

Beurteilung der Auswirkungen von SwissZinc auf die Konzentrationen von Chlorid und Sulfat in Fliessgewässern

Gutachten zu Handen der Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und
Ressourcennutzung (ZAR), Emmenspitz, Zuchwil.

Beat Müller

Eawag – Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs

Kastanienbaum, Januar 2016

1 Zusammenfassung

Bei der Behandlung der Filteraschen aus den Rauchgasreinigungen von Kehrlichtverbrennungsanlagen fallen grosse Mengen an Salzen an, hauptsächlich Chlorid und Sulfat. Die sechs zur Diskussion stehenden Standorte für SwissZinc, die grundsätzlich für eine Schweizweit zentrale Aufbereitungsanlage für die Hydroxidschlämme in Frage kommen, liegen an den Flüssen Rhone, Rhein, Aare, Linth und Töss. Die Eawag ist angefragt worden, die zu erwartenden Salzkonzentrationen in diesen Flüssen für vier verschiedene Einleitungsszenarien (unterschiedliche Frachten von Chlorid und Sulfat) zu diskutieren und beurteilen.

Die Menge Chlorid, welche durch SwissZinc in die Oberflächengewässer eingeleitet würde, beträgt je nach Szenario 1.8-4.5% der in der Schweiz verbrauchten Menge. Die Einleitung erfolgt jedoch nicht diffus und zeitlich begrenzt (wie zB. bei der Strassensalzung) sondern punktuell und quasi-kontinuierlich. Die zu erwartenden Konzentrationszunahmen bei langjährigen durchschnittlichen Monatsabflüssen (1999-2014) beträgt für die höchste vorgesehene Chlorid-Fracht (Szenario B) in der Rhone um 25%, im Rhein um 4%, in der Aare um 16%. Die Konzentrationen der Linth erhöhten sich wegen ihrer natürlichen geringen Salzkonzentration aus dem Walensee zeitweise um das über 20fache, wobei sie jedoch immer noch $<20 \text{ mg L}^{-1}$ betragen und somit unterhalb des Richtwertes zur Trinkwassergewinnung liegen würden. Am empfindlichsten reagiert die Töss mit ihrer geringen Wasserführung. Die Chlorid-Konzentrationen würden bei Szenario B zeitweise bis auf 150 mg L^{-1} ansteigen. Ein qualitativ vergleichbares Bild zeigt sich für die Sulfat-Konzentrationen: Während bei Rhone, Rhein und Aare die Erhöhung auch bei der Maximalfracht (Szenario D) vernachlässigbar gering ausfallen würde, erhöht sich die Konzentration in der Linth um das 3-4fache auf (immer noch sehr geringe) $3-4 \text{ mg L}^{-1}$, bei der Töss auf $20-35 \text{ mg L}^{-1}$.

Kritisch bei der Einleitung von Salzfrachten sind die Phasen, wenn die Gewässer nur wenig Wasser führen. Diese Situationen sind daher zusätzlich berechnet worden. Während in der Schweiz keine Toleranz- oder Grenzwerte für die Einleitung von Chlorid und Sulfat existieren, schlägt die EU-Direktive für Oberflächengewässer einen Grenzwert von 250 mg L^{-1} für Chlorid vor. Eingehende Untersuchungen zeigen, dass ab Konzentrationen von 100 bis 150 mg L^{-1} in Fliessgewässern Veränderungen der Lebensgemeinschaften zu beobachten sind.

Die zu erwartenden relativen Konzentrationserhöhungen (%) für Rhone, Rhein und Aare sind sehr ähnlich jenen bei Normalabfluss, sowohl für Chlorid als auch Sulfat. In der Linth sind Konzentrationsmaxima von bis zu 30 mg L^{-1} Chlorid und 7 mg L^{-1} Sulfat zu erwarten. In der Töss bewirkten Niedrigwassersituationen Chlorid-Konzentrationen von $150-200 \text{ mg L}^{-1}$ und extreme Maxima von bis zu 500 mg L^{-1} (Szenario B). Sulfat-Konzentrationen könnten $30-40 \text{ mg L}^{-1}$ und bis zu 90 mg L^{-1} erreichen (Szenario D).

Bei den Standorten Rhone und Linth muss bedacht werden, dass die unterliegenden Zürich- und Genfersee durch die Erhöhung der Salzfrachten ebenfalls beeinflusst würden. Unter Szenario B würde sich die Chlorid-Konzentration im Zürichsee innerhalb von 4 Jahren von 5 mg/L auf 11 mg/L mehr als verdoppeln. Im Genfersee würde diese Veränderung nach 34 Jahren bloss eine

relative geringe Zunahme von 9 mg/L auf 11 mg/L bzw. 18% verursachen. Die Zunahme der Sulfat-Konzentration wäre in beiden Seen vernachlässigbar.

Relevante Beurteilungskriterien für die Eignung der Standorte sind (i) die maximalen Chlorid-Konzentrationen, welche durch die Einleitungen auftreten können, (ii) die relative Veränderung der aktuellen Konzentrationen in den Gewässern durch die Einleitung, und (iii) inwiefern unterliegende Seen durch die Einleitungen betroffen sind und verändert werden.

Wir empfehlen, auf die Standorte Töss (Auftreten hoher Spitzenkonzentrationen) und Linth (starke relative Erhöhung der Salzkonzentration sowohl im Fluss als auch im unterliegenden Zürichsee) zu verzichten. Für die Realisierung der Standorte Rhone, Aare und Rhein sind keine nachweisbaren Umweltauswirkungen zu erwarten. Der geeignetste Standort ist der Rhein, da durch dessen grosse Wasserführung und geringe Saisonalität die grösste Verdünnung erreicht wird und keine See-Ökosysteme betroffen sind.

2 Einleitung und Problemstellung

Filteraschen aus den Rauchgasreinigungen von Kehrlichtverbrennungsanlagen sollen in Zukunft aufgearbeitet werden, um Metalle rückzugewinnen. Bei diesem nasschemischen Prozess fallen grosse Mengen gelöster Salze an, vor allem die Natrium-, Kalium und Calciumsalze von Chlorid und Sulfat. Die Rückgewinnung der Metalle – vor allem Zink, aber auch Kupfer, Blei und Cadmium – erfolgt durch Hydroxidfällung mit Kalkmilch aus den nassgereinigten Rauchgasen. Neu sollen die Hydroxidschlämme in der Schweiz zentral im SwissZinc-Projekt aufgearbeitet werden. Da grosse Mengen Salze entsorgt werden müssen, stellt sich die Frage nach einem geeigneten Standort bzw. Vorfluter, der diese Frachten aufnehmen kann. Sechs mögliche Standorte für SwissZinc werden vorgeschlagen und sind in Tabelle 1 vorgestellt.

Tabelle 1: Für SwissZinc vorgeschlagene Standorte mit den entsprechenden Vorflutern.

Nr.	Standort	Vorfluter
I	ARA Winterthur	Töss
II	KVA Linth, Niederurnen	Linthkanal
III	Industrieareal Full-Reuenthal	Rhein
IV	Industriestandort Basel	Rhein
V	Industriegebiet Monthey	Rhone
VI	KEBAG AG Zuchwil	Aare

Bei den vier vorgeschlagenen Szenarien A – D gelangten folgende Salzfrachten in die Oberflächengewässer (Tabelle 2):

Tabelle 2: Vier Szenarien für anfallende Abwasserfrachten von Chloriden und Sulfaten.

Szenario	Chlorid [kt Cl ⁻ a ⁻¹]	Sulfat [kt/a]
A	5.5	0.3
B	13.5	0.3
C	10.0	0.3
D	7.0	2.5

Im Auftrag der Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR) beurteilen wir in der vorliegenden Arbeit die mögliche Einleitung von Chlorid und Sulfat in die zur Diskussion stehenden Fließgewässer.

3 Richtwerte, ökotoxikologische Effekte

In der Schweiz gibt es keine Toleranz- oder Grenzwerte für die Chlorid-Konzentration in Oberflächengewässern. Auch für Abwassereinleitungen gibt es weder für Chlorid noch für Sulfat verbindliche Vorschriften. In der Gewässerschutzverordnung wird für trinkwassergenutztes Grundwasser ein Chlorid-Gehalt von $<40 \text{ mg L}^{-1}$ verlangt (GSchV). Chlorid-Gehalte in Gewässern sollten aus Gründen der Trinkwassergewinnung jedoch $<20 \text{ mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$ sein (Faktenblatt Strassensalzung, eawag 2011). Die Konzentration von Chlorid in Oberflächengewässern ist auch in der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) gesetzlich nicht verbindlich geregelt. In der EU-Direktive über Oberflächengewässer gilt ein Qualitätsstandard von 250 mg L^{-1} Chlorid (EPA 2001). Jedoch stellt man ab 80 mg Cl L^{-1} eine erhöhte Metallkorrosion und ab 100 mg L^{-1} eine Geschmacksbeeinträchtigung des Trinkwassers fest. Für die natürliche Verwitterung einschliesslich die Fracht aus den Niederschlägen kann ein Richtwert für die Einzugsgebietsfläche von $1 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ angenommen werden (Zobrist und Reichert, 2006).

