthält viele Einschlüsse (z.B. Serizit).

Beschreibung des Handstücks H3: Das Handstück H3 aus dem Hagenbachtal ist ebenfalls ein granitischer Gneis und ähnelt stark dem Handstück H1. Vergleichsweise hat dieses Handstück etwas mehr Biotit, was das Gestein dunkler wirken lässt. Die Foliation ist etwas weniger stark ausgeprägt und die Kalifeldspat-Augen sind 0,2 mm bis zu 2 cm groß.

Abbildung 65: Handstück H3 aus dem Hagenbachtal



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 328:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (20 %), Quarz (25 %), Plagioklas (30 %), Biotit (10 %), und als Nebengemengeteile (5 %) sind Chlorit, Muskowit, Serizit, Saussurite, Kalzit und Epidot zu verzeichnen.

Tabelle 27: Modalbestand des Dünnschliffs 328

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Muskowit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	25,02	33,38	30,77	2,31		6,25	98,87
Catanorm	26,97	35,12	28,46			8,16	101,62
Debon + Le Fort	61,06 (Kalifeldspat + Plagioklas)		29,03	9,91			100
Schätzung	20	30	25	10	10	5	100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (2-2,9 %), Korund (2,8-3,4 %), Kalzit (1,2 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (1,6 %) zusammen.

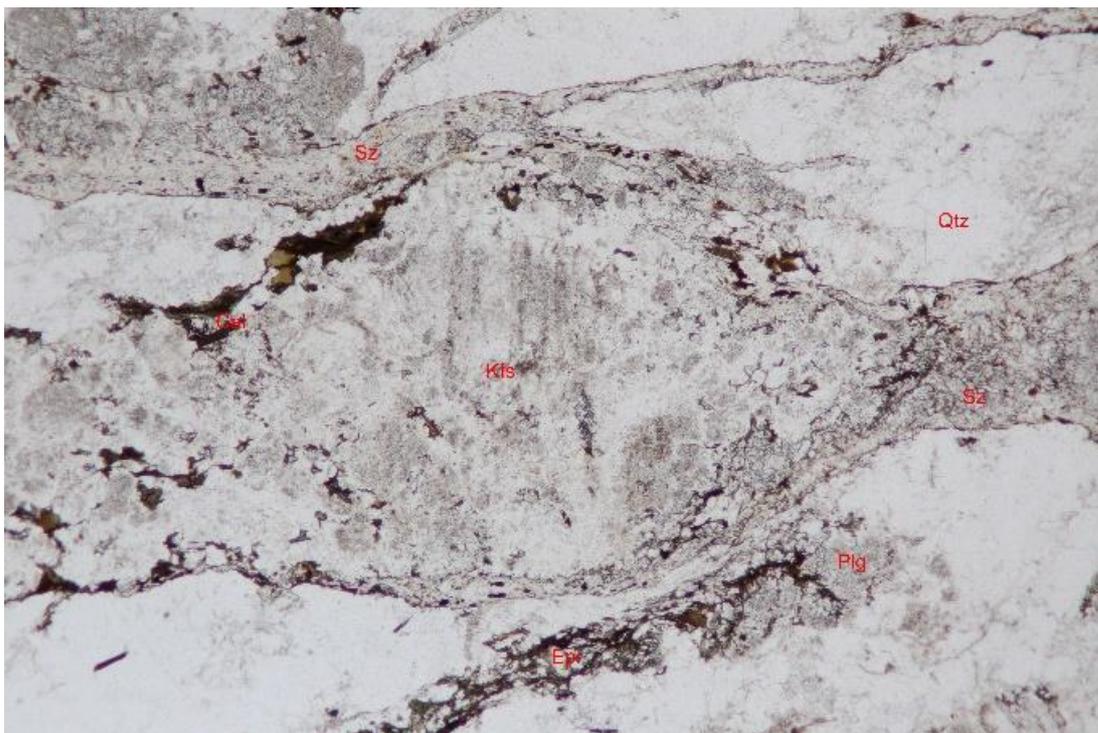
Der Dünnschliff 328 ähnelt stark dem Dünnschliff 327 aus dem Hagenbachtal. Die Kalifeldspäte sind makroskopisch bis zu 8 mm groß. Mikroskopisch ist zu erkennen, dass die optisch großen Kalifeldspäte zu kleinen Kalifeldspäten in Vergesellschaftung mit Quarz und Plagioklas zerkleinert sind. Die einzelnen Kalifeldspäte sind mikroskopisch im Durchschnitt 0,3 mm groß, teilweise stärker umgewandelt und vereinzelt einfach verzwillingt (Karlsbader).

Die Saussuritisierung des Plagioklases ist weiter fortgeschritten. Die Plagioklase sind fast immer vollständig überprägt. Nur vereinzelt sind hypideomorphe Körner oder Verzwilligungen im Plagioklas erkennbar. Der Quarz ist oft linsenförmig, undulös und in Subkörner zerkleinert mit einer granoblastischer Textur. Vergleichsweise mit dem vorherigen Schliff tritt Quarz in Clusten oder Linsenförmig öfters auf. Die Glimmerminerale und Chlorit sind in den Fließstrukturen und überwiegend xenomorph. Pleochroitische Höfe sind beim Biotit zu erkennen. Teilweise ist der Biotit chloritisiert. Muskowit und Serizit sind als

sekundäre Minerale und überwiegend um die Kalifeldspatäugen, in Rissen und als Einschlüsse vorhanden.

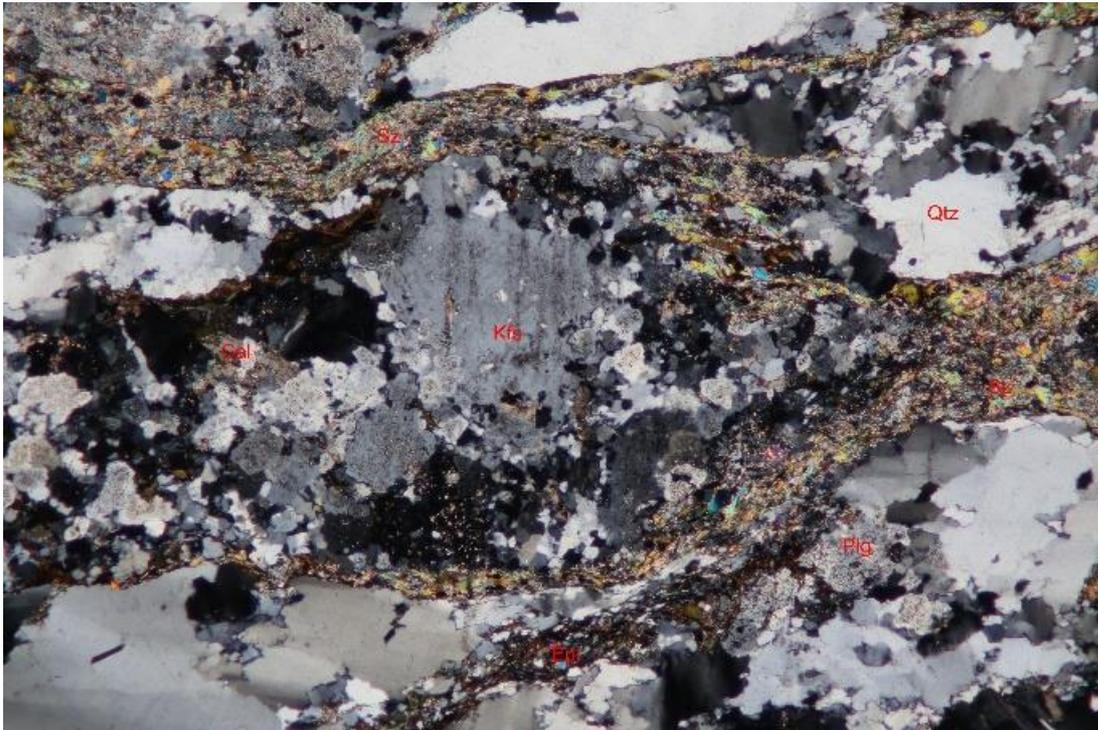
Akzessorien wie Epidot treten vereinzelt auf. Opake Einschlüsse und bräunliche Alteration an den Korngrenzen sind erkennbar.

Abbildung 66: Schliff 328 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 67: Schliff 328 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen ein in Subkörner zerkleinertes Kalifeldspat-Auge, das von Serizit umdrungen wird; der Quarz (Qtz) ist ebenfalls stark deformiert und in Subkörner zerkleinert und löscht undulös aus.

Zusammenfassung: Die Orthogneisproben aus dem Hagenbachtal (H1 und H3) weisen einen Urangehalt von 4 und 3 ppm auf (Tabelle 21). Die REM-Untersuchung (Präparat 633) zeigt auf, dass der Urangehalt bevorzugt an Uraninit, Epidot, Thorit, Coffinit, Xenotim und untergeordnet an Zirkon und Monazit gebunden ist. Die höchsten Urankonzentrationen haben dabei Thorit mit zumeist weniger als 15 Gew.%, mitunter aber bis 30 Gew.%, Uraninit mit 80-90 Gew.% und Coffinit mit 35 bis 50 Gew.% U.

Im Orthogneis der Schönebenalm ist das Uran (4 ppm; siehe Tabelle 21) vorwiegend an die Minerale Thorit, Epidot/Allanit/Zoisit, untergeordnet Zirkon, Xenotim, Monazit, Uranini gebunden. Hohe Urankonzentrationen weisen die Minerale Thorit (bis 10 Gew.% U) und Uraninit (80-85 Gew.%) auf.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 5.3 enthalten. Neben

Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 5.3 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährender Anteil
- UO₂-Gehalte (Gew. %) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

In der Steiermark wurden neben den Einzugsgebieten der im Rahmen des Grundwassermonitorings untersuchten Quellen im Gebiet Hagenbachtal/Seckauer Tauern weitere Gebiete in folgenden Regionen detaillierten gesteins- und mineralchemischen Untersuchungen, deren Ergebnisse dem Anhangsband Kapitel 5.4 entnommen werden können:

- Hohentauern
- Wald am Schoberpass
- Rettenegg
- St. Kathrein am Hauenstein

5.3.4 Fazit

Die im Zuge des Grundwassermonitorings in den Jahren 2018 bis 2019 an den Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, der Schönebenquelle SEQ und Hochreichartquelle HRQ gemessenen Urankonzentrationen lagen durchweg deutlich unterhalb des Trinkwasserparameterwertes von 15 µg/l. Die mit 7,6 µg/l höchste Urankonzentration wurde an der Schönebenquelle erhoben. An der Hagenbachquelle 2 wurden maximal 2,0 µg/l Uran gemessen, an der Hochreichartquelle maximal 1,4 µg/l. An der Hagenbachquelle 1 wurde Uran einmalig mit 1,0 µg/l detektiert, alle anderen Messungen lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 1 µg/l. Die Urangehalte in der Gesamtphase und in der gelösten Phase zeigten keine signifikanten Unterschiede, d.h. dass Uran nahezu vollständig gelöst im Grundwasser vorliegt. Die gemessenen Urankonzentrationen zeigten keine nennenswerten jahreszeitlichen Schwankungen. Die Arsenkonzentrationen der Schönebenquelle überschritten mit Werten zwischen 11,0 und 14,7 µg/l den Schwellenwert der QZV Chemie Grundwasser von 9 µg/l. Die Arsenkonzentrationen der übrigen Quellen waren unauffällig.

In keinem der sieben untersuchten Kristallgebiete der Steiermark waren Überschreitungen des Parameterwertes von 15 µg/l für Uran im Grundwasser festzustellen. In gleicher Weise wurden an den untersuchten Standorten in Summe weniger Mikro-Uranmineralisationen gefunden als in den weiteren untersuchten Kristallinstandorten in Kärnten und Tirol. Die Urankonzentrationen lagen bei den untersuchten Gesteinen zwischen 0,3 und 4,0 ppm. Trotzdem wurde bei den Gesteinen prinzipiell ein weites Spektrum von Uranmineralen nachgewiesen, nämlich Zirkon, Monazit, Allanit, Epidot, Thorit, Uraninit, Coffinit, Xenotim und ein U-Pb-Fe-Ti-Mineral. Hinsichtlich der Verfügbarkeit von Uran im Grundwasser dürfte allerdings wie bereits angesprochen die Häufigkeit der Minerale, insbesondere jene von Uraninit und Thorit, von entscheidender Bedeutung sein.

Bei der ergänzenden Ultrapurenanalytik wurden sämtliche Metalle der Seltenen Erden im maximal zweistelligen ng/l Bereich nachgewiesen. Bei Berücksichtigung eines normierten Verteilungsmusters ist auffällig, dass eine der oberen Kruste – Abreicherung der schweren Seltenen Erden mit negativer Cer und Europium Anomalie – ähnelnde Signatur vorliegt. Dies bestätigt im Wesentlichen die Forschungsergebnisse von Biddau et al. (2009) zu Gehalten von Seltenen Erden in Grundwässern der Schweiz im alpinen Setting. Bei dieser Studie wurden Gehalte zwischen 10 und 100 ng/l (Summe der Seltenen Erden) und negative Anomalien von Cer und Europium nachgewiesen. Außerdem wurden Platingruppenelemente bei der Ultrapurenanalytik nicht nachgewiesen, und auch weitere Elemente liegen nicht in auffällig erhöhten Konzentrationen vor.

5.4 Tirol

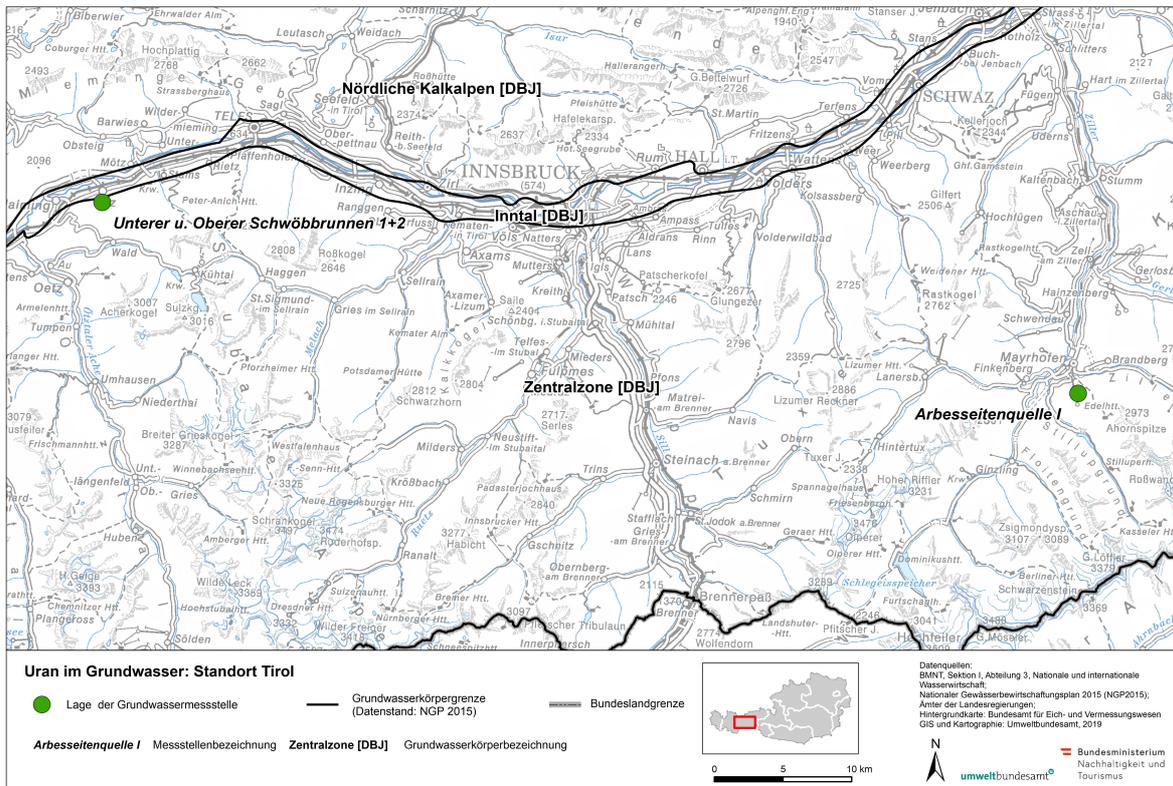
5.4.1 Ahorngneis bei Mayrhofen/Tirol

5.4.1.1 Überblick

Die Arbesseitenquelle 1 ist eine von annähernd 20 Quellen, die überwiegend in dem südlich von Mayrhofen durchziehenden Orthogneiskörper des sog. Ahornkernes liegen (Lage: siehe Abbildung 68). Dieser Orthogneiskern bildet das nördlichst gelegene Gneissmassiv, dem gegen Süd zwei weitere Gneiskerne (Tuxer- und Zillertalerker) folgen, die jeweils durch Metagesteinsserien (Schönach- und Greinermulde) voneinander getrennt sind. Die Gneiskörper sind durch ihre tektonische Überprägung als ENE-WSW-streichende Züge ausgebildet. Der Ahornkern nimmt dabei die tektonisch tiefste Position ein. Beim Ahorngneis handelt es sich nach Thiele (1992, S. 751) um einen Porphygranitgneis. Vesela et al. (2011) rechnen den Ahorngneis zu einer frühvariszischen Intrusionssuite, die sich durch hohe

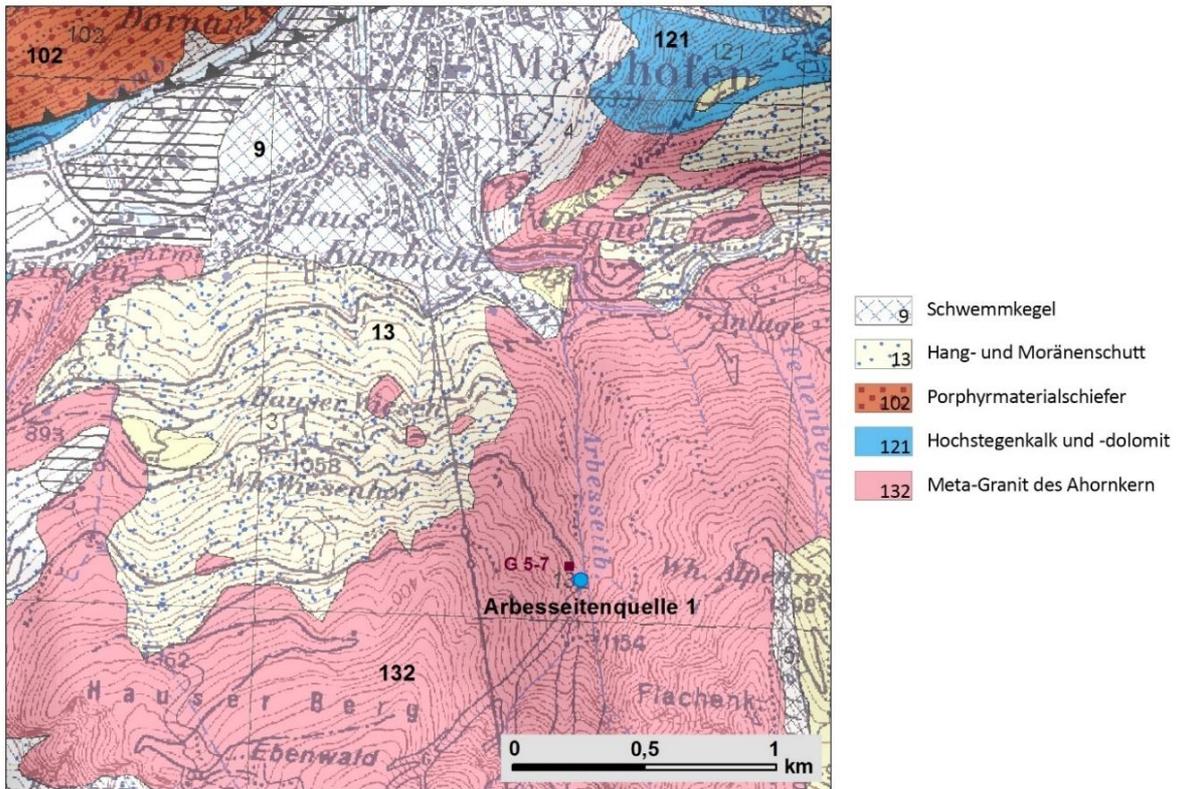
Kaliumgehalte auszeichnet. Weitere geochemische Merkmale weisen auf eine Einbeziehung von Mantelanteilen in der Schmelze hin. In der Literatur findet sich für diese Gesteinstypen der Begriff „Durbachit“, Intrusionsgesteine, die in den europäischen Varisziden nicht selten anzutreffen sind. Vesela et al. (2011, S. 1000) geben den Urangehalt eines porphyrischen Ahorngneisses mit 14 ppm, eines feinkörnigen Typs mit 21 ppm an. Die Siliziumoxidgehalte liegen zwischen 56,5 und 72,3 Gewichtsprozenten.

