

Diplomarbeit

Thomas Wackwitz

2002



**Multitracerversuch im gefluteten Blindschacht des Bergwerks Großkogel/Tirol:
Vorbereitung, Durchführung und GIS unterstützte Auswertung**

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Lehrstuhl für Hydrogeologie

Betreuer: Prof. Dr. B. Merkel

Dr. Ch. Wolkersdorfer

Vorwort

In der vorliegenden Diplomarbeit werden die Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen im Georgi Unterbau des Bergwerkes Großkogel/Tirol beschrieben. Als Grundlage dazu wurden zwei Tracertests im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau durchgeführt. Außerdem fanden hydrochemische Untersuchungen im Grubengebäude sowie im oberirdischen Einzugsgebiet statt.

Zielstellung war es, in Abhängigkeit von der Grubengeometrie Hinweise auf das Schadstoffpotential und den Stofftransport zu erhalten, um Rückschlüsse auf andere geflutete oder zu flutende Bergwerke zu ermöglichen.

Während der Untersuchungen im Georgi Unterbau wurde von der Firma Montanwerke Brixlegg AG die Frage gestellt: Inwieweit wird die erhöhte Antimonkonzentration in dem ebenfalls von dieser Firma betriebenen Bergwerk Schwaz durch den dort durchgeföhrten Dolomitabbau beeinflusst? Aufgrund der guten Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen der Montanwerke AG ist auch auf diese Fragestellung eingegangen worden. Für die Beantwortung der Problematik wurden im Wilhelm Erbstollen und oberirdischen Bereich der Grube Schwaz Wasserproben für die hydrochemische Analyse und Auswertung genommen.

Die Erstellung dieser Arbeit war ohne Mithilfe und Unterstützung einer Vielzahl von Personen nicht möglich. In erster Linie möchte ich meinen Betreuern, Herrn Prof. Dr. Merkel und Herrn Dr. Wolkersdorfer, danken, welche mir diese Diplomarbeit ermöglichten und mich mit fachlichen Hinweisen und Ratschlägen unterstützten. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Wolkersdorfer, der mir bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Tracerversuches sowie der hydrochemischen Analysen stets hilfreich zur Seite stand. Mein weiterer Dank gilt Frau Dipl. Geol. Andrea Hasche und meiner Kommilitonin Katy Unger für ihre Unterstützung bei der Bewältigung aller auftretenden Probleme.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Robert Stibich von den Montanwerken Brixlegg und Gerold Sturmmeier für die Hilfe bei den Befahrungen und für alle guten Hinweise. Im Weiteren gilt Dank dem Team 2000 für seine logistische Unterstützung im Rahmen der durchgeföhrten Arbeiten. Größter Dank gilt auch Diana Kirsch sowie Hella und Peter Barth, die mir jederzeit hilfreich zur Seite standen.

Vorwort

1. Zusammenfassung	6
2 Einleitung	7
3 Darstellung des Untersuchungsgebiete	9
3.1 Einführung	9
3.2 Geographische Verhältnisse	9
3.2.1 Untersuchungsgebiet Großkogel	9
3.2.2 Untersuchungsgebiet Schwaz	10
3.3 Geologische Verhältnisse	11
3.3.1 Einführung	11
3.3.2 Regionalgeologischer Überblick	11
3.3.3 Geologie des Untersuchungsgebietes Großkogel	13
3.3.4 Geologie des Untersuchungsgebietes Schwaz	16
3.4 Vererzungen und Mineralbildungen	18
3.5 Geschichte des Bergbaus in Brixlegg und Schwaz	21
3.6 Grubengebäude	23
3.7 Hydrologische und Hydrogeologische Verhältnisse	24
4 Beschreibung des Tracerversuches	27
4.1 Einführung	27
4.2 Überblick und Anforderungen an Tracer	28
4.2.1 Einführung	28
4.2.2 Künstliche Tracer	28
4.2.3 Natürliche Tracer	30
4.3 Wahl der Tracer	31
4.3.1 Uranin	31
4.3.2 Mikrosphären	33
4.3.3 Salz	35
4.4 Unbedenklichkeit der eingesetzten Tracer	37
4.5 Voruntersuchungen und Entwicklung neuer Methoden	37
4.6 Beschreibung der Versuchsdurchführung	40
4.6.1 Beschreibung des Filtersystems	40
4.6.2 Beschreibung der Lycopodiumaufgabesonde (Lydia)	40
4.6.3 Meteorologische und hydrologische Verhältnisse während des Tracerversuches	42
4.6.4 Tracereingabe	44
4.6.5 Eingesetzte Tracermengen	46
4.6.6 Beschreibung der Probenahme	47
4.6.7 Vor-Ort-Analytik	49
4.6.7.1 pH-Wert	49
4.6.7.2 Leitfähigkeit	50
4.6.7.3 Redoxpotential (Eh-Wert)	50
4.6.7.4 Sauerstoffgehalt	51
4.6.7.5 Basen- und Säurekapazität	52
4.6.7.6 Eisenbestimmung	53

5 Durchgeführte Laborarbeiten	54
5.1 Einführung	54
5.2 Aufbereitung der Mikrosphärenproben	54
5.3 Wasseranalysen	56
5.3.1 Hauptionen	56
5.3.2 Fluorid-Bestimmung	56
5.3.3 Spurenelemente	57
6 Ergebnisse des Tracerversuches	59
6.1 Einführung	59
6.2 Temperaturmessungen	59
6.3 Leitfähigkeitsmessungen	60
6.4 Mikrosphären	61
6.5 Uranin	65
6.6 Salz	68
6.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	69
7 Hydrogeochemische Untersuchungen	71
7.1 Einführung	71
7.2 Statistische Auswertung	71
7.3 Vor-Ort-Parameter	72
7.3.1 Wassertemperatur	72
7.3.1.1 Großkogel	72
7.3.1.2 Schwaz	74
7.3.2 pH-Wert	74
7.3.2.1 Großkogel	74
7.3.2.2 Schwaz	74
7.3.3 Redoxpotential	76
7.3.3.1 Großkogel	76
7.3.3.2 Schwaz	76
7.3.4 Sauerstoffgehalt	76
7.3.4.1 Großkogel	76
7.3.4.2 Schwaz	77
7.3.5 Elektrische Leitfähigkeit	77
7.3.5.1 Großkogel	77
7.3.5.2 Schwaz	78
7.4 Wasserhärte	79
7.4.1 Großkogel	79
7.4.2 Schwaz	79
7.5 Hauptionen	80
7.5.1 Einführung	80
7.5.2 Ionenbilanz	80
7.5.3 Darstellung im PIPER-Diagramm	81
7.5.4 Darstellung im Kreisdiagramm	82
7.5.4.1 Großkogel	83
7.5.4.2 Schwaz	83
7.5.5 Darstellung im STIFF-Diagramm	84
7.5.5.1 Großkogel	84
7.5.5.2 Schwaz	84
7.6 Berechnung des Sättigungsindex	88
7.7 Spurenelemente	91

7.7.1	Antimon	92
7.7.1.1	Einführung	92
7.7.1.2	Antimonkonzentrationen in den Untersuchungsgebieten	93
7.7.1.3	Grenzwerte für Antimon	96
7.7.1.4	Interpretationsversuch	96
7.7.8	Grenzwerte für Spurenelemente und Hauptionen	96
8	Verzeichnisse	97
8.1	Literaturverzeichnis	97
8.3	Abbildungsverzeichnis	100
8.4	Tabellenverzeichnis	103
8.5	Abkürzungsverzeichnis	104

1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde ein Multitracer test im Bergwerk Großkogel durchgeführt. Das Bergwerk befindet sich am Südrand des Inntals in der Tiroler Ortschaft St. Gertraudi. 1968 ist der zuletzt getriebene Barytabbau eingestellt und das Grubengebäude bis auf das Niveau des Mundloch vom Georgi Unterbau geflutet worden. Mit dem Tracertest sollten die hydrodynamischen Verhältnisse im gefluteten Blindschacht sowie der angrenzenden Bereiche geklärt werden.

Bei dem Tracertest im August 2001 sind in verschiedenen Teufen Uranin und verschiedenfarbige Mikrosphärensuspensionen in den Blindschacht eingebracht worden. Ein sich in der Nähe befindender See, sowie in eine kleine Erzrolle dienten zur Aufgabe von Mikrosphärensuspension und Steinsalzlösung. Von den sechs eingebrachten Tracern konnte nur die im See aufgegebenen Mikrosphären an der Oberfläche des Blindschachtes nachgewiesen werden. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Test im Februar 2002 mit Uranin im Blindschacht durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

Bei den Versuchen wurden erstmals neue Typen von "LydiA" eingesetzt. Damit die Zeit zwischen dem Einbringen der Sonden und dem Öffnen der Sonden festgehalten werden kann, sind diese mit einer automatischen Registrierung des Freisetzungzeitpunktes ausgestattet.

Die zwei erfolgreich durchgeföhrten Tracertests erbrachten mittlere Abstandsgeschwindigkeiten von 0,02 m/min für die im See eingegebenen Mikrosphären und 0,03 m/min für das im Blindschacht aufgegebene Uranin. Es konnte der Beweis erbracht werden, dass eine Verbindung zwischen See und Blindschacht besteht. Im weiteren ist nachgewiesen worden, dass keine großräumigen Konvektion vorhanden ist. Der Stofftransport unterhalb der 20- m Sohle erfolgt rein diffusiv.

Um die hydrochemischen Verhältnisse zu charakterisieren sind 52 Messstellen mehrmals beprobt worden. Die Beprobung erfolgte im Grubengebäude des Georgi Unterbau dem Wilhelm Erbstollen in Schwaz und in den jeweiligen übertägigen Einzugsgebieten. Nach Auswertung der Analysen ist das Wasser größtenteils als geringmineralisiertes Mg-Ca-SO₄-Wasser anzusprechen. Einige Messtellen im Bereich Schwaz weichen deutlich in Bezug auf die Gesamtmineralisation und die Zusammensetzung vom Großteil der Wässer ab. Die erhöhten Antimongehalte im Untersuchungsgebiet Schwaz sind nach Einstellung des Dolomitabbaues tendenziös rückläufig, jedoch noch weit über den Prüfwerten für Grund und Oberflächenwasser.

2 Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit soll unter anderem dazu beitragen, bergbaubedingte Schäden in der Hydrosphäre zu vermeiden und zu beseitigen. Bekanntlicherweise hat der bergbauliche Vortrieb erhebliche Auswirkungen auf die chemische Zusammensetzung des austretenden Grubenwassers. Um Kosten für die Aufbereitung von Grubenwasser zu senken, ist es von Bedeutung, die Grubengeometrie vor der Flutung so zu gestalten, dass das Schadstoffpotential und der Schadstofftransport geringst mögliche Auswirkungen auf das Umfeld haben. Nach den Arbeiten von WOLKERSDORFER (1996) und HASCHE (2001) soll nun auch diese Arbeit dazu beitragen, eine Prognose des Schadstoffaustretages und der hydrodynamischen Verhältnisse aus einem zu flutenden Bergwerk in Abhängigkeit von der Grubengeometrie aufzustellen.

In erster Linie wurden die Arbeiten in dem ehemaligen Schwerspatbergwerk Großkogel in St. Gertraudi bei Brixlegg/Tirol durchgeführt. Im Stollen Georgi Unterbau dieses Bergwerkes befindet sich ein zweitrumiger gefluteter Blindschacht, der für den Tracertest beste Bedingungen bot. Die Arbeiten wurden am 30./31.05.2001, im Zeitraum vom 01.08.2001-20.08.2001 und in der Zeit vom 18.02.-24.02.2002 vorgenommen. Neben den zwei im Blindschacht durchgeföhrten Tracertests (Test 1 mit Mikrospären, Uranin und Steinsalz; Test 2 mit Uranin) ist der Schacht auf seine physiko-chemischen Verhältnisse und die vor-Ort-Parameter untersucht worden. Um das Umfeld des Blindschachtes zu charakterisieren, wurden 7 weitere Messstellen Untertage und 9 weitere Messstellen Übertage eingerichtet und ebenfalls mehrmals beprobt.

Ziel des Versuches war es, Aufschluss über die hydrogeologischen Verhältnisse im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau zu erhalten. Hierzu waren Überlegungen zur Wahl des Tracers, der Eingabeteufen sowie zur Systematik des Versuches notwendig. Es konnte dabei auf vorhandene Ergebnisse anderer Versuche (WOLKERSDORFER 1996; HASCHE 2001) zurückgegriffen werden. Darüber hinaus sind neue Techniken zur Aufgabe des Tracers entwickelt und getestet worden. Bezuglich der hier beschriebenen Thematik ist bereits von Wolkersdorfer et. al. (2002) ein Artikel in den Wissenschaftlichen Mitteilungen der TU Bergakademie Freiberg veröffentlicht worden.

Eine weitere Diplomarbeit fand parallel zu dieser Arbeit im Bergwerk Großkogel statt. In dieser Diplomarbeit untersuchte UNGER (2002) mittels eines Modells die hydrodynamischen Verhältnisse im gefluteten Unterbau des Bergwerkes Großkogel.

Während der Versuchsdurchführung im Bergwerk Großkogel wurde von den Verantwortlichen der Montanwerke Brixlegg auf eine potentielle Antimonbelastung im austretenden Grubenwasser des Dolomitbergwerkes in Schwaz hingewiesen. Die Montanwerke Brixlegg brechen in diesem Bergwerk Dolomitgestein für den Straßenbau. In Folge eines überregional Aufsehen erregenden Bergsturzes am 10.07.1999 ruht der Abbau bis heute. Von großem Interesse für die Verantwortlichen der Montanwerke ist die Klärung der Frage nach der Ursache für die Antimonbelastung. Einerseits sind durch den betriebenen Bergbau die hydrogeologischen Verhältnisse verändert worden, andererseits ist von einer normalen geogenen Belastung des Wassers auszugehen, da das Element Antimon im anstehenden Fahlerz auftritt. Es hat sich folglich die Frage gestellt, inwieweit sind anthropogene Ursachen für die Antimonbelastung verantwortlich. Zur Klärung dieser Frage sind auf dem Niveau des Wilhelm Erbstollen im Bergwerk Schwaz 19 von den Montanwerken vorgegebene Messstellen hinsichtlich der physiko-chemischen Verhältnisse und der vor-Ort-Parameter beprobt und untersucht worden. Um die natürlichen Verhältnisse zu ermitteln, wurden 10 übertägige Messstellen im Bereich des Bergwerkes auf obengenannte Verhältnisse und Parameter analysiert. Die Probenahme erfolgte im Grubengebäude am 16.08.2001 und übertätig am 15.08. und 18.08.2001. Eine zweite Untersuchung wurde am 20.02.2002 an den übertage gelegenen Messstellen durchgeführt.

Die Proben haben die Kürzel BRX (Brixlegg) für das Untersuchungsgebiet Großkogel und SWZ für das Untersuchungsgebiet Schwaz. Hinter den Kürzeln steht das Datum der Probenahme und die Abkürzung der jeweiligen Lokalität. Es ergibt sich somit eine lange, aber übersichtliche Probenbezeichnung.

3 Darstellung der Untersuchungsgebiete

3.1 Einführung

Damit hydrogeochemische Vorgänge hinreichend genau zu deuten sind, ist es notwendig, die geologischen Zusammenhänge, die zur Mineralbildung in den Gesteinen einer Lagerstätte führen zu beschreiben. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieses Kapitel mit der geographischen Lage, der Geologie des Umfeldes und der geschichtlichen Entwicklung der Bergwerke Großkogel und Schwaz.

Im Folgenden werden die beiden Untersuchungsgebiete getrennt voneinander behandelt. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da beide Gebiete unter anderem durch unterschiedliche geographische Lage (Entfernung ca. 12 km) und Geschichte eigenständige Bereiche darstellen.

3.2 Geographische Verhältnisse

3.2.1 Untersuchungsgebiet Großkogel

Das Untersuchungsgebiet Großkogel liegt in der Ortschaft St. Gertraudi im österreichischen Bundesland Tirol (Abb. 1) 1,5 km nordöstlich der Einmündung des Flusses Ziller in den Inn und 3 km südwestlich der Stadt Brixlegg. Begrenzt wird das Gebiet von der Ortschaft Bruck an der Ziller im Osten, dem Inn und der Gemeinde Reith im Alpbachtal im Norden, einer gedachten Linie zwischen Bruck und der Gemarkung Kerschbaumsattel im Süden, sowie einer Straße zwischen Hygna und dem Kerschbaumsattel im Osten. Das Untersuchungsgebiet hat eine Nord-Süd- und eine Ost-West-Erstreckung von jeweils ca. 2.5 km. Höchster Punkt des Gebietes ist der Reither Kogel mit 1336 m ü. NN etwa 1,5 km südlich von St. Gertraudi, der tiefste Punkt das Haus Nummer 66a im Ortsteil Klausegg mit 550 m ü. NN.

Vorfluter für das Wasser aus dem Georgi Unterbau ist der Geyerbach, der das Untersuchungsgebiet im Westen und Norden umschließt und bei St. Gertraudi in den Inn mündet. Oberflächlich entwässert das Arbeitsgebiet im Westen in die Ziller und in Richtung Nord und Nordwest in den Geyerbach. Der unmittelbare oberirdische Bereich des Georgi Unterbau ist auch nach längeren Niederschlägen sehr trocken. Das lässt die Annahme zu, dass diese Wässer in vom Bergbau verursachte Hohlräume versickern und unterirdisch entwässern. Die zwischen Reither Kogel und Hinterkogel verlaufende Grünwiesstörung leitet in ihrem Verlauf Wasser oberirdisch direkt in den Inn und unterirdisch in den Stollenbereich vom Georgi Unterbau.

3.2.2 Untersuchungsgebiet Schwaz

Das Untersuchungsgebiet Schwaz liegt im österreichischen Bundesland Tirol am südlichen Rand des Inntals (Abb. 1). Innsbruck ist 26 km westlich der Stadt Schwaz gelegen und das Zillertal 11 km östlich. Im Schwazer Ortsteil Ried befindet sich der für die Untersuchungen maßgebende Wilhelm Erbstollen auf einer Höhe von 550 m ü. NN (Mundloch). Begrenzt wird das oberirdische Untersuchungsgebiet von den Ortschaften Buch und Hof im Osten, dem Zufluss des Tufter Bachs in den Inn im Norden, der Zintbergstrasse im Westen sowie der Pirchneraste im Süden. In Nord-Süd-Richtung erstreckt sich das Gebiet über eine Länge von ca. 4 km und in Ost-West Richtung über eine Länge von ca. 3,5 km. Höchste morphologische Erhebung im Gebiet ist der Kogelmoos ca. 3,5 km ostnordöstlich von Schwaz mit 1117 m ü. NN, die niedrigste der Zufluss des Tufter Bachs in den Inn mit einer Höhe über NN von 536 m.

Für das austretende Grubenwasser ist der Tufter Bach Vorfluter. Der Bach fließt in nordwestliche Richtung parallel zum Inn, bevor er bei der Ortschaft Buch in diesen mündet. Weitere Vorfluter für das Oberflächenwasser sind neben dem Tufter Bach der Bucher Bach im Osten und der Lahnbach

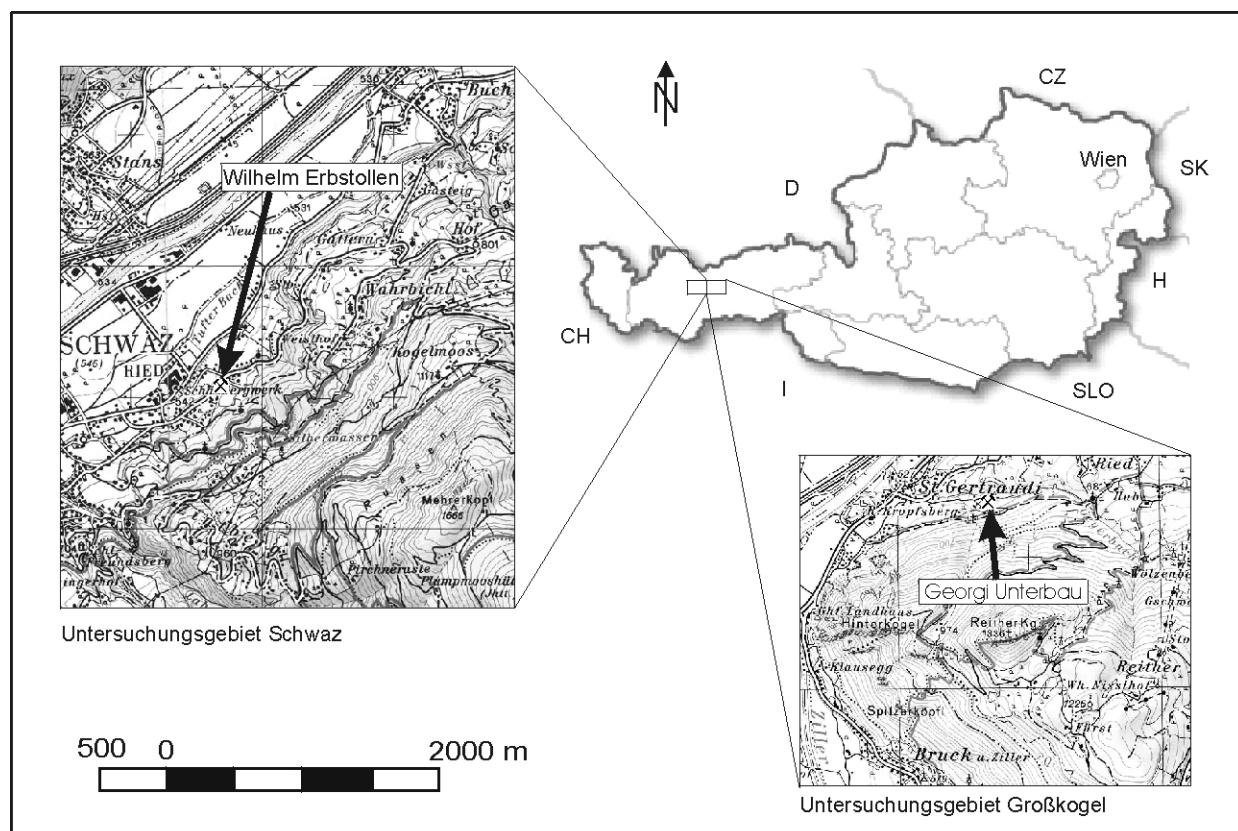


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete Schwaz und Großkogel in der Republik Österreich und Lage der Mundlöcher von Georgi Unterbau und Wilhelm Erbstollen im jeweiligen Untersuchungsgebiet.

im Süden und Westen. Mehrere kleine Wasserläufe erstrecken sich Richtung Nordwest zum Inntal hin. Die Wasserführung dieser "Rinnsale" ist ausgesprochen abhängig von den Niederschlagsmengen und den jahreszeitlichen Verhältnissen. Ein genauer Verlauf ist in unteren Tallagen nicht nachvollziehbar, da das Wasser dort kanalisiert wird und zur Wasserversorgung einzelner Bauernhöfe dient.

3.3 Geologische Verhältnisse

3.3.1. Einführung

Östlich von Schwaz bildet an der Grenze paläozoischer Grauwacken und Trias Gesteinen ein Streifen Schwazer Dolomit einen Grat südlich des Inn. Die höchsten Erhebungen sind der Mehrerkopf (1667 m; östlich Schwaz), der Reither Kopf (1655 m), der Larchkogel (1374 m; südlich Strass), der Reither Kogl (1336 m), das Gruber Joch (1490 m) und die Gratlspitz (1894). In Richtung Osten endet dieser Grat am Hösl-Joch.

Geographisch lässt sich dieses Gebiet keiner einheitlichen Gebirgsgruppe zuordnen. Westlich der Zillermündung wird das Gebiet den nördlichsten Teilen der Tuxer Voralpen zugerechnet, und östlich der Mündung sind es Teile der Kitzbühler Alpen, die das Gebirge aufbauen (PIRKL 1961).

3.3.2 Regionalgeologischer Überblick

Vorherrschende Einheiten des östlichen Teils Nordtirols sind die sich in Ost-West-Richtung erstreckenden Nördlichen Kalkalpen sowie der südlich daran anschließende Streifen der Nördlichen Grauwackenzone und des Innsbrucker Quarzphyllits. Die beiden erstgenannten Einheiten gehören dem oberostalpinen Deckensystem an, während der Innsbrucker Quarzphyllit dem Unterostalpin zugeordnet wird (SCHOBER 1984).

Zwischen Grauwackenschiefern und dem Innsbrucker Quarzphyllit ist ein schmales Kristallinband eingelagert, das sich in einem Streifen ab Schwaz bis nordwestlich von Mittersill im Pinzgau (Salzburg) hinzieht. Dabei handelt es sich um Gneise (Kellerjochgneis), die TOLLMANN (1977) der mittelostalpinen Einheit zuordnet. SCHOBER (1984) gibt nach SATIR & MORTEANI (1977) als Alter dieser Gneise ca. 435 Millionen Jahre an, was dem Übergang vom Ordovizium zum Silur entspricht.

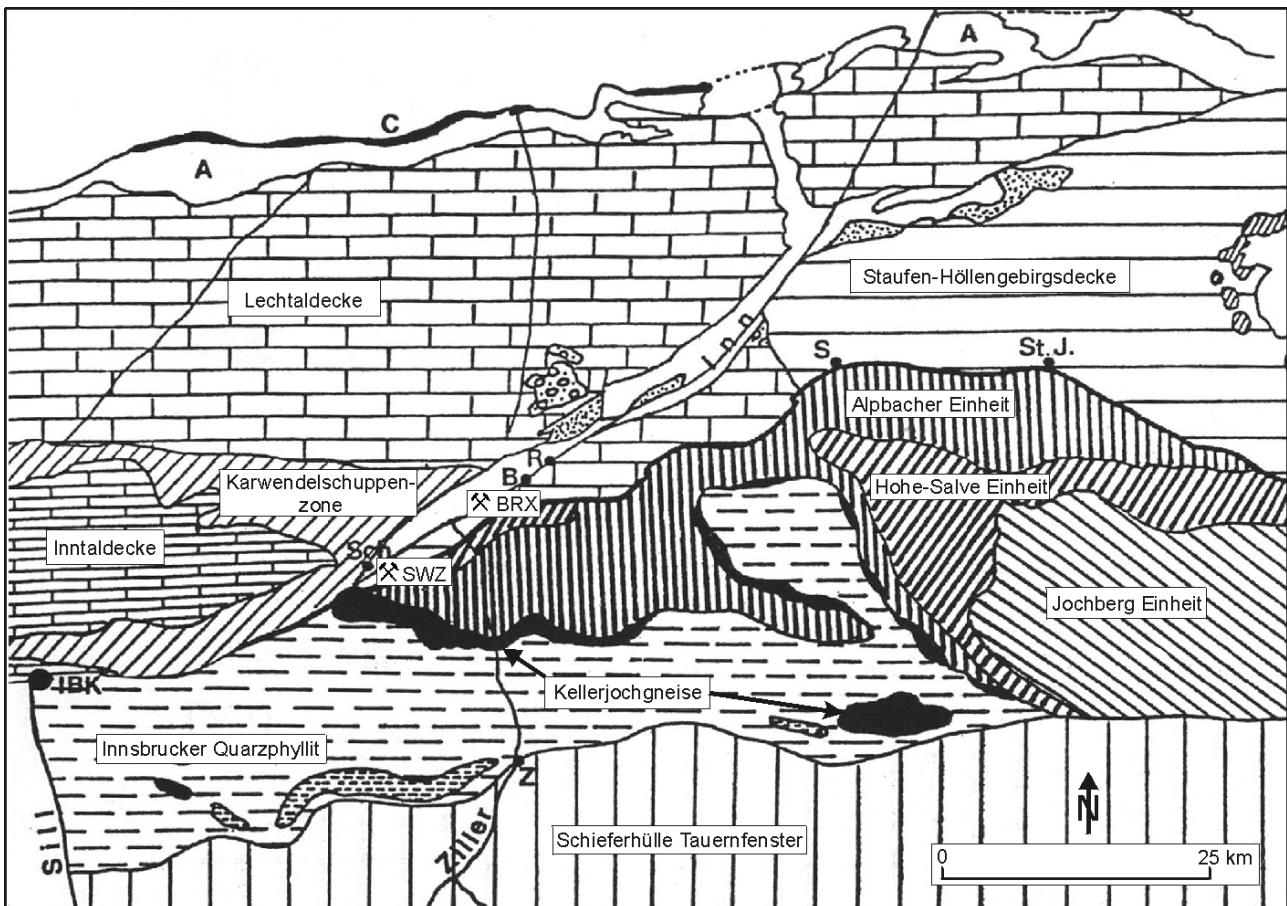
Im Süden und Südosten grenzt der Kellerjochgneis die Grauwackenzone vom unterostalpinen Quarzphyllit ab. MOSTLER (1982) gliedert diesen Quarzphyllit in drei Serien:

- Schwarzschiefer-Karbonat Serie (überwiegend Devon)
- Karbonat-Serizitphyllit (Silur)
- Quarzphyllit-Grünschieferserie (Ordovizium).

Die Grauwackenzone, nördlich an die mittelostalpinen Gneisschollen anschließend, bildet eine ca. 330 km lange und 25 km breite Zone, welche vom Wiener Becken im Osten bis in die Gegend von Schwaz zieht. Hauptsächlich bestehen diese paläozoischen Gesteine aus feinklastischen Bildungen, Tonschiefern und Karbonatgesteinen. Untergeordnet sind auch Grauwacken verbreitet (SCHOBER 1984). TOLLMANN (1977) gibt hierbei einen Schichtumfang vom Kambrium über das Ordovizium (Wildschönauer Schiefer) bis in das tiefere Oberdevon an.

Als Grenze der Grauwackenzone gegen Norden gilt eine primäre, lokal auch sedimentär gestörte Auflagerung der permoskythischen kalkalpinen Serie. Weiter östlich ist die Südbegrenzung der Grauwackenzone eine rein tektonische (SCHOBER 1984). MOSTLER (1982) unterteilt den westlichen Abschnitt der Nördlichen Grauwackenzone in drei tektonische Einheiten (Abb. 2):

- Alpbacher Einheit:
Die Alpbacher Einheit bildet den stratigraphisch tiefsten Horizont, streicht aus dem Alpbacher Raum um das Windau-Halbfenster herum und setzt sich im Norden bis in die Gegend um Hochfilzen fort.
- Hohe Salve Einheit:
Von der Hohen Salve verläuft diese Einheit nordwestlich von Westendorf bis zum Spiegelberghorn und überlagert die Alpbacher Einheit. Einen Streifen Schwazer Dolomit, der von Schwaz über den Ausgang des Zillertales zum Hösljoch zieht, stellt MOSTLER (1982) in diese Einheit.
- Jochberg Einheit:
Diese Einheit beginnt südwestlich von Kitzbühel und reicht im Süden bis zur Salzachtalstörung. Zum Osten hin nimmt die Jochberg Einheit ab Saalfelden die gesamte Breite der Grauwackenzone ein.



Legende: St. J = St. Johann/ Tirol; S = Söll; R = Rattenberg; B = Brixlegg; Sch = Schwaz; Z = Zell/Ziller; IBK = Innsbruck

Abb. 2: Geologische Übersichtskarte Nordtirols zwischen Innsbruck und dem Bundesland Salzburg (verändert aus SCHOBER 1984)

Beiderseits des Zillertales besteht die Grauwackenzone überwiegend aus ordovizischen Wildschönauer Schiefern und aus einem Streifen Schwazer Dolomit. In den Grenzbereich dieser beiden Gesteinstypen fallen die Untersuchungsgebiete. Weiter östlich folgt als tektonisches Großliniment die Inntalstörung, welche die Kalkalpen vom Unterostalpinen Quarzphyllit und der oberostalpinen Grauwackenzone trennt.

3.3.3 Geologie des Untersuchungsgebietes Großkogel

Die in St. Gertraudi liegenden Fahlerz-Baryt-Lagerstätten des Großkogel sind an den zur westlichen Grauwackenzone (Oberostalpin) gehörenden Schwazer Dolomit gebunden. Im Süden wird der Dolomitkomplex von den Wildschönauer Schiefern unterlagert. Lokal treten in diesen phyllitischen Schiefern Einschaltungen von Porphyroiden und Metabasiten auf (FRIMMEL 1989). Über diesen Einschaltungen folgt im Norden der Schwazer Dolomit. Als Einlagerung zwischen dem Phylliten und dem Dolomit finden sich helle, gut gebankte Quarzite, PIRKL (1961) deutet diese

geringmächtigen maximal 10 m mächtigen Gesteine als basalen Quarzit des Schwazer Dolomit. Beim Schwazer Dolomit selbst handelt es sich um Ablagerungen einer Karbonatplattform, die in ihrem mittleren und höheren Bereich im flachen Wasser gebildet wurde, aber auch zeitweilig trocken gelegen hat (FRIMMEL 1989). FRIMMEL (1989) zitiert aus HEINISCH et al. (1987) ein hohes Unterdevon-Alter für die metaklastische Serie der Wildschönauer Schiefer und die Karbonatplattform, wobei zwei Faziesdecken vorhanden waren, deren ursprüngliche Position jedoch unklar ist. Die größte Nord-Süd-Ausdehnung im Brixlegger Revier erreicht der Schwazer Dolomit mit 950 m im Bereich des Grünwiessattels (KRISCHKER 1990).

Im Bereich des Großkogel ist die Fahlerz-Baryt-Mineralisation ausschließlich an den Schwazer Dolomit gebunden. Der Dolomit hat eine gelbliche bis ockerige Anwitterungsfarbe und zeigt im frischen Bruch neben hellgrauen, auch gelbliche und rötliche Färbungen. Wechsellagerungen von helleren und dunkleren Schichten (cm- bis dm- Bereich) entsprechen fast immer dem sedimentären Gefüge (SCHOBER 1984).

Auf dem Schwazer Dolomit transgredieren die unteren Hochfilzener Schichten. Hierbei handelt es sich um Brekzien mit Zentimeter großen Komponenten aus Schwazer Dolomit und stellenweise auch Phyllit, eingebettet in einer meist roten dolomitischen bis sandig tonigen Grundmasse. Über den oberen Hochfilzener Schichten folgt bis zu 500 m mächtiger Buntsandstein (PIRKL 1961). An den Buntsandstein schließen sich die Gesteine der alpinen Trias an.

Quartäre Ablagerungen sind vor allem am nordöstlichen Unterrand des Reither Kogel zu finden. Grundmöräne der Würmeiszeit erstreckt sich vom erwähnten Unterrand des Reither Kogel in Richtung der Ortschaft Reith und bildet dort ein sanft gewelltes fruchtbare Acker- und Wiesengelände (PIRKL 1961).

Im ca. 280 m langen Stollen des Georgi Unterbau sind die ersten ca. 60 m ausgemauert und geben somit keinen Aufschluss über das anstehende Gestein. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass es sich um dunkelroten tonigen Buntsandstein handelt, da die folgenden ca. 70 m diesen Buntsandstein aufschließen. Es schließt sich danach eine ungefähr 10 m mächtige Dolomit-Basalbrekzie an, die vom Schwazer Dolomit abgelöst wird. Der restliche Bergbau ist Schwazer Dolomit aufgefahren. Es handelt sich dabei um eine Wechsellagerung von gebändertem und massigem Dolomit. Wildschönauer Schiefer steht weiter im Süden und ist im untertägigen Untersuchungsgebiet

Großkogel nicht anzutreffen. Ein idealisiertes Profil durch die Gesteinsserien in der näheren Umgebung der Lagerstätte Großkogel zeigt Abbildung 3.

Die Strukturen im Untersuchungsgebiet streichen großmaßstäblich ENE-WSW und haben ein steiles Einfallen Richtung Nord. Als tektonisch bezeichnet FRIMMEL (1989) den Kontakt zwischen Wildschönauer Schiefer und Schwazer Dolomit, wobei die Phyllite dem Dolomit nordwestvergent aufgeschoben wurden. Durch bruchhafte Verformungen ist es zu Verstellungen gekommen, die durch die Zerlegung des Schwazer Dolomit in mehrere Schollen sichtbar werden (PIRKL 1961). Hierbei ist die Scholle Heidstein-Kleinkogel von der Scholle Reitherkogel-Großkogel durch die steil Nordwest fallende Grünwies-Störung getrennt. Südlich der Scholle Heidstein-Kleinkogel liegen mehrere kleine abgetrennte und von tektonischen Flächen begrenzte Schollen (Klausenköpfel, Saurüssel, Zillerbrucker und Spitzer Köpfl). Die Scholle Reither Kogel-Großkogel östlich der Grünwiesstörung ist in sich durch mehrere WNW-ESE streichende Querstörungen sowie NE-SW streichende Störungen zerlegt (FRIMMEL 1989). Auf der Nordseite von Klein- und Großkogel zieht eine steil Süd fallende Störung entlang, das Südfallende Blatt (PIRKL 1961).

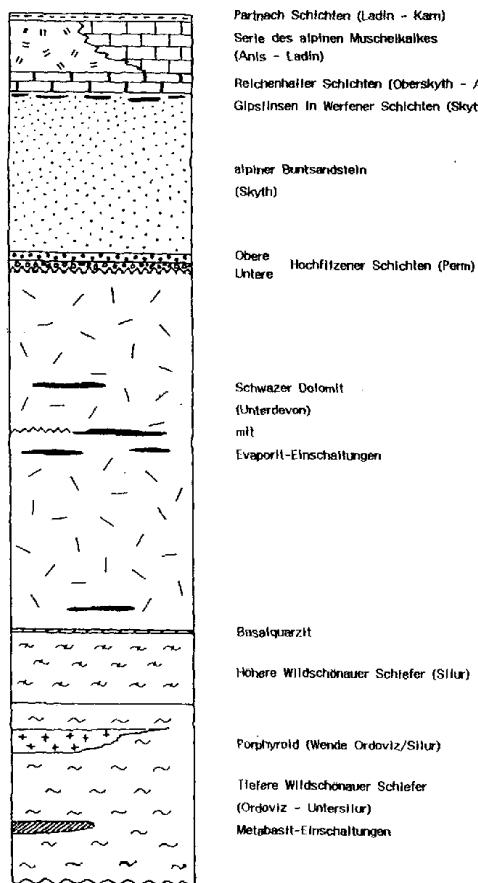


Abb. 3: Idealisiertes Profil durch die Gesteinsserien in der näheren Umgebung des Bergwerkes Großkogel (aus FRIMMEL 1989).

