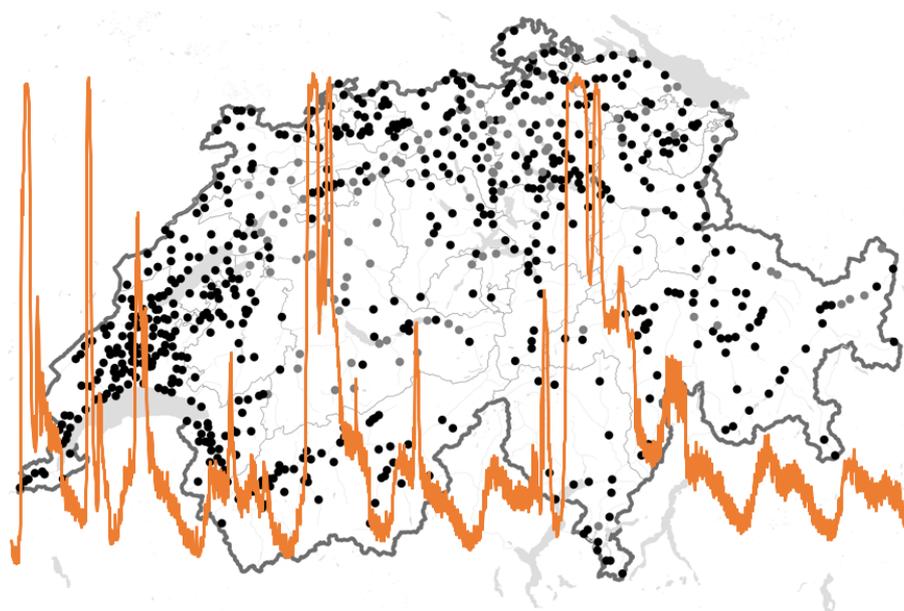


Master Umweltingenieurwissenschaften
Projektarbeit

Datenanalyse des Zulaufs von Schweizer Kläranlagen bezüglich Variabilität und Regenwasserbehandlung



Chiara BAUM
Alina STUTZ

Betreuer:
Dr. Jörg RIECKERMANN
Eawag, Dübendorf

Professor:
Prof. Dr. Eberhard MORGENROTH

Zürich
23. Dezember 2021



Declaration of originality

The signed declaration of originality is a component of every semester paper, Bachelor's thesis, Master's thesis and any other degree paper undertaken during the course of studies, including the respective electronic versions.

Lecturers may also require a declaration of originality for other written papers compiled for their courses.

I hereby confirm that I am the sole author of the written work here enclosed and that I have compiled it in my own words. Parts excepted are corrections of form and content by the supervisor.

Title of work (in block letters):

Datenanalyse des Zulaufs von Schweizer Kläranlagen bezüglich Variabilität und Regenwasserbehandlung

Authored by (in block letters):

For papers written by groups the names of all authors are required.

Name(s):

Baum

Stutz

First name(s):

Chiara

Alina

With my signature I confirm that

- I have committed none of the forms of plagiarism described in the '[Citation etiquette](#)' information sheet.
- I have documented all methods, data and processes truthfully.
- I have not manipulated any data.
- I have mentioned all persons who were significant facilitators of the work.

I am aware that the work may be screened electronically for plagiarism.

Place, date

Zürich, 23.12.2021

Signature(s)

For papers written by groups the names of all authors are required. Their signatures collectively guarantee the entire content of the written paper.

Zusammenfassung

Durch eine Erhöhung des Mischabwasserzuflusses zur ARA können Emissionen reduziert und der Betrieb des Entwässerungssystems optimiert werden (Mauchle u. a. 2018; Gresch und Sigrist 2019). Leider gibt es für die Schweiz noch keine Angaben, ob und inwieweit die Erhöhung des Mischwasserzuflusses zur ARA in der Praxis umgesetzt wird. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erhebung des aktuellen Stands der Regenabwasserbehandlung auf ARAs in der Schweiz.

Als Kennzahl für die Regenabwasserbehandlung wird der Faktor f_{S,Q_M} aus der ATV-DVWK A-198 vorgeschlagen (nach dem Ansatz von Schab 2018). Durch eine Datenanalyse des Mischwasserzuflusses wurde f_{S,Q_M} für 65 Schweizer ARAs bestimmt. Zum ersten Mal in der Schweiz wurde eine grossflächige Analyse der zeitlich hoch aufgelösten Zulaufdaten durchgeführt. Die Qualität der Zulaufdaten wurde durch Tests auf Einmaligkeit, Datenlücken, Gradienten, eingefrorene Werte und die physikalisch mögliche Wertbreite untersucht. Unplausible Werte wurden von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. In den weiteren Schritten wurde der Trockenwetterabfluss mit der Methode des gleitenden Minimums über 21 Tage und der Fremdwasserabfluss mit der Nachtminimum-Methode bestimmt. Zur Überprüfung der Annahmen, die bei der Methode des gleitenden Minimums getroffen werden, werden zusätzlich Regendaten beigezogen.

Die Datenqualität der Zulaufdaten ist für die meisten Anlagen sehr gut. Bei einigen ARAs zeigten v.a. die Überprüfung auf eingefrorene Werte und den plausiblen Wertebereich ungenügende Scores auf. Eine Validierung der angewandten Methoden ist nur durch weitere Instrumente möglich (z.B. mit RICHI).

Die Ergebnisse zeigen, dass der Faktor f_{S,Q_M} sensitiv auf die Methode der Trockenwettertagebestimmung ist: die mit den Regendaten ermittelten Trockenwettertage führen zu einem niedrigeren Spreizungsfaktor. Bei dieser Methode liegen rund ein Viertel der ARAs unter einem f_{S,Q_M} -Wert von 3 und etwa 40% unter dem nach Einwohner:innenkategorie empfohlenen Bereich (DWA 2003). Mit der Methode des gleitenden Minimums sind keine Werte unter 3 vorhanden und nur ca. 10% sind unter dem empfohlenen Bereich.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Erfassung der Gesamtsituation der Regenwasserbewirtschaftung für die Schweiz. Für detaillierte Analysen würden viele weitere Daten zu den einzelnen ARAs und deren Einzugsgebiete benötigt. Bei der Verwendung von f_{S,Q_M} -Werte einzelner ARAs ist dies zu berücksichtigen. Es zeigte sich jedoch, dass die Methode Prozesse im Einzugsgebiet gut abbilden kann. Durch die starke Sensitivität der f_{S,Q_M} -Berechnung würden sich weitere Überprüfungen lohnen. Für die Fremdwasserberechnung könnten Grundwasserdaten einbezogen werden (Eicher 2008). Detaillierte Bevölkerungsdaten, z.B. über das Mobilfunknetz, könnte die Abschätzung des täglichen Schmutzwasserabflusses verbessern (Troxler 2018).

Das f_{S,Q_M} wird mit dem maximale Zufluss pro Jahr (Q_{\max}) berechnet. Die Häufigkeit, mit der dieser erreicht wird, fliesst jedoch nicht in die Berechnung mit ein. Ihre Beurteilung sollte unter Einbezug des Speichervolumens im Einzugsgebiet (i-Wert) erfolgen. Die tatsächliche Bewirtschaftung von ARA und Einzugsgebiet könnte daher in Zukunft durch die drei Kennwerte - Faktor f_{S,Q_M} , Häufigkeit von Q_{\max} pro Jahr und dem i-Wert - charakterisiert werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Integrale Bewirtschaftung von Netz, ARA und Gewässer	1
3. Zielsetzung	2
4. Material und Methoden	4
4.1. Daten	4
4.1.1. ARA Zuflussdaten	4
4.1.2. ARA Datenbank	4
4.1.3. Regendaten	4
4.2. Datenvalidierung der der Zulaufdaten	5
4.3. Bestimmung des Faktors f_{S,Q_M}	7
4.3.1. Berechnungen mit den validierten Zulaufdaten	7
4.3.2. Einbezug von Regendaten	8
4.3.3. Grafische und quantitative Beurteilung der Resultate	8
4.4. Codestruktur	9
5. Resultate	10
5.1. Datenvalidierung	10
5.2. Bestimmung des Faktors f_{S,Q_M}	10
5.2.1. Berechnung der Abflusskomponenten nach ATV	12
5.2.2. Vergleich der Trockenwettertage nach ATV und mit Regendaten	13
6. Diskussion	15
7. Schlussfolgerungen	19
Appendices	I
A. Digitaler Appendix	I
B. Liste der Kläranlagen	I
C. Ergebnisse der Validierung	IV
D. Variabilität der Schmutz- und Fremdwasseranteile (Tageswerte)	VI
E. Regendaten	VIII
F. Faktor f_{S,Q_M} pro ARA (ATV-Methode)	X
G. Faktor f_{S,Q_M} pro ARA (Regenmethode)	XII
H. Untersuchung zu Korrelationen zum Spreizungsfaktor	XIV

I. Schreiben an ARA Betreiber

XVI

1. Einleitung

In der Schweiz sind 97% der Bevölkerung an eine Abwasserreinigungsanlage (ARA) angeschlossen. Durch den Bau von Kläranlagen konnte im letzten Jahrhundert die Belastung der Gewässer durch Einträge aus der Siedlungsentwässerung erheblich reduziert werden. Heute bestehen v.a. bei Gewässern in Siedlungsgebieten noch Defizite (Kunz u. a. 2016).

Die Hauptprobleme in urbanen Einzugsgebieten sind häufige, intensive Oberflächenabflüsse und Einträge von Nährstoffen und Mikroverunreinigungen. Ihre nachteiligen Auswirkungen zeigen sich in der reduzierten biologischen Vielfalt, erhöhten Konzentration von Schadstoffen und veränderter Gerinnemorphologie. Durch diese Defizite können die Gewässer ihre natürlichen Funktionen, wie z.B. Grundwasseranreicherung, Lebensraum und Hochwasserschutz, oft nicht ausreichend erfüllen. (Walsh u. a. 2005; Dittmer, Bachmann-Machnik und Launay 2020; Kunz u. a. 2016)

Einträge aus urbanen Gebieten bei Regenwetter werden einerseits durch das Kanalisationsnetz und Speichermöglichkeiten im Einzugsgebiet und andererseits durch die Kapazität der ARA charakterisiert. Bei mittleren und starken Regenfällen kann die Kapazität des Kanalisationsnetzes überschritten werden und ungereinigtes Abwasser wird in das Gewässer eingeleitet (Munz 1966). Auf der ARA ist die Kapazität durch die Reinigungsleistung der Anlagenkomponenten limitiert. Um auch bei Regenwetter eine ausreichende Reinigungsleistung zu erreichen, wird der Mischwasserzulauf zur ARA begrenzt (Q_{\max}).

2. Integrale Bewirtschaftung von Netz, ARA und Gewässer

Aufgrund der Verbindungen zwischen Einzugsgebiet, ARA und Gewässer wird für die Optimierung der Siedlungsentwässerung zunehmend eine integrale Bewirtschaftung angestrebt. Der Verband der Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) ist bestrebt die integrale Bewirtschaftung der Entwässerungssysteme in der Schweiz voranzutreiben. Mit dem Projekt GIRE will er anhand konkreter Beispiele zeigen, dass die integrale Betrachtung möglich und finanziell und ökologisch interessant ist. Eine Richtlinie ist in Bearbeitung (Rossi 2021).

Verschiedene Studien zeigen die konkreten Vorteile und Möglichkeiten auf. Am Beispiel einer Anlage wurde in einer Simulationsstudie der Einfluss der Zulaufbegrenzung (Q_{\max}) auf die Emission von Stickstoff untersucht. Bei zunehmendem Q_{\max} verschiebt sich die emittierte Fracht zunehmend in den Ablauf der ARA. Die Gesamtemission ist jedoch bei Entlastungen deutlich grösser und kann durch ein grösseres Q_{\max} reduziert werden (Mauchle u. a. 2018).

Gresch und Sigrist (2019) untersuchten anhand von 5 Einzugsgebieten in der Schweiz das Potenzial unterschiedlicher Optimierungsmöglichkeiten : i) statische Optimierung der Sonderbauwerke, ii) statische Ausnutzung von Q_{\max} zur ARA, iii) koordinierte Beckenentleerung, iv) dynamische Steuerung und v) Nutzung vorhandener Reserven der ARA.

Das Verhältnis des Überlaufvolumen im Vergleich zur statischen Optimierung ist in Abbildung 1 dargestellt. Die statische Optimierung wird üblicherweise im Rahmen der generellen Entwässerungsplanung (GEP) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die statische Ausnutzung des Zuflusses zur ARA bei Regenwetter ein erhebliches Potenzial hat (Gresch und Sigrist 2019).

Eine Datenanalyse zum Zulauf führte Schab (2018) für die Kläranlagen von Baden-Württemberg durch. Er ermittelte den Faktor f_{S,Q_M} aufgrund der Zulaufdaten. Der Faktor f_{S,Q_M} wird nach der ATV-DVWK A-198 normalerweise für den Bemessungszufluss zur ARA verwendet und kennzeichnet die Spreizung des Mischwasserzulaufs zum Schmutzwasserabfluss (s. Kap. 4.3) (DWA 2003). Bei der

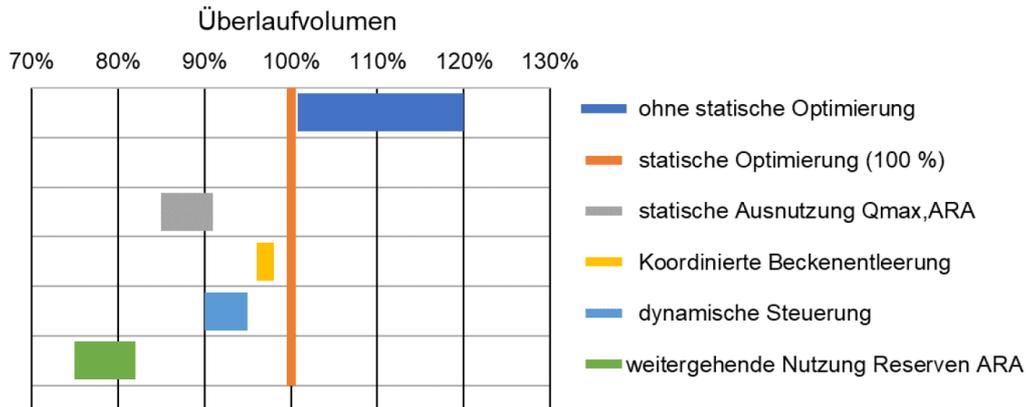


Abbildung 1: Reduktion des Überlaufvolumens durch verschiedene Optimierungsmassnahmen. Man sieht, dass durch die statische Optimierung von Q_{\max} das Überlaufvolumen um 10-15% reduziert werden kann. (Abbildung: Gresch und Sigrist 2019)

Dimensionierung wird f_{S,Q_M} im Bereich zwischen 3 bis 6 bzw. 6 bis 9 für grosse oder kleine Anlagen gewählt (DWA 2003). Eine Überschreitung des Bereichs ist dabei nicht problematisch, wenn im Ablauf der ARA die Einleitbedingungen eingehalten werden. Bei einer Unterschreitung des Bereichs wird weniger Zufluss zur ARA zugelassen als empfohlen. Die Belastung verschiebt sich in diesem Fall bei Regenwetter von der Kläranlage zum Kanalnetz. Zunehmende Entlastungen aus dem Kanalnetz ins Gewässer können die Folge sein. Die Auswertung von Schab zeigt, dass ein Grossteil der ARAs in Baden-Württemberg mit einem höheren f_{S,Q_M} betrieben werden, als für die Dimensionierung empfohlen. Wenn die Daten nicht systematisch falsch sind, bedeutet das, dass ARAs i.d.R. zum jetzigen Zeitpunkt mehr Q_{\max} nehmen können, als in einem (zukünftigen) Ausbaustand vorgesehen.

