

Schwermetall-Konzentrationen im Jahresverlauf von 5 Quellen in Strass i. Z., Tirol

Felix Thalheim¹; Wolfram Mostler²; Rupert Ebenbichler¹

¹) *Wasser Tirol – Wasserdienstleistungs-GmbH, Leopoldstraße 3, 6020 Innsbruck*

²) *Technisches Büro für Geologie Mag. Wolfram Mostler, Innrain 6-8/Top 35, 6020 Innsbruck*

Abstract

Five springs that contribute to the water supply system of a rural community in the Tyrolean Zillertal were investigated in terms of their respective heavy metal concentrations. As these partly toxic elements can prove to be a real challenge especially for smaller communities in both financial and sanitary regard, a deeper understanding of possible seasonal fluctuations/variations of these particular elements was desired and funded. The main objective was to evaluate whether there are certain predictable seasonal patterns or not, chiefly in order to obtain information on the appropriate mixing rate and, thereby, the amount of water that the community has to import.

Therefore, 52 samples (with one sample every week) were analysed with specific regard to their antimony, arsenic and copper concentrations, amongst many others. The obtained values were subsequently analysed using several statistical and comparative tools.

The results indicate that there are no clearly identifiable seasonal patterns in the concentration of those elements, at least not based on a weekly sample rate, which may be partly due to the small catchment area and high reactivity of the springs. Although there are clearly observable changes in concentration, these cannot be attributed directly and specifically to a certain cause, as most of the analytic values appear to be rather random. Nevertheless, it was possible to define upper and lower limits with respect to the antimony concentrations and to calculate certain mixing rates that the community can use to 'stay safe'.

Einleitung

Schwermetalle im Trinkwasser können ein erhebliches Gesundheitsrisiko darstellen, wenn sie in zu hoher Konzentration enthalten sind. Die gesundheitlichen Auswirkungen von insbesondere Antimon, Arsen, Blei und Chrom sind teilweise schon in geringen Mengen im Bereich weniger hundert Milligramm dramatisch, weswegen die österreichische Trinkwasserverordnung die entsprechenden Parameterwerte sehr niedrig ansetzt und im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte auch an den neusten Stand der Wissenschaft angepasst wurde.

Allgemein ist Österreich in der glücklichen Lage, dass nur in wenigen Gebieten die Metall- und Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser die jeweiligen Schwellen- oder (Indikator-)Parameterwerte überschreiten, was vornehmlich in den ausgedehnteren Porenaquiferen im Osten Österreichs der Fall ist (BMLFUW, 2012). Tirol im Speziellen weist demnach nur an vereinzelt Grundwasser-Messstellen Überschreitungen an z. B. Arsen (Inntal, Ötztal), Nickel (Ötztal) oder Mangan (Inntal, Zillertal, Brixental) auf.

In Hinblick auf Quellen hingegen liegen derart umfassende, kartografisch erfasste Analysen bislang nicht vor. Allerdings ist bekannt, dass unter anderem in Tirol insbesondere etliche Blockgletscherquellen, vorzugsweise bei aktiven Exemplaren, erhöhte Schwermetallkonzentrationen aufweisen (z. B. Krainer,

2014; Thies et al., 2018), wobei diese Quellen, wenn überhaupt, dann eher für Einzel- als für Gemeindewasserversorgungen verwendet werden. Allerdings können je nach den geologischen Gegebenheiten auch niedriger gelegene Quellen Parameterwertüberschreitungen aufweisen, wie sich in den letzten Jahren in einigen Wasserversorgungsanlagen zeigte. Die betroffenen Gemeinden müssen dann Maßnahmen zur Sicherung der Einhaltung der Parameterwerte ergreifen, was sie beispielsweise durch anteilige Mischung mit zugekauftem Wasser, Einrichtung von Filteranlagen oder Erschließung anderer unbelasteter Ressourcen erreichen.

Dies ist in der Gemeinde Strass i. Z. der Fall, die eine Wasserversorgungsanlage betreibt, welche von vier Quellen gespeist wird, wobei eine weitere Quelle als Reserve dient. In jenen wurden erhöhte Werte von insbesondere Antimon beobachtet, die den gesetzlich festgelegten Parameterwert der Trinkwasserverordnung von 5 µg/l überschreiten. Aus diesem Grunde wird Wasser aus einer Nachbargemeinde anteilig hinzugemischt.

Über das Verhalten von Schwermetallen im Quellwasser im Jahresverlauf gibt es bislang kaum genauere Untersuchungen, die aktuellere internationale Forschung beschäftigt sich offenbar eher mit der Herkunft und dem saisonalen Verhalten anthropogener Kontaminationen in Grund- und Flusswasser (z. B. Li et al. 2013; Bhardwaj et al. 2017). Da demzufolge nicht klar ist, ob und inwiefern die Konzentrationen in Abhängigkeit von online überwachbaren Parametern wie Schüttung, Wassertemperatur, pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit schwanken, stellt sich die Frage nach den wirtschaftlich optimalen und gesundheitlich sicheren Mischungsverhältnissen. Daher wurde von der Gemeinde Strass in Kooperation mit der Abteilung Wasserwirtschaft des Landes Tirol eine Untersuchung dieser Quellen beschlossen.

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich direkt am Übergang von Zillertal zu Inntal im Westen der Gemeinde Strass im Zillertal, Tirol, Österreich. Im unteren Bereich eines Hanges, der aus Westen hinunterzieht, befinden sich die vier Quellen, die zur Wasserversorgung genutzt werden (siehe **Abb. 10**). Diese sind die **Annaquellen 1-3**, die **Astholzquelle**, die **Dorfbrunnenquellen 1+2** und der rechte Ast der **Rainerquelle II**. Die derzeit nicht zur Wasserversorgung genutzte **Brettfalltunnelquelle** hingegen befindet sich im Brettfalltunnel und wurde bei dessen Errichtung gefasst.

In der Wasserversorgungsanlage (WVA) Strass i. Z. wurde 2011 ein Wasserdatenmanagement-System installiert, sodass hochaufgelöste Daten der einzelnen Wasserflüsse im System vorliegen, von denen vor allem die Wassermengen der Annaquelle, Astholzquelle und Dorfbrunnenquelle + Rainerquelle für die weiteren Betrachtungen relevant sind.

Geologisch-Hydrogeologische Verhältnisse im Umfeld von Quellen der Gemeinde Strass

Die geologischen Geländeaufnahmen im Umfeld der Quellen, die für die Trinkwasserversorgung der Gemeinde Strass von Bedeutung sind, lassen aus geomorphologischer Sicht von Nord nach Süd folgende Gliederung erkennen.

Zunächst gibt den steilen, bewaldeten Nordabschnitt mit sehr steilen, teilweise fast senkrechten Felswänden, auf denen sich die Kapelle Maria Brettfall befindet. Die Steilwände werden von einem Dolomitgestein mit überwiegend steilstehenden Trennflächen gebildet, das in den Hangfußlagen

kegelartige Hangschuttkörper aus Dolomitschutt in kiesig-sandiger bis steiniger, teilweiser blockiger Zusammensetzung ausgebildet.