Im Bergbau Großkogel lassen sich eine Reihe weiterer, saiger verlaufende Störungen (Blätter) verfolgen. FRIMMEL (1989) beschreibt diese Störungen zum einen mit einer Streichrichtung von WSW-ENE (Schwerspat-Schlußblatt, Schwerspat-Hauptblatt, Erzhauptblatt, Südliches Hauptblatt) und zum anderen als NW-SE streichend (Querblatt I und II). Da die NW-SE streichenden Störungen die WSW-ENE abschneiden, können diese als Ergebnis einer jüngeren tektonischen Beanspruchung angesehen werden.

Im Anhang unter Punkt A 1 ist eine Geologische Karte des Bergbaureviers von St. Gerdraudi dargestellt. Einen graphischen Überblick gibt das geologische Profil durch den Bergbau von Großkogel im Anhang A 2.

3.3.4 Geologie des Untersuchungsgebietes Schwaz

Im Bereich des Untersuchungsgebietes Schwaz keilt südlich des Inn die westliche Grauwackenzone mit altpaläozoischen Dolomit und Schieferabfolgen aus. Südlich der Grauwackenzone liegen die Gesteinsabfolgen des Altkristallins (Kellerjochgneis) und nördlich der Grauwackenzone die permozoischen Gesteine der Basis der Nördlichen Kalkalpen (WEBER & SCHNEIDER 2000).

Nördlich sind dem Dolomitsteinkomplex des Eiblschrofens und Mehrerkopfes Permoskythabfolgen (Alpiner Buntsandstein) sowie Wildschönauer Schiefer (Nördliche Schiefer) vorgelagert. Im Süden des Dolomitgesteinskomplexes lagern ebenfalls Wildschönauer Schiefer, hierbei handelt es sich allerdings um die Südlichen Schiefer (WEBER & SCHNEIDER 2000). Der Kontakt des Dolomit zu den Permoskythabfolgen ist tektonischer Art (Nordrandstörung; PIRKL 1961). WEBER & SCHNEIDER (2000) bezeichnen das Zusammentreffen von Dolomit und Schieferabfolgen als primären Kontakt der heute allerdings tektonisch überprägt ist. In Richtung Westen dünnnt der Dolomitkomplex aus, und es entsteht ein direkter Kontakt zwischen den Wildschönauer Schiefern und den Gesteinen des Alpinen Buntsandstein. Einen Überblick der anstehenden Gesteinseinheiten im Untersuchungsgebiet Schwaz gibt die Abbildung 4.

Als Wildschönauer Schiefer werden dunkle, metamorphe Tonschiefer, Siltsteine und Sandsteine des Altpaläozoikums bezeichnet, dabei sind örtlich Einschaltungen von Porphyroidgesteinen zu beobachten (WEBER & SCHNEIDER 2000). Im Bereich des Wilhelm Erbstollen sind geringmächtige Lagen von Quarzit aufgeschlossen, welche nach Pirkl (1961) das Hangende der Wildschönauer Schiefer bilden.

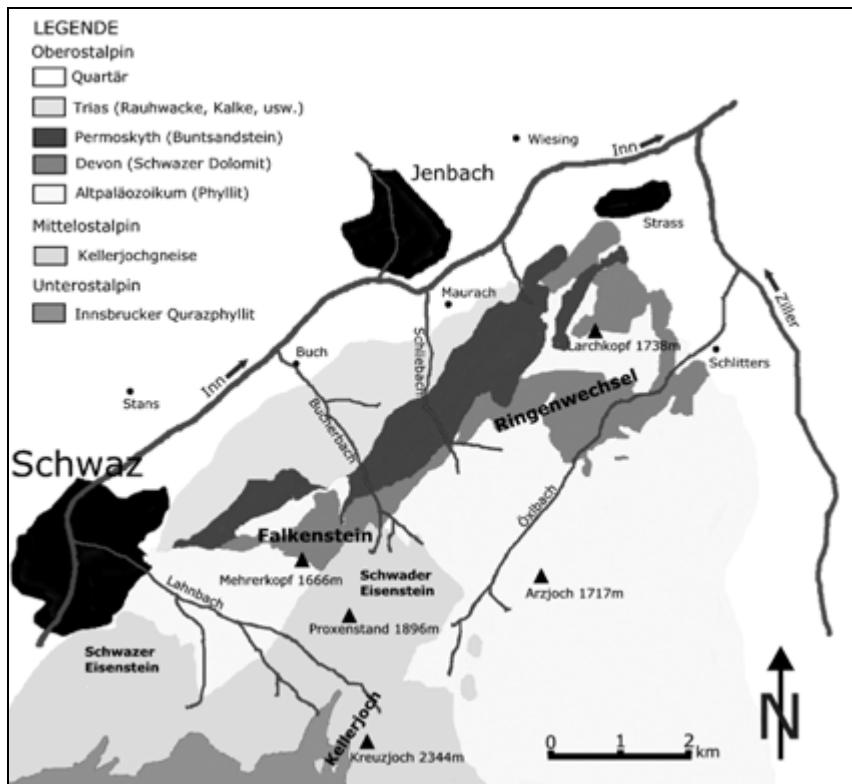


Abb. 4: Geologische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Schwaz (verändert aus SCHWAZER SILBERBERGWERK BESUCHERFÜHRUNG GMBH 2002)

Der Schwazer Dolomit im Untersuchungsgebiet Schwaz ist ein hellgrauer bis graugelber gebankter, feinkristalliner Dolomit unterdevonen Alters. Durch lithologische Unterschiede und die damit verbundenen Farbunterschiede ist die sedimentäre Schichtung erkennbar (WEBER & SCHNEIDER 2000).

Bei den permoozoischen Gesteinen handelt es sich um eine Basisbrekzie, die als Dolomitbrekzie mit rötlicher Matrix sowie aufgearbeiteten Wildschönauer Schiefer ausgebildet ist. Diese Basisbrekzie liegt dem Paläozoikum transgessiv und relieffüllend auf (WEBER & SCHNEIDER 2000).

Der Basisbrekzie lagert rötlich gebankte Sand- und Siltsteine auf, wobei die Mächtigkeit mehrere hundert Meter erreichen kann (PIRKL 1961). Diese Sand- und Siltsteine sind Teil des Alpinen Buntsandsteins.

In einem mächtigen Nordost überkippten Faltenbau lagern die Dolomit und Schieferabfolgen. Der Dolomitkomplex zwischen Eiblschrofen im Norden und dem Mehrerkopf im Süden sind Kern einer isoklinalen Faltenstruktur, deren Faltenachse NW-SE streicht (WEBER & SCHNEIDER 2000). Daher

liegen die stratigraphischen Schichtfolgen faltungsbedingt sowohl in aufrechter wie auch überkippter Position.

Der Dolomitgesteinskomplex wird durch eine Reihe Scherflächen in ein System von Schollen zerlegt. Die Gewinnung von Dolomit erfolgte durch die Abbaue Kienberg I; II und III in der sogenannten Kienbergscholle, während der Abbau IV im Krumörterrevier durchgeführt wurde (pers. Mitt. LUDESCHER).

3.4 Vererzungen und Mineralbildungen

Sowohl im Kellerjochgneis als auch im Schwazer Dolomit und in den Gesteinen der Trias wurden syngenetische Erzanreicherungen beobachtet (SCHOBER 1984). Da das Alter und die ursprüngliche Lage dieser drei Gesteinskomplexe sehr unterschiedlich ist, verlief die primäre Metallanreicherung unabhängig voneinander. Im Folgenden soll nur auf die Vererzungen im Schwazer Dolomit eingegangen werden, da die Untersuchungen im untertägigen Bereich ausschließlich in diesem devonischen Gestein durchgeführt wurden.

Das wichtigste Erz in den Dolomitgesteinen des Lagerstättenraumes von Brixlegg und Schwaz ist das Fahlerz. Mengenmäßig steht es gegenüber den anderen begleiteten Erzmineralen weit an der Spitze. Seine einstige bedeutende Stellung verdankt es seinem Silber- und Kupfergehalt. Zahlreiche Fahlerzproben wurden von ARLT & DIAMOND (1998) aus dem Bergbaurevier Schwaz, darunter auch zwei aus dem Georgi Unterbau, untersucht. Im Mittel stellten Sie folgende Zusammensetzung fest: Cu 41 %; Ag 0,5 %; Fe 2 %; Zn 5 %; Hg 0,7 %; Mn 0,02 %; Sb 16 %; As 9 %; S 26 %.

Fahlerze sind komplexe Sulfide (Sulfosalze) mit der allgemeinen Formel $Cu_{12}Sb_4S_{13}$ für Tetraedrit (Antimonfahlerz) und $Cu_{12}As_4S_{13}$ für Tennantit (Arsenfahlerz; Matthes 1996). Diese Erze sind in erster Linie hydrothermale Kupferminerale, bei denen Teile des Cu durch Fe, Zn, Ag oder Hg ersetzt sein können. Zwischen Tetraedrit und Tennantit besteht außerdem eine lückenlose Mischungsreihe. SCHOBER (1984) errechnete für die Brixlegger Fahlerze folgende Formel: (Cu_{9,95} Zn_{1,12} Fe_{0,36} Ag_{0,05}) Summe = 11,48 (Sb_{2,35} As_{1,63}) Summe = 3,98 S₁₃.

Antimon ist für die Fahlerze im Schwazer Dolomit ein Hauptbestandteil mit 16—20 % (Schober 1984), während es in Trasischen Sedimenten nur als Nebenbestandteil auftritt: Reichenhaller Schichten 2—3 %; Muschelkalk bis 6 %; Ramsaudolomit 3—4 %.

Im Schwazer Dolomit tritt das Fahlerz in vier verschiedenen Vererzungstypen auf (SCHOBER 1984):

- Schichtgebundene Vererzung

Dabei handelt es sich um eine primäre Vererzung ausschließlich gebunden an umkristallisierte Dolomite. Die Erzzufuhr ist durch das Aufsteigen aszendenter Lösungen an früh angelegten Klüften erfolgt.

- Brekzienvererzung

Diese Vererzung ist an Zerrüttungszonen des Schwazer Dolomits zu finden, wobei das Fahlerz als Bindemittel einen Großteil der umschlossenen Dolomitkomponenten verdrängt.

- Vererzung an jungen Klüften

Bei diesen jungen Klüften handelt es sich um durchschlagende ungestörte Flächen, die den Dolomit durchsetzen. Das Fahlerz erfüllt die jungen Klüfte, wobei die Erznähte selten dicker als 1 cm werden.

- Junge Gangvererzungen

Vererzungen dieses Typs sind durch alpidische Gebirgsbewegungen hervorgerufen worden und durchsetzen den Schwazer Dolomit und die Basalbrekzie, dabei wird auch die auflagernde Permoskytabfolge durchschlagen..

GRUNDMANN & MARTINEK (1994) beschreiben neben dem Fahlerz ca. 20 weitere Erzminerale des Berbaureviers Brixlegg Schwaz, unter anderem auch die Antimon enthaltenden Minerale: Antimonit (Sb_2S_3), Bournonit ($PbCuSbS_3$), Chalkostibit ($CuSbS_2$).

Dem Mineral Baryt (Schwerspat – $BaSO_4$) galt in den letzten hundert Jahren das wirtschaftliche Hauptinteresse im Bergbaurevier zwischen Brixlegg und Schwaz. Bariumsulfat kommt dort sowohl primär als Gangmineral als auch im sekundären Bildungsbereich vor (SCHNORRER 1994). Dieses spätere synsedimentäre Sulfatmineral hat eine weiße porzelanartige Farbgebung. FRIMMEL (1989) ermittelte für Dolomit und Baryt unterschiedliche Strontium-Isotopenverhältnisse, die eine epigenetische, metamorphogene Bildung des Baryt belegen. Durch eine variskische Metamorphose vor rund 300 Millionen Jahren (Karbon) wurden große Fluidmengen aus dem Sediment freigesetzt. Bei Temperaturen von 70–130 °C remobilisierten nacheinander Dolomit, Quarz und schon existierende Sulfide (FRIMMEL 1989). Die Barytbildung ist dabei auf eine Reaktion von bariumhaltigen Lösungen mit Anhydritreichen Evaporithorizonten innerhalb des Schwazer Dolomit zurückzuführen.

Tab. 1: Primäre und sekundäre sulfidische Erzminerale im Schwazer Dolomit im Bereich Brixlegg-Schwaz (Formeln aus FRIMMEL 1989).

Mineral	Formel
Antimonit	Sb ₂ S ₃
Bornit	Cu ₅ FeS ₄
Chalkopyrit	CuFeS ₂
Chalkosin	Cu ₂ S
Chalkostibit	CuSbS ₂
Covelin	CuS
Enargit	Cu ₃ AsS ₄
Fahlerz (Var. Schwazit)	(Cu,Hg,Zn) ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃
Luzonit	Cu ₃ AsS ₄
Pyrit	FeS ₂
Sphalerit	ZnS
Stibioluzonit	Cu ₃ SbS

Tab. 2: Oxidische sekundäre Kupferminerale im Schwazer Dolomit im Bereich Brixlegg-Schwaz (Formeln aus FRIMMEL 1989).

Mineral	Formel
Azurit	Cu ₃ [(OH)CO ₂] ₂
Cuprit	Cu ₂ O
Devellin	CaCu ₄ [(OH) ₆ (SO ₄) ₂] * 3H ₂ O
Langit	Cu ₃ [(OH) ₄ SO ₄] * H ₂ O
Malachit	Cu ₂ [(OH)CO ₃]
Olivenit	Cu ₂ [(OH)AsO ₄]
Posnjakit	Cu ₄ [(OH) ₆ SO ₄] * H ₂ O
Tonorit	CuO
Tirolit	Ca ₂ Cu ₉ [(OH) ₁₀ (AsO ₄) ₄] * 10H ₂ O

Tab. 3: Nicht-Kupferminerale im Schwazer Dolomit im Bereich Brixlegg-Schwaz (Formeln aus FRIMMEL 1989).

Mineral	Formel
Anhydrit	CaSO ₄
Aragonit	CaCO ₃
Baryt	BaSO ₄
Calcit	CaCO ₃
Cölestin	SrSO ₄
Dolomit	(Ca,Mg)CO ₃
Quarz	SiO ₂
Strontianit	SrCO ₃
Witherit	BaCO ₃

Einen Überblick (unvollständig) der auftretenden Minerale geben die Tabellen 1—3. Die Darstellungen sind in folgende Bereiche eingeteilt: Erzminerale, Kupferminerale und Nicht-Kupferminerale.

3.5 Geschichte des Bergbaus in Brixlegg und Schwaz

Das Bergbaurevier zwischen Brixlegg und Schwaz gehört zu den bedeutendsten europäischen Silberbergbaugebieten. Erstmals wurde das Montanrevier im Jahr 1273 urkundlich erwähnt. Angaben über den Bergbau in der Umgebung von Brixlegg sind schon in einem Güterverzeichnis aus dem Jahre 1416 zu finden. Durch die Nachricht reicher Silberfunde angelockt, wanderten viele Bergleute aus Böhmen, Sachsen und anderen mitteleuropäischen Bergbaugebieten ins Inntal. Es entstanden daraufhin die Grube Alte Zeche am Arzberg (Arz = Erz) und das Revier Ringenwechsel. Herzog Friedrich erließ 1427 eine Bergordnung für Schwaz zur Regelung der Grubenverleihung und des betrieblichen Ablaufs. Die damit verbundene Bergfreiheit förderte das Aufblühen des Bergbaureviers entscheidend. Sechsundzwanzig Gruben waren am Falkenstein vor dem Jahr 1460 in Betrieb, in den Jahren bis 1499 folgten weitere 231 Bergbaurechte. Ein sprunghafter Anstieg der Bergbaurechte war zwischen 1460 und 1463 auch im Brixlegger Bereich zu beobachten, so verliehen die Rattenberger Bergrichter in dieser Zeit 542 Rechte für die Betreibung von Bergbau. Infolge dieser Entwicklung waren bald mehr als 10.000 Knappen in über 1.000 Stollen beschäftigt und Schwaz wurde zum bedeutendsten Silberbergbaugebiet in Europa. Im Jahre 1523 erreichte der Falkensteiner Berbau mit 15,7 t Brandsilber die höchste Produktion (HANNEBERG & SCHUSTER 1994).

Nach anhaltenden wirtschaftlichen Schwierigkeiten übernahm erst die Familie Fugger (1521) und später der Staat (1557) Anteile vom Berggericht Rattenberg und privaten Unternehmern. Durch die Entdeckung Amerikas und der damit verbundenen Silberschwemme aus der "Neuen Welt" verschlechterte sich die Lage nochmals. Preisverfall und steigende Betriebskosten aber auch soziale und religiöse Unruhen während der Reformationszeit führten zum Niedergang des Bergbaues und Schwaz verlor seine Bedeutung als europäisches Bergbauzentrum. So kam es trotz einiger Modernisierungsversuche zur Auflassung im Revier Ringwechsel 1682.

Die einzigen Bergwerke auf Silber und Kupfer die der Staat Mitte des 19. Jahrhunderts noch betrieb waren der Bergbau Kogel (St. Gertraudi), ein am Matzenköpf bei Brixlegg entdecktes Erzvorkommen und die Alte Zeche bei Schwaz. Bei Aufschlußarbeiten am Großkogel wurde 1887 im neuangeschlagenen Georgi-Unterbaustollen ein größeres Fahlerz-Baryt-Vorkommen entdeckt,

welches wirtschaftlich ausgebeutet werden konnte. Ab 1900 tiefsten Bergleute im Georgi Unterbau einen Blindschacht auf 100 m ab. Durch erfolgreiche Prospektionsarbeiten wurde 1873 der Wilhelm Erbstollen angeschlagen und als fördertechnisch günstiger Zugang für die östlichen Revierteile des Falkenstein genutzt. Siebenundzwanzig Jahre später erreichte man mit diesem Stollen die reiche Vererzung im Krummörter-Revier (HANNEBERG & SCHUSTER 1994).

Nach dem 2. Weltkrieg wurden bis zur Einstellung des Bergbaus am Großkogel 1968 rund 25.000 Tonnen Baryt gefördert. Im selben Jahr wurde der Blindschacht im Georgi Unterbau geflutet und Mitte der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts wieder gesümpft. 1988 führten die Montanwerke Brixlegg Untersuchungs- und Prospektionsarbeiten durch (Abb. 5). Nach persönlicher Mitteilung von P. GSTREIN ist der Blindschacht seit 1990 wieder geflutet.

1946 wurde der Erzbergbau in Schwaz verstaatlicht und noch bis 1957 betrieben (HANNEBERG & SCHUSTER 1994). Danach ging das Bergwerk in den Besitz der Montanwerke Brixlegg über. Bis vorerst 1999 ist Untertage Dolomit für den Straßen- und Eisenbahnbau gebrochen worden. Zuletzt förderte der Betrieb ca. 120.000 t Dolomit im Jahr. Durch einen Bergsturz am Eibelschrofen kam der Abbau im Jahr 1999 zum erliegen.

Im Anhang unter Punkt A 3 ist eine Karte mit der Lage der Reviere im Bergbaugebiet Brixlegg-Schwaz abgebildet. Weiterhin sind dort eine geologische Übersicht und die Produktionsmenge der wichtigsten Reviere dargestellt.

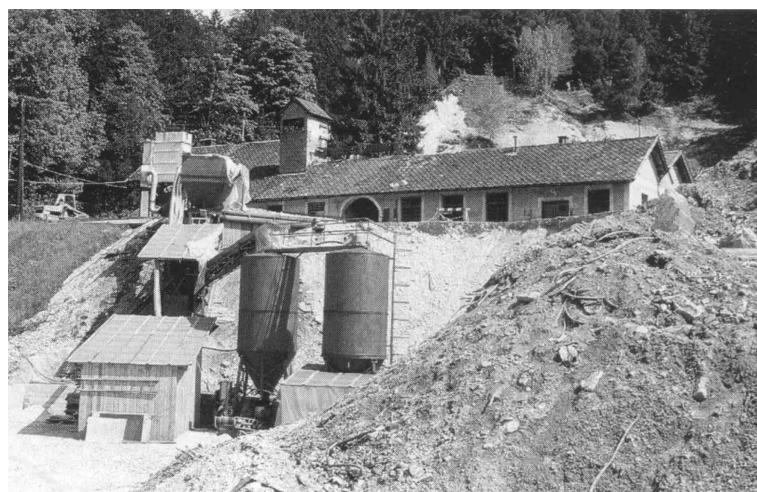


Abb.5: Probebetrieb zur Barytgewinnung im Bergbau Großkogel, 1988
(aus HANNEBERG & SCHUSTER 1994).

3.6 Grubengebäude

Das Grubengebäude des Georgi Unterbau ist über einen ca. 320 m langen Stollen zu erreichen. Dieser Stollen verläuft in Nord-Süd-Richtung und führt direkt zum Blindschacht am Maschinenhaus. Vom zweitürmigen Blindschacht aus sind die vier Sohlen in Teufen von 20, 40, 70 und 100 aufgefahren (PIRKL 1961; MUTSCHLECHER 1984, HANNEBERG & SCHUSTER 1994). 1990 wurde der Blindschacht letztmalig geflutet, so dass sich seitdem stationäre Verhältnisse einstellen konnten. Hydraulische Verbindung zwischen den Sohlen besteht außer über den Blindschacht durch die alten Abbaue der 14-Nothelfer- und Barbarazeche (WOLKERSDORFER et al. 2002). Erreichbar ist das Grubenwasser über den Blindschacht, eine Erzrolle südlich des Blindschachts, sowie den „Großen See“ und den „Kleinen See“. Beide Seen sind aus dem Verschnitt des Georgi Unterbau mit der 14-Nothelferzeche entstanden. Der Geflutete Tiefbau des Georgi Unterbau hat ein Volumen von ca. 35,000 m³.

Der aktive Bergbau in Schwaz ist durch den Wilhelm Erbstollen mit Übertage verbunden. Wichtige Hauptstrecken auf dem Niveau des Wilhelm Erbstollen sind die Verbindungsstrecke zum Schaubergwerk Schwaz, die „Neue Kienbergstrecke“ als Hauptförderstrecke, die Messerschmittstrecke und ihre Verlängerung nach Osten. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer Auffahrungen mit kleinerem Querschnitt (< 2 bis 4 m²). Das gesamte Grubengebäude (Wilhelm Erbstollen gehört zum ehemaligen Fahlerzbergbau Falkenstein) teilt sich in folgende Reviere (WEBER & SCHNEIDER 2000):

- Altes Schachtrevier
- Kienbergrevier
- Altes Krummörterrevier
- Neues Krummörterrevier
- Revier Alter Bau
- Rinner Revier.

Im Grubengebäude wurden für den Dolomitabbau zwei verschiedene Abbauverfahren angewendet. Zu Beginn (1957) wurde ein schwebender Örterbau von einem Bezugspunkt aus durchgeführt. Zur Anwendung kam dieses Verfahren bei den Abbauen Alt Kienberg sowie im Alten Krummörterrevier. Später erfolgte eine Umstellung der Dolomitgewinnung auf einen trichterförmigen Weitungsbau mit schwebendem Verrieb. Diese Verfahren wurde zur Auffahrung des Neuen Krummörterreviers sowie für Neu Kienberg angewendet (WEBER & SCHNEIDER 2000). Zugang zum Grubenwasser gibt es über einen Schrägschacht und einen 60 m Schacht im Neuen

Krummörter Revier. Ein anderer Zugang ist durch ein Netz von Gerinnen gegeben, die das Grubengebäude durchziehen.

3.7 Hydrologische und Hydrogeologische Verhältnisse

Zur Beschreibung der hydrologischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten Großkogel und Schwaz wurden als Grundlage Niederschlags- und Temperaturdaten des hydrographischen Dienstes Tirol verwendet. Diese Daten beschreiben einen Zeitraum von 1998 bis 2000 für die mittleren Monatstemperaturen und einen Zeitraum von 1991 bis 2000 für die Mittleren Monatsniederschläge. Im Weiteren sind die täglichen Durchschnittstemperaturen vom 01. Mai 2001 bis zum 28. Februar 2002 angegeben. Es ist somit der gesamte Untersuchungszeitraum mit Temperatur und Niederschlagsdaten abgedeckt.

Abbildung 6 zeigt die Temperatur- und Niederschlagsverteilung für die Untersuchungsgebiete innerhalb eines Jahres. Die Durchschnittstemperatur beträgt 8,6 °C, wobei die niedrigste Temperatur im Januar mit 8,6 °C und die höchste im August mit 17,3 °C ermittelt wurde. Mittlere Monatsniederschläge betragen 97,3 mm/m² mit einem Gesamtniederschlag von 1167,2 mm/m² im Jahr. Im Monat Juli ist die größte Niederschlagsmenge mit 163,1 mm/m² und im Monat Januar der geringste Niederschlag mit 51,8 mm/m² zu verzeichnen.

Während der Dauer der Untersuchungen vom Mai 2001 bis Februar 2002 lag die Durchschnittstemperatur bei 8,8°C, die kälteste Temperatur wurde mit -14,1 °C am 14.12.2001 gemessen und die höchste mit 24,8 °C am 02.08.2002 (Abb. 7). Niederschlagsreichster Monat im Untersuchungszeitraum ist der Juni mit 178,1 mm/m², der trockenste Monat der Januar mit 24,0 mm/m². Der Gesamtniederschlag betrug 923,1 mm/m², was auf ein Jahr gerechnet einen Niederschlag von 1107,72 mm/m² entspricht. Im Untersuchungszeitraum lag der Jahresdurchschnitt somit 59,5 mm/m² niedriger als im Vergleichszeitraum zwischen 1991 bis 2000.

Da die hier angegebenen Werte sich auf ein größeres Gebiet beziehen, können örtlich durchaus größere Abweichungen auftreten. Unter anderem ist dies durch die morphologische Lage und die Windverhältnisse bedingt.

Über die hydrogeologischen Verhältnisse im Umfeld des Untersuchungsgebietes Großkogel sind keine Veröffentlichungen bekannt. WEBER & SCHNEIDER (2000) haben ein Gutachten im Zusammenhang mit den Felssturzereignissen am Eiblschrofen erstellt, in dem kurz auf die hydrogeologischen Verhältnisse im Umfeld des Untersuchungsgebietes Schwaz eingegangen wird.

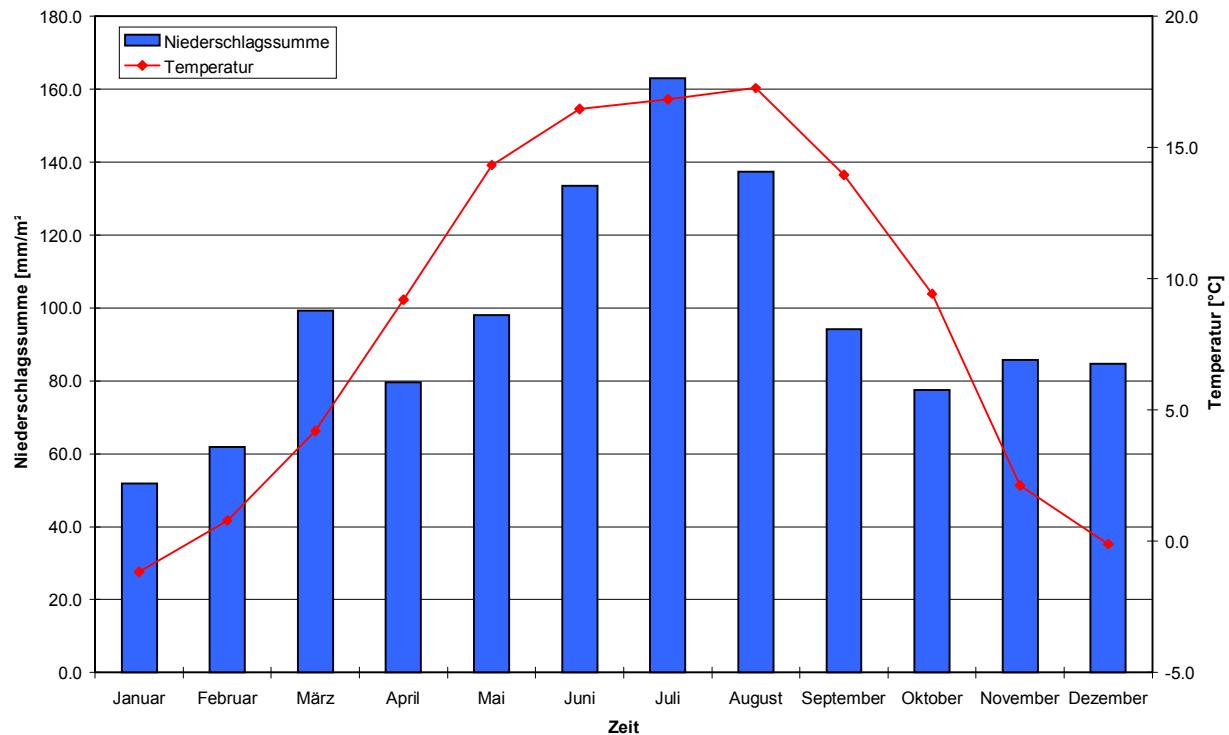


Abb. 6: Monatsmittelwerte für den Niederschlag für die Jahre 1991 bis 2000 und die Temperatur aus den Jahren 1998 bis 2000 in den Untersuchungsgebieten Großkogel und Schwaz

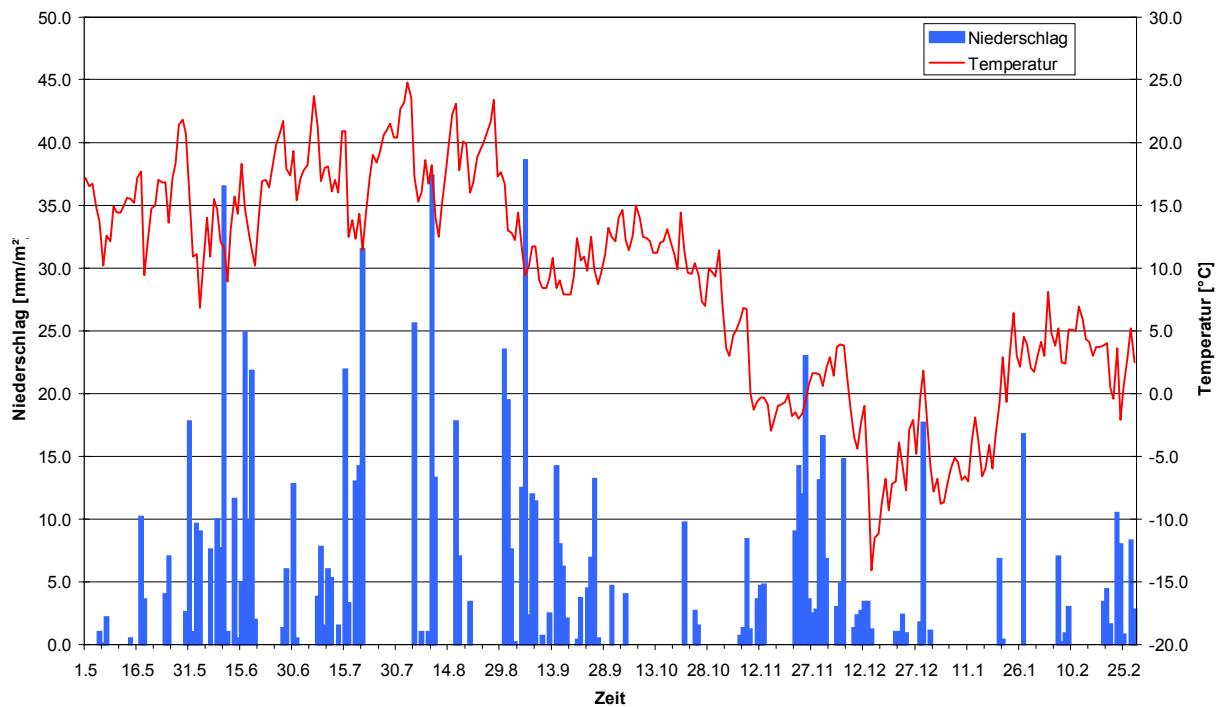


Abb. 7: Niederschlags- und Temperaturwerte im Zeitraum Mai 2001 bis Februar 2002

Eine Grundwasserzirkulation findet in den Gesteinserien fast ausschließlich auf Klüften, Störungen, Spalten und Gängen statt. Dabei zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Wasserführung von der Tektonik und den durch den Bergbau veränderten ursprünglichen hydrogeologischen Verhältnissen.

Eine besondere Bedeutung für die Grundwasserströmung in den Untersuchungsgebieten haben die tektonischen Strukturen. Sowohl die Gangzonen als auch die übrigen Störungen besitzen eine sehr hohe Durchlässigkeit. Grundwasser kann somit entlang dieser Strukturen unabhängig von der Grundwasserströmung des übrigen Gebirges lateral abströmen. So sammelt sich das Oberflächenwasser im Untersuchungsgebiet Großkogel größtenteils in der Grünwiesstörung und fließt über diese Störung in das Grubengebäude vom Georgi Unterbau. Quellaustritte und Vernässungszonen im selben Untersuchungsgebiet beschränken sich fast ausschließlich auf Schiefer- und Permoskythabfolgen und weniger auf den Bereich des Schwazer Dolomit. Diese Beobachtungen lassen sich auf das Untersuchungsgebiet Schwaz projizieren. WEBER & SCHNEIDER (2000) stellen fest, dass im Bereich des Dolomits keine Quellaustritte, vielmehr sogar Wasserschwünde vorliegen. Quellaustritte und Vernässungszonen beschränken sich wiederum auf die Schiefer- und Permoskythabfolgen. Beide Autoren führen weiter aus, dass Niederschlagswässer im Bereich des dolomitischen Untergrundes in erster Linie dem Bergwassersystem zugeführt wird. Eine Entwässerung im Bereich der Schieferabfolgen erfolgt oberflächennah, wobei die Leitfähigkeit Aufschluss über die Verweildauer des Wassers im Boden geben kann.

4 Beschreibung des Tracerversuches

4.1. Einführung

Tracer (Markierungsstoffe) sind Mittel zur Markierung von fließendem oder stehenden Gewässern. Dabei können die Wasserwege oberirdisch (Fluss-, See- oder Meerwasser) wie auch unterirdisch (Grund- oder Grubenwasser) verlaufen. In der Hydrogeologie sind Markierungsversuche (engl. tracer test) Verfahren zur Bestimmung der Fließrichtung und -geschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit v_a)

Versuche, die Wasserwege zu bestimmen, sind aus der Literatur schon mehrere Jahrhunderte bekannt. Von den damals verwendeten Markierungsstoffen wie Sägemehl, Pilze, Sporen, Viren oder Bakterien konnten sich in der Praxis nur wenige durchsetzen (MAURIN & ZÖTL 1976). Einen Überblick der Entwicklung von Hydrogeologischer Markierungstechnik gibt Tabelle 4.

Grundprinzip für einen Tracertest ist es, den Markierungsstoff an einer Stelle einzugeben (input) und an einer anderen (output) wieder nachzuweisen (JORDAN & WEDER 1988). Um die Fließgeschwindigkeit zwischen input und output zu ermitteln, wird die mittlere Abstandsgeschwindigkeit (v_a) errechnet [Gleichung 1]. Dies geschieht, weil der genaue Fließweg des Grundwassers im allgemeinen nicht ermittelt werden kann (Jordan & Weder 1995). Abbildung 8 verdeutlicht den Unterschied zwischen wahrem Fließweg des Grundwassers, durch Poren oder Klüfte, und der mittleren Abstandsgeschwindigkeit(v_a).

$$v_a = \frac{\Delta s}{\Delta t} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad [1]$$

Δs : Entfernung zwischen input und output

Δt : Zeit, die zwischen Eingabe und dem Eintreffen des Tracers an der Entnahmestelle vergeht



Abb. 8: Abstand Δs in genereller Grundwasserfließrichtung (dicker Pfeil) zur Ermittlung der Abstandsgeschwindigkeit und tatsächlichem Fließweg (dünner Pfeil) eines Wassermoleküls; (aus JORDAN & WEDER 1988).

Tab. 4: Zeittafel zur Entwicklung der hydrogeologischen Markierungstechnik (aus HASCHE 2001, nach KÄSS 1991)

1871	Darstellung des Fluoresseins (BAEYER 1871)
1872	1. Salzungsversuch (qualitativ) im Tafeljura (HÄGLER 1873)
1877	1. Salzungsversuch (quantitativ) an der Donauversickerung (KNOP 1878)
1877	1. Einsatz von Fluoressein-Kalium an der Donauversickerung (KNOP 1878)
1890.	Entwicklung der Fluoreskope und Anreicherungsverfahren zur halbquantitativen Uraninbestimmung
1894	1. Einsatz von Bakterien zur Grundwassermarkierung in der Oberrheinebene (PFUHL 1896)
1926	1. Einsatz von Lycopodiumsporen (TIMEUS)
1950	1. Einsatz von Radioisotopen (KNOP 1951)
1958	Anfärbung von Lycopodiumsporen (MAURIN & ZÖTL 1959) 1. Einsatz von aktivierungsanalytischen Isotopen (DIMITROULAS et al. 1963)
1964	Einführung der quantitativen Spektralfluorimetrie (KÄSS 1964)
1968	1. Phagenmarkierung, Finnland, Flusswasser (NIEMELÄ & KINNUNEN 1968)
1970	Einführung der doppelregistrierenden Fluoreszenz-Spektrographie (BEHRENS 1973)
1979	1. Einsatz von fluoreszierenden Sporen (KÄSS 1982)

4.2 Überblick und Anforderungen an Tracer

4.2.1 Einführung

Es gibt zwei Gruppen von Markierungsmitteln: künstliche und natürliche. Künstliche Markierungsmittel werden absichtlich in das zu untersuchende Wasser eingegeben, hingegen bei natürlichen Markierungsmitteln wird das Wasserregime auf Inhaltsstoffe oder sonstige Eigenschaften, die einer Markierung gleichkommen, untersucht (KÄSS 1998).

4.2.2 Künstliche Tracer

Künstliche Tracer können nur dann eingesetzt werden, wenn sie einer Reihe spezieller Anforderungen entsprechen:

- Tracer darf in der Natur nicht oder nur in geringem Maße im Wasser vorkommen
- gute analytische Erfassbarkeit auch in sehr großer Verdünnung bzw. niedrige Nachweisgrenzen

- gute Löslichkeit in Wasser

Der Tracer muß wasserlöslich sein, oder als Suspension angewendet eine sehr geringe Sedimentationsgeschwindigkeit besitzen.

- keine Wechselwirkungen

Möglichst geringe Wechselwirkungen mit dem durchflossenen Medium (z.B. Sorption) und anderen Komponenten des Wassers bzw. dem anstehenden Gestein.