Leider gibt es für die Schweiz keine Angaben, ob und inwieweit die Erhöhung des Mischwasserzuflusses zur ARA in der Praxis umgesetzt wird. Bast 2021 untersuchte in seiner Bachelorarbeit den Dimensionierungszufluss von 45 Kläranlagen im Kanton Bern. Er berechnete den Dimensionierungszufluss aufgrund von Tages-Werten des Zulaufs mit verschiedenen Methoden aus der Schweiz und Deutschland (Schweizer Verfahren/Gujer, Ansatz VSA und ATV-DVWK A 198). Seine Arbeit fokussiert auf die Unterschiede bei den Dimensionierungsmethoden und die Nutzung vorhandener Reserven der ARA. Die Annahmen in den Methoden wurden nicht durch weitere, externe Daten überprüft und die Rohdaten wurden in der Arbeit von Bast 2021 nicht validiert. Für die Validierung sind Daten mit hoher zeitlicher Auflösung wichtig, die nun zur Verfügung stehen.

3. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die **Erhebung des aktuellen Stands der Regenabwasserbehandlung auf ARAs in der Schweiz**. Als Kennzahl wird der Faktor f_{S,Q_M} aus der ATV-DVWK A-198 vorgeschlagen (nach dem Ansatz von Schab 2018).

Dies soll durch die Datenanalyse des Mischwasserzuflusses möglichst vieler Schweizer ARAs erreicht werden. In mehreren Schritten sollen die Qualität der Rohdaten überprüft und der Faktor f_{S,Q_M} berechnet werden. Eine Überprüfung der Annahmen wird zusätzlich mit Regendaten durchgeführt.

Die folgenden Forschungsfragen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden können:

1. Wie gross ist der Faktor f_{S,Q_M} im tatsächlichen Betrieb der Schweizer ARAs?

- Ergibt die Berechnung mit den Methoden nach ATV-DVWK A-198 plausible Resultate?
- Wie ist die Datenqualität der ARA-Zulaufdaten, die für die Analyse verwendet werden? Welche Methoden sind für eine automatisierte Auswertung der Zulaufdaten zweckmässig? Inwiefern ist die Zeitauflösung der Rohdaten ausschlaggebend für ein plausibles Endresultat?
 - Kann die Gültigkeit der Annahmen für die Ermittlung der Trockenwettertage mit Regendaten überprüft werden? Kann die Berechnung des Fremdwassers mit Grundwasserdaten überprüft werden? Ist eine Überprüfung der Berechnung von Schmutzwasser mit detaillierten Bevölkerungsdaten aus Mobilfunknetzen möglich?
 - Mit welchen Kennwerten einer Kläranlage oder Einzugsgebiets kann die Auslegung der Siedlungsentwässerung zusätzlich charakterisiert werden? Korreliert der Faktor f_{S,Q_M} mit der Anzahl angeschlossener Einwohner, der Höhe oder der Grösse des Gewässers?

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Bestandesaufnahme der Situation in der Schweiz. 67 von 716 Kläranlagen (Stand Datensatz, s. Kap. 4.1.2) sendeten ihre Daten für diese Arbeit ein und konnten ausgewertet werden. Es ist wahrscheinlich, dass eine Stichprobenverzerrung vorhanden ist, was ein beschönigtes Gesamtbild zur Folge hat. Bei der Implementation wurde darauf geachtet, dass die Analyse in Zukunft mit Datensätzen erweitert werden kann, um eine vollständige Auswertung zu ermöglichen.

Die Arbeit ist wie folgt strukturiert: Im folgenden Kapitel 4 werden die verwendeten Methoden beschrieben. Der Arbeitsablauf mit den jeweiligen Kapitelbezeichnungen ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Arbeit gliedert sich in 3 Schwerpunkte: Die Validierung der Rohdaten (Kapitel 4.2), die Berechnungen nach ATV-DVWK A-198 (Kapitel 4.3) und die Überprüfung mit Regendaten (Kapitel 4.3.2). Die verwendeten Daten werden in Kapitel 4.1 beschrieben.

Die Arbeit wurde als Gruppenarbeit im Rahmen des Masterprojekts des Studiengangs Umweltingenieurwissenschaften (ETH Zürich) durchgeführt. Dabei wurde die Datenvalidierung von Chiara Baum und die Überprüfung mit Regendaten von Alina Stutz bearbeitet.

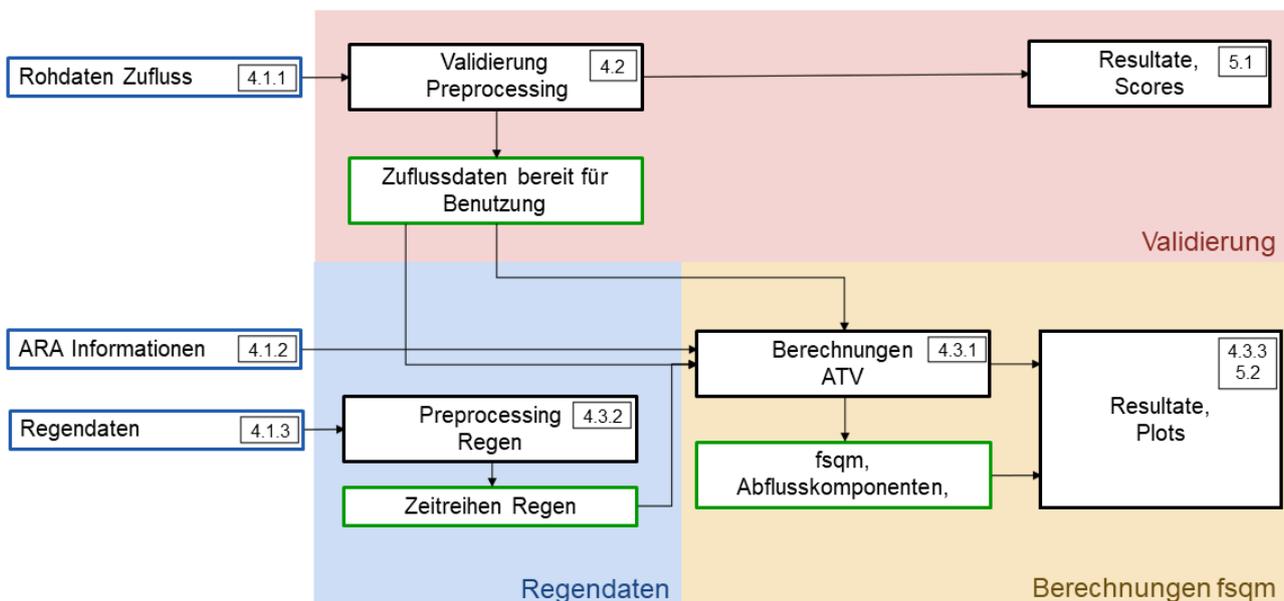


Abbildung 2: Struktur des Arbeitsablaufes mit Kapitelbezeichnungen zu den jeweiligen Methoden. Auf der linken Seite sind die Input-Daten dargestellt. Die 3 Schwerpunkte sind farbig hinterlegt. In den schwarz umrandeten Kästen werden Berechnungen und Auswertungen durchgeführt. Grün umrandet sind Zwischenergebnisse, die gespeichert werden.

4. Material und Methoden

4.1. Daten

4.1.1. ARA Zuflussdaten

Für die Analyse wird der Mischwasserzulauf einer ARA in mindestens stündlicher Auflösung benötigt. Für diese Arbeit standen die Daten von 67 Anlagen zur Verfügung. Die verfügbaren Jahre sind Abbildung 3 dargestellt. Tabelle 4.1.1 zeigt, welche zeitliche Auflösung für die ARAs vorhanden ist.

Bast 2021 berechnete u.a. den Faktor f_{S,Q_M} für die Kläranlagen des Kanton Berns. Das f_{S,Q_M} wurde mit den täglichen Werten von minimalem und maximalem Mischwasserzufluss über die Nachtminimum-Methode berechnet. Die Rohdaten mit täglicher Auflösung können im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgewertet werden. Die f_{S,Q_M} -Werte aus der Arbeit von Bast werden ebenfalls in der Abbildung 6 Kapitel 5.2 dargestellt.

Eine Liste der Kläranlagen, für die die Analyse durchgeführt wurde, befindet sich in Anhang B. Die Schreiben an die ARA Betreiber sind in Anhang I eingefügt.

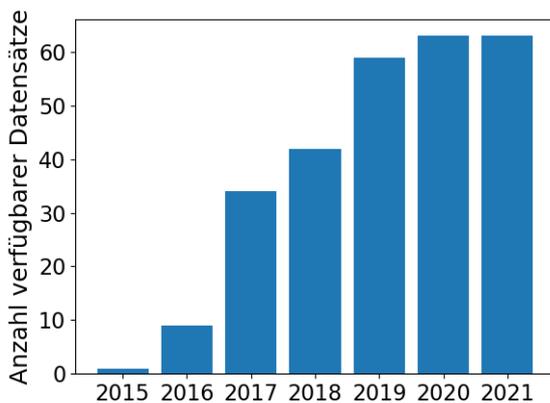


Tabelle 1: Zeitauflösung der Zuflusszeitreihen.

Zeitauflösung	Anzahl ARAs
1 min	7
5 min	42
15 min	17
1 h	1

Abbildung 3: Verfügbare Jahre der Datensätze.

4.1.2. ARA Datenbank

Für das Datenmanagement und die nachfolgenden Auswertungen wurde ein Datensatz mit Informationen zu den Schweizer ARAs verwendet. Zusätzlich wurden Geodaten der ARAs und der Einzugsgebiete verwendet. Die Daten (inkl. Geodaten) wurden im Rahmen des Projekts von Maurer und Herlyn (2006) erhoben und im Jahr 2014 aktualisiert.

4.1.3. Regendaten

Für die Ermittlung der Trockenwettertage an den ARA-Standorten werden räumliche Regendaten verwendet. Die Analyse wird mit dem Produkt *RhiresD* (Regendaten mit täglicher Auflösung) von MeteoSchweiz durchgeführt. Für *RhiresD* werden die Daten von Messstationen in der Schweiz und angrenzenden Bereichen räumlich interpoliert. Es wird erwartet, dass der Niederschlag mit *RhiresD* generell unterschätzt wird und dass die effektive räumliche Auflösung 15-20 km beträgt (MeteoSwiss

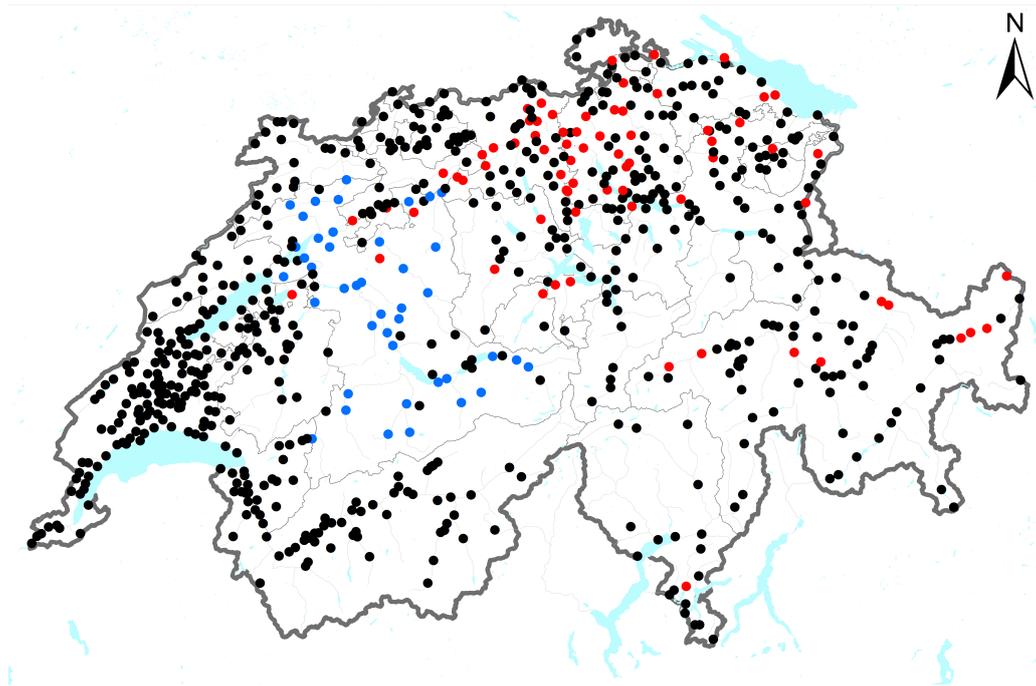


Abbildung 4: Karte der Abwasserreinigungsanlagen in der Schweiz (Maurer und Herlyn 2006, akt. 2014). Als rote Punkte sind die ARAs, deren Daten für diese Arbeit verfügbaren waren. Die blauen Punkte sind die ARAs welche in der Arbeit von Bast 2021 untersucht wurden. Man sieht, dass die teilnehmenden ARAs vorwiegend aus der Deutschschweiz sind.