Abbildung 68: Lageplan Untersuchungsgebiete Mayrhofen und Silz in Tirol



Quelle: BEV, Umweltbundesamt

Abbildung 69: Geologie im Raum südlich Mayrhofen mit Lage der Probenahmestellen.



Quelle: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 70: Zuläufe der beiden Quellstränge



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 71: Quelfassung Arbeseitenquelle 1



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

5.4.1.2 Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

Abbildung 72: Ahorngneis



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

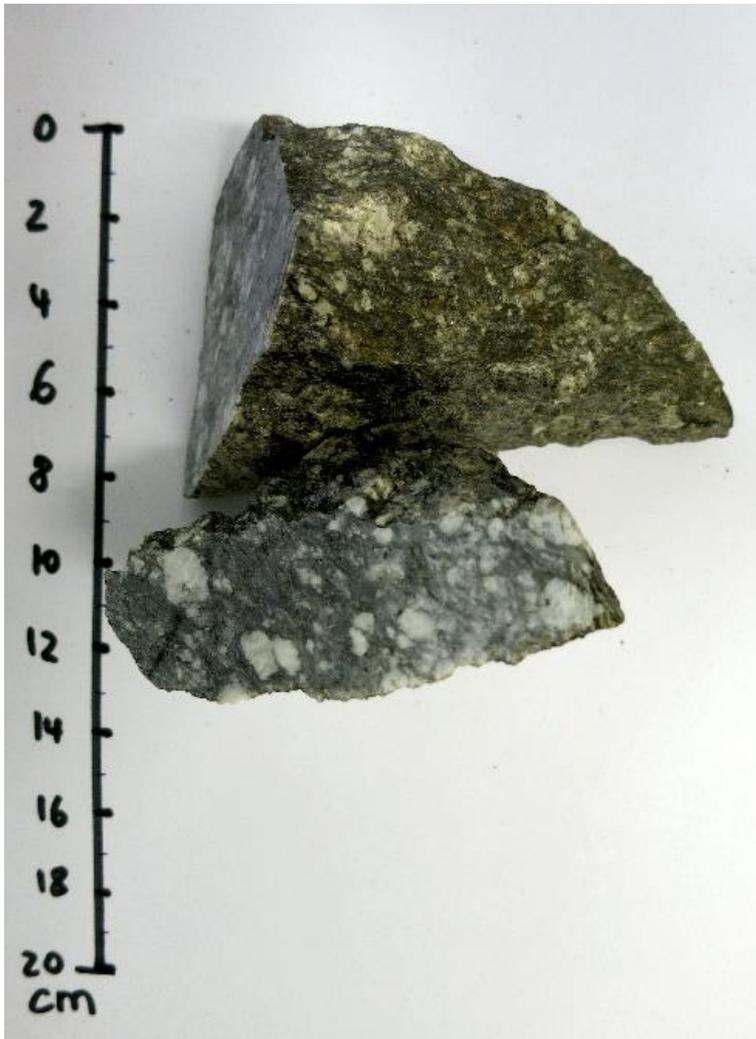
Fundort: Mayrhofen

Proben und Präparate: Aa, Ab, Ac (Handstücke); 622, 623, 624 (polierte Dünnschliffe); 317, 318, 319 (abgedeckte Dünnschliffe)

Angaben aus der Literatur: Frisch (1973, S. 12) beschreibt den Ahorngneis als porphyrkörniger Gneis granitischer Zusammensetzung. Die Granitbildung ist wahrscheinlich variszisch und die biotitreichen Schieferlagen sind parallel zu einer steilen Schieferung eingeordnet. Veslá et al. (2011) zählt den Ahorngneis zu einer frühvariszischen Intrusionssuite, für die hohe Kalium- und hohe Urangehalte typisch sind (prophyrischer Ahorngneis mit 14ppm Uran und feinkörniger Ahorngneis mit 21 ppm). Kupka (1954, S. 2) untersuchte die Gneise des Ahornkerns und beschrieb ein ähnliches mikroskopisches Bild wie jenes von Dünnschliff 317.

Beschreibung des Handstücks Aa: Grobkörniger granitischer Gneis, mit bis zu 1,5 cm großen Kalifeldspat-Augen; die Matrix um die Kalifeldspat-Augen ist mäßig dunkel und feinkörnig.

Abbildung 73: Handstück Aa aus Mayrhofen.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 317:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (25 %), Plagioklase (15 %), Quarz (20 %), Muskowit (Sericit) (15 %), Biotit (15 %) und Kalzit (5 %). Als Nebengemengeteile (5%) sind Akzessorien wie Orthit, Epidot, Zoisit, Klinozoisit, Apatit und opake Minerale zu verzeichnen.

Tabelle 28: Modalbestand des Dünnschliffs 317

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Muskowit (%)	Calcit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	24,97	25,08	25,27	8,37		4,06	9,93	97,68
Catanorm	31,14	25,17	21,38			4,61	17,71	100,01
Debon + Le Fort	66,35 (Kalifeldspat + Plagioklas)		19,2	20,1				100,08
Schätzung	25	15	20	15	15	5	5	100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (2,71-3,82 %), Korund (4,81-6,04 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (6,32 %) und Fluorit (1,03 %) zusammen.

Große porphyrische Kalifeldspat-Augen sind von Glimmermineralen umlagert, welche in einer quarzreichen und stark deformierten Matrix liegen. Die Kalifeldspat-Augen (Orthoklas bis Mikroklin) sind bis zu 1,3 cm groß, stark perthitisch entmischt und nach dem Karlsbader Gesetz verzwillingt. Viele sericitisierte Risse und Mikrolithe aus Plagioklasen, Sericit, Kalzit und weiteren Akzessorien sind in den Kalifeldspat-Augen enthalten.

Plagioklas tritt häufig als komplett sericitisierte Pseudomorphose bis zu 0,6 mm groß oder mit sericitisierten Kernen direkt neben und als Einschluss im Kalifeldspat auf. Des Weiteren ist Albit in den Kalifeldspäten entmischt und als Bestandteil in der Matrix bzw.

Zwischenmasse als Albit-Oligoklas mit Quarz vorhanden. Quarz ist in der Matrix 0,05 mm bis 0,6 mm groß oft zu Subkörner zerkleinert und löscht undulös aus.

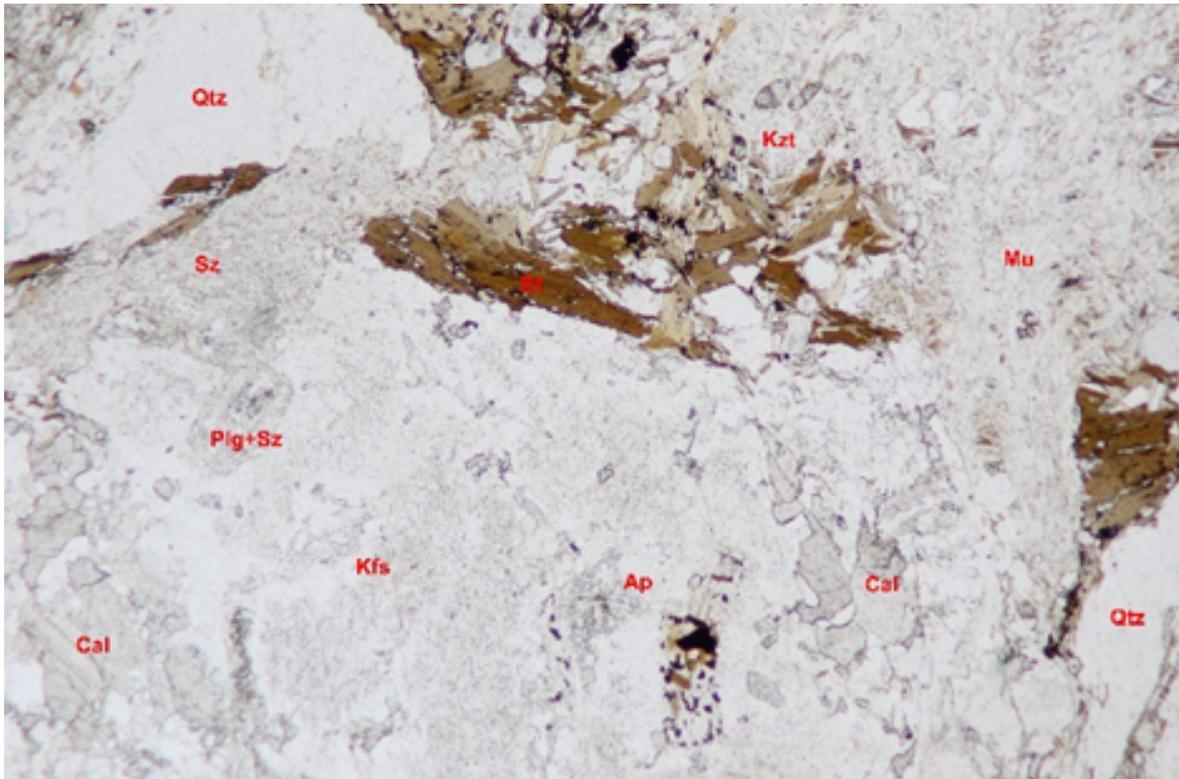
Glimmer zeigen postkristalline Deformationen, d.h. stetige Biegungen. Die Glimmerminerale Muskowit und Biotit sind überwiegend flasrig mit Schuppen um die Kalifeldspäte angeordnet. Muskowit ist teilweise sekundär entstanden. Er könnte in einer Scherzone aus Kalifeldspat hydratisiert worden sein.

Kalzit tritt idiomorph bis hypidiomorph mit gut definierbarer rhomboedrischer Spaltbarkeit (75°), Gleitzwillingen und hoher Doppelbrechung auf. Überwiegend ist er nahe den Kalifeldspat-Augen angeordnet.

Viele opake Einschlüsse sind besonders in den Biotiten erkennbar, wobei es sich um Erzentmischungen handeln kann.

Klinozoisit tritt hypidiomorph und um Orthit auf. So lässt sich beispielsweise ein bräunlicher (magmatisch entstandener) Orthit beschreiben, der in Klinozoisit mit brauner Eigenfarbe und anormaler (preußisch-)blauer Interferenzfarben eingebettet ist.

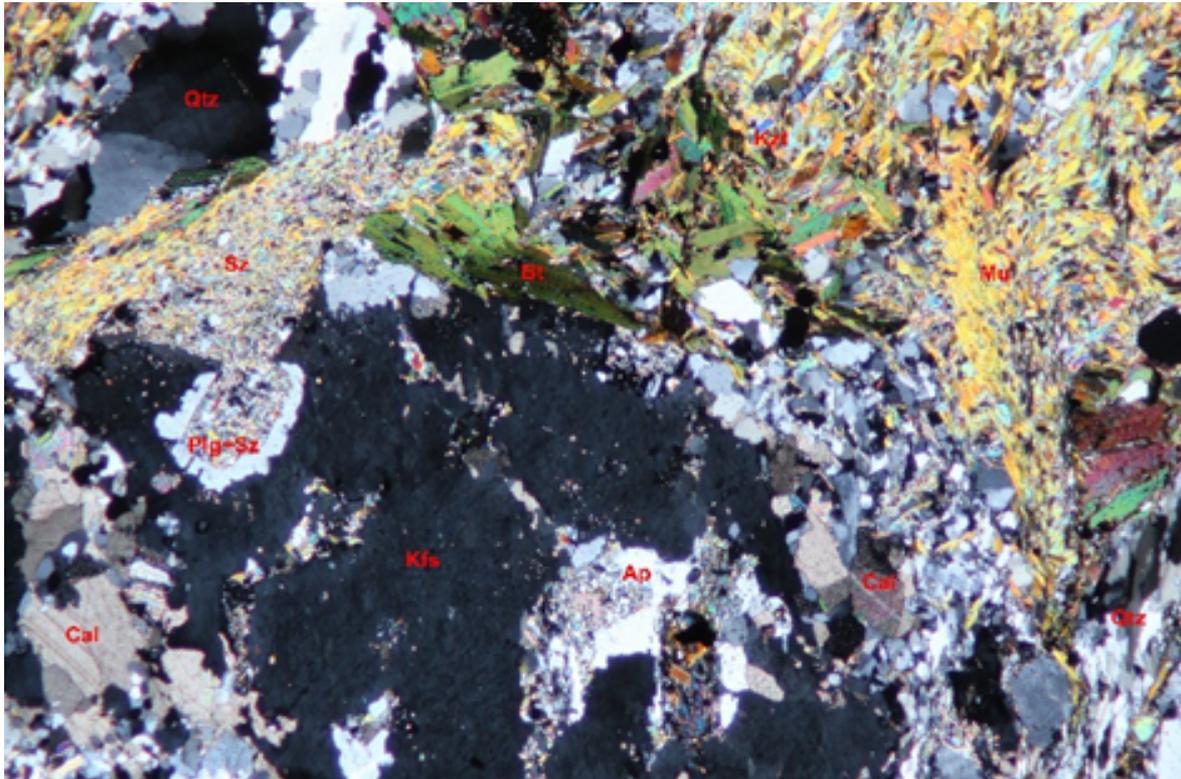
Abbildung 74: Schliff 317 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 74 und Abbildung 75: Der Kalifeldspat (Kfs, mittig) ist leicht perthitisch entmisch und hat Plagioklas Einsprenglinge. Plagioklas enthält einen Serizitkern (Plg+Sz, mitte links) und teilweise ist Plg als Pseudomorphose vertreten. Klinozoisite (Kzt, oben mitte) ist hypidiomorph und Kalzit (Cal) ist idiomorph auskristallisiert; Serizit ist stark vertreten; Quarz (Qtz) löscht undulös aus.

Abbildung 75: Schliff 317 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild:6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Handstücks A-b: Dieser Ahorngneis (Orthogneis) hat eine helle, mittel bis feinkörnige Matrix. Glimmerreiche, dunkle Lagen (Schlieren) von 3 mm bis 3,5 cm dicke durchziehen das Gestein. Diese Schlieren sind biotitreich, eingeregelt und enthalten Kalifeldspat-Augen. Generell sind Kalifeldspat-Augen bis zu 0,7 cm groß in der Matrix und in den Schlieren vorhanden.

Abbildung 76: Handstück A-b aus Mayrhofen



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 318:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (10 %), Plagioklase (30 %), Quarz (30 %), Muskowit (15%), Biotit (5 %) und Kalzit (10 %), im Nebengemengeteile (1 %) sind Akzessorien und opake Minerale zu verzeichnen.