Taleinwärts, an diesen steilen kompakten Abschnitt der Hangflanke angrenzend, verflacht das nahezu durchgehend bestockte Gelände, das auch nur mehr wenige Festgesteinsreste innerhalb einer flächig verbreiteten Lockergesteinsüberlagerung erkennen lässt, und greift zunehmend flacher werdend aus der Westflanke weiter in das Zillertal vor. In diesem Gelände sind mehrere Meter breite und wenige Meter tiefe in Falllinie ausgebildete rinnenartige Einschnitte ganz markante morphologische Formen. Die Zusammensetzung dieses Abschnittes lässt nahezu ausschließlich Lockermaterial erkennen, zudem ist dieses sehr häufig mit Großblöcken aus Dolomit durchsetzt. Im Süden an diesen Verflachungsbereich schließt wiederum ein deutlich steilerer bewaldeter Geländeabschnitt an, der aus demselben Festgestein (Dolomit) aufgebaut ist wie der Nordabschnitt, jedoch nicht mehr die Steilheit dieses Körpers besitzt.

Geologischer Aufbau der Hangflanke

Der nördliche wie auch der südliche Abschnitt wird vom sogenannten Schwazer Dolomit dominiert. Der Schwazer Dolomit (Devon) ist ein Karbonatgestein, das mittelgrau bis beige gefärbt, dickbankig, seltener plattig, örtlich bituminös, teilweise brekziös ausgebildet ist. Verwitterungsspuren in Form von bräunlichen limonitischen Überzügen geben diesem Gestein eine rötliche Farbe. Geringfügige Verkarstungserscheinungen und nicht selten tonig verfüllte Harnischklüfte sind häufig. Im nördlichen Abschnitt weist er einen deutlich massigen Charakter mit klar definierten steil NNE-fallenden Schichtflächen auf. Offene Klüfte sind häufig zu erkennen. Dieses Gestein bildet sowohl die westliche als auch die östliche Flanke im untersten Abschnitt des Zillertals, wobei insbesondere im westlichen Abschnitt dieses Gestein in Hinblick auf abbauwürdige Vererzungen bekannt ist.

Das Liegende des Schwazer Dolomits in Form der höheren Wildschönauer Schiefer tritt nur an wenigen Stellen im Norden am Übergang zum Flachabschnitt sowie in Resten innerhalb des Flachabschnittes auf. Die Lagerung ist ebenfalls steil NNW fallend. Die Wildschönauer Schiefer treten dabei sowohl als chloritische Phyllite wie auch als quarzitischer Schiefer auf.

Im Hangenden des Schwazer Dolomits sind auch Reste von Permoskyth in Form roter Sand- bis Schluffsteine aufgeschlossen.

Die Grundmasse, welche den Lockergesteinskörper aufbaut, der sich zwischen den Dolomitgesteinskörpern im Norden und Süden eingeschaltet hat, besteht aus Schutt sandig-kiesiger bis blockiger Zusammensetzung. Es handelt sich dabei um Dolomitschutt ohne Fremdkomponenten, aus Schutt, der sich aus Dolomit und phyllitischen Komponenten der Wildschönauer Schiefer zusammensetzt, aber auch stellenweise aus Schutt, der neben Dolomit und Wildschönauer Schiefer auch Komponenten aus roten Sand- und Schluffsteinen führt. Grundmoränenablagerungen, dem Schwazer Dolomit im Norden teilweise auflagernd, finden sich innerhalb der Lockergesteinsmasse im mittleren Abschnitt nicht mehr.

Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine

Betrachtet man die Gesteine im Untersuchungsgebiet in Hinblick auf ihre hydrogeologischen Eigenschaften, so ist der Schwazer Dolomit nicht nur durch seine ausgeprägte Klüftung, sondern auch durch kleinlumige Verkarstungen als ein potentielles Aquifergestein zu sehen.

Die Lagerung des Schwazer Dolomit-Gesteins bzw. seine Schichtungs- und Bankflächen fallen steil nach N bis NNW ein bzw. stehen E-W-streichend nahezu saiger. Die Bankungsflächen zeigen häufig Öffnungsweiten bis in den cm-Bereich und darunter, bieten Infiltrationsmöglichkeiten und sind durchaus geeignet, einen Bergwasserkörper aufzubauen. Hinweise auf ergiebige Karstquellen gibt es aber nicht.

Die elektrischen Leitfähigkeiten der Quellen schwanken zwischen 367 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und entsprechen damit den elektrischen Leitfähigkeiten karbonatischer Gesteine, insbesondere jener dolomitischer Zusammensetzung, was sich auch aus den hydrochemischen Analysen der Quellwässer mit einem typischen Ca-Mg Verhältnis von 2:1 ergibt.

Die Wildschönauer Schiefer als Chloritphyllite bis quarzische Phyllite besitzen hingegen kein Potenzial, Wasser zu führen, und sind hier als (markante) Wasserstauer anzusehen. Sie befinden sich im Liegenden der Lockergesteinsdecke des Mittelabschnitts.

Die Lockergesteinsdecke mit ihrer sandig-kiesigen bis steinig-blockigen Zusammensetzung zeigt immer wieder lagenweise auch deutlich schluffige Anteile. Diese besitzt ebenfalls das Potenzial, Niederschlagswässer zu speichern und weiterzuleiten. Ihre Mächtigkeit ist nicht bekannt, dürfte aber im Bereich mehrerer Meter bis 10-er Meter liegen.

Als Quelle der überdurchschnittlichen Schwermetallbelastung der Quellen können gesehen werden:

- Der Schwazer Dolomit mit vorwiegend Fahlerz- und Spateisenführung.
- In den Wildschönauer Schiefen wurden örtliche Vererzungsspuren in Form von feindispersen Kupferkies- und Pyritanteilen beschrieben.
- Alte Bergbauhalden stellen konzentrierte Anhäufungen von Vererzungen.
- Bergbau-Haldenmaterial mit Azurit- und Malachitspuren wurde augenscheinlich als Schüttung für die Forstwege verwendet.