2021).

Für diese Arbeit standen Niederschlagsdaten für den Zeitraum 1.12.2017-31.7.2021 zur Verfügung. Die Daten sind monatlich als NetCDF-Datei im Koordinatensystem WGS 84 abgespeichert. Die NetCDF-Datei enthält neben den Metadaten ein dreidimensionales Array, in welchem die Niederschlagsdaten nach Position (x,y) und Zeit (t) gespeichert sind.

Die Methode (s. Kapitel 4.3.2) wurde zu Beginn mit Radardaten implementiert, welche in einer zeitlichen Auflösung von 2-3 Minuten verfügbar war. Die Komputation benötigte einen erheblichen Speicher- und Zeitbedarf. Die Methoden wurden später für *RhiresD* angepasst.

4.2. Datenvalidierung der der Zulaufdaten

Jede Berechnung kann höchstens so aussagekräftig sein wie es die Daten sind, auf denen sie basiert. Aus diesem Grund und um ein besseres Verständnis über Datenvalidierungsmethoden zu gewinnen wurden die zur Verfügung bereitgestellten Rohdaten auf verschiedene Qualitätskriterien geprüft. Endprodukt der Validierung ist einerseits die Bereitstellung von gefilterten Zuflussdaten und andererseits ein Urteil über die Qualität jedes einzelnen Datensatzes. Die erhebliche Menge an Daten macht eine umfassende manuelle bzw. visuelle Validierung unmöglich. Bertrand-Krajewski und Muste empfiehlt die Implementierung von einfachen Datenchecks zur sogenannten 'Pre-Validierung'. Diese Checks sind möglichst automatisiert durchzuführen, sparen somit Zeit, und erlauben erlauben eine Kennzeichnung von potenziell unplausiblen Werten. In einem zweiten Schritt müsste die eigentliche Validierung auf globalem Niveau durch komplexere Checks stattfinden mithilfe von Expertinnen und zusätzlichen Informationen zu den Messungen. Wir beschränken uns hier auf die Pre-Validierung und nennen sie im folgenden Validierung der Daten.

Zur Validierung der Zuflussdaten wurden fünf Checks implementiert, dessen Effizienz visuell über drei bis fünf Datensätze visuell überprüft wurde:

1. **Einmaligkeit:** Redundante Zeitstempel, die beispielsweise durch Zeitverschiebungen oder Umstellen der Messgeräte auftreten könnten, werden ausgefiltert. Hierbei wird jeweils der erste Wert mit dem mehrfach vorkommenden Zeitstempel beibehalten und die restlichen Werte entfernt.
2. **Datenlücken:** fehlende Daten über die Zeitspanne der Zeitreihe zeugen von mangelnder Datenqualität und beeinträchtigen die Aussagekraft der darauf basierenden Berechnungen. Die Rohdaten werden auf die Zeitreihe mit existierenden Werten reduziert. Das Verhältnis der Menge gefilterter Daten zur Menge Rohdaten bildet den Score. Ausgenommen davon sind meist lang andauernde Lücken am Anfang bzw. Ende der Zeitreihe. Hier wird die Zeitreihe verkürzt, ohne das sich dies auf den Score auswirkt.
3. **Rangecheck:** Nach Kriterium 2 empfiehlt Bertrand-Krajewski und Muste die Rohdaten auf physikalisch möglichen Werten zu prüfen. In unserem Fall kann der Zufluss niemals negativ sein. Alle negativen Werte werden deshalb aussortiert. Für ein Filter nach einer fixen Obergrenze fehlen uns Daten über die Drosseleinstellung der Kläranlagen. Aus diesem Grund wird eine variable Obergrenze nach Kriterium 3 von Krajewski eingeführt: $Q_{val} < 2 * Q_{99}$, wobei sich Q_{99} auf das 99% Quantil der Daten nach der Entfernung der negativen Werte bezieht. Mit dem zweifachen 99%-Quantil werden mehrfach vorkommende fehlerhafte Werte (z.B. 9999l/s) aussortiert, jedoch nicht einzelne hohe Zuflüsse.
4. **Gradientencheck:** vor allem bei hoher Zeitauflösung sind Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden Messwerten ab einem bestimmten Wert unplausibel. Da wir keinerlei Informationen über die Kapazität des Kanalnetzes haben und zudem der maximal mögliche Gradient von ARA zu ARA verschieden ist, verwenden wir eine statistische Methode auszuweichen. Analog zu Krajewskis Kriterium 5 gehen wir mit einer Kombination aus einem Filter und einem Grenzwert folgendermaßen vor:
 - a) Bildung des gleitenden Mittelwert über 1 Stunde (je nach Zeitauflösung der Daten befinden sich 4 bis 60 Datenpunkte im Zeitfenster)
 - b) Bildung der absoluten relativen Differenz zwischen den Rohdaten und den in a. gemittelten Daten
 - c) Entfernung jener Datenpunkte, welche das 99% Quantil der in b. ermittelten Differenz überschreiten
5. **Frozencheck:** oftmals sind aufgrund von Defekten im Messsystem für den Zeitraum der Störung die angegebenen Werte eingefroren, d.h. aufeinanderfolgende Messungen weisen den auf Kommazahlen gleichen Messwert auf. Ziel dieses Checks ist es, solche Zeiträume zu identifizieren und die eingefrorenen Werte zu entfernen. Unabhängig von der Zeitauflösung der Daten werden Werte als 'eingefroren' beurteilt, wenn mindestens vier mal der gleiche Wert hintereinander angezeigt wird. Diese Werte wurden in den gefilterten Daten entfernt.

Bei jedem Datencheck wird eine neue Zeitreihe erstellt, bei der die jeweils unplausiblen Werte der Rohdaten entfernt worden sind. Der Score zur Beurteilung der Datenqualität wurde für alle Datenchecks wie folgt berechnet:

$$\text{Score} = \frac{\text{Länge gefilterte Zeitreihe}}{\text{Länge rohe Zeitreihe}} \quad (1)$$

Für eine finale Aussage über die Datenqualität eines Datensatzes zu machen werden die einzelnen Scores der Datenchecks auf ein Endergebnis aggregiert. Hier schlagen Clemens-Meyer u. a. verschiedene Methoden vor, von denen zwei implementiert wurden (Clemens-Meyer u. a. 2021): Einerseits wurde

mean_score als Durchschnittswert der Checks berechnet, andererseits wurden der *min_score* aus dem Minimum der Checks ermittelt. Während der *mean_score* alle Datenchecks gleich gewichtet ist, schlägt der *min_score* Alarm wenn ein Datensatz bei einem einzelnen Check schlecht abschneidet.

4.3. Bestimmung des Faktors f_{S,Q_M}

Für die Bemessung von Abwasseranlagen kann die deutsche Norm ATV-DVWK-A 198 verwendet (DWA 2003). Der Bemessungsabfluss zur Kläranlage Q_M wird über das jährliche Mittel von Schmutzwasser $Q_{S,aM}$, Fremdwasser $Q_{F,aM}$ und den Faktor f_{S,Q_M} definiert (Gl.2). Um die erforderlichen Speichervolumen und die Belastbarkeit der ARA zu optimieren, kann der Faktor f_{S,Q_M} in einem Bereich zwischen 3 und 9 gewählt werden.

$$Q_M = f_{S,Q_M} \cdot Q_{S,aM} + Q_{F,aM} \quad (2)$$

Um den tatsächlichen Faktor f_{S,Q_M} zu ermitteln, wird wie beim Ansatz von Schab (2018) Fremd-, Schmutzwasser und der maximale Abfluss zur ARA aus den Zulaufdaten ermittelt. Fremd- und Schmutzwasser können mit Methoden nach ATV alleine aufgrund der Zuflussdaten ermittelt werden (DWA 2003, vgl. nachfolgendes Kapitel). Da die A-198 zum Teil starke Annahmen macht, z.B. bei der 20% Schwelle zur Ermittlung von Trockenwetter-Tagen, wurden hier alternativ Regendaten zu der Ermittlung verwendet (Kap. 4.3.2).

$$f_{S,Q_M} = \frac{Q_{max} - Q_{F,aM}}{Q_{S,aM}} \quad (3)$$

4.3.1. Berechnungen mit den validierten Zulaufdaten

Der gemessene Mischwasserabfluss vor der Kläranlage setzt sich aus den Komponenten Schmutzwasser, Fremdwasser und Regenwasser zusammen. Fremd- und Schmutzwasser können nicht direkt gemessen werden. Es braucht deshalb Annahmen, um diese zu bestimmen. Die Methoden können für die Ermittlung von Fremd- und Schmutzwasser nur an Trockenwettertagen angewandt werden. Es wird angenommen, dass an diesen Tagen gar kein Regenwasser abfließt. Schmutzwasser unterliegt einem Tagesgang. In den frühen Morgenstunden ist sein Anteil sehr gering. Häufig wird daher die Nachtminimum-Methode für die Bestimmung des Fremdwassers angewandt. Sie erlaubt eine Bestimmung nur aufgrund der Zulaufdaten, indem angenommen wird, dass zwischen 0:00 und 5:00 Uhr kein Schmutzwasser anfällt und der minimale stündliche Zufluss an Trockenwettertagen dem Fremdwasser entspricht. (DWA 2003; DWA 2012)

Die Trockenwettertage können rechnerisch mit dem gleitenden Minimum über 21 Tage bestimmt werden. Bei der Methode mit gleitendem Minimum wird angenommen, dass Niederschlagsabflüsse stärker ansteigen als der Fremdwasserabfluss und dass innerhalb eines Zeitfensters von 21 Tagen (± 10 Tage) mindestens einmal Trockenwetter stattfindet. Tägliche Abflüsse, die bis 20% über dem gleitenden Minimum liegen, werden als Trockenwetterabfluss gezählt. Untersuchungen zeigten, dass bei kleineren Zeitfenstern der Fremdwasseranteil ansteigt und ab 21 Tagen konstant bleibt (Fuchs u. a. 2003). In Fuchs u. a. (2003) wird an den ermittelten Trockenwettertagen eine konstante Schmutzwassermenge abgezogen, um den Fremdwasseranteil zu erhalten. Wir verwenden diese Methode jedoch nur für die Bestimmung des Trockenwettertages und kombinieren sie mit der Nachtminimum-Methode. Dies erlaubt es, die Abflusskomponenten ohne weitere Zusatzdaten oder detailliertere Kenntnisse des Einzugsgebiets zu ermitteln. Es wird empfohlen, Regendaten für die Plausibilitätskontrolle beizuziehen

(vgl. Kapitel 4.3.2). (DWA 2003; DWA 2012)

Das Schmutzwasser wird für alle Trockenwettertage aus der Differenz zwischen dem Trockenwetterabfluss und dem Fremdwasser berechnet. Für die Berechnung von f_{S,Q_M} werden das Schmutzwasser und Fremdwasser jährlich gemittelt ($Q_{S,aM}$, $Q_{F,aM}$ in Gl. 3). Der Mischwasserzufluss zur Kläranlage Q_{\max} wird über das 99%-Quantil des stündlichen Zuflusses bestimmt (Gl. 4).

$$Q_{\max} = Q_{h,0.99} \quad (4)$$

4.3.2. Einbezug von Regendaten

Wenn die Methode des gleitenden Minimums für die Ermittlung des Trockenwetterabflusses verwendet wird, sollte eine Plausibilitätskontrolle mit Regendaten durchgeführt werden (DWA 2003). Durch die räumlichen Regendaten (*RhiresD*) sind für jeden ARA Standort Regendaten vorhanden. Die Abfrage der Zeitreihe des Niederschlags wird für jede ARA durch folgende Schritte erreicht:

1. Öffnen der NetCDF-Dateien von RhiresD in Python (s. Kapitel 4.1.3).
2. Die Datei wird als 3D Array (x/Longitude, y/Latitude, Niederschlagshöhe) und mit Metadaten (Koordinatensystem, Zellgrösse) gelesen.
3. Der Standort der ARAs ist im Schweizer Koordinatensystem CH1903 in der ARA-Datenbank vorhanden (s. Kapitel 4.1.2). Diese Koordinaten werden in das Koordinatensystem der Regendaten (WGS84) transformiert.
4. Die Position der ARAs werden im 3D Array gesucht (x,y) und die Zeitreihe des Niederschlags (3.Dimension) wird an dieser Position ausgelesen.

Die Trockenwettertage werden mit einer täglichen Grenzniederschlagshöhe von 0.3 mm und der Berücksichtigung von 1 Nachlaftag ermittelt (DWA 2003; DWA 2012; MeteoSchweiz 2020). Die Sensitivität der Berechnung auf die Grenzniederschlagshöhe und die Anzahl Nachlaftage ist in Abbildung 13 in Anhang E dargestellt.

4.3.3. Grafische und quantitative Beurteilung der Resultate

Der Faktor f_{S,Q_M} aller Anlagen wird als kumulative Verteilungsfunktion nach Anzahl angeschlossener Einwohner und ARA-Kategorie dargestellt (Abb. 6). Für die meisten Anlagen sind Daten mehrerer Jahre verfügbar. Für die Darstellung wird der Median verwendet. Die Informationen zu den einzelnen Kläranlagen können in Anhang B eingesehen werden. Eine Liste der f_{S,Q_M} -Werte für die ATV-Methode und die Methode mit den Regendaten in Anhang F und G vorhanden. Bei der Betrachtung einzelner f_{S,Q_M} -Werte sind die Limitierungen zu beachten (vgl. Diskussion in Kap. 6).

Für jede ARA werden Plots mit den Abflusskomponenten (Abb. 7), zur Saisonalität von Schmutz- und Fremdwasser (Abb. 8) und zum Trockenwetterabfluss (Abb. 10) erstellt. Diese erlauben die visuelle Überprüfung der vorgeschlagenen Methode und eine Interpretation der abgebildeten Prozesse. In Abb. 7 wird das 99%-Quantil stündlichen Abflusses pro Tag abgebildet. Schmutz- und Fremdwasserabflüsse werden gemäss Kap. 4.3 nur für Trockenwettertage berechnet und werden ebenfalls abgebildet. In Abbildung 8 werden die Monatsmittel des Schmutz- und Trockenwetterabflusses sowie Boxplots der Tageswerte dargestellt. Zusätzlich zur Abbildung wird mit dem Variationskoeffizient (CV) die Variabilität von Schmutz- und Fremdwasser quantitativ beurteilt (s. Anhang D).

