

Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser im Vierwaldstättersee und der Luzerner Reuss

Beurteilung des Einzugsgebiets und des Sees



Zofingen, 08. April 2013

Im Auftrag der Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, AK-VWS



Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser im Vierwaldstättersee und der Luzerner Reuss

Beurteilung des Einzugsgebiets und des Sees

Auftraggeber:

Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, c/o Amt für Umwelt Nidwalden, Gérald Richner, Engelbergstrasse 34, Postfach 1240, 6371 Stans

Autor:

Christian Götz (Datenanalyse, Modellierung und Bericht), ENVILAB AG, Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen, christian.goetz@envilab.ch

Fachliche Begleitung:

Eva Schager, Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden

Gérald Richner, Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden

Lorenz Jaun, Amt für Umweltschutz Kanton Uri

Philip Barufa, Amt für Umweltschutz, Kanton Schwyz

Robert Lovas, Umwelt und Energie, Kanton Luzern

Sabine Betschart, Amt für Landwirtschaft und Umwelt, Gewässerschutz, Kanton Obwalden

GIS basierte Darstellungen:

Birgit Huggler, HOLINGER AG, Alpenquai 12, 6005 Luzern

Informationen / Kontakt:

Der Bericht kann bei der Aufsichtskommission Vierwaldstättersee angefragt werden.

Telefon 041 618 75 01, Telefax 041 618 75 28, E-Mail gerald.richner@nw.ch

ENVILAB AG

Mühlethalstrasse 25, CH-4800 Zofingen

Telefon +41 (0)62 823 29 51, Fax +41 (0)62 823 73 52

www.envilab.ch, info@envilab.ch

Version	Datum	Dateiname	Sachbearbeitung	Freigabe
2.1	08.04.2013	Z3282-Bericht Version 2.0.pdf	Christian Götz Birgit Huggler	Christian Götz

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	3
1 EINLEITUNG	7
1.1 Ausgangslage	7
1.1.1 Aktueller Vorschlag zur Änderung des GSchG und der GSchV	7
1.1.2 Studien zum Thema Mikroverunreinigungen	9
1.2 Vorstudie im Vierwaldstättersee: Substanzscreening in drei Seebecken	9
1.3 Kläranlagen im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees und der Luzerner Reuss	12
2 STOFFFLUSSMODELLIERUNG DES EINZUGSGEBIETS	15
2.1 Stoffflussmodell	15
2.1.1 Grundsätzlicher Aufbau und Programmierung	15
2.1.2 Austauschtable	17
2.1.3 Zeithorizont	17
2.2 Stoffauswahl: Indikatorsubstanzen	18
2.3 Ökotoxikologische Beurteilung	18
2.3.1 Beurteilungsschema	18
2.3.2 Verwendete Qualitätskriterien	19
3 BEURTEILUNG DER VORFLUTER IM EINZUGSGEBIET	21
3.1 Modellierung des Abwasseranteils der Vorfluter	21
3.2 Modellierung der Stoffflüsse und Konzentrationen	22
4 SEEMODELLIERUNG	24
4.1 Modell und Parametrisierung	24
4.2 Messdaten	26
4.3 Stoffflüsse in den Vierwaldstättersee	26
4.4 Konzentrationen von Mikroverunreinigungen im Alpnachersee	27
4.5 Konzentrationen von Mikroverunreinigungen im Vierwaldstättersee	31
5 AUSBAUSZENARIEN	35
5.1 Definition und Beschreibung der Szenarien	35
5.2 Annahmen und Rahmenbedingungen der Szenarienanalysen	39
5.3 Verbesserung der Wasserqualität in den Fliessgewässern	39
5.3.1 Szenario 1: Ausbau nach aktuellen BAFU Kriterien	39
5.3.2 Szenario 2: Ausbau nach aktuellen BAFU Kriterien inkl. kleine Anlagen	40
5.3.3 Szenario 3: Alle für einen Ausbau / eine Ableitung von den kantonalen Behörden angedachten Anlagen	42

5.4	Einfluss der Frachtreduktion auf die Konzentrationen im Alpnachersee	43
5.5	Einfluss der Ausbaustrategien auf die Wasserqualität des gesamten Vierwaldstättersees	45
6	KOSTENBERECHNUNGEN	48
6.1	Kosten einer Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen	48
6.1.1	Kostengrundlage	48
6.1.2	Investitions- und Betriebskosten PAK-Verfahren	48
6.1.3	Investitions- und Betriebskosten Ozonung	49
6.2	Kostenschätzungen für die Anlagen im Gebiet des Vierwaldstättersees	50
6.3	Kosten der Ableitungen	53
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	54
8	LITERATURVERZEICHNIS	55

ANHANG

Anhang 1 Analysenbericht Nr. Z3285 – L01/12

Anhang 2 Modellierungsdaten

ZUSAMMENFASSUNG

Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, also Arzneimittelrückstände, Haushalt-chemikalien, Biozide und weitere Stoffe mit Ursprung im Siedlungsgebiet, kommen in den Gewässern teilweise in ökotoxikologisch problematischen Konzentrationen vor und haben einen grossen Anteil an den in Gewässern gefundenen anthropogenen organischen Spurenstoffen. In dieser Studie wurde das Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees und das Einzugsgebiet der Luzerner Reuss bis zur Kläranlage Rontal modelliert. Der Fokus lag auf der Untersuchung der Belastung des Vierwaldstättersees, der Belastung der Vorfluter im Einzugsgebiet und der Identifizierung und Beschreibung verschiedener Reduktionsszenarien.

Ausgangslage: Im Jahr 2009 wurden im Vierwaldstättersee von der Eawag verschiedene Proben auf eine sehr breite Palette an Mikroverunreinigungen untersucht. Es wurde dabei festgestellt, dass die meisten gefundenen Stoffe aus siedlungsbürtigen Quellen stammen und daher das kommunale Abwasser einer der Haupteintragspfade für organische Spurenstoffe im Vierwaldstättersee zu sein scheint. Es wurde bei den Messungen auch festgestellt, dass der Alpnachersee deutlich stärker belastet war, als die zwei anderen untersuchten Seebecken, der Urnersee und der Luzernersee. In der Zwischenzeit hat das Bundesamt für Umwelt BAFU in verschiedenen Studien den Handlungsbedarf betreffend Mikroverunreinigungen evaluiert und bereits sowohl einen Vorschlag für die Anpassung der Gewässerschutzverordnung als auch des Gewässerschutzgesetzes für die Reduktion der Belastung in die Vernehmlassung geschickt. Darin wird unter anderem festgehalten, dass die Kantone im Rahmen einer Einzugsgebietsplanung unter Berücksichtigung der vom Bund vorgegebenen Rahmenkriterien, die Kläranlagen benennen sollen, welche für einen weitergehenden Ausbau mit einer Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen vorgesehen werden müssen. Aus diesen Gründen hat die Aufsichtskommission Vierwaldstättersee eine Modellstudie in Auftrag gegeben, in welcher die Belastungslage des Vierwaldstättersees und des Einzugsgebiets systematisch erfasst und Strategien zur Reduktion der Belastung vorgeschlagen werden sollen.

Stofffluss- und Seenmodell: Zur flächendeckenden Analyse des Einzugsgebiets kam ein Stoffflussmodell zur Anwendung, welches an der Eawag für das BAFU entwickelt wurde und bereits in verschiedenen ähnlichen Fragestellungen angewendet und validiert wurde (Ort, et al., 2007; Longrée, et al., 2011). Basierend auf der Modellierung der Stofffrachten wurden dabei mit dem Mindestabfluss Q_{347} die Konzentrationen in den Vorflutern bei Trockenwetter bestimmt und mit wirkungsbasierten ökotoxikologischen Qualitätskriterien verglichen. Mit einem Beurteilungskonzept, welches an das Modul-Stufen-Konzept des BAFU angelehnt ist, wurde die Wasserqualität der betroffenen Fliessgewässer am Beispiel einiger wichtigen bekannten Mikroverunreinigungen beurteilt (Götz, et al., 2011; Abegglen, et al., 2012). Die Konzentrationsverläufe im Vierwaldstättersee wurden mit dem Seenmodellierungsprogramm *MSASlight* modelliert. Dabei wurde der Alpnachersee, welcher gemäss der vorangegangenen Studie von 2009 stärker belastet ist als die übrigen Becken des Vierwaldstättersees, separat modelliert.

Aktuelle Belastungslage / Handlungsbedarf: Von den 31 betrachteten Kläranlagen im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees und der Luzerner Reuss, leiten 8 Anlagen direkt in den See und 23 Anlagen in Fließgewässer ein. Die Analyse der aktuellen Belastungslage hat gezeigt, dass insgesamt in sechs der 23 modellierten Fließgewässer direkt unterhalb der Einleitstellen der Kläranlagen (ohne Anlagen mit Einleitung in den See), also in rund 25% aller untersuchten Vorfluter, ein Abwasseranteil von mehr als 10% auftritt. In diesen Vorflutern ist ebenfalls das Qualitätskriterium von Diclofenac, einem Schmerzmittel das insbesondere auf Forellen toxisch wirkt, überschritten. Hohe Konzentrationen von Mikroverunreinigungen treten vor allem unterhalb von kleineren und mittleren Anlagen mit schwachen Vorflutern auf: Sagenbach (Sattel), Seeweren (Schwyz), A2-Kanal (Rotzwinkel), Würzenbach (Udligenswil), Gerligebach (Ballwil) und Bilbach (Ruswil). Zusätzlich zu den sechs Vorflutern, welche bei Q_{347} Überschreitungen des Qualitätskriteriums von Diclofenac zeigen, gibt es verschiedene Restwasserstrecken, in welche Abwasser eingeleitet wird: Engelberger Aa (bei Engelberg und Buochs), grosse Melchaa (bei Kerns) und eine Restwasserstrecke der Reuss (bei Inwil/Eschenbach). Abschätzungen der Wasserabflüsse der Restwasserstrecken der Engelberger Aa bei Engelberg und bei Buochs zeigen, dass unter gewissen Bedingungen (keine Schneeschmelze, wenig Zufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet) dort durchaus Abwasseranteile von mehr als 10% und somit problematische Konzentrationen von Mikroverunreinigungen auftreten können. Die Restwasserstrecken der Melchaa und der Reuss sind vermutlich nicht problematisch. Für die Szenarienanalysen wurden die Restwasserstrecken nicht speziell berücksichtigt, unter anderem weil die Wassermengen der Restwasserstrecken zu wenig genau bekannt sind. Für die Engelberger Aa sollte die Situation genauer abgeklärt werden. Mit Probenahmen und Messungen von Mikroverunreinigungen bei Niedrigwasser, könnten Hinweise auf das tatsächlich vorhandene Verdünnungsverhältnis gewonnen werden.

Die Modellierung der Seebecken und der Vergleich mit Messdaten, welche im Rahmen dieser Studie erhoben wurden, haben gezeigt, dass der Alpnachersee relativ hohe Konzentrationen von organischen Spurenstoffen und einen geschätzten Abwasseranteil an kommunalem Abwasser von rund 5% aufweist. Im Weiteren wurde gezeigt, dass eine erhöhte Belastung mit Stoffen aus Spitalabwasser im Alpnachersee feststellbar ist. Das Seenmodell der übrigen Seebecken zeigt auf, dass die Gesamtbelastung des Vierwaldstättersees mit Stoffen aus kommunalem Abwasser vergleichsweise gering ist: Der See hat einen geschätzten Abwasseranteil von rund 0.5% und ist damit etwa halb so stark belastet wie beispielsweise der Bodensee und zehnmal weniger belastet als der Alpnachersee.

Reduktionsstrategien: Es wurden drei verschiedene Szenarien definiert und evaluiert: (1.) Ausbau der Kläranlagen nach den aktuellen Kriterien des BAFU, (2.) Ausbau nach den aktuellen Kriterien des BAFU und Ableitung der kleineren Anlagen mit problematischen Vorflutern auf die nächstgrössere mit einer weitergehenden Reinigungsstufe ausgerüstete ARA und (3.) Ausbau und Ableitung aller von den kantonalen Behörden angedachten Anlagen. Es wurden sowohl die Auswirkungen der Reduktionsstrategien auf den See als auch auf die Belastung des Einzugsgebiets modelliert.

Szenario 1: Die Kläranlagen Altdorf, Alpnach/Sarneraatal, Stans/Rotzwinkel, Schwyz und Emmen/REAL werden mit einer weitergehenden Reinigungsstufe ausgebaut. Nach dem Ausbau der fünf Kläranlagen, würden die Überschreitungen in den Vorfluter von sechs auf vier Einleitstellen gesenkt. Entlastet würden die Fliessgewässerabschnitte unterhalb von Schwyz (Seeweren und Muota) und das kurze Stück des A2-Kanals (ca. 650m) vor der Einmündung in den Alpnachersee. Bezüglich der Verbesserung der ökotoxikologischen Wasserqualität im Einzugsgebiet wäre der Effekt des Ausbaus der fünf Kläranlagen daher relativ gering. Die gesamte Stofffracht würde hingegen sehr effizient reduziert. Wenn man von einer mittleren Reinigungsleistung von 90% ausgeht, würde die Gesamtfracht an Mikroverunreinigungen aller modellierten Kläranlagen um 64% reduziert. Die Fracht in den Vierwaldstättersee würde dabei um rund 60% reduziert, wobei die Fracht in den Alpnachersee sogar um etwa 90% kleiner würde. Die mittleren Konzentrationen der betrachteten Mikroverunreinigungen im See würden gemäss dem Seenmodell im Alpnachersee nach zwei Jahren ca. zehnmal; und in den übrigen Seebecken nach rund 10 Jahren ca. dreimal tiefer liegen als heute.

Szenario 2: Neben den fünf grossen Kläranlagen, welche nach den BAFU Kriterien ausgebaut werden müssten, werden im Szenario 2 zusätzlich die Anlagen Sattel, Udligenswil, Ballwil und Ruswil aufgehoben und auf eine grössere Anlage abgeleitet. Mit diesen Massnahmen würden sämtliche problematische Vorfluter entlastet und es sollten im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees und der Luzerner Reuss bis und mit ARA Rontal keine Überschreitungen der untersuchten Mikroverunreinigungen bei Mindestabfluss Q_{347} mehr vorkommen. Auf die Frachtreduktion resp. die Konzentrationen im See haben diese Ableitungen im Vergleich zum Ausbau der grossen Anlagen nur einen marginalen Einfluss, es würden zusätzlich zum Szenario 1 lediglich 2% der mittleren Stofffracht in den Vierwaldstättersee mehr reduziert.

Szenario 3: Wenn alle von den kantonalen Fachstellen geplanten und angedachten Ableitungen und Zusammenschlüsse realisiert würden, würde zusätzlich zu den im Szenario 2 ausgebauten und abgeleiteten ARA die Kläranlagen Erstfeld, Gersau, Muotathal, Engelberg, Kerns, Buochs, Weggis/Vitznau, Talschaft Entlebuch, Sörenberg, Schwarzenberg und Inwil/Oberseetal abgeleitet. Insgesamt würden dabei 14 der bestehenden 31 Kläranlagen im untersuchten Gebiet aufgehoben. Alle Anlagen würden auf eine der grossen fünf Kläranlagen, welche eine weitergehende Reinigungsstufe bauen müssten, abgeleitet. Analog zum Szenario 2 würden keine Überschreitungen im Einzugsgebiet mehr auftreten. Die gesamte mittlere Stofffracht an organischen Spurenstoffen würde unter diesen Annahmen um 84% reduziert werden.

Kostenrechnung: Die spezifischen Kosten pro Einwohner für eine weitergehende Stufe sind von der Grösse der Anlage abhängig. Je grösser die Anlage ist, desto tiefer fallen die spezifischen Kosten aus (BG Ingenieure und Berater AG, 2012). Mit Hilfe von grössenabhängigen Kostenfunktionen wurden die Investitions- (resp. Kapitals-) und Betriebskosten für die fünf Anlagen, welche nach aktuellen Kriterien eine weitergehende Reinigungsstufe bauen müssten, abgeschätzt. Es wurde bei allen Anlagen angenommen, dass die Filtration ebenfalls ersetzt resp. neu gebaut werden müsste. Die Grössenordnung der spezifischen Jahreskos-

ten (Kapital- und Betriebskosten) bewegt sich je nach Anlage zwischen CHF 6.60 und 34.00 pro Einwohner und Jahr. Sehr entscheidend für die Jahreskosten ist, über wie viele Jahre die Investitionskosten abgeschrieben werden. Schreibt man linear über 30 Jahre ab, fällt der grösste Teil der Jahreskosten auf die Betriebskosten. Bei einer rascheren Abschreibung von einem Teil der Investitionen, z.B. der technischen Installationen, machen die Investition- resp. Kapitalkosten einen grösseren Anteil aus. Nach dem aktuellen Vorschlag der Änderung des Gewässerschutzgesetzes würden 75% der Investitionskosten vom Bund abgegolten.

Schlussfolgerungen: Die Wasserqualität im Vierwaldstättersee ist generell als sehr gut zu beurteilen. Mit Mikroverunreinigungen am stärksten belastet ist der Alpnachersee, welcher geschätzt rund 5% gereinigtes Abwasser enthält, was mehr ist als im Zürichsee und deutlich mehr, nämlich rund zehnmal soviel, wie in den restlichen Seebecken des Vierwaldstättersees. Der Alpnachersee würde insbesondere von einem Ausbau der Kläranlagen Alpnach/Sarneraatal und Stans/Rotzwinkel stark profitieren. Beide Kläranlagen wären nach den aktuellen Kriterien des Vorschlags zur Änderung der Gewässerschutzverordnung GSchV des BAFU auszubauen. Zusätzlich müssten die ARA Altdorf, Schwyz und Emmen/REAL ausgebaut werden. Für die Reduktion der Stofffracht (Ziel des BAFU: 40% Reduktion schweizweit) und den Schutz des Sees, wäre der Ausbau dieser fünf Anlagen nach dem heutigen Wissen ausreichend. Im Einzugsgebiet ist der Effekt dieser Ausbaustrategie voraussichtlich jedoch relativ gering. Um die Wasserqualität der stark belasteten Vorfluter zu verbessern, wäre es sinnvoll, zusätzlich zum Ausbau der fünf vorgeschlagenen Kläranlagen die ARA Sattel, Udligenswil, Ballwil und Ruswil aufzuheben und auf grössere Anlagen abzuleiten. Mit diesem Massnahmenpaket (gem. Szenario 2) würde sowohl das Einzugsgebiet betreffend ökotoxikologischer Gewässerqualität ausreichend geschützt, als auch die Frachten effizient reduziert. Die Situation in den Restwasserstrecken der Engelberger Aa (Einleitungen der ARA Engelberg und Buochs) müsste noch genauer analysiert werden. Weitere Untersuchungen wie beispielsweise die Messung einer repräsentativen Auswahl von Mikroverunreinigungen in den Vorflutern bei Niedrigwasser wären sowohl zur Abstützung der Modellresultate in den oben genannten Vorflutern mit mehr als 10% Abwasseranteil bei Q_{347} , als auch in den Restwasserstrecken sinnvoll. Für Anlagen, welche unter die BAFU Kriterien für einen weitergehenden Ausbau fallen, wurde im Vorschlag zur Änderung des Gewässerschutzgesetzes GSchG genannt, dass Ableitungen von Kläranlagen bis maximal zum Preis einer eigenen weitergehenden Stufe, ebenfalls zu 75% abgegolten werden. Da die vier Anlagen Sattel, Udligenswil, Ballwil und Ruswil nicht die Grösse von 8'000 angeschlossenen Einwohnern haben, wären mit dem aktuellen Entwurf zur Gesetzesänderung aber wahrscheinlich keine Abgeltungen für die Leitungen zu erwarten. Neben der Problematik der Mikroverunreinigungen gibt es aber weitere gewichtige Argumente dafür kleine ARA zu grösseren Anlagen zusammenzufassen: Die im Allgemeinen bessere Reinigungsleistung auf grösseren Anlagen, die Entlastung von kleinen Vorflutern von Schmutz- und Nährstoffen, eine bessere Energieeffizienz und der effizientere und kostengünstigere Betrieb (Maurer, et al., 2006). Für Kostenschätzungen im Einzelfall und eine konkrete Umsetzung müssen der Erneuerungsbedarf und die bestehenden Reserven der entsprechenden ARA miteinbezogen werden.

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage

Organische Spurenstoffe in natürlichen Gewässern stehen in Politik, Vollzug und in der jüngsten Umweltforschung mehr und mehr im Zentrum des Interesses. Neben verschiedenen Messkampagnen und Studien, in welchen organische Spurenstoffe in diversen Gewässern nachgewiesen wurden, werden auch negative Effekte dieser Substanzen im tieferen µg/L und teilweise bereits im ng/L Bereich nachgewiesen (Hirsch, et al., 1999; Escher, et al., 2008; Götz, et al., 2010; Longrée, et al., 2011; DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, 2002; Umweltministerium Baden-Württemberg, 2008). Diese organischen Spurenstoffe werden aufgrund des Konzentrationsbereiches welcher typischerweise im ng/L bis µg/L Bereich liegt auch Mikroverunreinigungen genannt.

Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, also Arzneimittelrückstände, Haushaltsschemikalien, Biozide und weitere Stoffe mit Ursprung im Siedlungsgebiet, haben einen grossen Anteil an den in Gewässern gefundenen anthropogenen organischen Spurenstoffen (Gälli, et al., 2009; Abegglen, et al., 2012; Longrée, et al., 2011; DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), 2008). Für Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser können vier Haupteintragspfade in die Gewässer unterschieden werden: (1) Eintrag mit gereinigtem Abwasser über Kläranlagen; (2) Eintrag mit ungereinigtem Abwasser über Mischwasserentlastungen bei Kapazitätsüberschreitungen der Kanalisation und der Kläranlagen; (3) Eintrag durch Leckagen in der Kanalisation oder Fehlanlüsse; und (4) Eintrag mit verschmutztem Niederschlagswasser von Dächern oder versiegelten Flächen durch Regenkanäle. Da viele Mikroverunreinigungen in konventionellen Kläranlagen nicht gut abgebaut werden und mengenmässig der grösste Anteil an Abwasser durch Kläranlagen in die Gewässer eingetragen wird, stellt der Eintrag über Kläranlagen für die meisten Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser den wichtigsten Eintragspfad dar (Gälli, et al., 2009).

1.1.1 Aktueller Vorschlag zur Änderung des GSchG und der GSchV

Um der Problematik von Rückständen von Arzneimittel, Haushaltsschemikalien, Bioziden etc. in den Gewässern, sogenannten Mikroverunreinigungen, zu begegnen, arbeitet das Bundesamt für Umwelt BAFU seit einigen Jahren daran, den Handlungsbedarf zu evaluieren und Handlungsstrategien zu entwickeln (Schärer, et al., 2010; Abegglen, et al., 2012). Für Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser wurde ein Handlungsbedarf identifiziert und es wurden bereits entsprechende gesetzliche Anpassungen vorbereitet: Am 25. April 2012 hat der Bundesrat und das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) in einer Medienmitteilung die wichtigsten Eckpunkte einer geplanten Änderung der Gewässerschutzgesetzgebung kommuniziert (Eidgenössisches Departement

für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2012):

„Damit die Mikroverunreinigungen aus dem gereinigten Abwasser in die Gewässer halbiert werden können, müssen rund hundert Abwasserreinigungsanlagen (ARA) in der Schweiz speziell aufgerüstet werden. Zur Deckung von 75 Prozent der Investitionskosten schlägt der Bundesrat eine Spezialfinanzierung vor: Von sämtlichen ARA in der Schweiz soll – abhängig von der Anzahl der angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohner – eine Abgabe erhoben werden. Am 25. April 2012 hat der Bundesrat eine entsprechende Änderung des Gewässerschutzgesetzes in die Vernehmlassung geschickt.

„Die Investitionskosten des Ausbaus von rund 100 der 700 ARA in der Schweiz werden auf 1,2 Milliarden Franken geschätzt. Zum Vergleich: Der Wiederbeschaffungswert der heutigen Infrastruktur zur Abwasserentsorgung beträgt etwa 80 Milliarden Franken. Ausgehend von einer Umsetzung der Massnahmen über 20 Jahre hat das BAFU die jährlichen Kosten mit 60 Millionen Franken veranschlagt. Zur Finanzierung von 75 Prozent der Investitionen benötigt der Bund demnach jedes Jahr 45 Millionen Franken. Um die Bereitstellung dieser Mittel zu gewährleisten, muss pro an eine ARA angeschlossene Einwohnerin oder Einwohner, eine Abgabe von jährlich maximal 9 Franken erhoben werden. Die Abgeltungen werden nur geleistet, wenn die vorgesehene Lösung auf einer zweckmässigen Planung beruht, einen sachgemässen Gewässerschutz gewährleistet, dem Stand der Technik entspricht und wirtschaftlich ist. Die Voraussetzungen für die Gewährung der Abgeltungen werden später in der Gewässerschutzverordnung präzisiert.“

„Damit die Mikroverunreinigungen im behandelten Abwasser in ausreichendem Masse und zu tragbaren Kosten verringert werden können, müssen rund 100 ARA aufgerüstet werden. Es handelt sich dabei um:

- ARA mit mehr als 80'000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern;
- ARA mit mehr als 24'000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern im Einzugsgebiet von Seen. Die Kantone können in begründeten Ausnahmefällen vom einem Ausbau solcher ARA absehen, wenn der Nutzen für die Ökosysteme und die Trinkwasserversorgung im Verhältnis zu den Investitionen vernachlässigbar klein ist;
- ARA mit mehr als 8'000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern, deren Abwasser mehr als 10 Prozent des Fließgewässers ausmachen, in welches sie eingeleitet werden. Bei dieser Kategorie von ARA müssen die Kantone im Rahmen einer Planung im Einzugsgebiet bestimmen, welche ARA aufzurüsten sind.“

(Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2012)

1.1.2 Studien zum Thema Mikroverunreinigungen

Das Thema der Mikroverunreinigungen in Gewässer und die damit verbundenen Verfahren und Kosten sind unter anderem aufgrund der geplanten Änderung des Gewässerschutzgesetzes hoch aktuell. Deshalb soll hier auf einige Publikationen über die in dieser Studie behandelte Thematik aufmerksam gemacht werden.

Im Bericht des BAFU mit dem Titel „Mikroverunreinigungen in kommunalem Abwasser“ (Abegglen, et al., 2012) welcher im Mai 2012 veröffentlicht wurde, werden die verschiedenen Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen vorgestellt und ihre Wirkung auf die Wasserqualität aufgezeigt. Ein Konzept zur Beurteilung der Belastung wurde im Auftrag des BAFU ebenfalls an der Eawag erarbeitet (Götz, et al., 2011; Götz, et al., 2010).