- Widerstandsfähigkeit

Eine Stabilität des Tracers gegenüber chemischen, physikalischen und biologischen Einflüssen muß gewährleistet sein.

- physiologische Unbedenklichkeit

Die angewendeten Konzentrationen müssen für Mensch, Tier und Pflanze ohne negative Auswirkungen sein.

- Wirtschaftlichkeit

Versuchsdurchführung, Anschaffung des Tracers und die Analytik müssen im wirtschaftlichen Verhältnis zum erwarteten Nutzen stehen.

Da es das ideale Markierungsmittel nicht gibt, muss je nach Fragestellung und Charakteristik des Versuchsgebietes, der am besten geeignete Tracer oder eine Kombination von Tracern gewählt werden.

Durch die kontinuierliche bzw. diskontinuierliche Messung der Tracerkonzentration an der Entnahmestelle entsteht eine Durchgangskurve (Abb. 9) des Tracers. Dieser Graph, auch Konzentration-Zeit-Kurve genannt, entspricht annähernd der Gaußverteilung mit asymmetrischen Flanken. Aufgrund von Dispersion und Verdünnung ergibt sich im Idealfall ein steiler Anstieg und ein flaches Abklingen der Kurve. Dabei ist auf der Ordinate die Konzentration und auf der Abszisse die Versuchszeit angetragen (KÄSS 1998).

In der Literatur (KÄSS 1998; NIEHREN 1999; WOLKERSDORFER 2000) sind folgende künstliche Markierungsstoffe zur Wassermarkierung beschrieben:

- Wasserlösliche Stoffe

- Farbstoffe
- Salze
- Schaumstoffe, Geruchstoffe und andere Chemikalien
- aktive und aktivierungsanalytische Isotope

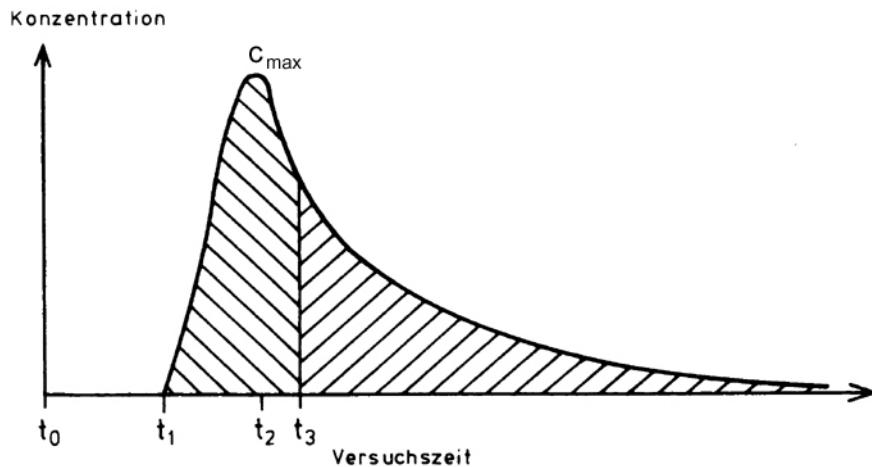


Abb. 9: Idealisierte Durchgangskurve bei Markierungsversuchen. t_0 : Zeitpunkt der Tracereingabe (input); t_1 : Zeitpunkt des ersten Auftretens des Tracers an der Entnahmestelle; t_2 : Zeitpunkt der höchsten Konzentration (c_{\max}); t_3 Halbwertszeit – die Hälfte der insgesamt an der Entnahmestelle gefundenen Tracermenge hat den output passiert; t_4 (nicht dargestellt): Zeitpunkt des letzten Nachweises (verändert aus KÄSS 1992)

- Triftkörper
 - fluoreszierende Mikrosphären
 - Bakterien
 - Phagen
 - Lycopodium-Sporen
 - Geobombe
 - andere Triftkörper

4.2.3 Natürliche Tracer

Natürliche Tracer sind im Wasser vorkommende natürliche Inhaltsstoffe. Obwohl sie teilweise, wie das durch atmosphärische Atomwaffentests freigesetzte Tritium, antropogenen Ursprung haben, ist das Tritium doch auf natürliche Weise (Niederschlag) ins Grundwasser gelangt. Folgende natürliche Tracer sind bekannt:

- Umweltisotope
Nuklide von in Gewässern vorkommenden Substanzen, die ohne anthropogenen Einfluss vorkommen.
- Umweltchemikalien
Substanzen die durch Kontamination in den Wasserkreislauf gelangen, aber auch Schwermetalle können als Tracer angesehen werden.

- Umweltorganismen
Bakterien und auch höhere Lebewesen sind als natürliche Tracer bekannt.
- Physikalische Einflüsse
Hierbei ist unter anderem die Erhöhung der Wassertemperatur einen wichtigen Aspekt.

4.3 Wahl der Tracer

Um die Strömungsverhältnisse im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau beschreiben zu können, wurden bei dem Multitracertest Floureszensfarbstoff, Tritftstoffe und NaCl Sohle eingesetzt. Als Feststofftracer wurden dabei $15 \mu\text{m}$ große fluoreszierende Mikrosphären (FluoSpheres der Firma Triton Technology Inc., 4616 Santa Fe Street, San Diego CA 92109) und als Fluoreszenzfarbstoff Uranin eingesetzt. Eine Aufgabestelle für Mikrosphären außerhalb des Blindschachtes war der große See. Von dort aus sollte eine eventuelle hydraulische Verbindung zum Blindschacht ermittelt werden. Des Weiteren kam 200 kg Steinsalz zum Einsatz. Mit dem Salz wurde der Versuch unternommen, eine Verbindung der südlich des Blindschachts gelegenen Erzrolle und dem Blindschacht nachzuweisen. Durch Erfahrungen aus früheren Tracerversuchen von WOLKERSDORFER (1997) und HASCHE (2001) in gefluteten Grubengebäuden wurde diese Auswahl an Tracerstoffen getroffen.

4.3.1 Uranin

Uranin ist das Natriumsalz des Fluoreszins und hat die Summenformel $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$. In vier verschiedenen Dissoziationszuständen (Abb. 10) kann das Markierungsmittel Uranin auftreten, wobei das zweiwertige Anion die stärkste Fluoreszenz besitzt (KÄSS 1998).

Die Fluoreszenzintensität ist abhängig von der Wasserstoffionenkonzentration und erreicht ihr Maximum bei pH-Werten über 8,5 (KÄSS 1998). Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit der Signalstärke vom pH-Wert. Bei einem pH-Wert von 7 beträgt die Fluoreszenzintensität nur 80 % des Maximalwertes. In pH-neutralen Lösungen liegt das Maximum der Fluoreszenz des Uranin bei 512 nm (KÄSS 1998). Es ist allerdings dabei zu beachten, dass das Maximum je nach Gerätetyp und spektraler Empfindlichkeitsverteilung des Vervielfachers von der genannten Wellenlänge um 1—2 nm abweichen kann (KÄSS 1998).

Nachteilig wirkt sich die Lichtempfindlichkeit des Uranin bei der Verwendung in offenen Gewässern aus, da es in wenigen Tagen stark photolysiert werden kann. Zum anderen können stark

wirkende Oxidationsmittel wie Chlor, Chloroxid und Ozon die Farbe relativ rasch zerstören. Die Eigenschaft des Uranin eine sehr geringe Neigung zur Adsorption zu haben, ist vor allen bei der Anwendung in Sedimenten von großem Vorteil.

Auf Grund der geringen Wechselwirkungen mit dem anstehenden Gestein und der Preisgünstigkeit hat Uranin einen großen Vorteil gegenüber anderen Mitteln die zur Grundwassermarkierung in Frage kommen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Uranin als Tracer für diesen Versuch bestens geeignet ist. Relative Dunkelheit und pH-Werte von über 7 im Untersuchungsbereich lassen keine negativen Auswirkungen auf Markierungsmittel zu.

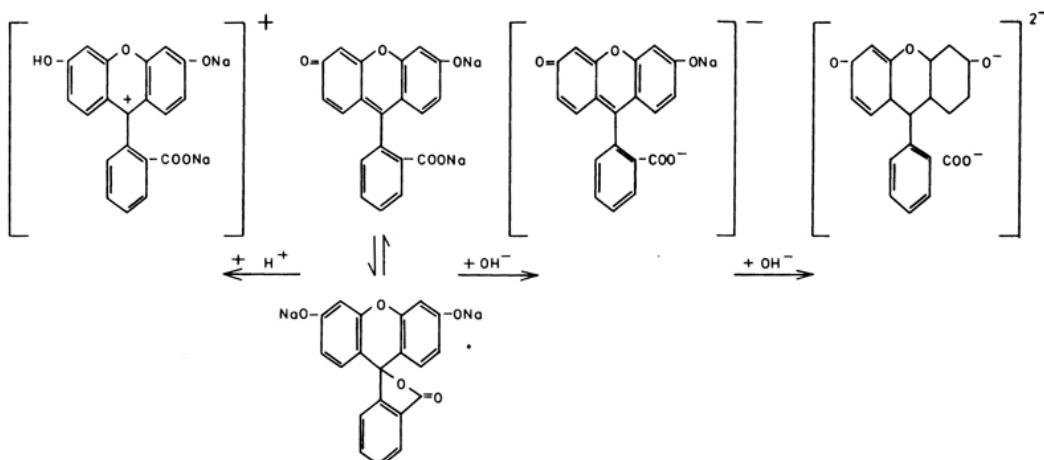


Abb. 10: Die prototrophen Zustände des Uranins (aus NIEHREN 1999). Von links nach rechts: Das einwertige Kation; die zwei Formen des Neutralmoleküls, oben die chinoide, unten die Lactonform; das einwertige Anion; das zweiwertige Anion.

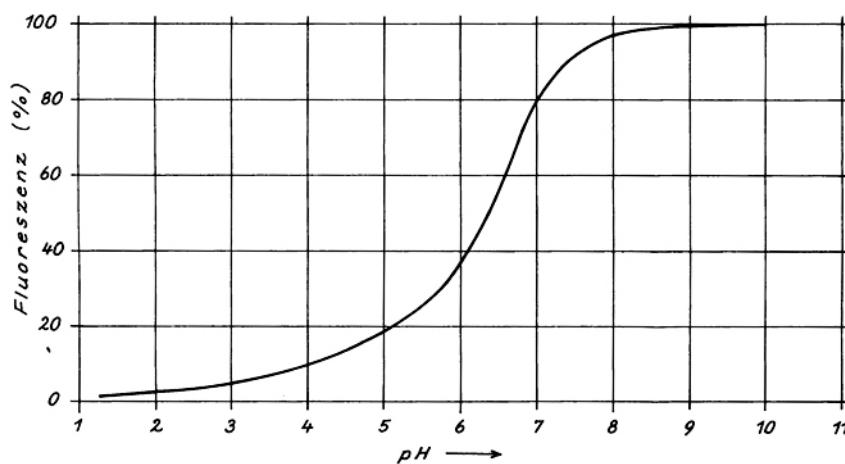


Abb. 11: Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität des Uranin vom pH-Wert (aus KÄSS 1992).

4.3.2 Mikrosphären

Im Rahmen des Tracertests im Georgi Unterbau sind auch Triftkörper in Form von Mikrosphären eingesetzt worden. Tracerversuche mit Mikrosphären stellen einen Übergang zwischen den Versuchen mit echt gelösten Mitteln, wie Fluoreszenzfarbstoffen oder Salzen und Sporentriftversuchen dar (KÄSS 1998). Ursprüngliches Anwendungsgebiet für Untersuchungen mit Mikrosphären ist die Physiologie. Anwendung in der Hydrogeologie finden diese fluoreszierenden Kugelchen noch nicht lange. Im Jahr 1985 führte SCHRÖDER erstmals Tracertests mit derartigen Triftstoffen im Kluftgrundwasser der kanadischen Provinz Ontario durch (KÄSS 1992).

Mikrosphären sind mikroskopisch kleine Polystyrolkügelchen, die mit Fluoreszenzfarben eingefärbt sind (KÄSS 1998). Sie bestehen aus ultrareinen Polystyrolketten (MOLECULAR PROBES 2002a), die durch Van-derWaals-Kräfte zusammengehalten werden (NIEHREN 1999). Diese Feststofftracer sind sehr homogen, nicht porös, hydrophob und haben eine Dichte von $1,06 \text{ g/cm}^3$ (MOLECULAR PROBES 2002b).

Die Oberfläche der Polystyrolketten kann durch die Verwendung von unterschiedlichen funktionellen Gruppen verschiedene Ladungsdichten erhalten. Dadurch ergibt sich ein breites Anwendungsfeld für diese Tracerstoffe. NIEHREN (1999) gibt Werte für die Oberflächenladungen zwischen 0,001 und 0,01 Milliequivalent/g an (Milliequivalent/g = [Anzahl (Ladungsträger) in Millimol] * [Valenz (Ladungsträger)]/[Gramm (Polystyrol)]).

Mikrosphären gibt es in anionischen, kationischen und neutralen Ladungszuständen. Sulfat-, Karboxyl-modifizierte und Aldehyd-Sulfat-Latexprodukte zählen zu den anionischen Mikrosphären. Dieser anionischen Tracerstoff wird vor allem im biologischen Bereich eingesetzt. Sulfat-Mikrosphären sind hydrophobe Partikel, die auch bei sauren pH-Werten sehr stabil sind (MOLECULAR PROBES 2002a). Sie haben die Eigenschaft, sich an Moleküle mit hydrophoben Charakter zu binden, aber auch an Proteine, Nucleinsäuren und Hormone lagern sich anionisch geladene Mikrosphären an (MOLECULAR PROBES 2002b). Durch die Anbindung von Aldehydgruppen an Sulfat-Mikrosphären werden Aldehyd-Sulfat-Mikrosphären hergestellt (NIEHREN 1999). Suspensionen dieser Aldehyd-Sulfat-Mikrosphären sind in einwertigen Elektrolytlösungen stabil, bilden aber bei Anwesenheit von zweiwertigen Kationen Agglomerate (MOLECULAR PROBES 2002a). Karboxylgruppen werden an Sulfat-Latex-Sphären gekoppelt, um Karboxyl-modifizierte Sphären zu bilden. Es entstehen dadurch hoch negativ geladene, relativ hydrophile und leicht poröse Oberflächen (NIEHREN 1999). Hierbei liegt die Oberflächenladung

zwischen 0,1 und 2,0 Milliequivalent/g. Karboxyl-modifizierte Mikrosphären sind als Suspension stabil in hochkonzentrierten Elektrolytlösungen (MOLECULAR PROBES 2002a).

Amine-modifizierte Mikrosphären zählen zu den kationischen Mikrosphären. Die hydrophilen Tracerstoffe werden durch chemische Anbindung von positiv geladenen Aminogruppen an die Karboxyl-modifizierten Polytyrolketten bebildet (MOLECULAR PROBES 2002a).

Die zur Wassermarkierung eingesetzten Mikrosphären haben ausschließlich neutrale Oberflächen. Somit kann eine Adsorption an organische und anorganische Partikel im Wasser fast ausgeschlossen werden. Vor dem Einsatz als Markierungsmittel in Wässern ist es notwendig die Mikrosphären mit einem Fluoreszenzfarbstoff einzufärben. Dies geschieht durch Eingabe des Farbstoffes während des Polymerisationsprozesses und führt zur gewünschten Einlagerung der Farbe ins Kugelvolumen (NIEHREN 1999). Die Farbe wird so gegen äußere Einflüsse geschützt, verblasst nicht oder bleicht aus. Tabelle 5 zeigt das Angebot der Firma Triton Technology Inc an fluoreszierenden Mikrosphären mit neutraler Oberfläche.

Bei dem hier beschriebenen Tracertest wurden Mikrosphären der Farben „yellow-green“, „green“, „orange“ und „red“ mit einem Durchmesser von 15 µm verwendet (Abb. 12). Die Wahl dieses Durchmessers beruht auf Erfahrungen von HASCHE (2001), die diese Mikrosphärengröße bei hydrodynamischen Untersuchungen im gefluteten Fluoridbergwerk Straßberg einsetzte. Herstellungsbedingt ergeben sich geringfügige Abweichungen in der Größe der Polystyrolkügelchen (Tab. 6), was aber keine Auswirkungen auf das Untersuchungsergebnis hat.



Abb. 12: Eingesetzte Mikrosphären der Firma Triton Technologies, Inc. (Foto WOLKERSDORFER)

Tab. 5: Optimale Anregungs- und Emissionswellenlängen von FluoSpheres Mikrosphären (aus MOLECULAR PROBES 2002c).

Farbe	Anregungswellenlänge [nm]	Emissionswellenlänge [nm]
Blue	360	423
Blue-Green	420	467
Green	450	488
Yellow-Green	495	506
Orange	534	552
Red	566	598
Crimson	610	635
Scarlett	646	680

Als Konzentration gibt Molekular Probes Inc. $1,0 * 10^6$ Mikrosphären pro Milliliter Suspension an. Die Lagerung sollte nach Herstellerangaben bei 4 °C erfolgen und aus Haltbarkeitsgründen ein Jahr nicht überschreiten (MOLECULAR PROBES 2002b). Durch den Zusatz von Thimerosal zur Mikrosphärensuspension wird der Tracerstoff gegen bakterielle Kontamination geschützt (MOLECULAR PROBES 2002c).

Tab. 6: Abweichung des Mikrosphärendurchmessers
(aus MOLECULAR PROBES 1999b).

Durchmesser der Mikrosphären	Variationskoeffizient
9,5 – 10,5 µm	< 5%
15,0 – 16,0 µm	< 5%

4.3.3 Salz

Salz zählt zu den gebräuchlichsten Markierungsstoffen. Bei dem hier beschriebenen Multitracerversuch wurde es in einer Erzrolle südlich des Blindschachtes eingesetzt.

Beim Einsatz von Salz ist zu bedenken, dass Grund- und Oberflächengewässer von Natur aus eine verschieden große Grundmenge an Salzen enthalten (KÄSS 1998). Die Anwendung kann besonders bei Abwässern, Müllsickerwässern und belasteten Fließwässern zu Problemen führen. Salze

dissoziieren in wässriger Lösung in Anionen und Kationen. Dies muss beim chemischen Nachweis Beachtung finden, da die Kationen bei der Untergrundpassage einen Verlust durch Adsorption oder Ionenaustausch unterliegen. Dabei ist der Kationenverlust im Porengrundwasser größer als im Karstgrundwasser (auch bei Grubenwasser). Grund für die Austauschbereitschaft der Kationen ist das Ionenpotential (Ladung/Ionenradius), d.h. je kleiner das Ionenpotential ist, desto größer ist die Fähigkeit zum Umtausch (KÄSS 1998). Des Weiteren spielt die Adsorptionsfähigkeit von organischem Material, wie z.B. Torflagen oder humosen Schichten, eine Rolle für den Kationenverlust.

Anionen unterliegen in einem weitaus geringerem Umfang, dem Ionenaustausch. Allerdings findet bei einigen Anionen während der Untergrundpassage auch eine Umwandlung durch Redox- oder biologische Reaktionen statt (KÄSS 1998).

Bei dem hier beschriebenen Versuch im Georgi Unterbau wurde als Salz NaCl verwendet. Auf physikalischem Weg wurde versucht, die durch Elektrolyte bewirkte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit zu bestimmen. Durch die Einspeisung von 200 kg NaCl in Form von Sohle bewirkt zwangsläufig eine Erhöhung der Dichte des zu markierenden Grubenwassers. Die Dichte D wässriger Natriumchloridlösungen bei 15 °C sind nach D'Ans & Lax (1970; zitiert aus KÄSS 1998):

Tab. 7: Zusammenhang zwischen wässrigen NaCl-Lösungen und ihrer Dichte bei 15 °C (aus KÄSS 1998)

L (g/L)	D (kg/L)
10	1,0071
100	1,0744
2000	1,1525
357,5 (gesättigt)	1,2024

Auf Grund dieser Dichteunterschiede besteht bei Salzungsversuchen die Gefahr des Absinkens der Sohle in tiefe Zonen und der daraus resultierenden langsamen Vermischung mit dem Wasserstrom.

Als Salztracer wurde handelsübliches Steinsalz mit folgender Zusammensetzung verwendet:
98,3% NaCl, 1,2 % SO₄²⁻, 0,47 % Ca²⁺, 0,03 % Mg²⁺.

4.4 Unbedenklichkeit der eingesetzten Tracer

Entsprechend der vom Arbeitskreis "Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern" herausgegebenen Liste (ARBEITSKREIS "HUMAN- UND ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEWERTUNG VON MARKIERUNGSMITTELN IN GEWÄSSERN" 1997) werden fluoreszierende Mikrosphären ($0,9\ldots17 \cdot 10^3$ Stück/m³) und Uranin (0,09...1,7 mg/L) als toxikologisch unbedenklich eingestuft.

Aus der Liste der Arbeitsgruppe "Bewertung wassergefährdenter Stoffe" des Beirates des Bundesministeriums des Innern "Lagerung und Transport wassergefährdenter Stoffe" ist zu entnehmen, dass erst Mengen ab 1 g/L NaCl fischtoxisch wirken (ROTH 1990). KÄSS (1998) gibt sogar einen Toleranzwert für die Fischtoxizität von 10g/L NaCl an. Bei einem Gehalt von 98% an NaCl der hier zugegebenen von 200 kg Steinsalz sind 196 m³ Wasser notwendig, um eine Konzentration von 1 g/L zu erreichen. Unter der Annahme, dass die Erzrolle direkte Verbindung zur 20 m Sohle hat und die eingegebene Sohle über den Blindschacht wieder aufsteigt, würden sich die 200 kg Steinsalz in minimal 300 m³ Grubenwasser verteilen. Es ist also nicht möglich, mit dieser Salzmenge eine Konzentration von 1 g/L zu erreichen.

4.5 Voruntersuchungen und Entwicklung neuer Methoden

Auf Voruntersuchungen bezüglich der Frage: "Eignen sich fluoreszierende Mikrosphären als Tracerstoff in einem gefluteten Bergwerk?", wurde verzichtet. HASCHE (2001) hat in ihrer Arbeit dies ausführlich beschrieben und positive Ergebnisse mit diesem Markierungsmittel erzielt. In Bezug auf Farbunterscheidung und -stabilität der Mikrosphären und Maschenweite der Filternetze wurde auf die von HASCHE gemachten Erfahrungen zurückgegriffen.

Im Vorfeld des Tracertests ist eine automatische Registrierung für den Freisetzungzeitpunkt des Tracers entwickelt worden, mit der die Zeit zwischen dem Einbringen der Sonden und dem Öffnen der Sonden festgehalten werden kann. In der Vergangenheit konnte der Zeitpunkt der Traceraufgabe nicht mit absoluter Genauigkeit ermittelt werden. Es musste sich auf Versuche in Wasserbecken (WOLKERSDORFER 1996) und das Aufsteigen von Luftblasen im Grubenwasser verlassen werden. Bei dem entwickelten Mechanismus (Abb. 13) handelt es sich um einen elektronischen Betriebsstundenzähler (Modul 230) mit 0,001-stündiger Auflösung. Der Zähler wird vor dem Zusammenbau der Sonden durch einen Magnetkontakt auf Null gestellt und nach dem Auseinanderbau abgelesen.

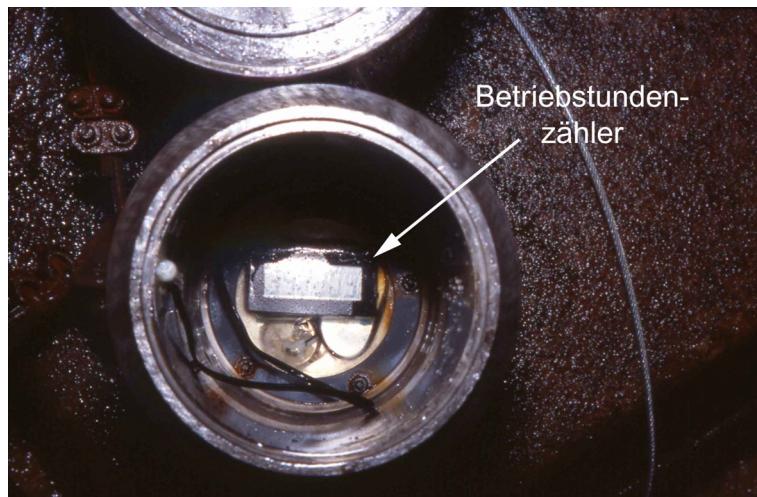


Abb. 13: Einblick in eine Lydia-Hälfte mit dem Betriebsstundenzähler (Foto Wolkersdorfer).

Der erste Einsatz des neuen Mechanismus im August 2001 ist leider fehlgeschlagen. Unsachgemäße Montage sowie falsche Handhabung führten zum Ausfall der Zeitmessung. Nach Auswertung und Behebung der gemachten Fehler ist die Zeitmessung im Februar 2002 erneut zum Einsatz gekommen, diesmal mit vollem Erfolg.

Bei der Durchführung des Tracertests im Februar 2002 kam das Onlinefluorimeter GGUN-FL20 Ser. # 13 (Groupe de Géomagnétisme; Université de Neuchâtel) zum Einsatz. Hierzu ist das Gerät mit dem eingesetzten Uranin kalibriert worden.

Für die Durchführung der Kalibrierung wurden zwei Stammlösungen mit 100 mg/L (I) und 0,1 mg/L (II) Uranin angefertigt. Diese Stammlösungen dienten zur Herstellung der verdünnten Lösungen (je 1 L) für die Kalibrierung (Tab. 8).

Unter Laborbedingungen wurden die acht Konzentrationen mit dem Fluorimeter untersucht. Dabei ist abwechselnd ein Liter Wasser und ein Liter Lösung durch die Messzelle des Onlinefluorimeters gelaufen. Die Reihenfolge der Lösungen richtete sich nach der jeweiligen Konzentration, wobei die niedrigste zuerst und die höchste am Schluss untersucht worden sind. In 10-sekündigen Abständen ist ein Signal auf eine PCMCIA-Datenkarte abgespeichert und später ausgelesen worden. Für die Durchlaufzeit von einem Liter Lösung ergaben sich 15 Werte, wobei der erste und letzte Wert verworfen wurde.

Tab. 8: Konzentrationen für die Kalibrierung von Uranin; hergestellt aus Stammlösung I (100 mg/L) und Stammlösung II (0,1 mg/L).

Konzentration Uranin [mg/L]	aus Stammlösung
0,5	I
0,1	I
0,05	I
0,01	I
0,005	I
0,001	II
0,0005	II
0,0001	II

Auf Grund der zu geringen Peakhöhe war es nicht möglich die Konzentrationen von 0,001 mg/L, 0,0005 mg/L und 0,0001 mg/L auszuwerten. Die Bearbeitung der anderen fünf Werte ergab nach statistischer Auswertung mit dem Programm Microsoft Excel 5.0 eine Nachweisgrenze von 7 µg/L und eine Bestimmungsgrenze von 10,6 µg/L bei einem Bestimmtheitsmaß von r^2 gleich 1 (Anlage B 1). In Abbildung 14 ist die Kalibriergerade 1. Grades mit dem Bestimmtheitsmaß und der Geradengleichung ($y = 0,0956x - 0,1911$) dargestellt. Die statistische Auswertung der Kalibrierung ist im Anhang (B 1.1 – 1.5) beigefügt.

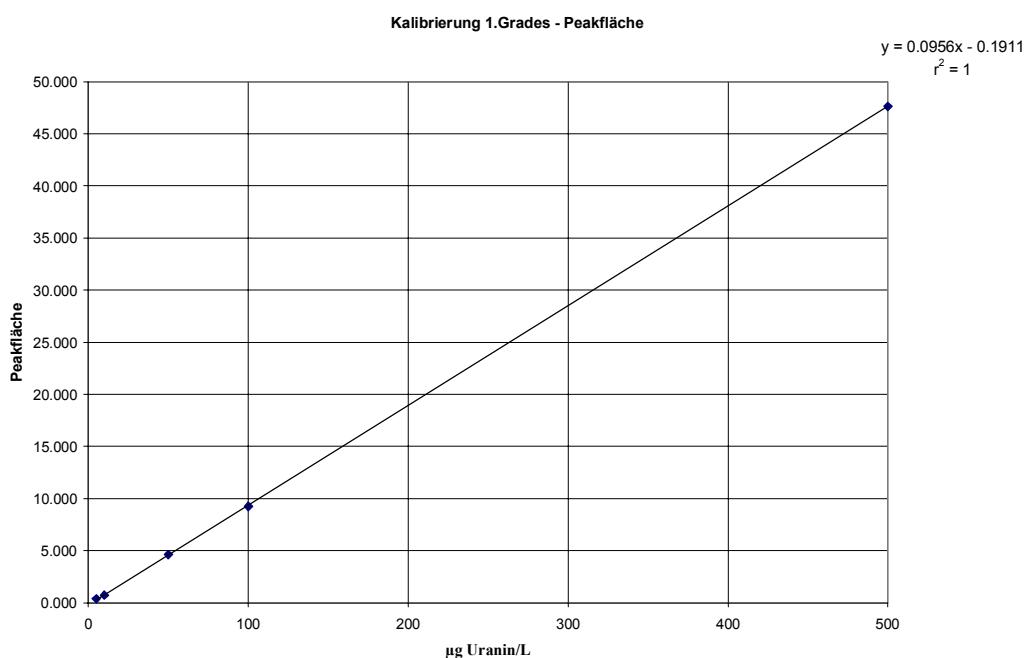


Abb. 14: Kalibriergerade 1. Grades für Uranin

4.6 Beschreibung der Versuchsdurchführung

4.6.1 Beschreibung des Filtersystems

Mit einem Filtersystem (Abb. 15) wird das auf Mikrosphärengehalte zu prüfende Wasser untersucht. Dazu wird das Grubenwasser über einen Planktonfilter geleitet, der das Feststoffmaterial sammelt. Das Filtersystem besteht aus PVC-Rohr mit einem Durchmesser von 200 mm, wie es auch für Wasserabflüsse verwendet wird. Erstmals kam ein dreiteiliges System (trichterförmiges Oberteil, Mittelstück und kurzes Endstück mit Standfläche) zum Einsatz, bei dem die einzelnen Teile mit einem Schnellspannsystem miteinander verbunden werden können.

Zwischen die Teile können Filter mit unterschiedlicher Maschenweite gespannt werden. So zum Beispiel ein grobes Netz oben und ein feinmaschiges Netz im unteren Verschluss. Diese Anordnung soll verhindern, dass größere Fremdkörper wie Holzspäne und Sediment auf das untere Feinmaschige Netz gelangen.

Bei dem hier beschriebenen Tracerversuch wurde nur ein Netz verwendet, da das Grubenwasser keine makroskopisch zu erkennenden Verunreinigungen aufwies. Als Filternetz fand ein Planktonnetz der Firma Hydro-Bios mit einer Maschenweite von 10 µm (NY 10 HC) Verwendung.

4.6.2 Beschreibung der Lycopodiumaufgabesonde (LydiA)

Ein großer Nachteil vergangener Zeit lag darin, dass Feststofftracer nicht an einer bestimmten Stelle und zu einer bestimmten Zeit in das Grubenwasser eingespeist werden konnten. Seit WOLKERSDORFER (1996) erstmals die Tracereingabe mit LydiA erfolgreich in einem Bergwerk einsetzte und HASCHE (2001) diese Ergebnisse bestätigte, sind folgende Anforderungen erfüllt:

- ortsgenaue Einspeisung, auch in tieferen Bereichen
- Freisetzungzeitpunkt des Tracers bestimmbar
- keine Vermischung unterschiedlicher Farben bei der Einspeisung
- keine Kontamination des durchfahrenen Wasserkörpers mittels unkontrolliert freiwerdender Sporen
- kein Sporenverlust bei der Einspeisung, durch Anhaftung der Sporen im Aufgabebereich oder durch Windverstäubung.

Von besonderer Bedeutung beim Einsatz der LydiA (Abb. 16) ist der Verschluss der beiden Sondenhälften. WOLKERSDORFER (1996) beschreibt die Verwendung eines chemischen Verschlusses (wasserlöslich). Er kommt zu dem Ergebnis, dass diese Art von Verschluss am

zuverlässigsten ist. Die speziell konstruierten Sondenteile werden mit Polyvinylchlorid (PVA) miteinander verklebt. Durch Testreihen mit PVAs der Firmen Wacker-Chemie GmbH und Hoechst AG (WOLKERSDORFER 1996) wurden diese als am geeignetsten ermittelt.

Für die Herstellung des chemischen Sondenverschlusses wurde das optimale Mischungsverhältnis zwischen PVA-Granulat und Wasser aus den Versuchen von WOLKERSDORFER (1996) übernommen.

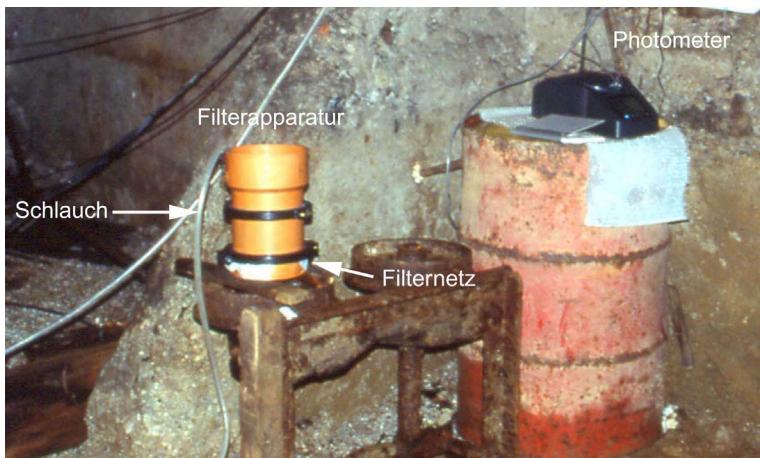


Abb.15: System für das
Abfilternder Mikrosphären



Abb. 16: Ablassen einer LydiA in den
Blindschacht des Georgi Unterbau
(Foto WOLKERSDORFER)

4.6.3 Meteorologische und hydrologische Verhältnisse während des Tracerversuches

Grundlage der meteorologischen Auswertung sind Daten die vom Hydrographischen Dienst Innsbruck zur Verfügung gestellt wurden. Während der Tracertests im August 2001 (02.—19.08.) fielen 103 mm Niederschlag, das sind im Mittel 5,7 mm. Die größte Niederschlagsmenge (Abb. 17) war am 09.08. mit 37,4 mm zu verzeichnen. Auf das langjährige Mittel der Niederschläge bezogen, ist im Monat August 2001 22 % mehr Niederschlag gefallen (langjähriges Mittel: 137,5 mm; Kapitel 3.7). Im Wintermonat Februar 2002 (18.02.—24.02.) sind mit 27,9 mm 55 % (langjährliches Mittel: 51,8 mm; Kapitel 3.7) des Niederschlags während der 7 Tage des Tracertests gefallen, wobei der tägliche mittlere Niederschlag 4,0 mm betrug. In Anlage 2.1 sind die Niederschlagswerte während der Tracertests im August 2001 und Februar 2001 aufgeführt.

Mittels eines Dreieckwehres wurde der Abfluss aus dem Blindschacht (Anlage B 2.4) bestimmt. In 3 m Entfernung vom Blindschacht wurde das Messwehr in die Abflussrinne des Schachtes eingegraben. Um ein Umfliesen des Messwehres zu vermeiden, wurde es mit Kunststofffolie zum Untergrund hin abgedichtet. Die Abflussrinne folgt dem Gefälle der Sohle des Georgi Unterbau in Richtung Mundloch. Über eine empirische Gleichung [2] (DUNGER 1998) ist der Durchfluss aus dem Wasserstand (20 cm vor dem Wehr) ermittelt worden.

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} * \tan(\alpha/2) * h^{5/2} \quad [2]$$

μ : Überfallbeiwert ($\mu = 0,578$ für $\alpha = 90^\circ$)

α : Ausschnittswinkel [$^\circ$]

h : Überfallhöhe [m]

g : Gravitationskonstante [m/s²] ($g = 9,81$ m/s²)

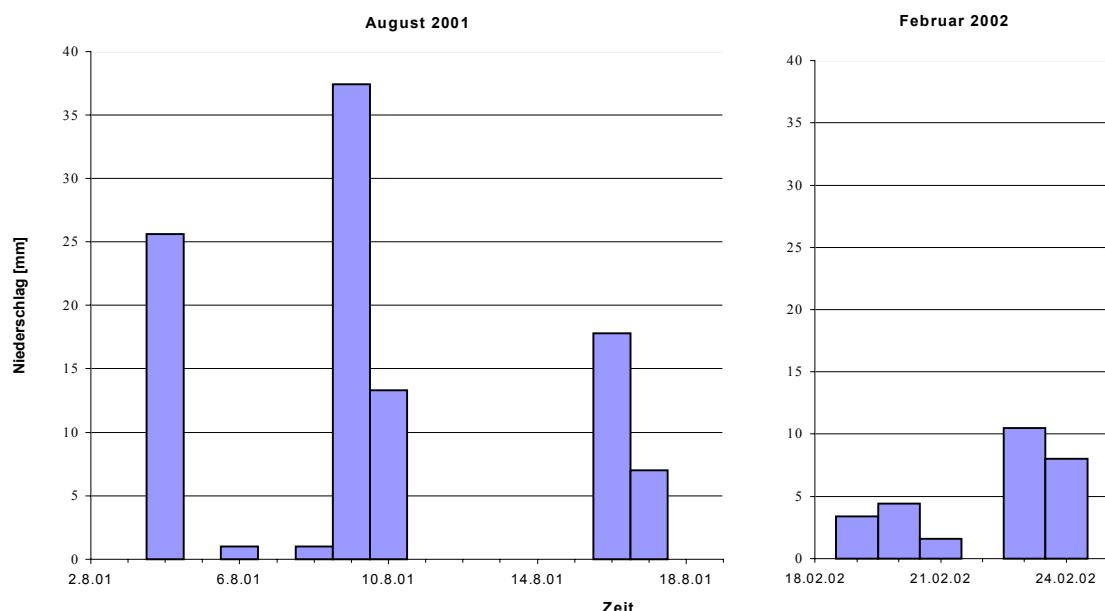


Abb. 17: Täglicher Niederschlag während der Tracerversuche im August 2001 und Februar 2002

Aus den aller 12 Stunden durchgeführten Wasserstandsmessungen am Messwehr ergeben sich Durchflussmengen zwischen 10 und 32 L/min (Abb. 18; Anl.B 2.2—2.4) Das entspricht 14,4 bis 46,1 m³/d Abfluss aus dem Blindschacht und einem Mittelwert (Tab. 9) von 23 L/min (33,1 m³/d).