Tabelle 29: Modalbestand des Dünnschliffs 318

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Muskowit (%)	Calcit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	21,37	30,24	31,58	4,37	-	5,49	5,43	98,48
Catanorm	24,45	31,2	28,22		-	6,16	9,88	99,99
Debon + Le Fort	66,35 (Kalifeldspat + Plagioklas)		24,68	8,98	-			100,01
Schätzung	10	30	30	5	15	10	1	101

Quelle: Geologische Bundesanstalt

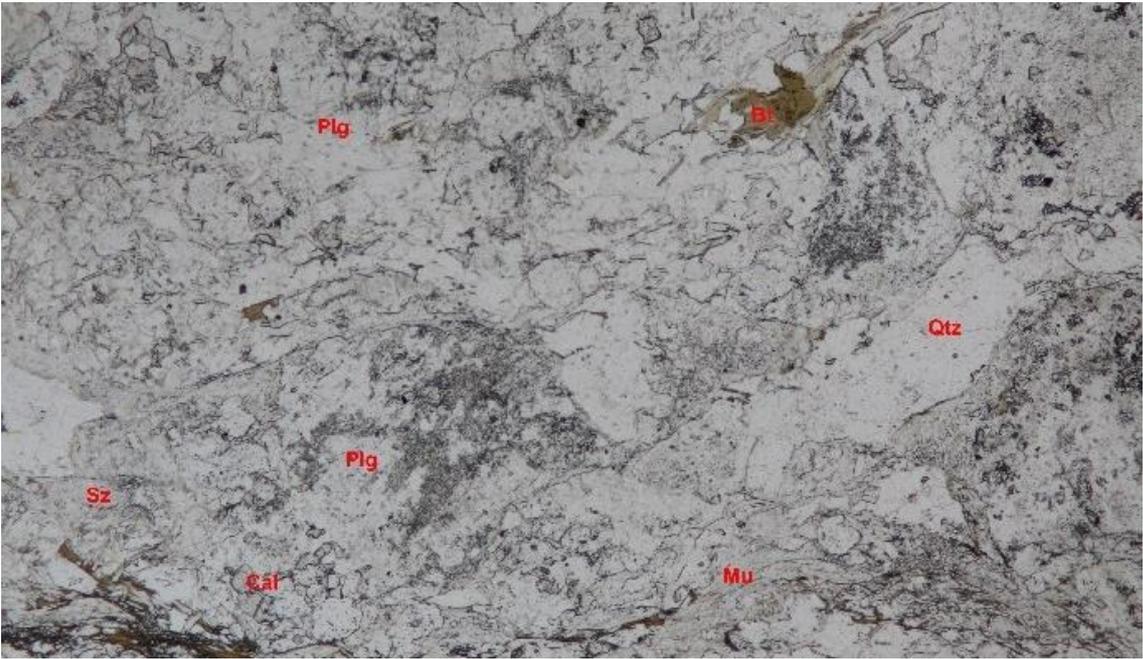
Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (1,0–1,4 %), Korund (3,74–4,45 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (3,34 %) zusammen.

Die mittel bis feinkörnige Matrix besteht aus Plagioklas+Quarz+Muskowit+Kalifeldspat und minimal Biotit. Kalifeldspat ist überwiegend perthitisch. Im Vergleich zum Schliff 317 ist prozentual weniger Kalifeldspat dafür mehr Plagioklas vorhanden. Der Plagioklas liegt feinkörnig in der Matrix als porphyroblastische, hypidiomorphe, bis zu 2 mm große Körner vor. Sehr häufig ist er polysynthetisch verzwilligt und poikiloblastisch. Es scheint als wäre der überwiegende Teil der Kalifeldspäte in polysynthetische Plagioklase umgewandelt. Myrmekit es ebenfalls zu finden.

Es ist kaum Biotit, dafür vergleichsweise viel hypidiomorpher Muskowit vorhanden. Serizit umfließt die Plagioklase und Kalifeldspäte und ist häufig als Mikrolith im Plagioklas vorhanden. Eine kataklastische Zone durchfließt den Schliff, die überwiegend sekundär gebildeten Hellglimmer enthält. Der Quarz in der Matrix ist in Subkörner zerkleinert und löscht undulös aus.

Es ist relativ viel hypidiomorpher Kalzit in der Matrix und um die Plagioklase vorhanden. Der Anteil der Akzessorien ist gering.

Abbildung 77: Schliff 318 (PPL), 2,5x vergrößert; Bild:6x4mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 78: Schliff 318 (XPL), 2,5x vergrößert; Bild:6x4mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 77 und Abbildung 78 zeigen ein ungleichkörniges kristalloblastisches Gefüge aus Plagioklas (Plg), Quarz (Qtz) und Kalifeldspat (Kfs) mit einem erhöhten Anteil an Plagioklas. Der Plg ist polysynthetisch Verzwillingt (oben links) und enthält viele Mirkolithe (Mitte). Muskowit (Mu), Serizit (Sz) und Biotit (Bt) ist um die Körner eingeregelt.

Beschreibung des Handstücks A-c: Das dritte Handstück aus Mayrhofen stammt aus einem feinen, hellen Gang und ist ebenfalls den Ahorngneisen zugeordnet. Das Gestein ist wenig eingeregelt, hell und hat eine feinkörnige Matrix. Auffällig ist eine bräunliche Verwitterung, welche punktuell immer wieder über das Gestein hinweg zu erkennen ist.

Abbildung 79: Handstück Ac aus Mayrhofen



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 319:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (20 %), Plagioklase (40 %), Quarz (25 %) und Muskowit (10 %), als Nebengemengeteile (5 %) sind Biotit, Kalzit, Granat, Chlorit, Hämatit, Klinoisit, Apatit und opake Minerale zu verzeichnen.

Tabelle 30: Modalbestand des Dünnschliffs 319

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Muskowit (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	21,75	40,32	31,87	1,05		2,67	98,48
Catanorm	22,72	42,67	29,75			3,93	99,99
Debon + Le Fort	65,84 (Kalifeldspat+Plagioklas)		30,72	3,44			100
Schätzung	20	40	25		10	5	100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (0,62–0,88 %), Korund (1,57–1,97 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (0,75 %) zusammen.

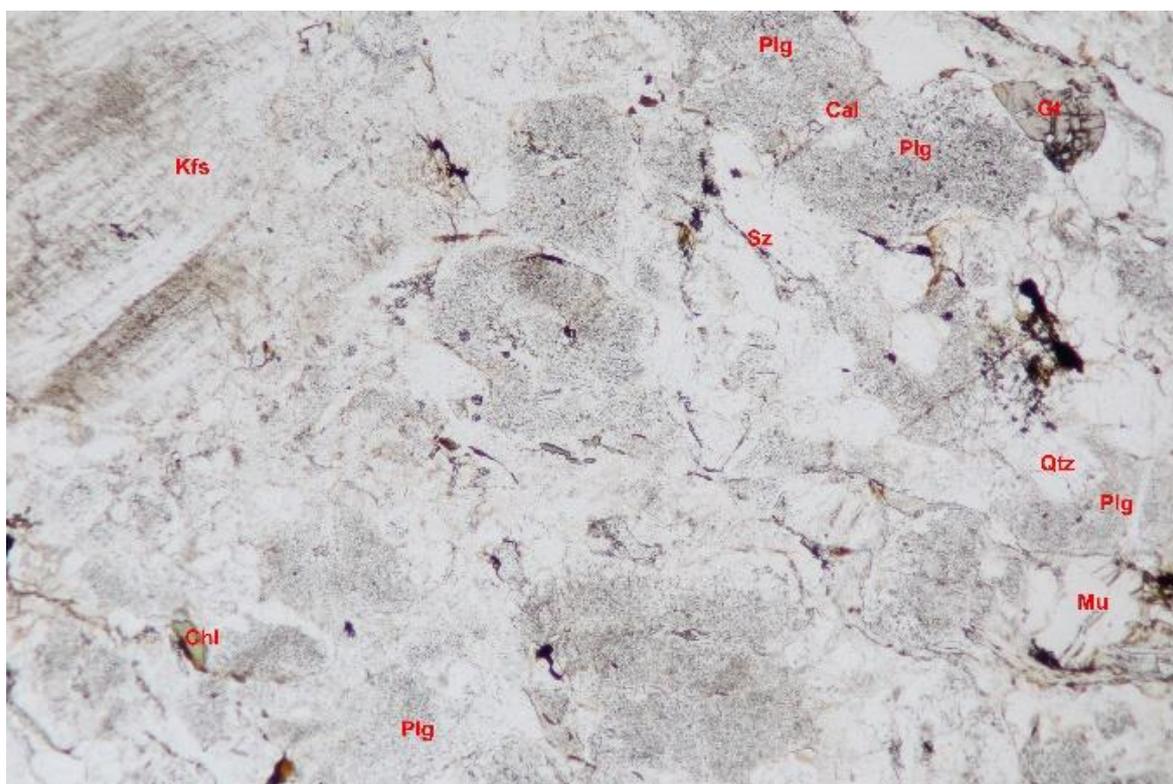
Die mittelkörnige und helle Matrix besteht aus Quarz + Plagioklas und Kalifeldspat und liegt zwischen den bis zu 5mm großen Kalifeldspat-Augen. Die leicht perititisch entmischten Kalifeldspat-Augen enthalten relativ große Einsprenglinge aus Plagioklas. Es ist eine leichte Einregelung der Minerale zu vernehmen. Der Plagioklas ist oft polysynthetisch verzwilligt und stark poikiloblastisch mit Epidot-, Apatit- und Muskowit-Einschlüssen. Die Einschlüsse sind sehr klein (wenige µm groß) und xenomorph. Der Quarz ist agglomeriert oder zu Subkörnern zerkleinert und löscht undulös aus. Teilweise sind Fließstrukturen von subkörnigen Quarzdomänen und Serizit in der Matrix und um Kalifeldspat-Augen vorhanden.

Beim Muskowit sind zwei unterschiedliche Ausbildungen zu erkennen. Teilweise ist er dicker und löscht undulös aus (magmatisch), teilweise ist er feinkörniger bis hin zu serizitisch (sekundär). Serizit ist in Freiräumen der Matrix, als Mikrolith, in Rissen und um Korngrenzen ausgebildet.

Eine rotbraune (rostrote) bis schwarze Einfärbung in Rissen und an den Korngrenzen von Biotit, Muskowit und Chlorit ist immer wieder zu erkennen. Die Verfärbung lässt auf eine

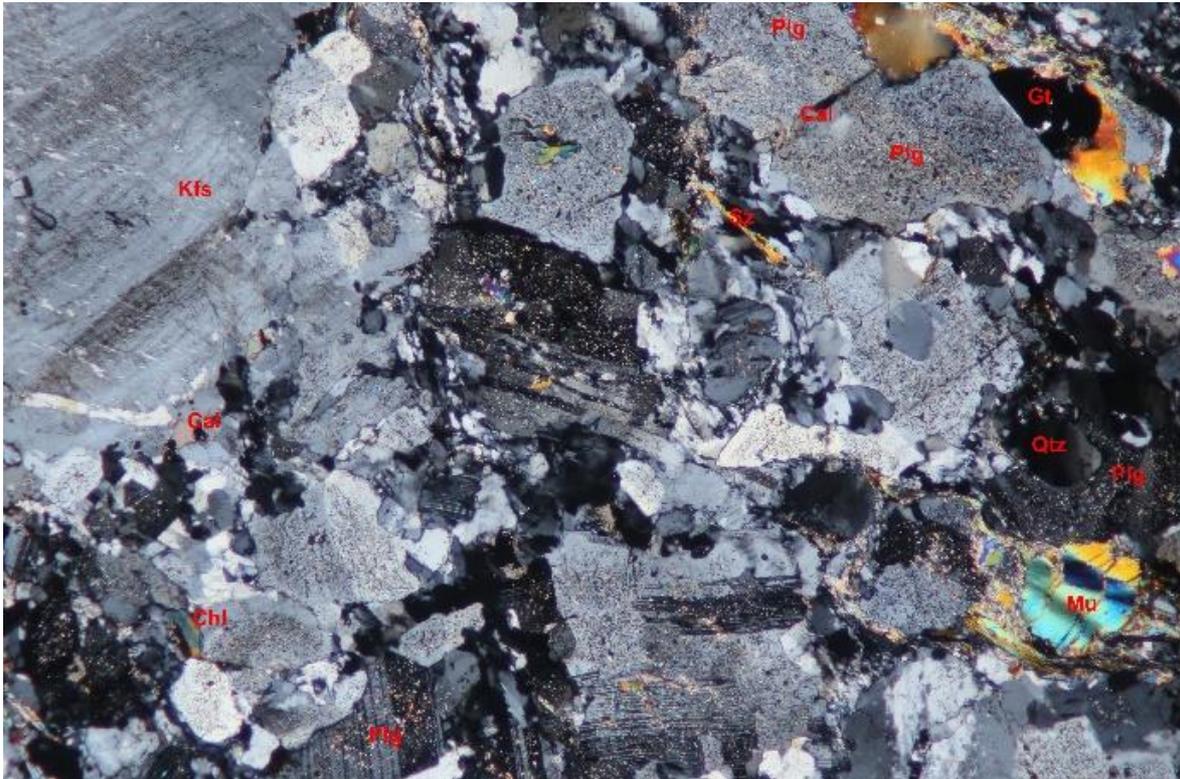
Alteration und/oder Hämatitverfärbung durch Verwitterung schließen. Opake Minerale wie Erze sind mäßig vertreten. Kalzit tritt als weiteres Verwitterungsprodukt auf. Granat ist hypidiomorph, mit Rissen und bis zu 0,4 mm groß bestimmbar.

Abbildung 80: Schliff 319 (PPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 81: Schliff 319 (XPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 80 und Abbildung 81: Die Matrix ist mittelkörnig und teilweise sind Körner zu Subkörnern leicht zerschert (Qtz); Kalifeldspat ist leicht perthitisch entmischt (Kfs); Plagioklas (Plg) ist polysynthetisch verzwilligt und poikiloblastisch; Muskowit (Mu) löscht undulös mit türkiesen Interferenzfarben aus.

Zusammenfassung: Die Gesteinsproben aus Mayrhofen (Ahorngneise) enthalten alle sekundär gebildeten Muskowit, wenig Biotit und hypidiomorphen Kalzit. Das gehäufte vorkommen von Serizit und Kalzit spricht für eine starke Überprägung/Alteration der Gesteine im Vergleich zu den anderen Proben. Besonders die Proben 318 und 319 weisen mikroskopisch sowie normativ einen hohen Kalzitanteil auf.

Im Verbreitungsgebiet des Ahorngneises wurde der Haupttyp selbst (Präparat 622) sowie eine helle Schliere in diesem (623) und ein heller Gang (624) mit dem REM untersucht. Die Urangehalte dieser drei Gesteine betragen 4,4 ppm, 5,0 ppm und 6,5 ppm (Tabelle 21). Bei allen drei Proben ist auffällig, dass Zirkon und Thorit einen Großteil des Urans beinhalten. Dabei ist bemerkenswert, dass in den (metamikten) Zirkonen kleine Thoriteinschlüsse einen oszillierenden Zonarbau nachzeichnen. Für den Urangehalt sind zudem Titanit, Allanit/Epidot

und Uraninit sowie beim hellen Gang auch Monazit und Xenotim für den Urangehalt mit verantwortlich.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 6.2 enthalten. Neben Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 6.2 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährer Anteil
- UO₂-Gehalte (Gew. %) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

5.4.2 Orthogneis Silz/Öztaler Alpen

5.4.2.1 Überblick

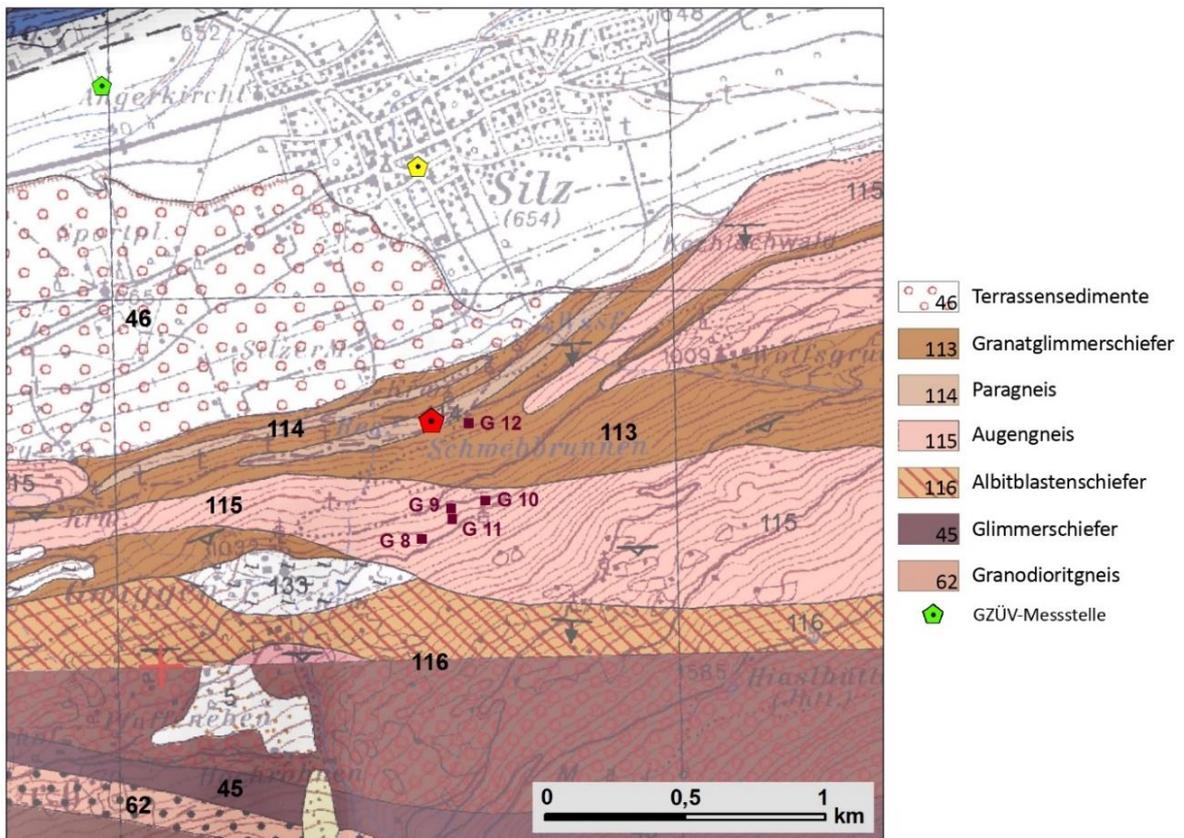
Der untersuchte Bereich in der Umgebung der Schwöbbrunnen (Lage: siehe Abbildung 68) liegt im unteren Hangbereich eines Bergrückens, der das obere Inntal noch unterhalb des Austritts des Ötztales im Süden begleitet. Im Inntal selbst verläuft die tektonische Grenze zwischen dem Block des Öztalkristallins im Süden und den Kalkalpen im Norden, die in diesem Abschnitt des Inntales als Ast der Engadiner Linie angesehen wird (Pirkl, 1980, S. 340). Im Nordabschnitt des Öztalkristallin herrscht generell ein E-W-Streichen der Gesteinszüge mit mittelsteilem bis steilem Südfallen. Ein großräumiger Faltenbau ist zu vermuten, der gegen Süd in den altbekannten Schlingenbau (Schmidegg, 1933) mit steilstehenden Faltenachsen übergeht, der als eine weitere Überprägung eines Faltenbaus verstanden werden kann.