Die Schweiz ist internationale Verpflichtungen mit den Rheinanliegerstaaten eingegangen (Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung, IKSr 1976), womit bezweckt wurde, die grossen Einleitungen vor allem der Kaliminen im Elsass zu beschränken. Die Vereinbarung im Zusatzprotokoll Anhang IV auf Seite 655 dürfte so interpretiert werden, dass die Summe aller grossen Einleitungen von Einzelbetrieben über 1 kg sec^{-1} in der Schweiz nicht mehr als 5 kg sec^{-1} betragen dürfen (J. Zobrist, mündliche Mitteilung). Der aktuelle Stand dieses Abkommens muss beim BAfU erfragt werden.

Frühe Messungen von Chlorid in den Schweizer Mittellandseen in den 40er Jahren zeigen Konzentrationen von $1\text{--}4 \text{ mg L}^{-1}$. Die Konzentrationen haben allerdings seither stark zugenommen, insbesondere durch die zunehmenden Strassen und den verlangten Winterdienst (Strassensalzung) (Müller und Gächter, 2011). Die Anwendung von Tausalz ist mit grossem Abstand die Hauptursache für die grosse Chlorid-Belastung des Oberflächen- und Grundwassers und kann in kleineren Gewässern lokal und kurzzeitig zu extrem hohen Konzentrationen führen (mehrere g L^{-1}). Das Salz wird fast ausschliesslich in der Schweiz gefördert ($400\text{--}530 \text{ kt NaCl a}^{-1}$, bzw. $245\text{--}320 \text{ kt Cl}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und eingesetzt (www.salz.ch; Tabelle 3). Naturgemäss findet der allergrösste Teil des Salzes seinen Weg ins Wasser. Die Chlorid-Frachten der zur Diskussion stehenden Einleitungen durch SwissZinc betragen (je nach Szenario) $1.8\text{--}4.5\%$ dieser Menge.

Tabelle 3: Salzverbrauch in der Schweiz [kt Chlorid pro Jahr]:

Produkt	Menge $\text{kt Cl}^{-1} \text{ a}^{-1}$	in %
Speisesalz	24	8
Agrarsalz	12	4
Ionentauschersalz	24	8
Gewerbe- und Industrie	76	25
Tausalz	60 – 210	50

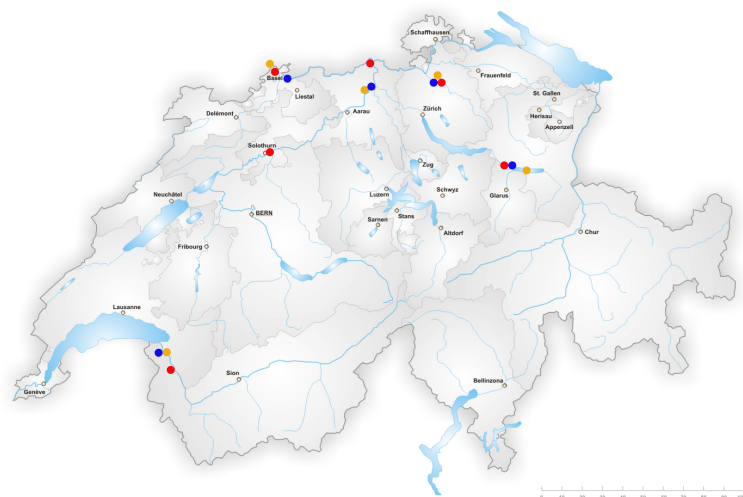
Es gibt eine Vielzahl von detaillierten Untersuchungen über die Reaktion von Fauna und Makrozoobenthos auf erhöhte Chlorid-Konzentrationen in Oberflächengewässern. Eine Studie aus Nordrhein-Westfalen (HBio 2010a) stellt in Übereinstimmung mit Ergebnissen aus Sachsen-Anhalt (HBio 2010b) eine beobachtbare Schädigung ab ca. $100 \text{ mg Cl}^- \text{ L}^{-1}$ fest, wo 17% der Arten nicht mehr vorkommen. Bei 200 mg L^{-1} waren 54% der Arten nicht mehr vorhanden.

Ein grosser Bericht aus Österreich (BMLFUW 2014) präsentiert eine ausführliche Literaturstudie sowie eigene Untersuchungen. Er hält fest, dass Fliessgewässer mit höherer Wasserhärte bzw. Alkalinität auch eine grössere Toleranz gegenüber Chlorid haben und diskutiert die Auswirkungen von Kurz- und Langzeitexposition. Es wird eine Obergrenze für die Chlorid-Konzentration bei Langzeitexposition von $100\text{--}120 \text{ mg L}^{-1}$ empfohlen. Eine Untersuchung aus Kanada empfiehlt ebenfalls einen Grenzwert von 120 mg L^{-1} (CCME 2011). Für gut gepufferte Gewässer kann ein Grenzwert von 150 mg L^{-1} beibehalten werden, wie er heute in der Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (BGB1. II Nr. 99/2010, Österreich) festgehalten ist.

Die Chlorid-Konzentrationen in Schweizer Seen liegt im unteren $\mu\text{g L}^{-1}$ -Bereich. Eine Veränderung der Biozönosen durch leichte Konzentrations-Erhöhungen wurde nie untersucht.

4 Datenlage und Methoden

Die optionalen Standorte für SwissZinc sind in der Karte (Figur 1) als rote Punkte dargestellt. Für diese Stellen wurden möglichst repräsentative Daten über den Abfluss (Hydrologie, blaue Punkte) sowie die Konzentrationsverläufe von Chlorid und Sulfat (orange Punkte) gesucht.



Figur 1:
Standorte für SwissZinc (rot) sowie Messstellen für die Abflüsse (blau) und chemische Konzentrationen (orange).

Zuverlässige Datensätze bestehen für die Rhone. Der Standort Monthey liegt nur ca. 12 km oberhalb der LHG-Messstelle (Abflussdaten der Messstationen des BAfU; hydrodaten.admin.ch) und der NADUF (Nationale Daueruntersuchung der Fliessgewässer) Probenahmestelle Porte du Scex.

Der Abfluss des Rheins bei Basel wird bei Rheinhalle durch eine LHG-Station gemessen. Dieser Abfluss entspricht auch etwa der Situation bei Village-Neuf, wo die Wasserzusammensetzung durch eine NADUF-Station bestimmt wird. Der eine SwissZinc Standort (Full-Reuenthal) liegt ca. 50 km oberhalb von Basel und dürfte durch die etwas geringere Wasserführung und Konzentrationen den Fluss auf dieser Strecke etwas stärker beeinflussen als im Folgenden berechnet. Für den Rhein unterhalb von Basel ist die Voraussage jedoch wieder zuverlässig.

Die Abfluss-Messstelle der Aare liegt bei Brugg-Aegerten, ca. 40 km flussaufwärts des Standorts KEBAG, Zuchwil. Da auf dieser Strecke keine grösseren Zuflüsse in die Aare münden, dürften die Abflusswerte auf die Aare bei Zuchwil anwendbar sein. Chemische Daten wurden von der NADUF-Messstelle bei Brugg verwendet. Die Konzentrationen dürften bei Zuchwil allerdings noch deutlich geringer sein als bei Brugg. Die berechneten Konzentrationserhöhungen durch die Salzeinleitungen sind daher auf der Strecke zwischen Zuchwil und Brugg eher unterschätzt.

An der Linth in Weesen (Biäsche) wird der Abfluss gemessen. Chemische Erhebungen werden jedoch an der Linth nicht gemacht. Wir haben daher Daten von der Zusammensetzung des Oberflächenwassers des Walensees, der von der Wasserversorgung Zürich (wvz) viermal jährlich beprobt wird, für eine Abschätzung verwendet. Sulfat ist nur ein einziges Mal gemessen worden, am 20.10.1980, mit einer Konzentration von 1.1 mg L^{-1} (Oberfläche). Um einen Richtwert für die Abschätzungen zu haben, haben wir im Folgenden diesen Wert verwendet. Diese Daten dürften die Situation gut beschreiben, da der Standort Niederurnen bloss ca. 3 km vom Ausfluss des Walensees entfernt liegt.

Die Töss bei der ARA Winterthur wird vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kt. Zürich monatlich beprobt und der Abfluss von einer Pegelstation gemessen.