Im Auftrag des BAFU wurde der Bericht „Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser“ (BG Ingenieure und Berater AG, 2012) im April 2012 veröffentlicht. Er zeigt unter Einbezug neuer Kostendaten und unter Berücksichtigung der aktuell diskutierten Rahmenbedingungen und Ausbauszenarien die Kosten für die Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser auf.

In der Eawag Studie aus dem Jahr 2006 (Maurer, et al., 2006) wird der Zustand, die Kosten und der Investitionsbedarf der bestehenden schweizerischen Abwasserentsorgung beschrieben.

In einer Studie im Bodensee und in dessen Einzugsgebiet, wurde ein Substanzscreening durchgeführt und der Handlungsbedarf in Bezug auf organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser untersucht, sowie mögliche Ausbauoptionen eruiert (Singer, et al., 2009; Longrée, et al., 2011; DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), 2008).

1.2 Vorstudie im Vierwaldstättersee: Substanzscreening in drei Seebecken

Im 2009/2010 wurden im Vierwaldstättersee im Auftrag der Aufsichtskommission drei der Seebecken auf eine breite Palette an Mikroverunreinigungen aus Siedlung und Landwirtschaft untersucht (Singer et al. 2010, Abschlussbericht, EAWAG und Aufsichtskommission VWS). Es wurde zur Untersuchung ein quantitatives Substanz-Screening eingesetzt, welches über 250 bekannte Mikroverunreinigungen umfasst. Die untersuchte Stoffpalette deckte sowohl die in der Schweiz am häufigsten gefundenen Pflanzenschutzmittel als auch die wichtigsten bekannten Arzneimittel, Haushaltschemikalien und teilweise deren Abbauprodukte ab.

In der Abbildung 1 sind die Probenahmestellen der durchgeführten Untersuchungen abgebildet.

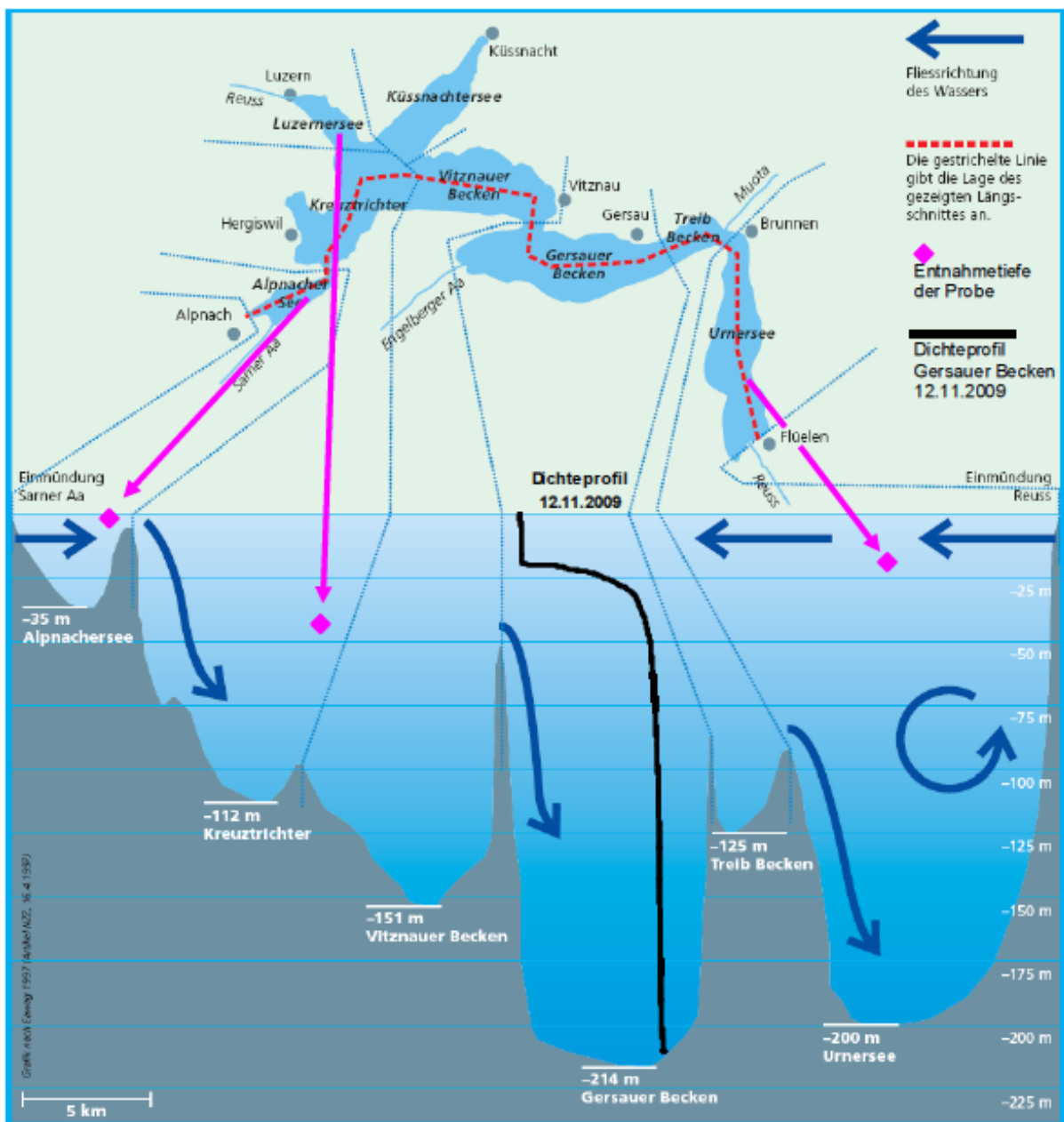


Abbildung 1: Untersuchungen im Vierwaldstättersee auf eine breite Palette an Mikroverunreinigungen (Singer et al. 2010, Abschlussbericht, EAWAG und Aufsichtskommission VWS).

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass der Alpachersee eine deutlich höhere Belastung aufweist als die zwei anderen untersuchten Seebecken.

Im Bericht wird die Situation folgendermassen zusammengefasst (Singer et al. 2010, Abschlussbericht, EAWAG und Aufsichtskommission VWS):

„Es kann festgestellt werden, dass sowohl das Tiefenwasser im Luzerner- und Urnersee als auch das ufernahe Oberflächenwasser aus dem Alpachersee aufgrund des alpinen Einzugsgebiet so gut wie keine nachweisbare Belastungen mit Pestiziden aus der

Landwirtschaft aufweist. Die positiven Substanzbefunde im Vierwaldstätter-see werden vor allem durch die Siedlungsentwässerungen verursacht. Eine Verminderung der sehr geringen, wenn auch nachweisbaren Gewässerbelastung des Vierwaldstättersees mit siedlungsbürtigen Chemikalien könnte damit durch weitergehende Verfahrensschritte (Ozonung, Aktivkohlebehandlung) bei der kommunalen Abwasserreinigung erreicht werden.“

Im Bericht wird empfohlen mit Fokus auf die in diesen Untersuchungen identifizierten Stoffe mit den höchsten Befunden die Gesamtsituation mit einem Modellansatz, analog wie er zur Beurteilung des Bodensees gewählt wurde, zu beurteilen und Reduktionsstrategien zu erarbeiten. Zu den Stoffen mit den höchsten Befunden, insbesondere im Alpnachersee, gehören das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol und die Süsstoffe Acesulfam und Sucralose.

1.3 Kläranlagen im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees und der Luzerner Reuss

Insgesamt wurden 31 Kläranlagen berücksichtigt. Davon befinden sich 22 im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees. Die übrigen neun untersuchten Kläranlagen befinden sich im oberen und mittleren Reusseinzugsgebiet und wurden bis ARA Rontal LU berücksichtigt. In der Abbildung 2 sind alle Kläranlagen dargestellt.

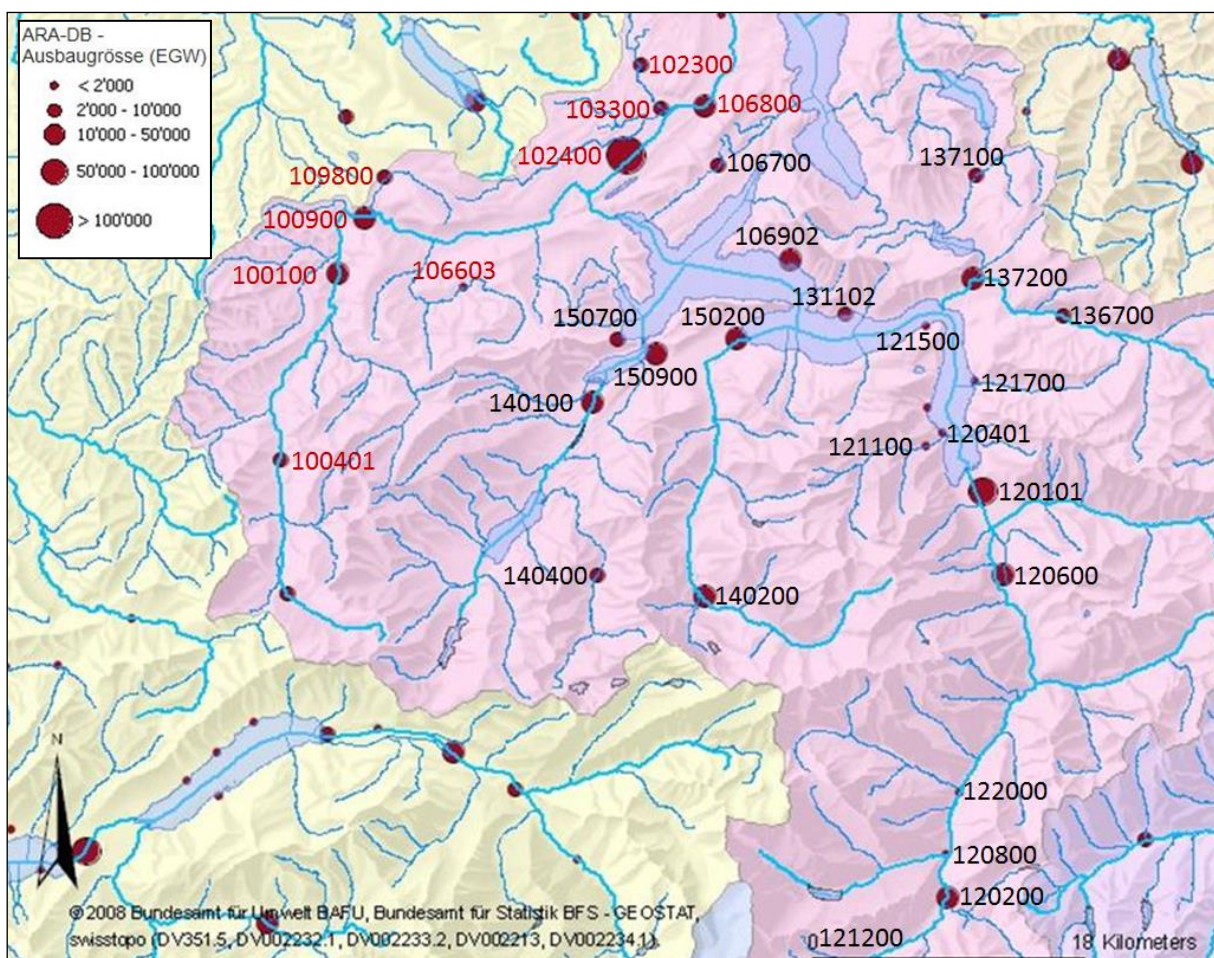


Abbildung 2: Kläranlagen im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (ID-Nummern schwarz) und im Einzugsgebiet der Reuss oberhalb der ARA Rontal LU (ID-Nummern rot). Die Grösse der Punkte illustriert die Ausbaugrösse in Einwohnergleichwerten (EGW). Daten EGW aus GEWISS, <http://gewiss.admin.ch>

In der Tabelle 1 sind die berücksichtigten ARA, die angeschlossenen Einwohner und die Dimensionierung der Kläranlagen angegeben. In der Tabelle 2 sind die Vorfluter der ARA mit den entsprechenden mittleren Niedrigwasserabflüssen Q_{347} aufgelistet.

Tabelle 1: Kläranlagen im Einzugsgebiet (EZG) des Vierwaldstättersees und im EZG der Reuss oberhalb der ARA Rontal. Angabe von angeschlossenen Einwohnern und der Dimensionierung (in Einwohnergleichwerten, EWG).

ARA Nummer	Name der ARA	Kanton	EZG VWS	Angeschlossene Einwohner	Einwohnergleichwerte (Dimensionierung)
120101	ALTDORF	UR	JA	23'200	55'500
120200	ANDERMATT	UR	JA	1'500	11'083
120401	BAUEN	UR	JA	150	617
120600	ERSTFELD	UR	JA	6'500	12'500
120800	GOESCHENEN	UR	JA	450	1'500
121100	ISENTHAL	UR	JA	500	650
121200	REALP	UR	JA	150	617
121500	SEELISBERG	UR	JA	600	1'867
121700	SISIKON	UR	JA	350	1'917
122000	WASSEN	UR	JA	400	1'417
131102	GERSAU	SZ	JA	1'900	10'000
136700	MUOTATHAL	SZ	JA	3'190	8'750
137100	SATTEL	SZ	JA	1'600	3'750
137200	SCHWYZ	SZ	JA	28'550	70'000
140100	ALPNACH (SARNERAATAL)	OW	JA	31'000	29'000
140200	ENGELBERG	OW	JA	3'850	25'000
140400	KERNS (MELCHTAL)	OW	JA	500	3'500
150200	BUOCHS (AUMUEHLE)	NW	JA	14'368	16'667
150700	HERGISWIL (LOPPER)	NW	JA	4'415	6'000
150900	STANS (ROTZWINKEL)	NW	JA	21'459	25'000
106700	UDLIGENSWIL	LU	JA	2'002	4'750
106902	WEGGIS / VITZNAU (LUETZELAU)	LU	JA	5'116	10'000
100100	TALSCHAFT ENTLEBUCH	LU	NEIN	13'554	17'500
100401	SOERENBERG	LU	NEIN	1'791	2'400
100900	WERTHENSTEIN (BLINDEI)	LU	NEIN	6'417	11'500
102300	BALLWIL	LU	NEIN	2'295	2'983
102400	EMMEN (BUHOLZ) / REAL	LU	NEIN	162'369	375'000
103300	INWIL (ESCHENBACH) / Oberseetal	LU	NEIN	6'945	10'000
106500	RONTAL (ROOT)	LU	NEIN	22'925	45'000
106603	SCHWARZENBERG/DORF	LU	NEIN	1'566	1'933
109800	RUSWIL	LU	NEIN	5'406	5'825

Tabelle 2: Vorfluter und Niedrigwasserabfluss (Q_{347}) der untersuchten Kläranlagen.

ARA Nummer	Name der ARA	Vorfluter	Niedrigwasserabfluss Q_{347} (L/s)
120101	ALTDORF	Vierwaldstättersee	-
120200	ANDERMATT	Reuss	2'000
120401	BAUEN	Vierwaldstättersee	-
120600	ERSTFELD	Reuss	5'532
120800	GOESCHENEN	Reuss	2'262
121100	ISENTHAL	Isitalerbach	653
121200	REALP	Furkareuss	432
121500	SEELISBERG	Vierwaldstättersee	-
121700	SISIKON	Vierwaldstättersee	-
122000	WASSEN	Reuss	3'492
131102	GERSAU	Vierwaldstättersee	-
136700	MUOTATHAL	Muota	1'377
137100	SATTEL	Sagenbach	23
137200	SCHWYZ	Seeweren	817
140100	ALPNACH (SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenwasser)	-
140200	ENGELBERG	Engelberger Aa ¹	850 (120-190)
140400	KERNS (MELCHTAL)	Grosse Melchaa ²	670
150200	BUOCHS (AUMUEHLE)	Engelberger Aa (ca.190 m oberhalb Einmündung in Vierwaldstättersee) ³	2'490
150700	HERGISWIL (LOPPER)	Vierwaldstättersee	-
150900	STANS (ROTZWINKEL)	A2-Kanal (ca. 650 m oberhalb Einmündung in Alpnachersee)	150
106700	UDLIGENSWIL	Würzenbach	ca. 5
106902	WEGGIS / VITZNAU (LUETZELAU)	Vierwaldstättersee	-
100100	TALSCHAFT ENTLEBUCH	Kleine Emme	1'512
100401	SOERENBERG	Kleine Emme	106
100900	WERTHENSTEIN (BLINDEI)	Kleine Emme	2'065
102300	BALLWIL	Gerligebach	ca. 40
102400	EMMEN (BUHOLZ) / REAL	Reuss	34'570
103300	INWIL (ESCHENBACH) / Oberseetal	Reuss (seit 2012) ⁴	34'960
106500	RONTAL (ROOT)	Reuss	35'350
106603	SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	240
109800	RUSWIL	Bilbach	73

¹ Einleitung in Restwasserstrecke. Die Werte in Klammern ist die ja nach Saison dotierte Restwassermenge ab 2013. Saisonale Dotierung: Dez - März: 120 L/s; Apr: 155 L/s; Mai - Okt: 190 L/s; Nov: 155 L/s.

² Gewässerabschnitt bei ARA-Einleitung ist Schwall-Sunk-Strecke ohne Restwasserabgabe. Durch einen Grundwasseraufstoss rund 900m oberhalb der ARA-Einleitung und Seitenzuflüssen wird aber praktisch immer Q_{347} erreicht. Generell eher mehr Wasser als natürlicherweise bei der Einleitstelle. Jedoch wird das Wasser der Melchaa rund 200m unterhalb der Einleitung wieder gefasst und nur noch 50 bis 100/s werden als Restwasser abgegeben.

³ Einleitung in Restwasserstrecke, überlagert von Schwall-/Sunk (Schwallbetrieb Speicherkraftwerk Dallenwil).

⁴ Restwasserstrecke der Wasserkraftnutzung Perlen, seit 2012

2 STOFFFLUSSMODELLIERUNG DES EINZUGSGEBIETS

2.1 Stoffflussmodell

Das für die Modellierung eingesetzte georeferenziertes Stoffflussmodell wurde im Rahmen des Projektes „Strategie Micropoll“ im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Umwelt an der Eawag entwickelt (Ort, et al., 2007; Ort, et al., 2009). Es dient als Screening Tool zur Beschreibung der IST-Situation und der Evaluation von Massnahmen zur weitergehenden Elimination von anthropogenen organischen Mikroverunreinigungen in Kläranlagen. Das Modell basiert auf der Kumulation von einwohnerspezifischen Stoffflüssen / Frachten, welche über die im Modell integrierten ARA in die Gewässer eingetragen werden. Die Stoffeinträge der Kläranlagen werden dabei entlang der Fließstrecke der Gewässer aufsummiert. Das verwendete Stoffflussmodell berücksichtigt keine Abbau- und Sorptionsprozesse in der Umwelt. Nur über die Eingangsgrößen können Abbauvorgänge erfasst werden (z.B. Abbau in ARA, Abbau im Bodensee). Die Modellierung muss daher auf quasi-persistente, gewässergängige Stoffe fokussiert bleiben. Diese Stoffe sind in der Regel jedoch auch, gerade aufgrund ihrer Persistenz, die problematischsten Mikroverunreinigungen aus dem kommunalen Abwasser.

Im Weiteren wurde dieses Modell für das Bodenseegebiet betr. Verbrauchszahlen und länderspezifischer Ausbau der Kläranlagen) angepasst und auch für eine Schweizweite Situationsanalyse für 6 Mikroverunreinigungen angewendet (Götz, et al., 2010; Longrée, et al., 2011). Im Weiteren kam hier verwendete Modell in den deutschen Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg zum Einsatz (interne Berichte). In laufenden Projekten, z.B. am Genfersee kommt dieser Modellansatz ebenfalls zur Anwendung.

2.1.1 Grundsätzlicher Aufbau und Programmierung

Das Stoffflussmodell ist in R programmiert. R ist eine freie Programmiersprache für statistisches Rechnen und statistische Grafiken. Sie ist in Anlehnung an die Programmiersprache S entstanden und weitgehend mit dieser kompatibel. Der Funktionsumfang von R kann durch eine Vielzahl von Paketen erweitert und an spezifische statistische Problemstellungen angepasst werden. Viele Pakete können dabei direkt aus einer über die R-Konsole abrufbaren Liste ausgewählt und automatisch installiert werden. Zentrales Archiv für diese Pakete ist das Comprehensive R Archive Network (CRAN).

Das Stoffflussmodell berücksichtigt keine Umweltprozesse und ist daher nur auf Substanzen anwendbar, welche in der Umwelt näherungsweise persistent sind. Der R-Code des Modells beinhaltet keine GIS basierten Elemente, er beruht auf der logischen Verknüpfung (graph theory) von Fließgewässerabschnitten in welche die Kläranlagen einleiten. Diese sind in einem Inputfile, der sogenannten „Austauschtabelle“, und werden für die Erstellung der Topologie des Fließgewässernetzes in R eingelesen (Ort, et al., 2007).

Die Berechnungen des Stoffflusses basiert auf Frachtberechnungen. Die Stofffrachten werden entlang der definierten Fließstrecke addiert. Die Konzentrationen werden dann in einem zweiten Schritt berechnet, indem die an einem bestimmten Punkt berechneten Frachten durch den Abfluss, beispielsweise den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) dividiert werden.

Die Stofffracht pro Kläranlage (F_{Stoff}) und die Konzentration im Vorfluter (C_{Stoff}), werden wie folgt berechnet (Formeln 1 und 2):

$$F_{\text{Stoff}} \left[\frac{\text{g}}{\text{Tag}} \right] = SE_{\text{Stoff}} \left[\frac{\text{g}}{\text{Einwohner} \cdot \text{Tag}} \right] \cdot E[\text{Einwohner}] \quad (1)$$

$$C_{\text{Stoff}} \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{Liter}} \right] = \frac{F_{\text{Stoff}} \left[\frac{\text{g}}{\text{Tag}} \right]}{MNQ \left[\frac{\text{Liter}}{\text{Tag}} \right]} \cdot 10^6 \quad (2)$$

Wobei SE_{Stoff} die Stoffmenge pro Einwohner ist, welche die Kläranlage mit dem gereinigten Abwasser verlässt und E die Einwohner pro Kläranlage.

Für die Berechnung müssen die folgenden Informationen verfügbar sein:

- Verbrauchsmengen der zu untersuchenden Substanz;
- Standort, Einleitstelle ins Gewässer und Anzahl angeschlossene Einwohner für jede berücksichtigte Kläranlage;
- Anteil der Substanz, die nach der Anwendung unverändert in die Kanalisation gelangt;
- Eliminationsleistung der Kläranlagen bezüglich ausgewählter Mikroverunreinigungen
- Topologisches Netzwerk aller Oberflächengewässer
- Informationen über die Abflüsse direkt unterhalb der Einleitstellen (beispielsweise mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ oder mittlerer Abfluss über das ganze Jahr, MQ)

Um die oben aufgezählten Daten einzulesen benötigt das in R programmierte Stoffflussmodell folgende zwei Dateien:

- Austauschtable: Diese Tabelle enthält alle Informationen über die Kläranlagen, die angeschlossenen Einwohner und deren Verknüpfung über das Gewässernetz.
- Input Stoffdaten: Diese Tabelle enthält alle stoffspezifischen Informationen, wie Verkaufsmengen, Metabolisierungsraten, Abbauraten.

Diese 2 Dateien müssen als Text-Files abgelegt werden. Die Erstellung der Tabellen kann aber beispielsweise in Excel erfolgen.

2.1.2 Austauschtable

Die Austauschtable enthält alle benötigten Kläranlagen Informationen und deren Verknüpfung. Im Folgenden sind die wichtigsten Parameter kurz beschrieben.

➤ Kläranlagen

Alle Kläranlagen im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees und in Luzern bis zur ARA Rontal wurden für die Berechnungen berücksichtigt (siehe Abschnitt 0, Tabelle 1). Zur eindeutigen Identifikation wurde jeder Kläranlage eine ID-Nummer zugeteilt. Zusätzlich wurden die verschiedenen Oberlieger berücksichtigt.

➤ Angeschlossene Einwohner

Für die Berechnung der Stoffflüsse von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser werden die tatsächlich an die Kläranlagen angeschlossenen Einwohner als Berechnungsgrundlage verwendet. Für die im Rahmen dieses Projektes berücksichtigten Mikroverunreinigungen, u.a. Arzneimittel und Haushaltschemikalien kann angenommen werden, dass die in die Kläranlage transportierte Stofffracht linear mit der Anzahl angeschlossener Einwohner korreliert. Die Dimensionierung der Kläranlagen, Das Industrieabwasser (Indirekteinleiter), das Fremdwasser und Regenwasser können für solche Stoffe in der Regel vernachlässigt werden. Alle verwendeten Einwohnerzahlen wurden von den kantonalen Fachstellen einzeln überprüft und für dieses Projekt aktualisiert.

➤ Abflussdaten

Um aus den Frachten die Konzentrationen nach den Einleitstellen der Kläranlagen zu berechnen wurde um eine realistische „worst-case“ Situation abzubilden der mittlere Niedrigwasserabfluss (Q_{347}) genommen.

Für die Vergleiche mit Messdaten wurden die Abflussdaten zum Zeitpunkt der Messungen berücksichtigt. Alle verwendeten Q_{347} -Werte wurden von den kantonalen Fachstellen einzeln überprüft und ggf. für dieses Projekt aktualisiert.

2.1.3 Zeithorizont

Die Modellresultate wurden für das Jahr 2025 berechnet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass in den nächsten 12 Jahren durchschnittlich ein Bevölkerungswachstum und dementsprechend ein Wachstum des Stoffverbrauchs von 5% auftritt. Diese 5% Bevölkerungswachstum wurden sowohl für die Berechnung des Handlungsbedarfs („IST-Zustand“), als auch für alle Szenarienanalysen verwendet.

2.2 Stoffauswahl: Indikatorsubstanzen

Sowohl für die Modellierung und Beurteilung der Vorfluter im Einzugsgebiet, sowie für die Seenmodellierung, wurde eine Stoffauswahl aus Substanzen aus kommunalem Abwasser getroffen. Als Grundlage für die Stoffauswahl wurden vorangegangene Arbeiten über Stoffe aus kommunalem Abwasser verwendet (Götz, et al., 2010; Abegglen, et al., 2012; Götz, et al., 2011), sowie das im Vierwaldstättersee durchgeführte Substanz-Screening (siehe oben).

In der Tabelle 3 sind die in dieser Arbeit untersuchten Mikroverunreinigungen mit Angaben zu Verbrauch und Abbau aufgelistet.