Durch die beiden Methoden werden unterschiedliche Abflüsse als Trockenwetterabfluss gekennzeichnet.

Um die Unterschiede abzubilden, wird die kumulative Verteilung des Trockenwetterabflusses (stündliche Werte) für jede ARA geplottet (Abb. 10).

Weitere grafische Analysen zu möglichen Einflussfaktoren/Korrelationen mit f_{S,Q_M} sind in Anhang H dargestellt.

4.4. Codestruktur

Die Analysen wurden in der Programmiersprache Python implementiert. Python ist Open-Source und besitzt eine grosse Anwendergemeinschaft. Es ist insbesondere für Datenanalysen gut geeignet. Der modulare Aufbau mit Funktionen erlaubt es, die Analysen für unterschiedliche Kläranlagen flexibel durchzuführen. Alle relevanten Daten zu der jeweiligen ARA werden in einem 'Dictionary' (Datenstruktur in Python) eingegeben. Die ARA-Daten werden dadurch in die Analyse integriert. Wichtige Zwischenresultate werden laufend gespeichert. Dies ermöglicht es, immer auf die Resultate zugreifen zu können und den Überblick zu behalten. Die Analyse wurden unter Verwendung von Anaconda und den Packages numpy, pandas, osgeo, matplotlib und seaborn implementiert. Für das Management des Codes und die Aufgaben im Rahmen des Masterprojektes wurde GitLab¹ verwendet. (*Anaconda Software Distribution* 2020; Harris u. a. 2020; The pandas development team 2020; McKinney 2010; GDAL/OGR contributors 2021; Hunter 2007; Waskom u. a. 2017)

¹Repository: <https://gitlab.switch.ch/Joerg.Rieckermann/miwara>

5. Resultate

Zuerst werden die Resultate der Validierung der Rohdaten dargestellt. Im zweiten Teil werden die Resultate des Faktors f_{S,Q_M} der Regen-Methode mit der Methode des gleitenden Minimums (ATV) verglichen. Für die Beurteilung der beiden Methoden werden in den Unterkapiteln 5.2.1 und 5.2.2 die Zwischenergebnisse dargestellt und beschrieben.

5.1. Datenvalidierung

In der Abbildung 5 ist die Verteilung der Ergebnisse der Datenchecks über die Rohdaten der 67 ARAs dargestellt. Während die Anlagen im Durchschnitt über alle Datenchecks mit einem Durchschnittsscore von etwa 0.96 abschneiden, ist die Abweichung vom Mittelwert bei einigen Datenchecks jedoch erheblich: So beträgt der Variationskoeffizient des Rangechecks rund 23%; der Frozencheck variiert um ca. 11% um den Mittelwert. Die Einmaligkeit der Zeitstempel ist praktisch bei jedem Datensatz garantiert, was daraufhin deutet, dass die Zeiten in UTC gespeichert worden sind.

Eine detaillierte Liste mit den Scores einzelner Checks für alle ARAs ist im Anhang C zu finden.

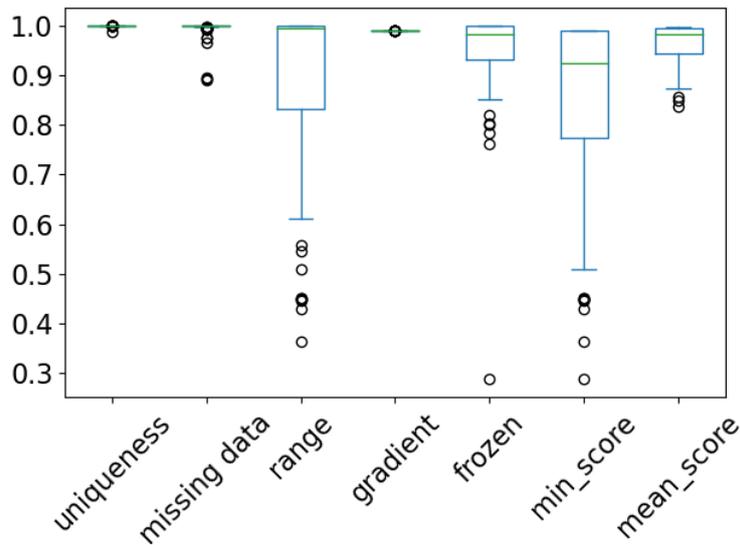


Abbildung 5: Verteilung der einzelnen und aggregierten Scores (*min_score* und *mean_score*) der Datenvalidierung über alle ARAs.

Die Berechnungen wurden mit gefilterten Zuflussdaten durchgeführt, und die Resultate für alle verfügbaren Datensätze dargestellt, auch wenn einige Datensätze einen niedrigen Qualitätsindex aufweisen. Resultate von ARAs, bei denen ein einzelner Datencheck (bzw. der *minscore*) ein Ergebnis unter 0.75 aufweist, sind jedoch kritisch zu beurteilen.

5.2. Bestimmung des Faktors f_{S,Q_M}

Die Verteilung des Spreizungsfaktors f_{S,Q_M} ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. In den Figuren 6a und 6b ist f_{S,Q_M} analog zu Schab nach angeschlossenen Einwohner:innen gruppiert, wobei in der rechten Abbildung die Trockenwettertage mit den Regendaten bestimmt wurden. In den beiden

unteren Abbildungen (Figuren 6c und 6d) ist f_{S,Q_M} nach ARA Kategorien des VSA unterteilt (VSA 2016).

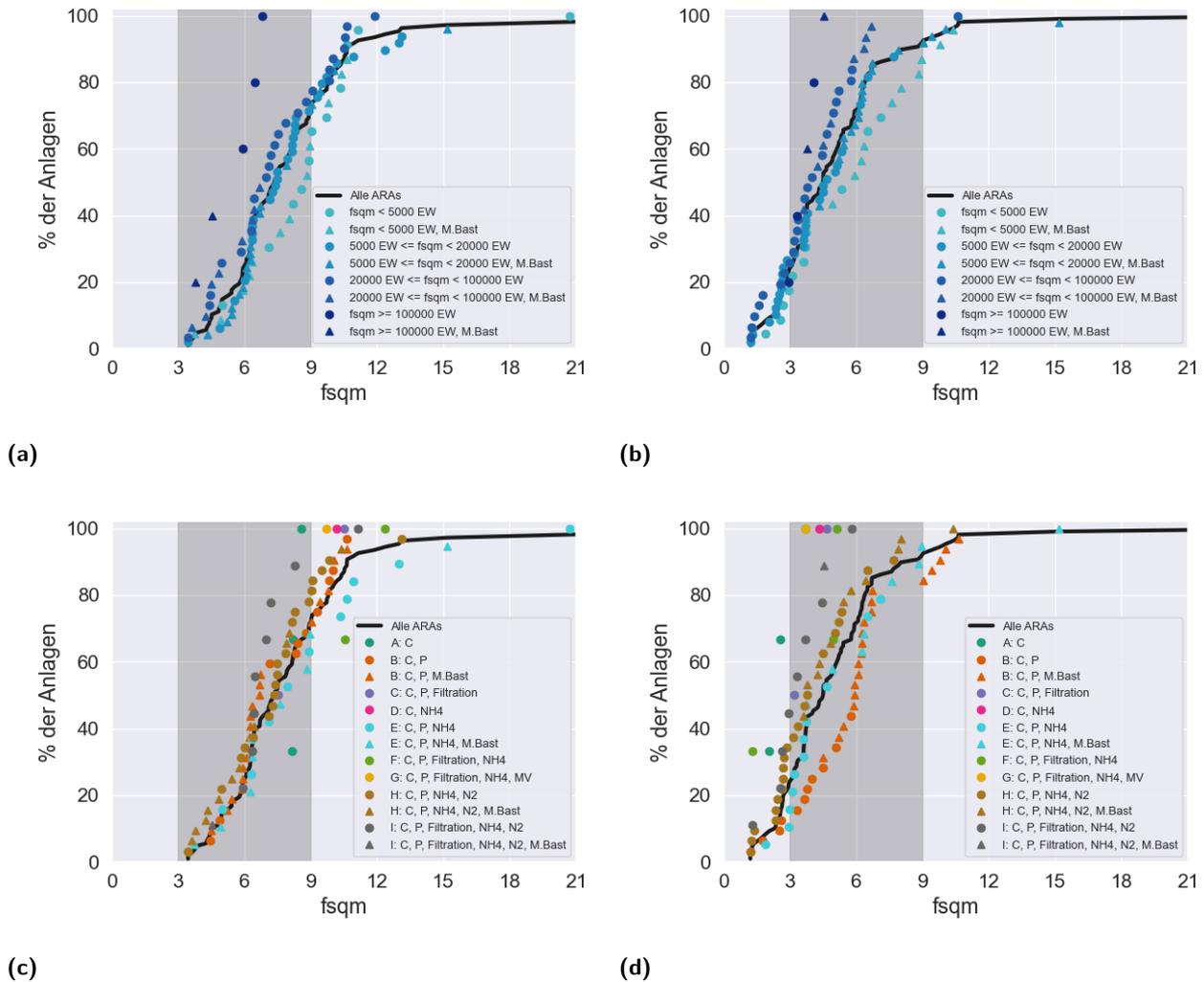


Abbildung 6: Verteilung des Spreizungsfaktors f_{S,Q_M} . **Oben:** nach Anzahl angeschlossener Einwohner:innen. **Unten:** nach ARA Kategorien des VSA. Diese Kategorien geben Informationen über die bestehenden Reinigungsschritte innerhalb der ARA. **Links:** Die Trockenwettertage wurden nach ATV 198 mit dem gleitenden Minimum bestimmt. **Rechts:** Die Trockenwettertage wurden anhand von Regendaten bestimmt. Man kann erkennen, dass mit der Regen-Methode deutlich mehr Anlagen unter dem empfohlenen Bereich liegen als mit der ATV-Methode.

Nach den ATV-Methode liegt der Grossteil der Anlagen im oder über des nach ATV empfohlenen Bereichs: für kleine und mittlere Anlagen zwischen 6 und 9, für grosse Anlagen zwischen 3 und 6. Bei den kleineren ARAs haben rund 20 Anlagen einen Spreizungsfaktor unter 6. Mittlere Anlagen weisen gemäss unseren Berechnungen höhere f_{S,Q_M} -Werte auf als die Werte von Bast. Zwei ARAs haben besonders hohe f_{S,Q_M} -Werte und sind in den Abbildungen nicht zu sehen: eine ARA von Bast mit f_{S,Q_M} von 25 und eine ARA, die unseren Berechnungen nach einen f_{S,Q_M} -Faktor von rund 70 aufweist. Deutlich zu sehen sind die kleineren f_{S,Q_M} -Faktoren für die grossen Anlagen mit über 100'000 angeschlossenen Einwohner:innen.

In den unteren Abbildungen wurden die Kläranlagen nach den ARA Kategorien des VSA gruppiert. Bedeutende Aussagen lassen sich über die ARAs machen, die einer der häufiger vorkommenden Kategorien angehören, nämlich zu den Kategorien B, E, H und I. Bei der Gruppierung nach Reinigungsart ist bei beiden Methoden (nach ATV + mit Regendaten) der f_{S,Q_M} -Faktor der denitrifizierenden Anlagen tendenziell kleiner. Auch ist in der rechten Abbildung ersichtlich, dass Anlagen, die organischen Kohlenstoff und Phosphor eliminieren (jedoch kein Stickstoff) deutlich höhere f_{S,Q_M} -Werte annehmen.

Unabhängig von der Art der Gruppierung ist deutlich erkennbar, dass der Faktor f_{S,Q_M} sensitiv auf die Methode der Trockenwettertagebestimmung ist: die mit den Regendaten ermittelten Trockenwettertage führen zu einem niedrigeren Spreizungsfaktor. Bei dieser Methode liegen rund ein Viertel der ARAs unter einem f_{S,Q_M} -Wert von 3 und etwa 40% unter dem von der Einwohner:innenkategorie empfohlenen Bereich. Auch verschwinden die Ausreisser aus den Figuren links. Die f_{S,Q_M} -Werte von Marc Bast sind bei Verwendung von Regendaten in den rechten Figuren eher höher als unsere Werte. Bei der Gleitenden Minimum Methode sind sie eher kleiner.

5.2.1. Berechnung der Abflusskomponenten nach ATV

Abbildung 7 zeigt die Zeitreihe von Schmutz- und Fremdwasser, sowie dem maximalen stündlichen Zufluss pro Tag. Am Beispiel der ARA Nr. 342500 sind zwei Möglichkeiten erkennbar, wie der Zulauf zur ARA geregelt sein kann. In den Jahren 2019-2021 wird der maximale Zufluss (bei ca. 300 l/s) häufig erreicht. Die Zuflussbegrenzung ist gut sichtbar. In den Jahren 2017 und 2018 wird der maximale Zufluss nicht erreicht und die Zuflussbegrenzung ist nicht sichtbar.