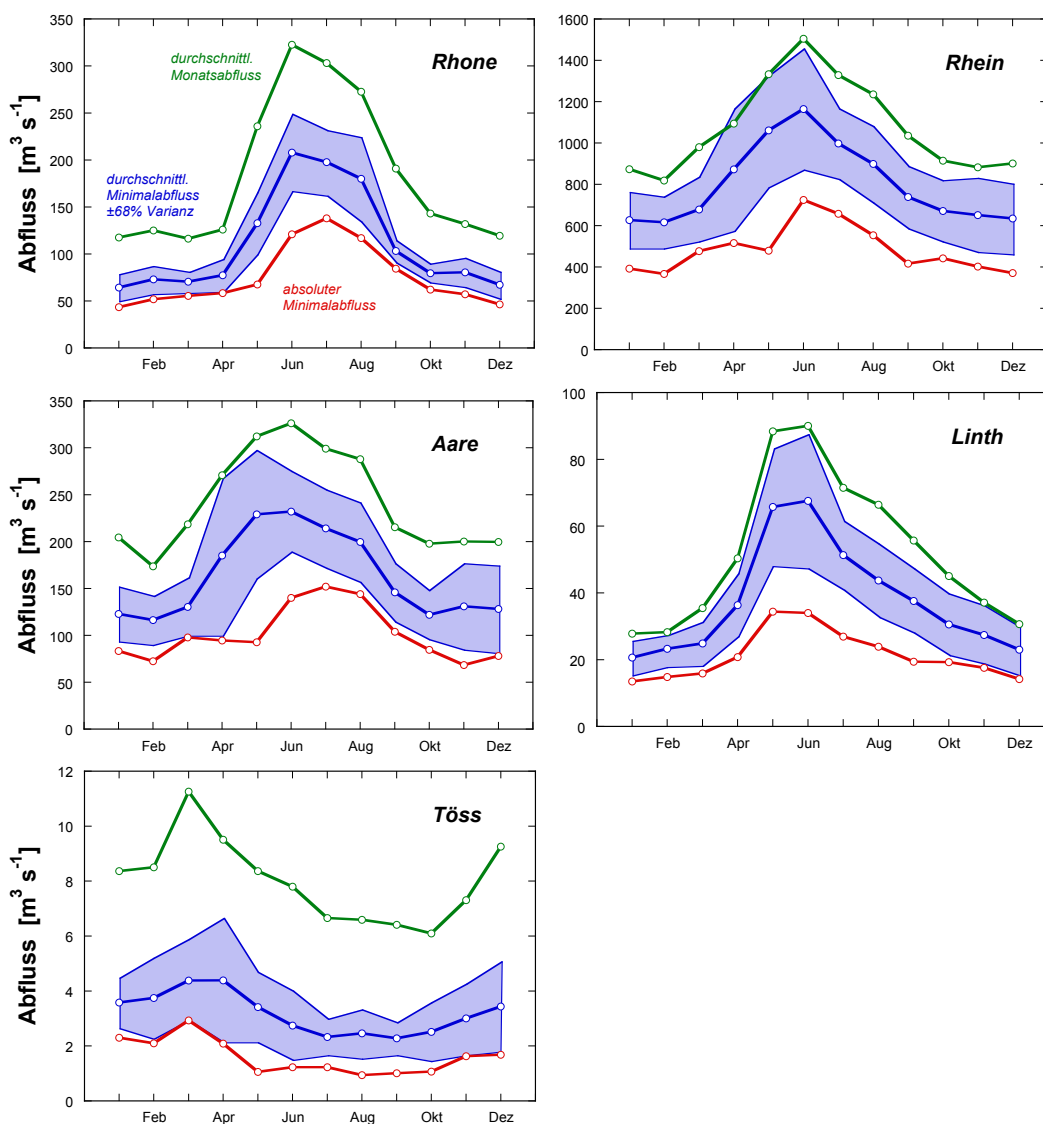
In der Tabelle 4 sind nach den SwissZinc Standorten und den entsprechenden Fliessgewässern für die Einleitung der Salzfrachten auch die Bezeichnungen der Abfluss-Messstationen des BAfU (hydrodaten.admin.ch) und die Herkunft der chemischen Daten zusammengefasst. Alle Datenreihen erstrecken sich über den Zeitraum von 1999-2014, ausser die Chemiedaten der Töss (2006-2014):

Tabelle 4: Herkunft der hydrologischen und chemischen Daten, welche für die Abschätzungen der Salzkonzentrationen an den SwissZinc Standorten verwendet wurden.

Nr.	Vorfluter	Hydrologie; Chemie
I	Töss	LH2132 (Neftenbach); AWEL (199, vor ARA W'thur)
II	Linthkanal	LHG2104 (Weesen); Walensee wvz
III, IV	Rhein	LH2289 (Basel, Rheinhalle); NADUF(Village-Neuf)
V	Rhone	SHGN2009 (Porte du Scex); NADUF(Porte du Scex)
VI	Aare	LH2029 (Brugg, Aegerten); NADUF(Brugg)

5 Hydrologie der Vorfluter

Entscheidend für die Einleitung von Salzfrachten in die zur Diskussion stehenden Gewässer sind die Wasserabflüsse, besonders die minimalen Abflüsse. Diese sind für die zur Diskussion stehenden Flüsse und den entsprechenden Standorten (Tabelle 1) in der Figur 2 dargestellt: **grün** die monatlichen Abflüsse im Mittel der letzten 16 Jahre (1999-2014); **blau** die monatlichen Minimalabflüsse im Mittel der Jahre 1999-2014, unterlegt mit den Standardabweichungen berechnet aus den letzten 16 Jahren ($\pm 65\%$ Varianz), sowie **rot** die absoluten Minima, die im betreffenden Monat die tiefsten in diesen 16 Jahren waren.



Figur 2: Abflüsse von Rhone, Rhein, Aare, Linth und Töss als Monatsdurchschnitte der Jahre 1999-2014. Grün: durchschnittlicher Monatsabfluss. Blau: durchschnittlicher monatlicher Minimalabfluss; der blau unterlegte Bereich gibt die Streuung ($\pm 65\%$) in diesen Jahren an. Rot: absoluter Minimalabfluss, der in diesen 16 Jahren auftrat.

Die Saisonalität der Wasserführung ist in allen Flüssen mit Ausnahme der Töss ausgeprägt mit Abflussspitzen in Juni. Die Erhöhung der Salzkonzentrationen wird daher in den Wintermonaten 2-3mal höher sein als im Sommer, falls dieselben Frachten entsorgt werden.

6 Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei durchschnittl. Abfluss

Entscheidend für die Fliessgewässer-Oekosystem bzw. die Organismen sowie die Verwendung des Wassers zur Trinkwasseraufbereitung sind nicht die eingeleiteten Frachten, sondern die Konzentrationen die sich einstellen. Sie sind abhängig von der Wasserführung und den eingeleiteten Frachten. Wir stellen im Folgenden dar, wie sich die Konzentrationen von Chlorid (Figur 3) und Sulfat (Figur 4) in diesen Flüssen bei durchschnittlichem Abfluss (monatliche Mittel von 1999-2014, grüne Linien in Figur 2) unter den verschiedenen Szenarien erhöhen würden. Für die Berechnungen wurde angenommen, dass die jährlich anfallende Salzfracht (Tabelle 2) kontinuierlich in die Gewässer abgegeben wird.

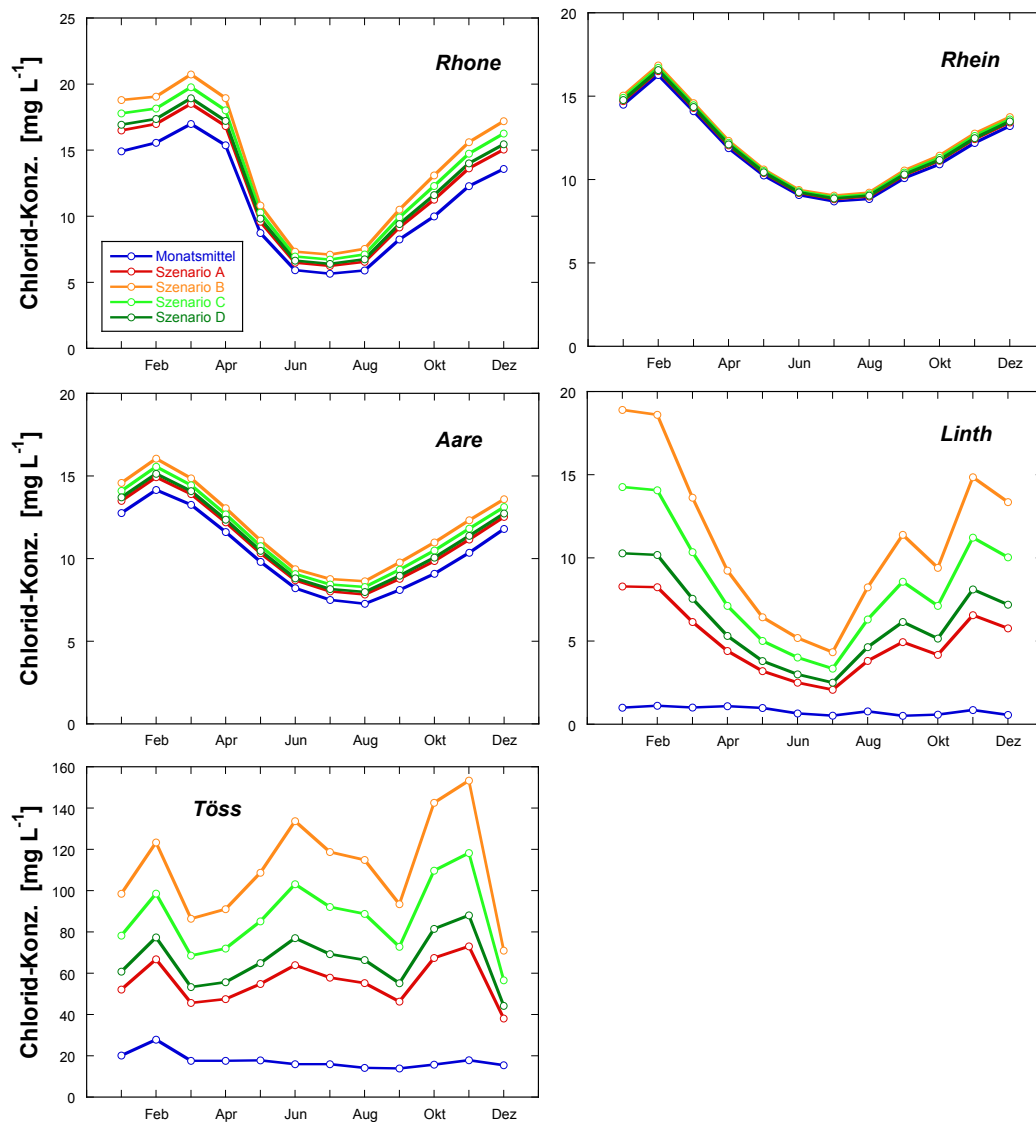
Aktuelle Chlorid-Konzentrationen in der **Rhone** liegen während der abflussärmeren Monaten Januar-April bei ca. 16 mg L^{-1} und fallen mit steigendem Abfluss im Sommer (Juni-August) auf ca. 6 mg L^{-1} (blaue Linie). Unter Szenario B, der grössten Chlorid-Fracht, würden sich die Konzentrationen während des ganzen Jahres um ca. 25% gegenüber heute erhöhen (orange Linie). Bei der Beurteilung des Standorts muss jedoch noch die Beeinflussung des unterliegenden Genfersees in Betracht gezogen werden (siehe Kapitel 8: 'Beeinflussung der unterliegenden Seen').