Die weitere Umgebung der Quelle wird von einem Biotitaugengneis dominiert (Nowotny, 1978, A98), der auf Glimmerschiefern mit Einlagerungen von Paragneisen und Phylliten aufliegt. Diese Paragesteine sind auch dem Orthogneis eingeschaltet. Der Orthogneiszug lässt sich auf 25 km E-W Erstreckung verfolgen und kann gemäß Kartenbild bis zu 700 m mächtig werden. Der Zug wird zumeist von einem Ablitblastenschiefer überlagert. In den höheren Berg- und Gipfelbereichen zieht ein geringmächtiger (ca. 100 m), steilgestellter, feinkörniger Granodioritgneiszug durch, der von Glimmerschiefern begleitet wird. Die

Metamorphose der Gesteine am Nordrand des Ötztalkristallin zeigt eine amphibolitfazielle Prägung mit Staurolith und Disthen und diese nimmt gegen Süden zu.

Aus dem nachfolgenden Kärtchen geht die teils beträchtliche quartäre Überdeckung des Grundgebirges nicht hervor, ist jedoch im angrenzenden Blatt (117) gut ersichtlich.

Abbildung 82: Geologie im Raum südlich Silz mit Lage der Probenahmestellen



Quelle: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 83: Quellfassung Schwöbbrunnen



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

5.4.2.2 Gesteins und mineralchemische Untersuchungen

Abbildung 84: Aufschluss des porphyrischen Augengneises (G8)



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Proben und Präparate: S1, S5a, S5b (Handstücke); 625, 627, 628 (polierte Dünnschliffe); 320, 322, 323 (abgedeckte Dünnschliffe)

Angaben aus der Literatur: Die Gesteinsproben in Silz stammen aus dem Ötztal-Bundschuh-Deckensystem. Der mittelkörnige, biotitreiche Granit bis Granodiorit mit zahlreichen Kalifeldspat-Einsprenglingen im nördlichsten Orthogneiszug des Ötztal-Stubai Kristallins (Schindlmayr, 1999, S. 167) wurde stark deformiert. Der Augengneis (Orthogneis) überdeckt eine Wechsellagerung aus einem Glimmerschiefer und Quarzit. Disthen und Staurolith sind durch eine amphibolitfazielle Prägung (Metamorphose) am Nordrand und mit Zunahme Richtung Süden im Ötztalkristallin zu finden.

Beschreibung des Handstücks S1: Der aus Silz stammende Orthogneis hat eine feinkörnige, helle Matrix aus Feldspat, Quarz und Glimmer. Die Biotitlagen sind leicht eingeregelt. Die Kalifeldspat-Augen sind bis zu 1 cm groß, machen aber einen relativ geringen Anteil aus.

Abbildung 85: Handstück S1 aus Silz



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 320:

Hauptbestandteile sind Kalifeldspat (20 %) Plagioklase (25 %), Quarz (25 %), Muskowit (20 %) und Epidot (5 %), als Nebengemengeteile (5 %) sind Chlorit, Zoesit, Apatit, Serizit und opake Minerale zu verzeichnen.

Tabelle 31: Modalbestand des Dünnschliffs 320

	Kalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Quarz (%)	Biotit (%)	Muskowit (%)	Epidot (%)	Rest (%)	Summe (%)
Mesonorm	26,59	32,69	34,14				3,99	98,41
Catanorm	27,64	34,38	32,34				5,39	99,98
Debon + Le Fort	62,74 (Kalifeldspat + Plagioklas)		33,32	3,94				100
Schätzung	20	25	25		20	5	5	100

Quelle: Geologische Bundesanstalt

Die vorliegende Tabelle gibt alle Werte in % an. Der Restbestandteil der Mesonorm und Catanorm setzt sich überwiegend aus Hämatit (0,9–1,3 %), Korund (2,1–2,8 %) und bei der Catanorm zusätzlich aus Hypersthen (0,6 %) zusammen.

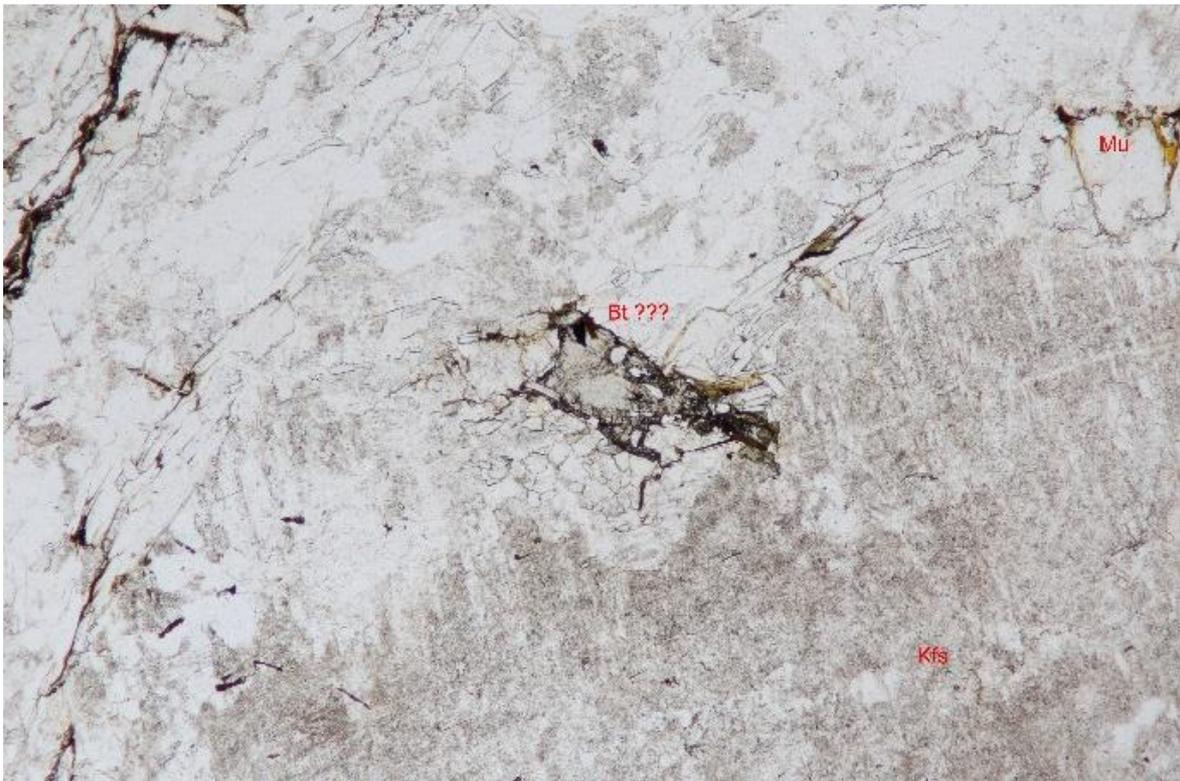
Die Matrix ist ein feinkörniges Gefüge aus Kalifeldspat, Plagioklas, Quarz und Muskowit. Ein 6,5 mm großer perthitisches Kalifeldspat-Einsprengling ist von Muskowit, Serizit und der feinkörnigen Matrix umlagert. Teilweise zeigt der Kalifeldspat eine mikrokline Gitterung. Der Plagioklas liegt 0,3–1,5 mm groß vor. Oft ist er polysynthetisch verzwillingt, vereinzelt ist er poikiloblastisch, einfach verzwillingt oder mit Serizit gefüllt. Die polysynthetischen Zwillinge sind nach dem Albit- und Perklingsesetz verzwillingt. In der Matrix ist Mikroklin vorhanden.

Der Quarz ist überwiegend in kleine Subkörner zerkleinert (polykristallines Aggregat/ granoblastische Textur (amöbenartig)). Ein undulöses 1,6 mm langgestrecktes Quarzauge konnte identifiziert werden. An den Rändern hat sich Muskowit und vermuteter Epidot eingeregelt.

Der Muskowit ist in der Matrix eingeregelt und zeigt auffällig hohe blau/türkise Interferenzfarben. Teilweise ist er stark überprägt und sieht verbogen aus, was man durch ein undulöses Auslöschten mit hellen bis farblosen Interferenzfarben erkennt. Biotit zeigt überwiegend einen olivgrün/grün/bräunlich mit starkem Pleochroismus, ist teilweise

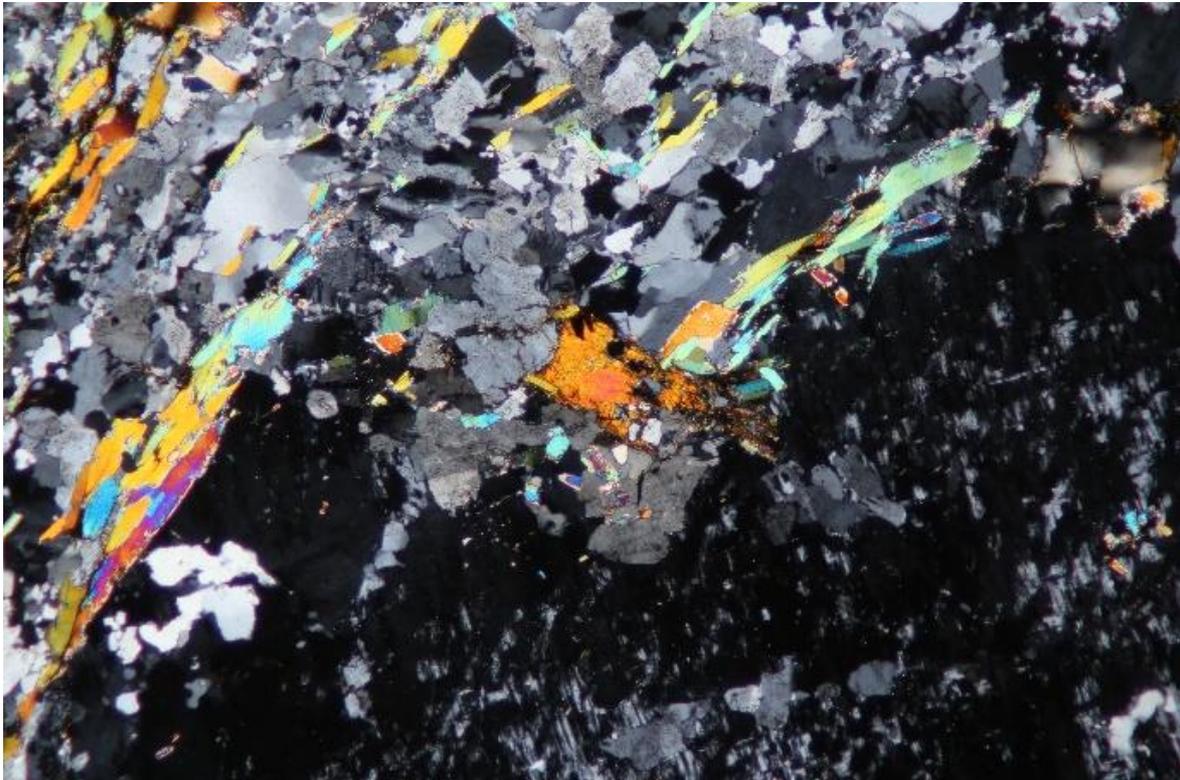
chloritisiert, bräunliche am Rand alteriert, hat viele opake (evtl. Ilmenit) Einschlüsse, xenomorph, selten sind tafelige Kristalle zu erkennen und er tritt häufig mit Serizit und Fe-Ti-Oxiden (Titanit) auf. Man könnte daraus schließen, dass der Biotit stark überprägt, sekundär verwittert und alteriert ist.

Abbildung 86: Schliff 320 (PPL), 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm; Biotit nebst perthitischem Kalifeldspat (Kfs) und Muskowit (Mu) mit einem undulösen Auslöschchen.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 87: Schliff 320 (XPL), 5 x vergrößert; Bild:3 x 2 mm; Biotit neben perthitischem Kalifeldspat (Kfs) und Muskowit (Mu) mit einem undulösen Auslöschen.



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Auffällig ist das häufige Auftreten von vermutetem Epidot/Titanit mit leichter perlmutter Eigenfarbe, hohem Relief und hohen Interferenzfarben.

Das faserige, mit bräunlicher Eigenfarbe Mineral wird vermutlich Stilpnomelan sein (ein spät retrogrades Mineral, das als K- und Fe-reiches Mineral auftritt).

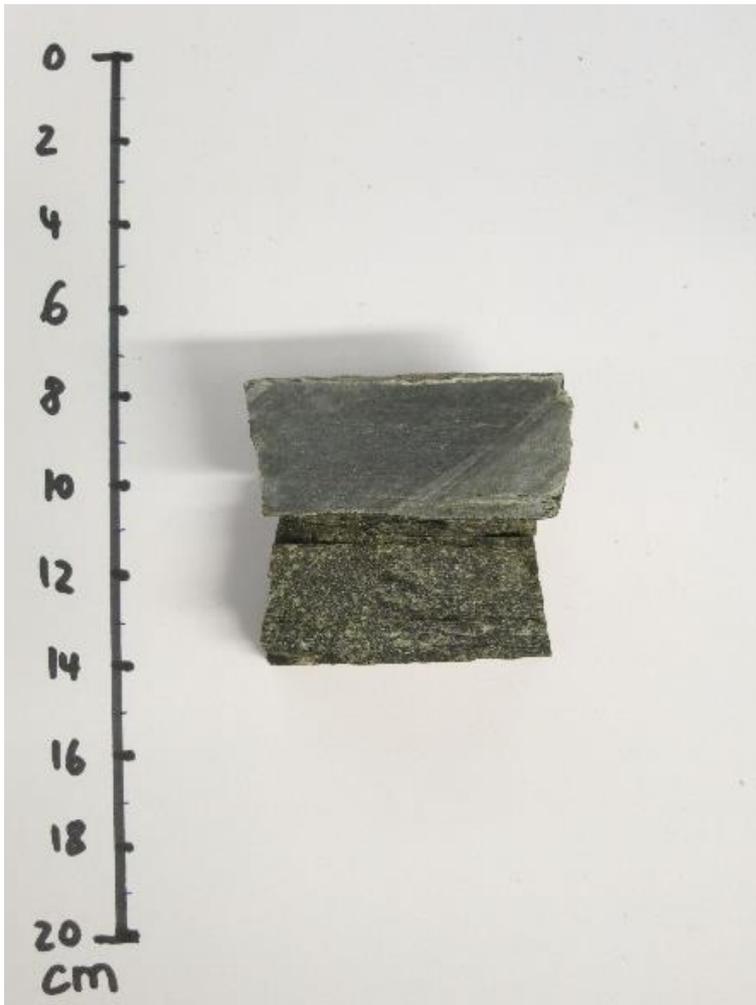
Abbildung 88: Schliff 320 (PPL); 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm faseriger Stilpnomelan in Plagioklas, Quarz und Kalifeldspat-Matrix



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Handstücks S5a: Das vorliegende Gestein erweist sich bei makroskopischer Betrachtung als sehr quarzhaltig. Die Eigenfarbe wirkt dennoch dunkel, obwohl viele Quarzkristalle erkennbar sind. Das Gefüge ist feinkörnig und ohne größere Feldspat-Einschlüsse. Die vereinzelt Biotitlagen sind leicht eingeregelt und es sind auch kleinere, verwitterte Granate zu erkennen. Nach dem makroskopischen Befund ist das Gestein als Quarzit bis quarzreicher Paragneis anzusprechen, eine genauere Zuordnung ist im Handstück schwer möglich.

Abbildung 89: Handstück S5a aus Silz



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 322:

Hauptbestandteile sind Quarz (50 %), Muskowit (15 %), Biotit (10 %), Chlorit (5 %), Plagioklase (15 %), und es sind Akzessorien (max. 5 %) wie Orthit, Epidot, Klinozoesit zu verzeichnen.

Die angestellten Norm-Berechnungen können hier nicht angewandt werden, da es sich um einen Quarzit bis quarzreichen Paragneis handelt (metamorphes Sedimentgestein).

Das Gefüge ist feinkörnig und gut eingeregelt. Es sind viele Risse enthalten. Der Hauptbestandteil ist Quarz. Der Quarz ist von 0,1 mm bis 1,3 cm groß, löscht undulös aus,

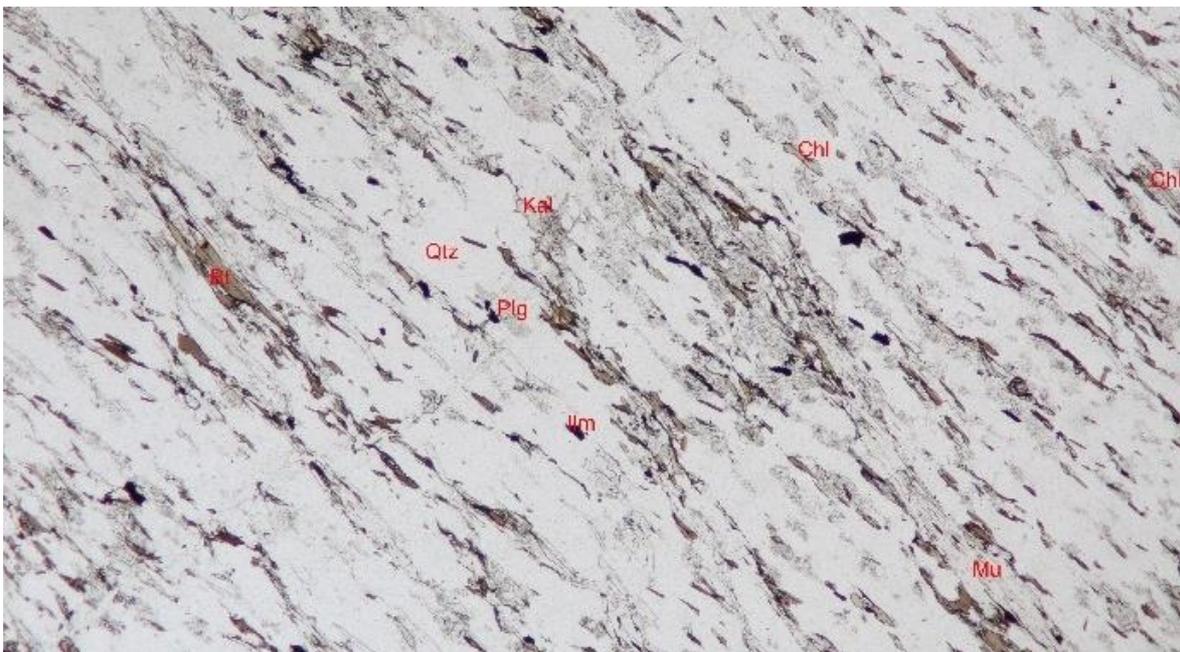
zeigt eine granoblastische Textur und besonders die größeren Körner sind in Subkörner zerkleinert.