Tabelle 3: Verbrauchszahlen, Metabolisierungsraten und Angaben über den Abbau in der biologischen Stufe von konventionellen Kläranlagen der modellierten Stoffe (Götz, et al., 2010).

	Carbamazepin (Antiepileptikum, Psychofarmaka)	Diclofenac (Analgetikum)	Sulfamethoxazol (Antibiotikum)	Amidotrizesäure (Röntgenkon- trastmittel)	Iopromid (Röntgenkon- trastmittel)	Benzotriazol (Korrosions- schutzmittel)	Acesulfam (Süssstoff)	Sucralose (Süssstoff)
Verkaufsmengen im Ein- zugsgebiet in kg/Jahr	201	278	124	25	356	821	1290	154
Metabolisierung im Körper	86%	84%	55%	0%	0%	⁵	0%	0%
Abbau in konventionellen Kläranlagen	11%	34%	57%	0%	54%	30%	0%	0%

2.3 Ökotoxikologische Beurteilung

2.3.1 Beurteilungsschema

Die Gewässerbelastung durch Mikroverunreinigungen wird üblicherweise auf der Basis von Einzelstoffbeurteilungen bewertet. Generell erfolgt eine Risikobewertung von Einzelstoffen durch den Vergleich einer Umweltkonzentration (EC) mit dem Qualitätskriterium (QK) der entsprechenden Substanz. Dabei wird ein Risikoquotient bestimmt. Der Risikoquotient (RQ) wird folgendermassen berechnet:

$$RQ = EC / QK$$

Wenn der Risikoquotient grösser als 1 ist, können nachteilige Einwirkungen auf Wasserlebewesen nicht mehr ausgeschlossen werden. Basierend auf den Risikoquotienten können

⁵ Benzotriazol wird nicht eingenommen und unterliegt somit keiner Metabolisierung.

Zustandsklassen der Wasserqualität der Vorfluter definiert werden. Hier werden die in Götz et al. (GWA 7/2010) im Rahmen des Beurteilungskonzeptes für das Bundesamt für Umwelt (BAFU) im Projekt „Strategie Micropoll“ definierten Klassen verwendet. Das System mit fünf Zustandsklassen ist an die Beurteilungsschemen des Modul-Stufen-Konzepts (MSK) angelehnt.

Tabelle 4: Wirkungsbasierte Beurteilung der chemischen Wasserqualität für Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser angelehnt an das Modul Nährstoffe des Modulstufenkonzepts des BAFU.

Zustandsklassen	Bedingung/Beschreibung		Einhaltung Qualitätskriterium
sehr gut	die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich einem Hundertstel des Qualitätskriteriums, aber kleiner als ein Zehntel des Qualitätskriteriums	$RQ < 0,1$	Qualitätskriterium eingehalten
gut	die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich einem Zehntel des Qualitätskriteriums aber kleiner als das Qualitätskriterium	$0,1 \leq RQ < 1$	
mässig	die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich dem Qualitätskriterium aber kleiner als das Zweifache Qualitätskriterium	$1 \leq RQ < 2$	Qualitätskriterium überschritten (nicht eingehalten)
unbefriedigend	die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich dem zweifachen Qualitätskriterium aber kleiner als das zehnfache Qualitätskriterium	$2 \leq RQ < 10$	
schlecht	die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich dem zehnfachen Qualitätskriterium	$RQ \geq 10$	

Das Qualitätskriterium ist für die Zustandsklassen „sehr gut“ und „gut“ erfüllt und für die Zustandsklassen „mässig“, „unbefriedigend“ und „schlecht“ nicht erfüllt. Wenn die ARA direkt in den See einleiten wird die entsprechende Einleitstelle nicht einzeln beurteilt, da angenommen wird, dass das eingeleitete Abwasser sich im See verteilt. Der See wird mit Hilfe eines Seenmodells separat modelliert und beurteilt.

2.3.2 Qualitätskriterien

Im Auftrag des BAFU hat das schweizerische Zentrum für angewandte Ökotoxikologie (Oekotoxzentrum) in den letzten drei Jahren für verschiedene Stoffe wirkungsbasierte Umweltqualitätskriterien auf der Basis von ökotoxikologischen Daten aus der Literatur hergeleitet. Das Oekotoxzentrum tauscht seine Daten und Erfahrungen zu Qualitätskriterien mit mehreren EU-Nationen aus. Der Informationsaustausch soll zu einer Harmonisierung der Qualitätsstandards beitragen und redundante Arbeiten verhindern.

„Umweltqualitätskriterien sind Richtwerte für die Konzentration einzelner Chemikalien, die eingehalten werden sollten, um ein vorgegebenes Qualitätsziel zu erfüllen. Sie werden auf Basis der akuten und chronischen Schädigung von Umweltorganismen mit Hilfe von Risiko-

bewertungsmodellen abgeleitet. Qualitätskriterien werden in der Umweltregulation verwendet, um Umweltkontaminationen einzuschränken und die Auswirkungen bestehender Kontaminationen besser beurteilen zu können.“ (<http://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/index>)

Vorschläge des Oekotoxzentrums für Qualitätskriterien für verschiedene Arzneimittel und Steroidhormone, Pestizide, Industriechemikalien und Komplexbildner sind auf deren Homepage publiziert und werden laufend aktualisiert (<http://www.oekotoxzentrum.ch>).

Für die in dieser Arbeit modellierten Arzneimittel Carbamazepin, Diclofenac und Sulfamethoxazol, sowie für das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol existieren solche Qualitätskriterien-vorschläge. Für die anderen modellierten Substanzen gibt es zurzeit noch keine wirkungs-basierten Qualitätskriterien.

Tabelle 5: Aktuelle Qualitätskriterienvorschläge des Oekotoxzentrums (Stand Januar 2013).

	Carbamazepin	Diclofenac	Sulfamethoxazol	Amidotrizoensäure	Iopromid	Benzotriazol	Acesulfam	Sucralose
Vorschläge für Qualitätskriterien (in µg/L)								
Akutes Qualitätskriterium (MAC-EQS)	2550	-	2.7	- ⁶	-	120	-	-
Chronisches Qualitätskriterium (AA-EQS)	0.5	0.05 ⁷	0.6	-	-	30	-	-

Für die Beurteilung der Belastungslage und des Handlungsbedarfs wurden die chronischen Qualitätskriterien verwendet. Das tiefste Qualitätskriterium der untersuchten Substanzen weist mit 0.05 µg/L Diclofenac auf.

⁶ Aktuell kein Vorschlag möglich.

⁷ Aktueller Wert, der in der EU diskutiert wird ist 0.1 µg/L

3 BEURTEILUNG DER VORFLUTER IM EINZUGSGEBIET

3.1 Modellierung des Abwasseranteils der Vorfluter

Als Grundlage für die Beurteilung der Vorfluter im Einzugsgebiet, wurde der Abwasseranteil in den Vorflutern abgeschätzt. Dies wurde mit Hilfe des Stoffflussmodells gemäss der in Ort et al. (2007) vorgeschlagenen Methode durchgeführt. Die Abflussdaten wurden von den Kantonalen Fachstellen Ende 2012 kontrolliert und ggf. aktualisiert. In der Abbildung 3 sind die Anteile an gereinigtem kommunalem Abwasser (Abwasseranteile) der Vorfluter angegeben.

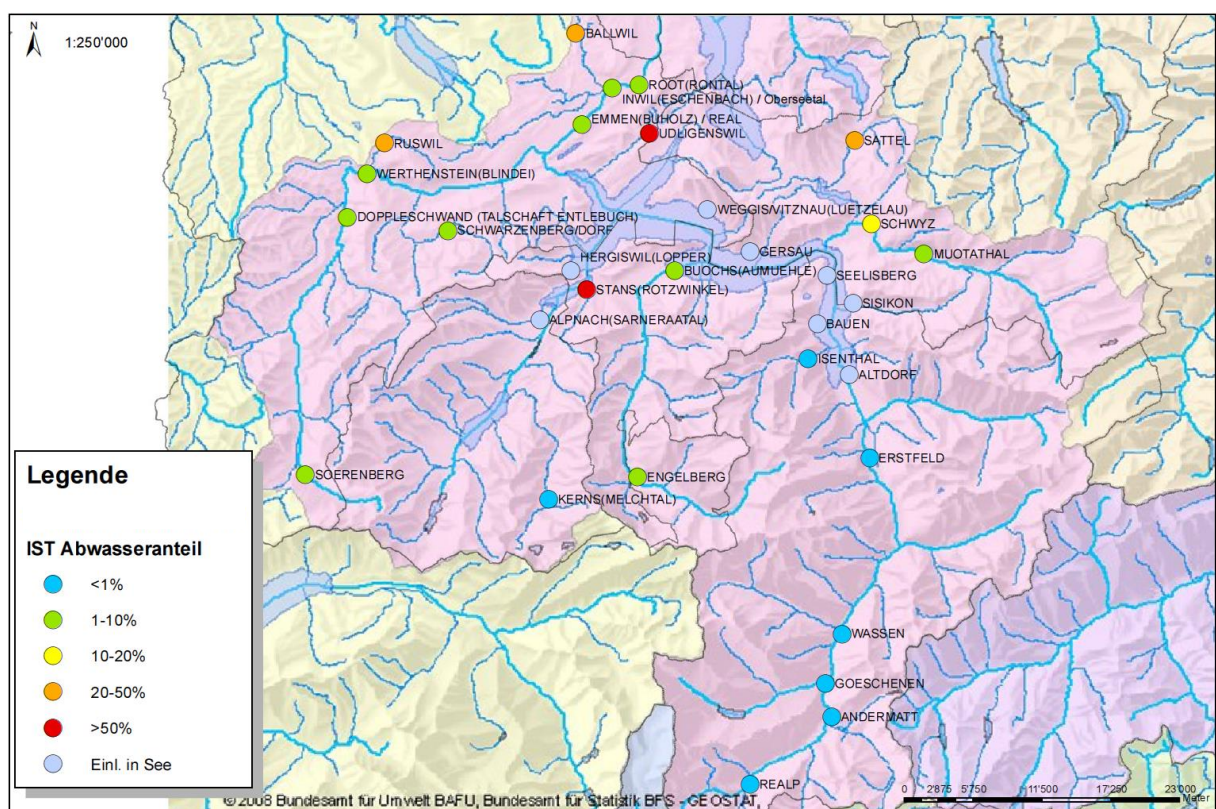


Abbildung 3: Modellierte Abwasseranteile in den Vorflutern der ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees. Gemäss Angaben des BAFU ist ein Abwasseranteil von >10% bei Niedrigwasser (Q_{347}) problematisch.

Insgesamt weisen sechs der modellierten Fließgewässer direkt unterhalb der Einleitstellen von Kläranlagen Abwasseranteile von mehr als 10% auf. Bei einem Abwasseranteil von mehr als 10% bei Niedrigwasser können negative Effekte auf Wasserlebewesen nicht mehr ausgeschlossen werden (Abegglen, et al., 2012). Insbesondere für die Vorfluter der Kläranlagen Stans und Udligenswil, welche einen Abwasseranteil von mehr als 50% aufweisen, besteht ein erhöhter Handlungsbedarf.

3.2 Modellierung der Stoffflüsse und Konzentrationen

Die Stoffflüsse bzw. Frachten an organischen Spurenstoffen wurden für alle 31 im Modell integrierten ARA berechnet. Von den 31 ARA leiten acht Anlagen direkt in den Vierwaldstättersee ein. Für diese Kläranlagen wurden dementsprechend keine Konzentrationen bestimmt. Für die Beurteilung des Handlungsbedarfs wurde das Jahr 2025 festgelegt und ein genereller Anstieg der Bevölkerung resp. Abwasserbelastung von 5% angenommen (siehe Abschnitt 2.1.3 Zeithorizont).

Die Stoffflüsse und Konzentrationen wurden für alle acht untersuchten Substanzen, Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol, Amidotrizoesäure, Iopromid, Benzotriazol, Acesulfam und Sucralose berechnet. Die Risikoquotienten konnten nur für die Arzneimittel Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol und das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol bestimmt werden, für die anderen Stoffe liegen zurzeit keine Vorschläge für Qualitätskriterien vor. Die Stoffflüsse und Konzentrationen sind in Anhang 2 wiedergegeben.

In der Abbildung 4 sind die Risikoquotienten für Sulfamethoxazol für die Fließgewässer direkt unterhalb der verschiedenen Einleitstellen der ARA dargestellt.

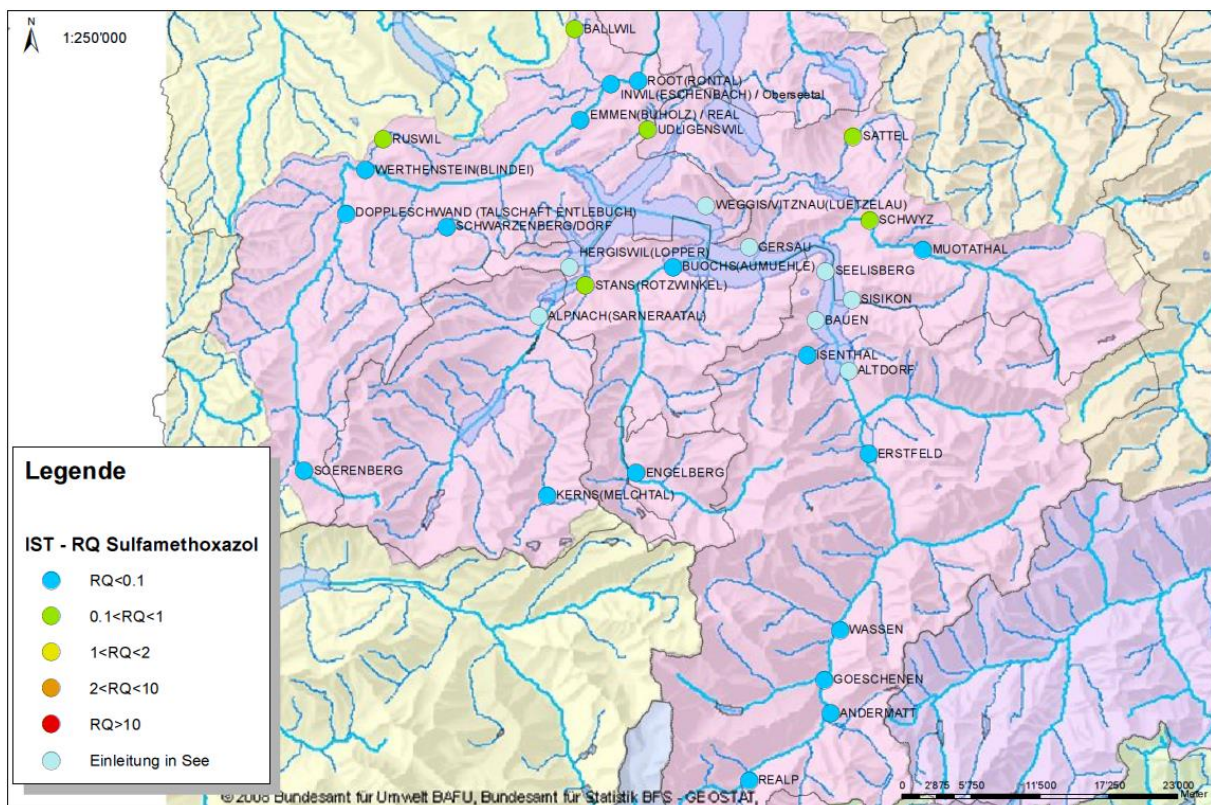


Abbildung 4: Risikoquotienten von Sulfamethoxazol in den Vorflutern bei Q_{347} .

Für Sulfamethoxazol wurde bei Niedrigwasser in keinem der modellierten Vorfluter eine Überschreitung der Qualitätskriterien gefunden. In sechs der modellierten Vorfluter war der Risikoquotient zwischen 0.1 und 1, d.h. nicht mehr als ein Faktor 10 unterhalb dem Quali-

tätskriterium von 0.6 µg/L. Für Benzotriazol (Qualitätskriterium = 30 µg/L) und Carbamazepin (Qualitätskriterium = 0.5 µg/L) ergibt sich bei der Risikobeurteilung ein ähnliches Bild (vergl. Anhang 2).

Das Analgetikum Diclofenac, welches in den Vorflutern in ähnlichen Konzentrationen vorkommt wie Sulfamethoxazol, aber mit 0.05 µg/L ein ungleich tieferes Qualitätskriterium aufweist, zeigt deutlich höhere Risikoquotienten. In der Abbildung 5 sind die Risikoquotienten für Diclofenac für die Fließgewässer direkt unterhalb der verschiedenen Einleitstellen der ARA dargestellt.

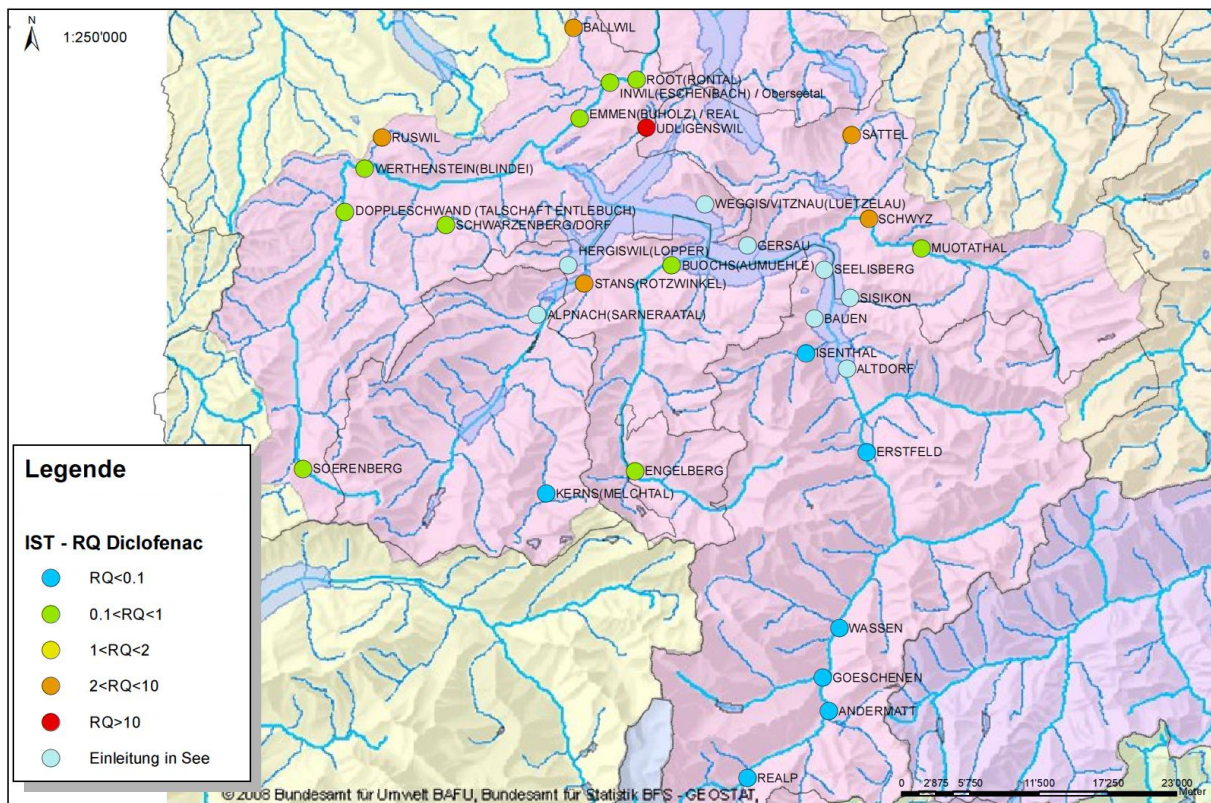


Abbildung 5: Risikoquotienten von Diclofenac in den Vorflutern bei Q_{347} .

Insgesamt wird das Qualitätskriterium für Diclofenac in sechs der 23 Vorflutern (ohne Anlagen mit Einleitung in den See), also in rund 25% aller Vorfluter überschritten. In einem Fließgewässer, bei Udligenswil, wird das Qualitätskriterium sogar um mehr als das Zehnfache überschritten, in fünf Fließgewässern um mehr als das Doppelte.

Die Resultate der Stoffflussmodellierung stimmen gut mit bisherigen Untersuchungen und vorangegangenen Abschätzungen überein (Ort, et al., 2007; Abegglen, et al., 2012). Es gilt jedoch für alle vorliegenden Resultate zu beachten, dass sie aufgrund allgemeiner Annahmen über Verbrauch und Abwasserzusammensetzung berechnet wurden. Spezifische lokale Gegebenheiten, wie beispielsweise etwaige gewerbliche und industrielle Indirekteinleiter, Mischwasserüberläufe etc. wurden nicht berücksichtigt. Eine Überprüfung der Resultate mit Messungen im Vorfluter für die Beurteilung im Einzelfall ist daher sicherlich sinnvoll.

4 SEEMODELLIERUNG

4.1 Modell und Parametrisierung

Der Vierwaldstättersee hat eine Fläche von rund 114 km², eine mittlere Seetiefe von 117 m und ist maximal 214 m tief (Gersauer Becken). Die mittlere Wasseraufenthaltszeit beträgt 3.4 Jahre (Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, www.4waldstaettersee.ch).

Der See liegt während der meisten Zeit des Jahres geschichtet vor, Im Winter wird der ganze See während einer kurzen Zeit vollständig durchmischt, wobei Wind das Wasser zum Zirkulieren bringt (www.4waldstaettersee.ch). Der Vierwaldstättersee weist durch die spezielle Form und die verschiedenen Seebecken (Alpnachersee, Kreuztrichter, Vitznauer Becken, Gersauer Becken, Treib Becken, Urnersee) ein sehr komplexes Mischungsverhalten auf. Für die Modellierung der Spurenstoffe, welche konstant über die Kläranlagen in den See eingetragen werden, wird ein stark vereinfachtes Modell angewandt:

- Es wird zwischen dem Alpnachersee den übrigen Seebecken des Vierwaldstättersees unterschieden.
- Es wird für beide modellierten Seebereiche (Alpnachersee und übrige Seebecken) angenommen, dass der See für zwei Monate im Winter vollständig durchmischt wird und sonst geschichtet vorliegt.
- Es wird angenommen, dass der Stofffluss der organischen Schadstoffe vom Alpnachersee in die übrigen Seebecken verläuft (der temporäre Rückfluss des Wassers wird vernachlässigt).

Diese Annahmen, lassen sich für persistente Stoffe, welche kontinuierlich in die Gewässer eingetragen werden und für welche angenommen werden kann, dass sie sich in einem Fließgleichgewicht befinden, treffen. Als Modellsoftware wurde das Programm MASALight (Modeling Anthropogenic Substances in Aquatic Systems) von Markus Ulrich, Eawag Dübendorf.

In der Seenuntersuchung vom Bodensee, in welcher verschiedene Seetiefen und Probenahmeorte analysiert und mit dem hier angewandten Modell MASASlight Combi-Box verglichen wurden, hat sich gezeigt, dass man mit diesen einfachen Modellannahmen die im See gemessenen Konzentrationen gut erklären kann (Singer, et al., 2009; Longrée, et al., 2011; Moschet, 2010).

Für die Parametrisierung des Modells müssen verschiedene Angaben über den See, wie Oberfläche, Volumen, Wasseraufenthaltszeit etc. bekannt sein. Diese Angaben wurden für den Vierwaldstättersee aus Angaben der Aufsichtskommission Vierwaldstättersee (www.4waldstaettersee.ch) und aus Arbeiten der EAWAG entnommen (Aeschbach-Hertig, 1994). In der Tabelle 6 sind diese Daten für den Alpnachersee und die übrigen Seebecken zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der für die Seemodellierung mit MASASlight verwendeten Parameter für den Vierwaldstättersee. Daten von www.4waldstaettersee.ch und (Aeschbach-Hertig, 1994)

Parameter	Einheit	Alpnachersee	Übrige Seebecken
Oberfläche	km ²	4.76	110
Volumen	m ³	104	11'880
Maximale Tiefe	m	35	214
Mittlere Tiefe	m	22	117
Abfluss	m ³ /s	12	109
Wasseraufenthaltszeit	Jahre	0.27	3.4
Mittlere Tiefe Übergang Epi- /Hypolimnion	m	10	20

Die Tiefe der Sprungschicht ist in den verschiedenen Becken vergleichbar. Daten aus den Jahren 2007 und 2009 im Urnersee und im Gersauerbecken zeigen, dass diese im Herbst zwischen rund 18 und 25 Meter lag (Abbildung 6).

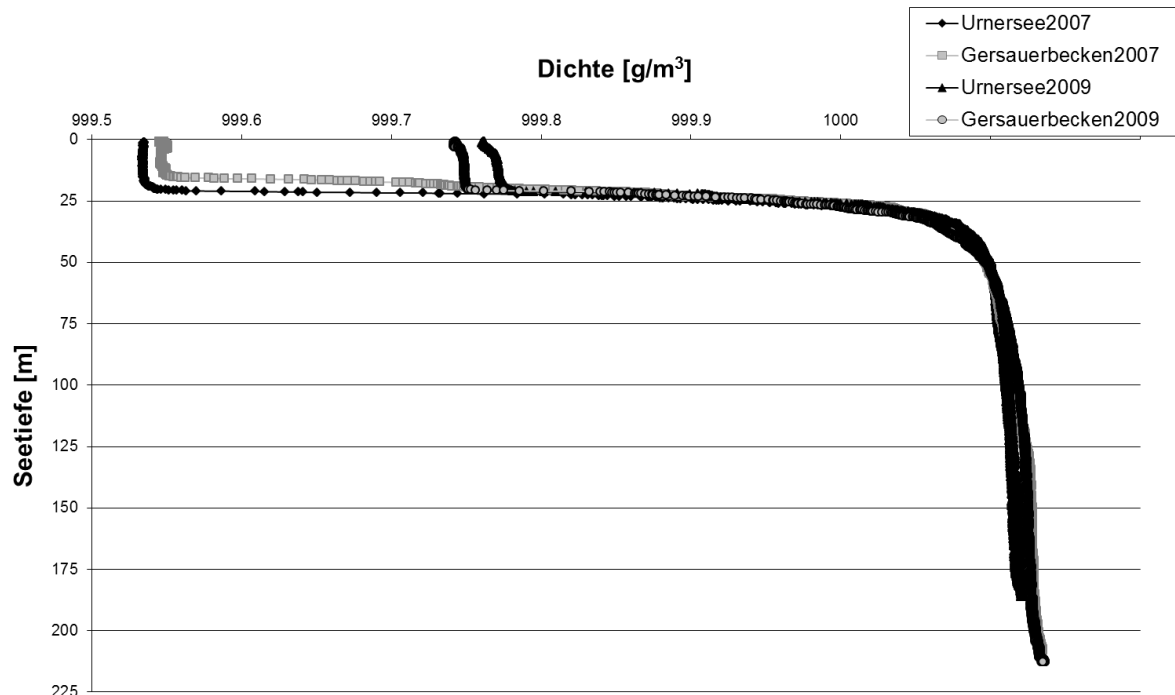


Abbildung 6: Dichtemessungen im Urnersee und im Gersauerbecken. Daten: Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, 2010.