Die Wasserführung des **Rheins** bei Basel ist so gross, dass die Einleitung der vorgesehenen Chlorid-Frachten zu keinen signifikanten Konzentrationserhöhungen führt.

Der Abfluss der **Aare** bei Brugg-Aegerten ist ähnlich der Rhone, so würde auch die Konzentration unter Szenario B das ganze Jahr über um ca. 16% erhöht.

Die **Linth**, welche vor allem das Oberflächenwasser des oberliegenden nährstoff- und salzarmen Walensees führt und im Vergleich zu den drei grossen Flüssen einen viel kleineren Abfluss hat, würde durch alle Szenarien massiv erhöhte Chlorid-Konzentrationen aufweisen. Diese lägen bei der maximal eingeleiteten Chlorid-Fracht (Szenario B) allerdings nur in der Grössenordnung der Konzentration in der Rhone. Auch hier muss die Auswirkung auf den Zürichsee berücksichtigt werden.

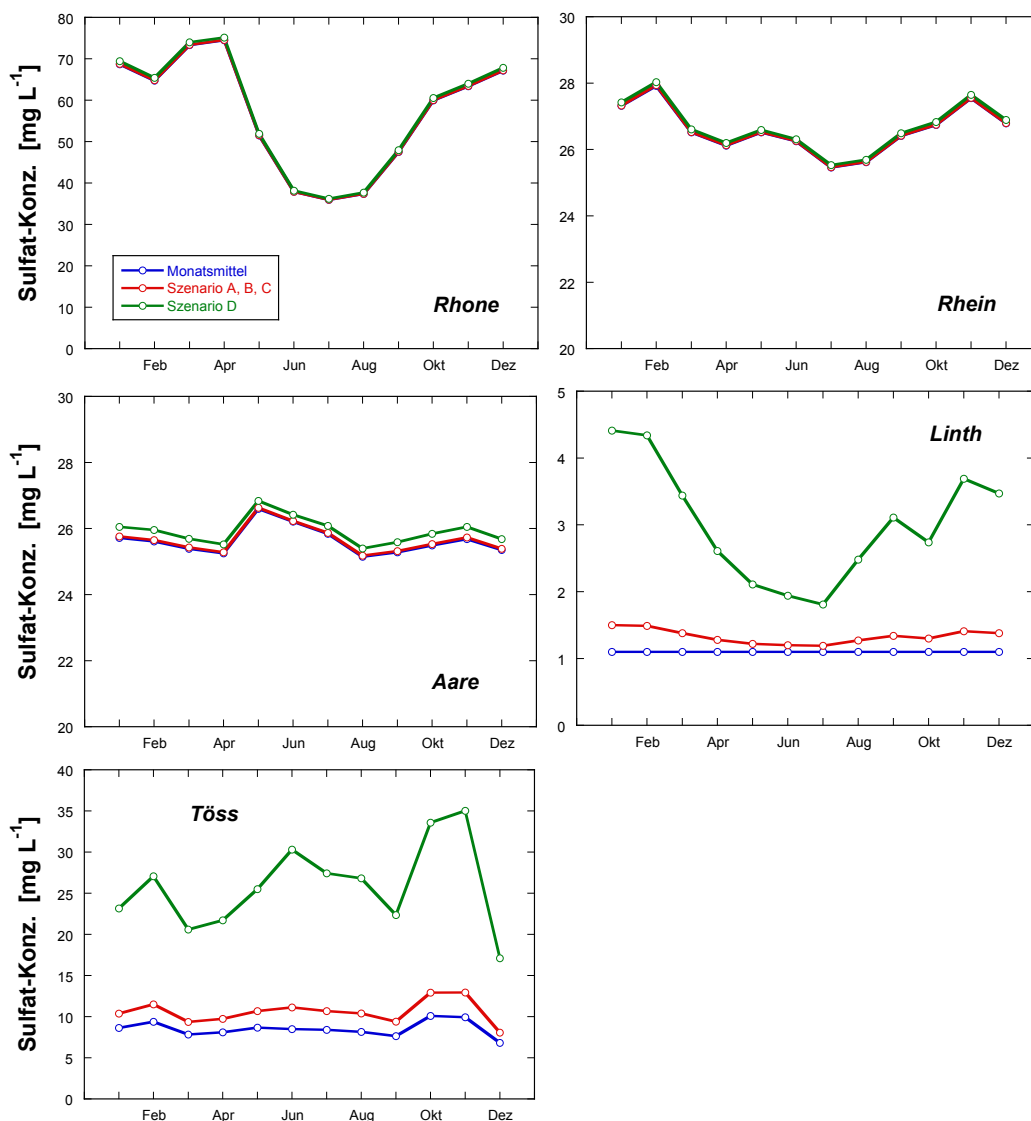
Am stärksten sind die Auswirkungen auf die **Töss** mit ihrer geringen Wasserführung und Saisonalität. Die Chlorid-Konzentrationen liegen schon heute bei ca. 20 mg L^{-1} und würden durch zusätzliche Frachten um bis zu 900% erhöht. Unter Szenario B wären Konzentrationen von bis zu 150 mg L^{-1} zu gewärtigen. Diese Konzentration entspricht etwa dem Bereich, ab dem nachteilige Auswirkungen auf das Benthos zu erwarten sind (siehe Kap. 3).



Figur 3: Chlorid

Mittlere Konzentrationen von Chlorid in den Vorflutern. Blau: über jeweils einen Monat gemittelte Konzentrationen der Jahre 1999-2014. Rot, orange, hellgrün, dunkelgrün: Für die Szenarien A, B, C und D zu erwartende mittlere Konzentrationen.

Für die Einleitung von Sulfat mit den Abwasserfrachten von SwissZinc sind bei durchschnittlichem Abfluss ähnliche, doch weniger drastische Effekte zu erwarten (Figur 4). Die Auswirkungen auf die Sulfat-Konzentrationen von Rhone und Rhein sowie Aare selbst für das Szenario D (höchste zusätzliche Sulfat-Fracht) wären vernachlässigbar klein. Konzentrationen in der Linth und der Töss würden um das 2-4fache erhöht.