Die Glimmerminerale sowie der Chlorit sind parallel zum Gefüge eingeregelt. Der Biotit zeigt einen rotbraunen zu gelbgrünen Pleochroismus und eine durchschnittliche Längsstreckung von 0,5 mm. Oft hat eine Chloritisierung und/oder teilweise bis vollkommene Umwandlung in Hellglimmer stattgefunden.

Der Chlorit zeigt überwiegend einen schwachen, hellgrünen Pleochroismus und stark ausgeprägte anormale blaue Interferenzfarben. Die sekundären Hellglimmer führen an den Spaltrissen und an den Rändern typischerweise feinste dunkle Substanz (Alteration). Opake Einschlüsse sind in dem Gefüge bis zu 0,2 mm groß. Der hypidiomorphe und undulös auslöschende Muskowit weist eine Längsstreckung von bis zu 0,8 mm auf. Feinkörnig und als Serizit ist er in kleinen Rissen, an Korngrenzen sowie als Einschlüsse in Plagioklasen vorhanden.

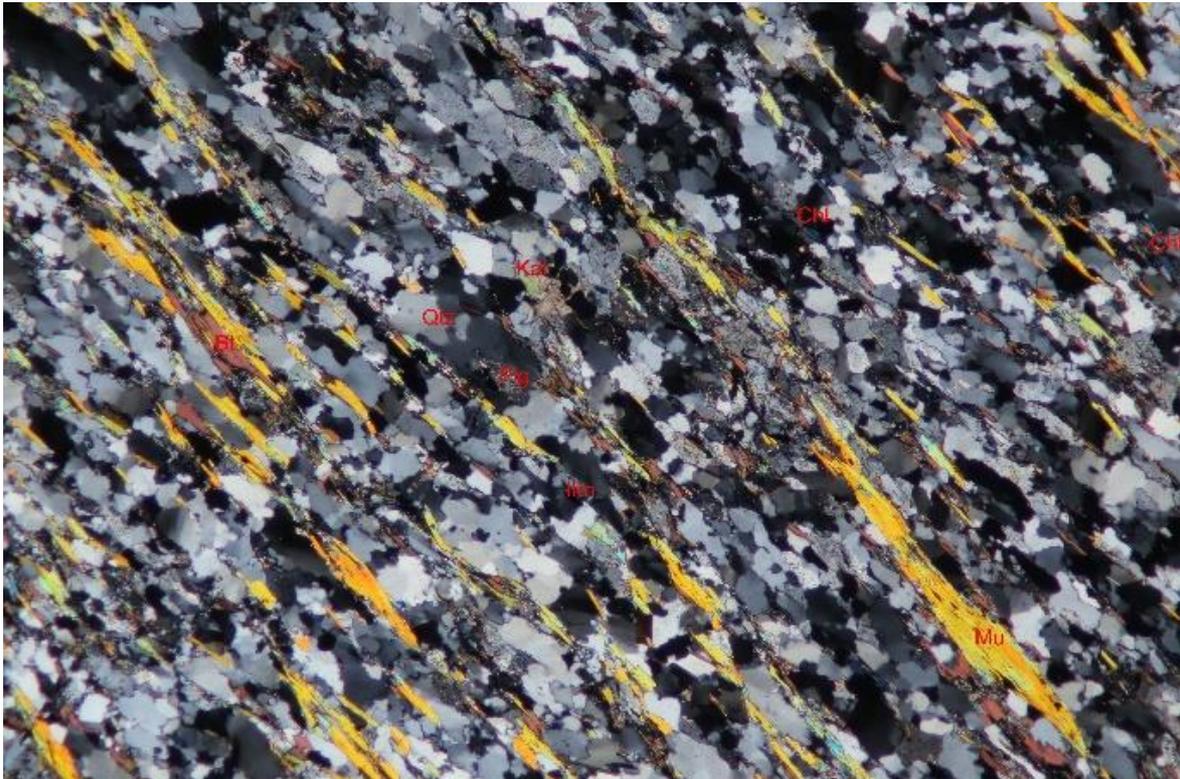
Der im Durchschnitt 0,3 mm große xenomorphe Plagioklas hat reichliche Mikrolithfüllung und teilweise Deformationslamellen. Mikrolithe sind Epidot, Klinozoesit, Muskowit, Apatit, Turmalin und opake Minerale. Bei den opaken Mineralen könnte es sich um Illmenit handeln.

Abbildung 90: Schliff 322 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 91: Schliff 322 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



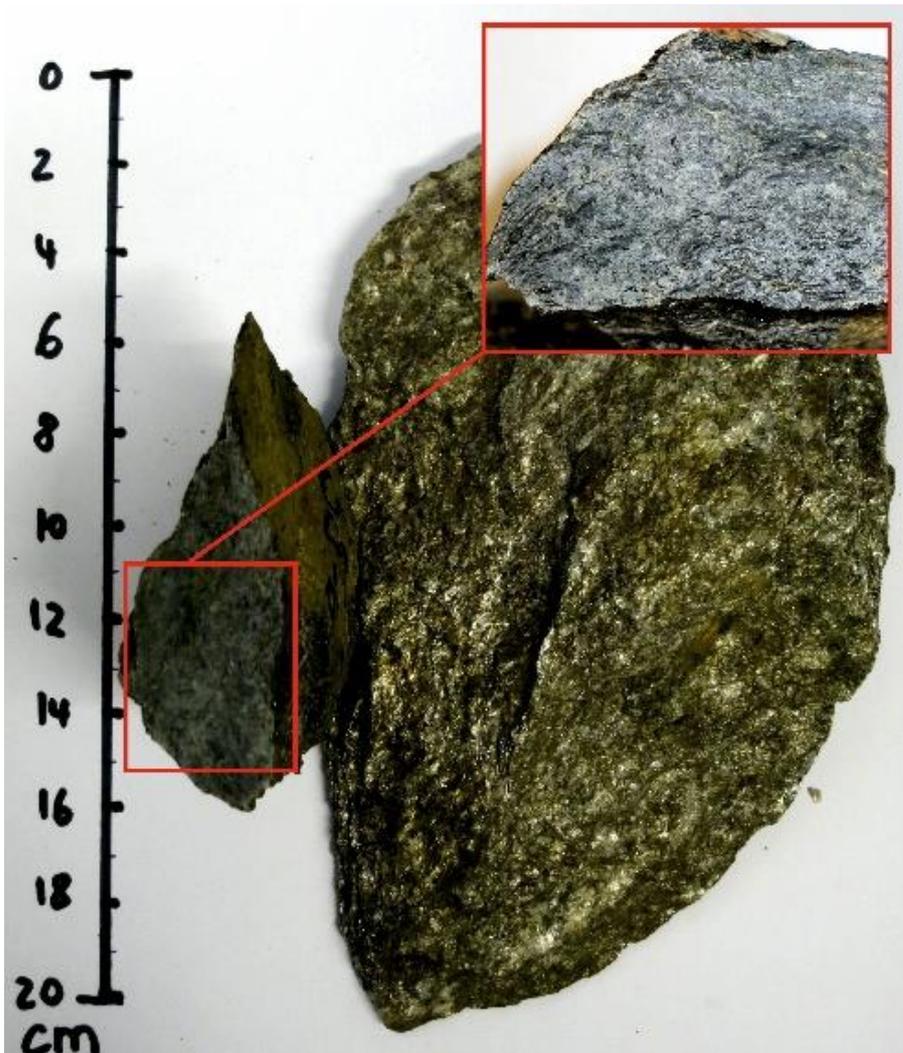
Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 90 und Abbildung 92: Der Quarzit zeigt eine feinkörnige und gut eingeregelt Matrix aus Quarz, Plagioklas, Chlorit und Glimmern; opake Minerale, granoblastische Strukturen beim Quarz und poikiloblastische Plagioklase sind zu erkennen.

Beschreibung des Handstücks S5b: Dieser Glimmerschiefer aus der Ötztal-Stubai-Kristallin steht unter dem Orthogneis an und tritt in Wechsellagerung mit dem oben beschriebenen Quarzit/quarzreichen Paragneis.

Das Handstück S5b aus Silz ist ein stark deformierter Glimmerschiefer. Biotit- und Muskowitlagen sind geschiefert und stark deformiert. Die Bruchflächen sind bucklig-wellig. Zwischen den Glimmerlagen liegen feine Quarzbänder mit langgestreckten Quarzlinsen von bis zu 2,5 cm Länge. Vereinzelt kann Feldspat erkannt werden.

Abbildung 92: Handstück S5b aus Silz



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Beschreibung des Dünnschliffs 323:

Hauptbestandteile sind Muskowit (25 %), Biotit (25 %), Chlorit (10 %), Quarz (10 %), Plagioklas (20 %) und Granat (5 %) als Nebengemengeteile (5 %) sind Epidot, Zoesit, Klinozoesit zu verzeichnen.

Die Norm Berechnungen können hier nicht angewandt werden, da es sich um einen Glimmerschiefer (metamorphes Sedimentgestein) handelt.

Der Hauptbestandteil des Gefüges sind Glimmerminerale sowie Chlorit mit einer lepidoblastischen Textur und undulösem Auslöschen. Sie sind teilweise sind zu Cluster

vereint. Die Paralleltexur ist stark deformiert und sieht bucklig-wellig aus. Knickfalten können erkannt werden (siehe Abbildung unten).

Der Biotit zeigt einen rotbraun-gelben Pleochroismus, Deformationslamellen und eine maximale Längsstreckung vom 1,6 mm. Oft ist der Biotit zu blassgrünen Chlorit und Hellglimmer umgewandelt. Somit sind Chlorit und Muskowit als sekundär gebildete Phase zu betrachten.

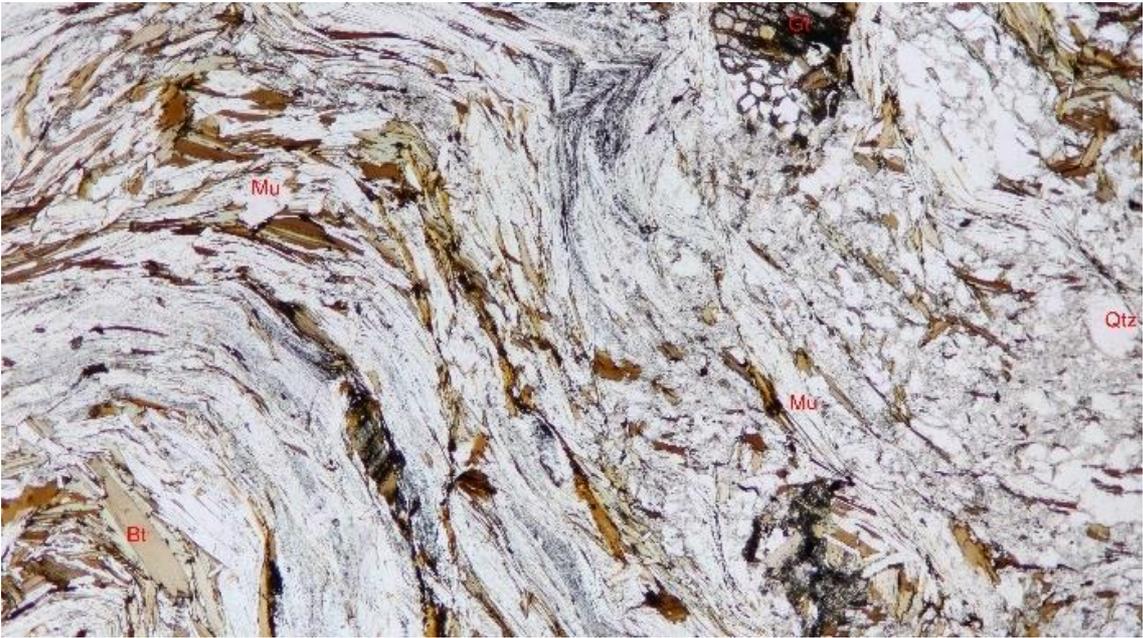
Muskowit ist parallel zu Biotit eingeregelt, hypidomorph, ebenfalls mit Deformationslamellen und eine maximale Längsstreckung von 1,4 mm. Der überwiegende Teil des Muskowits ist gut eingeregelt, dennoch gibt es einige Körner, besonders um die Granate oder in Vergesellschaftung mit Chlorit, die nicht eingeregelt sind. Dies spricht dafür, dass der nicht eingeregelt Muskowit sekundär, nach der Hauptmetamorphose gebildet wurde.

Quarz und Plagioklas liegt in der Matrix sehr stark deformiert vor. Plagioklas ist mit zahlreichen Erzkörnern durchsetzt und hat an den Rändern opake Einschlüsse. Der Plagioklas ist stark verwittert, selten polysynthetisch verzwillingt und hat neben opaken Einschlüssen auch viele kleine Mikrolithe von Muskowit, Epidot und Klinozoesit. Der Quarz ist in der Matrix durchschnittlich 0,05 mm groß und 10 % des Quarzes sind granoblastische und in Subkörner zerkleinerte, 2 mm große Quarzlinsen.

Granat ist mit einem großen Anteil als Porphyroblast im Glimmergefüge. Der Granat ist stark überprägt und teilweise skelettartig. Einschlüsse sind Muskowit, Biotit, Quarz, Epidot und Serizit.

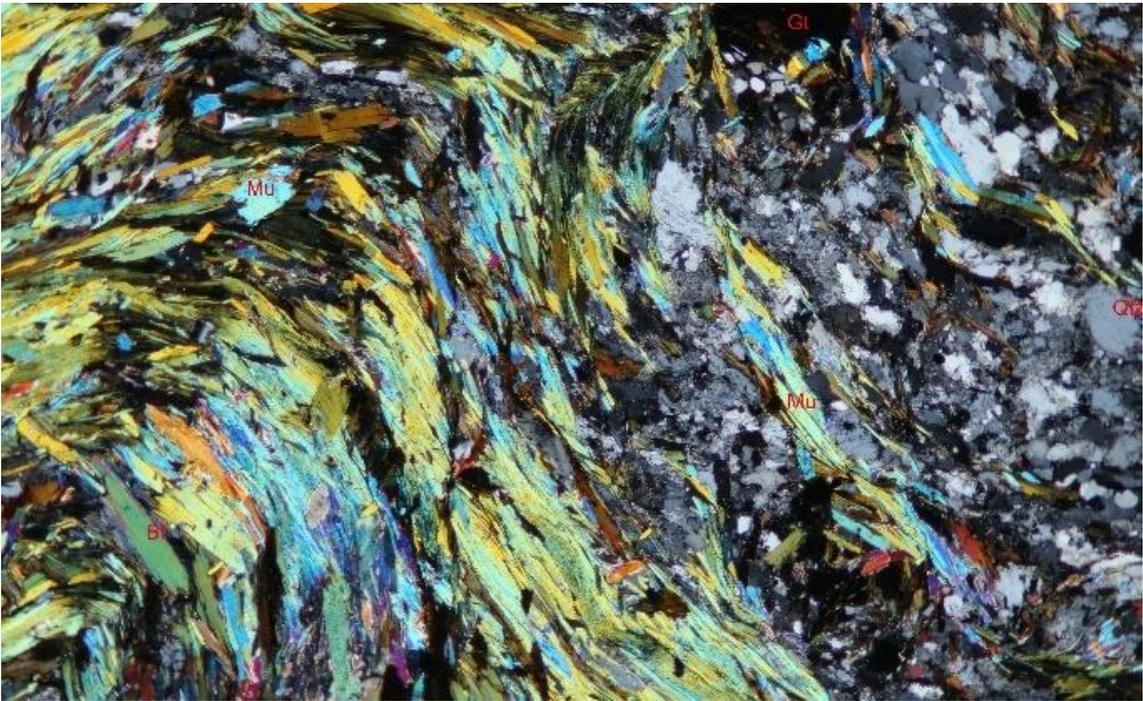
Abbildung 93 und Abbildung 94: Die Glimmerminerale im Glimmerschiefer sind sehr gut eingeregelt und Knickfalten können erkannt werden (oben Mitte); der Quarz ist stark alteriert; Granate (Gt) sind immer wieder vertreten.

Abbildung 93: Schliff 323 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Abbildung 94: Schliff 323 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm



Quelle/©: Geologische Bundesanstalt

Zusammenfassung: In Silz, im Einzugsgebiet der Schwöbbrunnen, wurden zwei Orthogneisproben (Probe S: 5,7 ppm U; Probe S4: 1,6 ppm U) sowie damit vergesellschaftet ein Quarzit (S5a: 1,6 ppm U) sowie ein Glimmerschiefer (S5b: 4,2 ppm U) beprobt (vgl. Tabelle 21). Die genannten Proben wurde mit dem REM untersucht (Probe S1= Präparat 625, S4 = 624, S5a = 627, S5b = 628).

In den beiden Orthogneisproben ist das Uran an eine Vielzahl von Akzessorien gebunden, wobei bei beiden Uraninit und Zirkon einen wichtigen Uranträger darstellen. Bei den anderen uranhaltigen Akzessorien unterscheiden sich beide. Bei den Metasedimenten ist auffällig, dass bei beiden Monazit und Zirkon wichtige Uranträger sind, die anderen Uran-Mikromineralisationen sind aber bei beiden unterschiedlich gestaltet. Auffällig bei den Metasedimenten ist auch, dass beide Zirkone und Monazite vergleichsweise hohe Urangelhalte aufweisen. Insgesamt ergibt sich ein sehr heterogenes Bild bei den Proben aus Silz. Gemeinsam ist jedoch allen, dass überall reichlich fein verteilte Mikro-Uranmineralisationen zu finden waren.