Tab. 9: Statistische Kennwerte zu den ermittelten Abflüssen aus dem Blindschacht des Georgi Unterbau

	L/min	m³/d	m³/s
Minimum	10,1	14,5	$0,17 * 10^{-3}$
Maximum	32,1	46,3	$0,54 * 10^{-3}$
Mittelwert	23,4	33,7	$0,39 * 10^{-3}$
Standardabweichung	5,8		

Die Abflusswerte aus dem Blindschacht nehmen im August 2001 tendenziell zu. Eine direkte Beziehung zu den Niederschlags-Ereignissen kann angenommen werden. Im unter Wasser stehenden Grubengebäude des Georgi Unterbau konnten sich seit seiner Flutung stationäre Verhältnisse einstellen. Somit entspricht der Abfluss aus dem Blindschacht im wesentlichen dem Zufluss in die gefluteten Grubenbaue, unter Vernachlässigung der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit. Der Zeitverzug zwischen Niederschlags-Ereignis und dem steigenden Abfluss (Abb. 20) liegt in der Tatsache begründet, dass der Wasserzutritt in den Tiefbau hauptsächlich als Tropfwasser erfolgt. Mit einem Zeitverzug von 1—2 Tagen kann somit mit einem Anstieg der Abflussmenge gerechnet werden.

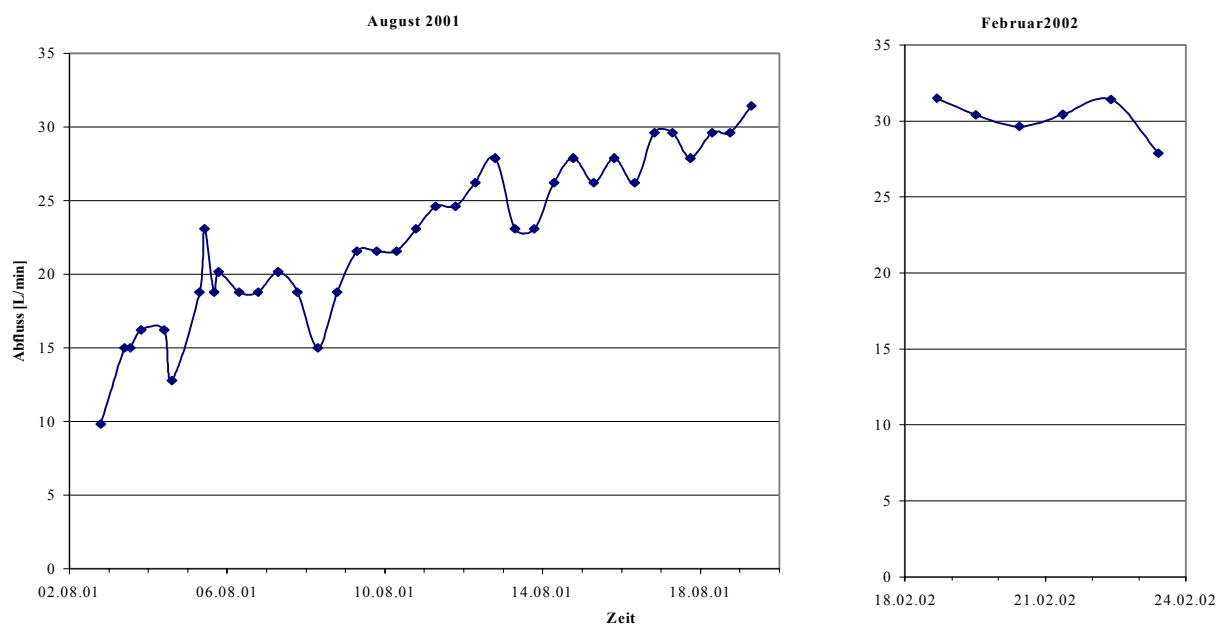


Abb. 18: Abfluss aus dem Blindschacht des Georgi Unterbau im August 2001 und Februar 2002

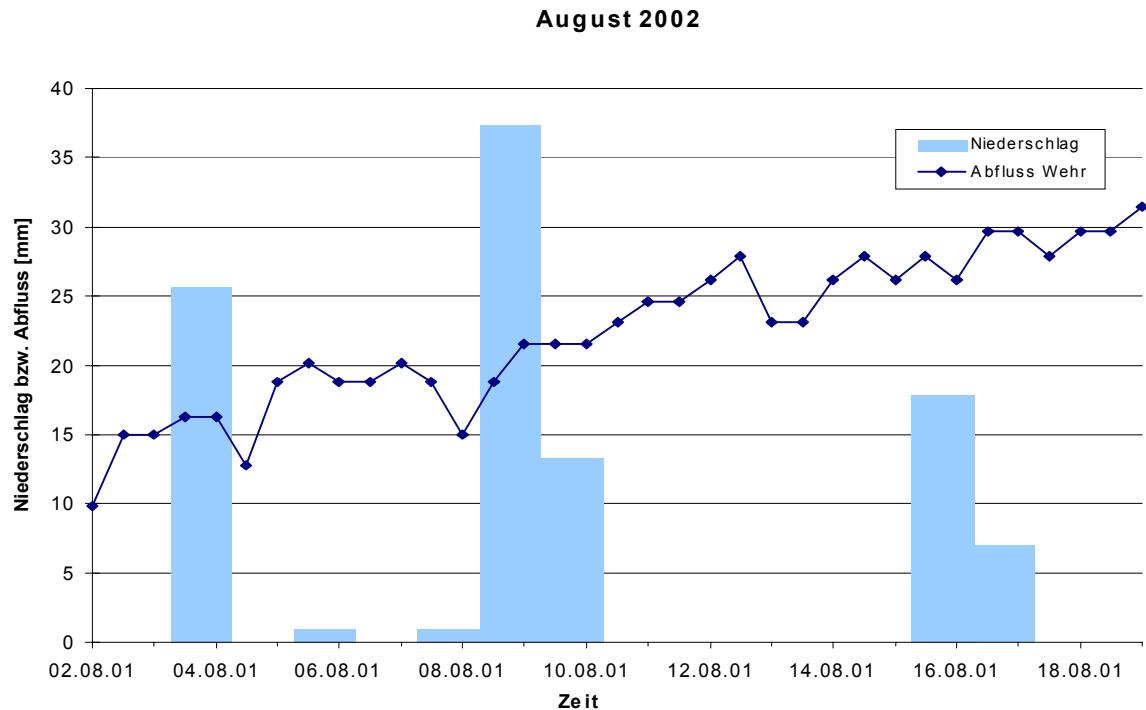


Abb. 19: Abflussverhalten des Blindschacht im Georgi Unterbau in Bezug zu den Niederschlagsereignissen im Zeitraum 02.08. bis 19.08.2002.

4.6.4 Tracereingabe

Vor der Traceraufgabe im August 2001 wurden die LydiAs mit Mikrosphären und Uranin gefüllt. Die Zugabe der Mikrosphärensuspension (4 mal je 20 ml) geschah direkt aus den Glasfläschchen in die Aufgabesonden, wobei die Fläschchen mehrmals mit destilliertem Wasser ausgespült wurden. Bei der Befüllung waren für jede Farbe gesonderte Einweghandschuhe, sowie nach dem Gebrauch die Verpackung dieser in Folie, notwendig. Das Uranin kam lose in Pulverform (900 g) in eine LydiA. Beim Tracertest im Februar 2002 erfolgte eine Zugabe von 50 g Uranin in wässriger Lösung. Auch die Flasche mit der Uraninlösung ist mehrmals mit destilliertem Wasser gespült worden.

Das Befüllen der Sonden erfolgte außerhalb des Grubengebäude von Georgi Unterbau. Es sind keine Tracerbehälter oder Materialien, die zum Befüllen benutzt wurden, in den Unterbau verbracht worden. Diese Maßnahmen dienten dazu, eine Kontamination so weit wie möglich auszuschließen.

Um die hydrodynamischen Verhältnisse im Bereich des gefluteten Blindschachtes des Georgi Unterbau charakterisieren zu können, wurden die Tracer an verschiedenen Stellen aufgegeben. Die Aufgabestellen waren der Blindschacht (BS), der Große See (GS) und eine östlich des

Blindschachtes gelegene Erzrolle (KS). In den Anlagen D 1.1 und E 1.1 ist die Lage graphisch und tabellarisch dargestellt.

In den zweitürmigen Blindschacht sind am 05.08.2001 vier LydiAs mit Mikrosphären und Uranin in unterschiedliche Teufen abgesenkt worden (Tab. 10). Die Auswahl der Aufgabestellen richtete sich nach der Teufe der Sohlen (20 m, 40 m, 70 m, 100 m). Um einer Verschleppung der Tracer durch eventuelle horizontale Strömung im Bereich der Sohlen entgegen zu wirken, wurden Aufgabeteufen (10 m, 30 m, 55 m, 85 m) zwischen den Sohlen gewählt.

Den Nachweis einer Verbindung zwischen dem Großen See (Anl. D1.1, E 1.2) und dem Blindschacht sollten im See aufgegebene Mikrosphären erbringen. Mit einem ca. 2 m langen Schöpfer wurde der Feststofftracer ca. 1,5 m vom Rand direkt eingegeben (Abb. 20). Damit alle Mikrosphärenkügelchen in das Wasser gelangen, ist der Schöpfer mehrmals ausgespült worden, wobei das Spülwasser ebenfalls in den See gegeben wurde.

Das Steinsalz (200 kg in Säcken zu je 50 kg) wurde vor Ort, unter kontinuierlichem Rühren in 600 L Wasser gelöst und vor der Zugabe in die Erzrolle einen Tag stehen gelassen. Als Lösungsbehälter dienten Polyethylenfässer, die nach der Eingabe der Sohle ebenfalls mehrmals ausgespült wurden.



Abb.20: Tracereingabe (Mikrosphären; Farbe: green) in den Großen See (GS) mittels eines Schöpfers.

4.6.5 Eingesetzte Tracermengen

Der Blindschacht hat einen Querschnitt von 6 m² und eine Teufe von etwa 100 m, somit ergibt sich eine Wassermenge von 600 m³. Während des Tracerversuches im August 2001 flossen 511,41 m³ (Summe: Wehr, Fotometer, Filter; Anl. B 2.2) ab. Dies würde bei Annahme einer vollständigen Durchströmung des Blindschachtes einen Wasseraustausch von 85 % bedeuten. Durch die im Vorfeld des Versuches gemachten Untersuchungen wird vermutet, dass keine großräumige Konvektion vorhanden ist (Wolkersdorfer 2001).

Beim Tracerversuch im August 2001 kamen jeweils 20 mL verschiedenfarbige Mikrosphären (Tab. 10) mit einer Konzentration von $1,0 * 10^6$ pro Milliliter Suspension zum Einsatz. Unter der Annahme einer homogenen Verteilung im Blindschacht würde dies eine Konzentration von 33.000 Mikrosphären/m³ ergeben.

Tab. 10: Eingabestellen, -zeiten und -mengen der Tracer des Multitracerversuches Großkogel/Tirol

Eingabestelle	Bezeichnung	Tracer	Menge	Eingabezeit
Blindschacht -10 m	BS 10	Mikrosphären "yellow"	$20 * 10^6$ in 20 mL	05.08. 08:29
Blindschacht -30 m	BS 30	Mikrosphären "orange"	$20 * 10^6$ in 20 mL	05.08. 08:17
Blindschacht -55 m	BS 55	Uranin	900 g in Pulverform	05.08. 08:02
Blindschacht -85 m	BS 85	Mikrosphären "red"	$20 * 10^6$ in 20 mL	05.08. 07:42
Großer See	GS	Mikrosphären "green"	$20 * 10^6$ in 20 mL	05.08. 08:46
Erzrolle	KS	NaCl-Sohle	200 kg gelöstes Steinsalz	05.08. 09:02—10:10
Blindschacht -10 m	BS 10	Uranin	50 g in Lösung	18:02 17:00

Als Fluoreszenztracer sind 900 g Uranin mit der Aufgabesonde in den Schacht eingebracht worden. Im Falle einer homogenen Verteilung ergäbe dies eine Konzentration von 1,5 mg/L. Der Uranin-Einsatz im Februar 2002 beschränkte sich auf 50 g. Diese geringe Menge wurde in 10 m Teufe aufgegeben, um das Strömungsverhalten im oberen Bereich des Blindschachtes zu untersuchen.

Unter der Berücksichtigung, dass ein Teil des Tracers durch Gravitation absinkt, wird eine Wassersäule von etwa 12 m angenommen. Bei einer gleichmäßigen Verteilung im Schacht ergibt sich eine Konzentration von 0,7 mg /L.

Eine Abschätzung, inwieweit die Sohle eine Leitfähigkeitsveränderung im Blindschacht oder dem gefluteten Grubenbau bewirkt, gestaltete sich sehr schwierig. Es war nicht bekannt, ob die Erzrolle eine Verbindung zu den Sohlen hat. Unter der Annahme einer gleichmäßigen Verdünnung der eingebrachten Sohle in errechneten 36.000 m³ Grubenwasser wird der Salzgehalt um 5,5 mg/L erhöht. In Bezug auf eine homogene Verteilung im Blindschacht wäre mit einer Erhöhung des Salzgehaltes um 0,33 g/L und mit einem Anstieg der Leitfähigkeit um 750 µS/cm zu rechnen.

Abschließend ist zu sagen, dass die eingesetzten Mengen Tracer genügen, um sie einwandfrei nachzuweisen. Keine der Konzentrationen ist als öko- oder humantoxisch anzusehen.

4.6.6 Beschreibung der Probenahme

Um eine regelmäßige Probenahme zu gewährleisten, wurde vor der Versuchsdurchführung ein Probenahmeplan aufgestellt. Von Bedeutung ist dieser Plan auch aufgrund der Tatsache, dass die eingesetzten Aufzeichnungsgeräte begrenzte Speicherkapazitäten besitzen.

Für den Nachweis der Feststofftracer wurde mittels einer Pleuger-Mini-Unterwasserpumpe (Pleuger Worthington Hamburg) kontinuierlich Schachtwasser, ca. 10 cm unter der Oberfläche, abgepumpt und über ein Spezialfiltersystem (10 µm Maschenweite, Hydro-Bios Kiel) geleitet. Zwei Mal täglich erfolgte der Wechsel (12-stündliches Intervall), dabei wurde das Filtersystem gegen ein anderes getauscht. Anschließend ist das eingesetzte Filternetz in einem Braunglas aufbewahrt worden, das mit der Probenummer versehen wurde. Das verwendete Filtersystem ist außerhalb des Georgi Unterbau gründlich unter fließendem Wasser gereinigt und mit einem neuen Filternetz bestückt worden.

Die Entnahme des markierten Wassers für den Nachweis des Uranins erfolgte ebenfalls mit einer Pleuger-Mini-Unterwasserpumpe (Pleuger Worthington Hamburg) ca. 10 cm unter der Wasseroberfläche. Mit einem 2-minütlich aufzeichnenden Spektrofotometer (Hach DR/2500, Loveland, Colorado) wurde das Uranin im August 2001 nachgewiesen (Abb. 16). Im Februar 2002 erfolgte der Uranin-Nachweis mit dem Onlinefluorimeter GGUN-FL20 Ser. # 13 (Groupe de Géomagnétisme; Université de Neuchâtel), das alle 4 Minuten ein Signal aufzeichnete und auf einer

PCMCIA-Datenkarte abspeicherte. Gefördert wurde das Schachtwasser ebenfalls mit einer Pleuger-Mini-Unterwasserpumpe ca. 10 cm unter der Wasseroberfläche.

In Tabelle 11 sind die Pumpenleistungen an der Entnahmestelle sowie die abgepumpte Wassermenge aufgeführt. Eine graphische Darstellung der Pumpenleistung zeigt Anlage B 2.2 und B 2.3.

Tab. 11: Pumpenleistungen und geförderte Wassermengen

Entnahmestelle	Pumpenleistung	Gepumpte Wassermenge
BS (Filter, Aug. 2001)	0,191—0,719 L/min	4,57 m ³
BS (Fotometer, Aug. 2001)	0,036—0,057 L/min	0,84 m ³
BS (Fluorimeter, Feb. 2002)	0,96—0,76 L/min	0,726 m ³

Für den Nachweis der Salzsohle ist eine Multiparametersonde verwendet worden. Die Sonde zeichnete 1 m unter der Wasseroberfläche des Blindschachtes kontinuierlich die Leitfähigkeit auf. In einem 24-stündigen Rhythmus wurden die abgespeicherten Werte am Datenlogger ausgelesen.

Nach Abschluss des Tracerversuches sind Schöpfproben aus dem Blindschacht genommen worden. Ziel dieser Maßnahme war es, Uranin nachzuweisen, dass gegebenenfalls durch fehlende vertikale Strömung nicht die Oberfläche erreichte. Für den Nachweis der Mikrosphären wurden in 10 m, 30 m 55 m und 90 m jeweils 0,5 L Schachtwasser entnommen und nach beschriebener Methode gefiltert. Des Weiteren wurde alle 10 m Schachtwasser für den Uranin-Nachweis entnommen und mit dem Spektrofotometer untersucht.

Eine Befahrung des Blindschachts bis in 100 m Tiefe mit einer Mehrparametersonde DL 512 (LogIn GmbH, Gommern) ist im Mai 2001, vor und nach dem Tracerversuch im August 2001 und im Februar 2002 durchgeführt worden. Mittels dieser Sonde wurden vertikale Temperatur- und Leitfähigkeitsprofile erstellt.

In den selben Zeiträumen sind aus dem Wasser des Blindschachts, aus dem Großen See, der Erzrolle und dem Großen See Süd (GSS) Proben für den analytischen Nachweis der Hauptionen und Schwermetalle entnommen worden. Die Beprobung erfolgte an der Oberfläche, in 10 m, 30 m, 55 m und 90 m Tiefe. Das genommene Probenwasser wurde mit einem Cellulose-Acetat-Filter

(Porenweite 0,45 µm) filtriert und anschließend in Kunststoffflaschen gefüllt (500 mL Hauptionen; 50 mL Schwermetalle). Um ein Ausfallen der Schwermetalle zu verhindern, sind die Flaschen für die Schwermetallanalyse mit Salpetersäure (3 Tropfen) angesäuert worden. Alle entnommenen Wasserproben wurden vor Ort beschriftet und bis zur Analyse im Labor kühl und dunkel gelagert.

4.6.7 Vor-Ort-Analytik

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Vor-Ort-Untersuchungen der Wasserproben erläutert. Die Untersuchungen wurden im Mai 2001 und vor bzw. nach den Tracerversuchen im August 2001 und Februar 2002 durchgeführt. Folgende Parameter wurden dabei ermittelt:

- pH-Wert
- Leitfähigkeit
- Temperatur
- Redoxpotential
- Sauerstoffgehalt
- Säuren- und Basenkapazität
- Eisengehalt.

Probenahmepunkte waren der Blindschacht (0,1 m, 10 m, 30 m, 55 m, 90 m), der Große See und die Erzrolle. Der Sauerstoffgehalt ist mit einem Sensor der Firma WTW (Weilheim) bestimmt worden, der Eisengehalt mit einem Feld-Photometer DR890 (Firma HACH), alle anderen Parameter mit dem Ultrameter 6 P (MYRON L Company, Karlsbad/USA). Alle Werte für die Vor-Ort-Parameter sind in Anlage E 3 aufgeführt.

4.6.7.1 pH-Wert

Chemisch reines Wasser ist zu einem geringen Teil dissoziert [Gleichung 3,4]:



Der ph-Wert hat keine Einheit und ist der negative dekadische Logarithmus [Gleichung 5] der Wasserstoffionenaktivität (HÖLTING 1996):

$$\text{pH} = -\log \{\text{H}^+\} \quad [5]$$

Einerseits hängt die Löslichkeit der meisten Mineralparagenesen entscheidend vom pH-Wert ab und andererseits beeinflusst die Lösung von Verbindungen den pH-Wert (SIGG & STUMM 1994).

Während der Versuchszeiträume wurde das Messgerät mehrmals mit Pufferlösungen kalibriert, um konstant gute Ergebnisse zu erhalten. Durch voreiliges Ablesen kann es beiden Messungen zu Fehlern kommen, die im Bereich von 0,5 pH-Einheiten liegen.

4.6.7.2 Leitfähigkeit

Bei der Leitfähigkeit handelt es sich um einen Summenparameter, der angibt, wie viel gelöste bzw. dissozierte Stoffe sich in der Wasserprobe befinden. In natürlichen Wässern, in denen die Temperatur ebenso wie die Wanderungsgeschwindigkeit und Wertigkeit der Ionen konstant ist, ist die Leitfähigkeit nur von der Ionenkonzentration abhängig.

Definiert wird die elektrische Leitfähigkeit [Gleichung 6] einer Flüssigkeit als Kehrwert des elektrischen Widerstandes (R) zwischen Elektroden mit einer Fläche ($F = 1 \text{ cm}^2$) und einem Abstand von einem Zentimeter (HÖLTING 1996):

$$K = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{F} \left[\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{cm}^2} \right] \text{ oder } [\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}] \text{ oder } [\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad [6]$$

ρ : spezifischer elektrischer Widerstand [$\Omega \cdot \text{m}$]

Wie schon beschrieben, wurden Leitfähigkeitsmessungen mittels einer Mehrparametersonde (Fa.LogIn) und auch teufenabhängig mit dem Messgerät Ultrameter 6P (Myron L Company) durchgeführt.

4.6.7.3 Redoxpotential (Eh-Wert)

Eine große Anzahl von chemischen und biochemischen Umsetzungen im Wasser sind Redoxreaktionen, d. h. bei ihnen findet ein Elektronentransfer statt. Der Elektronendonator wird dabei als Reduktionsmittel bezeichnet, der Elektronenakzeptor als Oxidationsmittel. Redoxspannungen geben einen Anhaltspunkt für das Vorhandensein aerober oder anaerober Prozesse. Positive Werte geben dabei einen Hinweis auf aerobe Vorgänge, während Werte zwischen -200 mV und 0 mV einen Übergangscharakter besitzen. Negative Werte unter -200 mV weisen hingegen auf anaerobe Verhältnisse hin.

Zur Bestimmung des Redoxpotentiales wurde das Messgerät Ultrameter 6P verwendet, dabei taucht eine hinsichtlich des Redoxsystems indifferente Platinelektrode (Messelektrode) in eine Lösung, die

ein Redoxsystem enthält und nimmt durch die NERNSTSche Gleichung [7] beschreibbares Potential an (HÜTTER 1994):

$$E_h = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \left[\frac{\text{ox}}{\text{red}} \right] \quad [7]$$

E_h	= Redoxpotential der Lösung (Volt, V)
E_0	= Standartpotential in V (bei 298 K; 10 ² Pa, wenn [ox] = [red] = 1 mol • L ⁻¹ Aktivität)
R	= Gaskonstante (1,987 cal • mol ⁻¹ • K ⁻¹ = 8,314 J • mol ⁻¹ • K ⁻¹)
F	= Faraday-Konstante (23,064 kcal • V ⁻¹ = 96,484 • 10 ³ V ⁻¹ • mol ⁻¹)
T	= Temperatur in K
n	= Zahl der umgesetzten Elektronen
ox	= Aktivität der oxidierten Form des Stoffes (mol • L ⁻¹)
red	= Aktivität der reduzierten Form des Stoffes (mol • L ⁻¹).

Das Redoxpotential ist Temperaturabhängig und muss daher korrigiert werden. Tabellen zur Korrektur finden sich z. B. in HÖLTING (1996) und HÜTTER (1994). Beim Messvorgang sollte darauf geachtet werden, dass der Messwert erst bei einer Messwertschwankung von nicht mehr als 1 mV innerhalb einer Minute abgelesen wird. Dies ist notwendig, um den Ablesefehler so gering wie möglich zu halten.

4.6.7.4 Sauerstoffgehalt

Der Sauerstoffgehalt nimmt bei der Beurteilung der Gewässergüte eine zentrale Stellung ein. Sein Gehalt ist entscheidend für biochemische Vorgänge. Dieser Gehalt kann als Absolutgehalt in mg/l oder als relativer Gehalt in % der Sättigungskonzentration angegeben werden, wobei die Sättigungskonzentration von der Wassertemperatur, dem Salzgehalt und auch vom Luftdruck abhängig ist. Die verwendete Messelektrode enthält eine Ag-Anode und eine KCl-Gel-Au-Kathode, die durch eine sauerstoffdurchlässige Membran von der Probe getrennt sind. Tritt Sauerstoff durch die Membran ein, so kommt es zu einer Reaktion an der Kathode infolgedessen Ionen freigesetzt werden, die zur Anode wandern. Auf diese Weise fließt ein Strom, dessen Stromfluss proportional zur eintretenden Sauerstoffmenge und damit zur Sauerstoffkonzentration in der Probe ist.

Ermittelt wurde der Sauerstoffgehalt direkt im Wasserstrom des zu untersuchenden Wassers. An Probenahmepunkten, wo dies nicht möglich gewesen ist, wurde das Wasser in einen Glaszyylinder gefüllt und im Zylinder gemessen.

4.6.7.5 Basen- und Säurekapazität

Bei natürlichen Wässern spielt die Basen- und Säurekapazität (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht) eine große Rolle. Die beteiligte Kohlensäure entsteht durch das Lösen von CO_2 in Wasser [Gleichung 8]:



Das Gleichgewicht liegt hierbei auf der Seite der Ausgangsstoffe, da die Kohlensäure eine schwache Säure ist. Kohlensäure ist eine zweibasische Säure, so dass zwei Stufen [Gleichung 9,10] ihre Salze gebildet werden:

1. Dissoziationsstufe (Hydrogencarbonat):



2. Dissoziationsstufe (Carbonat):



Im Wasser können folgende Kohlensäurespezies auftreten:

- gelöstes CO_2
- H_2CO_3
- HCO_3^-
- CO_3^{2-}

Da der Anteil des H_2CO_3 vernachlässigt werden kann, setzt sich der gesamte Anteil Q_c für die Kohlensäurespezies wie folgt zusammen [Gleichung 11]:

$$Q_c = c(\text{CO}_2) + c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{CO}_3^{2-}) \quad [11]$$

Die drei verschiedenen Spezies sind in ihrem Anteil stark vom pH-Wert abhängig:

- bei $\text{pH} < 4$ ist nur CO_2 vorhanden
- zwischen $\text{pH} 7$ und $\text{pH} 10$ fast nur HCO_3^-
- bei $\text{pH} > 11$ überwiegend CO_3^{2-}

Durch Titration mit Salzsäure (0,1 N HCl) erfolgte die Bestimmung der Säurekapazität (Acidität) bzw. mit Natronlauge (0,1 N NaOH) die Bestimmung der Basenkapazität (Alkalität). Die Titration wurde mit einem Digitaltitrator der Fa. Hach durchgeführt, dazu wurden 25 mL Probe mit den Indikatoren Methylorange bzw. Phenolphthalein versetzt und auf Farbumschlag titriert. Hat man die Werte durch Titration mit Säure erzielt, erhalten sie ein positives, hat man mit Lauge titriert, ein

negatives Vorzeichen (Anl. B3). Berechnet wurde die Konzentration (mmol/L) mit folgenden Gleichungen [12, 13]:

$$K_{S4,3}(+m); K_{B8,2}(+p) = \frac{\text{Anzeige} * 0,1 \text{ N HCl} [\text{mmol} * \text{mL}^{-1}] * 1000 [\text{mL} * \text{L}^{-1}]}{800 * \text{Vorlage} [\text{mL}]} \quad [12]$$

$$K_{S4,3}(-m); K_{B8,2}(-p) = \frac{\text{Anzeige} * 0,1 \text{ N NaOH} [\text{mmol} * \text{mL}^{-1}] * 1000 [\text{mL} * \text{L}^{-1}]}{800 * \text{Vorlage} [\text{mL}]} \quad [13]$$

Die Bestimmung der Base- und Säurekapazität durch Titration auf Farbumschlag ist mit Fehlern behaftet, da der Bereich des Farbumschlags bei Phenolphthalein zwischen pH 3,1—4,4 bzw. bei Metylorange zwischen pH 3,1—4,4 liegt (HÜTTER 1994). Eine weitere Fehlerquelle stellt das menschliche Auge dar, bei einer eventuellen Farbschwäche des Bearbeiters können hier größere Fehler auftreten. Ein Titrieren nach dem pH-Wert ist deshalb dem hier angewendeten Verfahren in Zukunft vorzuziehen.

4.6.7.6 Eisenbestimmung

Eisen ist ein wichtiger Bestandteil bei physiologischen Prozessen in Flora und Fauna. Sauerstoff ist für die Eisenspezies von besonderer Bedeutung, so erfolgt bei anaeroben Verhältnissen (Sauerstoffsättigung < 50%) die Reduktion zu zweiwertigem und bei aeroben Verhältnissen die Oxidation zu dreiwertigem Eisen.

Vor-Ort wurden die Eisengehalte mit einem Photometer der Fa. HACH (Typ: DR890) bestimmt. Dazu sind die Wasserproben mit Hilfe eines Cellulose-Acetat-Filter (Porenweite 0,45µm) der Fa. Sartorius GmbH/Göttingen und einem Druckfiltrationssystem gefiltert worden. Anschließend wurde unter Zusatz eines Indikators (Ferrous Iron Reagenz Powder) in 10 ml Probenlösung mit genanntem Gerät der gelöste Eisengesamt- und Eisen (II)-gehalt bestimmt. Auf Grund der sehr geringen Eisenkonzentrationen von überwiegend < 0,01—0,02 mg /L ist nicht bei jedem Probenahmepunkt eine Eisenbestimmung durchgeführt worden, sondern nur Stichproben.

5 Durchgeführte Laborarbeiten

5.1 Einführung

Die in diesem Kapitel beschriebenen wasserchemischen Analyseverfahren sind bei den im Mai und August 2001 und Februar 2002 genommenen Wasserproben angewendet worden. Bei den Analysen SWZ-MB-01—MB-19 handelt es sich um von den Montanwerken Brixlegg zur Verfügung gestellte Ergebnisse. Es kann deshalb keine Aussage über das jeweilige Verfahren zur Bestimmung der wasserchemischen Parameter gemacht werden.

5.2. Aufbereitung der Mikrosphärenproben

Für eine schnelle, sichere und einfache Untersuchung der Filternetzproben ist es nötig, diese aufzubereiten. KÄSS (1998) beschreibt und zitiert für die Behandlung der Probennetze eine Reihe von Autoren und schlägt verschiedene Methoden vor. In vorliegender Arbeit wurden die Erfahrungen und Methoden von Hasche (2001) übernommen, die eine Tracertest mit Sporen und Mikrosphären durchgeführt hat.

Zu den genommenen Filternetzproben wurden im Labor 200 ml destilliertes Wasser und 2 mg Oxalsäure ($C_2H_2O_4$) gegeben. Danach sind die in den Braungläsern befindlichen Netzproben mehrmals kräftig geschüttelt worden und zwei Wochen stehen gelassen. Die Zugabe der Oxalsäure erfolgte, um die auf den Netzen lagerten Karbonatkörnchen und eventuell auftretende Eisenoxidhydrate in Lösung zu bringen.

Um die Mikrosphären unter dem Mikroskop auswerten zu können, wurden die Filternetze mit destilliertem Wasser gründlich gewaschen. Das Waschwasser wurde anschließend zusammen mit dem Wasser aus den Braungläsern bzw. dem Rückstandwasser von der Gläser- und Deckelreinigung filtriert. Hierzu sind schwarzgraue Cellulosenitrat-Membranfilter der Firma Sartorius GmbH/Göttingen von 47 mm Durchmesser, einer Porenweite von 8 μ m und Gitteraufdruck verwendet worden. Nach Spülung des Oberteils vom Druchfiltrationssystem wurden die Filterblätter auf rechteckige Objektträger (76x110) gelegt und mit entsprechender Probenummer beschriftet. Die weitere Bearbeitung erfolgte nach Trocknung der Filter, durch das Abdecken mit Deckgläsern und seitlicher Fixierung mit Klebeband.

Durch die Konzentrierung der Mikrosphären auf den Membranfilter mit Gitternetzaufdruck ergibt sich eine kreisförmige Fläche von 43,5 mm Durchmesser. Somit errechnet sich eine Filterfläche von

1486,17 mm² mit 139 Quadraten. Bei einer Kantenlänge von 3,27 mm pro Quadrat beschreibt dieses eine Fläche von 10,69 mm² und entspricht somit 0,72 % der durchgesaugten Probensuspension.

Um die Gesamtzahl der Mikrosphären nach dem Auszählen aliquoter Teilmengen berechnen zu können, müssen die Grundsätze der Statistik Beachtung finden (Hofer 1959 in Käss 1998). Mit einem Fluoreszenzmikroskop (mit Kreuztisch) erfolgte die Bemusterung der Membranfilterpräparate. Die Auszählung folgt der Annahme, dass alle Feststofftracer statistisch auf dem Filter verteilt sind. Somit sind für die geringste statistische Sicherheit jeweils 20 Felder zu zählen. Bei hoher Belegungsdichte genügte das Auszählen eines bestimmten Bruchteils dieser Quadrate (bei >100 Sporen/Mikrosphären pro Quadrat – 2 Quadrate pro Filterplatte). Sofern sich zwischen zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Filtern signifikante Unterschiede ergaben, wurde die Anzahl der auszuzählenden Quadrate solange erhöht, bis entweder mehr als 20 Tracerpartikel oder 20 Felder gezählt waren (Hasche 2001).

Die Filterpräparate wurden mit einer Breitbandblauanregung (360—510 nm) und einer 250-fachen Vergrößerung bemustert. Aufgrund der Anregung erschienen die Polystyrolkugelchen der Farbe "green" hellgrün, der Farbe "orange" orange der Farbe "red" blutrot und der Farbe "yellow" gelb (Abb. 22)

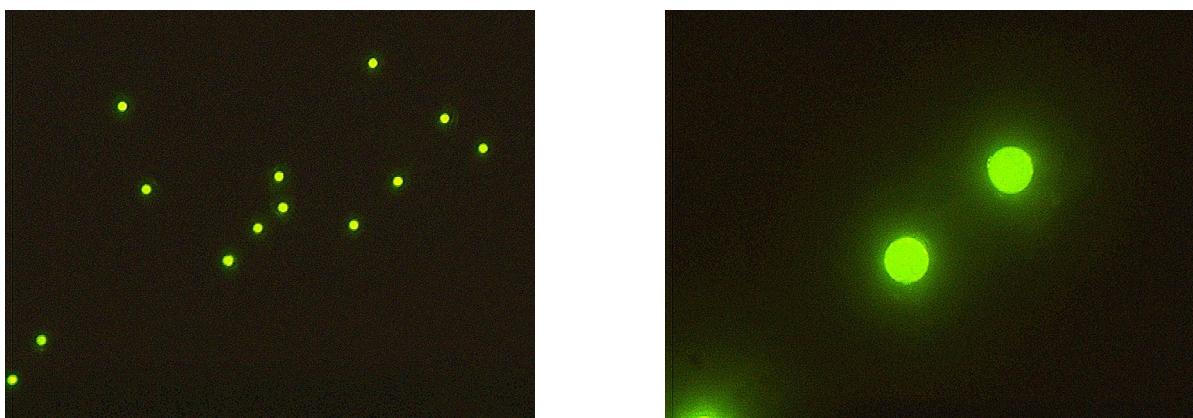


Abb. 22: Fluoreszmikroskopische Aufnahmen grüner Mikrosphären aus der Probe BRX-0708-2. Durchmesser der Mikrosphären 15 µm.

5.3 Wasseranalysen

5.3.1 Hauptionen

Die Hauptionen Li, Na, K, Ca, Mg, Cl, NO₃, SO₄ sind mit der Ionenchromatographie bestimmt worden. Am Lehrstuhl für Hydrogeologie der TU Bergakademie Freiberg erfolgten die Analysen mit dem Ionenchromatograph D6000 der Firma Merck-HITACHI.

Ionenchromatographie ist ein spezielles Verfahren der Hochdruck-Flüssig Chromatographie (HPLC). Unter Anwendung entsprechender Trennmaterialien und Elutionsmittel können damit sowohl Anionen als auch Kationen getrennt werden. Bei diesem Verfahren wird eine stationäre Phase (Trennsäule) eingesetzt (Ionenaustauscher niedriger Kapazität) und eine mobile Phase(Eluent), die grundsätzlich wässrige Lösungen von Salzen schwacher ein- oder zweibasiger Säuren sind.

Bei der Kopplung eines Leitfähigkeits-Detektors (zur online Detektion) mit einer Ionenaustauscher-Trennsäule und einer Suppressor-Säule wird eine chromatische Bestimmung vorgenommen. Dabei liegt die Aufgabe der Suppressor-Säule in der Neutralisation des Eluenten nach der Ionentrennung, was einen Nachweis kleinsten Ionenzahlen möglich macht. Dies geschieht durch die Verringerung der Untergrundleitfähigkeit in der mobilen Phase. Unter Verwendung eines Gemisches aus Phthalsäure und Tris-(hydroxymethyl)-amonomethan bei pH 4 wurden die Anionen analysiert. Ein Weinsäure-Dipicolinsäure-Gemisch diente zur Analyse der Kationen. In der stationären Phase wurde ein Hohlfasermembran-Suppressor mit sulfonierte Polyethylenfasern als Austauscher benutzt.

5.3.2. Fluorid-Bestimmung

Die Fluorid-Bestimmung erfolgte direktpotentiometrisch mit einer ionenselektiven Elektrode (ISE). Diese Ionensensitive Elektrode (ISE) ist eine elektrochemische Halbzelle, die durch eine Membran von der Messlösung getrennt ist. An der Phasengrenze zwischen Elektrodenmaterial und Messlösung tritt ein Potential auf, dessen Größe abhängig von der Aktivität und damit der Konzentration des zu bestimmenden Ions in der Lösung ist.

Bei Kontakt einer ISE mit einer wässrigen Lösung, die Florid-Ionen enthält, stellt sich zwischen Mess- und Bezugselektrode eine Kettenspannung ein, deren Höhe dem Logarithmus des Zahlenwertes der Fluorid-Ionenaktivität proportional ist. Temperatur und Ionenstärke beeinflussen

darüber hinaus die Kettenspannung. Daher müssen sie bei der Kalibrierung und Messung übereinstimmen und konstant gehalten werden. Weiterhin ist die Fluorid-Ionenaktivität vom pH-Wert abhängig. Als günstiger Bereich für eine Messung haben sich pH-Werte von 5 bis 7 erwiesen. Zur Fixierung des pH-Wertes und des Aktivitätskoeffizienten dienen spezielle Pufferlösungen. Mit dieser Voraussetzung wird im folgenden nicht mehr von Aktivität sondern von Fluorid-Ionenkonzentration gesprochen (DIN 38 405).