4.2 Messdaten

In den Jahren 2009 und 2012 wurden im Vierwaldstättersee verschiedene Proben genommen und auf organische Spurenstoffe ausgewertet. Die Messwerte für die in dieser Studie untersuchten Stoffe sind in der Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Messresultate von organischen Spurenstoffen im Vierwaldstättersee aus den Jahren 2009 (Singer et al. 2010, Abschlussbericht, EAWAG und Aufsichtskommission VWS) und 2012 (Anhang 1).

	Carbamazepin	Diclofenac	Sulfamethoxazol	Amidotrizoensäure	Iopromid	Benztotriazol	Acesulfam	Sucralose
Messungen im Alpnachersee (Konzentrationen in ng/L)								
Alpnachersee Epilimnion (23.10.2012)	(4) ⁸	12	(5)	<10	130	80	190	<50
Alpnachersee Hypolimnion (23.10.2012)	17	39	15	(9)	330	190	550	60
Alpnachersee Uferzone (28.10.2009) ⁹	9.2	9.4	8.1	-	210	240	>600	89
Messungen in anderen Seebecken (Konzentrationen in ng/L)								
Kreuztrichter, Seewasserfassung Salzfass (28.10.2009)	2.7	<1	3.7	-	<150	47	150	<10
Urnersee, Seewasserfassung Tellsplatte (28.10.2009)	2.3	1.2	2.5	-	<150	<40	110	<10

4.3 Stoffflüsse in den Vierwaldstättersee

Von den 31 modellierten Kläranlagen entwässern insgesamt 22 direkt oder indirekt in den Vierwaldstättersee. Für die Berechnung der Stofffracht in den See müssen nur diese 22 ARA berücksichtigt werden. In angeschlossenen Einwohnern ausgedrückt entspricht die Belastung mit kommunalem Abwasser rund 160'000 Einwohnern. Dazu kommen rund 380 Spitalbetten. Dies ist für den ganzen See gesehen eine relativ geringe Belastung. Der Alpnachersee in spezifischen zeigt, jedoch eine klar höhere Belastung als der Rest des Sees. Die Untersuchungen der EAWAG im Jahr 2009 haben gezeigt, dass für die 247 analysierten organischen Substanzen 53 positive Befunde in der Flachwasserprobe des Alpnachersees getätigt wurden. Die festgestellten Konzentrationen mit maximal Werten von über 600 ng/L waren

⁸ Werte in Klammern sind unter der Bestimmungsgrenze und nur semiquantitative Angaben

⁹ Messungen der EAWAG aus dem Jahr 2009

im Durchschnitt 5 bis 10mal höher als im Tiefenwasser des Luzerner-und Urnersees. Erhöhte Konzentrationen wurden vor allem für Stoffe aus kommunalem Abwasser detektiert.

Mit Hilfe des Stoffflussmodells (Abschnitt 2) wurden die Frachten der Mikroverunreinigungen in den See berechnet.

Tabelle 8: Mit dem Stoffflussmodell berechnete Frachten von organischen Spurenstoffen in den Vierwaldstättersee in Kilogramm pro Jahr (Frachten in den See berechnet für 2013).

	Carbamazepin	Diclofenac	Sulfamethoxazol	Amidotrizoensäure	Iopromid	Benzotriazol	Acesulfam	Sucralose
IST-Zustand - Frachten in kg / Jahr								
Fracht in Alpnachersee	3.6	4.3	3.5	3.6	24	42	188	22
Fracht in gesamten VWS	10	12	10	10	68	115	539	63

Für den Alpnachersee wurde angenommen, dass 60% der gesamten in den Alpnachersee eingeleiteten Stofffracht direkt ins Tiefenwasser des Sees (Hypolimnion) eingeleitet werden, während er geschichtet ist (durch die ARA Alpnach / Sarneraatal). Die übrigen 40% werden durch den A2-Kanal von der ARA Rotzwinkel ins Hypolimnion eingetragen.

Für die übrigen Seebecken wurde angenommen, dass insgesamt rund 2/3 des kommunalen Abwassers ins Tiefenwasser eingeleitet werden. Dies Einleitung der Mikroverunreinigungen ins Tiefenwasser geschieht teilweise direkt durch Tiefenwassereinleitungen der Kläranlagen (beispielsweise ARA Altdorf) und auch durch das Absinken der Wassermassen der Zuflüsse aufgrund der höheren Dichte (beispielsweise Reuss, teilweise „Unterwasserfall“ an der Schwelle Alpnachersee / Kreuztrichter).

4.4 Konzentrationen von Mikroverunreinigungen im Alpnachersee

Die Konzentrationen im Alpnachersee wurden mit MASAS*light* für den heutigen Zustand modelliert (siehe Abschnitt 4.1). Im Folgenden werden Resultate dargestellt und diskutiert.

In der Abbildung 7 sind die modellierten Konzentrationsverläufe über fünf Jahre und die gemessenen Konzentrationen für Carbamazepin, Sulfamethoxazol und Benzotriazol im Alpnachersee abgebildet.

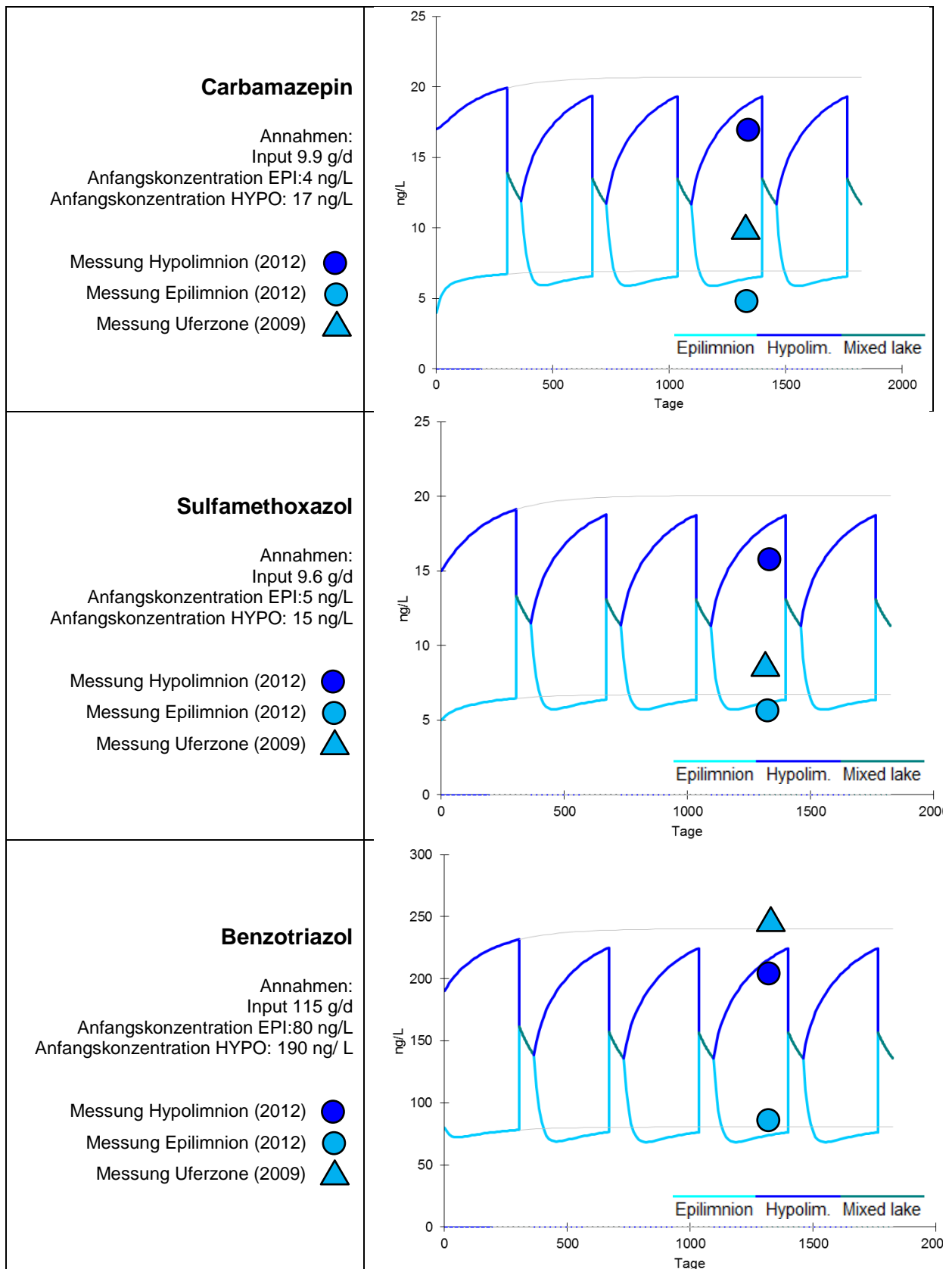


Abbildung 7: Modellierte Konzentrationsverläufe (Linien) für den Alpachersee der Stoffe Carbamazepin, Sulfamethoxazol und Benzotriazol (modelliert mit MASASlight). Die Messwerte (vergl. Tabelle 7) sind als Punkte resp. Dreiecke eingetragen.

Als Anfangskonzentrationen wurden die Messwerte von Epi- und Hypolimnion vom Oktober 2012 verwendet. Unabhängig von der gewählten Anfangskonzentration wird aufgrund der relativ kurzen Wasseraufenthaltszeit von 0.27 Jahren bereits nach 2 Jahren ein Fließgleichgewicht (steady-state) erreicht. Die steady-state Konzentration hängt näherungsweise nur von der Inputfracht und den Systemparametern ab.

Die Messwerte von Epi- und Hypolimnion vom Oktober 2012 (in den Abbildungen als Punkte eingetragen) bestätigen die Modellresultate. Die Messungen vom 2009 passen für Carbamazepin ebenfalls gut ins Bild. Für Sulfamethoxazol war kein Wert verfügbar (unterhalb Bestimmungsgrenze der dort angewandten Methode). Der Wert von Benzotriazol ist im 2009 deutlich höher als die Modellvorhersagen und die Messungen im 2012. Dies passt sehr gut mit anderen Studien und aktuellen Messungen zusammen, in welchen auch Hinweise darauf gefunden wurden, dass der Verbrauch sich im Vergleich zu vor rund 5-10 Jahren in etwa halbiert hat.

In der Abbildung 8 sind die Konzentrationsverläufe und Messdaten der künstlichen Süsstoffe Acesulfam und Sucralose wiedergegeben.

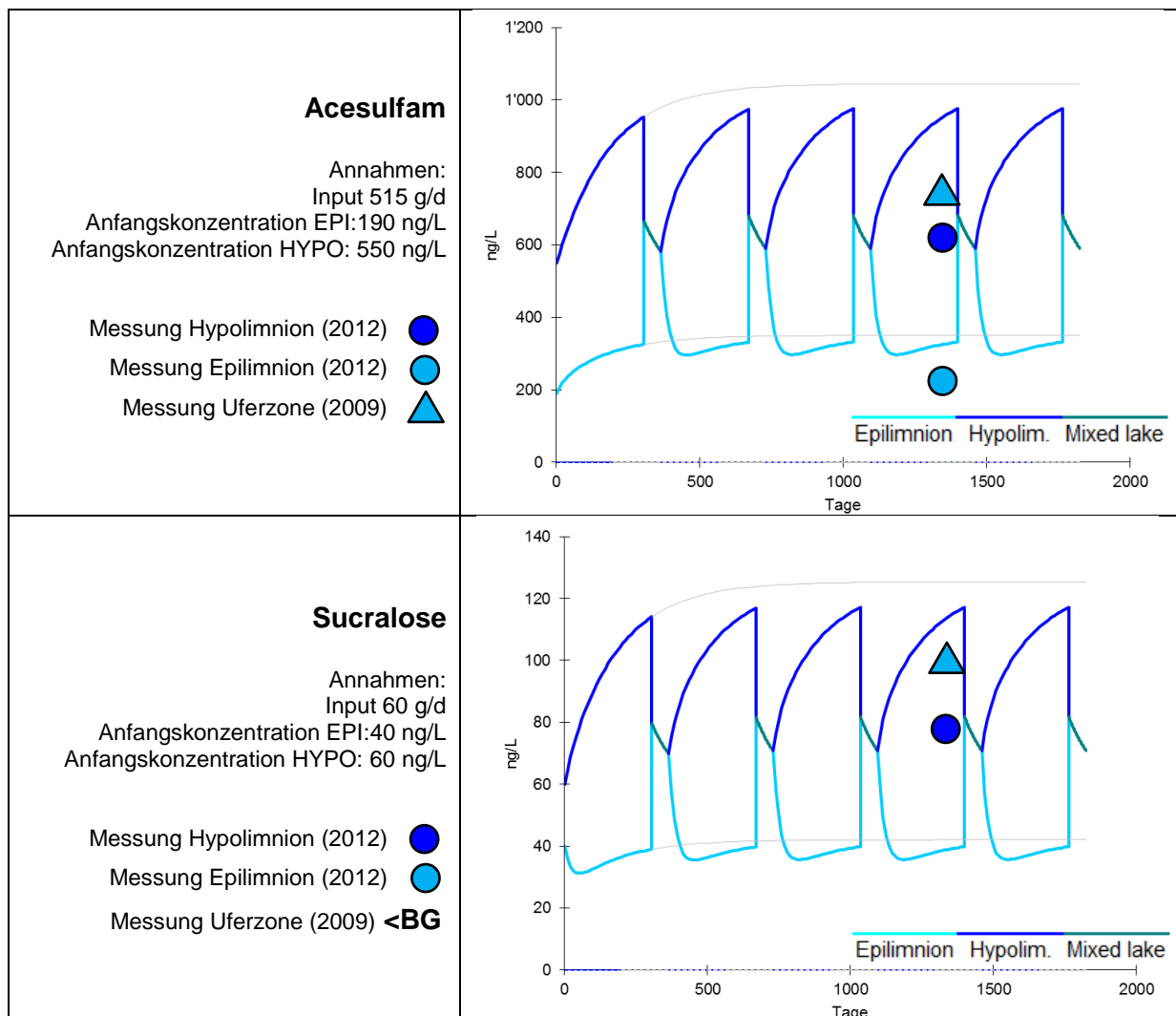


Abbildung 8: Modellerte Konzentrationsverläufe (Linien) für den Alpnachersee der künstlichen Süsstoffe Acesulfam und Sucralose (modelliert mit MASASlight). Die Messwerte (vergl. Tabelle 7) sind als Punkte resp. Dreiecke eingetragen.

Im Allgemeinen passen die Messwerte der Süsstoffe ebenfalls relativ gut mit den modellierten Konzentrationsverläufen zusammen. Für Acesulfam sind die Messdaten tendenziell ein bisschen tiefer als die modellierten Konzentrationen. Bei Sucralose passt die Größenordnung der Konzentrationen ebenfalls gut mit dem Modell zusammen. Die im Jahr 2012 gemessenen Werte waren bei beiden Süsstoffen tiefer als die im 2009 gefundenen Konzentrationen. Der Grund dafür ist nicht bekannt, da ein Rückgang des Konsums von künstlichen Süsstoffen eher unwahrscheinlich scheint. Beim Vergleich der Werte von 2009 und 2012 gilt jedoch zu beachten, dass die Proben an unterschiedlichen Stellen genommen wurden und die Analytik von unterschiedlichen Laboratorien durchgeführt wurden. Die Probe im 2009 wurde im Flachwasser in der Nähe der Einleitstelle der ARA Rotzloch genommen. Es wäre daher möglich, dass diese Probe aufgrund einer unvollständigen Einmischung der Abwasserfahne an dieser Stelle erhöhte Werte aufzeigen könnte.

In der Abbildung 9 sind die Konzentrationsverläufe des Schmerzmittels Diclofenac und des Röntgenkontrastmittels Iopromid aufgeführt.

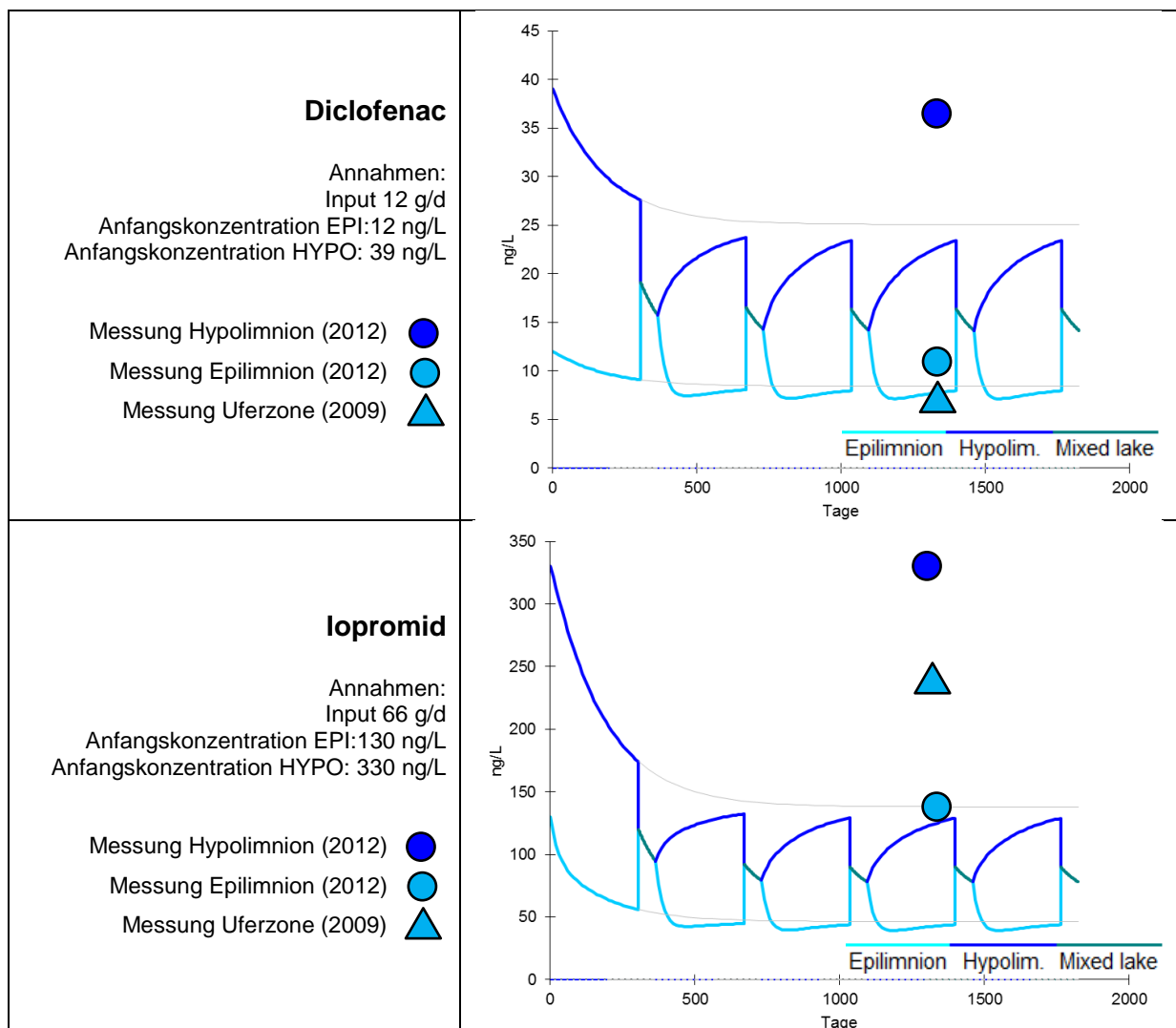


Abbildung 9: Modellierte Konzentrationsverläufe (Linien) für den Alpnachersee der Stoffe Diclofenac und Iopromid (modelliert mit MASASlight). Die Messwerte (vergl. Tabelle 7) sind als Punkte resp. Dreiecke eingetragen.

Die im See gefundenen Konzentrationen, insbesondere im Hypolimnion (Tiefenwasser) sind rund einen Faktor 2 bis 3 höher, als die mit den mittleren Verbrauchszahlen vorhergesagten Werte. Für Iopromid ist der wahrscheinliche Grund für die höhere Konzentration im Alpnachersee, dass die ARA Alpnach / Saarneraatal, an welche der Kantonsspital Obwalden (Saarnen) angeschlossen ist und die ARA Rotzloch, an welche das Kantonsspital Nidwalden angeschlossen ist, in den See entwässern. Beide Spitäler haben eine Radiologie Abteilung. Die Diclofenac Konzentrationen könnten möglicherweise ebenfalls erhöht sein aufgrund der Anwendung als Analgetikum in den Spitälern,

Wenn man von einer mittleren Acesulfam Konzentration von 600 ng/L ausgeht und diese Messung mit Seen mit bekanntem Abwasseranteil vergleicht, kommt man auf einen Anteil an gereinigtem Abwasser von rund 5% im Alpnachersee (Bürge, 2009). Sowohl die modellierten wie auch die gemessenen Konzentrationen der untersuchten Substanzen liegen alle unterhalb der entsprechenden Qualitätskriterien. Die Konzentration von Diclofenac liegt jedoch teilweise sehr nahe am Qualitätskriterium von 50 ng/L.

4.5 Konzentrationen von Mikroverunreinigungen im Vierwaldstättersee

Die Konzentrationen im Vierwaldstättersee (ohne dem Alpnachersee) wurden mit MASAS-light für den heutigen Zustand modelliert. Die Seebecken wurden als ein gesamtes System betrachtet (siehe Abschnitt 4.1). Im Folgenden werden Resultate dargestellt und diskutiert.

Aufgrund der höheren Wasseraufenthaltszeit im Vergleich zu Fließgewässern, sind im Seenmodell für gewisse Stoffe Abbauprozesse von Bedeutung. Sowohl Diclofenac und zu einem kleineren Teil auch Sulfamethoxazol werden photolytisch abgebaut. Die übrigen modellierten Substanzen sind keiner relevanten Photolyse unterworfen. Die Photolyseraten aus der Literatur sind für Diclofenac $4.6 \cdot 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ im Sommer und $4.1 \cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1}$ im Winter (Tixier, et al., 2003), für Sulfamethoxazol $4.6 \cdot 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ im Sommer und $4.6 \cdot 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ (Boreen, et al., 2004).

Als Anfangskonzentrationen wurde der Mittelwert der zwei Messungen vom Jahr 2009 verwendet. Beide Messungen wurden im Tiefenwasser, also im Hypolimnion durchgeführt, eine im Urnersee bei der Trinkwasserfassung Tellplatte und die zweite im Kreuzrichterbecken bei der Trinkwasserfassung Salzfass, nahe Luzern.

In der Abbildung 10 sind die modellierten Konzentrationsverläufe für die Arzneimittel Carbamazepin und Sulfamethoxazol, sowie für das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol angegeben.

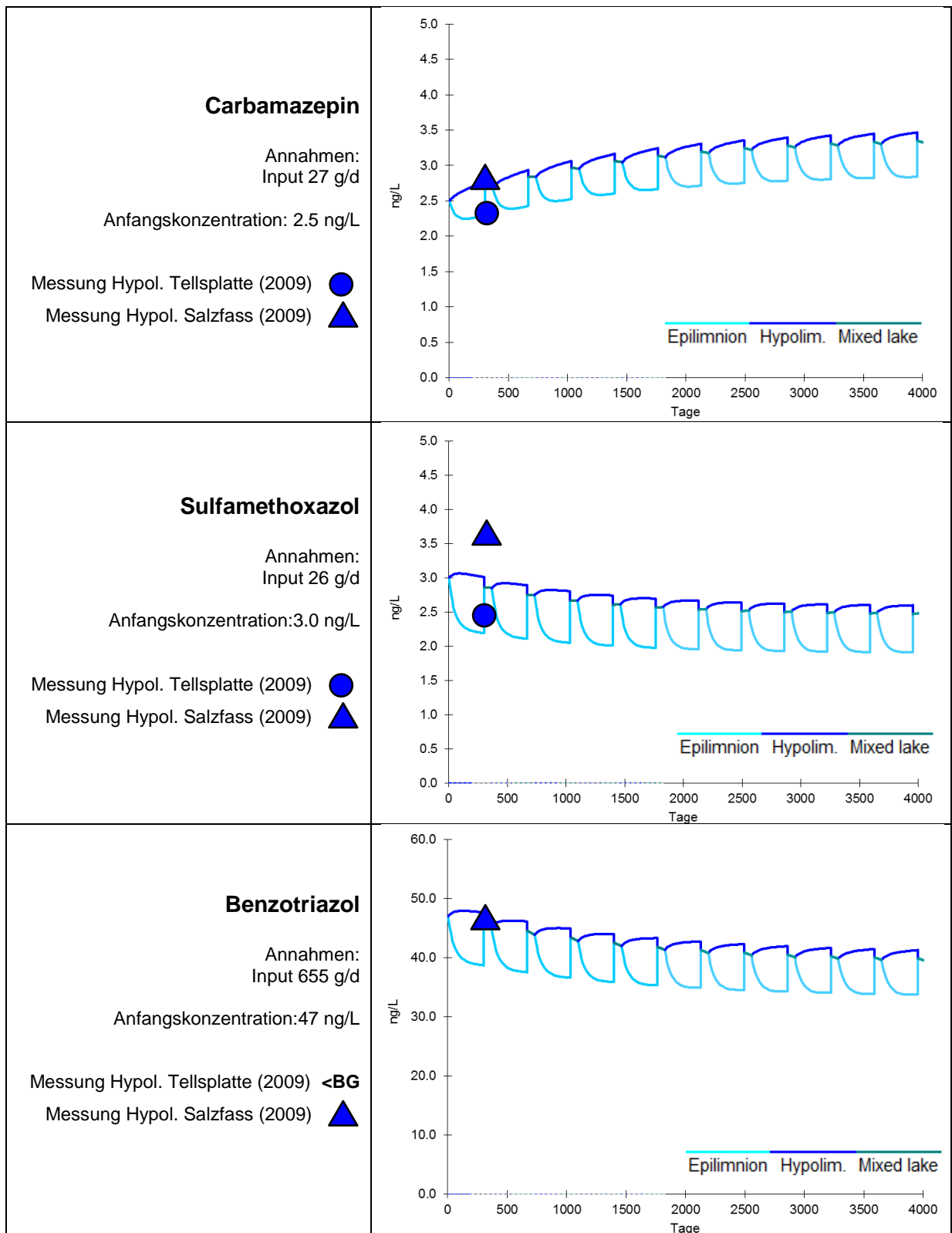


Abbildung 10: Modellerte Konzentrationsverläufe im Vierwaldstättersee für 10 Jahre, ausgehend von der Belastung von 2009 (Messungen Oktober 2009) für die Arzneimittel Carbamazepin und Sulfamethoxazol und das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol.