Ergebnis der geologisch-hydrogeologischen Untersuchungen

Eine detaillierte geologische Geländekartierung in Kombination mit den Erkenntnissen der geologischen Aufnahmen im Zuge von Vorerkundungen und der Tunnelvortriebsdokumentation des Brettfalltunnels, welcher das Untersuchungsgebiet teilweise von N nach S durchörtert, ergeben ein plausibles Bild der Zusammensetzung und Verbreitung jenes Aquifers, der die 5 zu betrachtenden Quellen der WVA Strass speist. Insgesamt zeigt sich ein Körper, wie er ganz besonders auch im schattierten Geländemodell der Laserscanaufnahmen deutlich wird, als eine nach NE in das Zillertal vorgeifende Zunge, die von Flanken, bestehend aus Schwazer Dolomit, begrenzt wird. Lediglich am nördlichen Rand zeigt diese Grenze auch Wildschönauer Schiefer und Buntsandstein als Festgestein. Vereinzelt finden sich auch an der Basis dieser Lockergesteinsmasse an mehreren Stellen Wildschönauer Schiefer. Jener von der westlichen Flanke des Zillertals mit deutlich begrenzten steilen Abrissflächen vorbauende zungenartige Körper mit seiner Lockergesteinsdecke und den auflagernden Grobblöcken vermittelt eine Massenbewegung, die auf alte (fossile) Berg- oder Felssturzprozesse zurückzuführen ist und die durch Murgangprozesse überprägt ist. Die Überlagerung des (kompetenten) Schwazer Dolomits auf den inkompetenten Wildschönauer Schiefen kann als Abscherhorizont gesehen werden, der diese Massenbewegung begünstigt hat. Am Fuße dieser Massenbewegung (im Zungenbereich) treten neben diffusen Vernässungen die besagten

Quellen aus. Nicht zuletzt zeigt auch die Analytik der Verweildauer der Quellwässer auf, dass es sich bei den untersuchten Quellen um solche handelt, die eine relativ geringe Verweildauer aufweisen, was für ein eher begrenztes oberflächennahes Einzugsgebiet spricht, welches sich wiederum zwanglos mit dem Körper der Rutschmasse in Einklang bringen lässt.

Abb. 10: *Digitales Geländemodell (tiris) des Gebietes südlich von Strass i. Z. mit geologischer Karte*

Methodik

Im Verlaufe eines Jahres (Anfang Februar 2017 bis Ende Januar 2018) wurde wöchentlich eine Probennahme (weitestgehend im Abstand von sieben Tagen) durchgeführt sowie die Vor-Ort-Parameter aufgezeichnet.

Es liegen also für jede der fünf Quellen 52 Datensätze vor, dabei wurden bis zu 32 Parameter bestimmt.

In der Folge wird allerdings auf der Seite der Vor-Ort-Parameter nur auf Schüttung (Q), elektrische Leitfähigkeit (LF), Wassertemperatur (WT) und pH-Wert (pH) eingegangen und bei den Ergebnissen der chemischen Analysen primär auf die Konzentrationen von Antimon (Sb), Arsen (As) und Kupfer (Cu).

In Hinblick auf die Datenauswertung wurden zunächst die wichtigsten Parameter übersichtlich dargestellt, die Wässer hydrochemisch charakterisiert und zusätzlich Wetterdaten erhoben, die für den Zeitraum und das Projektgebiet repräsentativ sind.

Weiterführend wurden für alle Quellen **Jahresgangskurven** der zentralen Parameter erstellt. Weiterhin wurden **Autokorrelationsanalysen** dieser Parameter durchgeführt, um die Korrelation der Datenreihen mit sich selber darzustellen und zu untersuchen, ob es auffällige Abhängigkeiten und Zyklizitäten gibt oder die Daten eher zufällig schwanken. Dazu wurde die ACF-Funktion des Excel-Plug-Ins ‚RealStats‘ verwendet.

Um mögliche Zusammenhänge/Abhängigkeiten zwischen den Schwermetall-Konzentrationen untereinander sowie mit den Parametern WT, LF, pH-Wert und vor allem Q zu erkennen, wurden über das in Excel integrierte Datenanalyse-Tool **Korrelationsmatrizen** für diese Parameter erstellt. Ergänzend dazu wurden **Punktkorrelationen** erstellt. In einem weiteren Schritt wurden **Kreuzkorrelationen** durchgeführt, die es erlauben, mögliche Auswirkungen von einem Parameter auf den anderen darzustellen, die mit einem zeitlichen Versatz („Lag“) auftreten. Zur Berechnung der Kreuzkorrelations-Funktionen wurde die Funktion ‚XCORR‘ des Programmes MATLAB verwendet.

Im Folgenden wird schwerpunktmäßig auf jene Quellen eingegangen, die als am repräsentativsten bzw. interessantesten erachtet wurden.

Ergebnisse

In der folgenden Tab. 1 sind die zentralen Parameter der Untersuchung dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Annaquelle mit 3,8 l/s im Mittel die mit Abstand höchste Schüttung aufweist, gefolgt von der Brettfalltunnelquelle (1,2 l/s), der Astholzquelle (0,8 l/s), der Rainerquelle (0,4 l/s) und der Dorfbrunnenquelle, welche mit durchschnittlich 0,3 l/s die geringste Schüttung aufweist. Die Astholzquelle weist den mit Abstand höchsten Schüttungsquotienten (>40) auf, die Brettfalltunnelquelle den geringsten (5). Die Lufttemperaturen (LT) wurden vor Ort nur an einer Stelle abgelesen und vom Probenehmer für alle Quellen gleich angegeben. Das Mittel der LT beträgt 9,1 °C. Bei den Wassertemperaturen ist auffällig, dass die Annaquelle mit 7,8 °C die durchschnittlich geringste Temperatur zeigt und zudem am wenigsten schwankt (2,7 °C). Allgemein liegen aber bis auf die Brettfalltunnelquelle, welche im Mittel über 1 °C höher liegt, alle Quellen in einem ähnlichen Temperaturbereich. Auch die weiteren Schwankungsbereiche sind mit 4,4 °C (Rainerquelle) und 5,3 °C (Brettfalltunnelquelle) ähnlich.

Tab. 1: Grafische Darstellung der Minima, Maxima, Mittelwerte und Mediane der Messungen der wichtigsten Parameter sowie deren Anzahl