Am Lehrstuhl für Hydrogeologie wurden die Fluorid Gehalte der Beprobung vom Mai 2001 und Februar 2002 vorgenommen. Dies erfolgte mit der Fluoridselektiven Elektrode F 500 der Firma WTW und einer Referenz-Elektrode (SE 20/EB) der Firma SensorTechnik Meinsberg.

Die Auswertung der Proben vom August 2002 erfolgte durch den Bearbeiter bei der Firma GFI (Gesellschaft für Instrumentelle Analytik) Scharfenstein. Als Elektrode kam dabei eine Einstab-Kombinations-Fluoridelektrode (Model 94-09, Firma Orion, Boston, USA) mit eingebauter Reverenz-Elektrode zum Einsatz. Bei dem dazugehörigen Messgerät handelte es sich um das Modell SA 720 ebenfalls von der Firma Orion.

Bei der Durchführung wurde 25 mL Probelösung mit 10 mL TISB-Lösung (Total Ionic Strength Adjustment Buffer) als Puffer versetzt. Unter ständigem Rühren und eintauchen der Elektrode wurde ein Messwert (mg/L) für jede Probelösung ermittelt. Alle Fluoridkonzentrationen sind in Anlage E 3 aufgelistet.

5.3.3 Spurenelemente

Mit der Analysenmethode ICP-MS (inductively-coupled-plasma mass-spectrometry), zu deutsch: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma, sind die Spurenelemente bestimmt worden. Diese Analysenmethode ermöglicht die Bestimmung einer Vielzahl von Elementen in relativ kurzer Zeit und ist aufgrund ihrer Nachweisstärke inzwischen eines der meist genutzten Verfahren der Spurenelementanalytik.

Die ICP-MS beruht auf der Ionisierung des zu analysierenden Materials in einem Plasma bei etwa 5000 °C. Zur Erzeugung des Plasmas wird ein hochfrequenter Strom in ionisiertes Argon induziert. Aus diesem Plasma werden die Ionen durch zwei Blenden, die als Sampler und Skimmer bezeichnet werden, in das Vakuum-System des Massenspektrometers überführt. Nach dem Fokussieren in der sogenannten Ionenoptik wird der Ionenstrahl im eigentlichen Massenspektrometer in Ionen unterschiedlicher Masse getrennt.

Weil jedes Element mindestens ein Isotop aufweist, dessen Masse bei keinem natürlichen Isotop eines anderen Elements auftritt, ist die Masse eine charakteristische Eigenschaft der Elemente. Dies wird sowohl zum qualitativen als auch zum quantitativen Nachweis genutzt.

Bei den heute üblichen ICP-MS-Geräten werden nach der Massentrennung einzelne Ionen detektiert, so dass sehr geringe Mengen eines Elements nachgewiesen werden können. Einschränkungen ergeben sich durch Geräte-spezifisches Untergrundrauschen, Interferenzen und der Transmisson des Systems.

Untersucht wurden die Konzentrationen (Anl. E 3) von folgenden Elementen: Ag, As, Au, Ba, Bi, Cd, Co, Cs, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Pd, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, U, W, Zn. Ausgeführt hat die Untersuchungen das Labor der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften (Tharandt) der Universität Dresden.

6 Ergebnisse des Tracerversuches

6.1 Einführung

Im Vorfeld der Tracerversuche sowie danach sind die physiko-chemischen Parameter im Blindschacht untersucht worden. Dies geschah zu Beginn, um die Eignung des Schachtes für einen solchen Versuch zu ermitteln und danach um die Ergebnisse zu bestätigen bzw. signifikante Veränderungen festzustellen. Die in diesem Kapitel auch beschriebenen vertikalen Temperatur- und Leitfähigkeitsprofile zählen zu diesen Untersuchungen.

Bei dem Tracertest kann von einem eindimensionalen Fließsystem innerhalb von Rohren (in Form von Schächten und Sohlen) ausgegangen werden, wobei der Advektion für den Stofftransport eine größere Rolle zukommt als der Dispersion.

6.2 Temperaturmessungen

Die Temperaturschwankungen der vier ausgewerteten Profile sind sehr gering. Es zeigen sich absolute Unterschiede von maximal 0,5 K. Im Mai und Anfang August erbrachten die Messungen nahezu konstante Temperaturwerte oberhalb der 40 m Sohle von ca. 8,5 °C. Zwischen der 40 m und der 70 m Sohle zeigen sich sehr kleine Temperaturschwankungen, wobei die Temperatur um 0,1 K ansteigt. Unterhalb der 70 m Sohle bleibt die Temperatur in einem konstanten Bereich von 8,6 °C.

Am 19.08.2001 zeigte die Temperaturmessung ein anderes Bild, oberhalb der 40 m Sohle korrelieren die Profile vom Mai und August sehr gut. Unterhalb der 40 m Sohle besteht eine konstante Temperatur von 8,57 °C bis in eine Teufe von 68 m. Dort fällt ein "Temperatursprung" von 0,15 K auf, der bis in eine Teufe von 100 m zu verfolgen ist.

Einen ähnlichen Verlauf wie bei den ersten drei Befahrungen zeigt die Befahrung im Februar 2002. Gemessen wurde im Bereich zwischen der 20 m Sohle und einer Teufe von 98 m. Der Temperaturanstieg (0,1 K) erfolgt auch hier an der 40 m Sohle. Im Teufenzonenbereich zwischen 50 m und 98 m bleibt die Temperatur relativ konstant mit 8,3 °C. Es ist ein Temperaturunterschied von 0,4 K im gesamten Bereich der Befahrung zu den im Mai 2001 und am 03.08.2001 durchgeföhrten Messungen zu beobachten. Diese sehr kleine Temperaturminderung ist durchaus auf gerätespezifische Abweichungen zurückzuföhren.

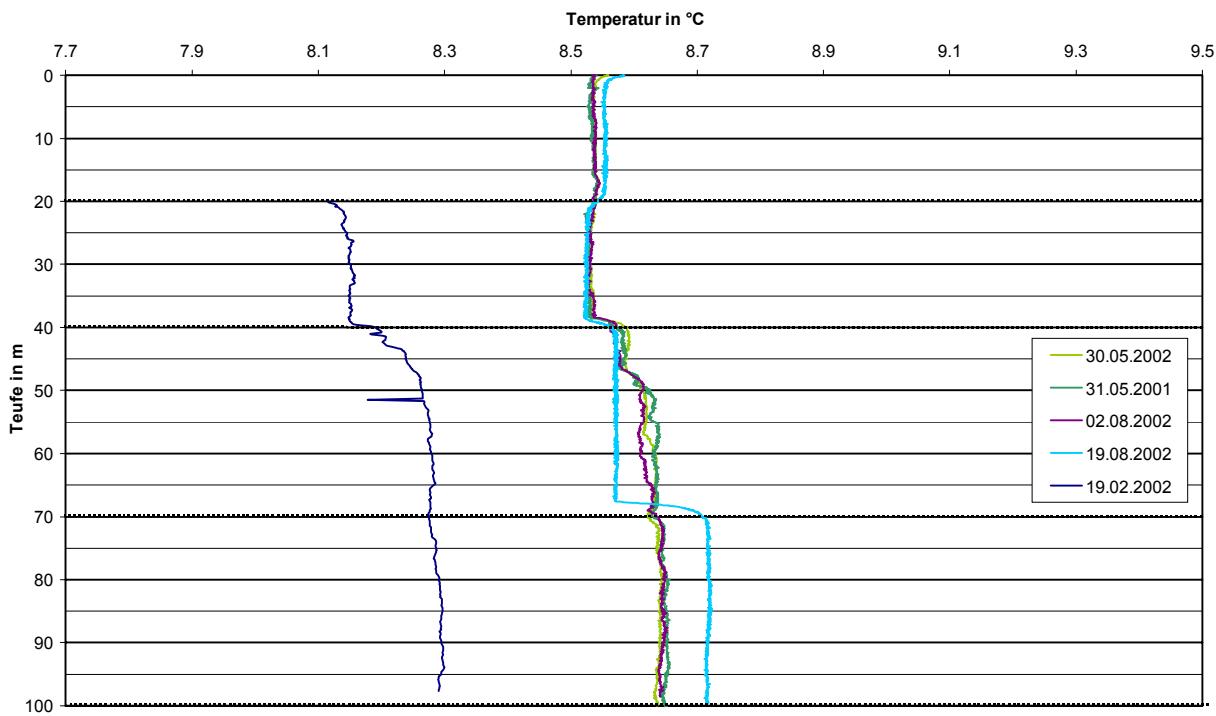


Abb. 22: Kontinuierliche Temperaturmessung im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau. Die Sohlen 20, 40, 70 und 100 sind durch gepunktete Linien hervorgerufen.

Die Temperaturunterschiede aller vier Befahrungen liegen unter 1 K und sind relativ konstant. Eine von den Messungen abzuleitende Schichtung des Schachtwasserkörpers kann als relativ stabil bezeichnet werden.

6.3 Leitfähigkeitsmessungen

Die kontinuierliche Leitfähigkeitsmessung vom 19.08.2001 unterscheidet sich in Ihrem Verlauf stark von den anderen Messungen (30./31.05.2001 und 19.02.2002). So verlaufen die Profile vom Mai 2001 mit einem Mittelwert von 0,34 mS/cm konstant bis in eine Teufe von 100 m. Ein unterhalb der 20 m Sohle auftretender Peak ist vermutlich einem durch den Bearbeiter verschuldeten Sedimenteneintrag in den Großen See zuzuschreiben. Am 02.08.2001 erbrachte die Befahrung des Blindschachtes denselben Verlauf wie im Mai. Der Mittelwert liegt allerdings mit 0,29 mS/cm um 0,05 mS/cm niedriger. Diese Abweichung ist gerätebedingt und aufgrund der geringen Werte nicht relevant für den durchgeführten Versuch.

Bis in eine Teufe von 39 m ist die Befahrung am 19.08.2001 mit den davor durchgeföhrten gleichzusetzen. Das Profil verläuft konstant mit 0,36 mS/cm, bis bei genannter Teufe eine Leitfähigkeitserhöhung von 0,02 mS/cm auf 0,38 mS/cm eintritt. Eine weitere Erhöhung um 0,05 mS/cm erfolgt bei 67 m, danach ist der Wert (0,47 mS/cm) konstant bis in eine Teufe von 100

m. Diese "Leitfähigkeitssprünge" werden durch die erhöhten Gehalte an Cl^- und Na^+ in diesen Teufen hervorgerufen. Durch das Absinken der als Tracer eingebrachten Sohle erhöhen sich die Chlorid und Natrium Gehalte um ein Vielfaches, wie in Tabelle 12 und Abbildung 25 aufgeführt.

Tab.12: Zeitliche Veränderung der Chlorid- und Natriumkonzentrationen [mg/L] im Blindschacht bzw dem Großen See und dem Großen See Süd des Georgi Unterbau vom Dezember 2000 bis Februar 2002.

Datum	Teufe [m]						
	0,1	10	30	55	90	GS	GSS
05.12.2000	Na^+	n.b.	0,55	0,54	0,55	0,52	n.b
	Cl^-	n.b.	0,84	0,84	0,80	0,79	n.b
30.05.2001	Na^+	n.b.	1,4	1,0	0,8	0,8	0,70
	Cl^-	n.b.	1,3	<1,0	<1,0	<1,0	<0,1
02./03.08.2001	Na^+	0,61	0,68	0,68	0,68	0,68	1,16
	Cl^-	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	3,0
19.08.2001	Na^+	n.b.	1,17	1,6	4,5	15,2	1,4
	Cl^-	n.b.	<0,7	1,0	4,7	20,2	0,7
19./23.02.2002	Na^+	3,33	3,80	3,42	3,8	4,02	3,26
	Cl^-	4,25	4,70	4,0	4,02	4,37	4,2
							3,20
							3,89

Die teufenabhängige Leitfähigkeitsmessung am 19.02. 2001 erfolgte in einem Bereich zwischen 20 und 98 m. Sehr häufige Schwankungen im Bereich von maximal 0,03 sind kennzeichnend für diese Befahrung. In der Grundtendenz verläuft die Kurve konstant mit einem Mittelwert von 0,49 mS/cm bei einer Standartabweichung von 0,006 mS/cm. Da die Leitfähigkeitsschwankungen sehr gering sind, kann von einem konstanten Verlauf gesprochen werden. Vergleichend zu den ersten drei Messungen liegt die Kurve vom 19.02.2002 zwar 0,2 mS/cm höher, ihr Verlauf ist aber ähnlich. Die am 19.08.2001 aufgetretenen Leitfähigkeitsunterschiede sind somit nicht mehr nachweisbar.

6.4 Mikrosphären

Von den vier aufgegebenen Tracern in Form von Mikrosphären konnten nur die der Farbe "green" nachgewiesen werden (Tab. 13). Die an der Entnahmestelle wiedergefundenen Mikrosphären der Farben "yellow", "orange" und "red" sind statistisch verteilt, doch fehlt die für den Tracerdurchgang typische Durchgangskurve, daher sind diese Mikrosphären als kontaminationsbedingt einzurordnen.

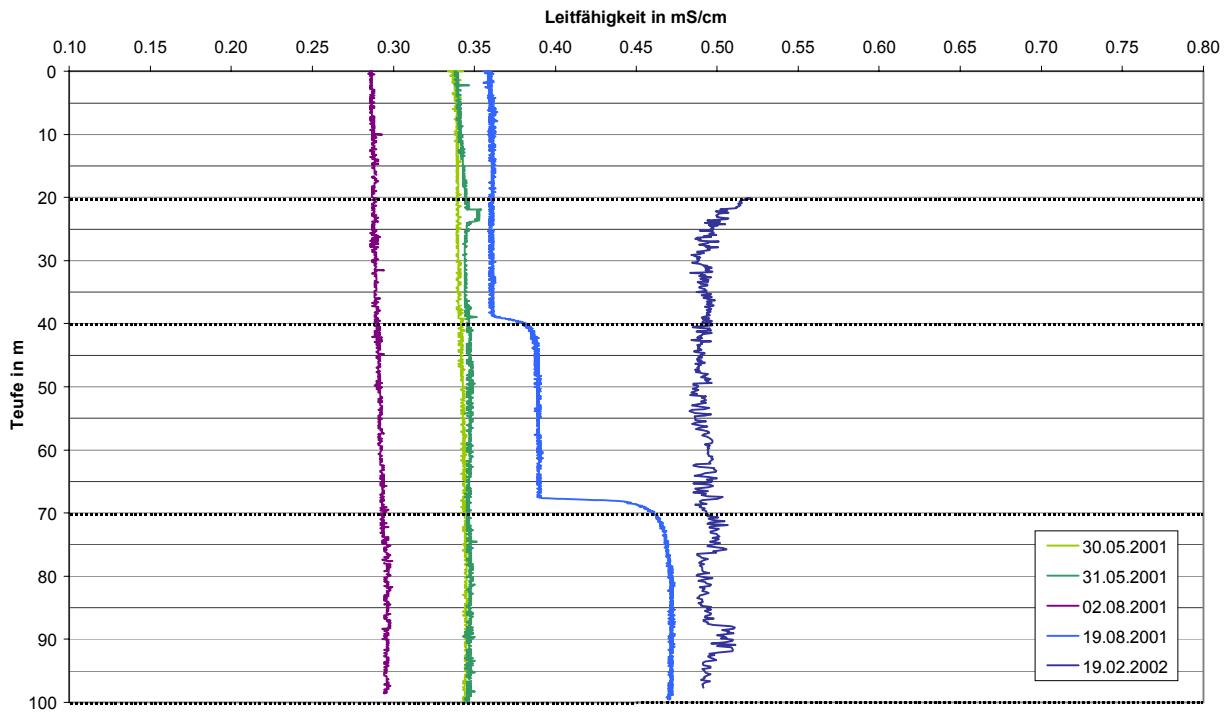


Abb. 22: Kontinuierliche Temperaturmessung im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau. Die Sohlen 20, 40, 70 und 100 sind durch gepunktete Linien hervorgerufen.

Der Nachweis der Mikrosphärenkügelchen "yellow" ist durch den späten Öffnungszeitpunkt der LydiA und dem aus Zeitgründen beendeten Tracerversuch nicht möglich gewesen.

In Abbildung 23 ist die Durchgangskurve der Mikrosphären ("green") graphisch dargestellt. Es zeigt sich eine typische Tracerdurchgangskurve mit einem schnellen Einsetzen und einem langsameren Abklingen der Tracerkonzentration, wobei das Maximum der Mikrosphären 5666 Stück entspricht. Die Wiederfindungsrate (englisch: Recovery rate) ergibt sich aus folgenden Abflusswerten:

Gepumpte Wassermenge (Filter):	4,57 m ³
Ausgeflossene Wassermenge (Wehr):	511,41 m ³
Verhältnis:	111,85

Mit dem ermittelten Faktor (Verhältnis) von 111,85 berechnet sich eine Wiederfindungsrate von 4,35 % für die Mikrosphären der Farbe "green".

Nach der Auswertung der ergeben sich folgende Parameter bezüglich der Zeiten und Geschwindigkeiten zwischen der Eingabe- und der Entnahmestelle (50 m):

$$t_{\max}: \text{Ersteinsatz Tracer} \quad \Rightarrow \quad v_{\max}: \text{maximale Abstandsgeschwindigkeit}$$

t_{dom} :	Maximalkonzentration Tracer	\Rightarrow	v_{dom} :	dominierende Abstandsgeschwindigkeit
t_a :	mittlere Konzentration Tracer	\Rightarrow	v_a :	mittlere Abstandsgeschwindigkeit
t_{50} :	mediane Konzentration Tracer	\Rightarrow	v_{50} :	mediane Abstandsgeschwindigkeit
t_{16} :	Konzentration bei 16 % Tracer	\Rightarrow	v_{16} :	Abstandsgeschwindigkeit bei 16 %
t_{84} :	Konzentration bei 16 % Tracer	\Rightarrow	v_{84} :	Abstandsgeschwindigkeit bei 16 %

Hierbei errechnet sich die Abstandsgeschwindigkeit nach Gleichung 1 (Kapitel 4.1). Um den Dispersionskoeffizienten (D_L) zu ermitteln wurde Gleichung 14 angewendet.

$$D_L = \frac{v_{50}^2 * (t_{84} - t_{16})^2}{8 * t_{50}} \quad [14]$$

Mit dem Dispersionskoeffizienten (D_L) errechnet sich nach Gleichung 15 die longitudale Dispersivität (λ_L).

$$\lambda_L = \frac{D_L}{v_{50}} \quad [15]$$

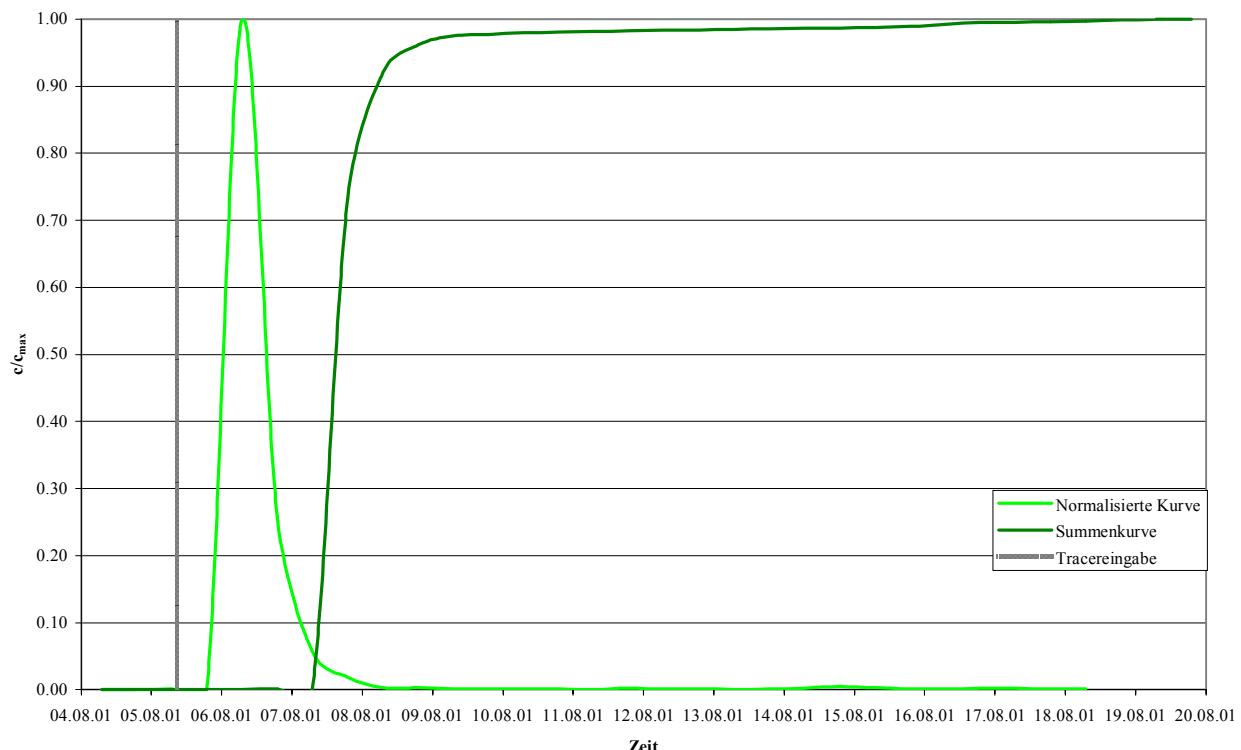


Abb. 23: Normalisierte Durchgangskurve (c/c_{\max}) des Tracertests mit Mikrosphären der Farbe "green" im August 2001. Das Maximum entspricht 5666 Mikrosphären von, die Summenkurve 4,35 %. Vertikale Linie: Injektion des Tracers.

Tab.13: Ergebnisse der aliquoten Auszählung der Filterproben für die Bestimmung der Mikrosphären.

Probe Nr.	Datum/ Uhrzeit	10 m (yellow)	20 m (orange)	85 m (red)	GS (green)
BRX-0408-01	04.8.01 07:00	0	0	1	2
BRX-0408-02	04.8.01 19:00	1	0	0	2
BRX-0508-01	05.8.01 07:00	4	2	0	1
BRX-0508-02	05.8.01 19:00	1	4	1	0
BRX-0608-01	06.8.01 07:00	8	4	0	1
BRX-0608-02	06.8.01 19:00	3	5	0	5
BRX-0708-01	07.8.01 07:00	3	5	0	17
BRX-0708-02	07.8.01 19:00	35	0	0	5666
BRX-0808-01	08.8.01 07:00	0	7	0	1464
BRX-0808-02	08.8.01 19:00	7	0	7	320
BRX-0908-01	09.8.01 07:00	0	5	0	105
BRX-0908-02	09.8.01 19:00	0	0	0	18
BRX-1008-01	10.8.01 07:00	0	0	1	17
BRX-1008-02	10.8.01 19:00	0	0	1	9
BRX-1108-01	11.8.01 07:00	0	0	0	7
BRX-1108-02	11.8.01 19:00	0	0	0	9
BRX-1208-01	12.8.01 07:00	0	0	0	5
BRX-1208-02	12.8.01 19:00	0	0	0	2
BRX-1308-01	13.8.01 07:00	0	1	0	12
BRX-1308-02	13.8.01 19:00	0	0	0	5
BRX-1408-01	14.8.01 07:00	0	0	1	7
BRX-1408-02	14.8.01 19:00	0	3	0	3
BRX-1508-01	15.8.01 07:00	0	0	0	5
BRX-1508-02	15.8.01 19:00	1	5	0	14
BRX-1608-01	16.8.01 07:00	1	6	0	26
BRX-1608-02	16.8.01 19:00	4	3	0	16
BRX-1708-01	17.8.01 07:00	22	4	0	5
BRX-1708-02	17.8.01 19:00	19	6	0	7
BRX-1808-01	18.8.01 07:00	24	6	0	10
BRX-1808-02	18.8.01 19:00	30	9	0	10
BRX-1908-01	19.8.01 07:00	34	7	0	6
BRX-1908-02	19.8.01 19:00	51	8	104	5

Die Auswertung der Durchgangskurven erfolgte sowohl mit Microsoft Excel 6.0 als auch mit der Software Tracy95 (Version 4.0.4B; Anl. C 1). In Tabelle 14 sind die Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt.

Mikrosphären der Farbe "green" konnten erstmals nach 48 Stunden (t_{\max}) an der Schachtoberfläche nachgewiesen werden. Nach weiteren 12 Stunden (t_{dom}) wird das Maximum des Mikrosphärendurchgangs erreicht. Für die mediane Durchgangszeit (t_{50}) konnten 67,5 Stunden ermittelt werden, so dass sich mittlere Strömungsgeschwindigkeiten, bei einer Fließstrecke von 70 m, von 0,02 m/min errechneten. Alle ermittelten Geschwindigkeiten liegen in einem Bereich von

$9 \cdot 10^{-3}$ m/min bei einer Standartabweichung von 0,003 m/min. Grund für diese geringen Geschwindigkeitsunterschiede ist die Steilheit der Durchgangskurve (KÄSS 1998).

Für die longituduale Dispersivität (λ_L) errechnete sich ein Wert von 0,92 m. Mit der Software Tracy95 (Modelltyp 1, Standartisierung 1D) sind 0,68 m für die longituduale Dispersivität ermittelt worden. Damit liegt der errechnete Wert 0,24 m über der modellierten Dispersivität. Tracy95 ist für Poren- und Grundwasserleiter entwickelt worden und lässt sich nur bedingt für die hier beschriebenen Strömungsverhältnisse anwenden. In gefluteten Bergwerken handelt es sich hauptsächlich um eine Strömung in Röhren, wobei der Transport durch Advektion und weniger durch Dispersion erfolgt. Trotz dieser Diskrepanzen zur Software Tracy95 ist die ermittelte Größe plausibel. Es zeigt sich eine bedingte Anwendbarkeit der Software für vorliegende Verhältnisse, was auch HASCHE (2001) schon bestätigte.

Tab.14: Ergebnisse aus den Tracerdurchgangskurven für die Mikrosphären der Farbe "green".

Parameter	Einheit	Ermittelte Werte	Mit Tracy95 ermittelte Werte
t_{\max}	[h]	$42,00 \pm 6$	
t_{dom}	[h]	$54,00 \pm 6$	54,00
t_a	[h]	$57,75 \pm 6$	
t_{50}	[h]	$61,50 \pm 6$	61,91
t_{16}	[h]	$44,00 \pm 6$	
t_{84}	[h]	$71,00 \pm 6$	
v_{\max}	[m/min]	0,024	
v_{dom}	[m/min]	0,019	
v_a	[m/min]	0,018	
v_{50}	[m/min]	0,017	0,019
v_{16}	[m/min]	0,023	
v_{84}	[m/min]	0,015	
D_L	[m ² /min]	0,016	0,013
λ_L	[m]	0,92	0,68

6.5 Uranin

Von den beiden mit Uranin durchgeführten Tracertests hatte nur der vom Februar 2002 Erfolg. Das in 10 m Teufe eingebrachte Uranin konnte an der Oberfläche des Blindschachts sehr gut nachgewiesen werden. Wie die normalisierte Durchgangskurve (Abb.24) zeigt, ist der Verlauf ähnlich dem des Mikrosphärendurchgangs. Es ist ein schneller Einsatz mit einem sehr steilen Anstieg zu beobachten und ein allmählicherer aber noch recht steiler Abfall der Kurve. Das Maximum der Uraninkonzentration beträgt 293 µg/L bei einem noch aus dem August 2001

stammenden Hintergrundwert von $3\mu\text{g}/\text{L}$. Die Wiederfindungsrate berechnet sich aus folgenden Abflusswerten:

Gepumpte Wassermenge (Fluorimeter) im Mittel:	0,726 L/min	(1 m ³ /Tag)
Ausgeflossene Wassermenge (Wehr) im Mittel:	31,5 L/min	(43—48 m ³ /Tag)
Verhältnis:		39,69

Unter Verwendung des Faktors von 39,96 ergibt sich eine Wiederfindungsrate von 2,6 %, dies entspricht 1,3 g Uranin. Wie die Durchgangskurve zeigt, steigt der Uraningehalt des Grubenwassers ab dem 20.02. wieder geringfügig an. Dies ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass nach dem Öffnen der LydiA ein Teil der dichtenen Uraninlösung im Schacht absinkt und danach mit dem aufströmenden Grubenwasser ausgetragen wird (Wolkersdorfer et. al.). KNAUTHE (voraussichtlich 2002) untersucht derzeit in Laborversuchen die genaueren Ursachen für die geringe Wiederfindungsrate. Die gemessenen Uraninkonzentrationen liegen, bis auf die Blindwerte, über der Nachweigrenze von $7\mu\text{g}/\text{L}$.

Die Auswertung der Durchgangskurve erfolgte mit der Software Microsoft Excel 6.0 und mit Tracy95 (Anl. C 1.2). Um den Dispersionskoeffizienten (D_L) und die longitudale Dispersivität (λ_L) zu berechnen, wurden die Gleichungen 14 und 15 verwendet. Zur Bestimmung der Durchgangszeiten wurde analog der Mikrosphärenauswertung eine normalisierte Durchgangskurve erstellt, in der die maßgeblichen Zeiten abgelesen werden konnten. In Tabelle 15 sind die ermittelten Ergebnisse der Kurven aufgeführt.

Nach 2,21 Stunden erfolgt der Tracereinsatz am Entnahmepunkt (t_{\max}), das entspricht bei einer Distanz von 10 m einer Maximalgeschwindigkeit (v_{\max}) von 0,08 m/min. Das Maximum des Tracerdurchgangs (v_{dom}) wird nach 3,34 Stunden erreicht ($v_{\text{dom}} = 0,05 \text{ m/min}$) und ein 50 %iger Tracerdurchgang (t_{50}) nach einer Zeit von 5,45 Stunden ($v_{50} = 0,03$). Aus diesen Werten lässt sich eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit (v_a) von 0,04 m/min abschätzen.

Modellierte (Modelltyp 1, Standardisierung 1 D) und errechnete Geschwindigkeiten haben eine Abweichung von 0,006 m/min, diese gute Übereinstimmung zwischen den Methoden ist unabhängig vom Modell zu bewerten. Anders verhält es sich, wie schon in Kapitel 6.3 beschrieben, mit den Werten der longitudinalen Dispersivität (λ_L). Bei der Auswertung der Uranindurchgangskurve tritt zwischen beiden Methoden eine Differenz von 0,9 m auf.

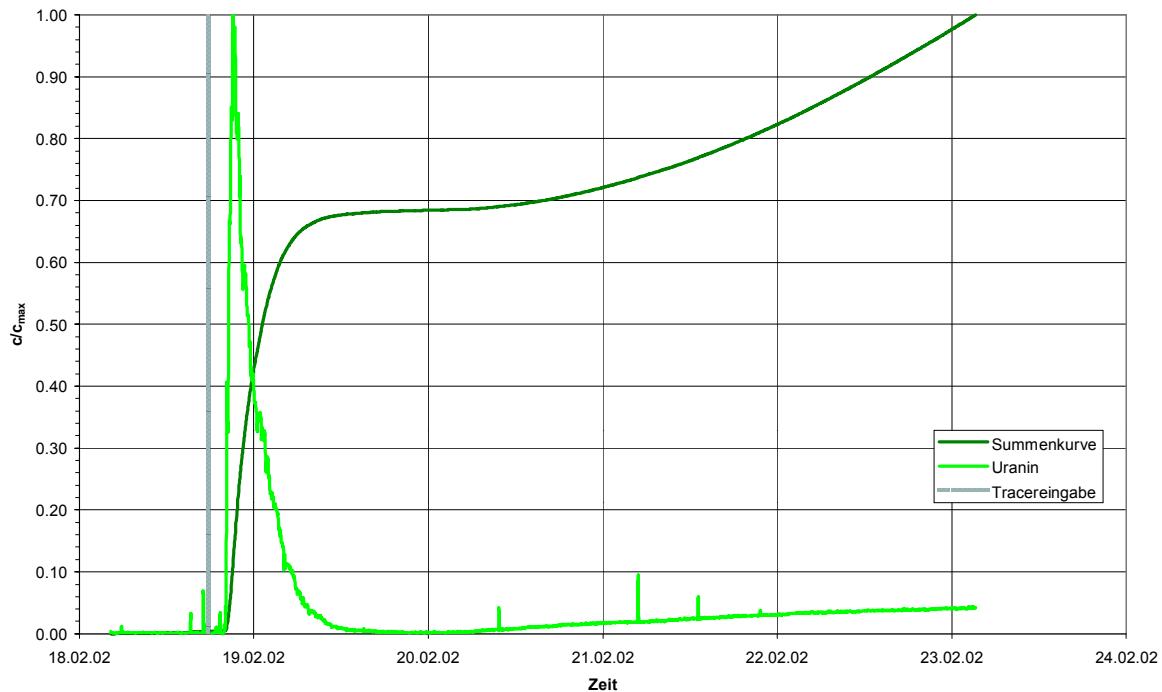


Abb. 24: Normalisierte Durchgangskurve (c/c_{\max}) des Tracertests mit Uranin im Februar 2002. Das Maximum entspricht einer Konzentration von $293 \mu\text{g}/\text{L}$, die Summenkurve 2,6 %. Vertikale Linie nach dem 19.02.: Injektion des Tracers. (aus Wolkersdorfer et. al.)

Das im August 2001 in 55 m Teufe eingebrachte Uranin konnte an der Oberfläche des Blindschachtes nicht nachgewiesen werden, da sich die Tracersonde nur unzureichend geöffnet hatte. Eine sich an den Tracerversuch anschließende Teufenbeprobung erbrachte im Bereich zwischen 40 und 80 m Teufe Uraninkonzentrationen zwischen 200 und 600 $\mu\text{g}/\text{L}$. Dabei zeigte sich, dass das Uranin annähernd symmetrisch um die Injektionsstelle verteilt ist (Anh. C 2.2).

Tab.15: Ergebnisse aus den Tracerdurchgangskurven für Uranin (Februar 2002).

Parameter	Einheit	Ermittelte Werte	Mit Tracy95 ermittelte Werte
t_{\max}	[h]	2,34	
t_{dom}	[h]	3,34	3,34
t_a	[h]	4,44	
t_{50}	[h]	5,54	4,51
t_{16}	[h]	2,41	
t_{84}	[h]	9,94	
v_{\max}	[m/min]	0,078	
v_{dom}	[m/min]	0,049	
v_a	[m/min]	0,037	
v_{50}	[m/min]	0,030	0,036
v_{16}	[m/min]	0,069	
v_{84}	[m/min]	0,016	
D_L	[m^2/min]	0,07	0,05
λ_L	[m]	2,3	1,4

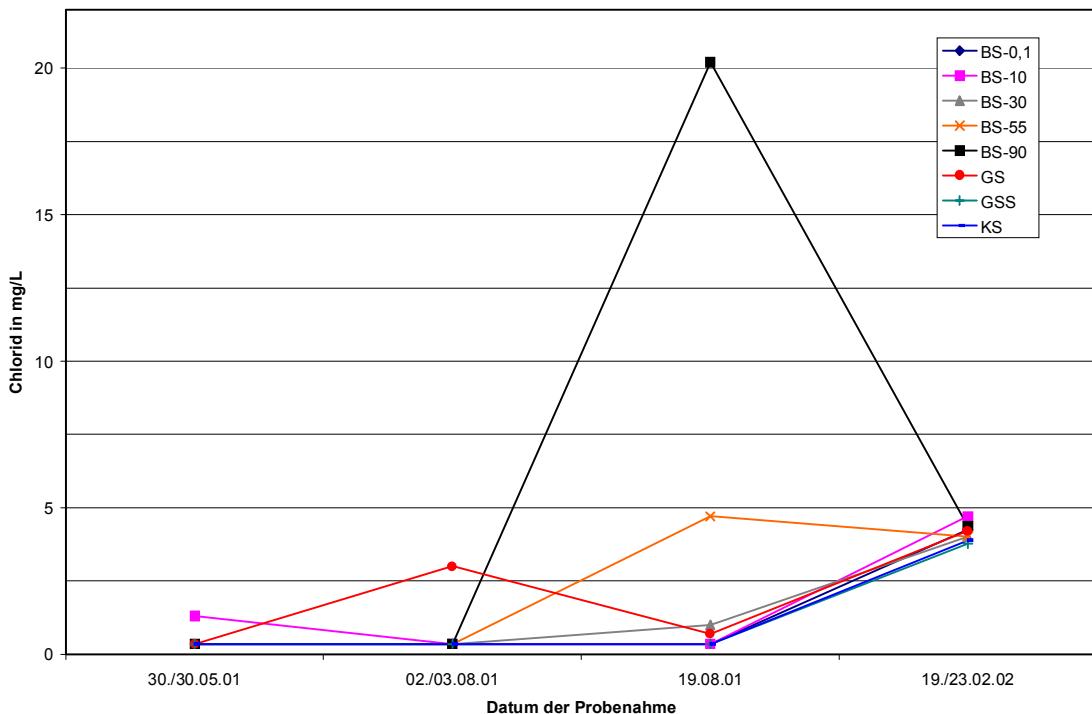


Abb.25: Verlauf der Chlorid-Konzentration bei Messstellen mit direktem Zugang zum gefluteten Bereich des Georgi Unterbau.

6.6 Salz

Die 200 kg Steinsalz, welche im August 2001 in den Blindschacht eingegeben wurden, konnten an der Schachtoberfläche nicht nachgewiesen werden. Aufgrund der hohen Dichte (ca. 1.18 g/l) der Sohle ist diese über den Blindschacht abgesunken und sammelte sich in dessen tieferen Bereichen. Nachgewiesen konnte die Steinsalzlösung mittels Leitfähigkeitsmesssonde (Kapitel 6.2) und wasserchemischen Analysen. Durch die regelmäßig genommenen teufenabhängigen Wasserproben wurde eine Erhöhung des Natrium- und Chloridgehaltes im Blindschacht nachgewiesen (Tab. 12).