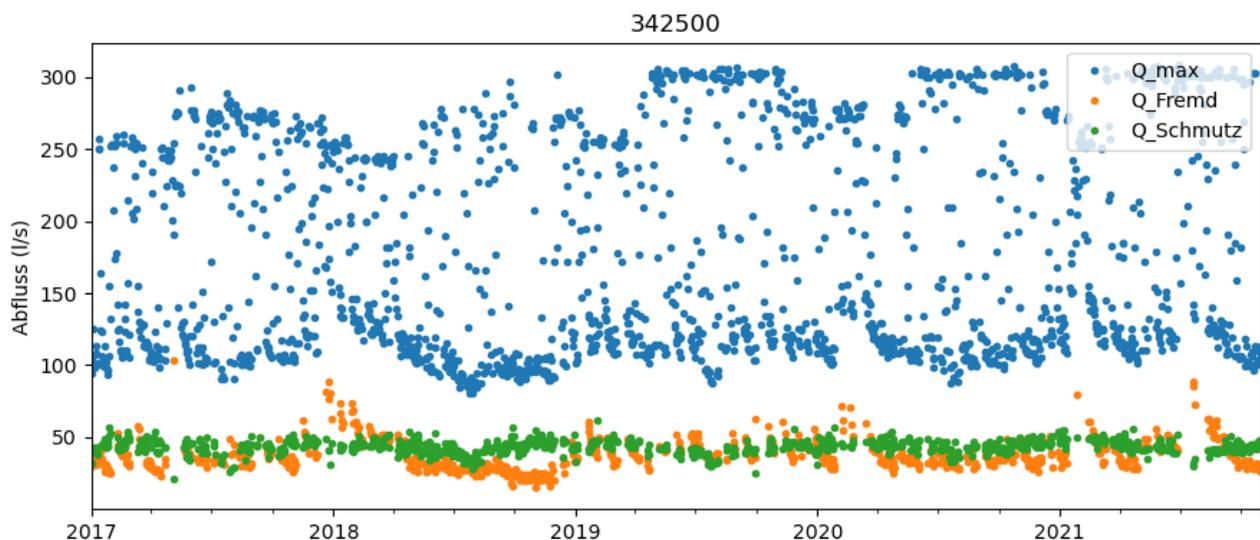


Abbildung 7: Zeitreihe von dem Stundenmaximum pro Tag (blau) und Schmutz- (grün) und Fremdwasser (orange) (nach ATV). Es ist erkennbar, dass der maximale Zufluss auf ca. 300 l/s begrenzt ist und in den Jahren 2019-2021 häufig erreicht wird. Die f_{S,Q_M} -Werte dieser ARA betragen: 2017=5.4(1.5), 2018=5.5(3.7), 2019=6.1(3.2), 2020=5.9(3.6), 2021=5.8(2.3) nach ATV (bzw. mit der Regen-Methode)

In Abbildung 8 ist die saisonale Variation von Schmutz- und Fremdwasser dargestellt. Wie erwartet, ist der Schmutzwasserabfluss über die Jahre konstant und nicht saisonal. Bei einigen ARAs zeigt sich im Vergleich eine erhöhter Variationskoeffizient (vgl. Anhang D). Es ist erkennbar, dass hauptsächlich

ARAs im Kanton Graubünden betroffen sind und bei diesen der Schmutzwasserabfluss in den Wintermonaten (Januar-März) erhöht ist (s. z.B. Abb.11 in Anhang D). Dies ist wahrscheinlich durch den Wintertourismus bedingt. Es waren leider keine Daten aus anderen Bergkantonen vorhanden, um dies zu verifizieren. Der Fremdwasserabfluss weist für die meisten ARAs eine grössere Variabilität (CV) auf. Im Plot ist bei vielen ARAs eine Abflussspitze im Sommer 2021 erkennbar, welche mit einem sehr nassen Juli 2021 erklärt werden kann. Zwischen Februar und Mai ist bei einigen ARAs ein erhöhter Fremdwasserabfluss erkennbar. Dies ist wiederum für die ARAs des Kantons Graubünden besonders ausgeprägt und wird wahrscheinlich durch die Schneeschmelze verursacht.

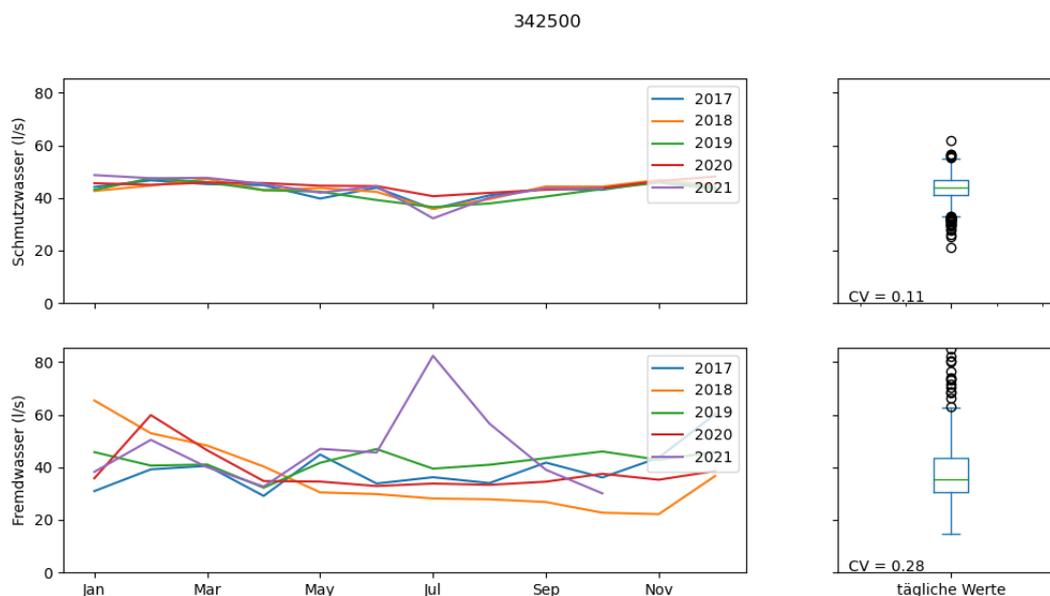


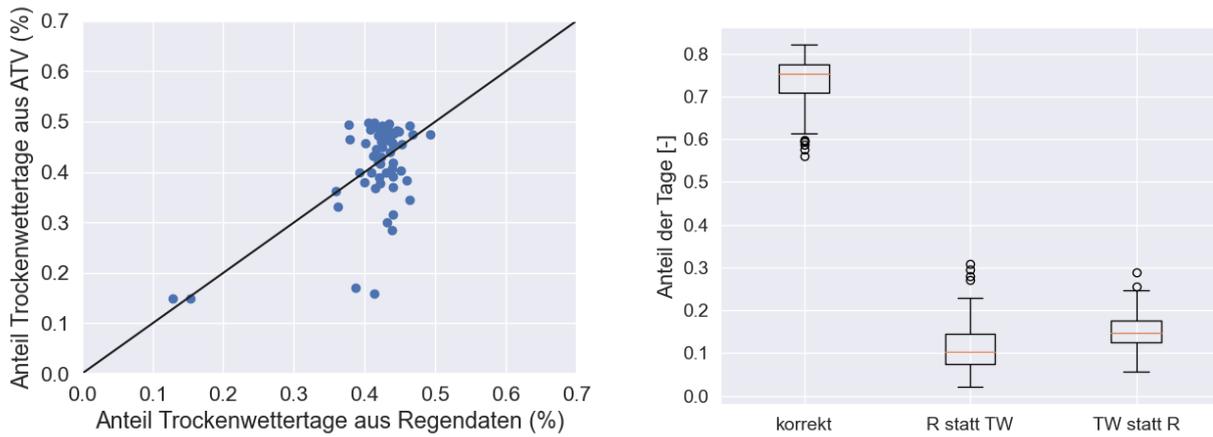
Abbildung 8: Variation des berechneten Schmutz- und Fremdwasseranteils der ARA Nr. 342500, **Links:** Monatsmittel, **Rechts:** Variation der täglichen Werte. Der Schmutzwasserabfluss ist saisonal und über die Jahre relativ konstant. Beim Fremdwasser sind zwischen den Jahren grössere Unterschiede erkennbar.

5.2.2. Vergleich der Trockenwettertage nach ATV und mit Regendaten

Aus den Regendaten gehen für die meisten ARAs 35-50% der Tage als Trockenwettertage hervor. Der Anteil der mit dem gleitenden Minimum berechneten Trockenwettertage liegt zwischen 15 und 50% (Abb. 9a). Beim Grossteil der Anlagen wird die Anzahl Trockenwettertage im Vergleich mit den Ergebnissen unter Verwendung der Regendaten leicht überschätzt. Es hat einige Anlagen, bei welchen sie stark unterschätzt werden verglichen mit der Methode mit Regendaten. Gemäss den Daten aller Messstationen von MeteoSchweiz sind durchschnittlich 64% Trockenwettertage (MeteoSchweiz 2020). Diese Erhebung berücksichtigt jedoch keine Nachlaufzeit und es wird eine Grenzniederschlagshöhe von 1 mm/d verwendet. Die Sensitivität der Methode auf die Anzahl Nachlaufzeit und die Grenzniederschlagshöhe wurde untersucht (Anhang E). Es zeigt sich, dass sich die Übereinstimmung der Trockenwettertage mit zunehmenden Nachlaufzeiten und Grenzniederschlagshöhe verschlechtert.

In Abbildung 9b ist erkennbar, dass 58-82% der Trockenwettertage korrekt erkannt werden. Abbildung 10 zeigt die kumulative Verteilung des Trockenwetterabflusses (Fremdwasser + Schmutzwasser) der beiden Methoden für eine ARA. Im abgebildeten Fall sieht man, dass die Verteilungen relativ gut übereinstimmen und die Differenz v.a. entsteht, da mit der Regen-Methode auch grössere Abflüsse

zum Trockenwetter gezählt werden. Die Differenz zwischen den beiden Verteilungen wurde in dieser Arbeit nicht quantitativ bestimmt. Es wird erwartet, dass eine Abhängigkeit zu der Länge der verfügbaren Zeitreihe besteht. Bei kurzen Zeitreihen haben Differenzen zwischen den Methoden in einer kumulativen Darstellung ein grösseres Gewicht.



(a) Anteil der Trockenwettertage berechnet mit der Methode des gleitenden Minimums (ATV) zum Anteil aus den Regendaten
 (b) Abweichung der Resultate des gleitenden Minimums von den Regendaten

Abbildung 9: Vergleich der Methoden für die Ermittlung der Trockenwettertage. Die Anzahl der Trockenwettertage werden mit dem gleitenden Minimum teilweise stark unterschätzt im Vergleich zu den Regendaten. 58-82% der Tage werden übereinstimmend erkannt.

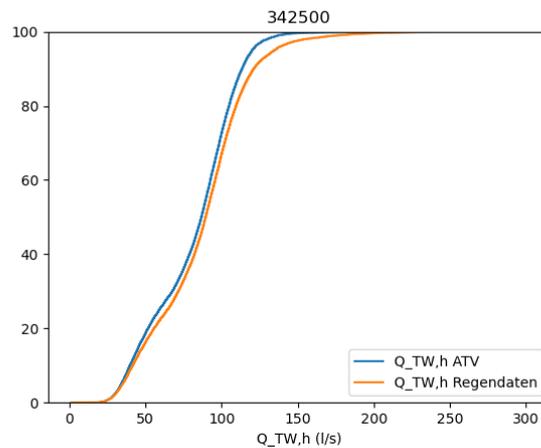


Abbildung 10: Kumulative Verteilung des Trockenwetterabflusses mit der Methode des gleitenden Minimums (ATV) und der Regen-Methode. Man sieht, dass die Differenz zwischen beiden Kurven durch grössere maximale Trockenwetterabflüsse aus den Regendaten verursacht werden.

6. Diskussion

Bei 10-40% der Anlagen liegen die f_{S,Q_M} -Werte unter dem empfohlenen Bereich. Die Resultate der 67 ARAs deuten darauf hin, dass eine Erhöhung des Q_{\max} dieser Anlagen die Leistung des Entwässerungssystems verbessern könnte. Die Ergebnisse hängen aber u.a. von wichtigen Einflussfaktoren ab, wie ARA-spezifischen Gegebenheiten und Annahmen bei den angewandten Methoden. Im folgenden werden die Resultate bezüglich der Einflussfaktoren und ihrer Sensitivität diskutiert. Ausserdem werden Möglichkeiten für weitergehende Ansätze und Analysen beschrieben.

Die Abbildungen zu den Zwischenresultaten in Kapitel 5.2.1 dienen der Interpretation der f_{S,Q_M} -Werte einzelner ARAs. Man sieht, dass die Prozesse im Einzugsgebiet (Niederschlag, Schnee, Wintertourismus) grundsätzlich gut abgebildet werden können und die Resultate der Berechnungen plausibel sind. Bei anderen Methoden wird teilweise für die Berechnung von Schmutzwasser das Jahresmittel vom Fremdwasser vom Trockenwetter abgezogen (Bast 2021; DWA 2003). Beim Fremdwasser sieht man in den Resultaten eine relative grosse Variabilität. Mit der Differenz zu einem Jahresmittel wären Einflüsse durch z.B. Wintertourismus nicht sichtbar. Es würden zudem künstliche Effekte hinzugefügt. Durch die erhöhten Trockenwetterzuflüsse im Sommer 2021 würde mit der Verwendung eines Fremdwassermittels das Schmutzwasser überschätzt. Das Fremdwasser sollte daher erst nach der Berechnung des Schmutzwassers gemittelt werden.

Die beiden Abbildungen zeigen Unterschiede zwischen den verschiedenen Jahren (vgl. Abb. 7 und Abb. 8). Diese können Anhaltspunkte bei der Interpretation unterschiedlicher f_{S,Q_M} -Werte für die einzelnen Anlagen sein. Die ARA kann sich z.B. folgende Fragen stellen:

- Wurde die ARA in anderen Jahren auf einem anderen Q_{\max} betrieben?
- Wieso wird der Drosselabfluss so oft oder so selten erreicht?
- Sind Prozesse aus dem Einzugsgebiet für unterschiedliche f_{S,Q_M} -Werte verantwortlich?
- Sind Veränderungen auf der ARA für unterschiedliche f_{S,Q_M} -Werte verantwortlich?

Man sieht, dass für die Beantwortung dieser Fragen genauere Kenntnisse der ARA und des EZG erforderlich sind. Die fehlenden ARA-spezifische Informationen sind zudem eine wichtige Unsicherheitsquelle. Es könnte eine Abhängigkeit von der Messstelle des ARA-Zulaufs bestehen. Zum Beispiel haben Pumpen einen starken Einfluss auf Fremdwassermessung. Falls sich nach der Zulaufmessung Entlastungen befinden, würde der f_{S,Q_M} -Wert überschätzt. Ebenfalls wurde der Einfluss des Trennsystems nicht untersucht.

Detailliertere Analysen und Einzelbetrachtungen waren nicht Ziel dieser Arbeit. Anhand der zwei Abbildungen zeigt sich jedoch, dass die Ergebnisse auch für einzelne ARAs zur weiteren Analyse interessant sein können.