Quelle		Manuelle Messungen			Ausgewählte Parameter											
					LF	pH	Sb	As	Cu	HCO ₃	Ca	Mg	Na	Cl	NO ₃	SO ₄
		Q [l/s]	LT [°C]	WT [°C]	µS/cm	-	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Annaquelle	Minimum	1,3	-2,0	6,5	315	8,8	7,7	2,4	1,9	202	37	22,6	3,7	6,5	12,5	9,5
	Maximum	7,9	26,0	9,2	403	9,2	9,5	3,7	4,8	209	40	24,5	4,9	9,0	14,3	15,4
	Mittel	3,8	9,1	7,8	383	9,0	8,4	2,9	3,1	206	38	23,4	4,3	7,8	13,2	13,1
	Median	3,4	9,0	7,8	384	9,0	8,4	2,9	3,1	206	38	23,4	4,4	8,0	13,0	14,2
	Anzahl	50	52	52	40	40	52	52	52	12	12	12	12	12	12	12
Astholzquelle	Minimum	0,1	-2,0	5,5	367	8,3	9,6	1,8	4,9	182	37	20,0	6,7	9,9	13,2	9,4
	Maximum	4,1	26,0	10,1	499	9,4	12,4	2,5	9,3	229	51	26,0	14,0	29,0	16,7	50,2
	Mittel	0,8	9,0	7,9	434	9,0	11,1	2,0	6,3	204	44	23,0	9,8	18,2	15,1	23,1
	Median	0,5	8,5	8,0	439	9,0	11,1	2,0	6,4	202	44	23,3	9,0	15,3	15,3	20,7
	Anzahl	51	51	51	39	38	50	50	50	12	12	12	12	12	12	12
Dorfbrunnen- quelle	Minimum	0,1	-2,0	5,5	379	8,6	5,8	1,0	1,0	221	41	24,7	0,9	1,4	15,6	5,9
	Maximum	1,3	26,0	10,7	430	9,1	7,5	1,3	2,3	255	45	28,1	1,5	2,4	23,6	9,9
	Mittel	0,3	9,1	8,1	410	8,7	6,6	1,1	1,4	239	43	26,5	1,2	1,9	18,5	8,0
	Median	0,2	9,0	7,9	411	8,7	6,5	1,1	1,3	238	43	26,6	1,2	1,8	18,3	7,9
	Anzahl	51	51	51	39	39	51	51	51	11	11	11	11	11	11	11
Reinerquelle	Minimum	0,2	-2,0	5,9	416	8,6	5,5	1,0	2,1	209	43	22,8	6,2	10,8	15,4	14,0
	Maximum	1,2	26,0	10,3	471	9,1	8,7	1,4	5,3	246	49	25,7	8,8	17,7	17,6	24,4
	Mittel	0,4	9,1	7,9	446	8,8	8,1	1,2	2,8	224	45	24,7	7,3	13,7	16,6	18,3
	Median	0,3	9,0	8,0	449	8,7	8,2	1,2	2,7	220	45	24,7	7,1	13,0	16,6	17,4
	Anzahl	51	51	51	39	39	51	51	51	11	11	11	11	11	11	11
Brettfall- tunnelquelle	Minimum	0,4	-2,0	6,6	384	7,8	12,1	6,6	1,0	253	52	31,2	5,7	12,1	9,9	36,9
	Maximum	2,0	26,0	11,9	548	9,1	15,3	9,3	3,6	264	54	33,0	7,1	14,2	11,7	45,3
	Mittel	1,2	9,1	9,2	513	8,7	13,8	7,5	1,4	258	53	31,8	6,1	13,0	10,5	40,7
	Median	1,2	9,0	9,1	513	8,7	13,9	7,4	1,3	257	53	31,7	6,1	13,0	10,3	40,4
	Anzahl	52	52	52	40	41	52	52	52	12	12	12	12	12	12	12

Die elektrischen Leitfähigkeiten zeigen an, dass die Brettfalltunnelquelle am stärksten und die Annaquelle am geringsten mineralisiert ist. Das zeigt sich unter anderem darin, dass bei der Brettfalltunnelquelle die mit Abstand höchsten Durchschnittswerte von Sb und As sowie auch Hydrogenkarbonat und Sulfat auftreten. Die mit Abstand höchsten Cu-Werte sind bei der Astholzquelle festzustellen (bis 9,3 µg/l), allerdings liegen sie nie über dem Parameterwert von 2 mg/l. Der As-Grenzwert von 10 µg/l wird ebenfalls von keiner Quelle überschritten.

Anders verhält es sich allerdings bei den Sb-Konzentrationen, die bei jeder Probe den Parameterwert von 5 µg/l überschreiten. Dabei weist die Dorfbrunnenquelle mit durchschnittlich 6,6 µg/l noch die geringste Belastung auf.

Hydrochemische Charakterisierung

Zur Charakterisierung der Wässer bzw. deren Vergleichbarkeit wurden u. a. Piper- und Stiff-Diagramme erstellt (**Abb. 11**, **Abb. 12**). Dazu wurden die Mittelwerte der gängigen Haupt- und Nebenionen verwendet.

Im Piper-Diagramm wird der ähnliche Chemismus der fünf Quellen deutlich, sie werden auf der Kationenseite klar von Magnesium und Calcium dominiert, auf der Anionenseite von Hydrogenkarbonat. Die Dorfbrunnenquelle zeigt dies besonders stark, die Brettfalltunnelquelle fällt durch einen etwas höheren Gehalt an Sulfat auf, die Astholzquelle durch verhältnismäßig erhöhte Werte von Natrium, Kalium und Chlorid. Diese Beobachtungen lassen sich durch das Stiff-Diagramm bestätigen. Zudem wird in diesem die geringe Mineralisierung des Wassers der Annaquelle deutlich, ebenso zeigt sich die verhältnismäßig erhöhte Mineralisierung der Brettfalltunnelquelle.

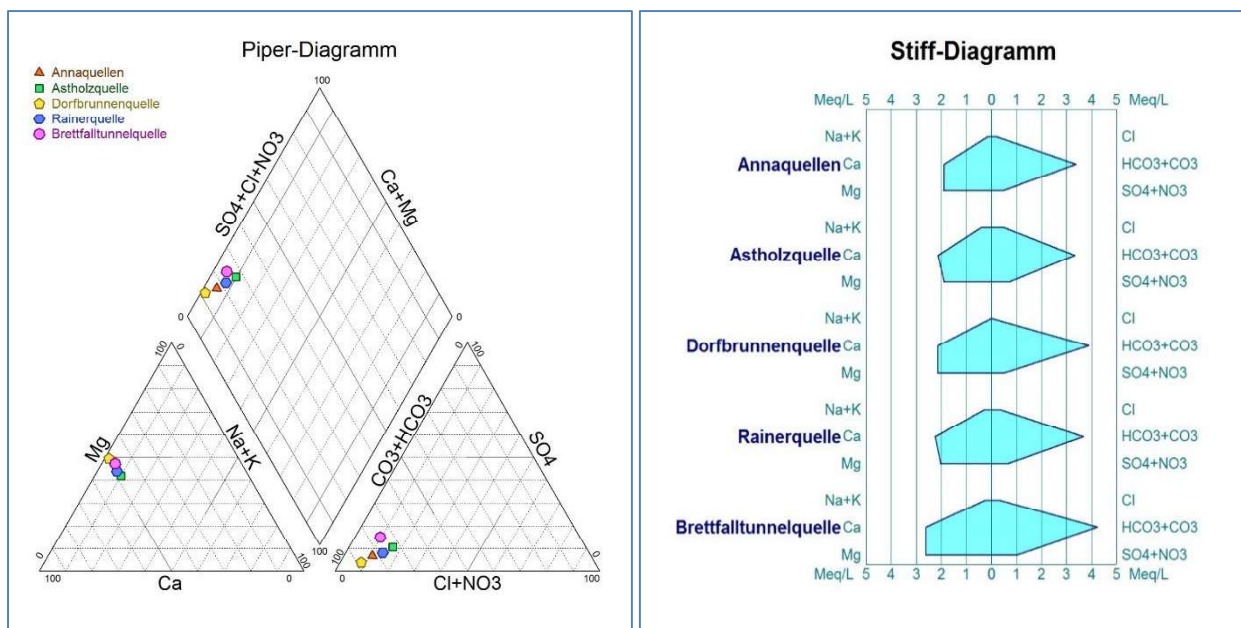


Abb. 11: Piper-Diagramm der wichtigsten Kat- und Anionen

Abb. 12: Stiff-Diagramm der wichtigsten Kat- und Anionen

Im Wesentlichen lassen sich die Wässer aller fünf Quellen als Calcium-Magnesium-Hydrogenkarbonat-Wässer charakterisieren.