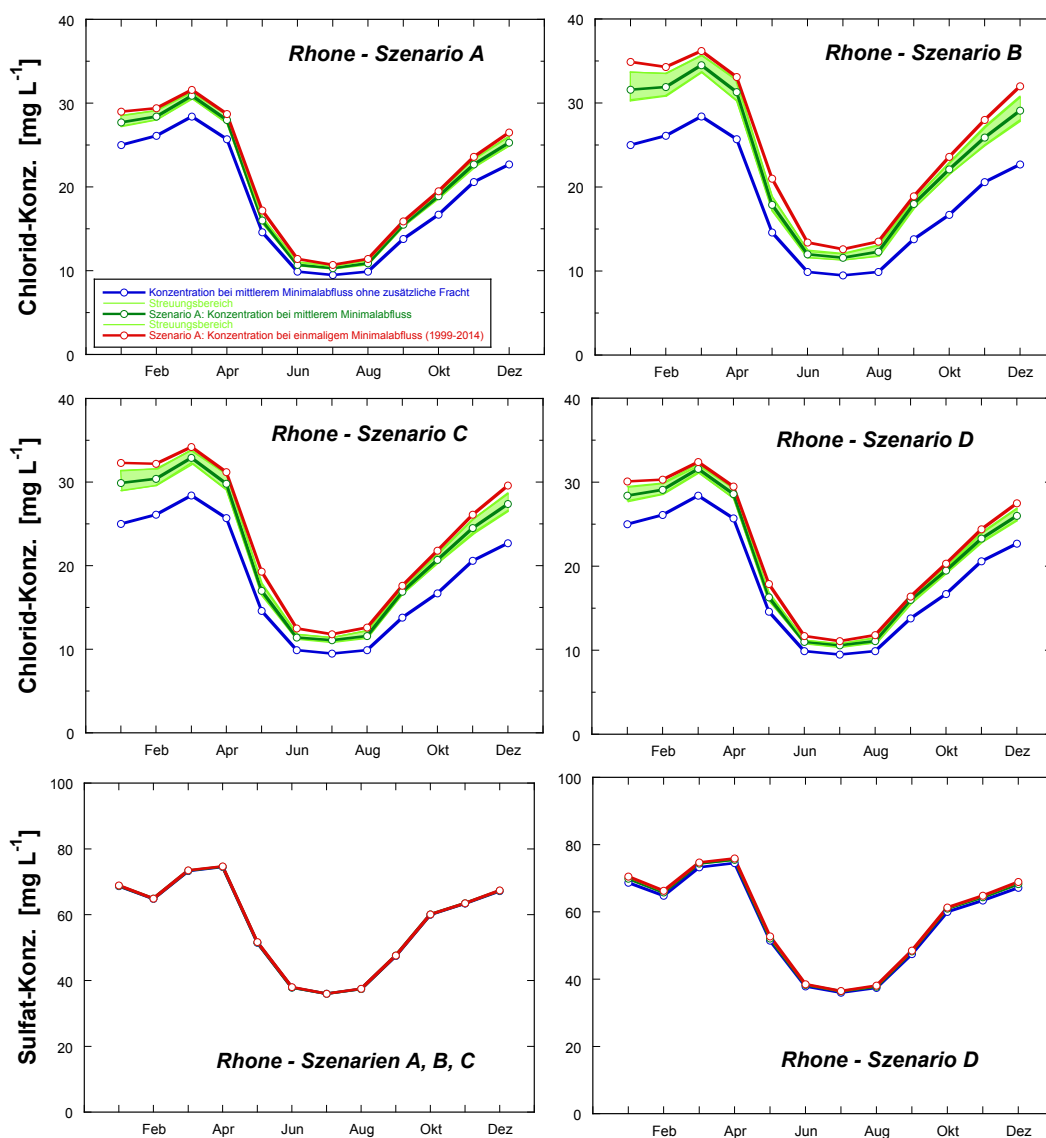
Figur 4: Sulfat

Mittlere Konzentrationen von Sulfat in den Vorflutern. Blau: über jeweils einen Monat gemittelte Konzentrationen der Jahre 1999-2014. Rot: Für die Szenarien A, B, C und grün: Für Szenario D zu erwartende mittlere Konzentrationen.

7 Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei Minimalabfluss

Die monatlichen Minimalabflüsse im Mittel der letzten 16 Jahre ergeben die zuverlässigste Abschätzung der regelmässig zu erwartenden monatlichen Maximalkonzentrationen. Die zu erwartenden Konzentrationen und Variationsbereiche entsprechen jenen Wasserführungen, die in der Figur 2 als blaue Linien und blaue Bereiche dargestellt sind. Die Konzentrationen bei Niedrigwasser können aus den Messungen nicht evaluiert werden. Wir haben dafür die gemessenen Konzentrationen aus den in Figur 3 (für Chlorid) dargestellten Monitoringdaten verwendet (blaue Linien in Figur 3). Dabei haben wir angenommen, dass die Salzfracht bei Minimalabfluss sich nicht ändert und somit die Konzentrationen entsprechend umgekehrt-proportional ansteigen. Als

Proportionalitätsfaktoren haben wir das gemittelte Verhältnis von mittlerem und minimalem Abfluss verwendet (Rhone: 0.6; Rhein: 0.76; Aare: 0.69; Linth: 0.74; Töss: 0.45). Dieses Vorgehen dürfte für das Chlorid angebracht sein, da dieses zu einem überwiegenden Teil anthropogener Herkunft ist und deshalb als zeitlich konstante Fracht eingetragen wird. Sulfat hingegen ist zum grössten Teil geogenen Ursprungs (bei der Rhone ist die Saisonalität des Sulfats vermutlich ein Mischungseffekt von exfiltrierendem sulfathaltigem Grundwasser, das im Winter dominiert und durch den erhöhten Sommerabfluss von Oberflächen- und Schmelzwasser verdünnt wird) so dass konstante Konzentrationen auch bei unterschiedlichen Wasserführungen zu erwarten sind.

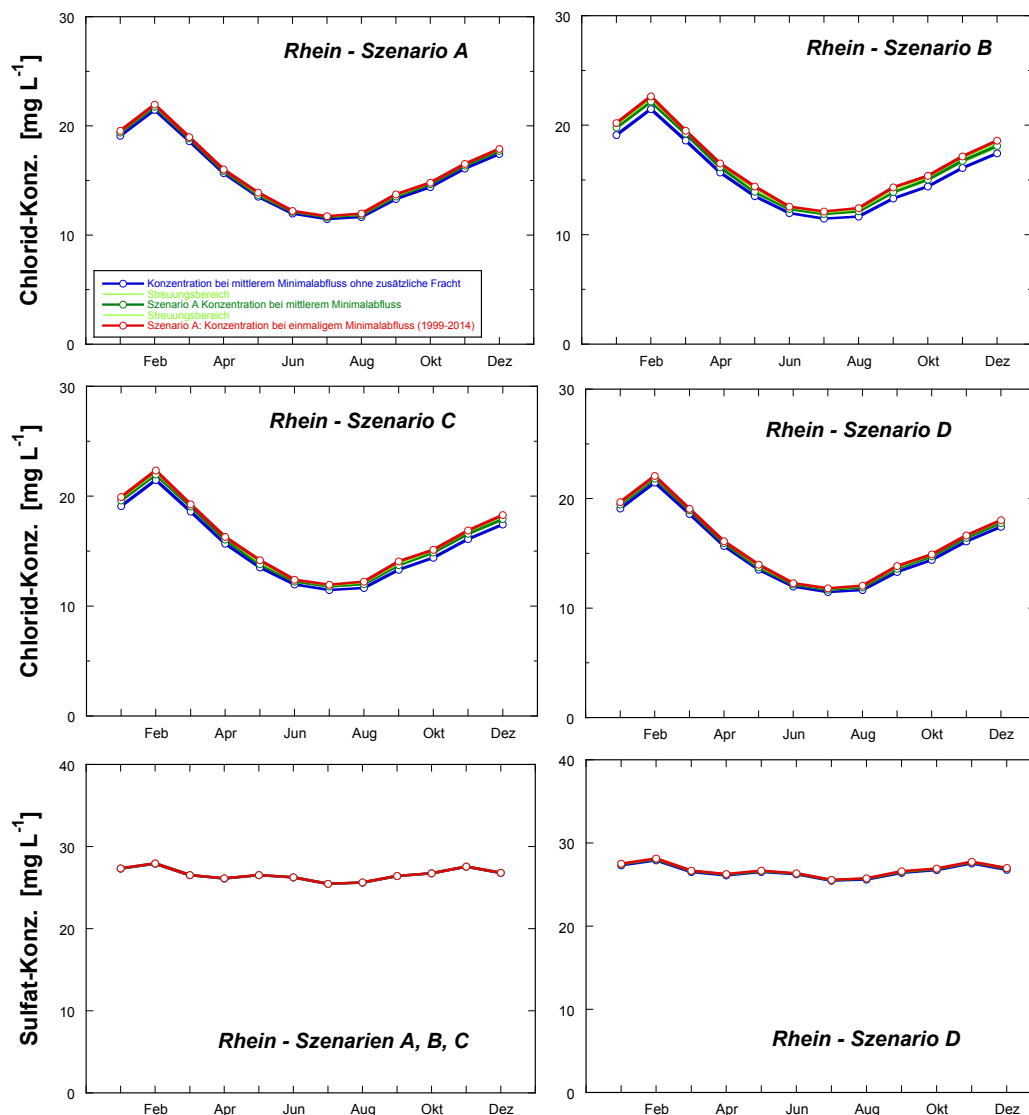


Figur 5: Rhone.

Prognostizierte Konzentrationen von Chlorid und Sulfat in der Rhone. Blau: aktuelle Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014). Grün: berechnete Konzentrationen für die entsprechenden Szenarien bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014; der hellgrüne Bereich zeigt die Varianzbreite der Minimalabflüsse). Rot: berechnete Konzentrationen für in den Jahren 1999-2014 einmalig auftretenden Minimalabfluss (Extremsituation).