Die automatisierte Pre-Validierung nach Clemens-Meyer u. a. (2021) ist ein erster Schritt, um mit einer hohen Wahrscheinlichkeit unplausible Werte aufzuzeigen. Das Fehlen von Metadaten und die Menge der zu bearbeitenden Datensätze haben den von ihm als eigentliche 'Validierung' genannten Schritt nicht ermöglicht. Dieser Mangel an zusätzlichen Informationen erschwert es, zwischen qualitätsarmen Daten und möglicherweise falsch ausgelegten Datenchecks zu unterscheiden. Der zweite Teil der Validierung müsste jedoch spätestens dann, wenn einzelne ARAs genauer untersucht werden sollten, in Erwägung gezogen werden. Dies nicht zuletzt, um korrekte Handlungsempfehlungen geben zu können.

Um die Eignung der Datenchecks für die ARA Zulaufdaten besser einschätzen zu können, schlagen wir vor, eine Sensitivitätsanalyse für den Range- und den Gradientencheck durchzuführen. Diese beiden Checks basieren auf Quantilen; es ist zu erwarten, dass eine Änderung des Quantils den Score der

Datensätze ändern wird. Auch das benutzte Zeitfenster beim Gradientencheck könnte variiert werden, z.B. in Abhängigkeit der Zeitauflösung des Datensatzes. Beim Frozencheck ist der Grenzwert der Anzahl eingefrorener Werte auf vier gesetzt worden, da in der Literatur keine Empfehlungen zu finden waren. Dieser Grenzwert könnte aber auch erhöht werden, insbesondere bei niedrigerer Auflösung der Daten.

Die hier implementierte Validierung vernachlässigt u.a. existierende räumliche und zeitliche Korrelationen der Daten. Insbesondere bei Regenwetter sind (zeitverschobene) Korrelationen der Zuflüsse benachbarter ARAs zu erwarten und einzelne Datenpunkte, die diesem Gang nicht folgen, könnten somit als unplausibel erkannt werden. Zeitliche Autokorrelationen sind häufig vorkommende Phänomene bei Sensoren (Trends, wiederkehrende Werte) und könnten z.B. mithilfe von autoregressiven Modellen erfasst und von den Daten subtrahiert werden. Um komplexere Anomalien zu erkennen, müsste letztendlich auf Maschinelles Lernen zurückgegriffen werden, entweder durch eine eigene Implementierung (z.B. in Form eines Autoencoders (Russo u. a. 2020)) oder durch Übermitteln der Daten an bereits spezialisierte Plattformen, beispielweise an Microsoft Azure Stream Analytics oder an RICHI (Disch und Rieckermann 2020). Mit der zunehmenden Menge an verfügbaren Daten aus verschiedenen Systemen und dem Hintergrund der integrierten Wasserbewirtschaftung ist das Projekt RICHI entstanden. Dieses Pilotprojekt der Eawag existiert mit der Unterstützung von Ingenieurfirmen und Verbänden bereits seit knapp zwei Jahren und hat als Ziel, gemessene Daten für die Kanalnetz- oder ARA-Betreiberin möglichst schnell zu validieren und gegebenenfalls Rückmeldungen zu geben. Für die Datenauswertung wird ein ganzes Spektrum an Validierungsmethoden verwendet, von einfachen Datenchecks (ähnlich wie in dieser Arbeit) bis hin zu komplexen neuronalen Netzwerken zur Erkennung von Anomalien. Insgesamt fünf Datensätze wurden an RICHI geschickt mit der Absicht, die Scores der ähnlichen Datenchecks zu vergleichen und somit die hier implementierten Datenchecks beurteilen zu können. Die Resultate von RICHI konnten aus Zeitgründen nicht mehr im Bericht aufgenommen werden.

Wie bereits einleitend erwähnt, ist es wahrscheinlich, dass eine Stichprobenverzerrung vorhanden ist. Die Einsendung der Daten für die Arbeit basierte auf freiwilliger Basis. Die Folge kann sein, dass nur Daten von Anlagen eingesendet werden, die vorbildlich betrieben werden oder bei denen die Reinigung sehr gut funktioniert. Zudem sind die französisch- und italienischsprachigen Landesteile untervertreten. Ein Indiz für die Verzerrung könnte sein, dass die f_{S,Q_M} -Werte von Bast (2021) für den Kanton Bern geringer sind als unsere (vgl. Abb. 6a). Für eine zukünftige Auswertung wäre es wichtig, schweizweit umfassende und repräsentative Daten zur Verfügung zu haben. Die Anpassung des Mischwasserzuflusses ist eine kostengünstige und einfache Möglichkeit, das Entwässerungssystem zu optimieren. Es wäre daher auch im Interesse der ARA Betreiber und der Kantone den aktuellen Stand der Regenabwasserbehandlung auf den ARAs zu erheben.

Die Abbildung 6 zeigt zunächst, dass die meisten Kläranlagen in der Schweiz ausreichend oder mehr als der nach ATV empfohlenen Regenabwassermenge behandeln. Sowohl in der Aufteilung nach der Anzahl Einwohner:innen als auch in der Aufteilung nach Reinigungsart treten einige Diskrepanzen auf: in den Figuren 6a und 6c haben die nitrifizierenden Anlagen (in grün) einen grösseren f_{S,Q_M} -Faktor, als es die Anlagen ohne Stickstoffbehandlung haben. Dies ist jedoch sehr unwahrscheinlich, da stickstoffeliminierende Prozesse mehr Zeit in Anspruch nehmen und allgemein weniger robust sind, u.a. bei niedrigeren Temperaturen sind als die Elimination von organischer Stoffe. Auch die Korrelation zwischen Grösse der ARA und f_{S,Q_M} ist bei Bestimmung der Trockenwettertage mittels Regendaten linearer. Wir vermuten daher, dass die Abbildungen 6b und 6d der wahren Grösse des Spreizungsfaktor näher kommen als es die reinen Berechnungen nach ATV aussehen lassen. Demzufolge wäre

bei rund 40% der Kläranlagen das Potenzial für eine Erhöhung des Q_{max} vorhanden. Inwiefern dies wirklich möglich ist, hängt u.a. von den Prozessen innerhalb der Kläranlage ab und kann mit unserer Analyse nicht beurteilt werden. Die Aufteilung nach Reinigungsart deutet jedenfalls darauf hin, dass komplexere Anlagen einen kleineren f_{S,Q_M} bevorzugen; vermutlich wird dies auch mit Hinblick auf die Erweiterung von Kläranlagen mit der Eliminierung von Mikroverunreinigungen so bleiben.

Einige jährliche f_{S,Q_M} verzerren das Bild, da nicht genug Daten über das ganze Jahr vorhanden waren. Die ARA mit dem höchsten f_{S,Q_M} hat im Jahre 2018 den unplausiblen f_{S,Q_M} von knapp 300, der jedoch nicht in die Berechnung hätte fließen sollen, da nur zwei Monate des Jahres vorhanden waren. In Abbildung 6 ist der Median von f_{S,Q_M} dargestellt. Die Mediane der verschiedenen ARAs wurden über unterschiedliche Zeitspannen berechnet. Anhand der uns zugeschickten ARA-Daten erhalten wir f_{S,Q_M} -Werte für die Jahre 2017 - 2021, während die Spreizungsfaktoren von Bast 2021 über die Jahre 2010 - 2019 ermittelt wurden. Um diese weitere Unsicherheit zu beseitigen wäre es sinnvoll, f_{S,Q_M} entweder über längere Zeitperioden zu erfassen und zu vergleichen oder über kurze Perioden ausschliesslich gleiche Jahre zu betrachten.

Die Übertragung einiger Datenchecks, insbesondere des Frozenchecks auf die berechneten Abflusskomponenten wäre eine einfach implementierbare Option, um diese auf unplausible Werte zu überprüfen.

Der Vergleich der ATV-Methode mit den Regendaten für die Bestimmung Trockenwettertage zeigt eine grundsätzlich gute Übereinstimmung. Man sieht, dass die Berechnung von f_{S,Q_M} sehr sensitiv auf die Trockenwettertage ist. Die Bestimmung der Trockenwettertage hat einen direkten Einfluss auf das Fremd- und Schmutzwasser. Teilweise bestehen grosse Unterschiede zwischen ATV und der Regen-Methode. Wir vermuten, dass das gleitende Minimum nicht für alle Daten zuverlässig funktioniert. Durch das gleitende Minimum über 21 Tage wird angenommen, dass innerhalb dieser 21 Tage mindestens einmal Trockenwetterabfluss vorkommt. Zudem wird eine 20% Schwelle angewandt (vgl. Kap.4.3). Nachlauftage von Regenereignissen werden dadurch möglicherweise ungenügend berücksichtigt. Bei der Regen-Methode müssen Annahmen über die Grenzniederschlagshöhe und die Anzahl Nachlauftage getroffen werden. In dieser Arbeit wurde als Grenzniederschlagshöhe für alle ARAs 0.3 mm/d verwendet. Aufgrund der räumlich heterogenen Verteilung der Niederschlagssumme und Häufigkeit (MeteoSchweiz 2020), könnte die Regen-Methode mit unterschiedlichen Grenzwerten nach ARA Standorten verbessert werden. Ebenfalls wurde der Zeitpunkt des Regens und Temperatur nicht einbezogen. Dazu wären Daten mit höherer zeitlichen Auflösung und die Implementierung einer Temperaturabhängigkeit nötig.

Eicher (2008) schlägt vor, Niederschlagsmessungen nicht direkt zu verwenden und zusätzlich die Grundwasser-Situation zu berücksichtigen. Seine Untersuchungen im Kanton Solothurn zeigen, dass das Grundwasser einen wesentlichen Teil des Fremdwassers ausmachen kann. Eine weitere Möglichkeit die Methode zu verbessern, wären detaillierte Bevölkerungsdaten im Einzugsgebiet. Es konnte bereits gezeigt werden, dass der tägliche Abfluss stark mit der Anzahl Handy-Nutzer im Einzugsgebiet korreliert (Troxler 2018). Die Auswertung von Mobilfunkdaten könnte daher auch zur Plausibilisierung der Resultate verwendet werden.

Es zeigt sich, dass bei beiden Methoden Unsicherheiten bestehen. Eine Übereinstimmung der Trockenwettertage der beiden Methoden erhöht die Glaubwürdigkeit des berechneten f_{S,Q_M} . Dies könnte quantitativ durch die Differenz der kumulativen Verteilungen des Trockenwetterabflusses (Abb. 10) beschrieben werden.

In dieser Arbeit wurde der Faktor f_{S,Q_M} nach Schab (2018) als Kennwert für die Bewirtschaftung des Gesamtsystems verwendet. Das f_{S,Q_M} wird mit dem maximale Zufluss pro Jahr (Q_{max}) berechnet. Es wird jedoch nicht berücksichtigt wie häufig dieser maximale Zufluss pro Jahr (i.d.R. der Drosselabfluss)

erreicht wird. Ein häufig erreichter Drosselabfluss wäre in einem System mit grossem Speichervolumen nicht problematisch. Falls kein Speichervolumen vorhanden ist, wird beim Erreichen des Drosselabflusses wahrscheinlich entlastet. Auf der anderen Seite, wenn der Drosselabfluss sehr selten erreicht wird, ist es ein Hinweis, dass der Zulauf zur ARA häufig grösser sein könnte. Durch die Erhöhung des Zuflusses zur ARA könnten Entlastungen im Einzugsgebiet verringert werden. Das Potenzial der Vergrösserung des ARA-Zuflusses haben Gresch und Sigrist 2019 mit einer Reduktion des Überlaufvolumens um 10-15% geschätzt (Abb. 1). Die Unterschiede im Q_{\max} sind zum Beispiel sichtbar, wenn man in Abbildung 7 die Jahre 2017-2018 mit den Jahren 2019-2021 vergleicht. Wie häufig Q_{\max} in einem Jahr auftritt, könnte durch eine adaptierte Version des Frozenchecks ermittelt werden. Die Häufigkeit des Drosselabflusses würde das Gesamtsystem weiter charakterisieren. Wir schlagen deshalb vor, in einer zukünftigen Arbeit auch die Häufigkeit von Q_{\max} in die Analyse zu integrieren.

Neben der Häufigkeit des Drosselzuflusses könnte das Einzugsgebiets-spezifische Speichervermögen (auch 'i-Wert', Einheit: $\text{m}^3/\text{ha}_{\text{red}}$) verwendet werden (nach Holinger 2019). Die Daten, die für diese Berechnung benötigt werden, werden im Rahmen des GeoIG in Zukunft durch die Behörden veröffentlicht (*Bundesgesetz über Geoinformation 2007; Verordnung über Geoinformation 2008; Dominguez 2021*). Am Beispiel einiger Anlagen konnten die Daten bereits dargestellt werden (Vorabzug, Abb. 14 in Anhang H). Es zeigt sich, dass erst wenige Anlagen auf die Bewirtschaftung des Gesamtsystems ausgelegt sind.

Die Bewirtschaftung von ARA und Einzugsgebiet könnte in Zukunft durch die drei Kennwerte - Faktor $f_{S,QM}$, Häufigkeit von Q_{\max} pro Jahr und dem i-Wert - charakterisiert werden.

Bisher wurde das System Einzugsgebiet, ARA und Gewässer vorwiegend modell-basiert betrachtet. Die zunehmende Verfügbarkeit von Messdaten erlauben nun auch die Beurteilung der tatsächlichen Bewirtschaftung. Hier konnten wir zeigen, dass nur anhand von einfacher Analysen des ARA Zulaufs bereits substanzielle Informationen gewonnen werden können. Wenn sich herausstellen sollte, dass Anlagen mit einem $f_{S,QM}$ von 2 oder 3 mehr Q_{\max} aufnehmen könnten, kann mit kostengünstigen Massnahmen optimiert werden. Die Erhöhung von Q_{\max} könnte statisch saisonal, ganzjährig oder dynamisch erfolgen.

7. Schlussfolgerungen

Die zu Beginn gestellten Forschungsfragen konnten grösstenteils beantwortet werden. Für einige Fragen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht bearbeitet werden konnten, werden mögliche Lösungsansätze vorgeschlagen.

1. *Wie gross ist der Faktor f_{S,Q_M} im tatsächlichen Betrieb der Schweizer ARAs?*

Ergibt die Berechnung mit den Methoden nach ATV-DVWK A-198 plausible Resultate?