Niederschlagssituation

Aufgrund der Nähe zum Einzugsgebiet der Quellen und der ähnlichen Höhenlage sowie der guten optischen Übereinstimmung mit den Schüttungsganglinien wurden in weiterer Folge zwecks Vergleich die Daten der Station Schlitterberg herangezogen. Bei diesen Daten (siehe **Abb. 20**) sind im Sommerhalbjahr 2017 die starken Niederschläge Ende Juli, Mitte August und Anfang September, die über mehrere Tage hinweg anhielten, besonders auffällig. Im Winterhalbjahr sind insbesondere die starken, mehrtägigen Niederschlagsereignisse Mitte Januar 2018 markant, die zum Aufbau einer fast meterhohen Schneedecke führten (siehe ebenfalls **Abb. 20**).

Analyse der Jahregänge

Bei der **Annaquelle** (Abb. 13) ist erkennbar, dass die WT dem saisonalen Zyklus folgt, im Sommer (Juli/August) die Höchstwerte und im Winter (Januar/Februar) die Minimalwerte erreicht. Die Schüttungsganglinie weist drei Bereiche mit Maxima auf, einmal Ende März, einen ausgedehnten Bereich mit hohen Schüttungen Ende Juni bis Mitte Oktober und einen Bereich im Januar 2018. Dazwischen liegen relative Niedrigwasserbereiche. Die LF nimmt bei längeren Phasen mit hoher Schüttung erkennbar ab (vor allem im Sommer 2017 und Januar 2018), steigt bei geringeren Schüttungen an. Der pH-Wert hingegen verhält sich ausgesprochen ausgeglichen, weist einen leicht steigenden Trend auf.

Abb. 13: grafische Darstellung der wichtigsten Messparameter der Annaquelle

Die Sb-Werte sind ebenfalls sehr konstant, zeigen sich nur bedingt von der Schüttung beeinflusst. Einzig Anfang September kommt es zu einem klar erkennbaren Absinken aufgrund anhaltend hoher Schüttung. Die As-Werte variieren im Jahresverlauf geringfügig, es gibt nur einen auffälligen Ausreißer Anfang September. Die Cu-Werte variieren während Phasen mit höherer Schüttung stärker, vor allem im September und während der darauffolgenden Phase mit schwankender Schüttung (Ende Oktober bis Anfang Dezember).

Die Daten der **Astholzquelle** (Abb. 14) zeigen ebenfalls, dass die WT dem saisonalen Zyklus folgt. Die Schüttungsganglinie weist drei Bereiche mit Maxima auf, einmal Mitte März, einen Bereich mit hohen Schüttungen Mitte August bis Anfang September und einen Bereich im Januar 2018. Dazwischen liegen ebenfalls relative Niedrigwasserbereiche. Die LF nimmt bei höheren Schüttungen deutlich erkennbar ab, steigt bei geringeren Schüttungen an. Der pH-Wert hingegen verhält sich ausgesprochen ausgeglichen, zeigt im Winter geringfügig höhere Werte.

Abb. 14: grafische Darstellung der wichtigsten Messparameter der Astholzquelle

Die Sb-Werte weisen eine Schwankungsbreite von etwa 3 µg/l auf. Bei höheren Schüttungen kommt es teilweise zu höheren Werten (z. B. Mitte März und Anfang September). Die As-Werte variieren im Jahresverlauf nur geringfügig, sie liegen im Winter 2017 und 2018 etwas höher und nehmen dazwischen (mit Unterbrechungen) ab. Die Cu-Werte schwanken vergleichsweise stark, variieren vor allem während Phasen mit höherer Schüttung, insbesondere im Sommer. Dabei scheinen höhere Schüttungen tendenziell höhere Cu-Konzentrationen zu bedingen.

Für die **Wasserversorgung** bedeuten die Sb-Werte in den Quellen letztlich, dass es in jedem Fall nötig ist, eine gewisse Menge an unbelastetem Wasser (Annahme: Sb-Konzentration von 0,0 µg/l) zuzumischen, um den Zielwert 5 µg/l zu erreichen. Bei der **Astholzquelle** sind bei einer Schwankung der Sb-Konzentration zwischen 9,6 und 12,4 µg/l zwischen 48 und 60 % Wasser zuzumischen. Für das **Mischwasser** der Anna-, Dorfbrunnen und Rainerquelle im **HB Dorf** (anteilig über die mittleren Schüttungen berechnet) ergibt sich, dass zum Erreichen des Zielwertes zwischen 32 und 46 % Wasser zugeführt werden müssen.

Autokorrelation

Bei den Autokorrelationen der **Annaquelle** (**Abb. 15**) ist feststellbar, dass die Datenreihe pH-Wert eine sehr starke Korrelation mit sich selber aufweist. Eine ebenfalls höhere Autokorrelation weist die Datenreihe WT (hellblaue Kurve) auf, wobei hier auch der saisonale Verlauf zu erkennen ist, der sich in dem deutlichen Ausschlag in den negativen Bereich (um Lag 20) und dem folgenden positiven Ausschlag (um Lag 43)

zeigt. Die Schüttung weist ebenfalls auffällige Extrema auf, was die drei Bereiche mit höheren Werten widerspiegelt. Beim Blick auf die LF ist erkennbar, dass sich diese gegenüber der Schüttung antizyklisch verhält. Die Parameter Sb und Cu weisen die geringsten Autokorrelationen auf, es ist keine Periodizität ableitbar, die Schwankungen stehen in keinem klaren Bezug zu anderen Werten. Die As-Werte hingegen weisen höhere Autokorrelation auf, zeigen eine gewisse Periodizität, doch eine Synchronität mit anderen Parametern lässt sich nicht erkennen.

Abb. 15: Autokorrelation der wichtigsten Parameter der Annaquelle

Die Autokorrelationen der restlichen Datenreihen bringen keine wesentlichen weiteren Erkenntnisse, weswegen hier auf eine gesonderte Darstellung verzichtet wird.

Korrelationsmatrix und Punktkorrelation

Die Korrelationsanalyse der Annaquelle (**Tab. 2**) zeigt, dass die meisten Parameter nur schwach positiv oder negativ korreliert sind oder nahezu gar nicht.