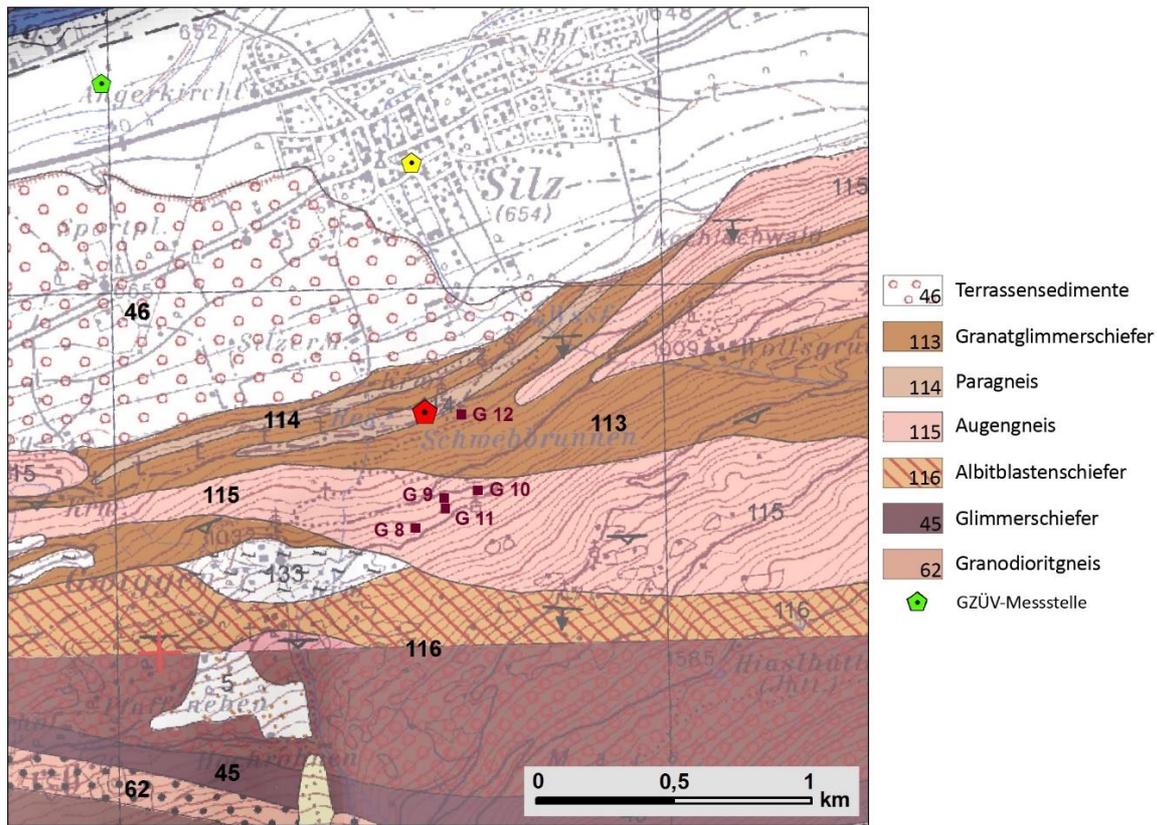
Die Ergebnisse der Untersuchung der Streupräparate auf uranführende Minerale per Rasterelektronenmikroskopie (EDX-REM) sind im Anhangsband Kapitel 6.2 enthalten. Neben Übersichtsbildern sowie Detailaufnahmen von Mineralen mit hoher Urankonzentration können Kapitel 6.2 zu jedem Streupräparat die folgenden, aus der REM-Analyse resultierenden Angaben entnommen werden:

- Modalbestand
- potentiell Uran-führende Mineralphasen und ihr ungefährender Anteil
- UO₂-Gehalte (Gew. %) in in den potentiell Uran-führenden Mineralphasen
- bevorzugte mineralische Bindung des Urans
- potentielle Zugänglichkeit des Grundwassers zu den Uran-Trägermineralen (Gefügebeziehungen)

5.4.3 Grundwasseruntersuchungen

Die Quellstandorte Unterer u. Oberer Schwöbbrunnen 1+2 sowie Arbesseitenquelle 1 (Lage: siehe Abbildung 68) wurden zwischen Februar 2018 und Dezember 2018 jeweils sechsmal beprobt. Die Beprobungen und Analysen erfolgten durch die Chemisch-Technische Umweltschutzanstalt (CTUA) des Amtes der Tiroler Landesregierung. Zusätzlich erfolgte im Herbst 2018 von der CTUA die Probenahme für die ICP-SFMS Ultrapurenanalyse der Universität für Bodenkultur Wien/Abteilung für Analytische Chemie.

Abbildung 95: Lage der Schwöbbrunnen 1+2 sowie der Arbesseitenquelle 1.



Quelle: Geologische Bundesanstalt

5.4.3.1 Grundwassermonitoring

Die beiden untersuchten Tiroler Quellen zeichnen sich durch eine sehr geringe Mineralisierung aus. Die elektrische Leitfähigkeit der Quellen liegt zwischen 149 und 167 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der Hauptionen-Chemismus beider Quellen ist unterschiedlich ausgeprägt (Abbildung 93). Insgesamt liegen die Quellwässer jedoch innerhalb jener Bandbreite, die durch die GZÜV-Messstellen des Grundwasserkörpers aufgespannt wird.

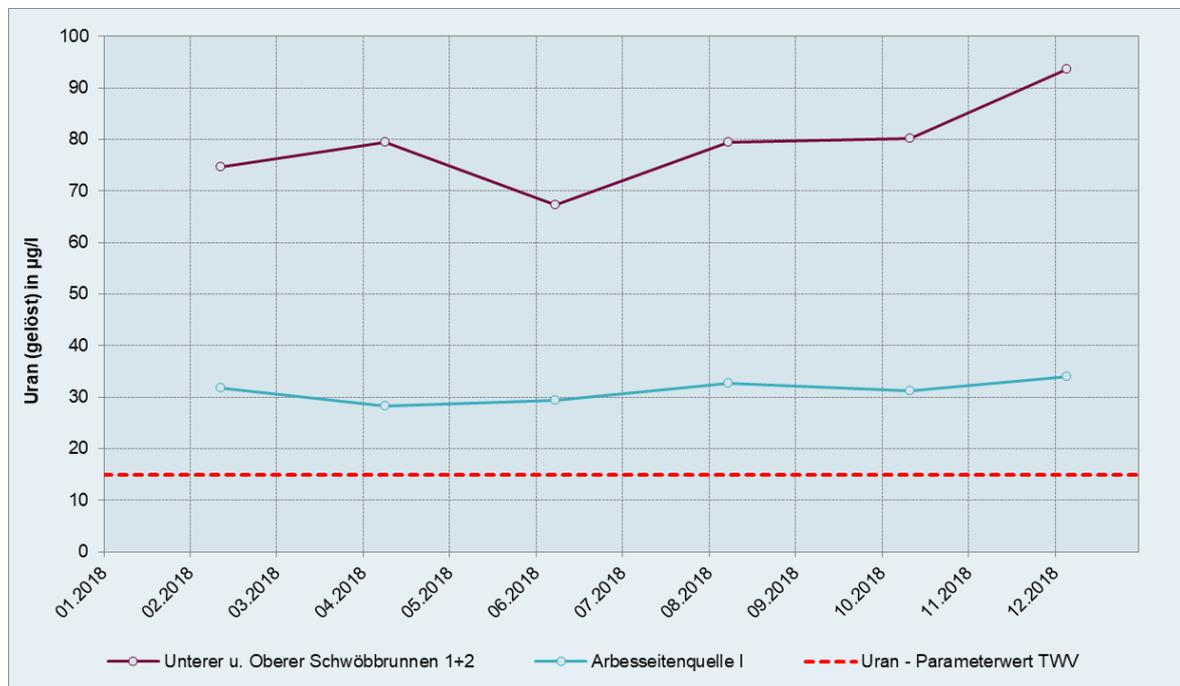
Auffällig sind die beim Schwöbbrunnen mit 31,8 bis 35,4 mg/l vergleichsweise hohen Sulfatkonzentrationen, während bei der Arbesseitenquelle 10,1 bis 12,4 mg/l gemessen wurden.

Die Urankonzentrationen der Quellen liegen durchweg deutlich oberhalb des Parameterwertes der Trinkwasserverordnung (Abbildung 96). Die mit 67,2 bis 93,6 $\mu\text{g}/\text{l}$ höchsten Urangehalte wurden am Schwöbbrunnen gemessen. An der Arbesseitenquelle wurden Urangehalte zwischen 28,2 und 34 $\mu\text{g}/\text{l}$ ermittelt. Die Arsenkonzentrationen der

Arbeseitenquelle überschreiten mit Konzentrationen zwischen 12,5 und 18,3 µg/l den Schwellenwert der QZV Chemie Grundwasser für Arsen von 9 µg/l. Die Arsenkonzentrationen des Schwöbbrunnens erreichen dagegen maximal 3,0 µg/l.

Die Urankonzentrationen wurden sowohl in der Gesamtphase als auch in der gelösten Phase bestimmt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Phasen festgestellt werden. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass Uran nahezu vollständig gelöst vorliegt.

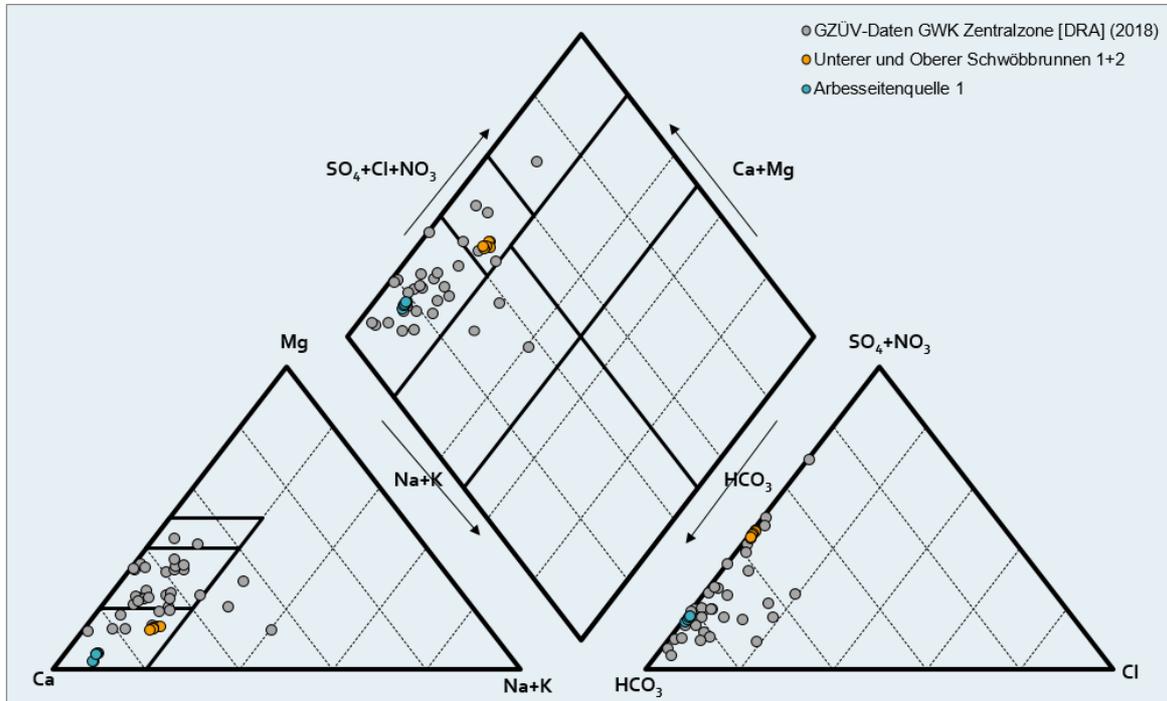
Abbildung 96: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) Unterer und Oberer Schwöbbrunnen 1+2 sowie Arbeseitenquelle 1



Quelle: Umweltbundesamt

Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings können messtellenbezogen dem Anhangsband Kapitel 6.1 entnommen werden.

Abbildung 97: Hauptionen des Grundwassers für den Unteren und Oberen Schwöbbrunnen 1+2, die Arbesseitenquelle 1 und die GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Zentralzone [DRA]



Quelle: Umweltbundesamt

5.4.3.2 Ultraspurenanalytik

Signifikante Vorkommen an den Metallen der Seltenen Erden wurden beim Schwöbbrunnen nahe Silz gemessen. Hervorzuheben sind beispielsweise die Lanthankonzentration von 205 ng/l sowie die Neodymkonzentration von 149 ng/l. Die Chondriten-normalisierte Häufigkeit zeigt für diese Quelle eine stark negative Cer- und Europium-Anomalie und tendenzielle Abreicherung der schweren Seltenen Erden.

Schwefel, Silicium, Strontium, Antimon, Barium, Lithium, Molybdän und Vanadium wurden sowohl im Schwöbbrunnen als auch in der Arbesseitenquelle nachgewiesen.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Ultraspurenanalytik für die Metalle der Seltenen Erden, die Elemente der Platingruppe, Silber, Gold und eine Fülle weiterer Spurenelemente kann dem Anhangsband in Kapitel 7 entnommen werden.

5.4.4 Fazit

In Tirol waren besonders hohe Urangelhalte in den untersuchten Grundwässern und auch zahlreiche Mikro-Uranmineralisationen festzustellen. Der ursächliche Zusammenhang ist evident. Bei den untersuchten Gesteinen Ahorngneis, Orthogneis, Quarzit und Glimmerschiefer wurden zahlreiche uranführenden Minerale festgestellt, nämlich Zirkon, Allanit, Epidot, Uraninit, Thorit, Coffinit, Titanit, Monazit und Xenotim. Bei den untersuchten Ahorngneisen, die Urankonzentration liegt zwischen 4,4 und 6,5 ppm im Gestein, sind Uraninite meist in Quarz, Feldspat, Zirkon und selten in Glimmern eingeschlossen und somit nur teilweise für das Grundwasser zugänglich. Große Thorite (bis 100 µm) und Allanite, beide an Korngrenzen der Hauptminerale zu finden, dürften jedoch entscheidend zur Freisetzung von Uran in das Grundwasser beitragen. Bei dem Orthogneis (Silz), der Urangelhalt liegt zwischen 1,6 und 5,7 ppm im Gestein, sind hingegen Uraninite für das Grundwasser über Risse der Wirtminerale verfügbar. Zusätzlich dürften randlich allanisierte Monazite für die Mobilisierung von Uran ins Grundwasser von Bedeutung sein. Bei dem Quarzit von Silz liegt der Urangelhalt im Gestein bei nur 1,6 ppm. Allerdings wurden Uraninite nachgewiesen, die oft am Rand von Monazit und Xenotim vorliegen und bei Verwitterung dem Grundwasser gut zugänglich sein dürften. Bei dem Glimmerschiefer von Silz, 4,2 ppm Uran im Gestein, ist hingegen die Uranführung von stark metamikten Zirkonen für die Freisetzung von Uran in das Grundwasser entscheidend. Aber auch Thorite, welche vielfach an Rissen und Korngrenzen der Hauptminerale vorliegen, sind dem Grundwasser exponiert.

Die im Zuge des Grundwassermonitorings im Jahr 2018 an der Arbesseitenquelle I bei Mayerhofen sowie beim Unteren u. Oberen Schwöbbrunnen 1+2 nahe Silz gemessenen Urankonzentrationen lagen durchweg deutlich über dem Trinkwasserparameterwert von 15 µg/l. Die mit 93,6 µg/l höchste Urankonzentration wurde am Schwöbbrunnen gemessen. An der Arbesseitenquelle wurden maximal 34 µg Uran/l ermittelt. Die Urangelhalte in der Gesamtphase und in der gelösten Phase zeigten keine signifikanten Unterschiede, d.h. dass Uran nahezu vollständig gelöst im Grundwasser vorliegt. Die gemessenen Urankonzentrationen zeigten keine nennenswerten jahreszeitlichen Schwankungen. Die Arsenkonzentrationen der Arbesseitenquelle überschritten mit Konzentrationen zwischen 12,5 und 18,3 µg/l durchweg den Schwellenwert der QZV Chemie Grundwasser von 9 µg Arsen/l. Die Arsenkonzentrationen beim Schwöbbrunnen waren unauffällig.

Bei der ergänzenden Ultraspurenanalytik wurden Metalle der Seltenen Erden im maximal dreistelligen ng/l Bereich nachgewiesen. Bei Berücksichtigung eines normierten Verteilungsmusters ist auffällig, dass eine der oberen Kruste – Abreicherung der schweren Seltenen Erden mit negativer Cer und Europium Anomalie – ähnelnde Signatur vorliegt. Bei der Studie von Biddau et al. (2009) zu Gehalten von Seltenen Erden in Grundwässern der Schweiz im alpinen Setting wurden Gehalte zwischen 10 und 100 ng/l (Summe der Seltenen

Erden) und negative Anomalien von Cer und Europium nachgewiesen. Einzig bei karbonatischen Aquiferen wurden deutlich höhere Werte (bis 516 ng/l) bestimmt. Mit der durchgeführten Ultraspurenanalytik wurde belegt, dass deutlich höhere Gehalte der Seltenen Erden auch in kristallinen Aquiferen vorliegen können. So wurden bei den Schwöbbrunnen in Summe 700 ng/l an Seltenen Erden festgestellt, besonders erwähnenswert sind die Konzentrationen von Lanthan (205 ng/l), Neodym (149 ng/l) und Yttrium (182 ng/l). Von den Platingruppenelementen war ausschließlich Platin in einer sehr geringen Konzentration (0,01 ng/l) nachweisbar und nennenswert erhöhte Konzentrationen von weiteren Elementen liegen – abgesehen von Uran – nicht vor.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Grundwasseruntersuchungen

Die Untersuchung des Verteilungsverhaltens von Uran zwischen Gesamtphase und gelöster Phase in den beprobten Grundwässern zeigte, dass keine signifikanten Unterschiede in den Urankonzentrationen der Gesamtphase und der gelösten Phase vorlagen. Dies weist darauf hin, dass Uran in Grundwasser nahezu vollständig gelöst vorliegt. Weiters konnten keine signifikanten jahreszeitlichen Schwankungen des Urangehalts im Grundwasser festgestellt werden.

Die Untersuchung von Metallen in den Grundwasserproben ergab Überschreitungen des Parameterwertes gemäß Trinkwasserverordnung (TWV 2001 i.d.g.F.) für Arsen an der Arbesseitenquelle I sowie der Schönebenquelle SEQ, die maximalen Arsenkonzentrationen beliefen sich auf 18 bzw. 15 µg/l. Für die untersuchten Grundwässer aus Retz und dem Seewinkel waren Überschreitungen der Indikatorwerte gemäß Trinkwasserverordnung für Eisen und Mangan zu verzeichnen, die sich auf das anoxische Milieu an den Grundwassermessstellen zurückführen lassen.

Antimon, Barium, Molybdän, Schwefel, Silicium und Strontium konnten in allen Grundwasserproben nachgewiesen werden. Lithium konnte mit Ausnahme der Hagenbachquelle HQ1 in allen Proben nachgewiesen werden.