Sowohl die modellierten Konzentrationen für Carbamazepin als auch für Sulfamethoxazol bewegen sich im Bereich von um die 3 ng/L, die von Benzotriazol von um die 45ng/L. Die gemessenen Konzentrationen bestätigen diese Größenordnung. Bei einem konstanten Eintrag ist für diese drei Substanzen über die nächsten zehn Jahre keine grosse Änderung in der Konzentration zu erwarten, wobei die Konzentrationen von Benzotriazol und Sulfamethoxazol noch geringfügig tiefer werden könnten und Carbamazepin noch leicht ansteigen könnte. Im Vergleich mit dem Bodensee sind die Konzentrationen dieser Stoffe rund zwei- bis dreimal tiefer (Moschet, 2010). Die Konzentrationen sind mit dem heutigen Wissen als ökotoxikologisch unbedenklich einzustufen (Götz, et al., 2010).

In der Abbildung 11 sind die Konzentrationsverläufe für die künstlichen Süsstoffe Acesulfam und Sucralose dargestellt.

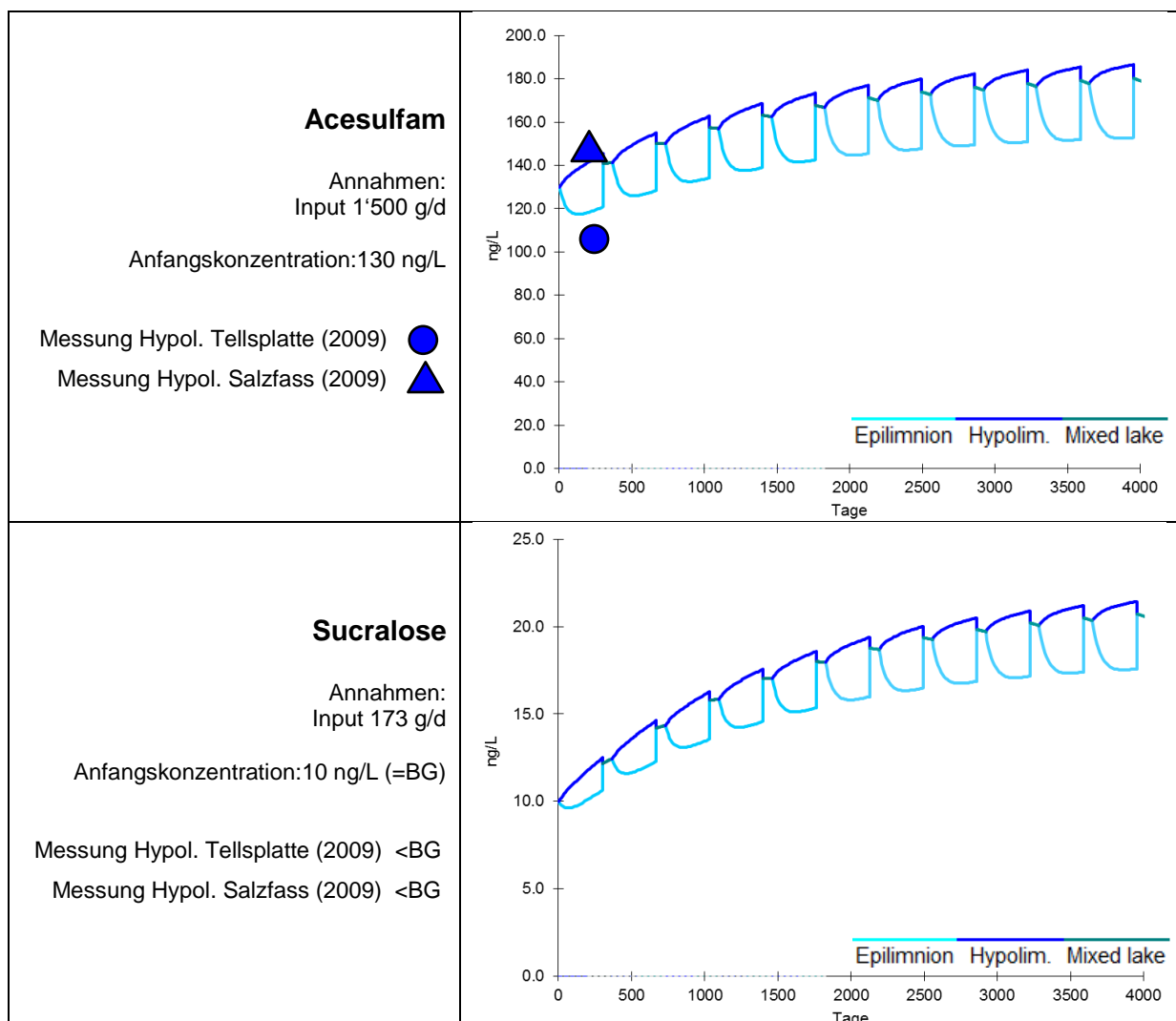


Abbildung 11: Modellierter Konzentrationsverläufe im Vierwaldstättersee für 10 Jahre, ausgehend von der Belastung von 2009 (Messungen Oktober 2009) für die künstlichen Süsstoffe Acesulfam und Sucralose.

Die modellierten Konzentrationsverläufe für Acesulfam und Sucralose im Vierwaldstättersee zeigen, dass bei gleichbleibendem Konsum in den nächsten Jahren noch ein Anstieg der Konzentrationen um rund einen Drittel zu erwarten ist. Die Gleichgewichtskonzentrationen

(steady-state) von Acesulfam liegen im Mittel bei rund 150 ng/L, die von Sucralose um die 18 ng/L. Sucralose konnte bei den Messungen im Jahr 2009, bei einer Bestimmungsgrenze der angewandten analytischen Methode von 10 ng/L im Vierwaldstättersee nicht bestimmt werden. In den neuen Messungen vom 2012 im stärker abwasserbelasteten Teil des Vierwaldstättersees, dem Alpnachersee, wurde der künstliche Süßstoff in quantifizierbaren Mengen gefunden (vgl. Abbildung 8, oben). Über Auswirkungen von künstlichen Süßstoffen auf aquatische Lebewesen gibt es noch nicht viele Informationen, daher können die vorliegenden Konzentrationen nicht beurteilt werden. Bezüglich Humantoxikologie müssten die Stoffe schon aufgrund ihrer Anwendung unbedenklich sein.

In der Abbildung 12 ist der modellierte Konzentrationsverlauf des Schmerzmittels Diclofenac dargestellt.

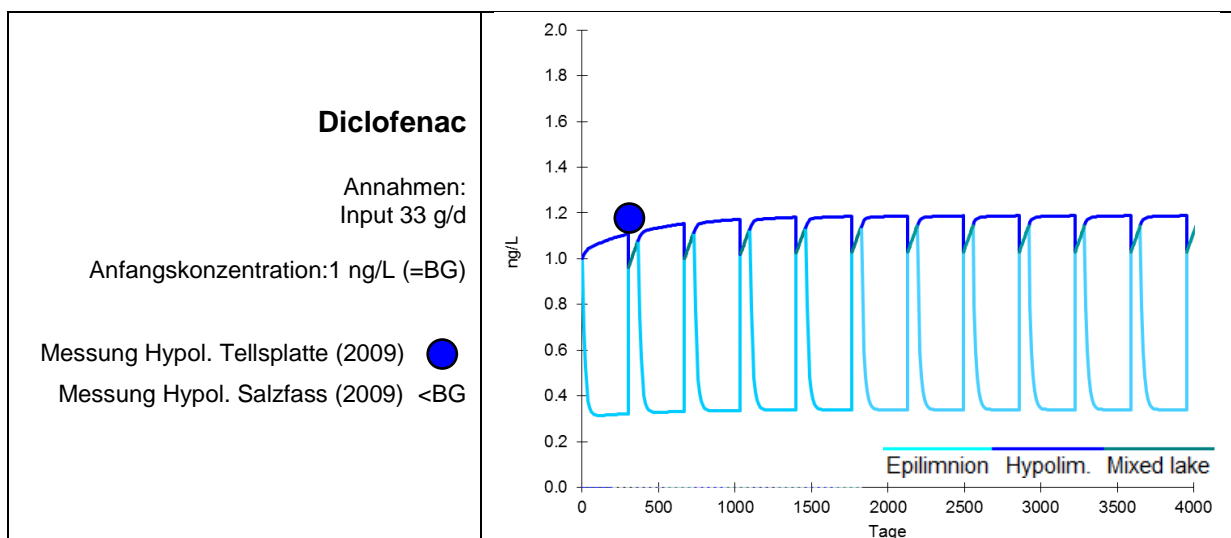


Abbildung 12: Modellierter Konzentrationsverlauf im Vierwaldstättersee für 10 Jahre, ausgehend von der Belastung von 2009 (Messungen Oktober 2009) für das Arzneimittel Diclofenac. Die zu erwartenden Konzentrationen sind im Epilimnion unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (BG, Diclofenac) von gängigen Analytischen Methoden.

Die aufgrund der Modellierung zu erwartenden Konzentrationen im Vierwaldstättersee sind nahe der Bestimmungsgrenze (Hypolimnion) resp. unterhalb der Bestimmungsgrenze (Epilimnion) von 1 ng/L. Die gemessene Konzentration von 1.2 ng/L im Tiefenwasser des Urnersees bestätigt diese Modellresultate. Diclofenac wird photolytisch abgebaut, daher ist die Konzentration im Epilimnion, der oberen Schicht im See sehr tief. Die modellierten Konzentrationen von Diclofenac im See stellen nach dem heutigen Wissensstand kein ökotoxikologisches Problem dar und liegen rund 50-100mal unter dem aktuellen Qualitätskriterium von 50 ng/L.

Im Allgemeinen lässt sich zusammenfassen, dass der Vierwaldstättersee (Seebecken ohne dem Alpnachersee) bezüglich Stoffen aus dem kommunalen Abwasser sehr tiefe Konzentrationen aufweist und daher das Wasser diesbezüglich sauber ist. Im Vergleich zum Bodensee sind die Konzentrationen rund dreimal tiefer, im Vergleich zum Alpnachersee sogar zehnmal tiefer. Wenn man die Acesulfamkonzentration zur Schätzung des Abwasseranteils heranzieht, kommt man auf rund 0.5% Abwasser.

5 AUSBAUSZENARIEN

5.1 Definition und Beschreibung der Szenarien

Die Auswirkungen von verschiedenen Ausbaustrategien auf die Belastung der Vorfluter und des Vierwaldstättersees wurden mit Hilfe der Analyse von verschiedenen Szenarien untersucht. In Bezug auf ökotoxikologisch problematische Konzentrationen stehen dabei die Fließgewässer im Einzugsgebiet, welche teilweise eine ungenügende Verdünnung aufweisen im Mittelpunkt. Die Auswirkungen von verschiedenen Ausbaustrategien auf die Belastung des Sees, welche das Hauptanliegen der Aufsichtscommission Vierwaldstättersee sind, wurden aber ebenfalls beurteilt.

Für die Auswahl der Szenarien wurden die aktuellen Kriterien des BAFU, die in der Vernehmlassung zur Änderung der Gewässerschutzverordnung GSchV vorgeschlagen und in der Mitteilung zur geplanten Änderung des Gewässerschutzgesetzes GSchG aufgrund der Rückmeldungen revidiert wurden, berücksichtigt.

Auf dieser Basis wurden zusammen mit den kantonalen Fachstellen die in den einzelnen Kantonen geplanten und angedachten ARA Zusammenschlüsse und möglichen ARA Ausbaustrategien diskutiert und für die Szenarienauswahl miteinbezogen.

Es wurden folgende Ausbauszenarien definiert und analysiert:

- Szenario 1: Ausbau der ARA nach aktuellen Kriterien der geplanten Änderung im Entwurf zur GSchV vom 25. April 2012.
- Szenario 2: Ausbau der ARA nach aktuellen Kriterien der geplanten Änderung im Entwurf zur GSchV vom 25. April 2012 und unter Berücksichtigung möglicher Ableitungen / Einzelausbauten von ARA an besonders problematischen Vorflutern, welche weniger als 8'000 angeschlossenen Einwohner aufweisen.
- Szenario 3: Langfristige Belastung bei einer Umsetzung aller von den kantonalen Fachstellen angedachten Ausbauten und Ableitungen.

Die von einem potentiellen Ausbau oder einer Ableitung betroffenen Kläranlagen sind in den folgenden Tabellen für die drei Szenarien aufgeführt.

Tabelle 9: Szenario 1: Ausbau der ARA nach aktuellen Kriterien der geplanten Änderung im Entwurf zur GSchV vom 25. April 2012.

ARA Nummer	Name der ARA	Angeschlossene Einwohner	See	Abwasseranteil	Ausbau nach Kriterien des Entwurfs GSchV
120101	ALTDORF	23'200	X		>24'000 & See
120200	ANDERMATT	1'500		0.4%	
120401	BAUEN	150	X		
120600	ERSTFELD	6'500		0.8%	
120800	GOESCHENEN	450		0.4%	
121100	ISENTHAL	500		0.4%	
121200	REALP	150		0.2%	
121500	SEELISBERG	600	X		
121700	SISIKON	350	X		
122000	WASSEN	400		0.3%	
131102	GERSAU	1'900	X		
136700	MUOTATHAL	3'190		1.5%	
137100	SATTEL	1'600		31%	
137200	SCHWYZ	28'550		19%	>8'000 & >10%
140100	ALPNACH (SARNERAATAL)	31'000	X		>24'000 & See
140200	ENGELBERG	3'850		2.1%	
140400	KERNS (MELCHTAL)	500		0.3%	
150200	BUOCHS (AUMUEHLE)	14'368	(X)	3.4%	
150700	HERGISWIL (LOPPER)	4'415	X		
150900	STANS (ROZWINKEL)	21'459	(X)	66%	>8'000 & >10%
106700	UDLIGENSWIL	2'002		100%	
106902	WEGGIS / VITZNAU (LUETZELAU)	5'116	X		
100100	TALSCHAFT ENTLEBUCH	13'554		4.7%	
100401	SOERENBERG	1'791		7.8%	
100900	WERTHENSTEIN(BLINDEI)	6'417		4.9%	
102300	BALLWIL	2'295		27%	
102400	EMMEN (BUHOLZ) / REAL	162'369		4.8%	>80'000
103300	INWIL (ESCHENBACH) / Oberseetal	6'945		4.9%	
106500	RONTAL (ROOT)	22'925		5.1%	
106603	SCHWARZENBERG/DORF	1'566		3.2%	
109800	RUSWIL	5'406		34%	

Tabelle 10: Szenario 2: Ausbau der ARA nach aktuellen Kriterien der geplanten Änderung im Entwurf zur GSchV vom 25. April 2012 und unter Berücksichtigung möglicher Ableitungen / Einzelausbauten von ARA an besonders problematischen Vorflutern, welche weniger als 8'000 angeschlossenen Einwohner aufweisen.

ARA Nummer	Name der ARA	Abwasseranteil	Ausbau nach Kriterien des Entwurfs GSchV und problematischen Vorflutern	Bemerkungen
120101	ALTDORF		>24'000 & See	MV-Stufe möglich
120200	ANDERMATT	0.4%		
120401	BAUEN	-		
120600	ERSTFELD	0.8%		
120800	GOESCHENEN	0.4%		
121100	ISENTHAL	0.4%		
121200	REALP	0.2%		
121500	SEELISBERG	-		
121700	SISIKON	-		
122000	WASSEN	0.3%		
131102	GERSAU	-		
136700	MUOTATHAL	1.5%		
137100	SATTEL	31%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zu Schwyz möglich
137200	SCHWYZ	19%	>8'000 & >10%	MV-Stufe möglich
140100	ALPNACH (SARNERAATAL)	-	>24'000 & See	MV-Stufe möglich
140200	ENGELBERG	2.1%		
140400	KERNS (MELCHTAL)	0.3%		
150200	BUOCHS (AUMUEHLE)	3.4%		
150700	HERGISWIL (LOPPER)	-		
150900	STANS (ROZWINKEL)	66%	>8'000 & >10%	MV-Stufe in Planung
106700	UDLIGENSWIL	100%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zur ARA REAL (gepl. auf 2021)
106902	WEGGIS / VITZNAU (LUETZELAU)	-		
100100	TALSCHAFT ENTLEBUCH	4.7%		
100401	SOERENBERG	7.8%		
100900	WERTHENSTEIN (BLINDEI)	4.9%		
102300	BALLWIL	27%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zur ARA Oberseetal (2013/14)
102400	EMMEN (BUHOLZ) / REAL	4.8%	>80'000	MV-Stufe möglich
103300	INWIL (ESCHENBACH) / Oberseetal	4.9%		
106500	RONTAL (ROOT)	5.1%		
106603	SCHWARZENBERG/DORF	3.2%		
109800	RUSWIL	34%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zur ARA Blindei (2017/18)

Tabelle 11: Szenario 3: Langfristige Belastung bei einer Umsetzung aller angedachten Ausbauten und Ableitungen.

ARA Nummer	Name der ARA	Abwasseranteil	Ausbau nach Kriterien des Entwurfs GSchV und problematischen Vorflutern	Bemerkungen
120101	ALTDORF	-	>24'000 & See	MV-Stufe möglich
120200	ANDERMATT	0.4%		
120401	BAUEN	-		
120600	ERSTFELD	0.8%		Ableitung zu Altdorf möglich
120800	GOESCHENEN	0.4%		
121100	ISENTHAL	0.4%		
121200	REALP	0.2%		
121500	SEELISBERG	-		
121700	SISIKON	-		
122000	WASSEN	0.3%		
131102	GERSAU	-		Ableitung zu Schwyz möglich
136700	MUOTATHAL	1.5%		Ableitung zu Schwyz möglich
137100	SATTEL	31%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zu Schwyz möglich
137200	SCHWYZ	19%	>8'000 & >10%	MV-Stufe möglich
140100	ALPNACH (SARNERAATAL)	-	>24'000 & See	MV-Stufe möglich
140200	ENGELBERG	2.1%		Ableitung ARA Rotzwinkel (>20Jahre)
140400	KERNS (MELCHTAL)	0.3%		Ableitung ARA Sarneraatal
150200	BUOCHS (AUMUEHLE)	3.4%		Ableitung ARA Rotzwinkel (>20Jahre)
150700	HERGISWIL (LOPPER)	-		
150900	STANS (ROZWINKEL)	66%	>8'000 & >10%	MV-Stufe in Planung
106700	UDLIGENSWIL	100%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zur ARA REAL (gepl. auf 2021)
106902	WEGGIS / VITZNAU (LUETZELAU)	-		Langfristig ARA Schönau ZG (>>20Jahre)
100100	TALSCHAFT ENTLEBUCH	4.7%		Langfristig ARA Blindei
100401	SOERENBERG	7.8%		Langfristig ARA Blindei
100900	WERTHENSTEIN (BLINDEI)	4.9%		
102300	BALLWIL	27%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zur ARA Oberseetal (2013/14)
102400	EMMEN (BUHOLZ) / REAL	4.8%	>80'000	MV-Stufe möglich
103300	INWIL (ESCHENBACH) / Oberseetal	4.9%		Langfristig ARA REAL o. RONTAL
106500	RONTAL (ROOT)	5.1%		
106603	SCHWARZENBERG/DORF	3.2%		Langfristig ARA REAL via Malters
109800	RUSWIL	34%	Hoher Abw.-Anteil	Ableitung zur ARA Blindei (2017/18)

5.2 Annahmen und Rahmenbedingungen der Szenarienanalysen

Die Auswirkungen der drei oben aufgeführten Szenarien auf die Verbesserung der Gewässerqualität der Vorfluter im Einzugsgebiet wurden mit folgenden Annahmen berechnet:

- Beim Ausbau einer ARA mit einer weitergehenden Stufe, werden die modellierten Mikroverunreinigungen Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol und Benzotriazol mit einer Effizienz von 90% zusätzlich zur biologischen Stufe (mittlere Eliminationsraten über verschiedene Verfahren) aus dem Abwasser entfernt. Für die Stoffe, für welche keine Qualitätskriterien vorhanden sind, wurde die Verringerung der Belastung in den Vorflutern nicht bewertet.
- Es werden in allen Szenarien nur die fünf Kläranlagen als ausgebaut angenommen, welche den BAFU Kriterien entsprechen: Altdorf, Schwyz, Alpnach/Saarneraatal, Stans/Rotzwinkel und Emmen (REAL).
- Für die übrigen Anlagen werden in den Szenarien 2 und 3 angenommen, dass sie gemäss den Angaben der kantonalen Behörden abgeleitet werden. Bei der Ableitung wird der ursprüngliche Vorfluter zu 100% entlastet, und die anfallende Fracht der ARA zugerechnet, auf welche das Abwasser gemäss den Angaben in den Szenarien (Tabelle 9 bis Tabelle 11) abgeleitet wird.

Für die Berechnung der Frachtreduktion in den See wurde ebenfalls mit einer durchschnittlichen Reinigungsleistung von 0.9 gerechnet (mittlere Eliminationsraten über verschiedene weitergehende Verfahren) gerechnet. Dies gilt nicht für die Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure und Iopromid und für die Süsstoffe Acesulfam und Sucralose. Für diese Stoffe ist eine geringere Reinigungsleistung durch weitergehende Verfahren zu erwarten.

5.3 Verbesserung der Wasserqualität in den Fliessgewässern

5.3.1 Szenario 1: Ausbau nach aktuellen BAFU Kriterien

Im Szenario 1 wurden die Auswirkungen eines Ausbaus der ARA nach aktuellen Kriterien der geplanten Änderung im Entwurf zur GSchV vom 25. April 2012 untersucht. Die detaillierten Resultate sind für die Stoffe, für die Qualitätskriterien vorhanden waren (Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac und Sulfamethoxazol) im Anhang 2 dargestellt.

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen des potentiellen Ausbaus am Beispiel von Diclofenac illustriert. Diclofenac ist aufgrund der vorliegenden Konzentrationen und des tiefen Qualitätskriteriums von 50 ng/L, die von den untersuchten Mikroverunreinigungen für die Wasserqualität kritischste Substanz. Im IST-Zustand wurde das Qualitätskriterium für Diclofenac in sechs der 23 Vorflutern (ohne Anlagen mit Einleitung in den See), also in rund 25% aller Vorfluter überschritten. Die Risikoquotienten nach dem Ausbau gemäss Szenario 1 sind in der Abbildung 13 wiedergegeben.

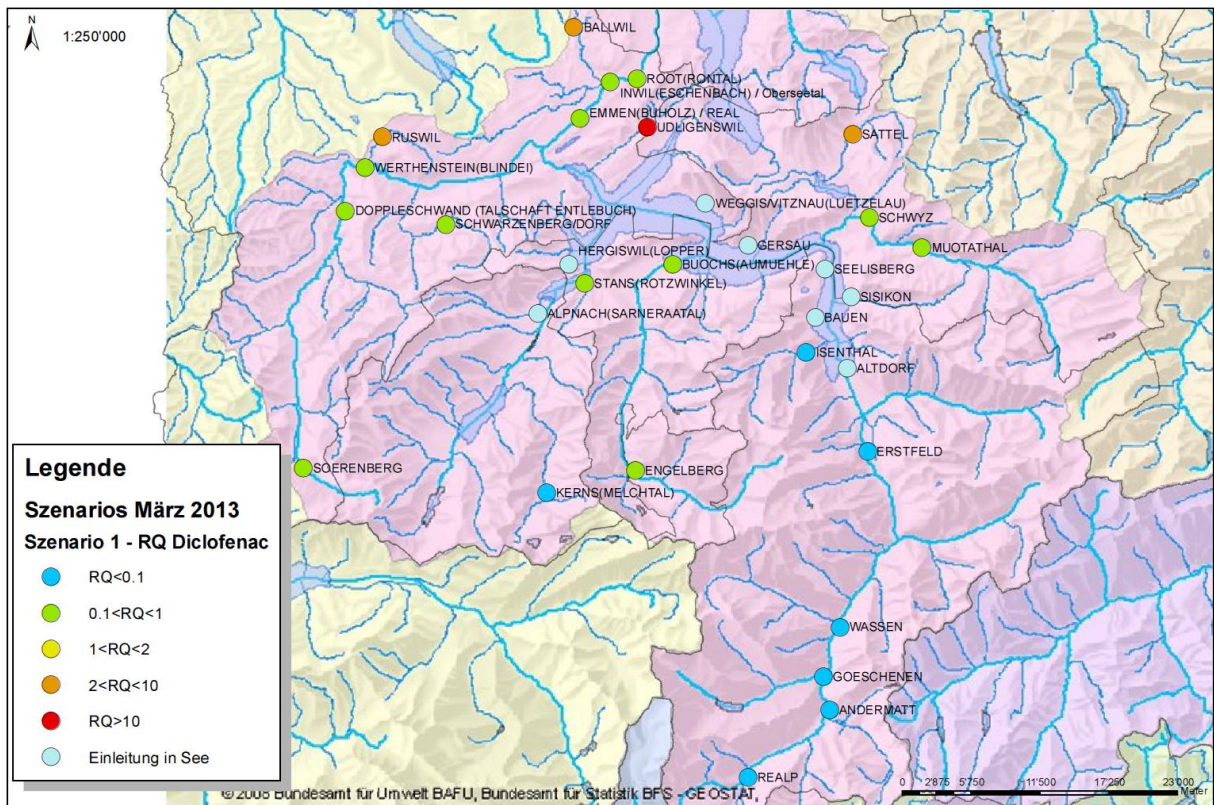


Abbildung 13: Risikoquotienten von Diclofenac bei einem Ausbau der Kläranlagen nach den aktuellen BAFU Kriterien (Szenario 1).

Nach dem Ausbau der fünf Kläranlagen gemäss Szenario 1, wurden die Überschreitungen von sechs auf vier Vorfluter gesenkt. Entlastet wurden die Fliessgewässerabschnitte unterhalb von Schwyz (Seeweren und Muota) und das kurze Stück des A2-Kanals (ca. 650m) vor der Einmündung in den Alpnachersee. Bezüglich der Verbesserung der ökotoxikologischen Wasserqualität im Einzugsgebiet ist der Effekt des Ausbaus der fünf Kläranlagen Altdorf, Schwyz, Alpnach/Saarneraatal, Stans/Rotzwinkel und Emmen/REAL relativ bescheiden.