Tab. 2: Korrelationsanalyse der wichtigsten Parameter der Annaquelle

Korrelation Annaquellen							
	Q	LF	WT	Sb	As	Cu	pH
Q	1						
LF	-0,24	1					
WT	0,08	0,61	1				
Sb	-0,36	0,25	-0,20	1			
As	0,13	0,16	0,20	0,23	1		
Cu	0,27	-0,18	-0,14	-0,20	-0,34	1	
pH	0,47	-0,21	0,07	-0,38	-0,29	0,24	1

Die höchste positive Korrelation weisen LF und WT auf (**Abb. 16**), steigende WT bedeuten folglich tendenziell steigende LFs. Die schwache negative Korrelation von Q und Sb ist auch bei der Punktkorrelation ersichtlich (**Abb. 17**), allerdings ist das Bestimmtheitsmaß R^2 ausgesprochen klein. Vor allem bei hohen Schüttungen (> 7 l/s) weist der Sb-Gehalt eine hohe Schwankungsbreite auf, bis dorthin sind die leicht mit steigender Schüttung abnehmenden Konzentrationen aber klar beobachtbar.

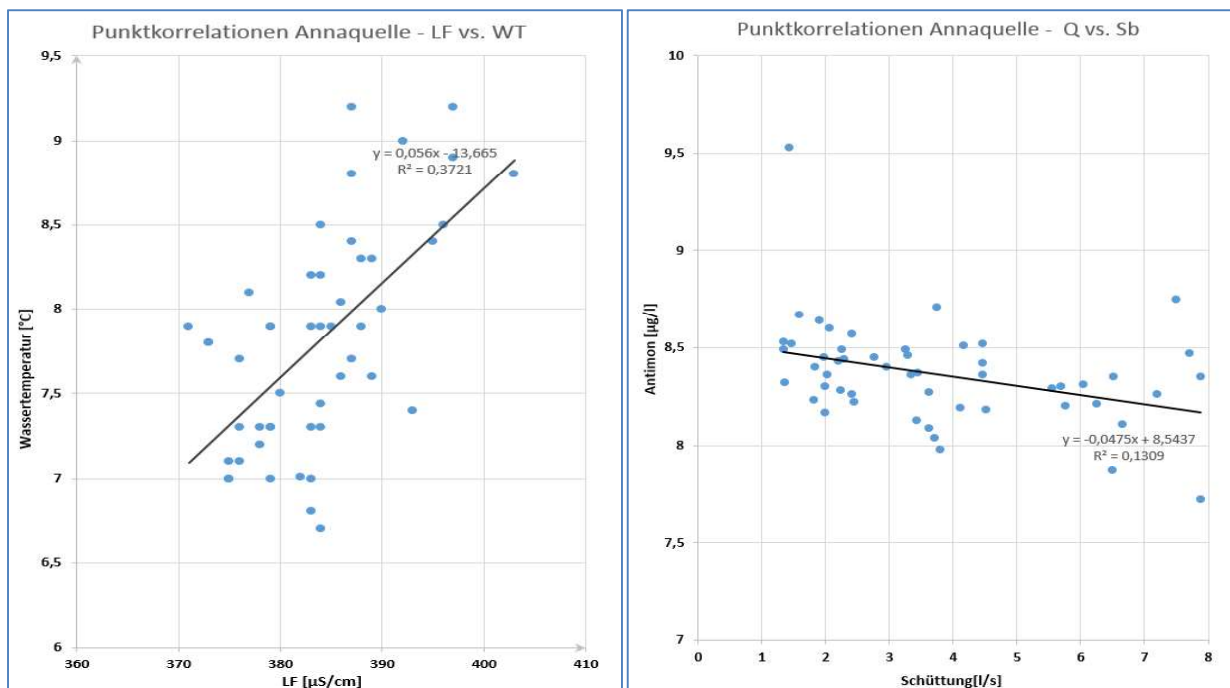


Abb. 16: Punktkorrelation der elektrischen Leitfähigkeit mit der Wassertemperatur (Annaquelle)

Abb. 17: Punktkorrelation der Schüttung mit der Antimon-Konzentration (Annaquelle)

Die **Korrelationsanalyse der Astholzquelle** (**Tab. 3**) zeigt, dass die meisten Parameter nur schwach positiv oder negativ korreliert sind (z. B. pH und Q, As und LF) oder nahezu gar nicht (Sb und WT). Allerdings weist vor allem Sb eine höhere positive Korrelation mit der Schüttung und eine höhere negative Korrelation mit der LF auf. Zudem korrelieren LF und Q auffallend negativ, ebenso wie As und WT.

Tab. 3: Korrelationsanalyse der wichtigsten Parameter der Astholzquelle

Korrelation Astholzquelle							
	Q	LF	WT	Sb	As	Cu	pH
Q	1						
LF	-0,61	1					
WT	-0,07	0,41	1				
Sb	0,59	-0,69	0,01	1			
As	-0,01	-0,26	-0,60	-0,08	1		
Cu	0,49	-0,13	0,17	0,35	-0,34	1	
pH	0,35	-0,34	-0,33	0,31	-0,12	0,30	1

Insgesamt korrelieren die Parameter bei der Astholzquelle besser als bei der Annaquelle. Das zeigt sich auch im verhältnismäßig guten Bestimmtheitsmaß in den folgenden Abbildungen. Obwohl bei niedriger Schüttung die Schwankungsbreite der LF auffallend hoch ist, ist der sinkende Trend bei steigender Schüttung klar ersichtlich (**Abb. 18**). Selbiges gilt für das Verhältnis von Schüttung und Sb-Konzentration (**Abb. 19**), wo trotz hoher Schwankungsbreite bei niedriger Schüttung die mit steigender Schüttung ebenfalls steigenden Konzentrationen klar erkennbar sind.