In der **Rhone** liegen die so geschätzten Chlorid-Konzentrationen bei durchschnittlichem Minimalabfluss daher um 67% höher als bei Normalabfluss. Die Konzentrationen erhöhen sich je nach Szenario um bis zu maximal 25% (Szenario B). Die Variationsbreite (grüner Bereich) aufgrund des variierenden Minimalabflusses ist gering, und auch bei extremen Niedrigwassersituationen wird die Chlorid-Konzentration nie mehr als 36% gegenüber der natürlichen Situation zunehmen.

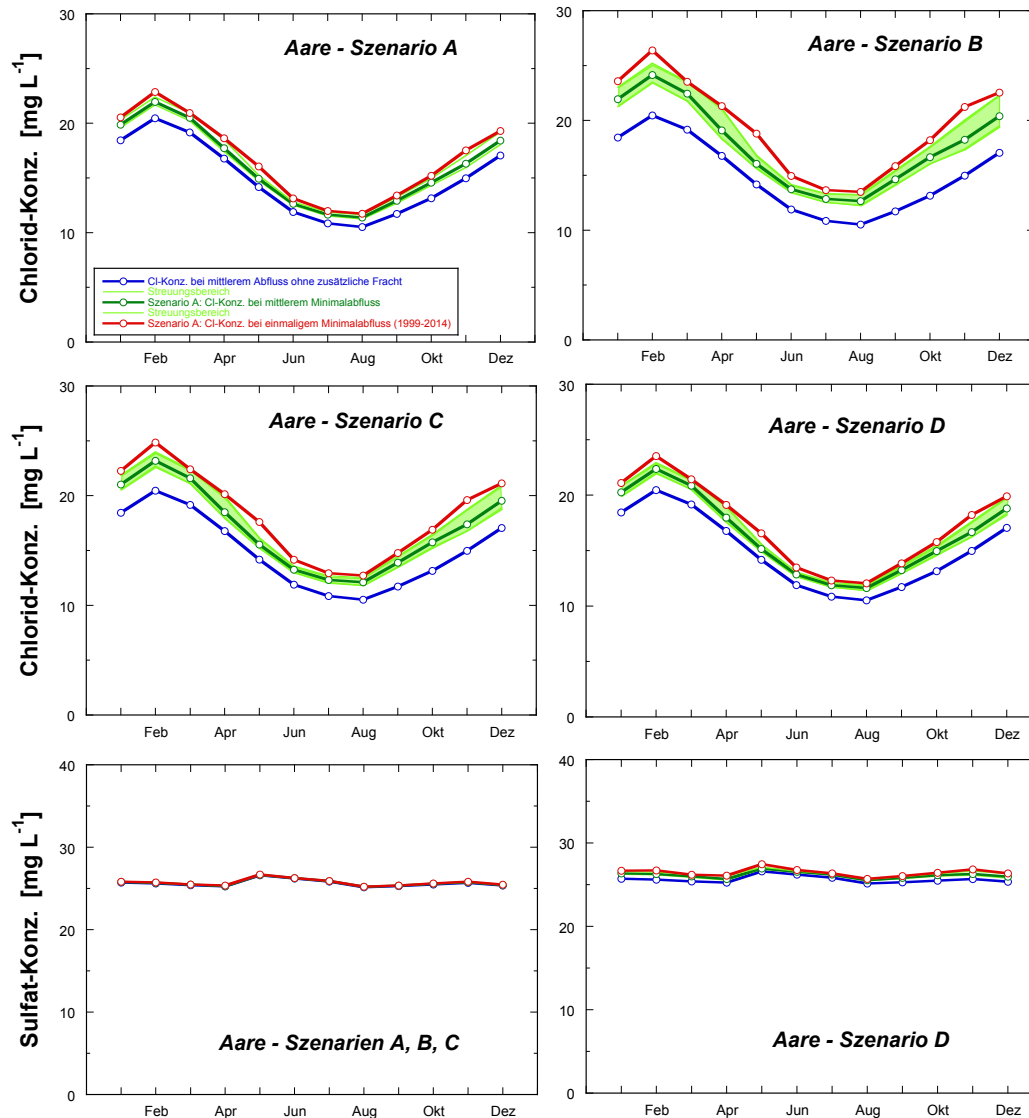
Der Eintrag einer zusätzlichen Sulfat-Fracht in die Rhone, welche schon natürlicherweise eine grosse geogene Sulfat-Fracht transportiert, ist selbst unter Szenario D nicht mehr nachweisbar.



Figur 6: Rhein.

Prognostizierte Konzentrationen von Chlorid und Sulfat im Rhein. Blau: aktuelle Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014). Grün: berechnete Konzentrationen für die entsprechenden Szenarien bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014; der hellgrüne Bereich zeigt die Varianzbreite der Minimalabflüsse). Rot: berechnete Konzentrationen für in den Jahren 1999-2014 einmalig auftretenden Minimalabfluss (Extremsituation).

Alle Szenarien in Figur 6 zeigen, dass für den **Rhein** bei Basel auch bei extremen Niedrigwassersituationen die zusätzlichen Salzfrachten nur zu einer sehr geringen Konzentrationserhöhung führen würden.



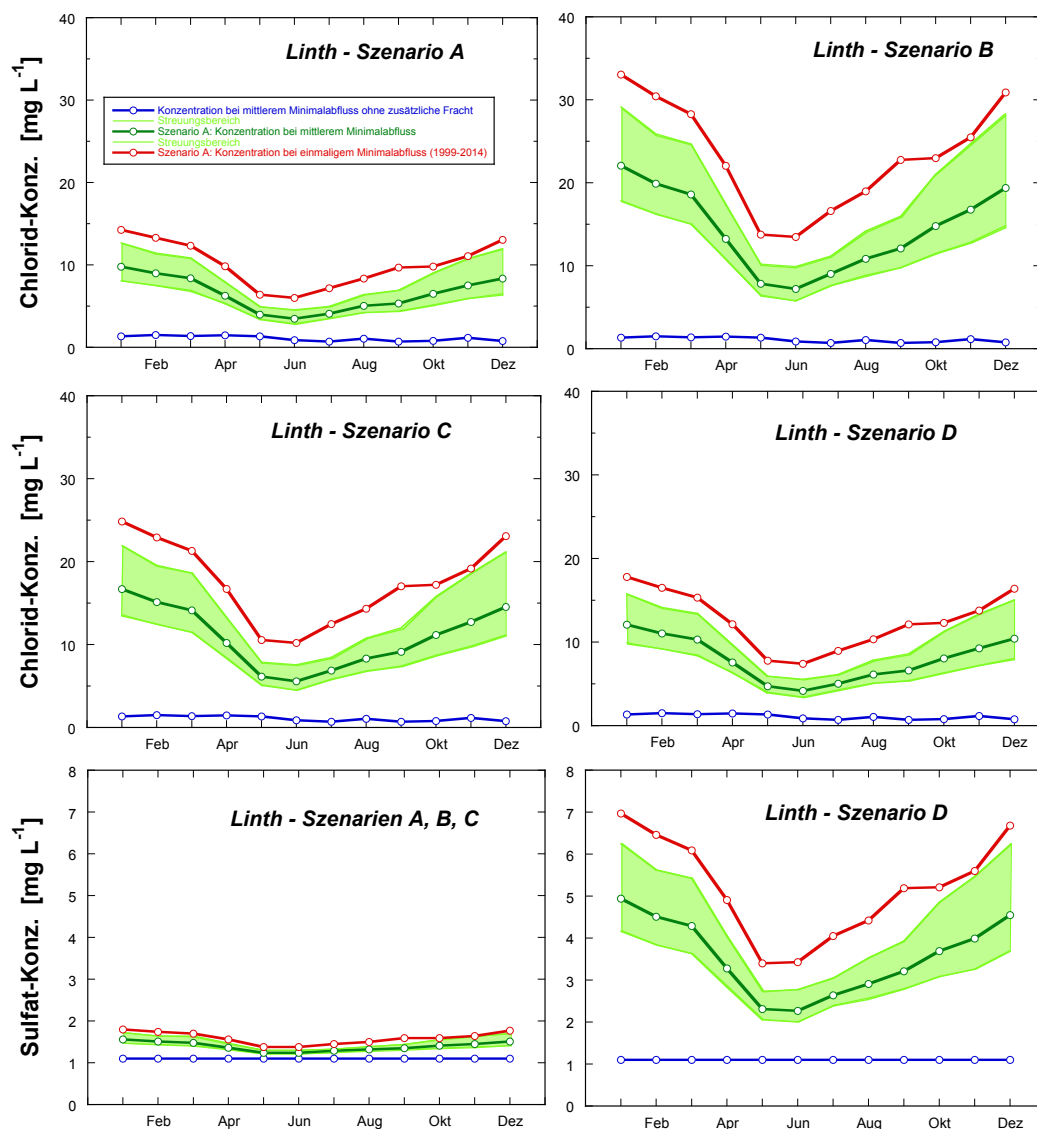
Figur 7: Aare.