Die gesamte Stofffracht wird hingegen sehr effizient reduziert. Wenn man von einer mittleren Reinigungsleistung von 0.9 ausgeht, wird die Gesamtfracht an Mikroverunreinigungen aus allen modellierten Kläranlagen um 64% reduziert. Die Fracht in den Vierwaldstättersee wird dabei um 62% reduziert, wobei die Fracht in den Alpnachersee sogar um 89% kleiner wird.

5.3.2 Szenario 2: Ausbau nach aktuellen BAFU Kriterien inkl. kleine Anlagen

Im Szenario 2 werden neben den fünf ARA von Szenario 1 alle Kläranlagen, welche in den Vorflutern problematische Konzentrationen verursachen, auf grössere unterliegende Anlagen abgeleitet (vgl. Tabelle 10). Dabei gehören alle der Ziel-ARA für die Ableitungen zur Auswahl der fünf Kläranlagen für den Bau einer weitergehenden Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen, ausser der ARA Oberseetal auf welche im Szenario 2 die ARA Ballwil abgeleitet würde. Da die ARA Oberseetal seit 2012 direkt in die Reuss einleitet, ist jedoch dort

eine ausreichend grosse Verdünnung des Abwassers vorhanden (kumulierter Abwasseranteil bei Q_{347} deutlich $<10\%$).

Da alle kleinen Kläranlagen, welche problematische Konzentrationen in den entsprechenden Vorflutern verursachen im Szenario 2 abgeleitet werden, werden die entsprechenden Vorfluter komplett vom Abwasser entlastet und es treten keine Überschreitungen mehr auf. Die Risikoquotienten von Diclofenac sind in der Abbildung 14 dargestellt.

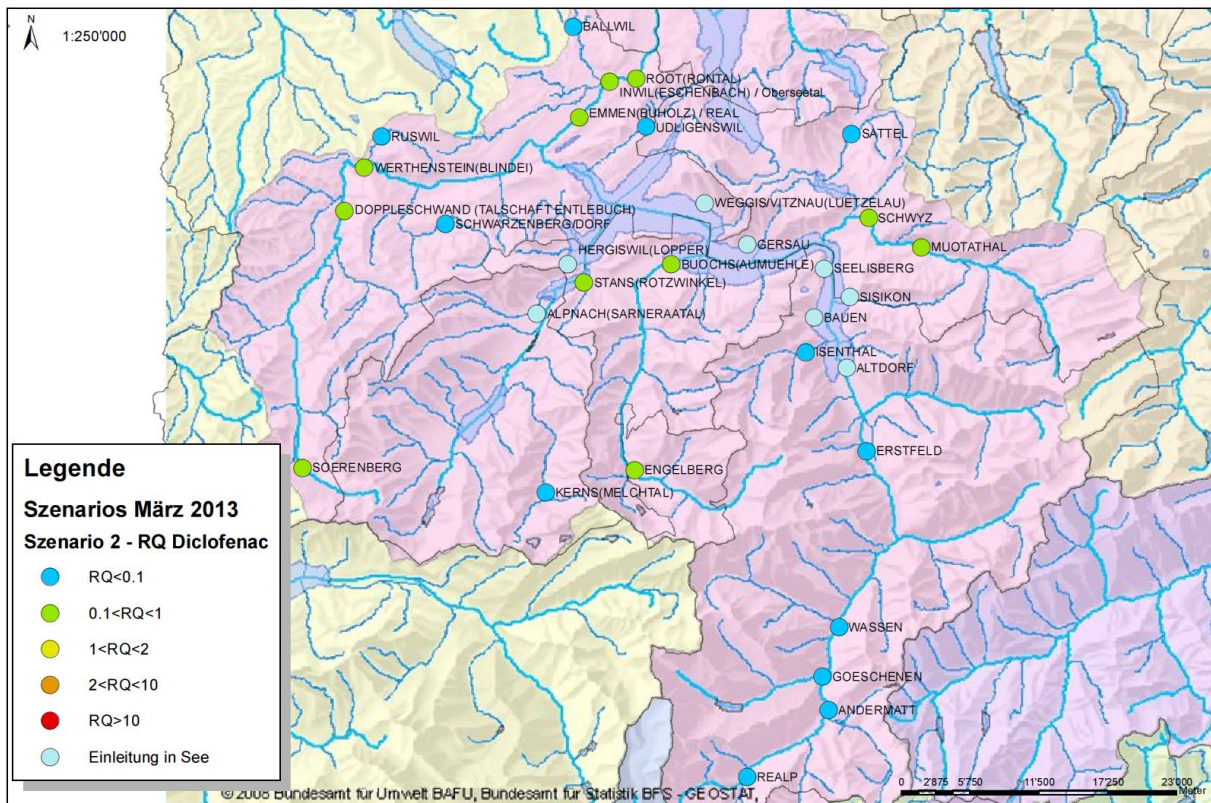


Abbildung 14: Risikoquotienten von Diclofenac bei einem Ausbau der ARA nach aktuellen BAFU Kriterien und unter Berücksichtigung möglicher Ableitungen / Einzelausbauten von ARA an besonders problematischen Vorfluter (Szenario 2).

Mit einem Ausbau der ARA im Gebiet des Vierwaldstättersees gemäss Szenario 2, sind somit in sämtlichen Vorflutern die ökotoxikologischen Kriterien für die hier untersuchten Substanzen eingehalten. Die Stofffracht wird nur unwesentlich stärker reduziert als im Szenario 1: Reduktion der gesamten Fracht der modellierten ARA um 67%, Reduktion der Stofffracht in den Vierwaldstättersee um 64%, wobei die Reduktion der Stofffracht in den Alpnachersee wiederum 89% beträgt.

5.3.3 Szenario 3: Alle für einen Ausbau oder eine Ableitung von den kantonalen Behörden angedachten Anlagen

Das Szenario 3 beinhaltet den Ausbau der fünf grossen von den BAFU Kriterien betroffenen Kläranlagen plus alle von den kantonalen Fachstellen angedachten Ableitungen. Das sind alle im Szenario 2 ausgebauten bzw. abgeleiteten ARA und 11 zusätzliche ARA, welche aufgehoben und auf grössere Anlagen abgeleitet werden. Insgesamt werden von den 31 betrachteten Anlagen in diesem Szenario an 20 Kläranlagen Anpassungen vorgenommen, wobei 5 Anlagen ausgebaut und 15 Anlagen aufgehoben und abgeleitet werden. In der Abbildung 15 sind die Risikoquotienten von Diclofenac für das Szenario 3 aufgeführt.

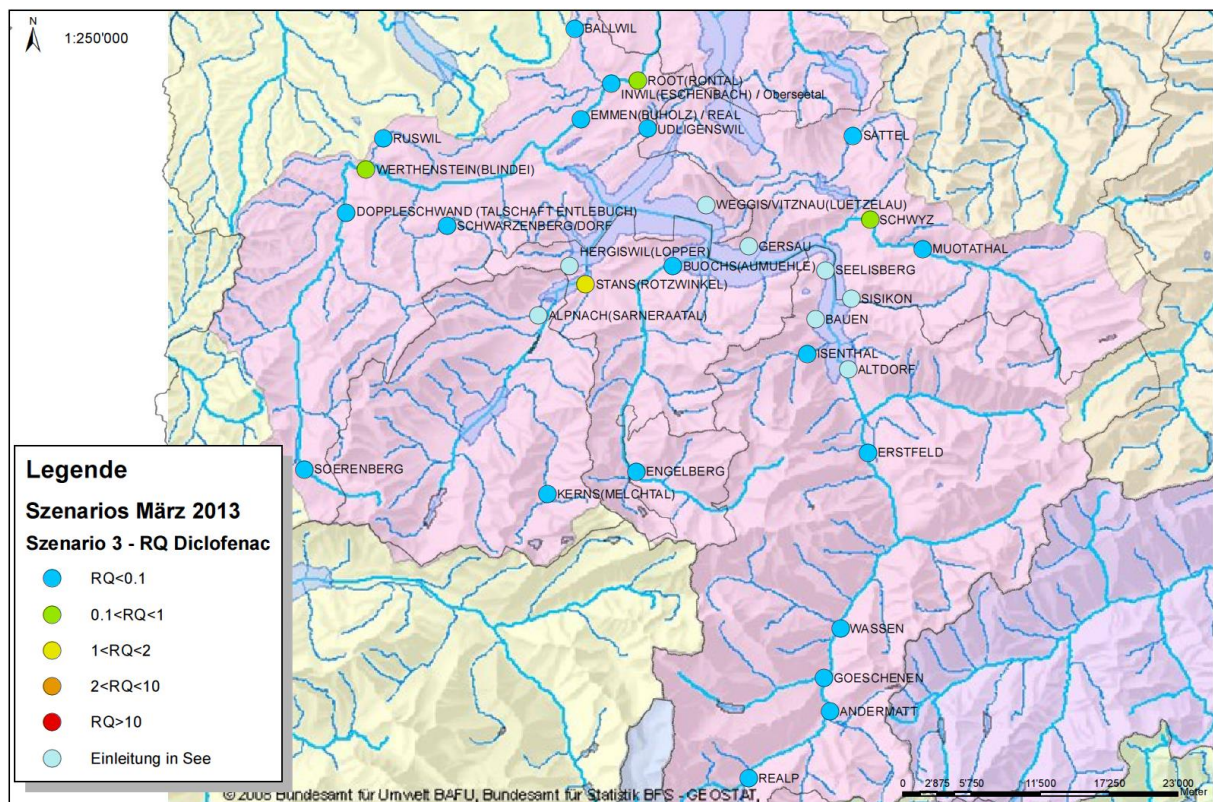


Abbildung 15: Risikoquotienten von Diclofenac bei der Umsetzung aller angedachten Ausbauten und Ableitungen (Szenario 3).

Insgesamt tritt in diesem Szenario eine Überschreitung auf. Diese ist bei der ARA Rotzwinkel im A2-Kanal. Durch die Ableitung der ARA Engelberg und Buochs auf die ARA Rotzwinkel nimmt dort die Stofffracht um rund die Hälfte zu. Dies bringt im A2-Kanal trotz einer Reinigungsleistung für Mikroverunreinigungen von 90% einer weitergehenden Stufe der ARA Rotzwinkel, eine leicht erhöhte Konzentration. Allerdings ist der Risikoquotient nur geringfügig über 1 und gerade bei Diclofenac kann bei einer gut funktionierenden weitergehender Stufe von einer Elimination von mehr als 95% ausgegangen werden (Abegglen, et al., 2012). Die Stofffrachten werden insgesamt mit all diesen Massnahmen sogar um 81% reduziert, die Stofffracht in den Vierwaldstättersee um 85%, die in den Alpnachersee um 87%.

Insgesamt bringt dieses Ausbauszenario im Hinblick auf die Problematik der Mikroverunreinigungen zwar noch weitere Verbesserungen, die geforderten Ziele können aber bereits mit dem Ausbau resp. den Ableitungen in Szenario 2 erreicht werden. Eine Ableitung der zusätzlichen 11 Anlagen in Szenario 3, ist alleine aufgrund der Problematik der Mikroverunreinigungen nicht notwendig. Verschiedene andere Gründe, wie beispielsweise die im Allgemeinen bessere Reinigungsleistung auf grösseren Anlagen, die Entlastung von kleinen Vorflutern von Schmutz- und Nährstoffen, eine bessere Energieeffizienz und der effizientere und kostengünstigere Betrieb von grösseren Anlagen müssen hier den Ausschlag für den Entscheid einer Ableitung geben. Dazu müssen unter anderem die Investitions- und Betriebskosten der Ableitung den Investitions- (resp. Sanierungs-) und Betriebskosten der bestehenden kleinen Anlagen gegenübergestellt werden. Auch die weiteren Kriterien, welche für Ara Zusammenschlüsse sprechen, müssen im Einzelfall betrachtet werden. Eine Optimierung der gesamten Abwasserreinigung kann im Rahmen dieser Studie nicht genauer diskutiert werden.

5.4 Einfluss der Frachtreduktion auf die Konzentrationen im Alpachersee

Der Einfluss eines weitergehenden Ausbaus der Kläranlagen Stans/Rotzwinkel und Alpnach/Sarneraatal auf die zu erwartenden Konzentrationen im Alpachersee wird hier an den Beispielen Carbamazepin und Diclofenac illustriert. Für Mikroverunreinigungen mit vergleichbaren Abbauraten über weitergehende Verfahren sieht die zu erwartende Reduktion in den Gewässern ähnlich aus. Dies gilt nicht für die Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure und Iopromid und auch nicht in gleichem Masse für die Süsstoffe Acesulfam und Sucralose. Diese Stoffe werden mit den weitergehenden Verfahren nicht mit der gleichen Effizienz aus dem Abwasser entfernt (Götz, et al., 2010; Abegglen, et al., 2012). Folgende mittleren Reinigungsleistungen der weitergehenden Verfahren wurden für die modellierten Stoffe angenommen: Amidotrizoesäure: keine zusätzliche Elimination; Iopromid: 50%; Acesulfam: 80%; Sucralose 30%; alle übrigen Stoffe 90% (Moschet, 2010; Bürge, 2009; Lange, et al., 2012; Götz, et al., 2010).

Die modellierten Konzentrationsverläufe für Carbamazepin, Diclofenac und Benzotriazol beim Ausbau der beiden oben genannten ARA sind in der Abbildung 16 wiedergegeben.

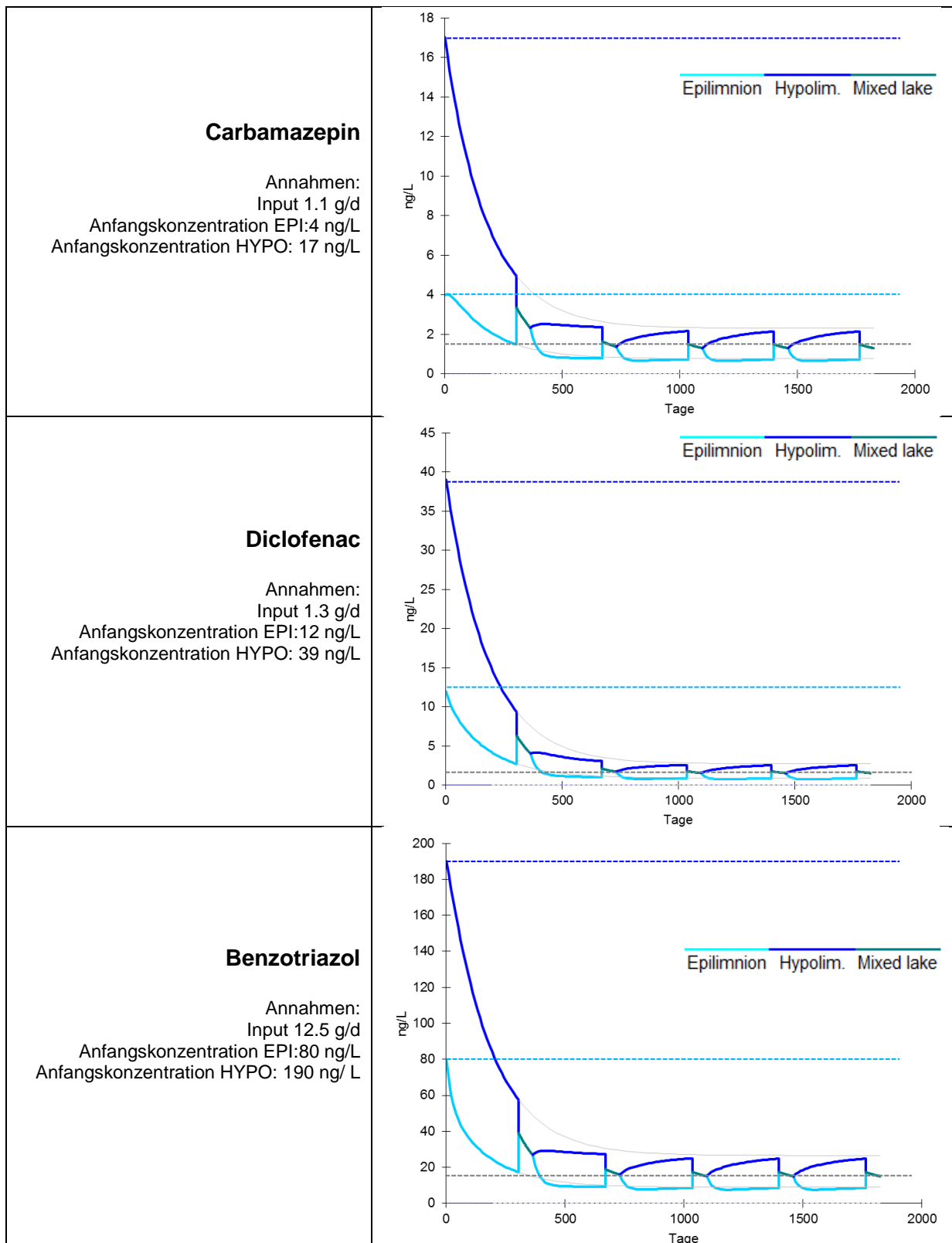


Abbildung 16: Modellierter Konzentrationsverlauf von Carbamazepin, Diclofenac und Benzotriazol im Alpna-chersee bei einem Ausbau der ARA Stans/Rotzwinkel und Alpnach/Sarneraatal mit einer weitergehenden Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen. Angenommen Effizienz der zusätzlichen Stufe: 0.9.

Sowohl für Carbamazepin als auch für Diclofenac kann innerhalb von rund 2 Jahren mit einer Reduktion von rund einem Faktor 10 gerechnet werden. Beide Stoffe müssten auf Konzentrationen unterhalb von 4 ng/L reduziert werden. Dies wäre für Diclofenac mehr als einen Faktor 10 unterhalb des aktuellen Qualitätskriteriums von 50 ng/L, für Carbamazepin sogar rund einen Faktor 100 unterhalb des Qualitätskriteriums von 500 ng/L.

Mit Massnahmen an den Kläranlagen Stans/Rotzwinkel und Alpnach/Sarneraatal kann somit der Alpnachersee effizient und sehr rasch stark entlastet werden. Dies sieht für alle drei oben beschriebenen Szenarien gleich aus. Im Szenario drei ist der Stoffeintrag durch die Ableitungen von Engelberg und Buochs zur ARA Stans/Rotzwinkel nur unwesentlich grösser als in den beiden anderen Szenarien (Reduktion gegenüber heute von 87% der Frachten im Szenario 3, wobei die Fracht in den Alpnachersee in den Szenarien 1 und 2 um 89% reduziert würde).

5.5 Einfluss der Ausbaustrategien auf die Wasserqualität des gesamten Vierwaldstättersees

In den Szenarien 1 bis 3 werden verschiedene Ausbaustrategien analysiert. In der Tabelle 12 sind die Frachten in kg pro Jahr und die entsprechende Reduktion der Frachten gegenüber dem IST-Zustand für die drei Szenarien angegeben.

Tabelle 12: Jährliche Frachten von Mikroverunreinigungen in den Vierwaldstättersee für die drei verschiedenen Ausbauszenarien und Angabe der Frachtreduktion in Prozent gegenüber dem IST-Zustand.

		Carbamazepin	Diclofenac	Sulfamethoxazol	Amidotrizoesäure ¹⁰	Iopromid	Benzotriazol	Acesulfam ¹¹	Sucralose
In den Vierwaldstättersee eingeleitete Frachten									
Szenario 1	kg/Jahr	4.0	4.7	3.8	10	43	46	235	48
	Reduktion in %	62%	62%	62%	-	34%	62%	54%	20%
Szenario 2	kg/Jahr	3.7	4.4	3.6	10	42	43	224	47
	Reduktion in %	64%	64%	64%	-	36%	64%	56%	22%
Szenario 3	kg/Jahr	1.5	1.8	1.5	10	28	17	110	34
	Reduktion in %	84%	84%	84%	-	57%	84%	78%	43%

¹⁰ Angenommene mittlere Eliminationsraten für Kontrastmittel über weitergehende Verfahren: Amidotrizoesäure: keine zusätzliche Elimination; Iopromid: 50% (Götz, et al., 2010).

¹¹ Angenommene mittlere Eliminationsraten für Süsstoffe über weitergehende Verfahren: Acesulfam: 80%; Sucralose 30% (Moschet, 2010; Bürge, 2009; Lange, et al., 2012).

Bezüglich der Frachtenreduktion ist zwischen den Szenarien 1 und 2 kein grosser Unterschied vorhanden. Im Szenario 2 wurden zusätzlich zu den Kläranlagen im Szenario 1, kleine Anlagen, welche auch schwache Vorfluter haben, auf grössere Anlagen abgeleitet, welche eine weitergehende Stufe haben würden. Dieses Szenario hat die Reduktion von ökotoxikologisch problematischen Vorflutern zum Ziel (vgl. Kapitel 5.3.2). Die Ziele der Frachtreduktion und der Optimierung bezüglich ökotoxikologischer Kriterien sind in diesem Fall nicht kongruent. Dies wurde auch in anderen Studien für die Situation in der ganzen Schweiz so festgestellt (Ort, et al., 2007). Die im Szenario 1 und 2 erreichten Frachtreduktionen, von um die 60% für Arzneimittel, übersteigen die vom BAFU geforderte Reduktion von 40% im schweizerischen Mittel (Schärer, et al., 2010).

Im Szenario 3 wird die Fracht von Mikroverunreinigungen in den Vierwaldstättersee sogar noch um rund einen Drittel stärker reduziert als mit den Massnahmen in den Szenarien 1 und 2. Für die modellierten Arzneimittel resultiert eine Reduktion der Fracht von fast 85%.

In der Abbildung 17 sind die modellierten Verläufe der Benzotriazolkonzentrationen im Vierwaldstättersee für die drei Szenarien wiedergegeben.

Die gemessenen Konzentrationen im Jahr 2009 und die für den Ist-Zustand modellierten Konzentrationsverläufe bewegen sich für Benzotriazol um die 40 bis 50 ng/L (vgl. Ist-Zustand, Abbildung 10). Im Szenario 1 wird der Stoffeintrag in den See durch den Ausbau der grössten Kläranlagen im Einzugsgebiet um 62% reduziert. Diese Reduktion hätte voraussichtlich einen Rückgang der mittleren Konzentration im See auf rund 17 ng/L zur Folge. Bis diese Konzentration nach der Eintragsreduktion erreicht würde, dauert es aufgrund der relativ hohen Wasseraufenthaltszeit von 3.4 Jahren mindestens zehn Jahre. Für Benzotriazol wurden keine Abbauprozesse und keine Sedimentation in relevantem Ausmass angenommen. Der Rückgang der Konzentration für Szenario 2 ist erwartungsgemäss mit Szenario 1 vergleichbar.

Mit der Reduktion von fast 85% der eingetragenen Frachten der Arzneimittel und auch von Benzotriazol gemäss Szenario 3, nimmt die Benzotriazol Konzentration im Vierwaldstättersee sogar bis auf unter 10 ng/L ab (Abbildung 17). Die Konzentrationen von Stoffen mit kleinerem Eintrag, wie Carbamazepin, Diclofenac und Sulfamethoxazol würden alle unter 1 ng/L kommen, was mit den meisten gängigen analytischen Methoden nicht mehr quantifizierbar ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass mit den Massnahmen von Szenario 1 bereits eine sehr effiziente Reduktion der Konzentrationen im Vierwaldstättersee realisierbar wäre. Alle modellierten und gemessenen Konzentrationen sind auch heute deutlich unter den ökotoxikologischen Qualitätskriterien. Im Sinne des Ressourcenschutzes und der Trinkwassernutzung kann eine weitere Reduktion dieser Stoffe durch den Ausbau der grösseren ARA aber durchaus als sinnvoll erachtet werden.

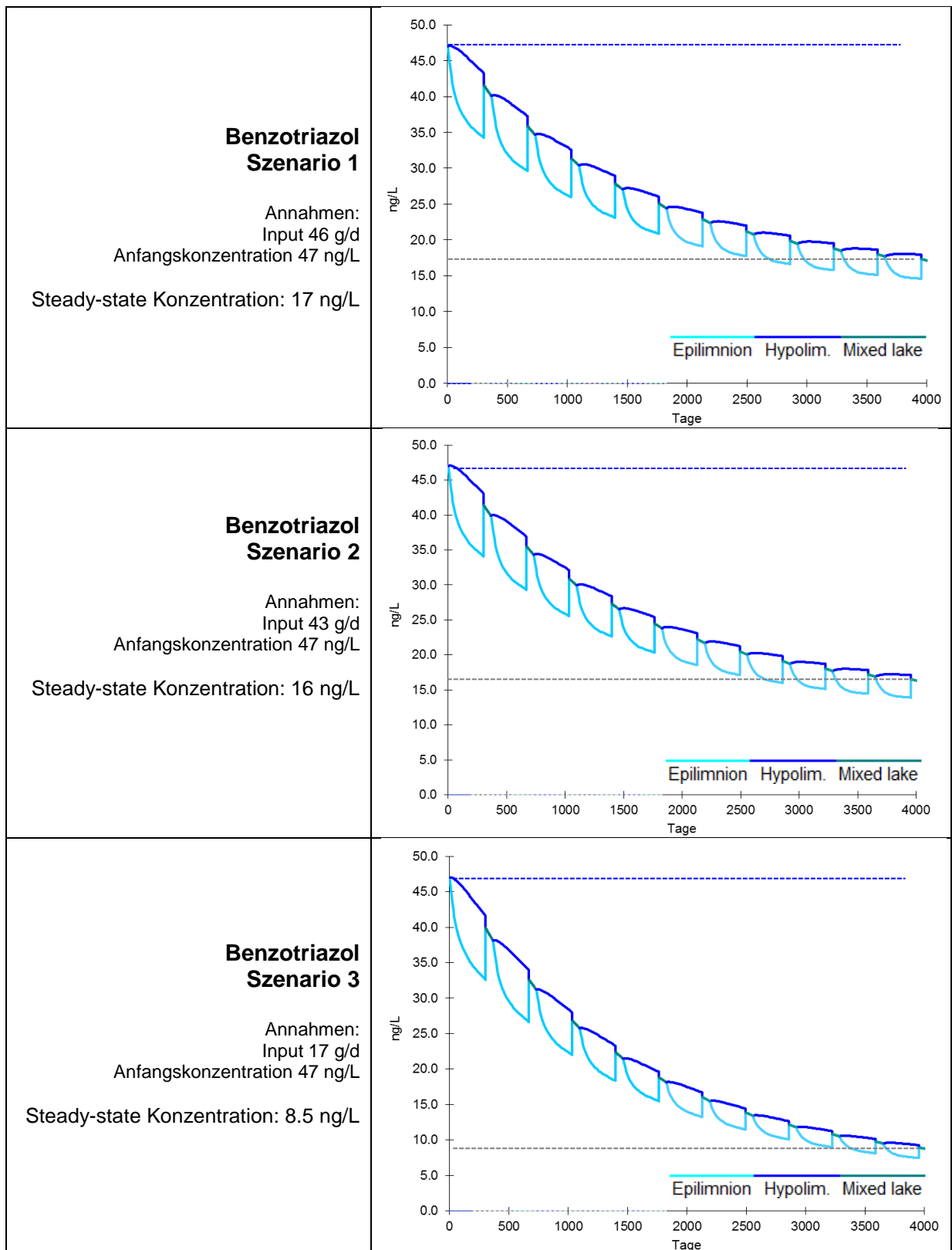


Abbildung 17: Modellerte Konzentrationsverläufe für Benzotriazol für die drei Reduktionsszenarien 1 bis 3 über 10 Jahre.