Vor der Messung am 19.08.2001 lagen die Natrium-Konzentrationen im Blindschacht zwischen 0,61 und 1,4 mg/L und die Chloridkonzentrationen zwischen <0,7 und 1,3 mg /L. Nach der Zugabe der Sohle erhöhten sich die Konzentrationen in 90 m Teufe um 14,5 mg/L Nitrat und 19,5 mg/L Chlorid. Eine abschließende Messung am 23.02.2002 zeigt eine gleichmäßige Konzentration der Chlorid- und Natrium-Ionen über den gesamten Teufenbereich. Die mittlere Natriumkonzentration liegt bei 3,74 mg/l und die des Chlorid bei 3,74 mg/L, wobei die Standardabweichung jeweils 0,25 mg/L beträgt.

An den Messstellen mit direktem Zugang zum Grubenwasser des Georgi Unterbau sind bei der Februar-Messung ebenfalls gestiegene Natrium- und Chlorid-Konzentrationen festzustellen. Die Werte dieser drei Lokalitäten gleichen sich denen des Blindschachtes an. Abbildung 25 verdeutlicht den Konzentrationsverlauf anhand des Chlorid und zeigt einen Bereich von 3,8—4,7 mg/L, in dem alle Messstellen bei der Abschlussbeprobung liegen.

6.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Bei den Tracerversuchen im August 2001 und Februar 2002 kamen drei Typen von Tracern zum Einsatz, von denen sich im ersten Versuch die Mikrosphären der Farbe "green" und beim zweiten Versuch das Uranin als erfolgreich erwiesen.

Die Markierungsversuche erbrachten mittlere Strömungsgeschwindigkeiten für den oberen Bereich des Blindschachtes von 0,03 m/min im Mittel. Berechnungen im Vorfeld der Versuche ergaben auf Basis eines Piston-Flow-Modells eine Geschwindigkeit von 0,04 m/min. Dieser 1 Zehnerpotenz ausmachende Unterschied lässt sich mit der großen Wandrauhigkeit eines gezimmerten Schachtes mit zwei voneinander getrennten Trümmern erklären (WOLKERSDORFER et. al. 2002). Im oberen Bereich des Schachtes sind die Trümer durch eine Bretterwand voneinander getrennt, der dadurch entstehende kleinere Querschnitt bedingt auch die höhere Strömungsgeschwindigkeit.

Tracer, die unterhalb der 20-m-Sohle eingebracht wurden, konnten an der Schachtoberfläche nicht nachgewiesen werden. Aus der Uraninverteilung in 55 m Teufe lässt sich der Schluss ziehen, dass der Stofftransport unterhalb der 40 m Sohle rein diffusiv erfolgt. Würde in diesem Bereich eine hydraulische Verbindung zu anderen Bereichen existieren, müsste die Uraninverteilung nach oben oder unten verschoben sein. Ebenso ist die Konzentrationsverteilung der Natrium- und Chlorid-Ionen ein Indiz für diese Tatsache. Im Zeitraum zwischen dem 19.08.2001 und dem 23.02.2002 verringerte sich die Konzentration im Bereich von 90 m Teufe, während sie sich im Schacht und den Messstellen Großer See (GS), Kleiner See (KS) und in dem vom Tracertest unbeachteten Großen See Süd (GSS) erhöhte. Dabei stellte sich an allen Messstellen, die mit dem Grubenwasser in Verbindung stehen, eine in etwa gleichmäßige Konzentration ein.

Mit dem Tracertest konnte eine Verbindung des Blindschachtes mit dem Großen See und dem Kleinen See nachgewiesen werden. Die Verbindung des Großen See zum Blindschacht erfolgt vorrangig über die 20 m Sohle. Ein Vergleich mit Tracertests in anderen Bergwerken (Niederschlema/Alberoda, Straßberg/Harz) zeigt, dass keine konvektive Durchmischung des Schachtkörpers vorhanden ist (WOLKERSDORFER et. al. 2002). Eine fehlende Verbindung zu anderen

Schächten verhindert eine weitgreifende Konvektion und damit eine Durchmischung des gefluteten Bereichs. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Bereich zwischen der 40 und der 70 m Sohle als hydraulische Barriere wirkt.

7 Hydrogeochemische Untersuchungen

7.1 Einführung

In diesem Kapitel sollen die hydrogeochemischen Parameter näher beschrieben werden. Dazu wurden 52 Messstellen (23 Messstellen BRX und 29 Messstellen SWZ) beprobt und die wasserchemischen Analysen ausgewertet. Die Proben mit der Bezeichnung SWZ-2706-MB 01—19 haben die Montanwerke Brixlegg zur Verfügung gestellt. In der Anlage E 1.1 sind die Messstellen tabellarisch aufgelistet. Abbildungen der Messstellen des Untersuchungsgebiet Großkogel befinden sich in Anlage E 1.2. Mit dem GIS-Programm Arc View 3.1 werden alle Messstellen auf topographischen Karten und Grubenplänen dargestellt (Anlage E 1.1, E 2.1, E 3.1, E 4.1).

Die Probenahme erfolgte an jeder Messstelle nach der in Kapitel 4.6.7 beschriebenen Vorgehensweise. Aus gerätetechnischen Gründen wurde die Eisenbestimmung nicht vor Ort sondern im Georgi Unterbau durchgeführt.

Alle wasserchemischen Analysen sowie die vor-Ort-Parameter sind im Anhang E 3 tabellarisch aufgeführt. Hierbei sind die Datensätze von Großkogel (E 3.1) und Schwaz (E 3.2) getrennt dargestellt.

Mittels chemisch-thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen wurde untersucht, welche Phasen im Gleichgewicht vorliegen und somit für die Kontrolle der Hauptbestandteile des Wassers verantwortlich sind. Dabei erfolgte die Betrachtung wiederum getrennt nach den Gebieten Schwaz und St. Gertraudi.

7.2 Statistische Auswertung

Eine statistische Auswertung erfolgte hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung. Auf eine Ausreißerkontrolle wurde verzichtet, da (bis auf den Blindschacht) nicht genügend Analysen pro Messstelle zur Verfügung standen. Für einen Ausreisertest nach DIXON (DIN 2257) werden mindestens 5 Stichproben benötigt. Mit $n \geq 4$ Stichproben kann ein Test laut Bartsch (1997) und mit $n \geq 3$ Stichproben der SHAPIRO-WILKS-Test (W-Test), wie ihn KAISER & MÜHLBAUER (1983) beschreiben, durchgeführt werden. Da somit ein SHAPIRO-WILKS-Test nur bei 5 Messstellen durchzuführen wäre, hat sich der Bearbeiter auf eine Begutachtung der Analysen beschränkt.

Die Mittelwerte (Anl. E 2.1 und E 2.2) der untersuchten Wasserparameter errechneten sich für jede Messstelle nach Gleichung 16.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [16]$$

Dabei ist zu bedenken, dass der Mittelwert ausreißerempfindlich ist und bei 90% der Messstellen aus nur zwei Stichproben gebildet wurde. Es ist also theoretisch möglich, dass es sich bei diesen Stichproben um einen oder sogar zwei Ausreißer handelt.

Gleichermaßen gilt für die Standardabweichung. Anhand dieser lässt sich erkennen, wie stark Messwerte um einen Mittelwert streuen (DAVIS 1986). In Anlage E 2.1 und E 2.2 sind nur dann Standardabweichungen angegeben, wenn die Anzahl der Messwerte $n \geq 3$ ist, da die Abweichung bei $n = 2$ der Hälfte des Betrages aus der Differenz beider Messwerte entspricht. Berechnet wurde die Standardabweichung nach Gleichung 17.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [17]$$

7.3 Vor-Ort-Parameter

7.3.1 Wassertemperatur

7.3.1.1 Großkogel

Die Messungen der Wassertemperatur (Abb. 26) ergaben im Georgi Unterbau einen Mittelwert im August 2001 von 8,1 °C, die Februarmessung erbrachte im Mittelwert 0,1 K weniger. Aufgrund einer Messgenauigkeit von 0,1 K kann die Temperatur als konstant angesehen werden.

Im Bereich der Oberflächenwässer spiegelt sich der Einfluss der Außentemperaturverhältnisse deutlich in einer Temperaturverringerung im Februar wieder. Der Mittelwert im August betrug 10,7 °C hingegen der vom Februar 6,9 °C. Diese Temperaturverringerung (3,8 K) ist allerdings nicht bei allen Messstellen so deutlich zu erkennen, so beträgt die Differenz zwischen beiden Messungen an der Messstelle KKQ nur 0,2 K (Februar: 7,5 °C; August: 7,7 °C) und an der Messstelle FQE 0,7 K (Feb.: 7,1 °C; Aug.: 7,8 °C). Somit lässt sich auf eine längere Verweildauer des Wassers im Gebirge an diesen Punkten schließen. Alle anderen übertägigen Messstellen sind außentemperaturabhängig. Bei dem Punkt AHQ kann hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit keine Aussage getroffen werden, da der Brunnen durch Verbruch nicht zugänglich war und die Wasserproben im ca. 500 m entfernten Bauernhof genommen wurden.

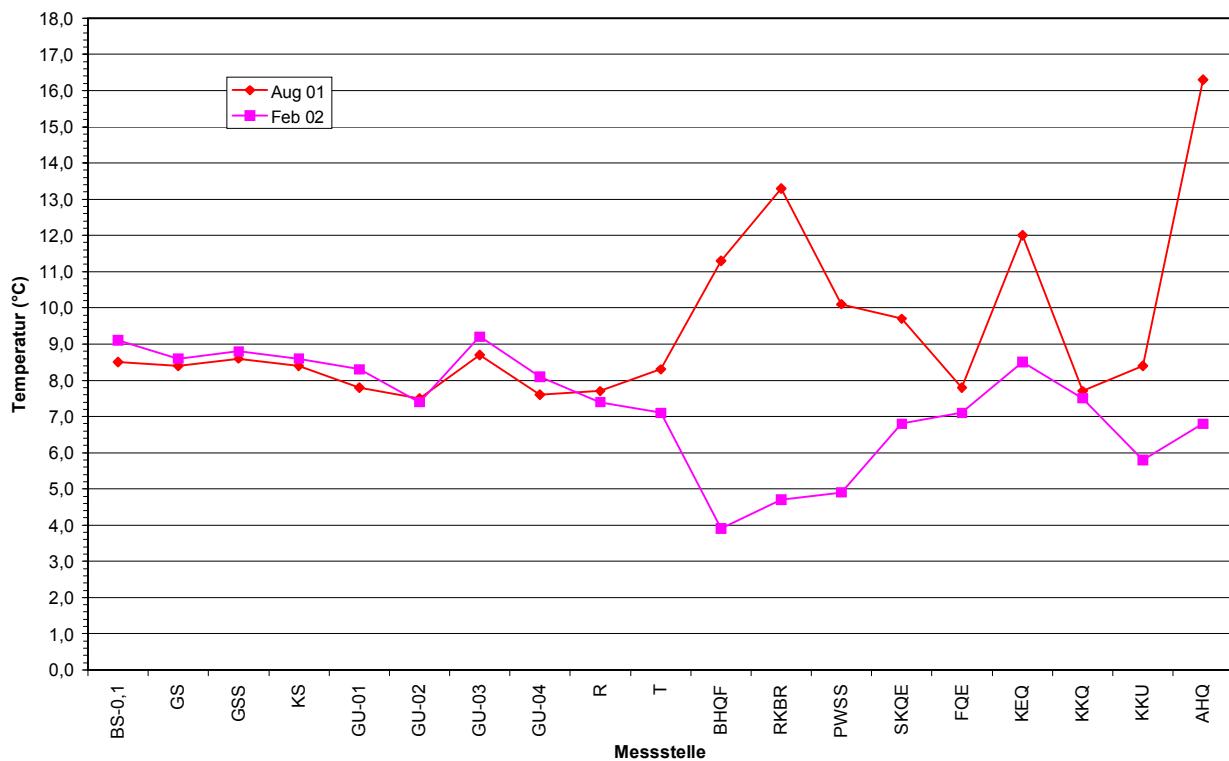


Abb. 26: Wassertemperaturen im Bereich Großkogel im August 2001 und Februar 2002.

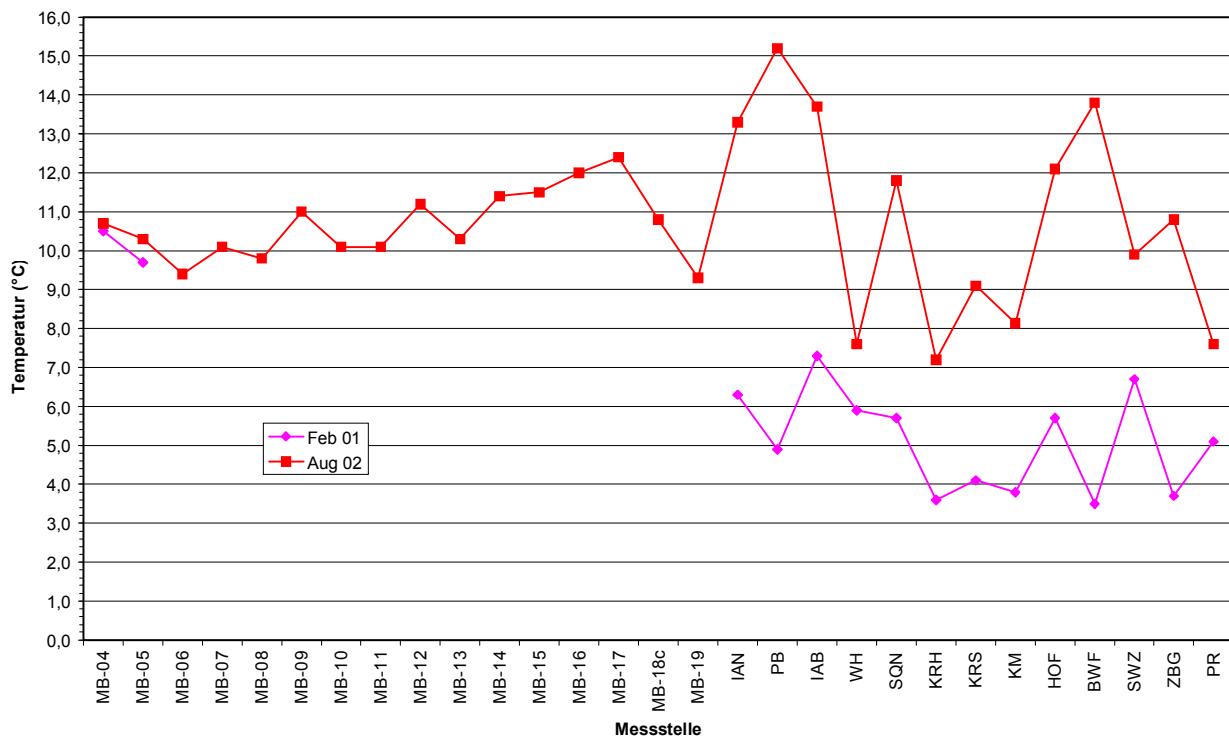


Abb.27: Wassertemperaturen im Bereich Schwaz im August 2001 und Februar 2002.

7.3.1.2 Schwaz

Die Temperaturmessungen im August 2001 (Abb. 27) ergaben für den untertägigen Bereich von Schwaz Temperaturen von 10,8 °C im Mittel. An den Messstellen MB-16 und MB-17 wurden dabei die höchsten Temperaturen mit 12 °C und 12,4 °C gemessen. Dies lässt die Vermutung zu, dass das Wasser an diesen Punkten sehr schnell von der Oberfläche zuströmt. Ein Vergleich zum Winterhalbjahr ist nicht möglich, da im Februar keine Messungen im Bereich des Wilhelm Erbstollens durchgeführt wurden.

Bei den Messungen im übertägigen Bereich liegen die Temperaturen im August 2001 mit einem Mittelwert von 10,8 °C 3,7 K höher als die vom Februar 2001, was die Außentemperaturverhältnisse widerspiegelt. Bei keiner der untersuchten Messstellen ist eine Unabhängigkeit von den Außentemperaturen zu erkennen. Die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Probenahmepunkten im Februar von 3,2 K sind unter anderem mit dem Gefälle der Außentemperatur zwischen den verschiedenen Höhenlagen am Untersuchungstag zu erklären. Während im Inntal Temperaturen von ca. 5-6 °C gemessen wurden, herrschten in den oberen Bereichen ca. -5°C (KRH, KRS, KM, ZBG). An der Messstelle BWF wird die geringe Temperatur (3,8 °C) durch Schmelzwasser hervorgerufen, das im Bucher Bach dem Inn zufließt.

7.3.2 pH-Wert

7.3.2.1 Großkogel

Während des Untersuchungszeitraumes befand sich der pH-Wert im untertägigen sowie übertägigen Bereich von Großkogel im Pufferbereich des Kalzits und Dolomits (Abb. 28). Der Mittelwert beträgt 7,9, wobei die Maxima mit 8,4 bei den Punkten GU-02, R, KKU und KKQ lagen. Da die geringsten pH-Werte 7,6 betragen, befinden sich alle gemessenen Werte in einem Bereich von 0,8.

7.3.2.2 Schwaz

Auch im Untersuchungsgebiet Schwaz (Abb.: 29) befand sich der pH-Wert im Bereich der Kalzit- und Dolomit-Pufferung. Eine signifikante Unterscheidung des untertägigen zum übertägigen Bereich ist nicht zu erkennen. Für den Durchschnitt ist ein pH-Wert von 8,0 ermittelt worden, dabei liegen die Messungen im Wilhelm Erbstollen 0,1 Einheiten unter den im übertägigen Einzugsbereich durchgeführten Messungen. Der an der Messstelle MB-19 gemessene pH-Wert (7,26) ist der für das Trinkwasser der Stadt Schwaz, es handelt sich also um aufbereitetes Wasser.

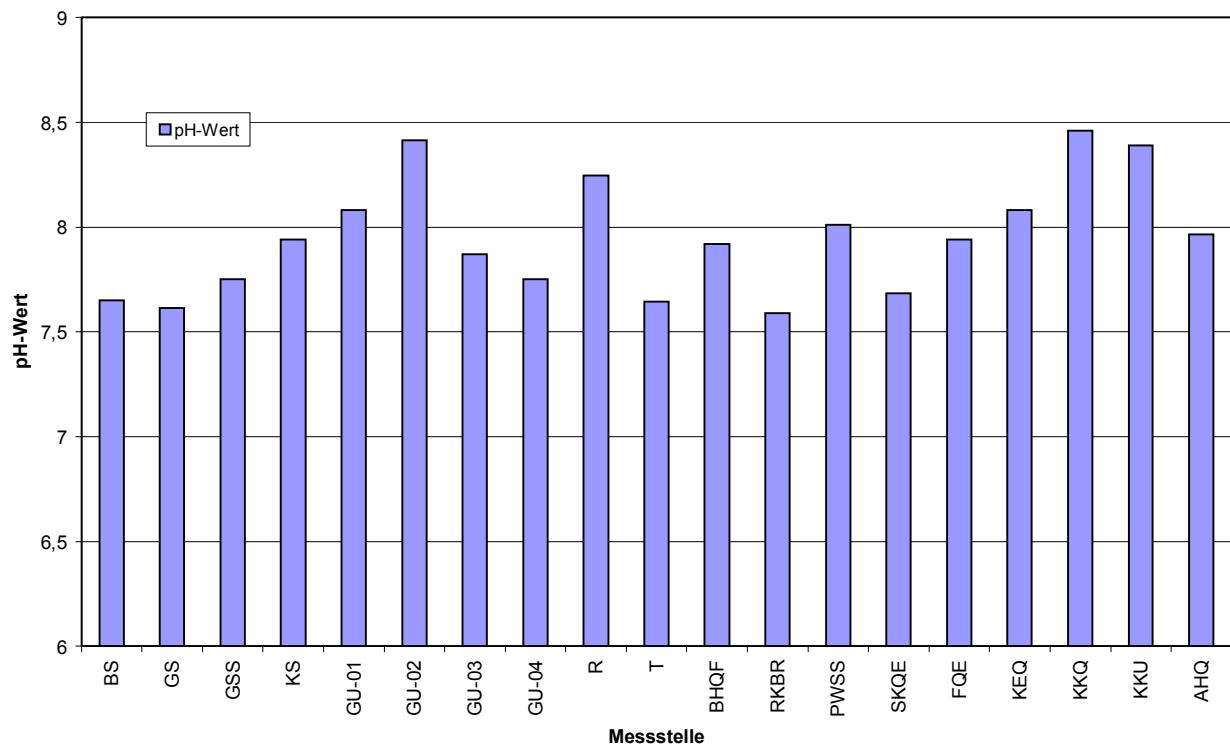


Abb. 28: Verteilung des pH-Wertes im Bereich Großkogel.

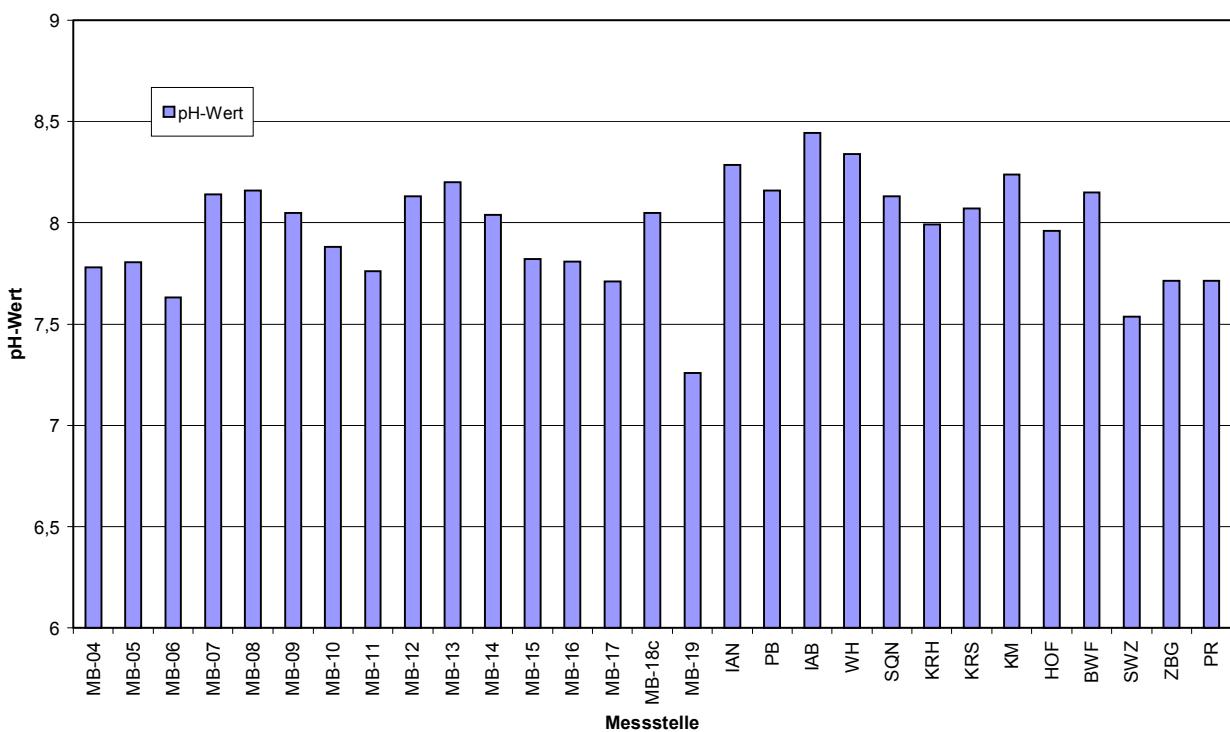


Abb. 29: Verteilung des pH-Wertes im Bereich Schwaz.

7.3.3 Redoxpotential

Redox-Messungen stellen einen der schwierigsten vor-Ort-Parameter dar, dessen Genauigkeit selbst bei ausreichender Wartezeit nur ± 10 mV beträgt. Besonders bei Grubenwässern müsste korrekterweise eine Einstellzeit von bis zu einer Stunde eingehalten werden (WOLKERSDORFER 2001a). Da mit Einstellzeiten von 5 bis 10 Minuten gearbeitet wurde, ergibt sich ein Abweichung aus Messfehler und "Einstellungsfehler" von ± 20 mV.

7.3.3.1 Großkogel

Die Redoxpotentiale im Bereich Großkogel liegen im oxidierenden Milieu. Im Mittel betragen die Potentiale 430 ± 20 mV (410...450 mV). Mit 446 ± 20 mV (426...466 mV) liegt das untertägige Potential 32 mV höher als das Potential von Übertage (414 ± 20 mV; 396...434 mV). Unter Einbeziehung des Fehlers überschneiden sich die Bereiche und es ist ein in etwa konstantes Redox-Potential vorhanden. Signifikant kleiner ist der an der Messstelle GU-01 ermittelte Wert von 354 ± 20 mV (334...364 mV). Erklärbar ist dies durch die ungünstigen Bedingungen für eine Probenahme, das Wasser strömt hier entlang der Grünwies-Störung sehr turbulent in den Stollen des Georgi Unterbau.

7.3.3.2 Schwaz

Im oxidierenden Milieu liegen auch die Redoxpotentiale des Bereiches Schwaz. Das Mittel aller gemessenen Werte beträgt 446 ± 20 mV (426...466 mV), dabei liegt der untertägige Bereich um 23 mV höher als der übertägige. Bei einem Fehler von ± 20 mV hebt sich diese Differenz allerdings wieder auf und es können in etwa konstante Verhältnisse verzeichnet werden.

7.3.4 Sauerstoffgehalt

Mit dem Sauerstoffgehalt lassen sich bedingt Aussagen über die Art des Fließens, sowie das Alter von Wässern machen. Bei turbulenter Strömung durch teilweise luftgefüllte Klüfte nimmt der Sauerstoffgehalt zu. Mit zunehmender Verweildauer und geringen Fließgeschwindigkeiten bzw. laminarem Fließen nimmt er ab.

7.3.4.1 Großkogel

Das Wasser im Grubengebäude des Georgi Unterbau weist Sauerstoffgehalte zwischen 2,8 und 14,6 mg/L auf. Dabei liegen die Gehalte an den Messstellen BS, GS, KS und GSS unter 5mg/L bzw unter 50 % Sättigung. Es handelt sich hierbei um Wässer mit geringen Fließgeschwindigkeiten und laminarem Fließen. An den Probenahmepunkten GU-01 (11,3 mg/L, 104 %) und GU-04 (11,8 mg/L, 109 %) herrscht eine turbulente Strömung vor, was sich auch im Sauerstoffgehalt und

in der Sauerstoffsättigung widerspiegelt. Im Mittel wurden unterteage 6,7 mg/L (65 %) gemessen. Die Werte der Sauerstoffkonzentration liegen im überirdischen Einzugsgebiet naturgemäß höher. Die geringsten Konzentrationen weisen die Messstellen AHQ (8,6 mg/L, 87 %) und RKBR (8,2 mg/L, 79 %) auf. Sauerstoffkonzentrationen von über 10 mg/L liegen an den Punkten FQE (10,9 mg/L), KEQ (11,3 mg/L), KKU (9,8 mg/L) und SKQE (11,0 mg/L) vor, wobei diese leicht übersättigt sind. Im Oberflächenbereich von Großkogel sind Mittelwerte von 9,8 mg/L Sauerstoffsättigung zu verzeichnen.

7.3.4.2 Schwaz

Im untertägigen Bereich haben die Messungen der Sauerstoffkonzentrationen Werte zwischen 3,4 und 9,7 mg/L (39—96 %) erbracht. Dies entspricht im Mittel 6,5 mg /L mit einer Sauerstoffsättigung von 68 %. Die oberirdischen Messstellen zeigen eine deutlich größere Sättigung an Sauerstoff mit durchschnittlich 122 % im August 2001 und 87 % im Februar 2002. Erklärbar ist diese Differenz mit den verschiedenen Jahreszeiten und den daraus resultierenden Klimabedingungen. Im Durchschnitt sind Werte von 10,3 mg/L (105 %) ermittelt worden

7.3.5 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrischen Leitfähigkeit des Wassers ist direkt proportional zur Menge der darin gelösten Stoffe. Mit dieser Größe lässt sich im Zusammenhang mit der chemischen Zusammensetzung auf den Gesteinseinfluss der Wässer rückschließen (HÜTTER 1994). Die elektrische Leitfähigkeit steht in direktem Zusammenhang mit der Gesamtmineralisation.

7.3.5.1 Großkogel

Die Leitfähigkeitswerte im Georgi Unterbau zeigen nur geringe Änderungen beim Vergleich der beiden Messungen. Dabei weisen die der Messstellen BS, KS, GS und GSS mit Werten zwischen 419 und 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$ höhere Werte auf als die Messtellen mit oberflächlichem Zustrom zum gefluteten Bereich (GU-01—GU-04: 311—378 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Erklärbar ist dies mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten bzw. kürzeren Verweildauern im dolomitischen Gestein.

Im oberirdischen Einzugsbereich sind signifikante Unterschiede an den Messstellen, RKBR (Aug.: 395 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Feb.: 319 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und PWSS (Aug.: 323 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Feb.: 366 $\mu\text{S}/\text{cm}$) aufgetreten. Ein Grund hierfür könnte der Zutritt von Schmelzwasser (Februar) an dem Punkt RKBR sein, da es sich dabei größtenteils um Oberflächenwasser handelt. Die gegenläufige Tendenz an Messstelle PWSS kann hingegen nicht erklärt werden, zumal dort beste Bedingungen für den Zutritt von

Oberflächenwasser (Schmelzwasser) vorliegen (Anl. E 1.2). Alle anderen Probenahmepunkte verzeichnen konstante Werte im Vergleich von August- und Februarmessung. Besonders auffallend ist dabei die geringe Leitfähigkeit beim Punkt AHQ mit einem Mittelwert von 221 µS/cm, was auf ein gering mineralisiertes und schnell fließendes Oberflächenwasser schließen lässt. Ein Vergleich von Messstellen im Wilschönauer Schiefer (SKQE, FQE) und Schwazer Dolomit erbrachte keine signifikanten Unterschiede.

7.3.5.2 Schwaz

Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit weisen im Bereich des Wilhelm Erbstollen signifikante Unterschiede auf. An den Messstellen MB-09 und MB-12 tritt dabei ein Maximum von 1087 µS/cm bzw. 1107 µS/cm auf. Beide Wässer sind aufgrund dieser hohen Leitfähigkeit typische "Schieferwässer" (WEBER & SCHNEIDER 2000). Aus einer Zutrittsstelle im Buntsandstein wurde die Probe MB-06 entnommen, sie zeigt dabei eine insignifikant höhere Leitfähigkeit von 453 µS/cm. Alle anderen Wasserproben sind vorrangig vom Dolomit beeinflusst und haben einen mittleren Leitfähigkeitswert 419 µS/cm. Dabei tritt ein erheblicher Unterschied zwischen dem Maximum an Messstelle MB-13 (525 µS/cm) und dem Minimum bei Messstelle MB-10 (291 µS/cm) auf. Ein Vergleich mit dem Gutachten von WEBER & SCHNEIDER (2000) zeigt im Bereich des Probenahmepunktes MB-13 ebenfalls einen recht hohen Wert (dort Messstelle 17: 619 µS/cm). Ebenso verhält es sich im erwähnten Gutachten an der Messstelle MB-14 (dort: Messstelle 20: 303 µS/cm).

Ein sehr differenzierte Bild bietet auch der übertägige Bereich des Wilhelm Erbstollens. Die geringsten Leitfähigkeitswerte wurden an der Messstelle PR (104 µS/cm, phyllitischer Schutt) sowie an den Messstellen MB-19 (104 µS/cm, Trinkwasserversorgung Schwaz) und ZBG (104 µS/cm, phyllitische Gneise) gemessen. Die Stadtwerke Schwaz beziehen aus dem Bereich von ZBG und SWZ (321 µS/cm, Grenze Tonstein pyllitische Gneise) einen Teil ihres Trinkwassers und verteilen dieses in Abhängigkeit vom Stadtviertel (STADTWERKE SCHWAZ). Im Anstrom des Inn sind im Uferbereich 221 µS/cm gemessen worden, durch den Zufluss von PB (431 µS/cm) erhöht sich die Leitfähigkeit im Bereich des Abstroms um durchschnittlich 80 µS/cm. Da diese Messung im mittelbaren Einflussbereich des Zuflusses an Messstelle PB erfolgte, kann davon ausgegangen werden, dass sich im weiteren Verlauf des Inn der ursprüngliche Wert wieder einstellt. Alle anderen Proben lagen im Bereich von 238 µS/cm (KRS) und 464 µS/cm (HOF) bei einem Mittelwert von 322 µS/cm.

7.4 Wasserhärte

Für die Angabe der Gesamt- und Karbonathärte sind alle Werte in Äquivalenteinheiten umgerechnet worden. Um ein Wasser hinsichtlich seiner Härte zu qualifizieren, werden Härtestufen nach KLUT-OLSZEWSKI verwandt (HÖLTING 1992, Tab.16). Die Angabe der Härte in °dH ist zwar nicht mehr üblich, soll aber an dieser Stelle zum Vergleich trotzdem erfolgen.

Tab. 16: Härtestufen nach KLUT-OLSZEWSKI aus HÖLTING (1992)

Härtestufe	Gesamthärte in mmol(eq)/L	Gesamthärte in °dH
sehr weich	< 1,43	< 4
weich	1,43...2,86	4...8
mittelhart	2,86...4,28	8...12
ziemlich hart	4,28...6,43	12...18
hart	6,43...10,71	18...30
sehr hart	> 10,71	> 30

7.4.1 Großkogel

Im gesamten Untersuchungsbereich sind keine signifikanten Veränderungen in der Härte zwischen den Beprobungen zu erkennen. Das Maximum der Gesamthärte im Georgi Unterbau beträgt 6,3 mmol(eq)/L (GU-04), bei einem Mittelwert von 5,3 mmol(eq)/L und einem Minimum an der Messstelle GU-03 von 4,5 mmol(eq)/L. Eine Berechnung der Karbonathärte ergab einen Wert von 3,6 mmol(eq)/L.

Der übertägige Einzugsbereich liegt bei der Gesamthärte von 4,2 mmol(eq)/L (FQE) bis 6,0 mmol(eq)/L (KKU), dabei beträgt das Mittel aller Werte 5,2 mmol(eq)/L. Eine signifikante Abweichung stellt die Messstelle AHQ mit einer Härte von 2,6 mmol(eq)/L dar. Im Bezug auf die Karbonathärte (Hydrogenkarbonathärte) ist am Punkt KKU der höchste Wert mit 4,5 mmol(eq)/L und am Punkt FQE der niedrigste Wert mit 2,4 mmol(eq)/L gemessen worden (Mittelwert: 3,53 mmol(eq)/L).

Eine Qualifikation nach Tabelle 16 ergibt für den Bereich Großkogel ein ziemlich hartes Wasser. Einige Messstelle, die dem nicht entspricht, ist die AHQ (Wildschönauer Schiefer).

7.4.2 Schwaz

Eine andere Situation ist im Bereich des Wilhelm Erbstollen anzutreffen. Die Maximalkonzentrationen der Gesamthärte liegt hier an den Messstellen MB-09 mit 12 mmol(eq)/L und MB-12 mit 13 mmol(eq)/L signifikant höher als im restlichen Bereich (5,4 mmol(eq)/L). Bei

beiden Wässern handelt es sich um sogenannte "Schieferwässer" (WEBER & SCHNEIDER 2000). Im Bereich der Karbonathärte sind Werte zwischen 2,4 mmol(eq)/L (MB-13) und 4,5 mmol(eq)/L (MB-04) ermittelt worden (Mittelwert: 3,4).

Die Messstellen des übertägigen Einzugsbereiches haben eine Gesamthärte (GH) zwischen 3,2 mmol(eq)/L (IAN) und 6,8 mmol(eq)/L (PB), dabei befindet sich die Konzentration der Karbonathärte (KH) in einem Bereich von 1,2 (HOF) und 4,3 mmol(eq)/L (KRH). Signifikant geringere Härten haben die Wässer der Proben von PR (GH: 1,7 mmol(eq)/L, KH: 1,3 mmol(eq)/L) und ZBG (GH: 1,7 mmol(eq)/L KH: 1,3 mmol(eq)/L). Beide Messstellen sind nur unwesentlich vom anstehenden Gestein beeinflusst und befinden sich in moorigem Boden.

Ein Vergleich zur Qualifizierung der Wasserhärte zeigt für die Messstellen MB-09 und MB-12 ein sehr hartes Wasser, im Gegensatz dazu zeichnen sich die Messstellen PR und ZBG durch ein weiches Wasser aus. Alle anderen beprobten Wässer liegen im Bereich von mittelhart bis ziemlich hart.

7.5 Hauptionen

7.5.1 Einführung

Um die Ionenzusammensetzung und Konzentration der Wässer zu veranschaulichen, wurden diese graphisch in verschiedenen Diagrammen dargestellt. Unterschiede und bestimmte Eigenschaften können auf diese Art rasch und deutlich visuell zum Ausdruck gebracht werden. Zur Anwendung kamen das PIPER-, STIFF- und Kreis-Diagramm. Damit eine möglichst genaue Darstellung möglich ist, wurde eine Berechnung der Ionenbilanz durchgeführt.

7.5.2 Ionenbilanz

Für eine Auswertung der Hauptionen ist eine Berechnung des Analysefehlers mittels Ionenbilanz notwendig (Gleichung 18). Dazu werden alle Datensätze mit vollständiger Hauptionenanalyse ausgewertet. Die in die Berechnung eingebrachten Ionen sind:

- Anionen: F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-
- Kationen: Li^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}

$$F [\%] = \frac{(\Sigma \text{Kationen} - \Sigma \text{Anionen})}{0,5 \cdot (\Sigma \text{Kationen} + \Sigma \text{Anionen})} \cdot 100 \quad [18]$$

Analysenfehler $\geq 15\%$ sind (Anl. E 3.1 und E 3.2 rot unterlegt) für die weiteren Auswertungen nicht herangezogen worden. Von 128 Analysen trifft dies auf 17 zu, dies entspricht 13 %. Bei Messstellen, wo es nicht möglich war beide Analysen zu streichen wurde die mit dem kleineren Fehler verwendet. Gründe für die Analysenfehler können einerseits in einer fehlerhaften Probenahme und einer mangelnden Qualität der Analytik liegen, andererseits aber auch in der fehlenden Bestimmung von Phosphat, besonders bei dem Oberflächenwasser des Inn. Im Weiteren könnte die fehlende Berücksichtigung von Komplexen einen erhöhten Einfluss auf den Analysefehler haben (DVWK-SCHRIFT 125).

7.5.3 Darstellung im PIPER-Diagramm

Bei einem PIPER-Diagramm werden die Hauptionen als Kationen- und Anionenprozentanteile (%meq/L) in zwei Dreiecken aufgetragen. Gesamtkationen und Gesamtanionen werden jeweils als 100 % betrachtet. Die Kationen- und Anionenpositionen werden dann in ein Viereck projiziert, welches die Gesamtverhältnisse repräsentiert.