Prognostizierte Konzentrationen von Chlorid und Sulfat in der Aare. Blau: aktuelle Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014). Grün: berechnete Konzentrationen für die entsprechenden Szenarien bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014; der hellgrüne Bereich zeigt die Varianzbreite der Minimalabflüsse). Rot: berechnete Konzentrationen für in den Jahren 1999-2014 einmalig auftretenden Minimalabfluss (Extremsituation).

Auch bei Niedrigwasser ist die Situation der **Aare** ähnlich jener der Rhone (Figur 7). Die zusätzliche Chlorid-Fracht unter Szenario B führte zu 20 % höherer Konzentration verglichen mit der aktuellen Situation. Die zu erwartende Variationsbreite ist gering, und auch bei extremen Nied-

rigwassersituationen verursachten die zusätzlichen Frachten höchstens ca. 30% Konzentrationszunahme. Die zusätzliche Sulfat-Fracht führt zu vernachlässigbaren Konzentrationserhöhungen.

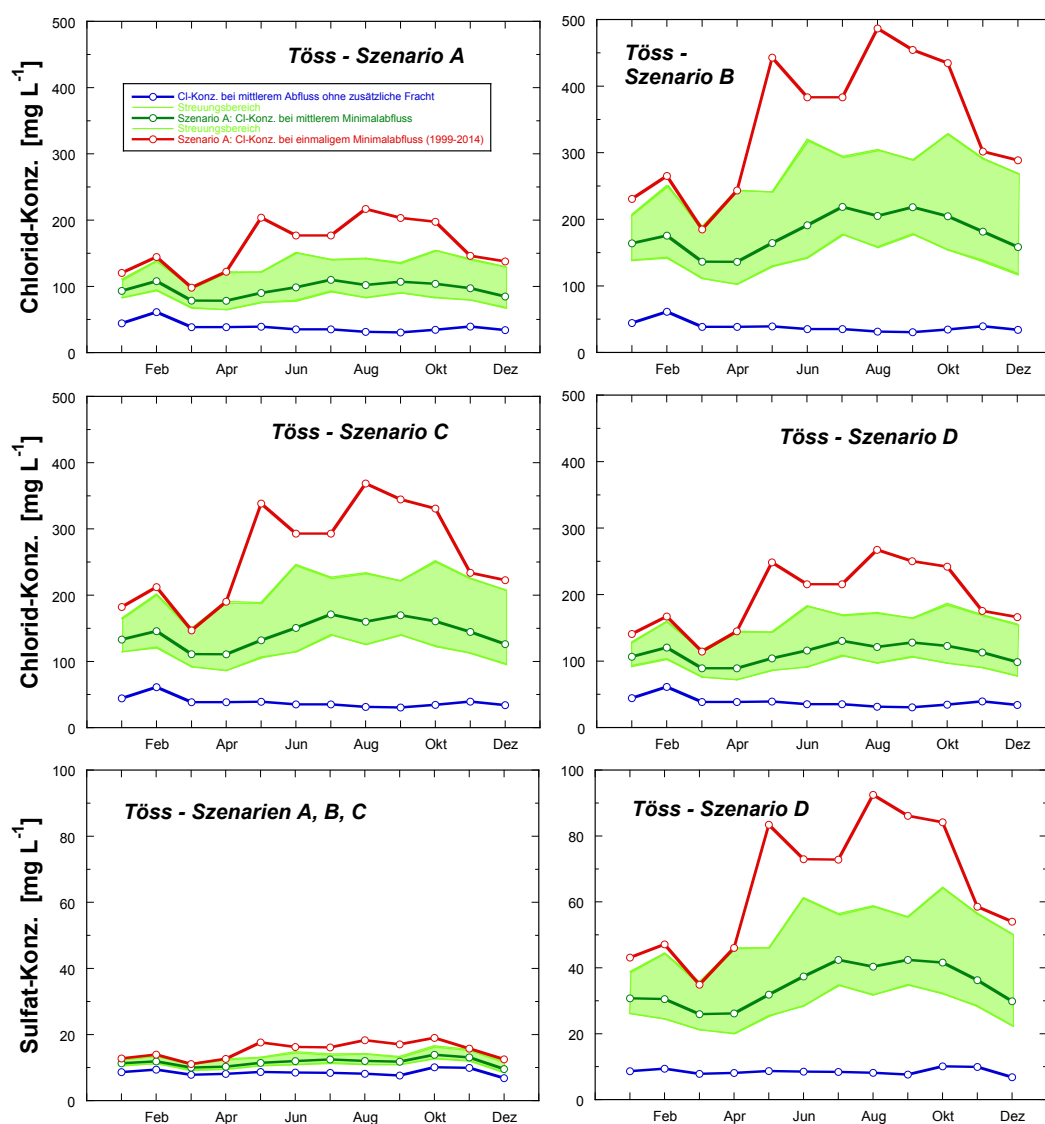
In der **Linth** (Figur 8) mit ihren geringen Salzkonzentrationen aus dem Walensee führen die zusätzlichen Einträge (zB. Szenario B) bei Niedrigwasser bis zu 14fach erhöhter Chlorid-Konzentration, bei extrem tiefem Abfluss gar zu 23fach erhöhter Chlorid-Konzentration. Dabei bildeten sich Konzentrationen wie sie in Rhone, Rhein und Aare vorkommen. Auch die Sulfat-Konzentration würde unter Szenario D um ein Mehrfaches erhöht. Die Konzentrationen lägen jedoch immer noch weit unter denen der anderen Flüsse.



Figur 8: Linth.

Prognostizierte Konzentrationen von Chlorid und Sulfat in der Linth. Blau: aktuelle Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014). Grün: berechnete Konzentrationen für die entsprechenden Szenarien bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014; der hellgrüne Bereich zeigt die Varianzbreite der Minimalabflüsse). Rot: berechnete Konzentrationen für in den Jahren 1999-2014 einmalig auftretenden Minimalabfluss (Extremsituation).

Aufgrund der geringen Wasserführung reagiert die Töss (Figur 9) am sensibelsten auf die zusätzlichen Chlorid- und Sulfat-Frachten, erst recht bei Niedrigwasserständen. Während den durchschnittlichen Minimalabflüssen würde die Chlorid-Konzentration unter Szenario B (höchste Chlorid-Fracht) um den Faktor fünf gegenüber des unveränderten Zustands zunehmen, bei extremen Niedrigwassersituationen um den Faktor neun. Die Chlorid-Konzentrationen, die schon im aktuellen Zustand im Mittel 38 mg L⁻¹ betragen, könnten auf Höchstwerte von 180 mg L⁻¹ bzw. gar auf bis zu 490 mg L⁻¹ ansteigen. Diese Konzentrationen liegen deutlich über den von verschiedenen Untersuchungen vorgeschlagenen Richtwerten von 100-150 mg L⁻¹ (siehe Kap. 3), allerdings jedoch nur kurzzeitig (Tage bis Wochen).



Figur 9: Töss.

Prognostizierte Konzentrationen von Chlorid und Sulfat in der Töss. Blau: aktuelle Konzentrationen von Chlorid und Sulfat bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014). Grün: berechnete Konzentrationen für die entsprechenden Szenarien bei durchschnittlichem Minimalabfluss (Mittel aus den Jahren 1999-2014; der hellgrüne Bereich zeigt die Varianzbreite der Minimalabflüsse). Rot: berechnete Konzentrationen für in den Jahren 1999-2014 einmalig auftretenden Minimalabfluss (Extremsituation).

Die Sulfat-Konzentrationen würden unter den Szenarien A, B und C bei Niedrigwasser um 40% auf durchschnittlich 12 mg L^{-1} zunehmen, eine Konzentration, die jedoch immer noch wesentlich unter denen von Rhone, Rhein und Aare liegt. Unter Szenario D hingegen könnte die Sulfat-Konzentration um das 40fache auf durchschnittlich 35 mg L^{-1} steigen und bei extremen Niedrigwasserständen gar Spitzen von über 90 mg L^{-1} erreichen. Das sind Konzentrationen, wie man sie in der Rhone findet.

8 Beeinflussung der unterliegenden Seen

Im Falle der Standorte II und V gelangen die Salzfrachten in die unterliegenden Seen Zürich- und Genfersee. Durch die Erhöhung der Salzfracht wird sich die Zusammensetzung des Seewassers ebenfalls verändern. Die zusätzliche Fracht eines Stoffes (L_{Salz}), der sich konservativ verhält (was wir für Chlorid und Sulfat annehmen können), erhöht die Konzentration im Stationärzustand ($[C_{\text{nachher}}]$) mit

$$[C_{\text{nachher}}] = [C_{\text{vorher}}] + L_{\text{Salz}} / Q_{\text{out}}$$

Die aktuellen mittleren Konzentrationen ($[C_{\text{vorher}}]$) von Chlorid und Sulfat (Zürichsee: 2004-2013; Genfersee: 2010-2011) in den durchmischten Seen (Februar/März) ist in der folgenden Tabelle 5 zusammengestellt. Angefügt ist ebenfalls der mittlere Jahresabfluss Q_{out} (2004-2013):

Tabelle 5: Mittlere Konzentrationen von Chlorid und Sulfat aus den Jahren 2004-2013 und die mittleren Jahresabflüsse von Zürich- und Genfersee.