Bei 10-40% der Anlagen liegen die f_{S,Q_M} -Werte unter dem empfohlenen Bereich. Unsere Resultate deuten darauf hin, dass eine Erhöhung des Q_{\max} dieser Anlagen die Leistung des Entwässerungssystems verbessern könnte. Die Berechnung des f_{S,Q_M} -Faktors ist stark sensitiv auf die Trockenwettertage. Mit der Regen-Methode zeigt sich, dass Anlagen mit Stickstoffeliminierung kleinere f_{S,Q_M} -Werte aufweisen als die anderen Anlagen. Da stickstoffeliminierende Prozesse mehr Zeit in Anspruch nehmen und allgemein weniger robust sind, ist auch ein kleinerer f_{S,Q_M} -Wert zu erwarten. Wir vermuten daher, dass mit der Regen-Methode die Realität besser abgebildet wird.

2. *Wie ist die Datenqualität der ARA-Zulaufdaten, die für die Analyse verwendet werden?*

Welche Methoden sind für eine automatisierte Auswertung der Zulaufdaten zweckmässig? Inwiefern die Zeitauflösung der Rohdaten ausschlaggebend für ein plausibles Endresultat?

Die Datenqualität der Zulaufdaten ist im Durchschnitt gut. Die zwei Datenchecks *range* und *frozen* zeigen für einige ARAs schlechtere Scores auf. Eine Validierung der Methoden ist nur durch weitere Instrumente möglich (z.B. mit RICHI). Mit unseren Berechnungen zeigten sich keine Unterschiede zwischen der Zeitauflösung. Mit weiteren Untersuchungen, insbesondere in Bezug auf die ATV-Methoden, könnten der Einfluss der Zeitauflösung abgeschätzt werden.

3. *Kann die Gültigkeit der Annahmen für die Ermittlung der Trockenwettertage mit Regendaten überprüft werden? Kann die Berechnung des Fremdwassers mit Grundwasserdaten überprüft werden? Ist eine Überprüfung der Berechnung von Schmutzwasser mit detaillierten Bevölkerungsdaten aus Mobilfunknetzen möglich?*

Die verwendete Methode (nach ATV) zeigte grundsätzlich plausible Resultate und die Charakteristiken in Schmutz- und Fremdwasser wurden abgebildet. Durch die Verwendung der Regendaten konnte die starke Sensitivität der f_{S,Q_M} -Berechnung auf die Trockenwetter-Methode gezeigt werden. Es würde sich daher lohnen weitere Daten beizuziehen. Eine Plausibilisierung mit Grundwasser- und Mobilfunkdaten war jedoch aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

4. *Mit welchen Kennwerten einer Kläranlage oder Einzugsgebiets kann die Auslegung der Siedlungs-entwässerung zusätzlich charakterisiert werden? Korreliert der Faktor f_{S,Q_M} mit der Anzahl angeschlossener Einwohner, der Höhe oder der Grösse des Gewässers?*

Eine Korrelation zu möglichen ARA- und EZG-spezifischen Werten konnte nicht nachgewiesen werden. Durch die Ergebnisse lässt sich erkennen, dass f_{S,Q_M} als Kenngrösse für die Bewirtschaftung in Zukunft mit dem *i*-Wert und der Häufigkeit von Q_{\max} pro Jahr ergänzt werden könnte.

In der Diskussion wurden die Erkenntnisse, Limitierungen und weiteren Möglichkeiten beschrieben. Die offene Fragen und wichtige Erkenntnisse für zukünftige Arbeiten sind: i) Analyse mit grösserer Anzahl Datensätze (schweizweit), ii) Auswertung des Einflusses der zeitlichen Auflösung der Daten bezüglich der ATV-Methoden, iii) Untersuchung des Einflusses von Trennsystem und Mischsystem auf den Faktor f_{S,Q_M} , vi) Verbesserung der Methode zur Bestimmung der Trockenwettertage mit Grundwasserdaten, v) Einbezug von Mobilfunkdaten für die genauere Abschätzung des Schmutzwasserabflusses und vi) Ergänzung der Analyse mit weiteren Kennwerten, die die Bewirtschaftung des Entwässerungssystem charakterisieren können (*i*-Wert und Häufigkeit von Q_{\max}).

Literatur

- Anaconda Software Distribution* (2020). Version Vers. 2-2.4.0. URL: <https://docs.anaconda.com/>.
- Bast, Marc (2021). *Regenwasserbehandlung auf Berner Abwasserreinigungsanlagen. Studie anhand von ARA-Daten*. Bachelorarbeit Umweltingenieurwissenschaften ETH.
- Bertrand-Krajewski, J. L. und M. Muste (2008). *Data Validation: Principles and Implementation*.
- Bundesgesetz über Geoinformation* (2007). Stand am 1.10.2009. URL: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2008/388/de>.
- Clemens-Meyer, Francois H. L. R., Mathieu Lepot, Frank Blumensaat, Dominik Leutnant und Guenter Gruber (2021). *Data validation and data quality assessment*, S. 327–390. ISBN: 9781789060119. DOI: 10.2166/9781789060119_0327.
- Disch, Andy und Jörg Rieckermann (2020). *Virtual employees assisted sewer management*. URL: <https://www.eawag.ch/en/departement/sww/projects/virtual-employees-assisted-sewer-management/> (besucht am 22. 12. 2021).
- Dittmer, Ulrich, Anna Bachmann-Machnik und Marie A. Launay (2020). “Impact of Combined Sewer Systems on the Quality of Urban Streams: Frequency and Duration of Elevated Micropollutant Concentrations”. In: *Water* 12.3. ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w12030850.
- Dominguez, Damian (2021). (BAFU), persönliche Kommunikation mit Jörg Rieckermann.
- DWA (2003). *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*. ger. ATV-DVWK-Regelwerk Arbeitsblatt A 198. Hennef: ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft. ISBN: 978-3-924063-48-1.
- (2012). “Fremdwasser in Entwässerungssystemen ausserhalb von Gebäuden”. ger. In: ATV-DVWK-Regelwerk Merkblatt DWA-M 182.
- Eicher, Christian (2008). *Rückschlüsse aus ARA-Betriebsdaten auf die Situation im Kanalnetz, Bericht zu einer Untersuchung an Kläranlagen im Kanton Solothurn*. Techn. Ber. Amt für Umwelt, Kanton Solothurn.
- Fuchs, Stephan, Steffen Lucas, Hansjörg Brombach, Gebhard Weiss und Bernd Haller (2003). “Fremdwasserprobleme erkennen - methodische Ansätze”. In: *KA - Abwasser, Abfall* 50, S. 28–32.
- GDAL/OGR contributors (2021). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://gdal.org>.
- Gresch, Markus und Adrian Sigrist (2019). “Potenzial von integraler Bewirtschaftung von Kanalnetz und Abwasserreinigungsanlagen: Ein empirischer Vergleich”. In:
- Harris, Charles R., K. Jarrod Millman, Stéfan J. van der Walt, Ralf Gommers, Pauli Virtanen, David Cournapeau, Eric Wieser, Julian Taylor, Sebastian Berg, Nathaniel J. Smith, Robert Kern, Matti Pícus, Stephan Hoyer, Marten H. van Kerkwijk, Matthew Brett, Allan Haldane, Jaime Fernández del Río, Mark Wiebe, Pearu Peterson, Pierre Gérard-Marchant, Kevin Sheppard, Tyler Reddy, Warren Weckesser, Hameer Abbasi, Christoph Gohlke und Travis E. Oliphant (Sep. 2020). “Array programming with NumPy”. In: *Nature* 585.7825, S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- Holinger (2019). *Nutzen Gesamtsystem ÄRA-Netz-Gewässer*.

- Hunter, J. D. (2007). “Matplotlib: A 2D graphics environment”. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3, S. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
- Kunz, Manuel, Yael Schindler Wildhaber, Anne Dietzel, Irene Wittmer und Vera Leib (2016). “Zustand der Schweizer Fließgewässer. Ergebnisse der Nationalen Beobachtung Oberflächengewässerqualität (NAWA) 2011–2014.” In: Umwelt-Zustand Nr. 1620.
- Mauchle, Arnold, Michael Brögli, Hans Balmer und Frank Blumensaat (2018). “Integrierte Simulation von Kanalnetz und ARA. Modellbasierte Beurteilung von Bewirtschaftungsstrategien”. In: *Aqua & Gas* 10.
- Maurer, Max und Anja Herlyn (2006). *Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung*.
- McKinney, Wes (2010). “Data Structures for Statistical Computing in Python”. In: *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Hrsg. von Stéfan van der Walt und Jarrod Millman, S. 56–61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- MeteoSchweiz (2020). *Normwerte Niederschlag 1991-2020*. URL: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/normwerte-pro-messgroesse-und-station.html>.
- MeteoSwiss (Sep. 2021). *Daily Precipitation (final analysis): RhiresD*. aufgerufen am 26.11.2021. URL: https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publicationen/produkt/raeumliche-daten-niederschlag/doc/ProdDoc_RhiresD.pdf.
- Munz, W. (1966). “Die Wirkung verschiedener Gewässerschutzmassnahmen auf den Vorfluter”. In: *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, Basel*.
- Rossi, Luca (2021). “Integrale Wasserbewirtschaftung. Ein Schwerpunkt des VSA - Umsetzungsbeispiele”. In: *Aqua & Gas* 2.
- Russo, Stefania, Andy Disch, Frank Blumensaat und Kris Villez (2020). “Anomaly Detection using Deep Autoencoders for in-situ Wastewater Systems Monitoring Data”. In: arXiv: 2002.03843. URL: <http://arxiv.org/abs/2002.03843>.
- Schab, Julian (2018). “ Q_M und $f_{S,QM}$ - Wichtige Parameter für die Gesamtsystembetrachtung/-optimierung von Kläranlage, Mischwasserbehandlung und Gewässer.” In: Vortragsfolien und Manuskript zur DWA Lehrer- und Obmannatagung im Kurhaus Bad Cannstatt, <https://confluence.dwa-bw.de>.
- The pandas development team (Feb. 2020). *pandas-dev/pandas: Pandas*. Version latest. DOI: 10.5281/zenodo.3509134. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>.
- Troxler, Patrick (2018). “Predicting Inflow to WWTP Oberengadin”. Magisterarb. ETH Zürich.
- Verordnung über Geoinformation* (2008). Stand am 1.7.2021. URL: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2008/389/de>.
- VSA (2016). “Definition und Standardisierung von Kennzahlen für die Abwasserentsorgung”. In: Walsh, Christopher J., Allison H. Roy, Jack W. Feminella, Peter D. Cottingham, Peter M. Groffman und Raymond P. Morgan (2005). “The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure”. In: *Journal of the North American Benthological Society* 24.3, S. 706–723. DOI: 10.1899/04-028.1.

Waskom, Michael, Olga Botvinnik, Drew O’Kane, Paul Hobson, Saulius Lukauskas, David C Gemperline, Tom Augspurger, Yaroslav Halchenko, John B. Cole, Jordi Warmenhoven, Julian de Rooter, Cameron Pye, Stephan Hoyer, Jake Vanderplas, Santi Villalba, Gero Kunter, Eric Quintero, Pete Bachant, Marcel Martin, Kyle Meyer, Alistair Miles, Yoav Ram, Tal Yarkoni, Mike Lee Williams, Constantine Evans, Clark Fitzgerald, Brian, Chris Fonnesbeck, Antony Lee und Adel Qalieh (Sep. 2017). *mwaskom/seaborn: v0.8.1 (September 2017)*. Version v0.8.1. DOI: 10.5281/zenodo.883859. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.883859>.

Anhang D Variabilität der Schmutz- und Fremdwasseranteile (Tageswerte)

Tabelle 4: Variationskoeffizient (CV) des Schmutz- und Fremdwasseranteils.

ARA-Nr.	CV SW	CV FW	ARA-Nr.	CV SW	CV FW	ARA-Nr.	CV SW	CV FW
	0.17	0.32		0.86	0.77		0.48	0.28
	0.36	0.23		0.12	0.23		0.35	0.19
	0.14	0.3		0.2	0.36		0.34	0.67
	0.51	0.57		0.13	0.44		0.21	0.26
	0.16	0.35		0.16	0.19		0.22	0.41
	0.36	0.37		0.38	0.53		0.18	0.27
	0.15	0.38		0.23	0.25		0.15	0.35
	0.16	0.33		0.19	0.42		0.61	0.43
	0.16	0.57		0.12	0.19		0.13	0.2
	0.1	0.34		0.36	0.47		0.13	0.28
	0.16	0.57		0.13	0.18		0.14	0.38
	0.16	0.25		0.33	0.34		1.07	0.39
	0.11	0.27		0.32	0.38		0.12	0.29
	0.17	0.34		0.21	0.29		0.17	0.2
	0.21	0.24		0.13	0.29		0.43	0.33
	0.15	0.24		0.14	0.4		0.17	0.51
	0.24	0.28		0.22	0.36		0.37	0.43
	0.18	0.22		0.18	0.28		0.37	0.43
	0.23	0.3		0.11	0.28		0.17	0.27
	0.14	0.22		0.38	0.32		0.16	0.4
	0.16	0.24		0.35	0.49		0.18	0.47
	0.16	0.39		0.34	0.43			
	0.52	0.32		0.38	0.48			

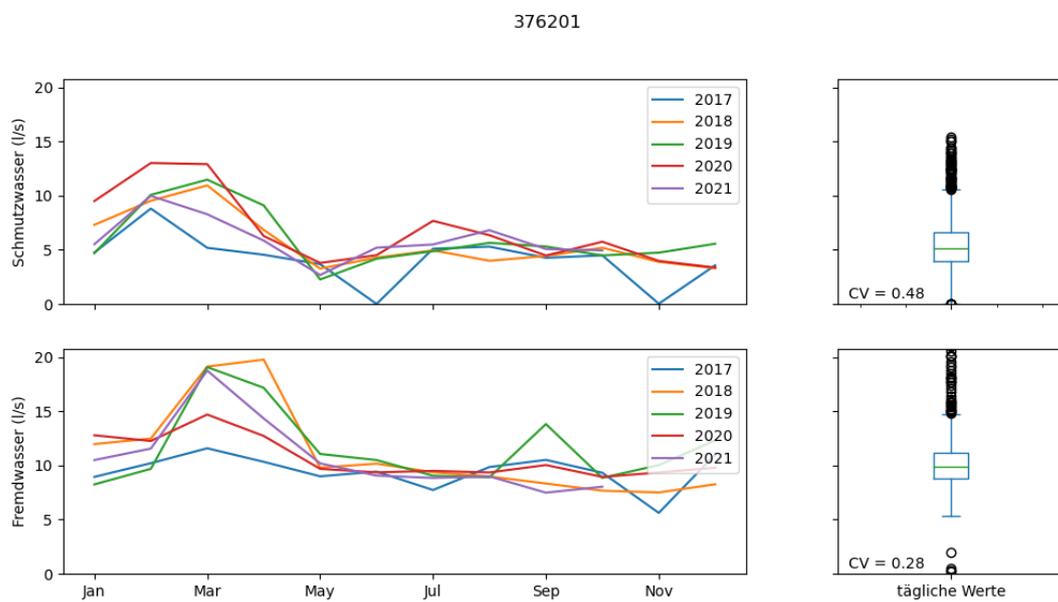


Abbildung 11: Variation des berechneten Schmutz- und Fremdwasseranteils der ARA Nr. 376201 als Beispiel für eine ARA im Kanton Graubünden. Es erkennbar, dass der Schmutzwasserabfluss in den Wintermonaten erhöht ist. **Links:** Monatsmittel, **Rechts:** Variation der täglichen Werte.