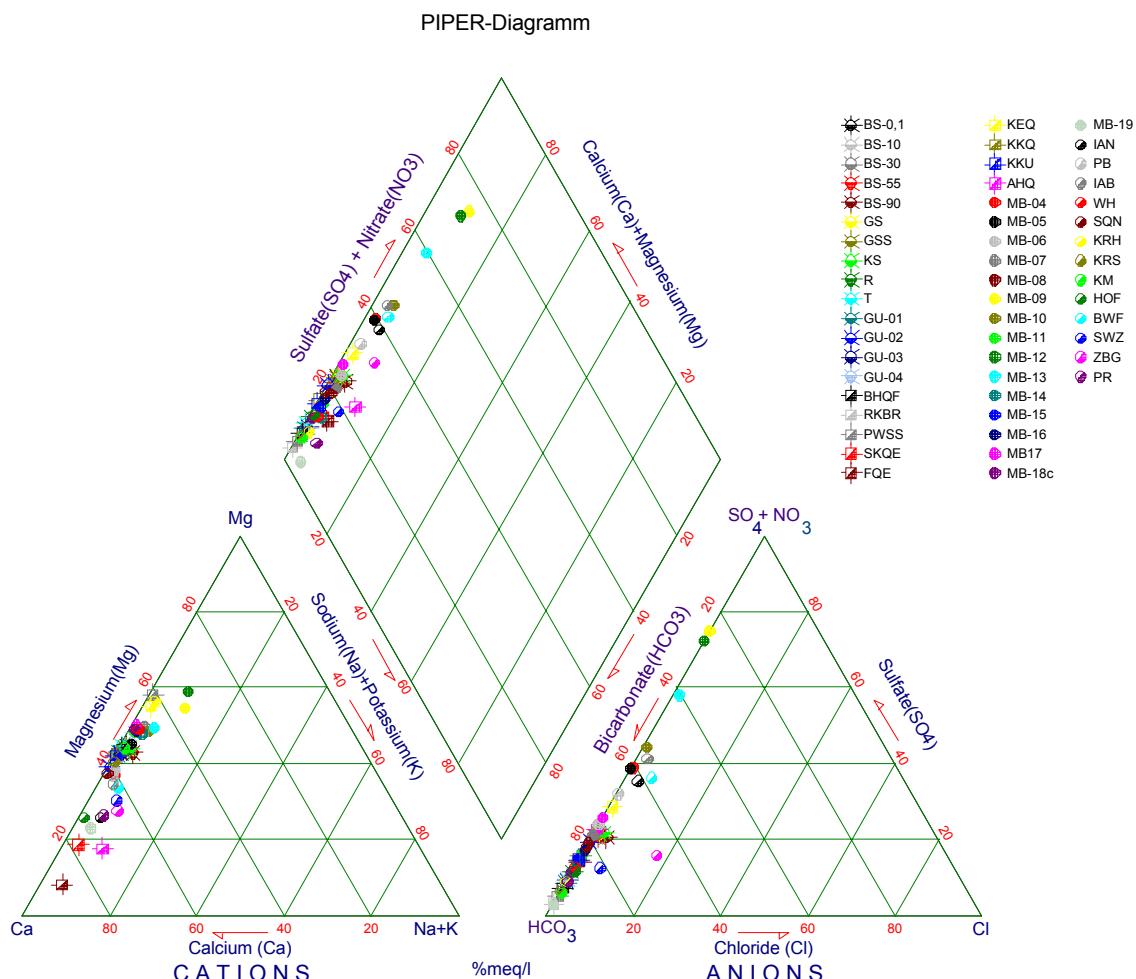


Abb. 30: PIPER-Diagramm der Wasseranalysen von 52 Messstellen aus den Untersuchungsgebieten Großkogel und Schwaz.

Kalzium und Magnesium sowie Natrium sind die häufigsten Kationen und bilden die Eckpunkte im Kationendreieck. Das meist in wesentlich geringeren Konzentrationen als Natrium vorkommende Kalium wird mit diesem zusammen geplottet. Im Anionendreieck bilden Hydrogenkarbonat, Sulfat und Chlorid die Eckpunkte, hierbei wird Nitrat zusammen mit Sulfat dargestellt (HÖLTING 1994)

In Abbildung 30 sind die Mittelwerte von 52 Messstellen im Piper-Diagramm dargestellt. Es ist der karbonatische Chemismus der Wässer mit einer Betonung der Erdalkalien deutlich ersichtlich. Lediglich die Proben der Messstellen MB-09, MB-12 und MB-13 besitzen einen höheren Sulfat- und Alkaligehalt. Der Vergleich der Erdalkalien zeigt eine leichte Tendenz Richtung Kalzium. Diese Tatsache ist nicht ganz plausibel, da es sich beim überwiegenden Teil der Wässer um dolomitisch beeinflusste handelt. Bei den Wässern mit der höchsten Kalzium-Äquivalentkonzentrationen handelt es sich um Messstellen (AHQ, SKQE, FQE) im Bereich der Wilschönauer Schiefer.

Bei einer qualitativen Charakterisierung nach Furtak & Langguth (DVWK SCHRIFT 125) handelt es sich um erdalkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch (Feld a) bis hydrogenkarbonatisch-sulfatisch (Feld b) und an zwei Messstellen sulfatisch (Feld c). Müller (1994) bezeichnet den Bereich, in dem die Mehrzahl der Punkte im Viereckdiagramm plottet, als frische normale bis frische dolomitische Wässer. Der obere Bereich würde dabei eher auf stagnierende Verhältnisse hindeuten. Dem kann an dieser Stelle nur bei MB-09 zugestimmt werden, da dort bei Probenahme eine sehr geringe Schüttung registriert wurde (kein Wert ermittelt). Am Tag der Probenahme lag an der Messstelle MB-12 hingegen eine Schüttungsmenge von 138 L/min vor.

7.5.4 Darstellung im Kreisdiagramm

Die Darstellung der Kreisdiagramme erfolgte mittels der GIS-Software Arc View 3.1. Jedes Untersuchungsgebiet (Großkogel, Schwaz) ist getrennt nach untertägigem und übertägigem Bereich dargestellt. Für die Darstellung sind folgende Ionen verwendet worden: NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Eine Einbeziehung der restlichen Haupthonen (F^- , Cl^- , Li^+ , K^+) hätte auf Grund ihrer geringen Konzentrationen kein verändertes Bild ergeben.

Kreisdiagramme zeigen immer die Verteilung der Ionen bezogen auf 100 %. Sie geben dabei keine Konzentrationen der einzelnen Parameter an, sondern nur ihr Verhältnis zueinander. In der Anlage D (D1.3: Georgi Unterbau, D 2.2: übertägiger Bereich Georgi Unterbau, D 3.4: Wilhelm Erbstollen, D 4.3: übertägiger Bereich Wilhelm Erbstollen) sind alle Karten beigelegt.

7.5.4.1 Großkogel

Die Kreisdiagramme für den Georgi Unterbau zeigen eine einheitliche Zusammensetzung der Wässer hinsichtlich der Haupthonen. Auffallend ist dennoch ein erhöhter Sulfatanteil der zufließenden Wässer (GU-02, GU-03, GU-04) im Vergleich zum gefluteten Bereich BS, KS, GS, GSS) und dem Wasser aus der Grünwies Störung (GU-01). Bei den Anionen ist das Hydrogenkarbonat dominierend und auf Seite der Kationen sind das Calcium und Magnesium.

Im überirdischen Gebiet zeigen die Wässer nördlich des Reither Kogel eine ähnliche Verteilung wie im Georgi Unterbau (KKU, BHQF, KKQ, R, T), wobei das Wasser der Messstelle PWSS (wie auch RKBR) kaum Sulfat enthält. Am Probenahmepunkt KEQ liegt der höchste Nitrat Anteil (33 mg/L) im gesamten Bereich vor, was den Einfluss der oberhalb der Messstelle betrieben Landwirtschaft deutlich macht. Die Wässer von SKQE, FQE und AHQ sind im anstehenden Wildschönauer Schiefer genommen worden, dort zeigen sich signifikant geringere Magnesiumanteile. Natrium nimmt vor allem im Wasser der Messstelle AHQ einen größeren Teil ein. Eine Erklärung könnte in der Freisetzung von Nitrat bei der Verwitterung von Silikaten liegen (Matteß 1994, Merkel & SPERLING 1996)

7.5.4.2 Schwaz

Die Auswertung der Wässer im Wilhelm Erbstollen mittels Kreisdiagramm zeigt an den Messstellen MB-09, MB-10, MB-12 und MB-13 signifikante Unterschiede in der Verteilung der Ionen im Bezug zu den restlichen Probenahmepunkten. Vor allem bei den Anionen sind erhebliche Unterschiede festzustellen. Sulfat ist der dominierende Parameter an MB-09 und MB-10. Im Bereich der Kationen ist der prozentuale Anteil von Magnesium größer als der vom Kalzium. Die Beprobung der Messstellen MB-10 und MB-13 erbrachte eine Dominanz von Hydrogenkarbonat und Sulfat mit einem überdurchschnittlich großen Anteil an Nitrat. Die anderen beprobten Wässer (MB-06—MB-08, MB-11, MB-14—18c) unterscheiden sich nur unwesentlich in der Ionenverteilung. Hydrogenkarbonat dominiert den Anionbereich vor einem Anteil Sulfat und Magnesium und Kalzium dominieren bei den Kationen zu etwa gleichen Teilen.

Die Messstellen des überirdischen Bereichs von Schwaz sind bei den Kationen vorrangig vom Kalzium geprägt. An den Beprobungspunkten MB-04 und MB-05 (beides Grubenwässer) bzw. BWF, IAN, IAB und PB ist der Anteil des Sulfat an der Gesamtmineralisation besonders hoch.

7.5.5 Darstellung im STIFF-Diagramm

Mit dem STIFF-Diagramm können Analysen in charakteristischer graphischer Form gezeigt werden, indem Ionenkonzentrationen (Milliäquivalent pro Liter) auf parallelen Achsen aufgetragen werden. Somit können Charakteristika von verschiedenen Wässern deutlich dargestellt und verglichen werden (Müller 1994).

In den nachstehenden Diagrammen sind 52 Messstellen graphisch dargestellt.. Für die Auswertung wurden die schon im Piper-Diagramm verwendeten Parameter genutzt. Die Gruppierung der Messstellen erfolgte nach dem bei den Kreisdiagrammen verwendeten Schema.

7.5.5.1 Großkogel

Aus den Diagrammen (Abb. 31) des Georgi Unterbau ist ersichtlich, dass die Wässer eine sehr einheitliche Zusammensetzung aufweisen. Das dominierende Anion ist immer das Hydrogenkarbonat. Bei den Kationen überwiegt das Kalzium gefolgt von einem Magnesiumanteil.

Es zeigen sich im Blindschacht keine teufenabhängigen Unterschiede. Das Wasser hat im Bereich der Messgenauigkeit eine homogene Zusammensetzung.

Der übertägige Bereich des Georgi Unterbau zeigt ein differenzierteres Bild (Abb:31). Bei den Anionen dominiert weiterhin das Hydrogenkarbonat. Auf Seite der Kationen überwiegt an der Messstelle KEQ der Magnesiumanteil. gegenüber dem des Kalziums. Ebenfalls an Punkt KEQ wird der schon unter Kapitel 7.5.4.1 beschriebene erhöhte Nitratgehalt deutlich. Bei den im Wildschönauer Schiefer genommenen Wässern (SKQE, FQE) wird abermals die absolute Dominanz des Kalziums deutlich. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass die beprobten Wässer von AHQ aufgrund ihrer geringeren Mineralisation keinen längeren Kontakt mit den dem Gestein (Schiefer) haben.

7.5.5.2 Schwaz

Wie schon in Kapitel 7.5.2 und 7.5.3.2 beschrieben treten im untertägigen Bereich von Schwaz die signifikantesten Unterschiede in der Ionenzusammensetzung auf. Auffallend ist auch bei dieser Darstellungsform die Dominanz des Sulfat und die vergleichsweise hohe Magnesium- Kalzium und Natriumkonzentration bei den Messstellen MB-09 und MB-12. Weber & Schneider (2000) bezeichnen diese Wässer auf Grund der hohen Leitfähigkeit- bzw. der Gesamtmineralisation als typische Schieferwässer, geben aber keinen Hintergrund für diese Meinung an.

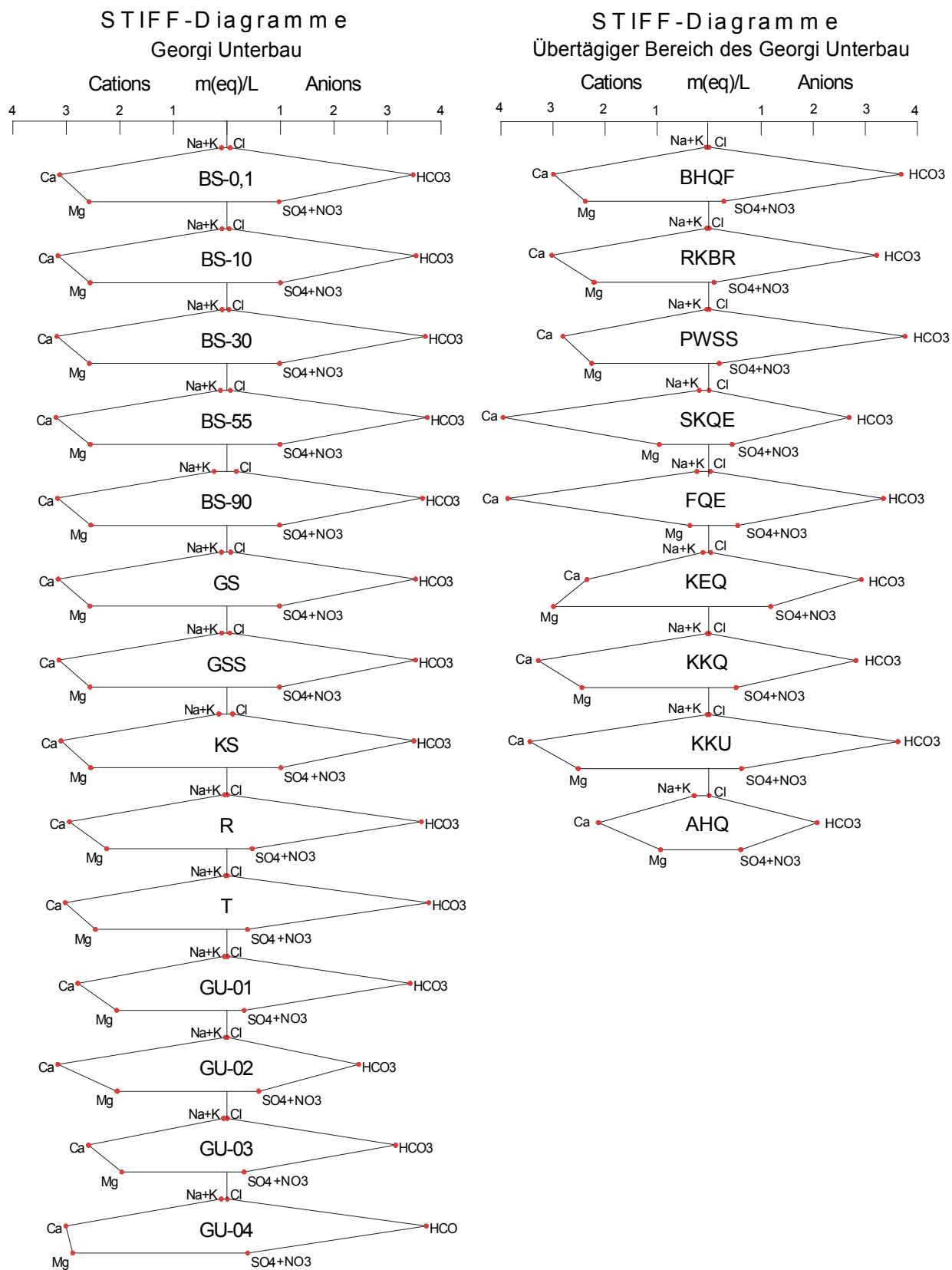


Abb. 31: STIFF-Diagramme des Untersuchungsgebietes Großkogel von 23 Messstellen.

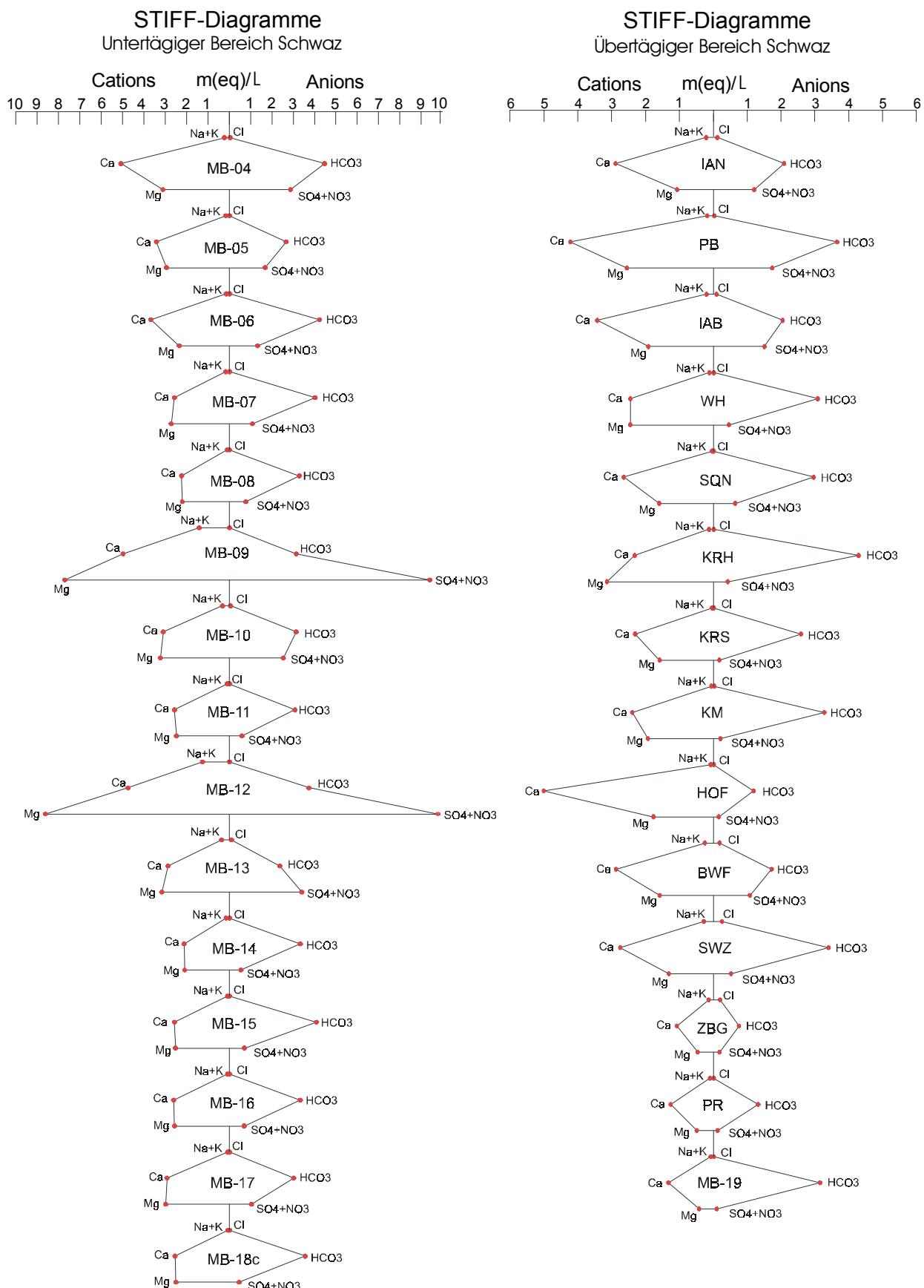


Abb. 32: STIFF-Diagramme des Untersuchungsgebietes Schwaz von 29 Messstellen

Wässer aus Gips- oder Anhydritgesteinen weisen hohe Konzentrationen an Sulfat in Verbindung mit Calcium und Magnesium auf. Häufig sind diese Wässer an Kalziumsulfat gesättigt, so daß nur noch Magnesium in Lösung gehen kann (DVWK-SCHRIFT 125 1999). Für diese Gegebenheiten sprechen die mit chemisch-thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen (Software PREEQC) ermittelten Sättigungskoeffizienten (SI) von 0,74 (MB-09) und 0,76 (MB-12), die nur an diesen Messstellen eine Sättigung aufweisen. Andererseits können die Sulfatkonzentrationen auch durch Verwitterungsprozesse (Pyridverwitterung) im Bereich der Oxidationszone von Sulfiderzlagerstätten hervorgerufen werden (MATTHEß 1994). Dies würde auf einen Einfluss des ehemaligen Abbaus von Sulfiderzen (z. B. Fahlerz) hindeuten.

Neben den erheblichen Anteilen von Magnesium im Dolomit wird bei der Verwitterung von Metamorphiten, in z.B. Glimmer (Biotit), Chlorit oder Tonmineralen eingebautes Magnesium frei (MERKEL & SPERLING 1996, MATTHEß 1994).

Die DVWK-SCHRIFT 125 (1999) erläutert, dass die Lösungsgehalte in niedrig metamorphen Gesteinen im Allgemeinen höher als in magmatischen oder hochmetamorphen Gesteinen ist, da insbesondere Schiefer dem Wasser größere Kontaktflächen bieten und langsamer durchflossen werden. Häufig weisen daher stark pyrithaltige Schiefer höhere Sulfatgehalte auf, was wiederum die Meinung von Weber & Schneider (2000) bestätigen würde.

Bevor das Wasser die Messstellen erreicht, fließt es über große Mengen gebrochenen Dolomitgestein. Daher ist eine Aufmineralisation durch den erhöhten Oberflächenkontakt ohnehin erkläbar.

Ein erhöhter Nitratgehalt an den Messstellen MB-10 und MB-13 (hauptsächlich aus Analysenwerten und Kreisdiagramm ersichtlich) wird durch die landwirtschaftliche Beeinflussung der zutretenden Wässer hervorgerufen. Im Grubengebäude befindliche Sprengstoffreste könnten allerdings auch einen Einfluss auf die Gehalte haben.

Die Wässer des übertägigen Bereiches von Schwaz werden auf Seite der Anionen wiederum vom Hydrogenkarbonat dominiert, während Kalzium den Bereich der Anionen bestimmt. Eine Ausnahme bildet dabei die Messstellen KRH und WH, bei denen Magnesium etwas höhere Konzentrationen aufweist. Vorhandene Analysenfehler werden vor allem bei der Messstellen MB-19 (15 %) Hof (15 %), IAN (14 %) und IAB (18 %) deutlich.

7.6 Berechnung des Sättigungsindex

Der Sättigungsindex (SI) gilt als Maß für die thermodynamische Aktivität in einem geohydrochemischen System, das den Sättigungsgrad des Lösungsinhaltes eines Wassers hinsichtlich chemischer Spezies oder der im Wasser gelösten Minerale charakterisiert (HÖLTING 1994). Im Verlauf der Zeit wird ein Wasser, das sich im Ungleichgewicht befindet, einem Gleichgewichtszustand zustreben. Übersättigte Phasen fallen aus, während gegenüber dem Wasser untersättigte Feststoffphasen in Lösung gehen (WOLKERSDORFER 1996).

Der dekadische Logarithmus des Quotienten aus Ionenaktivität (IAP) und Löslichkeitsprodukt (LP, Gleichung 19) wird als Sättigungsindex bezeichnet. Durch Umrechnung in Aktivitäten der analytisch bestimmten Konzentrationen (dabei Ionenstärke, Wassertemperatur, Komplexbildung berücksichtigen) berechnet sich das IAP. Aus der maximalen Löslichkeit durch Umrechnung auf die Wassertemperatur ergibt sich das LP (MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002).

$$SI = \log \frac{IAP}{IP} \quad [19]$$

Der Sättigungsindex von Kalzit in wässriger Lösung errechnet sich (Gleichung 20) beispielsweise aus ($\log K$, aus MERKEL & SPERLING 1996):



zu

$$SI = \log \frac{\{\text{Ca}^{2+}\} \cdot \{\text{CO}_3^{2-}\}}{10^{-8,48}} \quad [20]$$

Eine Übersättigung wird durch ein positives, eine Untersättigung durch ein negatives SI ausgedrückt. MERKEL & PLANER-FRIEDRICH (2002) geben einen Bereich von - 0,2 bis + 0,2 für ein quasi Gleichgewicht an. Die Zeitdauer, bis eine Feststoffphase den Sättigungszustand erreicht, ist von verschiedenen Faktoren wie pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur und dem Vorhandensein anderer Spezies und Feststoffe abhängig. Eine im Wasser stark übersättigte Phase, die sich aber aus kinetischen Gründen nicht bilden kann, wird nicht ausfallen (DVWK Schrift 100 1992). Dolomit zum Beispiel würde trotz eines positiven SI von 2,37 aufgrund seiner Reaktionsträgheit nicht ausfallen, während für Kalzit mit einem SI von 0,74 eine rasche Ausfällung zu erwarten wäre (MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002).

Die Berechnung des Sättigungsindex erfolgte mit der Software PHREEQC und unter Verwendung der Datensammlung MINTEQ, da dort das Element Antimon enthalten ist. Folgende Analysenwerte wurden für die Berechnung des Sättigungsindex verwendet:

- Kationen: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Li^+ , Fe ges., As, Ba, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, U ges., Zn
- Anionen: Cl^- , F^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-
- Sonstige: Eh-Wert, pH-Wert, Temperatur

In den Abbildungen 33 (Großkogel) und 34 (Schwaz) ist der Sättigungsindex der Mineralphasen Magnesit (MgCO_3), Aragonit (CaCO_3), Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Kalzit (CaCO_3) und Baryt (BaSO_4) graphisch, sowie in Anlage E 4 tabellarisch dargestellt. Wie die Berechnungen zeigen, spielen für die Zusammensetzung des Wassers nur wenige Mineralphasen eine Rolle. Zur Gleichgewichtseinstellung tragen ausschließlich Karbonate und Sulfate bei. Hierbei handelt es sich um begrenzende Phasen, die für die Begrenzung der Moleküle und Ionen im Wasser bestimmend sind.

Bei Begutachtung des Sättigungsindex vom Blindschacht des Georgi Unterbau fällt auf, dass mit zunehmender Teufe die Kalzit- und Dolomitsättigung zunimmt und sich ein Gleichgewicht mit dem Grubenwasser einstellt. Grund hierfür ist längere Verweildauer des Grubenwassers mit zunehmender Teufe. Im Großen See hingegen ist eine deutliche Untersättigung vom Dolomit vorhanden. Erwartungsgemäß ist das Baryt an allen Messstellen im Georgi Unterbau gesättigt bis übersättigt.

Die Messstellen des übertägigen Bereichs von Großkogel weisen an den Messstellen KKU, KKQ und KEQ einen positiven Sättigungsindex bei allen dargestellten Mineralphasen auf. Bei dem Oberflächenwasser von RKBR tritt hingegen eine leichte (Kalzit) bis deutliche Untersättigung auf.

Im Bereich von -1 bis +1 liegen der Sättigungsindex aller Mineralphasen im Wilhelm Erbstollen mit Ausnahme vom Dolomit an MB-12 (+ 1,4). Auffällend ist, dass Magnesit bei allen Wässern im negativen Bereich des Sättigungsindex liegt, hingegen alle anderen Mineralphasen im Gleichgewicht mit dem Grubenwasser stehen bzw. übersättigt sind.

Die Wässer von ZBG und PR unterscheiden sich deutlich mit einer konstanten Untersättigung von allen anderen. Deutlich zu erkennen ist, dass es sich hierbei um Oberflächenwässer mit fehlendem, stratigraphisch bedingten, Dolomitkontakt handelt ist. Beim Trinkwasser der Stadt Schwaz (MB-19) zeichnet sich eine leichte Untersättigung der berechneten Mineralphasen ab.

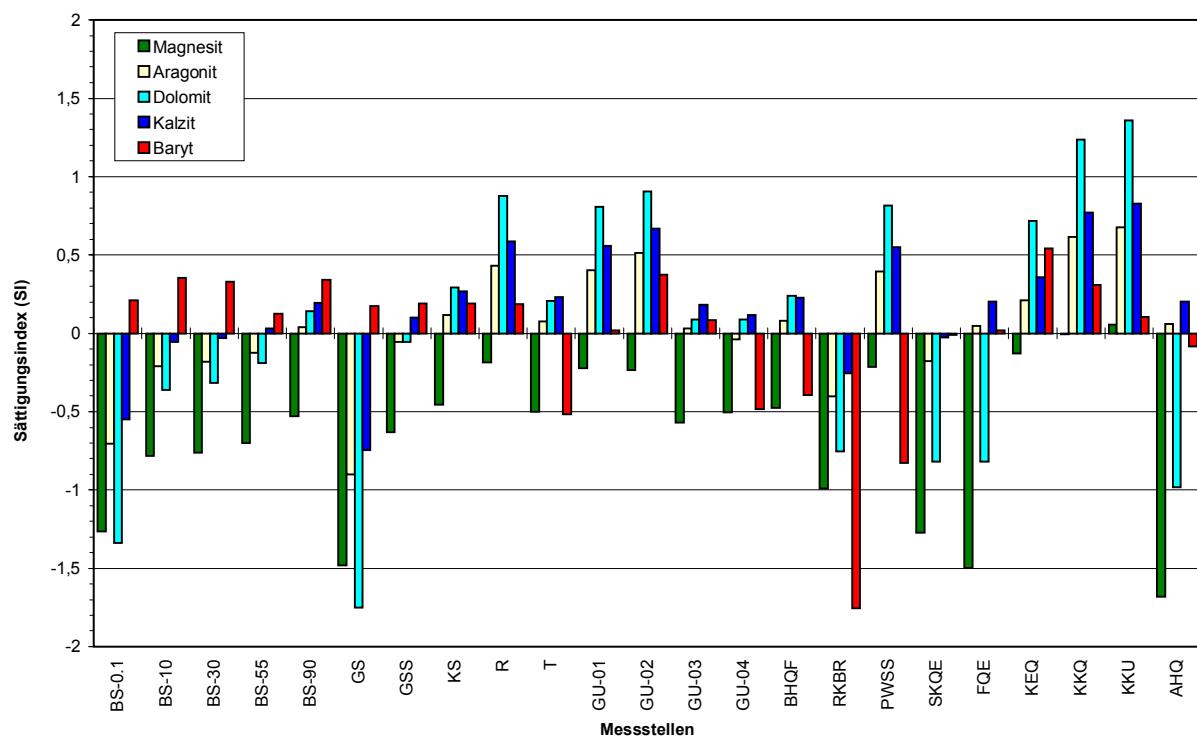


Abb. 33: Sättigungsindex von Magnesit, Aragonit, Dolomit, Kalzit und Baryt im Bereich Großkogel.

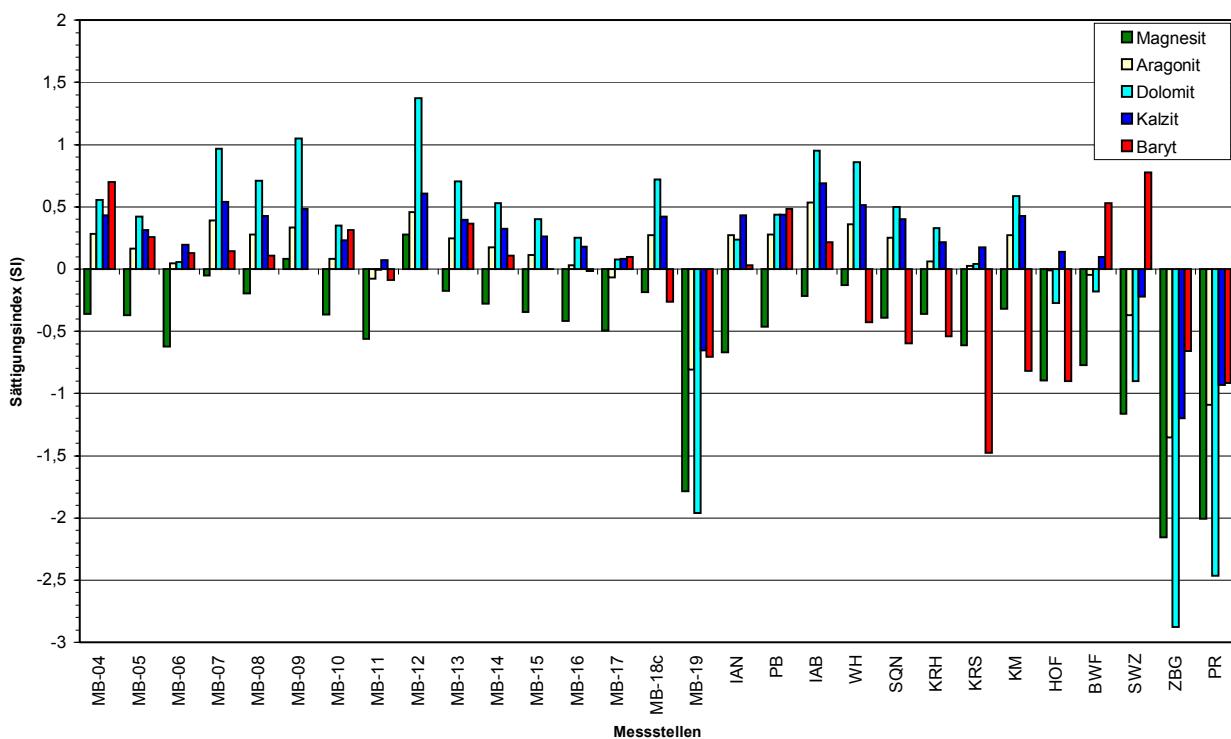


Abb. 34: Sättigungsindex von Magnesit, Aragonit, Dolomit, Kalzit und Baryt im Bereich Schwaz.

7.7 Spurenelemente

Von den untersuchten 24 Spurenelementen (Kapitel 5.3.3, Anlage E 3) lagen folgende 14 Elemente mehrheitlich über der Nachweisgrenze (geordnet nach Molekulargewicht): Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Sn, Sb, Cs, Ba, W, Pb, U. Nachfolgend werden die Elemente Mn, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Ba, U im Bereich Georgi Unterbau dargestellt (Sb in Kapitel 7.7.1). Vergleichsdiagramme zu Darstellung der Massenkonzentration für die Teilgebiete Großkogel übertägiger Bereich und Schwaz sind im Anhang E 5 abgebildet.

Die Spurenelemente im Wasser des Blindschachts zeigen in ihrer Teufenabhängigkeit keine deutliche Tiefenzonierung (Abb. 35). Eine signifikante Verringerung der Massenkonzentrationen ist am Mundloch des Georgi Unterbau (Messstelle R) durch Verdünnung des Grubenwassers im Bereich der Grünwies Störung (GU-01), zu verzeichnen.

Elemente der ökonomisch gewonnenen Minerale und des Gangmittels (Strontianit, Baryt, Fahlerz) kommen erwartungsgemäß am häufigsten vor (Sr, Ba, As, Cu, Zn). Bei einem mittleren pH-Wert von 7,7 ist es erklärlich, dass fast alle Schwermetalle in relativ geringen Konzentrationen vorkommen. Da es sich beim Georgi Unterbau um eine Quecksilberfahlerzlagerstätte handelt, ist es auffällig, dass die Konzentration des Quecksilbers unter der Nachweisgrenze ($0,1 \mu\text{g/L}$) liegt. Erklärbar ist dieser Umstand wiederum durch den erwähnten pH-Wert von 7,7, bei dem Quecksilber, wie viele andere Metalle, wenig mobil ist.

An den Messstellen im Wilhelm Erbstollen wurden sehr hohe Werte von Strontium gemessen. Die Massenkonzentration liegt dabei im Bereich zwischen 5 mg/L (MB-18c) und einem Höchstwert von $>10 \text{ mg/L}$ an den Messstellen MB-09 und MB-12. Strontium ist ein Element des Karbonatminerals Strontianit (SrCO_3). Dieses Mineral kommt als Kluftfüllung im Kalkstein oder Kalkmergel vor und stammt aus den Gehalten des Nebengesteins (LATERALEKRETION, MATTHES 1996).

Die Analyse der Messstelle MB-19 ergab für das Metall Zink einen Wert von 0,55 mg /L. Da es sich dabei um Trinkwasser der Stadt Schwaz handelt, kann von einem Probenahmefehler ausgegangen werden. Vor der Probenahme am 20.08. wurde die verzinkte Wasserleitung ca. 10 min gespült, offensichtlich hat diese Zeitdauer nicht ausgereicht, um eine brauchbare Analyse zu erhalten. Die Stadtwerke Schwaz können keine Zinkkonzentration für das gelieferte Trinkwasser angeben, da dieses Parameter nicht untersucht wird (mündliche Mitteilung Stadtwerke Schwaz).