	Zürichsee	Genfersee
Chlorid $[\text{mg L}^{-1}]$	5.0 ± 0.6	9.2 ± 0.4
Sulfat $[\text{mg L}^{-1}]$	14.8 ± 0.4	48.1 ± 1.4
Mittl. Abfluss Q_{out} $[\text{m}^3 \text{ yr}^{-1}]$	$2.36 \cdot 10^9$	$7.81 \cdot 10^9$

Die Zeit zur Erreichung des neuen Stationärzustands (95% des endgültigen Zustands) beträgt 3 τ (τ : Wasseraufenthaltszeit). Für den Zürichsee sind das 4.2 Jahre, für den Genfersee 34 Jahre.

In Tabelle 6 ist die Erhöhung der Konzentration des jeweiligen Ions in % der Ursprungskonzentration ($[C_{\text{vorher}}]$) nach Erreichung des Stationärzustands aufgeführt:

Tabelle 6: Mittlere Konzentrationen von Chlorid und Sulfat in mg L^{-1} , die sich in Zürich- und Genfersee je nach SwissZinc Szenario im Stationärzustand einstellen würden. Die Erhöhung in % bezüglich der aktuellen Konzentration ist in der Klammer angezeigt.

	Aktuell	A	B	C	D
Zürichsee					
Chlorid	5.0	7.3 (+46%)	10.7 (+114%)	9.2 (+84%)	8.0 (+60%)
Sulfat	14.8	14.9 (+0.9%)	14.9 (+0.9%)	14.9 (+0.9%)	15.9 (+7.2%)
Genfersee					
Chlorid	9.2	9.9 (+8%)	10.9 (+18%)	10.5 (+14%)	10.1 (+10%)
Sulfat	48.1	48.1 (+0.1%)	48.1 (+0.1%)	48.1 (+0.1%)	48.4 (+0.6%)

Mit der Linth als Standort für SwissZinc würde sich die Chlorid-Konzentration im Zürichsee nach 4.2 Jahren je nach Szenario zwischen 46% und 114% erhöhen. Die Sulfat-Konzentration hingegen wäre nicht messbar erhöht, ausser bei Szenario D (+7.2%).

Die Rhone als Standort würde den unterliegenden Genfersee wesentlich weniger beeinflussen. Nach 34 Jahren wäre die Chlorid-Konzentration um 18% angestiegen (Szenario B). Die Erhöhung der Sulfat-Konzentration bliebe bei allen Szenarien unmessbar gering.

9 Abschliessende Beurteilung

Wir beurteilen im Folgenden die Eignung der Standorte für SwissZinc nach den drei Kriterien

1. Maximale Chlorid-Konzentrationen, die durch die Einleitungen auftreten können
2. Veränderung des aktuellen Zustands durch die Einleitungen
3. Beeinflussung von unterliegenden Gewässern (Zürich- und Genfersee)

Die Wasserführung der **Töss** ist mit $2\text{--}4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sehr klein, weshalb durch die Einleitung von konstanten Mengen Chlorid zu sehr hohen Konzentrationen führen kann. Kurzzeitig könnten bei extrem niedrigem Abfluss unter Szenario B Chlorid-Konzentrationen bis zu 500 mg L^{-1} entstehen, was deutlich über den Qualitätszielen der EU-Direktive (250 mg L^{-1}) liegt. Wir beurteilen deshalb den Standort Töss als von allen zur Auswahl stehenden am wenigsten geeignet.

Ausser bei Niedrigwassersituationen in der Töss würde an keinem der für das SwissZinc-Projekt vorgeschlagenen Standorte das Qualitätsziel von $150 \text{ mg Cl}^{-1} \text{ L}^{-1}$ (in Kap. 3 diskutiert) überschritten.

Die **Linth** führt zehnmal mehr Wasser als die Töss, sodass die Einleitungen von Chlorid die Konzentrationen zu keiner Zeit über 35 mg L^{-1} erhöhen würden. Die Chlorid-Konzentration ist jedoch sehr niedrig und würde bei Einleitungen nach dem Szenario B über 40fach erhöht. Die an der Linth bestehende Biozönose würde durch die grosse relative Veränderung massiv beeinflusst.

Dazu kommt die Erhöhung der Chlorid-Konzentration im unterliegenden Zürichsee, die sich innerhalb von etwa 4 Jahren mehr als verdoppeln würde (Szenario B). Obwohl diese Verdoppelung vermutlich keine nachweislichen Veränderungen für die lokalen Lebensgemeinschaften hätte, sollte eine anthropogene Beeinflussung dieses Ausmasses in einem See möglichst vermieden werden.

Die **Rhone** führt noch einmal 2-3mal mehr Wasser als die Linth, und die aktuellen Konzentrationen von Chlorid und Sulfat sind schon relativ hoch, sodass der vorgesehene zusätzliche Eintrag keine grosse relative Veränderung bewirken würde (+25% Cl^- für Szenario B). Zu bedenken ist in dieser Stelle der unterliegende Genfersee. Im Verlauf von 34 Jahren würde die Chlorid-Konzentration um 8-18% zunehmen (Szenarien A und B). Diese relative Zunahme fällt allerdings nicht stark ins Gewicht, wenn die Entwicklung der anderen anthropogenen Quellen in Betracht gezogen werden: Die mittlere Chlorid-Konzentration im Genfersee hat sich in den letzten 40 Jahren mehr als verdreifacht.

Die **Aare** hat eine ähnliche Wasserführung wie die Rhone, jedoch ist die Saisonalität weniger ausgeprägt. Der geplante zusätzliche Eintrag erhöht die mittlere Konzentration nur um 15%, und Konzentrationsschwankungen wegen Niedrigwasserphasen erreichen Spitzen von 20 bis 30%.

Die mit Abstand grösste und gleichmässigste Wasserführung zeigt der **Rhein**. Mit einem Abfluss von $600 - 1100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ist der Verdünnungseffekt so gross, dass die Konzentrationserhöhung durch die geplante Chlorid-Fracht kaum mehr nachweisbar ist. Die zeitliche Fracht der unter Szenario B eingeleiteten Chlorid-Menge betrüge 0.43 kg s^{-1} .

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Töss und die Linth als Standorte vermieden werden sollten. Aare, Rhone und Rhein könnten realisiert werden, ohne dass grössere Beeinträchtigungen der Ökosysteme bzw. grössere Veränderungen der Konzentrationen von Chlorid oder Sulfat zu erwarten sind. Unter diesen ist der Rhein vorzuziehen, da der Verdünnungseffekt hier am grössten ist. Ob die zusätzliche Fracht von 0.43 kg s^{-1} (Szenario B) unter das IKS-Abkommen von 1976 fällt, müsste für die Standorte Rhein und Aare beim BAfU abgeklärt werden. Bei der Rhone muss bedacht werden, dass hier ein unterliegender See mit beeinträchtigt wird, wenn auch nur wenig. Die Veränderungen durch zusätzliche Sulfat-Frachten sind bei allen drei Standorten vernachlässigbar gering.

10 Referenzen:

BMLFUW 2014: Chlorid. Auswirkungen auf die aquatische Flora und Fauna, mit besonderer Berücksichtigung der vier biologischen Qualitätselemente gemäss EU-WRRL. Ministerium für ein lebenswertes Österreich. www.bmlfuw.gv.at. Wien, Oktober 2014.

CCME, 2011b. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Chloride. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg. 2011.

Eawag 2011: Strassensalzung. Faktenblatt.

GSchV: Gewässerschutzverordnung vom 28. Okt. 1998 (Stand am 1. Januar 2014).

HBio 2010a: Ableitung ökologisch begründeter Schwellenwerte des Chloridgehaltes und Abschätzung des Einflusses der Gewässerstruktur auf das Makrozoobenthos in NRW. Büro für Hydrobiologie, Mainz. 2010.

HBio 2010b: Einfluss des Salzgehaltes auf die makrozoobenthische Besiedlung Sachsen-Anhalts.- unveröff. Bericht i.A. des LHW Sachsen-Anhalt 81(02/10), Büro für Hydrobiologie, Mainz. 2010.

IKSR 1976: Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung. Zusatzprotokoll zum Übereinkommen zum Schutz des Rheins gegen Verunreinigung durch Chloride, unterzeichnet am 3. Dez, 1976 in Bonn.

<http://www.amtsdruckschriften.bar.admin.ch/viewOrigDoc.do?id=10052153>

EPA 2001: Parameters of water quality. Interpretation of standards. Environmental protection agency, Ireland. www.epa.ie/rivermap/docs/Parameters.pdf

Müller B, Gächter R (2011) Increasing chloride concentrations in Lake Constance: Characterization of sources and estimation of loads. *Aquatic Sci.* Doi:10.1007/s00027-011-0200-0.

Zobrist J, Reichert P (2006) Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds. *J Hydrobiol* 329, 207-223.