Signifikante Vorkommen an Metallen der Seltenen Erden wurden beim Unteren und Oberen Schwöbbrunnen 1+2 bei Silz, der Hagenbachquelle HQ1, der Hochreichartquelle HRQ, in Retz bei IHB-5 sowie im Seewinkel bei KB1 (unterer Horizont) und KB2 (oberer Horizont) gemessen. Je nach geologischer Herkunft wurden verschiedene Muster für die Elemente der Seltenen Erden festgestellt. Die Proben aus den Kristallinstandorten in Tirol und der Steiermark zeigen eine stark negative Cer- und Europium-Anomalie und tendenzielle Abreicherung der schweren Seltenen Erden. Im Gegensatz dazu wurden in den Proben aus den beiden Porengrundwasserstandorten Retz und Seewinkel nur sehr schwach ausgeprägte Anomalien festgestellt.

Bodenuntersuchungen

Die im Seewinkel und in Retz durchgeführten Bodenuntersuchungen ergaben keine neuen Erkenntnisse im Vergleich zu den bereits abgeschlossenen DaFNE-Forschungsprojekten.

Weder eine Anreicherung von Uran noch eine Verlagerung mit der Tiefe im Untergrund konnte nachgewiesen werden. Ebenso bestand kein Zusammenhang zwischen Phosphat- und Urangehalten.

Gesteins- und mineralchemische Untersuchungen

An den Porengrundwasserstandorten Retz und Seewinkel zeigten die Untersuchungen der Urangehalte in den Sedimentfraktionen <0,063 mm sowie 0,063 bis 2 mm, dass eine Anreicherung von Uran in der Feinstfraktion < 0,063 mm vorliegt. Während in den untersuchten Sedimenten aus dem Seewinkel ein großer Anteil des Urans in schwer löslichen akzessorischen Mineralen wie beispielsweise Zirkone gebunden ist, spielen in Retz andere Bindungsformen eine Rolle. Hier ist Uran nur in einem geringen Ausmaß an schwer löslichen akzessorischen Mineralen wie Zirkon, Monazit und Xenotim gebunden. Vielmehr weisen sowohl die geochemischen Untersuchungen als auch die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion auf einen Zusammenhang von Uran mit Sulfiden hin. Ein großer Teil des Urans dürfte an adsorbierte Phasen (Bindung an Korngrenzen), amorphe Fe-Oxid-Hydroxide, organische Phasen oder Uraninit gebunden sein. Somit ist anzunehmen, dass Sorptionsprozesse die geochemische Mobilität von Uran im gegebenen Setting entscheidend beeinflussen. Uraninit konnte bei den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der Proben aus dem Seewinkel und aus Retz nicht nachgewiesen werden. Das Fehlen von Uraninit ließe sich durch eine sehr feine Verteilung begründen, da diese nicht detektierbar ist. Für eine sehr feine Verteilung spricht zudem, dass Uran in der Feinstfraktion angereichert vorliegt.

An jenen Kristallinstandorten, für die höhere Urankonzentrationen in den untersuchten Quellwässern zu verzeichnen sind, liegt Uraninit zumeist in Zirkone eingeschlossen vor. Die Zirkone befinden sich häufig an den Korngrenzen der Hauptminerale, sind oftmals metamikt bzw. zerklüftet und somit verwitterungsanfällig. Bei physikalischer Verwitterung der Zirkone können somit auch deren Uraniniteinschlüsse mit Grundwasser in Kontakt kommen.

An den steirischen Standorten, an denen die Urangehalte im Quellwasser im Vergleich zu den anderen untersuchten Gebieten sehr niedrig waren, wurden insgesamt weniger Mikro-Uranmineralisationen gefunden als in Kärnten und Tirol, auch wenn bei den Gesteinen prinzipiell ein weites Spektrum von Uranmineralen nachgewiesen wurde. Hinsichtlich der Verfügbarkeit von Uran im Grundwasser dürfte allerdings die Häufigkeit der Minerale, insbesondere jene von Uraninit und Thorit, von entscheidender Bedeutung sein.

Uranakkumulation an Redoxfronten

Säulen- und Batchexperimente zeigten klar, dass die Retzer Sedimente mikrobielle Gemeinschaften enthalten, die alle relevanten Prozesse der Anreicherung von Uran an einer Redoxfront katalysieren. Dies schließt die reduktive Ausfällung von Uran an der Redoxfront ein, die zu einer Anreicherung von Uran in Sedimenten führt, sowie die oxidative Remobilisierung, die zu einer Anreicherung von Uran im Grundwasser führt. Die Experimente zeigten zudem, dass die Uranoxidation besonders effizient an die Nitratreduktion gekoppelt ist. Somit spielt Nitrat im Grundwasser eine besondere Rolle in der Ausbildung solcher lokalen Urananreicherungen.

Die Grundwässer in Retz zeigten alle Anzeichen, die bei aktivem Abläufen dieser Prozesse erwartet werden: eine Redoxfront liegt vor mit niedrigen Urangelhalten und Nitratgehalten im zuströmenden Grundwasser und uran- und nitratfreiem Grundwasser im Abstrom. Es besteht kein säkulares Gleichgewicht des Urans mit den Tochterisotopen, was weiterhin bestätigt, dass die Prozesse an der Redoxfront rezent ablaufen.

Voraussetzungen für lokale Anreicherungen von Uran im Grundwasser durch diese Prozesse sind also die folgenden:

- Anströmende Grundwässer mit niedrigen Urangelhalten (ggf. deutlich unter den Trinkwassergrenzwerten, z.B. aus Verwitterungslösungen, Drainage trockengelegter Moore, hydrothermalen Lösungen usw.) und Nitratgehalten
- Transport dieser Lösungen über eine oxisch/anoxische Redoxfront

Konsequenzen dieser geochemischen Situation sind

- Hohe lösliche Urankonzentrationen auf der oxischen Seite der Redoxfront
- Anreicherung des Urans in der Festphase auf der anoxischen Seite der Redoxfront
- Uran- und Nitratfreie Lösungen im Abstrom der Redoxfront

Ausblick

Neuere Untersuchungen (Bhattacharyya et al., 2017) zeigen, dass Uranisotopenfraktionierung an Redoxfronten zu Verschiebungen der Uranisotopenzusammensetzung führen kann. Daher könnten Isotopenuntersuchungen Hinweise auf den Anreicherungsmechanismus in der Festphase geben. Allerdings fehlen entsprechende Untersuchungen an kleinskaligen Anreicherungen, wie sie in Retz oder ggf. im Seewinkel vorliegen. Daher ist noch es schwierig abzuschätzen, ob solche Isotopensignaturen

als robuste Marker der Anreicherungsmechanismen dienen können. Darüber hinaus könnten die Isotopensignaturen einen Hinweis auf die Herkunft des Urans liefern, wenn die Signaturen der Uranquellen (z.B. aus Verwitterungslösungen) bekannt ist (Spano et al., 2017). Auch hier wären detaillierte Untersuchungen notwendig, um im Einzelfall belastbare Aussagen treffen zu können. Für beide hier angerissenen Fragestellungen wären also Untersuchungen notwendig, die durchaus interessant sein könnten, den Rahmen des vorliegenden Projektes aber deutlich überschritten hätten.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht zu den untersuchten Horizonten und angewandten analytischen Methoden	23
Tabelle 2: Übersicht zu den bei der sequentiellen Extraktion nach Percival (1990) in Schönwiese (2007) verwendeten Reagenzien und erfassten Uran-Phasen	25
Tabelle 3: Umrechnungen von Masse (g) in Aktivität (Bq) für Uran (MERKEL, 2002)	29
Tabelle 4: Physikalische Parameter der Säulenexperimente	31
Tabelle 5: Sequentiell einfließende Lösungen in Säulenexperimenten. Ein pH von 7,1 wurde in allen Lösungen durch CO ₂ -Begasung eingestellt.	33
Tabelle 6: Radon-222 Analysen von beprobten natürlichen Wässern im Seewinkel	41
Tabelle 7: Geochemie der beprobten Tiefenbereiche der Bohrung Seewinkel KB2	42
Tabelle 8: Urangehalte der Fraktionen <0,063 und 0,063-2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung Seewinkel KB2	44
Tabelle 9: XRD-Analysen der Fraktion 0,063-2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung Seewinkel KB2	45
Tabelle 10: Ergebnisse der Radon-220 Leachingversuche von der Bohrung Seewinkel KB2	47
Tabelle 11: Radon-222 Analysen von beprobten natürlichen Wässern in Retz	55
Tabelle 12: Geochemie der beprobten Bereiche der Bohrung Retz IHB-5 und des Retzer Kellersystems	58
Tabelle 13: Urangehalte der Fraktionen <0,063 und 0,063–2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 sowie des Retzer Kellersystems	59
Tabelle 14: XRD-Analysen der Fraktion 0,063-2 mm von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 sowie des Retzer Kellersystems	60
Tabelle 15: Vergleich der zu erwartenden Radon-220-Emanation der Sedimentproben mit dem Mittel der tatsächlichen gemessenen Emanation aus den Sedimentproben ins Wasser; die uranreiche Probe Retz, IHB-5 – 25-25 m u. GOK zeigt einen deutlich geringeren Wert als den erwarteten. Dies deutet auf ein starkes Ungleichgewicht in der Zerfallsreihe hin.	62
Tabelle 16: In Abbildung 19 berücksichtigte Grundwassermessstellen	66
Tabelle 17: CHNS-Analyse der Retzer Sedimente	69
Tabelle 18: Röntgenfluoreszenzanalyse der Retzer Sedimente (Gehalte in %)	69
Tabelle 19: Proben und Dünnschliffpräparate zu den in den Alpen untersuchten Kristallinstandorten, gegliedert nach den Bundesländern, mit Bezug zu den dauerbeobachteten Quellmessstellen; die genaue Lage der Probenahmestellen kann den folgenden Detailbeschreibungen entnommen werden.	87

Tabelle 20: Hauptelemente der kristallinen Gesteinsproben; H ₂ O und CO ₂ wurde an der Geologischen Bundesanstalt bestimmt, die anderen angegebenen Konzentrationen wurden an der Universität Salzburg gemessen, lediglich die Analyse zu SEA wurde zur Gänze an der Geologischen Bundesanstalt bestimmt.	89
Tabelle 21: Spurenelemente der kristallinen Gesteinsproben; mit Ausnahme des Urans und Lithiums, diese Werte sind ICP-MS-Analysen, wurden alle anderen Elemente mit der RFA bestimmt (Teil 1 + Teil 2)	90
Tabelle 22: Modalbestand des Dünnschliffs 313	96
Tabelle 23: Modalbestand des Dünnschliffs 314	104
Tabelle 24: Modalbestand des Dünnschliffs 315	109
Tabelle 25: Modalbestand des Dünnschliffs 316	113
Tabelle 26: Modalbestand des Dünnschliffs 327	130
Tabelle 27: Modalbestand des Dünnschliffs 328	133
Tabelle 28: Modalbestand des Dünnschliffs 317	143
Tabelle 29: Modalbestand des Dünnschliffs 318	147
Tabelle 30: Modalbestand des Dünnschliffs 319	150
Tabelle 31: Modalbestand des Dünnschliffs 320	157

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Uran im Grundwasser – Ergebnisse der GZÜV-Untersuchungen im Jahr 2013	12
Abbildung 2: Klassifizierung der Proben nach den Kationen-Verhältnissen von Quarz, Plagioklas und Kalifeldspat in einem P-Q Diagramm (Debon & Le Fort, 1983)	20
Abbildung 3: Klassifizierung von granitoidischen Gesteinen nach der Mesonorm in einem Q-ANOR Diagramm; $Q = 100 * (Qtz / (Qtz + Ab + Or + An))$ und $ANOR = 100 * An / (An + Or)$ (Streckeisen & Le Maitre, 1979)	21
Abbildung 4: Klassifizierung der Proben nach Frost et al. (2001)	22
Abbildung 5: Polierter Anschliff eines Streupräparats, Durchmesser 4 cm.	24
Abbildung 6: Radon-222 Leachingversuche	29
Abbildung 7: Säulenversuchsaufbau mit zuströmender Lösung in gasdichten Tedlar-Beuteln, Schlauchquetschpumpe, Säulen und Fraktionssammler	32
Abbildung 8: Lageplan Untersuchungsgebiet zwischen Frauenkirchen und Podersdorf am See im Seewinkel mit den untersuchten Grundwasserprobenahmestellen	37
Abbildung 9: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der untersuchten Grundwassermessstellen im Seewinkel	38
Abbildung 10: Hauptionen des Grundwassers an den untersuchten Messstellen sowie den GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Seewinkel	39
Abbildung 11: Sequentielles kumulatives Extraktionsverhalten von Uran von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung Seewinkel KB2	46
Abbildung 12: Lageplan Untersuchungsgebiet Retz	50
Abbildung 13: Geologischer Profilschnitt zum Raum Retz mit der Bohrung IHB-5 und den beprobten Teufenbereichen; Geologie nach der Geologischen Karte 1:50.000, Blatt 9 Retz (Roetzel, 1999) und Blatt 22 Hollabrunn (Roetzel, 1998), Bohrungen nach den Unterlagen im Archiv der Fachabteilung Hydrogeologie und Geothermie; Uran-frei bezieht sich auf den geringen Urangehalt im gespannten Grundwasser.	51
Abbildung 14: Ausschnitt aus der geologischen Karte 1:50.000 mit der Lage der beiden Brunnenfelder Sandweg (südlich) und Seeweg (nördlich) im Randbereich der Böhmisches Masse	52
Abbildung 15: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der untersuchten Grundwassermessstellen in Retz	53

Abbildung 16: Retz: Hauptionen des Grundwassers an den untersuchten Messstellen sowie den GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Weinviertel [MAR]	54
Abbildung 17: Sequentielles kumulatives Extraktionsverhalten von Uran von ausgewählten Tiefenbereichen der Bohrung IHB-5 und von einer Probe aus dem Retzer Kellersystem (Schmiedgasse)	61
Abbildung 18: Ausgewertete Grundwassermessstellen im Bereich der vermuteten Redoxfront Retz	65
Abbildung 19: Konzentrationen von Nitrat, Uran und Mangan entlang eines Redoxgradienten, der durch abnehmende Nitratkonzentrationen und erhöhte Uran- und Mangankonzentrationen im Bereich der Redoxfront gekennzeichnet ist (Daten: Umweltbundesamt).	66
Abbildung 20: Vermutete geochemische Verhältnisse im Bereich der Wasserfassung Retz	68
Abbildung 21: Nitratreduktion in Gegenwart von 1,8 mM Azetat bei 20 und 30 Grad Celsius. Kontrollexperimente (-Azetat) zeigen nur geringe Nitratreduktion.	71
Abbildung 22: Nitratreduktion in Gegenwart von Azetat. Zunächst gleichzeitige Zugabe von Azetat und Nitrat. Es folgten zwei weitere Zugaben von Nitrat. Nach 210 Stunden folgte eine weitere Zugabe von Azetat.	72
Abbildung 23: Nitratreduktion nach Glukosezugabe im Batchexperiment	73
Abbildung 24: Mikrobielle Uranreduktion und reduktive Manganmobilisierung in Gegenwart verschiedener potentieller Elektronendonoren in Batch-Experimenten.	74
Abbildung 25: Nitratreduktion in Gegenwart von Glukose im Säulenexperiment (Phase 1, Tabelle 5). Die Nitratkonzentrationen werden als Funktion des Wasservolumens gezeigt, welches die Säule bereits durchströmt hat, normalisiert auf das gesamte Porenvolumen (18 ml).	75
Abbildung 26: Uran(VI)-Durchbruch und anschließende reduktive Uran(IV)-Fällung im Säulenexperiment (Phase 2, Tabelle 5). Im Influent wurde ab 24 PV μM Uran(VI) zugegeben.	76
Abbildung 27: Oxidative Uran-Remobilisierung und -Durchbruch nach Zugabe von Nitrat im Zufluss (Phase 4, Tabelle 5).	77
Abbildung 28: Mangan- und Eisenreduktion werden durch erhöhte Mangan(II)- und Eisen(II)-Konzentrationen angezeigt.	78
Abbildung 29: Die Festlegung von Uran in der Festphase und die anschließende oxidative Mobilisierung in der Modellrechnung.	80
Abbildung 30: Überblick zu den Untersuchungen im Raum Retz	82
Abbildung 31: Lageplan Puffquelle und der beiden Quelläste der Kaiser Franz Josef Quelle	92
Abbildung 32: Lage der Puffquelle und des Probenahmeorts G1.	93
Abbildung 33: Quellfassung Puffquelle; der Gesteinsblock im Hintergrund wurde beprobt.	94
Abbildung 34: Handstück P aus Fragant.	95

Abbildung 35: Schliff 313 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	98
Abbildung 36: Schliff 313 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	98
Abbildung 37: Lage der Kaiser Franz Josef-Quellen und der Probenahmestelle der Gesteinsproben.	100
Abbildung 38: Quellfassung Kaiser Franz Josef-Quelle 1. Die Umgebung zeigt Blockwerk aus Paragneisen und Granitgneisen.	101
Abbildung 39: Quellstube der Kaiser Franz Josef-Quelle 2.	102
Abbildung 40: Handstück FJ1 aus Mallnitz.	103
Abbildung 41: Schliff 314 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm.	105
Abbildung 42: Schliff 314 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	106
Abbildung 43: Schliff 314 (PPL); idiomorpher Titanit in Matrix, Größe Titanit: 0,32 mm	106
Abbildung 44: Schliff 314 (XPL); idiomorpher Titanit in Matrix, Größe Titanit: 0,32 mm	107
Abbildung 45: Handstück FJ2 aus Mallnitz	108
Abbildung 46: Schliff 315 (PPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm.	110
Abbildung 47: Schliff 315 (XPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm.	111
Abbildung 48: Schliff 315 (XPL), 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm.	111
Abbildung 49: Handstück FJ3 aus Mallnitz.	112
Abbildung 50: Schliff 314 (PPL), 5 x vergrößert; Bild: 2 x 3 mm.	114
Abbildung 51: Schliff 314 (XPL), 5x vergrößert; Bild: 2 x 3 mm.	115
Abbildung 52: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der Puffquelle und der Kaiser Franz Josef Quelle	117
Abbildung 53: Hauptionen des Grundwassers für die Puffquelle, Kaiser Franz Josef Quelle und die GZÜV-Messstellen im Grundwasserkörper Zentralzone [DRA]	118
Abbildung 54: Lageplan Untersuchungsgebiet Hagenbachtal/Seckauer Alpen mit den Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, Hochreichartquelle HRQ1 und Schönebenquelle SEQ in der Steiermark	121
Abbildung 55: Geologie im Hagenbachtal mit Lage der Probenahmestellen Hagenbachquellen HQ1 und HQ2	122
Abbildung 56: Geologische Karte Blatt Oberzeiring-Kalwang (Metz, 1967)	123
Abbildung 57: Geologische Übersichtskarte zu den Seckauer Alpen (Mandl et al., 2018)	123
Abbildung 58: Aufschluß Rannachserie im Hagenbachtal.	124
Abbildung 59: Granitgneis Stubenbachgraben (G21)	125
Abbildung 60: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) der Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, der Hochreichartquelle HRQ1 und der Schönebenquelle SEQ	126
Abbildung 61: Hauptionen des Grundwassers für die Hagenbachquellen HQ1 und HQ2, Hochreichartquelle HRQ1, Schönebenquelle SEQ und die GZÜV- Messstellen im Grundwasserkörper Niedere Tauern einschl. Seckauer Tauern [MUR]	127
Abbildung 62: Handstück H1 aus dem Hagenbachtal	129