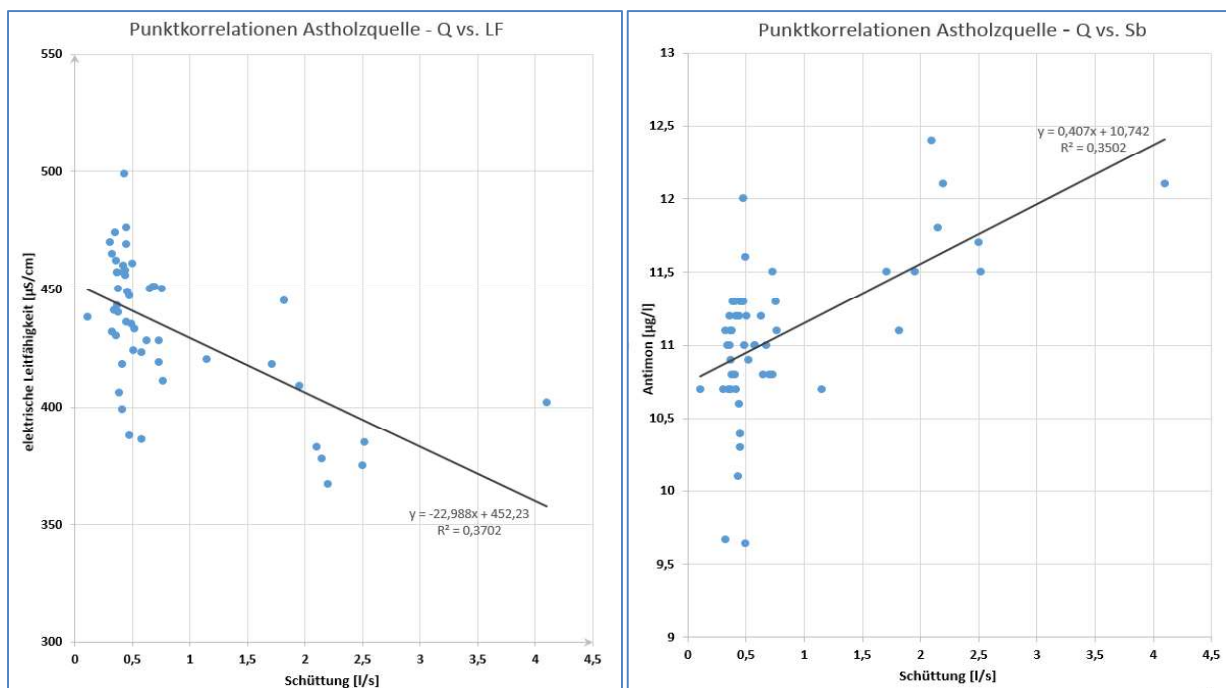


Abb. 18: Punktkorrelation der Schüttung mit der elektrischen Leitfähigkeit (Astholzquelle)

Abb. 19: Punktkorrelation der Schüttung mit der Antimon-Konzentration (Astholzquelle)

Die **Korrelationsanalysen der Rainerquelle und der Dorfbrunnenquelle** bestätigen im Wesentlichen die bisherigen Erkenntnisse, auffällig ist bei letzterer allerdings die ausgesprochen hohe positive Korrelation von Cu und Q (0,82).

Bei der **Korrelationsanalyse der Brettfalltunnelquelle** ist insbesondere die schwache positive Korrelation zwischen Q und LF auffällig, da dieses Verhalten, dass höhere Schüttungen tendenziell höhere LFs bedingen, einzig an dieser Quelle zu beobachten ist.

Kreuzkorrelation

Um mögliche Einflüsse der Niederschläge auf das Schüttungsverhalten der Quellen zu ermitteln, wurden zwischen den Tagessummen des Niederschlages der Station Schlitterberg und den Ganglinien (Tagesmittelwerte) der drei mittels IDM gemessenen Quellen (**Abb. 20**) Kreuzkorrelationen durchgeführt. Dass die Niederschlagsverhältnisse der Station Schlitterberg für das Einzugsgebiet am repräsentativsten sind, zeigte sich letztlich in der besonders guten Übereinstimmung von markanten Schüttungsanstiegen mit größeren Schneeschmelz- bzw. Niederschlagsereignissen (beispielsweise Niederschlagsereignisse Ende Juli bis Mitte September 2017, Schneeschmelze Mitte/Ende Januar 2018).

Abb. 20: *Schneehöhen und Niederschlagssummen der Station Schlitterberg und Schüttungsganglinien*

Die **Kreuzkorrelation** der Niederschlagsdaten der Station Schlitterberg mit den Schüttungsdaten der **Annaquelle** zeigt, dass nur wenige Bereiche der Kreuzkorrelations-Funktion (in der Folge XCF) über dem Grenzwert der statistischen Signifikanz ($\pm 0,1047$) liegen (**Abb. 21**).

Abb. 21: *Darstellung der Kreuzkorrelations-Funktion der Annaquelle in Abhängigkeit von den Lags*

Am signifikantesten ist der Peak nahe Lag 0, welcher zur genaueren Betrachtung vergrößert dargestellt wurde. Darin zeigt sich, dass die **beste Korrelation** der gegeneinander verschobenen Zeitreihen bei einem **Lag von 7 bis 9** auftritt (Maximum bei 8). Das bedeutet, dass die Schüttung der Annaquelle durchschnittlich acht Tage nach einem Niederschlagsereignis auf ein solches reagiert.

Die **Kreuzkorrelation** der Niederschlagsdaten der Station Schlitterberg mit den Schüttungsdaten der **Astholzquelle** zeigt, dass mehrere Bereiche der XCF über dem Grenzwert der statistischen Signifikanz ($\pm 0,1047$) liegen (**Abb. 22**). Dabei ist die hohe Korrelation nahe Lag 0 besonders signifikant.

***Abb. 22:** Darstellung der Kreuzkorrelations-Funktion der Astholzquelle in Abhängigkeit von den Lags*

Der vergrößerte Peak in **Abb. 22** zeigt, dass die **maximale Korrelation** der analysierten Zeitreihen bei **Lag 2** liegt. Also zeigen sich die Auswirkungen von Niederschlagsereignissen auf die Schüttung der Astholzquelle durchschnittlich etwa zwei Tage später. Die Analyse der Datenreihe **Dorfbrunnen-** plus **Rainerquelle** zeigte eine etwas schwächere Korrelation, wies dabei allerdings ebenfalls ein **Maximum bei Lag 2** auf.

Interpretation/Diskussion

Zur übersichtlicheren Darstellung der Korrelationsanalysen wurden in **Tab. 4** zunächst die Korrelationen der Metalle mit den Vor-Ort-Parametern ausgewertet. Dabei wurde lediglich betrachtet, ob die Korrelation zwischen den Parametern positiv oder negativ ist.

Tab. 4: Übersicht über die Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Korrelationsanalyse	Parameter	Q	WT	LF	pH
	Korrelation	+/-	+/-	+/-	+/-
Annaquelle	Sb	-	-	+	-
	As	+	+	+	-
	Cu	+	-	-	+
Astholzquelle	Sb	+	+	-	+
	As	-	-	-	-
	Cu	+	+	-	+
Dorfbrunnenquelle	Sb	+	+	-	-
	As	+	+	-	+
	Cu	+	-	-	+
Rainerquelle	Sb	-	+	+	-
	As	+	-	-	+
	Cu	+	+	-	+
Brettfalltunnelquelle	Sb	-	-	-	-
	As	-	+	-	+
	Cu	-	+	-	+
	Verhältnis	9:6	9:6	3:12	9:6

Zusätzlich wurden in der folgenden **Abb. 23** die Antimonwerte aller fünf Quellen in Bezug zum Niederschlag, den Schneehöhen und den Schüttungsganglinien der Anna- und Astholzquelle dargestellt.