6 KOSTENBERECHNUNGEN

6.1 Kosten einer Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen

6.1.1 Kostengrundlage

Für die Abschätzung der Kosten für eine Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen wurden die Angaben aus dem Bericht des BAFU zu den Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser (BG Ingenieure und Berater AG, 2012) verwendet.

Die Kosten pro Einwohnerwert sind für die Investitions- und Betriebskosten von der Dimensionierungsgrösse der ARA abhängig. Es werden die Kosten für das PAK-Verfahren und die Ozonung berechnet.

6.1.2 Investitions- und Betriebskosten PAK-Verfahren

Für die Berechnung der Investitionskosten für das PAK-Verfahren in Abhängigkeit der Dimensionierungsgrösse der ARA wurde die in Abbildung 18 aufgeführte Formel verwendet. In Abbildung 19 sind die spezifischen Betriebskosten in Abhängigkeit der Belastungsgrösse und die dafür verwendete Formel ersichtlich.

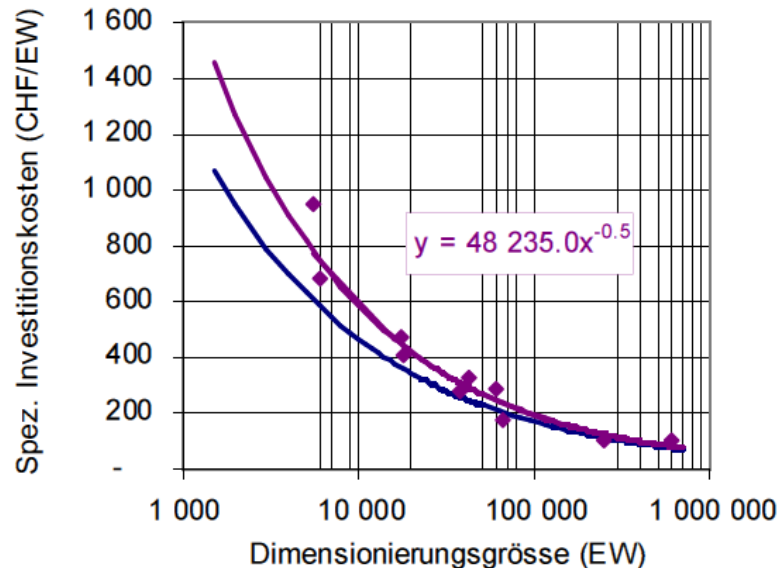


Abbildung 18: Investitionskostenkurve PAK mit neuer Filtration. Violett: aktualisierte Kostenkurve und verwendete Kostendaten. Blau: Kostenkurve Hunziker 2008 (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

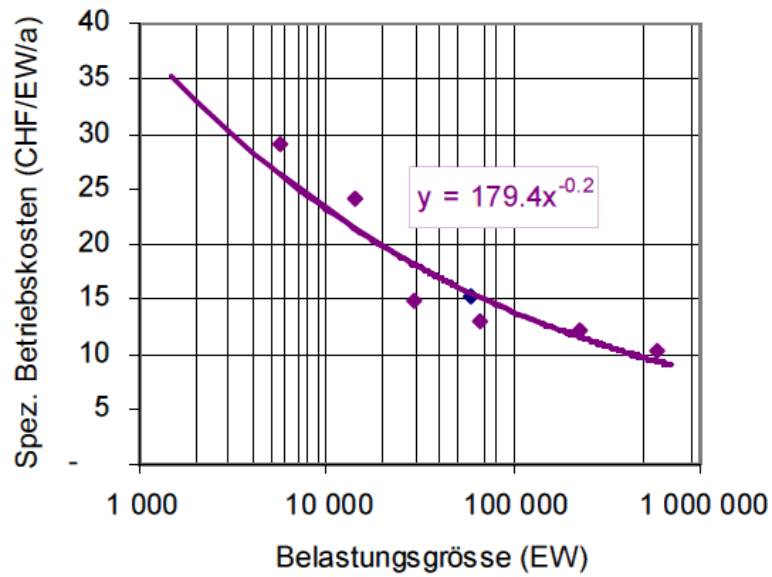


Abbildung 19: : Betriebskosten PAK mit neuer Filtration. Violett: aktualisierte Kostenkurve und verwendete Kostendaten. Blau: Nicht verwendeter Kostenpunkt. (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

6.1.3 Investitions- und Betriebskosten Ozonung

Für die Ozonung wurden im erwähnten Bericht des BAFU keine Kostenkurven mit einer neuen Filtration veröffentlicht. Um diese Kosten jedoch trotzdem berechnen zu können, wurden die Kostenformeln für die Ozonung mit bestehendem Filter (Abbildung 20 und Abbildung 21) verwendet und die Kosten für die Filtration addiert.

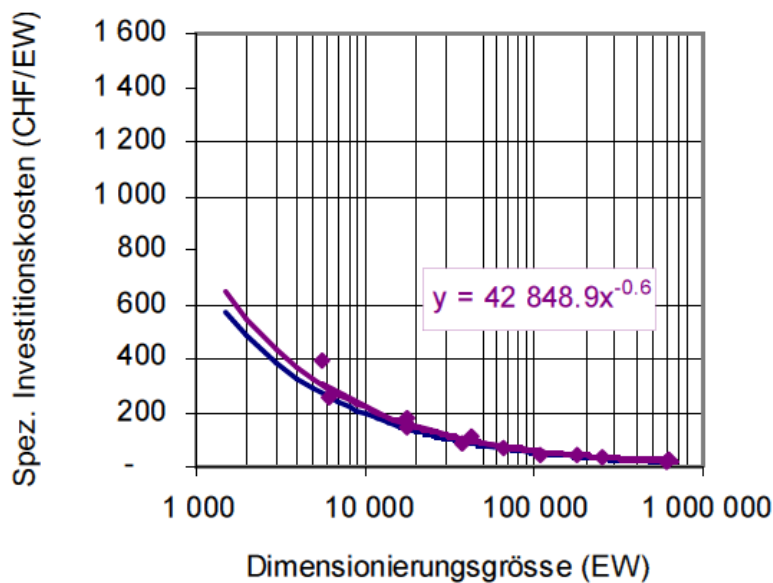


Abbildung 20: Investitionskosten Ozonung mit bestehender Filtration. Violett: aktualisierte Kostenkurve und verwendete Kostendaten. Blau: Kostenkurven Hunziker 2008 (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

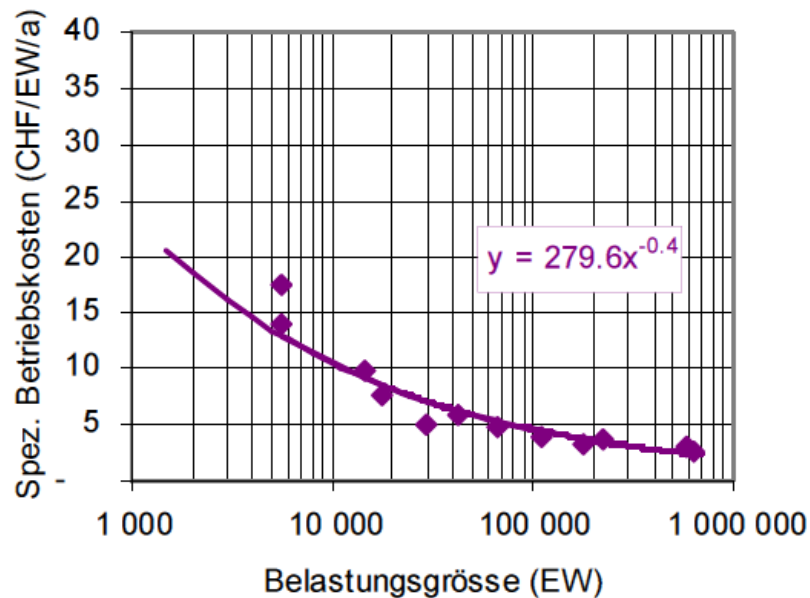


Abbildung 21: Spezifische Betriebskosten mit bestehender Filtration für die Ozonung. Violett: aktualisierte Kostenkurve und verwendete Kostendaten. (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

Die Kosten für eine neue Filtration wurden aus der Differenz der Kosten für das PAK Verfahren mit neuer Filtration und den Kosten für das PAK Verfahren mit bestehender Filtration für die jeweilige Dimensionierungsgröße für die Investitionskosten nach Formel 1 und für die Betriebskosten nach Formel 2 berechnet.

Formel 1: Investitionskosten Filtration

$$y = 48'235.0x^{-0.5} - 28'135.5x^{-0.5}$$

Formel 2: Betriebskosten Filtration

$$y = 179.4x^{-0.2} - 137.5x^{-0.2}$$

Es wird angenommen, dass in allen betrachteten Anlagen ein Neubau einer Filtration nötig ist, es werden daher immer die Preise mit einer neuen Filtration verwendet.

6.2 Kostenschätzungen für die Anlagen im Gebiet des Vierwaldstättersees

Als Basis für die Kostenschätzungen der potentiell auszubauenden ARA im Gebiet des Vierwaldstättersees wurden die oben dargestellten Kostenverteilungen verwendet. Es wurden keine regionalen Gegebenheiten, wie beispielsweise eine mögliche Nutzung einer bestehenden Filtration oder die Umnutzung von bestehenden Becken etc. berücksichtigt. Die hier be-

rechneten Kostenschätzungen sind daher nur als sehr grobe Orientierung zu verstehen. In der Tabelle 13 sind die geschätzten Investitionskosten für eine Pulveraktivkohle-Adsorptions-Stufe (PAK-Stufe) und den Bau einer Ozonung angegeben. Die spezifischen Investitionskosten pro Einwohner werden kleiner, je grösser die entsprechende Anlage ist.

Tabelle 13: Geschätzte Investitionskosten für die fünf Anlagen, welche unter die aktuellen BAFU Kriterien für den weitergehenden Ausbau fallen. Berechnungen gemäss grössenabhängiger Dimensionierung (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

Name der ARA	Dimensionierung (EGW)	Investitionskosten PAK (gem. BAFU 2012)		Investitionskosten Ozonung (gem. BAFU 2012)	
		CHF/Einw.	CHF	CHF/Einw.	CHF
ALTDORF	55'500	205	11'400'000	146	8'100'000
SCHWYZ	70'000	182	12'800'000	129	9'000'000
ALPNACH (SARNERAATAL)	29'000	283	8'200'000	208	6'000'000
STANS (ROTZWINKEL)	25'000	305	7'600'000	226	5'600'000
EMMEN (BUHOLZ) / REAL	375'000	79	29'500'000	52	19'600'000

Die jährlichen Betriebskosten sind ebenfalls von der Grösse der Anlagen abhängig und werden in der folgenden Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: : Geschätzte Betriebskosten (pro Jahr) für die fünf Anlagen, welche unter die aktuellen BAFU Kriterien für den weitergehenden Ausbau fallen. Berechnungen gemäss grössenabhängiger Dimensionierung (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

Name der ARA	Dimensionierung (EGW)	Jährliche Betriebskosten PAK (gem. BAFU 2012)		Jährliche Betriebskosten Ozonung (gem. BAFU 2012)	
		CHF/Jahr/Einw.	CHF/Jahr	CHF/Jahr/Einw.	CHF/Jahr
ALTDORF	55'500	20	1'120'000	8	458'000
SCHWYZ	70'000	19	1'350'000	8	540'000
ALPNACH (SARNERAATAL)	29'000	23	670'000	10	289'000
STANS (ROTZWINKEL)	25'000	24	590'000	10	260'000
EMMEN (BUHOLZ) / REAL	375'000	14	5'160'000	5	1'820'000

Im Folgenden werden die Jahreskosten für die fünf Anlagen berechnet. Für die Berechnung der Kapitalkosten für die weitergehenden Reinigungsstufen (sowohl PAK wie auch Ozonung) wird eine Lebensdauer von 30 Jahren angenommen, über die linear abgeschrieben wird.

Tabelle 15: Geschätzte Jahreskosten (Betriebs- und Kapitalkosten) für die fünf Anlagen, welche unter die aktuellen BAFU Kriterien für den weitergehenden Ausbau fallen. Berechnungen gemäss grössenabhängiger Dimensionierung (BG Ingenieure und Berater AG, 2012).

Name der ARA	Jahreskosten PAK (Betriebs- und Kapitalkosten)		Jahreskosten Ozonung (Betriebs- und Kapitalkosten)	
	CHF/Jahr/Einw.	CHF/Jahr	CHF/Jahr/Einw.	CHF/Jahr
ALTDORF	27	1'500'000	13	729'000
SCHWYZ	25	1'770'000	12	842'000
ALPNACH (SARNERAATAL)	32	940'000	17	490'000
STANS (ROTZWINKEL)	34	846'000	18	448'000
EMMEN (BUHOLZ) / REAL	17	6'150'000	6.6	2'480'000

Die Grössenordnung der spezifischen Jahreskosten bewegt sich gemäss diesen groben Abschätzungen zwischen CHF 6.60 und 34.00 pro Einwohner und Jahr. Sehr entscheidend für die Jahreskosten ist über wie viele Jahre die Investitionskosten abgeschrieben werden. Schreibt man linear über 30 Jahre ab, fällt der grösste Teil der Jahreskosten auf die Betriebskosten. Bei einer rascheren Abschreibung von einem Teil der Investitionen, z.B. der technischen Installationen, machen die Investition- resp. Kapitalkosten einen grösseren Anteil aus.

Für die ARA Emmen / REAL liegt auch eine detailliertere Kostenstudie aus dem Jahr 2008 vor (Hunziker AG, im Auftrag des Bundeamts für Umwelt, 2008). Dort werden, je nach PAK-Dosierung die Jahreskosten für eine PAK-Adsorptionsstufe inkl. Filter auf CHF 4'800'000 (niedrige Dosierung) bis CHF 6'000'000 (hohe Dosierung) geschätzt und für eine Ozonung inkl. Filter auf CHF 2'900'000 (niedrige Dosierung) bis CHF 3'600'000 (hohe Dosierung) geschätzt. Die hier auf die Studie von BG basierten abgeschätzten Zahlen für eine PAK Stufe sind daher eher als hoch zu betrachten und die Kosten für die Ozonung eher niedrig geschätzt, bewegen sich aber im gleichen Rahmen.

Gemäss der Vorlage zur Änderung des Gewässerschutzgesetzes GSchG ist geplant, dass 75% der Investitionskosten für die nach den aktuellen Kriterien rund 100 in der Schweiz betroffenen Anlagen durch den Bund abgegolten werden (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2012). Wenn angenommen wird, dass die kompletten Investitionskosten (inkl. Bau der Filtration) zu 75% abgegolten werden, kommt man auf spezifische Jahreskosten zwischen CHF 5.30 und 26.00 pro Einwohner und Jahr.

Die Wahl der zu bevorzugenden Technologie, hängt neben den Kosten und der vorhandenen Infrastruktur auch von der Zusammensetzung des Abwassers ab. Dies gilt insbesondere für die Eignung einer Ozonung. Die Ozonung wurde in Pilotprojekten in Regensdorf und Lausanne ausgiebig getestet, und es wurde festgestellt, dass die Technologie für kommunales Abwasser geeignet scheint (Abegglen, et al., 2012; Abegglen, et al., 2010; Gälli, et al., 2009). Bei grösserem Industrieabwasseranteil, in welchem teilweise hohe Bromidkonzentrationen oder andere unbekannte Stoffe auftreten können, sollte im Voraus abgeklärt werden, ob die Ozonung nicht toxische Abbauprodukte bildet, welche die Gesamtoxizität des Ab-

wasser sogar noch erhöhen könnte. Dies könnte beispielsweise mit Hilfe von Ökotoxtest in Verbindung mit Laboruntersuchungen (Ozonung im Labormassstab) oder Pilotanlagen vor Ort getestet werden.

6.3 Kosten der Ableitungen

Die Kosten der Ableitungen hängen von der konkreten Streckenführung, insbesondere von den Durchmessern der benötigten Leitungen und von notwendigen Pumpen zur Überbrückung von Steigungen, sowie von bereits vorhandenen Kanalisationssystemen, an welche angeschlossen werden könnte, ab.

In Bezug auf die Problematik der Mikroverunreinigungen, wäre aufgrund von erhöhten Konzentrationen in den Vorflutern eine Ableitung der folgenden kleineren Anlagen sinnvoll (Szenario 2): Sattel, Udligenswil, Ballwil, Schwarzenberg, Ruswil. Diese Anlagen weisen in den Vorflutern problematische Konzentrationen von Mikroverunreinigungen auf, eignen sich aber aufgrund der Grösse nicht für einen Ausbau mit einer weitergehenden Stufe.

Die Kosten von Ableitung von Anlagen, welche aufgrund der vom BAFU aufgeführten Kriterien ausgebaut werden müssten, werden ebenfalls vom Bund zu 75% abgegolten, maximal bis zu 75% vom Betrag, welcher eine weitergehende Reinigungsstufe kosten würde (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2012). In der Mitteilung zur Änderung der Gewässerschutzverordnung hält der Bund fest, dass die Kantone die betroffenen Anlagen im Rahmen einer Einzugsgebietsplanung festlegen sollen, was einen gewissen Spielraum für sinnvolle Zusammenschlüsse von Kläranlagen mit einschliessen könnte. Für die kleineren Anlagen, welche aufgrund der Grösse klar nicht unter die BAFU Kriterien fallen, können nach der aktuellen Vorlage der GSchG-Änderung keine Abgeltungen erwartet werden.

Neben der Problematik der Mikroverunreinigungen gibt es weitere Argumente kleiner Kläranlagen zu grösseren Anlagen abzuleiten / zusammenzufassen. Neben den ebenfalls tieferen spezifischen Kosten von grösseren Anlagen in der klassischen Abwasserreinigung (Maurer, et al., 2006), ist auch ein effizienterer und professionellerer Betrieb möglich. Der Erneuerungsbedarf der einzelnen Anlagen ist ebenfalls sowohl für die Kosten als auch für die Planung von sinnvollen Zusammenschlüssen entscheidend.

Im Rahmen dieser Arbeit für die Aufsichtskommission Vierwaldstättersee AK-VWS konnten die Kosten für die möglichen Ableitungen nicht berechnet werden. Dies sollte nach einer konkreteren Festlegung der Leitungsführungen etc. geschehen und müsste von den kantonalen Behörden resp. den Abwasserverbänden in Auftrag gegeben werden. Bei gewissen ARA liegen auch schon konkrete Projekte und Planungen vor.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Wasserqualität im Vierwaldstättersee ist generell als sehr gut zu beurteilen. Am stärksten belastet mit Mikroverunreinigungen ist der Alpachersee, welcher geschätzt rund 5% gereinigtes Abwasser enthält, was beispielsweise mehr ist als im Zürichsee und deutlich mehr, nämlich rund zehnmal, als in den restlichen Seebecken des Vierwaldstättersees. Der Alpachersee würde insbesondere stark von einem Ausbau der Kläranlagen Alpnach/Sarneraatal und Stans/Rotzwinkel profitieren. Beide Kläranlagen wären nach den aktuellen Kriterien des Vorschlags zur Änderung der Gewässerschutzverordnung GSchV des BAFU auszubauen. Zusätzlich müssten die ARA Altdorf, Schwyz und Emmen/REAL ausgebaut werden. Für die Reduktion der Stofffracht (Ziel des BAFU: 40% Reduktion Schweizweit) und den Schutz des Sees wäre der Ausbau dieser fünf Anlagen nach dem heutigen Wissen ausreichend. Für den Schutz der Ökosysteme im Einzugsgebiet ist der Effekt dieser Ausbaustrategie jedoch relativ gering. Um die Wasserqualität der stark belasteten Vorfluter zu verbessern wäre es sinnvoll zusätzlich zum Ausbau der fünf oben vorgeschlagenen Kläranlagen die ARA Sattel, Udligenswil, Ballwil und Ruswil aufzuheben und auf grössere Anlagen abzuleiten. Mit diesem Massnahmenpaket (entspricht dem Szenario 2), würden sowohl die Fliessgewässer im Einzugsgebiet betreffend ökotoxikologischer Gewässerqualität ausreichend geschützt, als auch die Stofffrachten in den Vierwaldstättersee effizient reduziert. Für Anlagen, welche unter die BAFU Kriterien für einen weitergehenden Ausbau fallen, wurde im Vorschlag zur Änderung des Gewässerschutzgesetzes GSchG genannt, dass Ableitungen von Kläranlagen bis maximal zum Preis einer eigenen weitergehenden Stufe, ebenfalls zu 75% abgegolten werden. Da die vier Anlagen Sattel, Udligenswil, Ballwil und Ruswil nicht die Grösse von 8'000 angeschlossenen Einwohnern aufweisen, können für die Ableitung dieser Anlagen wahrscheinlich keine Abgeltung erwartet werden. Effizienz- und Kostenstudien zeigen aber, dass Zusammenschlüsse auch für die konventionellen Reinigungsverfahren lohnend sein können und liefern gewichtige Argumente dafür kleine ARA zu grösseren Anlagen zusammenzufassen: Die im Allgemeinen bessere Reinigungsleistung auf grösseren Anlagen, die Entlastung von kleinen Vorflutern von Schmutz- und Nährstoffen, eine bessere Energieeffizienz und der effizientere und der kostengünstigere Betrieb (Maurer, et al., 2006). Für Kostenschätzungen im Einzelfall und eine konkrete Umsetzung müssen der Erneuerungsbedarf und die bestehenden Reserven der entsprechenden ARA miteinbezogen werden.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Abegglen, Christian und Siegrist, Hansruedi. 2012. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012. Umwelt-Wissen Nr. 1214: 210S.
- . 2012. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Publikation Umwelt-Wissen Nr. 1214*. Bern : Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2012.
- Abegglen, Christian, et al. 2010. Mikroverunreinigungen in Kläranlagen - Technische Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. *GWA*. 7 2010.
- Aeschbach-Hertig, Werner. 1994. *Helium und Tritium als Tracer für physikalische Prozesse in Seen*. s.l. : ETH Zürich, 1994. Diss. ETH Nr. 10714.
- BG Ingenieure und Berater AG. 2012. *Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser*. Bern : Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 2012.
- Boreen, A. L., Arnold, W. A. und McNeill, K. 2004. Photochemical fate of sulfa drugs in the aquatic environment. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*. 228, 2004, Bde. 287-ENVR.
- Bürge, Ignaz. 2009. Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfam in the aquatic environment: An ideal chemical marker of domestic wastewater in the groundwater. *Environmental Science and Technology*. 43, 2009, Bde. 4381-4385.
- DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW). 2008. *Bestimmung organischer und anorganischer Spurenstoffe im Bodensee*. s.l. : Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 2008.
- DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe. 2002. *Pharmaka und Hormone in Grund-, Oberflächengewässern und Böden in Baden-Württemberg*. s.l. : Abschlussbericht Projekt-Nr. U33-00.01 - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2002.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. 2012. *Mikroverunreinigungen: Spezialfinanzierung für ARA-Ausbau in der Vernehmlassung*. s.l. : Medienmitteilung 25.04.2012, 2012.
- Escher, Beate, et al. 2008. Toxic equivalent concentrations (TEQs) for baseline toxicity and specific modes of action as a tool to improve interpretation of ecotoxicity testing of environmental samples. *J. Environ. Monit.* 2008, 612-621.
- Gälli, René, Ort, Christoph und Schärer, Michael. 2009. *Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Publikation Umwelt-Wissen*. Bern : Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2009.
- Götz, Christian, et al. 2010. *Mikroverunreinigungen - Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen*. s.l. : Gas, Wasser, Abwasser. *GWA* 4/2010, 2010.
- Götz, Christian, et al. 2010. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Kombination von Expositions- und ökotoxikologischen Effektdaten*. s.l. : Gas, Wasser, Abwasser. *GWA* 7/2010, 2010.

- Götz, Christian, Kase, Robert und Hollender, Juliane. 2011. *Mikroverunreinigungen - Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser*. Studie im Auftrag des BAFU. . Dübendorf : Eawag, 2011.
- Hirsch, R., et al. 1999. Occurrence of antibiotics in the aquatic environment. *Science of the Total Environment*. 1999, 225: 109-118.
- Hunziker AG, im Auftrag des Bundesamts für Umwelt. 2008. *Massnahmen in Ara zur weitergehenden Elimination von Mikroverunreinigungen - Kostenstudie*. s.l. : www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/03716/0370/04348/index.html?lang=de (15.5.2010), 2008.
- Lange, Frank, Scheurer, Marco und Brauch, Heinz J. 2012. Artificial sweeteners—a recently recognized class of emerging environmental contaminants: a review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 403, 2012, Bde. 2503–2518.
- Longrée, Philipp, et al. 2011. Organische Mikroverunreinigungen im Bodensee. *GWA*. 2011, 7/2011.
- Maurer, M und Herlyn, A. 2006. *Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Studie im Auftrag des BAFU. Dübendorf, Eawag*. s.l. : Eawag Bericht, 2006.
- Moschet, Christoph. 2010. *Georeferenced Mass Flux Modelling of Selected Micropollutants in the Catchment of Lake Constance*. Dübendorf : Master-Thesis, Eawag, 2010.
- Ort, Christoph, et al. 2007. Mikroverunreinigungen: Nationales Stoffflussmodell. *GWA*. 2007, Bd. 11/2007.
- Ort, Christoph, Hollender, Juliane und Siegrist, Hansruedi. 2009. Model-Based Evaluation of Reduction Strategies for Micropollutants from Wastewater Treatment Plants in Complex River Networks. *Environmental Science and Technology*. 43(9), 2009, Bde. 3214-3220.
- Schärer, Michael, Sieber, Ueli und Müller, Stephan. 2010. *Weitere Massnahmen gegen Mikroverunreinigungen*. s.l. : Gas, Wasser, Abwasser. *GWA* 7/2010, 2010.
- Singer, Heinz, et al. 2009. *Screening-Messungen von organischen Mikroverunreinigungen im Bodensee - Substanzinventarisierung für das Freiwasser. In Zusammenarbeit mit der IGKB und dem AfU Graubünden*. Dübendorf : Eawag, 2009.
- Tixier, Céline, et al. 2003. Occurrence and fate of carbamazepine, clofibric acid, diclofenac, ibuprofen, ketoprofen, and naproxen in surface waters. *Environmental Science and Technology*. 6, 2003, Bde. 1061-1068.
- Umweltministerium Baden-Württemberg. 2008. *Perfluorierte Tenside in Baden-Württemberg - Zwischenbericht*. s.l. : Umweltministerium Baden-Württemberg, 2008.