Abbildung 63: Schliff 327 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	131
Abbildung 64: Schliff 237 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	131
Abbildung 65: Handstück H3 aus dem Hagenbachtal	132
Abbildung 66: Schliff 328 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4mm	134
Abbildung 67: Schliff 328 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4mm	135
Abbildung 68: Lageplan Untersuchungsgebiete Mayrhofen und Silz in Tirol	138
Abbildung 69: Geologie im Raum südlich Mayrhofen mit Lage der Probenahmestellen.	139
Abbildung 70: Zuläufe der beiden Quellstränge	139
Abbildung 71: Quellfassung Arbesseitenquelle 1	140
Abbildung 72: Ahorngneis	141
Abbildung 73: Handstück Aa aus Mayrhofen.	142
Abbildung 74: Schliff 317 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	144
Abbildung 75: Schliff 317 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	145
Abbildung 76: Handstück A-b aus Mayrhofen	146
Abbildung 77: Schliff 318 (PPL), 2,5x vergrößert; Bild: 6x4mm	148
Abbildung 78: Schliff 318 (XPL), 2,5x vergrößert; Bild: 6x4mm	148
Abbildung 79: Handstück Ac aus Mayrhofen	149
Abbildung 80: Schliff 319 (PPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	151
Abbildung 81: Schliff 319 (XPL), 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4mm	152
Abbildung 82: Geologie im Raum südlich Silz mit Lage der Probenahmestellen	154
Abbildung 83: Quellfassung Schwöbbrunnen	155
Abbildung 84: Aufschluss des porphyrischen Augengneises (G8)	155
Abbildung 85: Handstück S1 aus Silz	156
Abbildung 86: Schliff 320 (PPL), 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm; Biotit nebem perthitischem Kalifeldspat (Kfs) und Muskowit (Mu) mit einem undulösen Auslöschen.	158
Abbildung 87: Schliff 320 (XPL), 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm; Biotit nebem perthitischem Kalifeldspat (Kfs) und Muskowit (Mu) mit einem undulösen Auslöschen.	159
Abbildung 88: Schliff 320 (PPL); 5 x vergrößert; Bild: 3 x 2 mm faseriger Stilpnomelan in Plagioklas, Quarz und Kalifeldspat-Matrix	160
Abbildung 89: Handstück S5a aus Silz	161
Abbildung 90: Schliff 322 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	162
Abbildung 91: Schliff 322 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	163
Abbildung 92: Handstück S5b aus Silz	164
Abbildung 93: Schliff 323 (PPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	166
Abbildung 94: Schliff 323 (XPL); 2,5 x vergrößert; Bild: 6 x 4 mm	166
Abbildung 95: Lage der Schwöbbrunnen 1+2 sowie der Arbesseitenquelle 1.	168
Abbildung 96: Urankonzentrationen (gelöste Fraktion) Unterer und Oberer Schwöbbrunnen 1+2 sowie Arbesseitenquelle 1	169

Abbildung 97: Haptionen des Grundwassers für den Unteren und Oberen
Schwöbbrunnen 1+2, die Arbesseitenquelle 1 und die GZÜV-Messstellen
im Grundwasserkörper Zentralzone [DRA]

170

9 Literaturverzeichnis

Bargar, J. R., Williams, K. H., Campbell, K. M., Long, P. E., Stubbs, J. E., Suvorova, E. I. & Webb, S. M. (2013): Uranium redox transition pathways in acetate-amended sediments. – Proceedings of the National Academy of Sciences, 110, 12, 4506-4511.

Baumgarten, A., Eder, A., Dersch, G., Großgut, G., Humer, F., Herndl, M., Katzlberger, C., Kumpan, M., Landstetter, C., Liebmann, B., Pfundtner, E., Riss, A., Spiegel, H. & Zethner, G. (2016): Verhalten von Uran aus Phosphat haltigen Düngern im System Boden-Wasser-Pflanze. DaFNE-Forschungsprojekt 100960, Endbericht Februar 2016. AGES, Wien.

Berka, R., Katzlberger, C., Philippitsch, R., Schubert, G., Korner, M., Landstetter, C., Motschka, K., Pirkl, H., Grath, J., Draxler, A. & Hörhan, T. (2014): Erläuterungen zur geologischen Themenkarte Radionuklide in den Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs 1:500.000. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

Bhattacharyya, A., Campbell, K.M., Shelly, D.K., Roebbert, Y., Weyer, S., Bernier-Latmani, R. & Borch, T. (2017): Biogenic non-crystalline U^(IV) revealed as major component in uranium ore deposits. – Nat. Commun. 8, 15538. <https://doi.org/10.1038/ncomms15538>.

Biddau, R., Benismon, M., Cidu, R. & Parriaux, A. (2009): Rare earth elements in groundwater from different Alpine aquifers. – Geochemistry, 69, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.05.002>.

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2015): Wemhöner, U., Humer, F., Schubert, G., Berka, R., Philippitsch, R. & Hörhan, T.: Uran in Grundwässern Österreichs. Bericht und Karte 1:500.000. Wien.

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2017): Humer, F.: Forschungsprojekt Nr. 101204 - Uran in Grundwasser. Zwischenbericht 2017. Wien.

BMNT – Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018): Humer, F.: Forschungsprojekt Nr. 101204 - Uran in Grundwasser. Zwischenbericht 2018. Wien.

Boyanov, M. I., Fletcher, K. E., Kwon, M. J., Rui, X., O'Loughlin, E. J., Loffler, F. E., & Kemner, K. M. (2011): Solution and microbial controls on the formation of reduced U (IV) species. – *Environmental Science & Technology*, 45(19), 8336-8344.

Clarke, D. B. (1981): The Mineralogy of peraluminous granites: a review. – *Canadian Mineralogist*, 19, 3-17.

De Pablo, J., Casas, I., Gimenez, J., Molera, M., Rovira, M., Duro, L., & Bruno, J. (1999): The Oxidative Dissolution Mechanism of Uranium Dioxide: 1. The Effect of Temperature in Hydrogen Carbonate Medium. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 19, 3097-3103.

Debon, F. & Le Fort, P. (1983): A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. – *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 73, 135-149.
<https://doi.org/10.1017/S0263593300010117>.

Debon, F. & Le Fort, P. (1988): A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. – *Bulletin de Mineralogie*, 111, 493-510.

Dobrzyński, D., Boguszewska-Czubara, A. & Sugimori, K. (2018): Hydrogeochemical and biomedical insights into germanium potential of curative waters: a case study of health resorts in the Sudetes Mountains (Poland). – *Environmental Geochemistry and Health*, 40, 1355-1375.

Dreher, J., Rajner V., Rank D. & Reitingner J. (1986): Grundwasseruntersuchungen am Ostufer des Neusiedlersees und im Seewinkel; Biologische Station Neusiedlersee – BFB-Bericht 58.

Ebner, F. & Göd, R. (1997): Uranbezirk Liesing-Paltental. – In: Weber, L. (Hrsg.), *Handbuch der Lagerstätten, Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs*. – *Archiv für Lagerstättenforschung*, 19, 385. Verlag der Geologische Bundesanstalt, Wien.

Elster, D., Fischer, L., Hann, S., Goldbrunner, J., Schubert, G., Berka, R., Hobiger, G., Legerer, P. & Philippitsch, R. (2018): Österreichs Mineral- und Heilwässer: Teil I. Vorkommen & Hydrogeologie; Teil II. Ultraspuren & Hydrochemie. – 442 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

Exner, Ch. (1957): Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein 1:50.000. – 168 S., 8 Tafeln, Verlag der geologischen Bundesanstalt, Wien.

Exner, Ch. (1964): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Sonnblickgruppe 1:50.000. – 170 S., 8 Tafeln, Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.

Frisch, W. (1973/1974): Die stratigraphisch-tektonische Gliederung der Schieferhülle und die Entwicklung des penninischen Raumes im westlichen Tauernfenster. – Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien, 66-67., 9-20.

Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis D. J. & Frost C. D. (2001): A geochemical classification for granitic rocks. – *Journal of Petrology*, 42, 2033-2048.
<https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>.

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 Zustands von Gewässern.

Holy, K., Polaskova, A., Baranova, A., Sykora, I., & Hola, O. (1998): Radon emanation coefficients in sandy soils. – In Nikodemova, D. (Ed.): Radiation Hygiene Days 1998 Conference Proceedings of the 21-st Radiation Hygiene Days, (p. 250). Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic.

Hutchison, C. S. (1974): Laboratory Handbook of Petrographic Techniques. – John Wiley & Sons, New York, 527 S.

Ishimori, K., Lange, Y., Martin, P., Mayya, Y.S. & Phaneuf, M. (2013): Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. – Technical Reports Series, 474, 85 S., IAEA.

Karl, F. (1959): Vergleichende petrographische Studien an den Tonalit-Graniten der Hohen Tauern und den Tonalit-Graniten einiger periadriatischer Intrusivmassive. – *Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt*, 202, 1-192. Wien.

Kübeck, C. & Bergmann, A. (2015): Uranmobilisierung in Porengrundwasserleitern. – Vortrag beim DVGW-LAWA-Forum: Uran im Grundwasser – Vorkommen, Ursachen und Entfernung. 7. Mai 2015, Kassel.

Kupka, E. (1954): Zur geologischen Stellung des Ahornkernes in den westlichen Hohen Tauern. – Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien, 47, 1-34.

Legerer, Ph. (2018): Radon-Analytik der Grundwässer in Retz und im Seewinkel. In: Schubert, G.; Kaminsky, E-F.; Elster, D.; Leger, Ph.; Benold, Ch.; Hobiger, H. & Berka, R. (2018): 2. Tätigkeitsbericht der Geologische Bundesanstalt zum DaFNE-Forschungsprojekt Nr. 101204. S. 39–40. – Unveröffentlichter Bericht, Geologische Bundesanstalt, Wien.

Lewis, D. G., Fein, J.B., Burns, P.C., Szymanowski, J.E.S. & Converse, J. (2008): Solubility measurements of the uranyl oxide hydrate phases metaschoepite, compreignacite, Na-compreignacite, becquerelite, and clarkeite. – J. Chem. Thermodynamics 40 (2008), 980–990. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2008.02.006>.

Lovley, D. R., Phillips, E. J., Gorby, Y. A., & Landa, E. R. (1991): Microbial reduction of uranium. – Nature, 35, 6317, 413.

Mandl, M., Kurz, W., Hauzenberger, Ch., Fritz, H., Klötzli, U. & Schuster, R. (2018): Pre-Alpine evolution of the Seckau Complex (Austroalpine basement/Eastern Alps): Constraints from in-situ LA-ICP-MS U/Pb zircon geochronology. – Lithos, 2018, 412-430, Elsevier.

Matthes, S. (1996): Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrographie und Lagerstättenkunde. – Springer.

Merkel, B. J. (2002): Uran in Trinkwasser. – Internetbeitrag aus dem Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiburg.

Metz, K. (1967): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000. Nr. 130-131 Oberzeiring - Kalwang 1:50.000. – Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.

Metz, K. (1976): Der geologische Bau der Seckauer und Rottenmanner Tauern. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 119 (1976), 151-205. Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.

Metz, K. (1980): Geophysikalische, geologische und lagerstättenkundliche Studien in der Rannachserie des Liesingtales, Stmk.: Bericht zu Projekt P 29 der Steiermärkischen Landesregierung ("Schwerminerale Rannachserie"). – Bericht, 9 S., Universität Graz.

Mielke P. & Winkler H. G. F. (1979): Eine bessere Berechnung der Mesonorm für granitische Gesteine. – Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte, 10, 471-480.

Moon, H. S., Komlos, J. & Jaffe, P. (2007): Uranium reoxidation in previously bioreduced sediment by dissolved oxygen and nitrate. – *Environmental Science & Technology*, 41, 13, 4587-4592.

Nolan, J., & Weber, K. A. (2015): Natural Uranium Contamination in Major US Aquifers Linked to Nitrate. – *Environmental Science & Technology*, 2, 8, 215-220.

Nowotny, A. (1978): Bericht 1977 über Aufnahmen im Kristallinanteil auf Blatt 116, Telfs und Blatt 117, Zirl. – *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 1978, A98-A99. Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Parkhurst, D. L., & Appelo, C. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey.

Pestal, G., Hejl, E., Braunstingl, R. & Schuster, R. (Red) (2009): Geologische Karte von Salzburg 1:200 000: Erläuterungen. – 162 S., Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.

Percival, J.B. (1990): Clay mineralogy, geochemistry and partitioning of Uranium within the alteration halo of the Cigar Lake Uranium Deposit Saskatchewan. – Dissertation, Ottawa, Carleton University, Ottawa.

Pirkl, H. (1980): 3.8 Die Westlichen Zentralalpen. – In: Oberhauser, R. (Red.): *Der geologische Aufbau Österreichs*, S. 332-347, Springer.

Plant, J. A., Simpson, P. R., Smith, B., & Windley, B. F. (1999): Uranium ore deposits; products of the radioactive Earth. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 38, 1, 255-319.

Prey, S. (1964): Die Matreier Zone in der Sadniggruppe. – In: Exner, Ch.: *Erläuterungen zur Geologischen Karte der Sonnblickgruppe 1:50.000*, S. 131-157. Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.

Prüfstelle für ionisierende Strahlung und Strahlenschutz (2017): Prüfbericht Nr. LA837-1/17. – 4 S., Seibersdorf Labor GmbH, Seibersdorf.

Reitinger, J. & Schmalfluss, R. (1993): Ergebnisse des Forschungsprojektes Wasserhaushaltsstudie Neusiedlersee. – *Arch.f. Lagerst.forsch.Geol.B.-A.*, 14, 133-137.

Rezabek, H.R. (1990–1992): Grundwasserwirtschaft Seewinkel. – Gruppe Wasser, Wien.

Roetzel, R. (Red.) (1998): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. 22 Hollabrunn. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

Roetzel, R. (Red.) (1999): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 9 Retz. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

Scharbert, S.: (1980): Die Bösensteingruppe und die Seckauer Tauern. – In: Oberhauser, R. (Red.): Der geologische Aufbau Österreichs. Springer.

Schindlmyr, A. (1999): A Key for Understanding the Early Palaeozoic History of Austroalpine Crystalline Basement in the Western Eastern Alps. – Dissertation Univ. Salzburg, 167 S.

Schmidegg, O. (1933): Neue Ergebnisse in den südlichen Ötztaler Alpen. – Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1933, 83-95. Wien.

Schnabel, W. (Red.) (2002): Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000. Legende und kurze Erläuterung. Mit Beiträgen von Krenmayr, H.; Mandl, G.W.; Nowotny, A.; Roetzel, R.; Scharbert, S. & Schnabel, W. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

Schönwiese, D. (2007): Untersuchungen eines Uranvorkommens in der Oberfalz auf Eignung als natürliches Analogon für das Verhalten radioaktiver Elemente im Fernfeld eines hypothetischen Endlagers. – Dissertation, Braunschweiger geowissenschaftliche Arbeiten, 29, 146 S., Braunschweig.

Schubert, G., Finger, F., Gasser, V. & Lettner, H. (2003): Radionuklide im Grundwasser des kristallinen Untergrunds im Mühlviertel. – 36 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

Shand, S. J. (1943): Eruptive rocks. – 2. Ausgabe, 444 S., John Wiley, New York.

Smedley, P. & Kinniburgh, D. (2017): Molybdenum in natural waters: A review of occurrence, distributions and controls. – Applied Geochemistry, 84, 387-432.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.05.008>.

Spano, T.L.; Simonetti, A.; Balboni, E.; Dorais, C. & Burns, P. (2017): Trace element and U isotope analysis of uraninite and ore concentrate: Applications for nuclear forensic investigations. – Applied Geochemistry 84 (2017), 277–285.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.07.003>.

Streckeisen, A. & Le Maitre, R. W. (1979): A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. – Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, 136, 169-206.

Thiele O. (1992): Bericht 1991 über geologische Aufnahmen auf Blatt 150 Mayrhofen. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 135, S. 751. Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.

Ulrich, K. U., Singh, A., Schofield, E. J., Bargar, J. R., Veeramani, H., Scharp, J. O. & Giammar, D. E. (2008): Dissolution of biogenic and synthetic UO₂ under varied reducing conditions. – Environmental Science & Technology, 42(15), 5600.

van Berk, W., & Fu, Y. (2017): Redox Roll-Front Mobilization of Geogenic Uranium by Nitrate Input into Aquifers: Risks for Groundwater Resources. – Environmental Science & Technology, 51, 1, 337-345.

Veselá, P., Söllner, F., Finger, F. & Gerdes, A. (2011): Magmato-sedimentary Carboniferous to Jurassic evolution of the western Tauern window, Eastern Alps (constraints from U-Pb zircon dating and geochemistry). – International Journal of Earth Sciences, Band 100, 993-1027, Springer. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0596-0>.

Wagner, T., Kainz, S., Wedenig, M., Pleschberger, R., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Ribis, M., Hergarten, S. & Winkler, G. (2019): Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen. Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen (RGHeavyMetal, BBK-Nr. 101093). Endbericht. – Institut für Erdwissenschaften der Karl-Franzens-Universität Graz im Auftrag des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus.

Weber, L. (Hrsg.) (1997): Handbuch der Lagerstätten, Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. – Archiv für Lagerstättenforschung, 19, 607 S., Verlag der Geologische Bundesanstalt, Wien.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus

Stubenring 1, 1010 Wien

[bmnt.gv.at](https://www.bmnt.gv.at)