Abb. 23: Übersicht der Antimon-Werte aller Quellen im Vergleich zur Schüttung der Anna- und Astholzquelle und zu Niederschlag und Schneehöhe der Wetterstation Schlitterberg

Aus der Analyse der Korrelationskoeffizienten gemäß **Tab. 4** lässt sich zusammenfassend ablesen, dass

- kein klares, einheitliches Verhalten der Quellen erkennbar ist,
- die Schwermetalle insgesamt mit Q, WT und pH eher positiv korrelieren (jeweils 9:6),
- die elektrische Leitfähigkeit negativ mit den Schwermetall-Konzentrationen korreliert (3:12) und
- die Schwermetall-Konzentrationen nicht nur von Quelle zu Quelle unterschiedlich mit den Vor-Ort-Parametern korrelieren, sondern auch innerhalb einer Quelle gegensätzlich reagieren können.

Die vergleichende Darstellung der Sb-Werte, Niederschläge und Schüttungen in **Abb. 23** zeigt allerdings, dass sich die Ganglinien der Sb-Werte grob in fünf Bereiche einteilen lassen:

1. Schneeschmelze 2017 bis nach erstem Schüttungsmaxima (Mitte/Ende März); charakterisiert von starken Schwankungen zwischen Einzelwerten,
2. Zeitraum bis Ende Juli 2017; gekennzeichnet von geringeren Schwankungen der Schüttungs- und Schwermetallwerte, NS wirkt sich kaum auf Ganglinien aus,
3. Zeitraum bis Ende September 2017; bei den meisten Quellen wieder stärkere Schwankungen von Messpunkt zu Messpunkt,
4. Zeitraum bis Ende Dezember 2017; zurückgehende Schüttungen bedingen geringere Schwankungen zwischen Messpunkten,
5. Zeitraum bis Ende Januar 2018; Schneeschmelz- und Niederschlagsereignisse führen zu höheren Schüttungen und stärkeren Schwankungen der Schwermetall-Konzentrationen.

Diese verschiedenen Zeiträume stehen eng mit Schüttungsänderungen in Zusammenhang, demzufolge also auch mit Infiltrationsprozessen, was im Wesentlichen durch die Zusammensetzung des durchflossenen Gesteins/Sediments und die dort jeweils herrschenden - und sich im Jahreslauf verändernden – Lösungsbedingungen der Metalle bedingt ist. So können sich z. B. bei fallendem Grundwasserstand durch verstärkte Sulfidoxidation Schwermetalle anreichern, die sich dann bei Wiederanstieg in kurzfristig erhöhten Konzentrationen äußern (pers. Kommunikation mit Dr. C. Mair). Im Großteil der Fälle scheint sich aber recht schnell ein gewisses Lösungsgleichgewicht einzustellen.

Zudem hat die Kreuzkorrelation gezeigt, dass die Quellen im Durchschnitt innerhalb einer Woche auf Niederschläge reagieren. Die ergänzenden Isotopenanalysen des Umweltbundesamtes (2018) an Proben der Anna- und der Astholzquelle ergaben mittlere Verweilzeiten von deutlich unter einem Jahr, Haupteinfluss von Sickerwässern rezenter Niederschläge und ein höher gelegenes durchschnittliches Einzugsgebiet für die Annaquellen.

In Anbetracht dieser Umstände lässt sich also festhalten, dass bei derart kleinen EZGs und rasch reagierenden Quellen bei der Beprobung eine höhere zeitliche Auflösung nötig ist, um ggf. genauere Einblicke in die Dynamik von Schwermetall-Konzentrationen im Quellwasser zu erlangen.

Für eine Mischungsoptimierung zeigte sich bei ggst. Untersuchung keine ausreichende Abhängigkeit der Schwermetall-Konzentrationen von online messbaren Parametern (Q, WT, LF, pH). Nichtsdestotrotz ließen sich aus den anteiligen Antimon-Werten in den Hochbehältern die erforderlichen Beimischungsmengen von unbelastetem Wasser ermitteln. Bei der Astholzquelle und damit im HB Astholz sind dies zwischen 48 und 60 % zur Erreichung des Zielwertes von 5 µg/l, für das Mischwasser im HB Dorf zwischen 32 und 46 %.

Literaturverzeichnis

BHARDWAJ, R., GUPTA, A. AND GARG, J.K. (2017): Evaluation of Heavy Metal Contamination Using Environmetrics and Indexing Approach for River Yamuna, Delhi Stretch, India. *Water Sciences*, 31, 52-66.

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: PHILIPPITSCH, R.; LOISHANDL-WEISZ, H.; WEMHORNER, U.; SCHATNER, CH.; SCHUBERT, G. & SCHEDL, A.: *Metalle im Grundwasser in Österreich. Karten und Erläuterungen*. Umweltbundesamt, Wien. Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 60 S.

GSTREIN, P. (1979): Neuerkenntnisse über die Genese der Fahlerzlagerstätte Schwaz (Tirol). *Mineralium Deposita* 14, 185-194.

GSTREIN, P. (1981): Prähistorischer Bergbau am Burgstall bei Schwaz (Tirol). *Veröffentlichungen des Museum Ferdinandeum*, Bd. 61, 25 -46

HAIYAN LI, LIANG LIU, MINGYI LI, AND XIAORAN ZHANG (2013): Effects of pH, Temperature, Dissolved Oxygen, and Flow Rate on Phosphorus Release Processes at the Sediment and Water Interface in Storm Sewer. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, vol. 2013.

JACOBS, S.(1994): B 169 – Zillertalbundesstraße Brettfalltunnel – Geologischer Schlussbericht. Korneuburg, August 1994; Unveröffentlichter Schlussbericht.

JACOBS, S.(1994): B 169 – Zillertalbundesstraße Brettfalltunnel – Geologischer Schlussbericht-Geotechnischer Längenschnitt M.1: 10 000. Korneuburg, August 1994; Unveröffentlichter Schlussbericht.

KRAINER, K. (2014): Permafrost and Climate Change in North and South Tyrol. In: Rutzinger, M., Heinrich, K., Borsdorf, A. & Stötter, J. (eds), *permAfrost*, Austrian Permafrost Research Initiative, Final Report, p. 51-67 (IGF-Forschungsberichte, Band 6, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften)

MAIR, CH. (2018): pers. Kommunikation

PIRKL, H. (1961): Geologie des Trias-Streifens und des Schwazer Dolomits südlich des Inn zwischen Schwaz und Wörgl (Tirol). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt (Wien)*, 104:1-157.

THIES, H.; NICKUS, U.; TESSADRI, R.; TROPPEL, P. AND KRAINER, K. (2018): Peculiar arsenic, copper, nickel, uranium, and yttrium-rich stone coatings in a high mountain stream in the Austrian Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 110

UMWELTBUNDESAMT (2018): BRIELMANN, H.; HUMER, F.: Abschätzung von mittleren Verweilzeiten für die Astholzquelle und die Annaquellen – Gemeinde Strass im Zillertal. Umweltbundesamt, Wien. Im Auftrag der Abteilung Wasserwirtschaft, Amt der Tiroler Landesregierung.