ENVILAB AG Bearbeitung:

Dr. Christian Götz, christian.goetz@envilab.ch, Telefon: 062 823 29 51

Anhang 1

Analysenbericht Nr. Z3285 – L01/12

ANALYSENBERICHT NR. Z3285 - L01 / 12

Oberflächenwasser-Untersuchung (Alpnachersee)

Auftraggeber, Ort: Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, Lorenz Jaun

Probeentnahme durch: Auftraggeber

Projekt-Nr.: -

Objekt: Alpnachersee, Epi- und Hypolimnion

Eingang der Probe(n): 24.10.2012

Probennummer: **Probenbezeichnung Kunde:**

3264 Alpnachersee - Epilimnion

3265 Alpnachersee - Hypolimnion

Probenahme vom:

23.10.2012

23.10.2012

Analysenresultate siehe nächste Seite(n)

Parameter	Probennummer			Best.- grenze	Einheit	Methode/ Verfahren
	3264	3265				

Abwassertracer						
Coffein	43	45		25	ng/L	extern

Arzneimittel						
Carbamazepin	(4)	17		10	ng/L	extern
Diclofenac	12	39		10	ng/L	extern
Sulfamethoxazol	(5)	15		10	ng/L	extern

Kontrastmittel						
Amidotrizoesäure	<10	(9)		10	ng/L	extern
Iopamidol	<10	<10		10	ng/L	extern
Iopromid	130	330		10	ng/L	extern

Korrosionsschutzmittel						
Benzotriazol	80	190		10	ng/L	extern

Künstliche Süsstoffe						
Acesulfam	190	550		10	ng/L	extern
Sucralose	<50	60		50	ng/L	extern

Die kursiv, in Klammern angegebenen Werte sind halbquantitative Schätzungen unterhalb der Bestimmungsgrenzen und nur als Orientierungswerte zu verwenden.

geprüft Laborleitung: Dr. Ivan Beranek

Zofingen, 19. November 2012

SachbearbeiterIn: Dr. Christian Götz

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die Prüfgegenstände. Ohne schriftliche Genehmigung der ENVILAB AG darf der Bericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Detailinformationen zum Messverfahren sowie zu Messunsicherheiten und Prüfdaten sind auf Anfrage erhältlich.

Anhang 2

Modellierungsdaten

Tabelle A - 1: Modellierte Stoffflüsse in kg/Jahr für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Annahme: IST-Zustand plus 5% Bevölkerungswachstum).

ARANAME	VORFLUTER	Stofffluss kumuliert Carbamazepin (kg/a)	Stofffluss kumuliert Diclofenac (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sulfamethoxazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Amidotrizoos. (kg/a)	Stofffluss kumuliert Iopromid (kg/a)	Stofffluss kumuliert Benzotriazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Acesulfam (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sucralose (kg/a)
ALTDORF	Vierwaldstättersee	2.2	2.6	2.1	2.2	14	51	114	13
ANDERMATT	Reuss	0.11	0.13	0.11	0.11	0.74	2.6	5.9	0.68
BAUEN	Vierwaldstättersee	2.3	2.6	2.2	2.3	15	52	117	14
ERSTFELD	Reuss	0.62	0.72	0.59	0.62	4.0	14	32	3.7
GOESCHENEN	Reuss	0.14	0.17	0.14	0.14	0.94	3.3	7.5	0.87
ISENTHAL	Isitalerbach	0.03	0.04	0.03	0.03	0.2	0.8	1.8	0.21
REALP	Furkareuss	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.2	0.5	0.06
SEELISBERG	Vierwaldstättersee	4.6	5.4	4.4	4.6	30	106	238	28
SISIKON	Vierwaldstättersee	2.3	2.7	2.2	2.3	15	52	118	14
WASSEN	Reuss	0.17	0.20	0.16	0.17	1.1	3.9	8.9	1.0
GERSAU	Vierwaldstättersee	4.7	5.6	4.6	4.7	31	109	245	29
MUOTATHAL	Muota	0.22	0.26	0.21	0.22	1.4	5.0	11	1.3
SATTEL	Steiner Aa	0.11	0.13	0.11	0.11	0.72	2.5	5.7	0.66
SCHWYZ	Muota	2.3	2.7	2.2	2.3	15	53	118	14
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)	2.2	2.5	2.1	2.2	14	50	112	13
ENGELBERG	Engelberger Aa	0.26	0.31	0.25	0.26	1.7	6.1	14	1.6
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0.03	0.04	0.03	0.03	0.2	0.8	1.8	0.2
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	1.2	1.5	1.2	1.2	8.2	29	65	7.5
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee	3.9	4.6	3.8	3.9	26	90	204	24
STANS(ROZWINKEL)	A2-Kanal	1.5	1.7	1.4	1.5	10	34	76	8.9
UDLIGENSWIL	Würzebach	0.14	0.16	0.13	0.14	0.90	3.2	7.1	0.83
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee	6.3	7.4	6.1	6.3	41	146	328	38
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	1.1	1.2	1.0	1.1	6.9	24	54	6.4
SOERENBERG	Kleine Emme	0.12	0.14	0.12	0.12	0.80	2.8	6.4	0.74
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	1.5	1.8	1.4	1.5	10	34	77	9.0
BALLWIL	Gerligebach	0.16	0.18	0.15	0.16	1.0	3.6	8.1	0.95
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	24	28	23	24	154	541	1217	142
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	24	28	23	24	157	552	1241	145
ROOT(RONTAL)	Reuss	26	30	25	26	168	591	1331	155
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0.11	0.13	0.10	0.11	0.70	2.5	5.6	0.65
RUSWIL	Bilbach	0.37	0.44	0.36	0.37	2.4	8.5	19	2.2

Tabelle A - 2: Modellierte Konzentrationen in ng/L für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Annahme: IST-Zustand plus 5% Bevölkerungswachstum).

ARANAME	VORFLUTER	Konzentration kumuliert Carbamazepin (ng/L)	Konzentration kumuliert Diclofenac (ng/L)	Konzentration kumuliert Sulfamethoxazol (ng/L)	Konzentration kumuliert Amidotrizoessäure (ng/L)	Konzentration kumuliert Iopromid (ng/L)	Konzentration kumuliert Benzotriazol (ng/L)	Konzentration kumuliert Acesulfam (ng/L)	Konzentration kumuliert Sucralose (ng/L)
ALTDORF	Vierwaldstättersee								
ANDERMATT	Reuss	1.8	2.1	1.7	1.8	12	41	93	11
BAUEN	Vierwaldstättersee								
ERSTFELD	Reuss	3.5	4.2	3.4	3.5	23	81	183	21
GOESCHENEN	Reuss	2.0	2.4	1.9	2.0	13	46	104	12
ISENTHAL	Isitalerbach	1.7	2.0	1.6	1.7	11	38	86	10
REALP	Furkareuss	0.8	0.9	0.7	0.8	4.9	17	39	4.6
SEELISBERG	Vierwaldstättersee								
SISIKON	Vierwaldstättersee								
WASSEN	Reuss	1.6	1.8	1.5	1.6	10	36	81	9.4
GERSAU	Vierwaldstättersee								
MUOTATHAL	Muota	5.0	5.9	4.8	5.0	33	116	261	30
SATTEL	Steiner Aa	155	181	149	155	1011	3555	8002	933
SCHWYZ	Muota	89	104	85	89	580	2040	4592	536
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)								
ENGELBERG	Engelberger Aa	9.9	12	9.5	9.9	64	226	510	59
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	1.6	1.9	1.6	1.6	11	37	84	9.8
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	16	19	15	16	104	366	823	96
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee								
STANS(ROZWINKEL)	A2-Kanal	311	365	299	311	2034	7153	16099	1878
UDLIGENSWIL	Würzebach	470	551	452	470	3071	10799	24308	2835
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee								
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	22	26	21	22	144	507	1142	133
SOERENBERG	Kleine Emme	37	43	35	37	240	842	1896	221
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	23	27	22	23	150	527	1186	138
BALLWIL	Gerligebach	125	146	120	125	816	2869	6457	753
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	22	25	21	22	141	496	1116	130
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	22	26	21	22	142	500	1126	131
ROOT(RONTAL)	Reuss	23	27	22	23	151	530	1194	139
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	14	17	14	14	93	326	734	86
RUSWIL	Bilbach	162	190	156	162	1059	3723	8380	977

Tabelle A - 3: Modellierte Risikoquotienten (RQ) für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Annahme: IST-Zustand plus 5% Bevölkerungswachstum).

ARANAME	VORFLUTER	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol
ALTDORF	Vierwaldstättersee								
ANDERMATT	Reuss	0.004	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BAUEN	Vierwaldstättersee								
ERSTFELD	Reuss	0.007	0.08	0.006	0.003	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GOESCHENEN	Reuss	0.004	0.05	0.003	0.002	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
ISENTHAL	Isitalerbach	0.003	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
REALP	Furkareuss	0.002	0.02	0.001	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SEELISBERG	Vierwaldstättersee								
SISIKON	Vierwaldstättersee								
WASSEN	Reuss	0.003	0.04	0.002	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GERSAU	Vierwaldstättersee								
MUOTATHAL	Muota	0.010	0.12	0.008	0.004	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SATTEL	Steiner Aa	0.31	3.63	0.25	0.12	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1
SCHWYZ	Muota	0.18	2.08	0.14	0.07	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	RQ<0.1
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)								
ENGELBERG	Engelberger Aa	0.02	0.23	0.02	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0.003	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	0.03	0.37	0.03	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee								
STANS(ROTWINKEL)	A2-Kanal	0.62	7.30	0.50	0.24	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1
UDLIGENSWIL	Würzebach	0.94	11.03	0.75	0.36	0.1<RQ<1	RQ>10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee								
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	0.04	0.52	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SOERENBERG	Kleine Emme	0.07	0.86	0.06	0.03	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	0.05	0.54	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
BALLWIL	Gerligebach	0.25	2.93	0.20	0.10	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	RQ<0.1
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	0.04	0.51	0.03	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	0.04	0.51	0.03	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
ROOT(RONTAL)	Reuss	0.05	0.54	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0.03	0.33	0.02	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
RUSWIL	Bilbach	0.32	3.80	0.26	0.12	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1

Tabelle A - 4: Modellierte Stoffflüsse in kg/Jahr für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Szenario 1, Ausbau der Anlagen nach BAFU Kriterien).

ARANAME	VORFLUTER	Stofffluss kumuliert Carbamazepin (kg/a)	Stofffluss kumuliert Diclofenac (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sulfamethoxazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Amidotrizoos. (kg/a)	Stofffluss kumuliert Iopromid (kg/a)	Stofffluss kumuliert Benzotriazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Acesulfam (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sucralose (kg/a)
ALTDORF	Vierwaldstättersee	0.78	0.91	0.75	0.78	5.1	18	40	4.7
ANDERMATT	Reuss	0.11	0.13	0.11	0.11	0.74	2.6	5.9	0.68
BAUEN	Vierwaldstättersee	0.82	0.96	0.79	0.82	5.4	19	42	5.0
ERSTFELD	Reuss	0.62	0.72	0.59	0.62	4.0	14	32	3.7
GOESCHENEN	Reuss	0.14	0.17	0.14	0.14	0.94	3.3	7.5	0.87
ISENTHAL	Isitalerbach	0.03	0.04	0.03	0.03	0.22	0.79	1.8	0.21
REALP	Furkareuss	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.24	0.53	0.06
SEELISBERG	Vierwaldstättersee	1.4	1.7	1.4	1.4	9	32	73	8.5
SISIKON	Vierwaldstättersee	0.85	1.0	0.81	0.85	5.5	19	44	5.1
WASSEN	Reuss	0.17	0.20	0.16	0.17	1.1	3.9	8.9	1.0
GERSAU	Vierwaldstättersee	1.5	1.8	1.5	1.5	10	35	80	9.3
MUOTATHAL	Muota	0.22	0.26	0.21	0.22	1.4	5.0	11	1.3
SATTEL	Steiner Aa	0.11	0.13	0.11	0.11	0.7	2.5	5.7	0.66
SCHWYZ	Muota	0.52	0.62	0.50	0.52	3.4	12	27	3.2
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)	0.25	0.29	0.24	0.25	1.6	5.7	13	1.5
ENGELBERG	Engelberger Aa	0.26	0.31	0.25	0.26	1.7	6.1	14	1.6
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0.03	0.04	0.03	0.03	0.2	0.8	1.8	0.21
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	1.2	1.5	1.2	1.2	8.2	29	65	7.5
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee	0.70	0.82	0.67	0.70	4.6	16	36	4.2
STANS(ROZWINKEL)	A2-Kanal	0.15	0.17	0.14	0.15	1.0	3.4	7.6	0.89
UDLIGENSWIL	Würzebach	0.14	0.16	0.13	0.14	0.9	3.2	7.1	0.83
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee	3.1	3.7	3.0	3.1	21	72	163	19
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	1.1	1.2	1.0	1.1	6.9	24	54	6.4
SOERENBERG	Kleine Emme	0.12	0.14	0.12	0.12	0.80	2.8	6.4	0.74
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	1.5	1.8	1.4	1.5	10	34	77	9.0
BALLWIL	Gerligebach	0.16	0.18	0.15	0.16	1.0	3.6	8.1	0.9
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	7.1	8.3	6.8	7.1	46	162	365	43
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	7.5	8.8	7.2	7.5	49.3	173	390	45
ROOT(RONTAL)	Reuss	9.3	11	8.9	9.3	61	213	479	56
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0.11	0.13	0.10	0.11	0.70	2.5	5.6	0.65
RUSWIL	Bilbach	0.37	0.44	0.36	0.37	2.4	8.5	19	2.2

Tabelle A - 5: Modellierte Risikoquotienten (RQ) für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Szenario 1, Ausbau der Anlagen nach BAFU Kriterien).

ARANAME	VORFLUTER	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol
ALTDORF	Vierwaldstättersee								
ANDERMATT	Reuss	0.004	0.042	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BAUEN	Vierwaldstättersee								
ERSTFELD	Reuss	0.007	0.083	0.006	0.003	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GOESCHENEN	Reuss	0.004	0.047	0.003	0.002	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
ISENTHAL	Isitalerbach	0.003	0.039	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
REALP	Furkareuss	0.002	0.018	0.001	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SEELISBERG	Vierwaldstättersee								
SISIKON	Vierwaldstättersee								
WASSEN	Reuss	0.003	0.037	0.002	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GERSAU	Vierwaldstättersee								
MUOTATHAL	Muota	0.01	0.12	0.008	0.004	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SATTEL	Steiner Aa	0.31	3.63	0.25	0.12	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1
SCHWYZ	Muota	0.04	0.48	0.03	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)								
ENGELBERG	Engelberger Aa	0.02	0.23	0.02	0.008	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0.003	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	0.03	0.37	0.03	0.012	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee								
STANS(ROTWINKEL)	A2-Kanal	0.06	0.73	0.05	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
UDLIGENSWIL	Würzebach	0.94	11.03	0.75	0.36	0.1<RQ<1	RQ>10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee								
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	0.04	0.52	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SOERENBERG	Kleine Emme	0.07	0.86	0.06	0.03	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	0.05	0.54	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
BALLWIL	Gerligebach	0.25	2.93	0.20	0.10	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	RQ<0.1
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	0.01	0.15	0.01	0.00	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	0.01	0.16	0.01	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
ROOT(RONTAL)	Reuss	0.02	0.20	0.01	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0.03	0.33	0.02	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
RUSWIL	Bilbach	0.32	3.80	0.26	0.12	0.1<RQ<1	2<RQ<10	0.1<RQ<1	0.1<RQ<1

Tabelle A - 6: Modellierte Stoffflüsse in kg/Jahr für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Szenario 2).

ARANAME	VORFLUTER	Stofffluss kumuliert Carbamazepin (kg/a)	Stofffluss kumuliert Diclofenac (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sulfamethoxazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Amidotrizoos. (kg/a)	Stofffluss kumuliert Iopromid (kg/a)	Stofffluss kumuliert Benzotriazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Acesulfam (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sucralose (kg/a)
ALTDORF	Vierwaldstättersee	0.78	0.91	0.75	0.78	5.1	18	40	4.7
ANDERMATT	Reuss	0.11	0.13	0.11	0.11	0.74	2.6	5.9	0.68
BAUEN	Vierwaldstättersee	0.82	0.96	0.79	0.82	5.4	19	42	5.0
ERSTFELD	Reuss	0.62	0.72	0.59	0.62	4.0	14	32	3.7
GOESCHENEN	Reuss	0.14	0.17	0.14	0.14	0.94	3.3	7.5	0.87
ISENTHAL	Isitalerbach	0.03	0.04	0.03	0.03	0.2	0.8	1.8	0.21
REALP	Furkareuss	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.2	0.5	0.06
SEELISBERG	Vierwaldstättersee	1.3	1.5	1.3	1.3	8.6	30	68	7.9
SISIKON	Vierwaldstättersee	0.85	1.0	0.8	0.85	5.5	19	44	5.1
WASSEN	Reuss	0.17	0.20	0.16	0.17	1.1	3.9	8.9	1.0
GERSAU	Vierwaldstättersee	1.4	1.7	1.4	1.4	9.4	33	75	8.7
MUOTATHAL	Muota	0.2	0.3	0.2	0.2	1.4	5.0	11	1.3
SATTEL	Steiner Aa	0	0	0	0	0	0	0	0
SCHWYZ	Muota	0.43	0.50	0.41	0.43	2.8	10	22	2.6
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)	0.25	0.29	0.24	0.25	1.6	5.7	13	1.5
ENGELBERG	Engelberger Aa	0.26	0.31	0.25	0.26	1.7	6.1	14	1.6
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0.03	0.04	0.03	0.03	0.2	0.8	1.8	0.21
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	1.2	1.5	1.2	1.2	8.2	29	65	7.5
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee	0.70	0.82	0.67	0.70	4.6	16	36	4.2
STANS(ROTWINKEL)	A2-Kanal	0.15	0.17	0.14	0.15	1.0	3.4	7.6	0.89
UDLIGENSWIL	Würzebach	0	0	0	0	0	0	0	0
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee	3.0	3.6	2.9	3.0	20	70	157	18
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	1.1	1.2	1.0	1.1	6.9	24	54	6.4
SOERENBERG	Kleine Emme	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	2.8	6.4	0.74
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	1.5	1.8	1.5	1.5	10	35	79	9.2
BALLWIL	Gerligebach	0	0	0	0	0	0	0	0
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	6.5	7.6	6.3	6.5	43	150	337	39
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	7.0	8.2	6.7	7.0	45.7	161	362	42
ROOT(RONTAL)	Reuss	8.6	10	8.2	8.6	56	197	443	52
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0.11	0.13	0.10	0.11	0.70	2.5	5.6	0.65
RUSWIL	Bilbach	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle A - 7: Modellierte Risikoquotienten (RQ) für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Szenario 2).

ARANAME	VORFLUTER	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol
ALTDORF	Vierwaldstättersee								
ANDERMATT	Reuss	0.004	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BAUEN	Vierwaldstättersee								
ERSTFELD	Reuss	0.007	0.08	0.006	0.003	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GOESCHENEN	Reuss	0.004	0.05	0.003	0.002	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
ISENTHAL	Isitalerbach	0.003	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
REALP	Furkareuss	0.002	0.02	0.001	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SEELISBERG	Vierwaldstättersee								
SISIKON	Vierwaldstättersee								
WASSEN	Reuss	0.003	0.04	0.002	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GERSAU	Vierwaldstättersee								
MUOTATHAL	Muota	0.010	0.12	0.008	0.004	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SATTEL	Steiner Aa					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SCHWYZ	Muota	0.03	0.39	0.03	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)								
ENGELBERG	Engelberger Aa	0.02	0.23	0.02	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0.003	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	0.03	0.37	0.03	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee								
STANS(ROZWINKEL)	A2-Kanal	0.06	0.73	0.05	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
UDLIGENSWIL	Würzebach					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee								
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	0.04	0.52	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SOERENBERG	Kleine Emme	0.07	0.86	0.06	0.03	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	0.05	0.55	0.04	0.02	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
BALLWIL	Gerligebach					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	0.01	0.14	0.01	0.00	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	0.01	0.15	0.01	0.00	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
ROOT(RONTAL)	Reuss	0.02	0.18	0.01	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0.03	0.33	0.02	0.01	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
RUSWIL	Bilbach					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1

Tabelle A - 8: Modellierte Stoffflüsse in kg/Jahr für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Szenario 3).

ARANAME	VORFLUTER	Stofffluss kumuliert Carbamazepin (kg/a)	Stofffluss kumuliert Diclofenac (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sulfamethoxazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Amidotrizoos. (kg/a)	Stofffluss kumuliert Iopromid (kg/a)	Stofffluss kumuliert Benzotriazol (kg/a)	Stofffluss kumuliert Acesulfam (kg/a)	Stofffluss kumuliert Sucralose (kg/a)
ALTDORF	Vierwaldstättersee	0.78	0.91	0.75	0.78	5.1	18	40	4.7
ANDERMATT	Reuss	0.11	0.13	0.11	0.11	0.74	2.6	5.9	0.68
BAUEN	Vierwaldstättersee	0.82	0.96	0.79	0.82	5.4	19	42	5.0
ERSTFELD	Reuss	0.62	0.72	0.59	0.62	4.0	14	32	3.7
GOESCHENEN	Reuss	0.14	0.17	0.14	0.14	0.9	3.3	7.5	0.9
ISENTHAL	Isitalerbach	0.03	0.04	0.03	0.03	0.2	0.8	1.8	0.2
REALP	Furkareuss	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.2	0.5	0.1
SEELISBERG	Vierwaldstättersee	0.73	0.85	0.70	0.73	4.8	17	38	4.4
SISIKON	Vierwaldstättersee	0.44	0.52	0.43	0.44	2.9	10	23	2.7
WASSEN	Reuss	0.17	0.20	0.16	0.17	1.1	3.9	8.9	1.0
GERSAU	Vierwaldstättersee	0.73	0.85	0.70	0.73	4.8	17	38	4
MUOTATHAL	Muota	0	0	0	0	0	0	0	0
SATTEL	Steiner Aa	0	0	0	0	0	0	0	0
SCHWYZ	Muota	0.24	0.28	0.23	0.24	1.6	5.6	13	1.5
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)	0.22	0.25	0.21	0.22	1.4	5.0	11	1.3
ENGELBERG	Engelberger Aa	0	0	0	0	0	0	0	0
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa	0	0	0	0	0	0	0	0
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa	0	0	0	0	0	0	0	0
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee	0.79	0.93	0.76	0.79	5.2	18	41	4.8
STANS(ROZWINKEL)	A2-Kanal	0.27	0.32	0.26	0.27	1.8	6.3	14	1.6
UDLIGENSWIL	Würzebach	0	0	0	0	0	0	0	0
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee	0.7	0.9	0.7	0.7	4.8	17	38	4.4
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme	0	0	0	0	0	0	0	0
SOERENBERG	Kleine Emme	0	0	0	0	0	0	0	0
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	0.58	0.68	0.56	0.58	3.8	13	30	3.5
BALLWIL	Gerligebach	0	0	0	0	0	0	0	0
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	3.3	3.9	3.2	3.3	22	76	170	20
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	3.3	3.9	3.2	3.3	22	76	170	20
ROOT(RONTAL)	Reuss	4.9	5.7	4.7	4.9	32	112	252	29
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig	0	0	0	0	0	0	0	0
RUSWIL	Bilbach	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle A - 9: Modellierte Risikoquotienten (RQ) für die 31 ARA im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees (Szenario 3).

ARANAME	VORFLUTER	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol	RQ Carbamazepin	RQ Diclofenac	RQ Sulfamethoxazol	RQ Benzotriazol
ALTDORF	Vierwaldstättersee								
ANDERMATT	Reuss	0.004	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BAUEN	Vierwaldstättersee								
ERSTFELD	Reuss	0.007	0.08	0.006	0.003	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GOESCHENEN	Reuss	0.004	0.05	0.003	0.002	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
ISENTHAL	Isitalerbach	0.003	0.04	0.003	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
REALP	Furkareuss	0.002	0.02	0.001	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SEELISBERG	Vierwaldstättersee								
SISIKON	Vierwaldstättersee								
WASSEN	Reuss	0.003	0.04	0.002	0.001	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
GERSAU	Vierwaldstättersee								
MUOTATHAL	Muota					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SATTEL	Steiner Aa					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SCHWYZ	Muota	0.02	0.22	0.02	0.007	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
ALPNACH(SARNERAATAL)	Alpnachersee (Tiefenw.)								
ENGELBERG	Engelberger Aa					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
KERNS(MELCHTAL)	Gr. Melchaa					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
BUOCHS(AUMUEHLE)	Engelberger Aa					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
HERGISWIL(LOPPER)	Vierwaldstättersee								
STANS(ROTWINKEL)	A2-Kanal	0.12	1.35	0.09	0.04	0.1<RQ<1	1<RQ<2	RQ<0.1	RQ<0.1
UDLIGENSWIL	Würzebach					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
WEGGIS/VITZNAU(LUETZELAU)	Vierwaldstättersee								
DOPPLESCHWAND	Kleine Emme					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
SOERENBERG	Kleine Emme					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
WERTHENSTEIN(BLINDEI)	Kleine Emme	0.02	0.21	0.014	0.007	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
BALLWIL	Gerligebach					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
EMMEN(BUHOLZ) / REAL	Reuss	0.006	0.07	0.005	0.002	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
INWIL/ Oberseetal	Reuss (seit 2012)	0.006	0.07	0.005	0.002	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
ROOT(RONTAL)	Reuss	0.009	0.10	0.007	0.003	RQ<0.1	0.1<RQ<1	RQ<0.1	RQ<0.1
SCHWARZENBERG/DORF	Rümlig					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1
RUSWIL	Bilbach					RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1	RQ<0.1