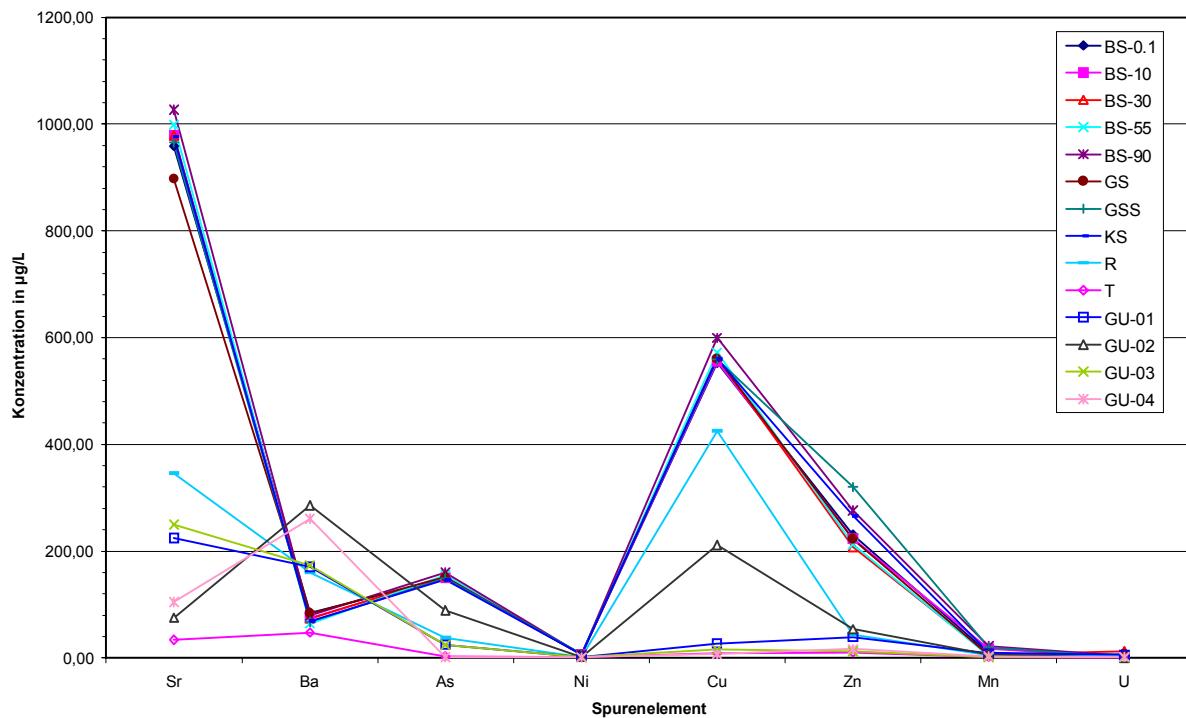


Abb. 35: Massenkonzentration ausgewählter Spurenelemente des Georgi Unterbau im Vergleich

7.7.1 Antimon

7.7.1.1 Einführung

Antimon mit dem chemischen Symbol Sb ist vom lateinischen Namen "Stibium" abgeleitet. Es ist ein Halbmetall und steht in der 5. Hauptgruppe des Periodensystems mit der Ordnungszahl 51. Die Atommasse beträgt 121,1 bei einer Dichte von 6,96 g/cm² und einem Schmelzpunkt von 630,7 °C. An der Luft ist Antimon beständig und tritt analog zum Arsen in den Wertigkeiten +5, +3, 0 und -3 auf. Chemisch verhält sich Antimon in vielen Dingen ähnlich wie Arsen und Wismut, seine unmittelbaren Nachbarn im Periodensystem.

Antimon ist ein toxisches Spurenelement, das meist mit Schwefel und Arsen vorkommt. Wenn es in das Blut gelangt, wirkt es sehr giftig. Über Magen und Darmwände werden Antimon und seine Verbindungen allerdings nicht gut aufgenommen. Bei oraler Aufnahme rufen sie starken Brechreiz hervor, so dass Antimon-Vergiftungen selten auftreten. Die Toxizität von Antimon kann nur schwer beurteilt werden, da es fast immer mit anderen giftigen Metallen wie Blei und Arsen auftritt, deren Wirkung im Vordergrund steht. Antimon wirkt teratogen und mutagen als Antimontrioxid im Tierversuch kanzerogen (KATALYSE UMWELTLEXIKON 2002). Allerdings ist die kanzerogene Wirkung des Metalloxids beim Menschen umstritten.

Antimon kommt in der oberen Erdkruste mit geschätzten 10^{-4} Gew. % selten vor. Die wichtigsten Mineralien sind Antimonit und Valentinit (MERKEL & SPERLING 1998 aus FALBE & REGNITZ 1992). In Kapitel 3.4 sind die im Untersuchungsgebiet hauptsächlich vorkommenden Antimonminerale beschrieben.

7.7.1.2 Antimonkonzentrationen in den Untersuchungsgebieten

In den Untersuchungsgebieten sind die Antimonkonzentrationen vor allem im untertägigen Bereich sehr hoch. Es sind Werte bis 1,6 mg/L an der Messstelle MB-13 gemessen worden.

Die graphische Darstellung der Antimonverteilung in Verbindung mit der Lage der jeweiligen Messstelle, ist in den Anlagen D 1.2 (Georgi Unterbau), D 3.3 (untertägiger Bereich Schwaz) und D 4.2 (übertägiger Bereich Schwaz) beigefügt. Bei den Diagrammen von Abbildung 36 und 37 wurden neben den im Juni 2001, August 2001 und Februar 2002 gemessenen Konzentrationen auch die von WEBER UND SCHNEIDER (2000) ermittelten Werte verwendet. Nach dem Bergsturz vom 10. Juli 1999 erstellten genannte Autoren ein Gutachten zur Geologie und vorhandener Georisiken im Zusammenhang mit den Felssturzereignissen am Eiblschrofen. Soweit dies möglich war sind die Messstellen dieser Arbeit mit denen des Gutachtens korreliert worden.

Alle Wässer des gefluteten Bereichs vom Georgi Unterbau (Abb.36, Tabelle 17) haben in etwa eine konstante Konzentration von 1,0 mg/L im Mittel und lassen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messungen erkennen. Der Grubenwasserzutritt an der Messstelle GU-02 weist im Vergleich zum restlichen Grubenbau die höchsten Werte auf (0,4 mg/L). Am Mundloch des Georgi Unterbau ist ein deutlicher Verdünnungseffekt zu verzeichnen, dort ist die Konzentration mit 0,2 mg/L nur noch 20 % so hoch wie am Ablauf des Blindschachtes.

Die Antimonkonzentrationen der übertägigen Messstellen KKU und KKQ ist mit 0,08 mg/L bzw. 0,1 mg/L am höchsten. Dabei handelt es sich um Wasseraustritte aus alten Stollen und Abbauen. Alle anderen Messstellen des Bereichs liegen deutlich unter diesen Werten.

Im untertägigen Bereich von Schwaz sind signifikante Unterschiede zwischen den Messstellen festzustellen (Abb.37, Tabelle 17), dabei haben die Punkte MB-09, MB10, MB-13, MB-15 und MB-16 die höchsten Konzentrationen. Ein deutlicher Abfall der Menge gelösten Antimons, zwischen der Messung im September 1999 und den restlichen, wird bei MB-04, MB-07, MB-12 und MB-16 deutlich. Zwischen den Messungen vom August 2001 und Februar 2002 lässt sich kein jahreszeitlich bedingter Trend erkennen.

Die Messstelle SQN befindet sich im Blockschutt des Felssturzes und weist 1,2 mg/L (August 2001) und 1,4 mg/L (Februar 2002) im übertägigen Bereich die höchste Konzentration auf. Deutlich erhöhte Werte zeichnen auch die Punkte PB (dem Inn zufließendes Grubenwasser), WH, KRH und KRS (alte Abraumhalden) aus. Unverständlich ist die erhöhte Konzentration der Februarmessung im Abstrombereich des Inn (IAB). Da PB zu diesem Zeitpunkt weniger Antimon führte müsste sich dies auch in der Konzentration von IAB niederschlagen. Alle anderen Werte des Bereichs liegen signifikant unter den hier besprochenen.

Tab 17: Antimonkonzentrationen im gesamten Untersuchungsgebiet von Messungen im September 1999, Juni und August 2001 und Februar 2002.

Messstelle	08/20001	02/2002	Messstelle	09/1999	06/2001	08/2001	02/2002
BS-0,1	1,001	1,017	MB-04	0,302	0,197	0,172	0,154
BS-10	1,021	1,016	MB-05	0,035	<0,064	0,329	0,322
BS-30	1,016	1,022	MB-06		0,034	0,016	
BS-55	1,026	1,032	MB-07	0,75	0,423	0,463	
BS-90	1,010	0,977	MB-08		0,473	0,540	
GS	1,000	1,006	MB-09	1,5	1,470	1,496	
GSS	0,999	1,022	MB-10		1,173	1,140	
KS		1,015	MB-11		0,368	0,372	
R	0,190	0,175	MB-12	1,16	0,825	0,878	
T	0,002	0,001	MB-13		1,710	1,758	
GU-01	0,076	0,068	MB-14	0,78	0,082	0,079	
GU-02	0,384	0,384	MB-15		1,052	0,984	
GU-03	0,058	0,060	MB-16	1,23	1,019	0,972	
GU-04	0,002	0,002	MB-17		0,226	0,293	
BHQF	0,005	0,010	MB-18c		0,283	0,219	
RKBR	0,003	0,004	MB-19		<0,064	0,001	
PWSS	0,009	0,004	IAN			0,001	0,002
SKQE	0,001	0,001	PB			0,209	0,169
FQE	0,002	0,002	IAB			0,016	0,083
KEQ	0,002	0,002	WH			0,530	0,458
KKQ	0,078	0,083	SQN			1,197	1,367
KKU	0,109	0,116	KRH			0,326	0,181
AHQ	0,002	0,003	KRS			0,396	0,365
		KM				0,013	0,017
		HOF				0,002	0,002
		BWF				0,007	0,008
		SWZ				0,002	0,0026
		ZBG				0,0002	0,0012
		PR				0,0002	0,0075

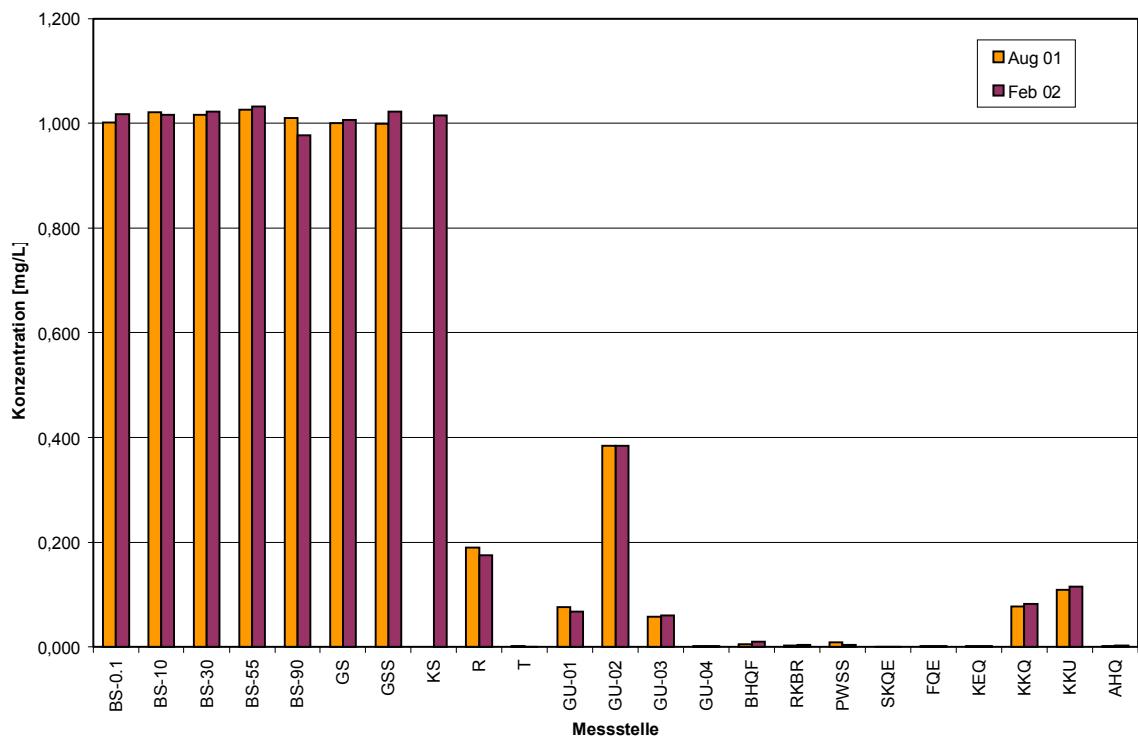


Abb. 36: Antimonkonzentration aller Messstellen des Untersuchungsgebietes Großkogel, aus Messungen vom August 2001 und Februar 2002.

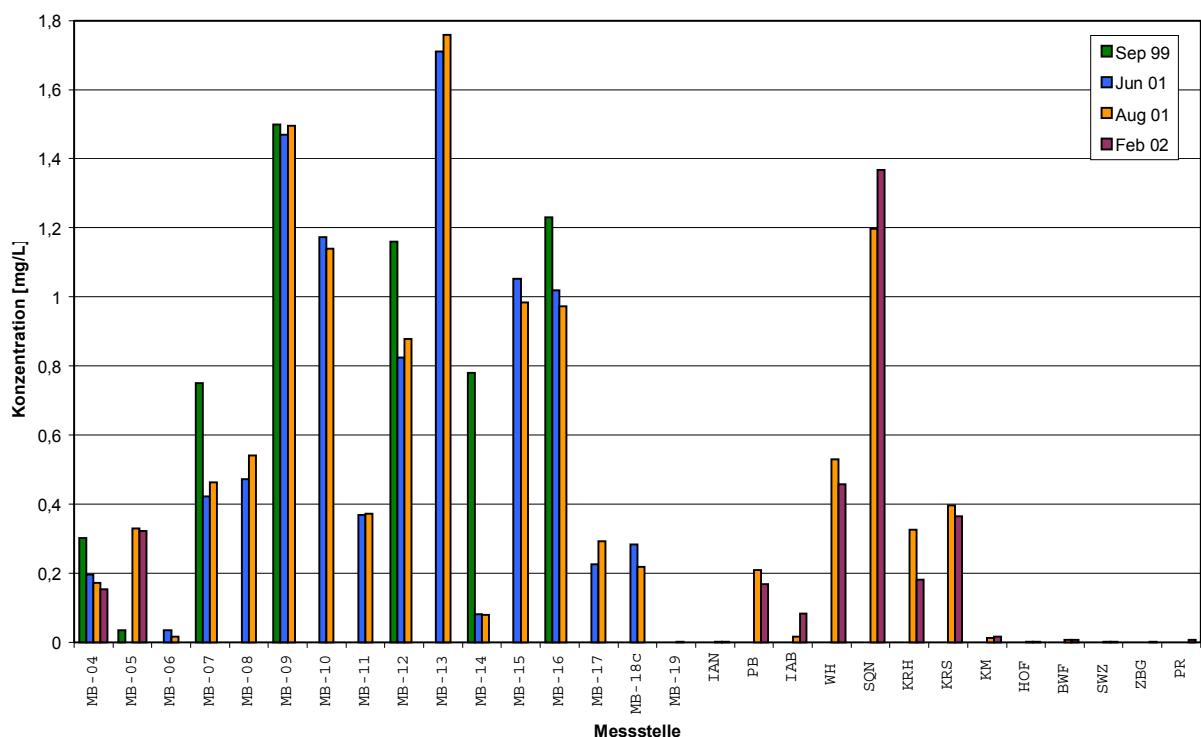


Abb.37: Antimonkonzentration aller Messstellen des Untersuchungsgebietes Schwaz, aus Messungen vom September 1999, Juni 2001,August 2001 und Februar 2002.

7.7.1.3 Grenzwerte für Antimon

Die Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA) gibt für Antimon einen Prüfwert im Grundwasser von 0,01 mg /L an. Dieser Wert wird von einer Reihe Messstellen in den oberirdischen Bereichen unterschritten. Dieser Wert soll als Vergleich dienen, da es sich an keiner Meßstelle um Klassisches Trinkwasser handelt. Ebenso der Wert von 0,005 mg/L für Antimon in der österreichischen Trinkwasserverordnung, die am 01. September 2001 in Kraft getreten ist. Von Interesse ist dabei, dass alle für Trinkwasser genutzten Wasseraustritten (außer KKU) diesen Grenzwert unterschreiten oder unmittelbar darüber liegen.

7.7.1.4 Interpretationsversuch

Ein wesentlicher Mechanismus für Antimonaustausch im Bergbaugebiet ist die Aufschließung über die Verwitterungs- und Lösungsdynamik. Der Austrag erfolgt gebunden an vererzte Bereiche und Bergbauhalden. Sauerstoffreiche Niederschlags- und Grubenwässer fördern die Oxidation der sulfidischen Antimonminerale. Anthropogen oder geogen vergrößerte Gesteinoberflächen tragen zur verstärkten Lösung des Halbmetalls Antimon bei, was im Bereich des Felssturzes sehr deutlich wird. Seit der Einstellung des Dolomitabbaues in Schwaz vor ca. 3½ Jahren (Zeitpunkt der letzten Probenahme) ist zwar in einigen Bereichen des Grubengebäudes eine signifikante Verminderung der Konzentration festzustellen. Der Vergleich mit dem Georgi Unterbau zeigt jedoch, dass auch nach ca. 50 Jahren ohne anthropogene Beeinflussung recht hohe Konzentrationen auftreten. Ein geogen bedingtes Auftreten von Vererzungen, wird immer erhöhte Antimonkonzentrationen in den Wässern hervorrufen. Bergbau und die damit einhergehende Vergrößerung der Oberflächen bzw die Zerkleinerung des Gebirges, wird den Antimongehalt weiter erhöhen.

7.7.8 Grenzwerte für Spurenelemente und Hauptionen

Zum Vergleich mit den Prüfwerten der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 1994) sind die darin angegebenen Werte im Anlage E 6 aufgelistet, zusätzlich sind alle Überschreitungen im Anlage E 3 blau unterlegt. Für die Einschätzung des Inn sind die Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnenwässer (LAWA 1997) sowie die Qualitätsanforderungen der Internationalen Kommision zum Schutz der Elbe (IKSE 1989) und des Rheins (IKSR 1998) benutzt worden. Das Wasser des Inn liegt bei allen Parametern unter den Qualitätsanforderungen. Auf einen Vergleich mit der österreichischen Trinkwasserverordnung (TWV) von 2001 wurde verzichtet da es sich bis, auf MB-19, an keiner Messstelle um Trinkwasser handelt und auch keine kommerzielle Aufbereitung erfolgt..

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- ARBEITSKREIS HUMAN- UND ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEWERTUNG VON MARKIERUNGSMITTELN IN GEWÄSSERN (1997): Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern.- Grundwasser; S.61—64, 2 Tab.; Berlin Heidelberg.
- ARLT, T.& DIAMOND, L. W. (1998): Composition of tetrahedrite-tennantite and “schwazite” in the Schwaz silver mines, North Tyrol, Austria.- Mineralocial Magazine, 62: S. 801—802, 8 Abb., 5.Tab.; London.
- BARTSCH, H.-J. (1997): Taschenbuch mathematischer Formeln.- 17. neubearb. Aufl., 699 S., 480 Abb.; Leipzig (Fachbuchverlag).
- DIN 38405 Teil 4 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Anionen (Gruppe D), Bestimmung von Fluorid (D 4).
- DUNGER, V. (1994): Grundlagen der Hydrologie.- Vorlesungsskripte zur Lehrveranstaltung, 148 S., TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- DAVIS, J.C. (1986): Statistics and Data Analysis in Geology.- 2. Auflage, 646 S.; New York (John Wiley & Sons).
- DVWK-Schrift 125 (1999): Methoden zur Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.; Wirtschaft- und Verlagsgesellschaft.
- FRIMMEL, H. (1989): Einsatzmöglichkeiten der Strontium-Methode in der Lagerstättengeologie am Beispiel der Barytlagerstätte Kogel/ Brixlegg (Tirol).- Archiv für Lagerstättenforschung Geologische Bundesanstalt, Bd. 11, S.127—146; Wien.
- GRUNDMANN, G. & MARTINEK, K.-P. (1994): Erzminerale und Gangarten des Bergbaugebietes Schwaz-Brixlegg. – Mineralien Magazin, Lapis, Jg. 19: S. 28—40, 44 Abb.; München.
- HANNEBERG, A. & SCHUSTER, H. (1994): Geschichte des Bergbaus in Schwaz und Brixlegg.– Mineralien Magazin, Lapis, Jg.19: S. 13—21, 16 Abb., 3 Tab.; München.
- HASCHE A. (2001): Multitracerversuch in einem gefluteten Bergwerk - Vorbereitung, Durchführung, Auswertung.- 99 S., 16 Abb., 29 Tab., 36 Anl., 2 Anh.; Unveröffentlichte Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- Hölting, B. (1996): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.- 5. erweit. und überarb. Aufl., 441 S., 114 Abb., 46 Tab.; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).
- HÜTTER, L., A. (1994): Wasser und Wasseruntersuchung.- Laborbücher Chemie, 515 S.; Frankfurt am Main (Salle und Sauerländer).
- IKSE (INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DER ELBE): Erster Bericht über die Erfüllung des "Aktionsprogramms Elbe".-1998; Magdeburg.
- JORDAN, H.P. & WEDER, H.J. (1988): Hydrogeologie.- 444 S., 209 Abb., 92 Tab., 18 Taf.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- JORDAN, H.P. & WEDER, H.J. (1995): Hydrogeologie.- Grundlagen und Methoden, Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen.- 589 S., 427 Abb., 178 Tab.; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).
- KAISER, R.E. & MÜHLBAUER, J.A. (1983): Elementare Tests zur Beurteilung von Messdaten – Soforthilfe für statistische Tests mit wenigen Messdaten.- 2. Auflage, 96 S.; Mannheim (B.I. Hochschultaschenbücher).
- KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik.- Lehrbuch der Hydrogeologie, 9, 519 S., 234 Abb., 30 Tab., 4 Taf.; Berlin Stuttgart (Gebrüder Bornträger).

- KÄSS, W. (1998): Tracing Technique in Geohydrology.- 581 S., 270 Abb., 40 Tab., 8 Plat.; Rotterdam:Balkema.
- KATALYSE UMWELTLEXIKON (Stand 12.07.2002): <http://www.umweltlexikon-online.de/fp/archiv/RUBwerkstoff-material-substanz/Antimon.shtml>
- KRISCHKER, A. G. (1990): Die Baryt-Fahlerz-Lagerstätte St. Gertraudi/Brixlegg.- Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Innsbruck, S. 206; Innsbruck.
- LAWA (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER): Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden.- 1994; Stuttgart.
- LAWA (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER): Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer, Band I: Teil I: Konzeption zur Ableitung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen.- 1997; Berlin.
- MATTHES, S. (1996): Mineralogie-Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde.- S. 49—52 , 174 Abb., 42 Tab.; Berlin/Heidelberg (Springer).
- MATTHEß, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers- Lehrbuch der Hydrogeologie, 2, 3. überarbeitete Auflage, 497 S., 139 Abb., 116 Tab.; Berlin Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- MAURIN, V. & ZÖTL, J.G.(1976): Triftstoffe.- In: Gospodaric, R. & Zötl, J.G. (1976): Markierung unterirdischer Wässer - Untersuchungen in Slowenien 1972-1975.- Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, 28: S. 217-218; Graz.
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1996): Hydrodynamische Stoffsysteme Teil 1, DVWK Schrift 110, Bonn (Kommisionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1998): Hydrodynamische Stoffsysteme Teil 2, DVWK Schrift 117, Bonn (Kommisionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- MERKEL, B. & PLANER-FRIEDRICH (2002): Grundwasserchemie.- Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme, 219 S., 74 Abb., 56 Tab.; Berlin/Heidelberg (Springer).
- MOLECULAR PROBES (2002a): Working with FluoSpheres® Fluorescent Microspheres – Properties and Modifications.- Product Information: 5 S., Molecular Probes, Inc. [revised: 18.04.2002]: www.probes.com.
- MOLECULAR PROBES (2002b): FluoSpheres® Fluorescent Microspheres for Blood Flow Determination.- Product Information: 6 S., 2 Abb., 1 Tab., Molecular Probes, Inc. [revised: 18.04.2002]: www.probes.com.
- MOLECULAR PROBES (2002c): FluoSpheres® Fluorescent Microspheres Physical Characteristics.- Product Information: 6 S., 1 Abb., 4 Tab., Molecular Probes, Inc. [revised: 18.04.2002]: www.probes.com.
- MOSTLER, H.(1982): Untersuchung von Erzlagerstätten im Innsbrucker Quarzphyllit und auf der Alpeiner Scharte.- Bd. 1 Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, S. 77—83; Wien.
- MÜLLER, H. (1994): Hydrogeologische Untersuchung im Bergbau Grosskogel, Brixlegg.- Unveröffentlichtes Gutachten, Büro für Bau- und Hydrogeologische Beratung; Innsbruck.
- MUTSCHLECHNER, G. (1984): Erzbergbau und Bergwesen im Berggericht Rattenberg.- 163 S., 68 Abb., 1 Tab.; Innsbruck (Eigenverlag Gemeinden Alpbach, Brixlegg, Rattenberg und Reith im Alpbachtal).
- NIEHREN, S. (1999): Neue Methoden zur Grundwassermarkierung – Entwicklung eines feldtauglichen Mikrosphärenzählers.- Schriftenreihe des Institutes für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, 1: 92 S., 56 Abb., 6 Tab.; Zürich.
- PIRKL, H. (1961): Geologie des Trias-Streifens und des Schwazer Dolomits südlich des Inn zwischen Schwaz und Wörgl (Tirol).- Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Bd. 104, S.1—150, 9 Abb., 7 Taf.; Wien
- ROTH, L. (1998): Grenzwerte für Trink-, Oberflächen- und Grundwasser.- In: Wassergefährdente Stoffe.- 33. Erg. Lfg. 5/98, Kap. III – 0.4; Landsberg, München, Zürich.

- SCHAFFER, R., SCHEDL, A., HULLA, G., DOPPELHOFER, D., RIRKL, H., & NEINAVIAIE, H. (2001): Schwermetallastrag in ehemaligen Bergaugebieten-Transferlehrpfad in die Nahrungskette am Beispiel der Antimon-Fahlerzlage Brunnalm bei Kirchberg in Tirol.- Geologische Bundesanstalt, Fachabteilung Rohstoffgeologie, 56 S.; Wien.
- SCHNORRER, G. (1994): Die Sekundärminerale des Bergaugebietes Schwaz-Brixlegg in Tirol.- Mineralien Magazin, Lapis, Jg.19: S. 41—69, 86 Abb.; München.
- SCHOBER, CH. (1984): Zur Geologie der Schwazer Trias und des Schwazer Dolomits bei Brixlegg (Tirol) unter besonderer Berücksichtigung der Vererzung.- Unveröffentlichte Dissertation, Universität Innsbruck, 186 S.; Innsbruck
- SCHULZ, H.D. & KÖLLING, M. (1992): Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten hydrochemischer Modellprogramme.- DVWK Schrift 100, S1—96, 7 Abb.; Hamburg und Berlin (Kommisionsvertrieb Verlag Paul Parey).
- SCHWAZER SILBERBERGWERK BESUCHERFÜHRUNG GMBH (Stand 15.05.2002):
<http://silberbergwerk.at/Geologie/geokarte.htm>
- STADTWERKE SCHWAZ (Stand 25.07.2002): <http://www.stadtwerkeschwaz.at/wasser/wasser.html>
- TOLLMANN, A. (1977): Die Zentralalpen.- Geologie von Österreich, Bd. 1: Wien (Deuticke).
- UNGER, K. (2002): Hydrodynamische Verhältnisse im gefluteten Unterbau des Bergwerks Großkogel/Tirol.- Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- VANEK, R. (1999): Strukturgeologische Untersuchungen als Basis für Felsmechanische Analysen im Dolomitbergbau Schwaz/Tirol.- Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Innsbruck; Innsbruck.
- WEBER, L. & SCHNEIDER, J. F. (2000): Geologie, Geotechnik, Georisiken.- Internationales Expertengutachten zum Verfahren des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit nach § 179 Mineralrohstoffgesetz betreffend den Bergbaubetrieb „Dolomitbergbau Schwaz“ der Montanwerke Brixlegg Aktiengesellschaft und das Schaubergwerk „Silberbergwerk Schwaz“ der Silberbergwerk Schwaz Besucherführungsgesellschaft m.b.H. in Zusammenhang mit den Felssturzereignissen am Eiblschrofen, S. 1—171; Wien.
- WÖBKING, H. (1982): Untertägige Eigenpotentialmessungen in den Bergbauen Grosskogel bei Brixlegg und Falkenstein bei Schwaz.- Berg- und Hüttenm. Mh., 127: S. 476—483, 8 Abb.; Wien.
- WOLKERSDORFER, CH. (1996): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks – Die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda.- Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, 50: 216 S., 131 Abb., 61 Tab.; Clausthal.
- WOLKERSDORFER, CH. (2000): II Tracermethoden (Altlasten).- Tracer- und Isotopenmethoden Weiterbildung im Dresdner Grundwasserforschungszentrum; 37 S., 14 Abb.; Dresden.
- WOLKERSDORFER, CH. (2001): Kurzbericht zur hydrogeologischen Teufenprobenahme am 30./31. Mai 2001.- Antrag auf einen Multitacerversuch im Blindschacht des Georgi Unterbau, TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- WOLKERSDORFER, CH. (2001a): Großkogel: Georgi Unterbau – Kurzbericht zur hydrogeologischen Teufenbeprobung am 5. Dezember 2000.- TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- WOLKERSDORFER, CH., HASCHE, A., UNGER, K., WACKWITZ, T. (2002): Tracer Techniken im Bergbau – Georgi-Unterbau bei Brixlegg/Tirol.- Wissenschaftliche Mitteilungen, Bd. 19 TU Bergakademie Freiberg, S. 37—43 ; Freiberg.

8.3 Abbildungsverzeichnis

Titelfoto: Blick auf den Reitherkogel (links) und den Hinterkogel (rechts) aus Richtung Norden (Foto: Wolkersdorfer).

Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete Schwaz und Großkogel in der Republik Österreich und Lage der Mundlöcher von Georgi Unterbau und Wilhelm Erbstollen im jeweiligen Untersuchungsgebiet.

Abb. 2: Geologische Übersichtskarte Nordtirols zwischen Innsbruck und dem Bundesland Salzburg (verändert aus SCHOBER 1984).

Abb. 3: Idealisiertes Profil durch die Gesteinsserien in der näheren Umgebung des Bergwerkes Großkogel (aus FRIMMEL 1989).

Abb. 4: Geologische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Schwaz (verändert aus SCHWAZER SILBERBERGWERK BESUCHERFÜHRUNG GMBH 2002).

Abb. 5: Probebetrieb zur Barytgewinnung im Bergbau Großkogel, 1988 (aus HANNEBERG & SCHUSTER 1994).

Abb. 6: Monatsmittelwerte für den Niederschlag für die Jahre 1991 bis 2000 und die Temperatur aus den Jahren 1998 bis 2000 in den Untersuchungsgebieten Großkogel und Schwaz.

Abb. 7: Niederschlags- und Temperaturwerte im Zeitraum Mai 2001 bis Februar 2002.

Abb. 8: Abstand Δs in genereller Grundwasserfließrichtung (dicker Pfeil) zur Ermittlung der Abstandsgeschwindigkeit und tatsächlicher Fließweg (dünnner Pfeil) eines Wassermoleküls; (aus JORDAN & WEDER 1988).

Abb. 9: Idealisierte Durchgangskurve bei Markierversuchen. t_0 : Zeitpunkt der Tracereingabe (input); t_1 : Zeitpunkt des ersten Auftretens des Tracers an der Entnahmestelle; t_2 : Zeitpunkt der höchsten Konzentration (c_{max}); t_3 Halbwertszeit – die Hälfte der insgesamt an der Entnahmestelle gefundenen Tracermenge hat den output passiert; t_4 (nicht dargestellt): Zeitpunkt des letzten Nachweises.

Abb. 10: Die prototrophen Zustände des Uranins (aus Niehren 1999). Von links nach rechts: Das einwertige Kation; die zwei Formen des Neutralmoleküls, oben die chinoide, unten die Lactonform; das einwertige Anion; das zweiwertige Anion.

Abb. 11: Abhängigkeit der Floureszenzintensität des Uranin vom pH-Wert (aus Käss 1992).

Abb. 12: Eingesetzte Mikrosphären der Firma Triton Technologies, Inc. (Foto WOLKERSDORFER)

Abb. 13: Schematische Darstellung des Mechanismus zur Bestimmung des Zeitpunktes der Traceraufgabe.

Abb. 13: Einblick in eine Lydia-Hälfte mit dem in Epoxyharz gegossenen Betriebstundenzähler und Batterie (Foto WOLKERSDORFER).

Abb. 14: Kalibriergerade 1. Grades für Uranin.

Abb. 15: System für das Abfiltern der Mikrosphären.

Abb. 16: Ablassen einer Lydia in den Blindschacht des Georgi Unterbau (Foto WOLKERSDORFER).

Abb. 17: Täglicher Niederschlag während der Tracerversuche im August 2001 und Februar 2002.

Abb. 18: Abfluss aus dem Blindschacht des Georgi Unterbau im August 2001 und Februar 2002.

Abb. 19: Abflussverhalten des Blindschacht im Georgi Unterbau in Bezug zu den Niederschlags-Ereignissen im Zeitraum 02.08. bis 19.08.2002.

Abb. 20: Tracereingabe (Mikrophären; Farbe: green) in den Großen See (GS) mittels eines Schöpfers (Wolkersdorfer).

Abb. 21: Fluoreszmikroskopische Aufnahme grüner Mikrosphären aus der Probe BRX-0708-2. Durchmesser der Mikrosphären 15 µm.

Abb. 22: Kontinuierliche Temperaturmessung im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau. Die Sohlen 20, 40, 70 und 100 sind durch gepunktete Linien hervorgerufen.

Abb. 22: Kontinuierliche Leitfähigkeitsmessung im gefluteten Blindschacht des Georgi Unterbau. Die Sohlen 20, 40, 70 und 100 sind durch eine gepunktete Linie hervorgehoben.

Abb. 23: Normalisierte Durchgangskurve (c/c_{\max}) des Tracertests mit Mikrosphären der Farbe "green" im August 2001. Das Maximum entspricht 5666 Mikrosphären von, die Summenkurve 4,35 %. Vertikale Linie: Injektion des Tracers.

Abb. 24: Normalisierte Durchgangskurve (c/c_{\max}) des Tracertests mit Uranin im Februar 2002. Das Maximum entspricht einer Konzentration von 293 µg/L, die Summenkurve 2,6 %. Vertikale Linie nach dem 19.02.: Injektion des Tracers. (aus Wolkersdorfer et.al.).

Abb. 25: Verlauf der Chlorid-Konzentration bei Messstellen mit direktem Zugang zum gefluteten Bereich des Georgi Unterbau.

Abb. 26: Wassertemperaturen im Bereich Großkogel im August 2001 und Februar 2002.

Abb. 27: Wassertemperaturen im Bereich Schwaz im August 2001 und Februar 2002.

Abb. 28: Verteilung des pH-Wertes im Bereich Großkogel.

Abb. 29: Verteilung des pH-Wertes im Bereich Schwaz.

Abb. 30: PIPER-Diagramm der Wasseranalysen von 52 Messstellen aus den Untersuchungsgebieten Großkogel und Schwaz.

Abb. 31: STIFF-Diagramme des Untersuchungsgebietes Großkogel von 23 Messstellen.

Abb. 32: Stiff- Diagramme des Untersuchungsgebietes Schwaz von 29 Messstellen.

Abb. 33: Sättigungsindex von Magnesit, Aragonit, Dolomit, Kalzit und Baryt im Bereich Großkogel.

Abb. 34: Sättigungsindex von Magnesit, Aragonit, Dolomit, Kalzit und Baryt im Bereich Schwaz.

Abb. 35: Massenkonzentration ausgewählter Spurenelemente des Georgi Unterbau im Vergleich.

Abb.36: Antimonkonzentration aller Messstellen des Untersuchungsgebietes Großkogel, aus Messungen vom Februar 2001 und August 2002.

Abb.37: Antimonkonzentration aller Messstellen des Untersuchungsgebietes Schwaz, aus Messungen vom September 1999, Juni 2001,August 2001 und Februar 2002.

8.4 Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Primäre und sekundäre sulfidische Erzminerale im Schwazer Dolomit im Bereich Brixlegg-Schwaz (Formeln aus FRIMMEL 1989).
- Tab. 2: Oxidische Sekundäre Kupferminerale im Schwazer Dolomit im Bereich Brixlegg-Schwaz (Formeln aus FRIMMEL 1989).
- Tab. 3: Nicht-Kupferminerale im Schwazer Dolomit im Bereich Brixlegg-Schwaz (Formeln aus FRIMMEL 1989).
- Tab. 4: Zeittafel zur Entwicklung der hydrogeologischen Markierungstechnik (aus Hasche 2001, nach Käss 1991)
- Tab. 5: Optimale Anregungs- und Emissionswellenlängen von FluoSpheres Mikrosphären (aus MOLECULAR PROBES 2002c).
- Tab. 6: Abweichung des Mikrosphärenendurchmessers (aus MOLECULAR PROBES 1999b).
- Tab. 7: Zusammenhang zwischen wässrigen NaCl-Lösungen und ihrer Dichte bei 15 °C (aus KÄSS 1998)
- Tab. 8: Konzentrationen für die Kalibrierung von Uranin; hergestellt aus Stammlösung I (100 mg/L) und Stammlösung II (0,1 mg/L).
- Tab. 9: Statistische Kennwerte zu den ermittelten Abflüssen aus dem Blindschacht des Georgi Unterbau
- Tab. 10: Eingabestellen, -zeiten und -mengen der Tracer des Multitracerversuches Großkogel/Tirol
- Tab. 11: Pumpenleistungen und geförderte Wassermengen
- Tab. 12: Zeitliche Veränderung der Chlorid- und Natriumkonzentrationen [mg/L] im Blindschacht bzw. dem Großen See und dem Großen See Süd des Georgi Unterbau vom Dezember 2000 bis Februar 2002.
- Tab. 13: Ergebnisse der aliquoten Auszählung der Filterproben für die Bestimmung der Mikrosphären.
- Tab. 14: Ergebnisse aus den Tracerdurchgangskurven für die Mikrosphären der Farbe "green".
- Tab. 15: Ergebnisse aus den Tracerdurchgangskurven für Uranin (Februar 2002).
- Tab. 16: Härtestufen nach KLUT-OLSZEWSKI aus HÖLTING (1992)
- Tab. 17: Antimonkonzentrationen im gesamten Untersuchungsgebiet von Messungen im September 1999, Juni und August 2001 und Februar 2002.

8.5 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
µS	Mikrosiemens
a	Jahr
Abb.	Abbildung(en)
Anh.	Anhang
Anl.	Anlage(n)
Bd.	Band
BMN	Bundesmeldenetz
ca.	cirka
cm³	Kubikzentimeter
cm	Zentimeter
d	Tag
ENE	Ostnordost
g	Gramm
Jg.	Jahrgang
K	Grad Kelvin
kg	Kilogramm
L	Liter
m	Meter
m²	Quadratmeter
min	Minute
Mitt.	Mitteilung(en)
mL	Milliliter
mm	Millimeter
mS	Millisiemens
NE	Nordost
nm	Nanometer
NN	Normalnull
NW	Nordwest
pers.	persönlich(e)
PVC	Polyvinylchlorid
s	Sekunde
S.	Seite(n)
SE	Südost
St.	Sankt
SW	Südwest
t	Tonne(n)
Tab.	Tabelle(n)
Taf	Tafel(n)
ü.	über
Var.	Variation
WSW	Westsüdwest
z.B.	zum Beispiel
v _a	Abstandsgeschwindigkeit