Anhang E Regendaten

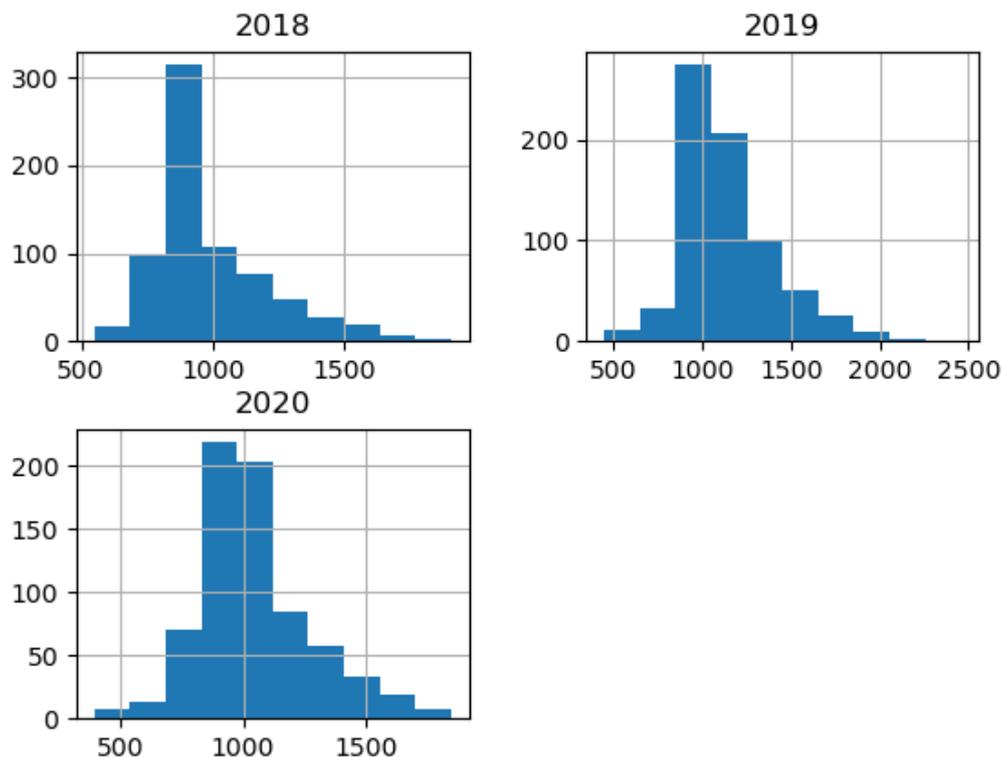
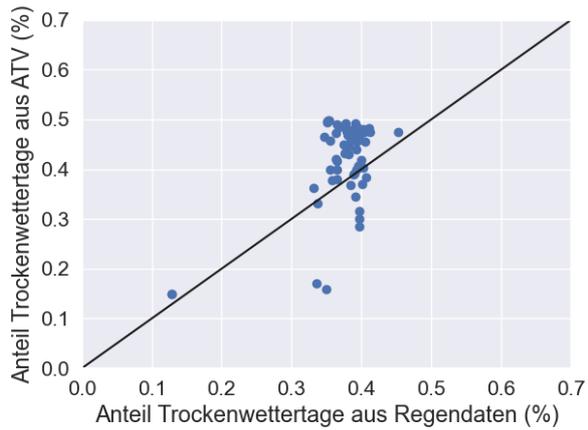
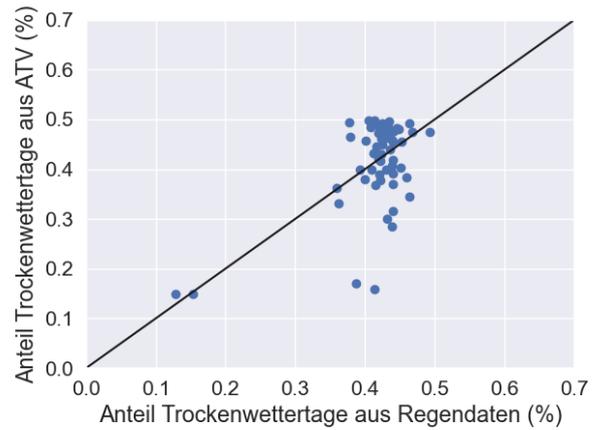


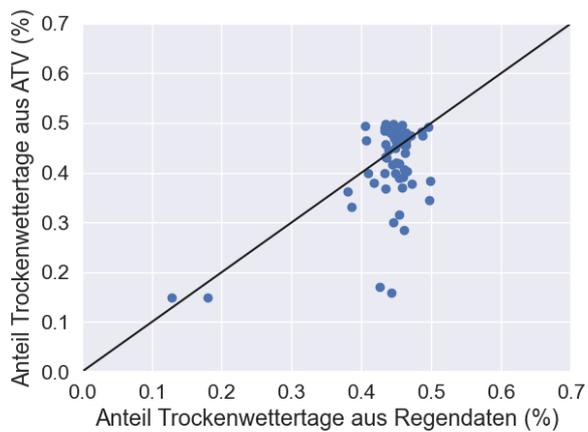
Abbildung 12: Histogramm der Jahressumme des Niederschlages (mm/a) für alle ARA Standorte der Schweiz (2018-2020). Es ist erkennbar, dass im Mittel ca. 800-1'200 mm Niederschlag pro Jahr fällt. Dies entspricht den Messdaten von MeteoSchweiz: Der Median aller Schweizer Messstationen liegt bei 1208 mm/a (MeteoSchweiz 2020).



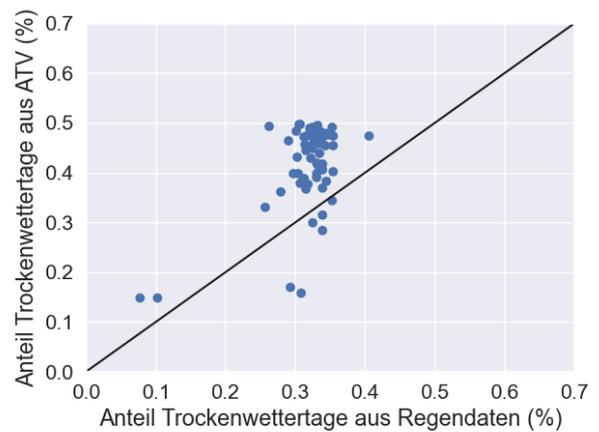
(a) 0.1 mm, 1 Tag ($R^2=0.36$)



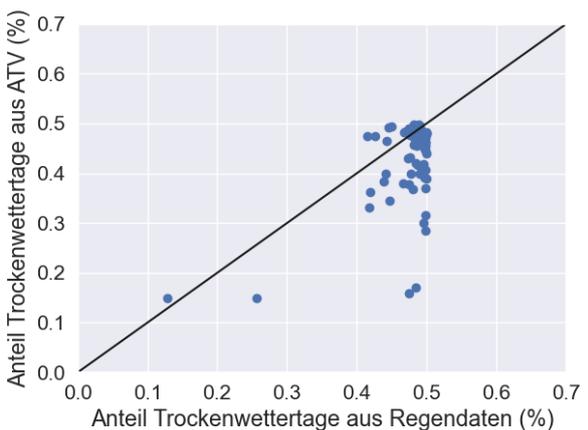
(b) 0.3 mm, 1 Tag ($R^2=0.35$)



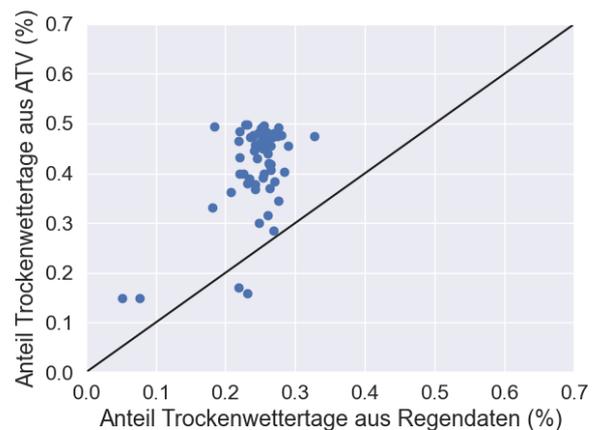
(c) 0.5 mm, 1 Tag ($R^2=0.33$)



(d) 0.3 mm, 2 Tage ($R^2=0.34$)



(e) 1 mm, 1 Tag ($R^2=0.29$)



(f) 0.3 mm, 3 Tage ($R^2=0.31$)

Abbildung 13: Sensitivität der Methode mit Regendaten auf die Grenzniederschlagshöhe und die Anzahl Nachlauf-tage. In Nordrhein-Westfalen wird eine Niederschlagshöhe von 0.3 mm/d (inkl. 1 Nachlauf-tag) verwendet für die Abgrenzung von Trockenwettertagen (DWA 2012). MeteoSchweiz verwendet eine Grenzniederschlagshöhe von 1 mm/d (ohne Nachlauf-tag) (MeteoSchweiz 2020). In dieser Arbeit werden 0.3 mm/d und 1 Nachlauf-tag verwendet.

Anhang F Faktor f_{S,Q_M} pro ARA (ATV-Methode)

Tabelle 5: Der Faktor f_{S,Q_M} pro ARA nach der ATV-Methode. Es ist zu berücksichtigen, dass keine ARA-spezifische Auswertung vorgenommen wurde. Zudem können die Werte für Jahre abweichen, wo die Zeitreihe nicht vollständig vorhanden war.

ARA-Nr.	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	gesamt
alle	6.4	7.2	7.2	8.2	8.3	8.2	8.0	8.1
					6.8	6.8	7.0	6.8
					11.1	13.6	11.9	11.9
				10.7	11.3	10.8	11.1	10.9
				9.6	8.6	8.4	9.9	9.1
		13.6	12.8	14.0	14.3	13.5	12.3	13.6
					6.5	8.6	4.5	6.5
		7.2	6.9	7.7	7.3	8.0	7.4	7.4
			8.2	8.6	9.3	8.6	9.5	8.6
							6.3	6.3
						7.2	7.8	7.5
							6.3	6.3
			10.8	11.8	10.8	9.4	9.8	10.8
			6.0	6.2	6.0	5.8	5.8	6.0
	6.4	6.8	7.2	7.0	7.3	6.9	7.1	7.0
			10.2	14.0	13.1	12.0	12.0	12.0
			12.2	10.5	11.1	9.7	6.2	10.5
					7.5	7.8	7.5	7.5
					10.1	9.4	9.5	9.5
			6.3	6.0	7.1	6.7	6.3	6.3
		5.9	5.9	6.1	6.1	5.9		5.9
			11.1	10.5	10.2	9.5	10.5	10.5
					13.6	13.2	11.8	13.2
			10.0	22.9	11.9	10.2	10.3	10.3
				12.1	13.4	12.2	12.5	12.4
					9.4	10.2	9.8	9.8
					4.6	5.6	12.3	5.6
			4.8	4.4	4.4	4.5		4.5
				6.5	6.5	6.7	6.3	6.5
					4.6	4.9	7.8	4.9
					7.9	8.1	6.4	7.9
				11.4	9.2	8.9	8.2	9.1
					8.6	8.8	8.9	8.8
				284.0	49.6	51.9	86.8	69.4
					7.2	7.0	6.9	7.0
		5.0	5.3	4.1	6.4	4.9	4.7	5.0
			6.0	5.8	6.4	6.4	7.1	6.4
			6.5	8.1	6.7	6.2	6.5	6.5
					6.9	8.2	8.3	8.2
					8.7	9.7	14.1	9.7

F. Faktor f_{S,Q_M} pro ARA (ATV-Methode)

ARA-Nr.	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	gesamt
			4.4	8.1	7.9	7.9	8.7	7.9
				9.0	9.5	8.7	8.9	8.9
			5.4	5.5	6.1	5.9	5.8	5.8
						9.7	8.1	8.9
			8.4	13.4	12.7	7.8	6.0	8.4
	7.5		7.2	7.8	10.7	9.1	9.1	8.5
			8.2	8.2	8.2	8.2	8.7	8.2
			8.4	7.3	7.3	6.2	6.8	7.3
						12.9	8.4	10.6
						24.1	17.5	20.8
	5.6		5.8	5.2	4.7	5.4	5.1	5.3
	8.8		9.2	11.5	10.9	10.3	10.6	10.4
			11.3	11.7	10.9	11.1	11.1	11.1
					7.1	7.3	7.5	7.3
				16.7	11.0	5.5	4.5	8.2
			10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	10.8
					7.4	7.4	8.5	7.4
					8.6	8.2	7.9	8.2
			8.7	9.1	8.6	8.1	7.3	8.6
			10.8	9.0	8.4	8.2	8.0	8.4
			6.0	6.5	4.5	4.4	4.1	4.5
			7.1	7.0	9.3	10.9	11.5	9.3
			11.5	8.9	8.8	8.5	8.1	8.8
			3.7	3.3	3.6	3.5	2.2	3.5
			3.7	3.3	3.6	3.5	2.2	3.5
					8.3	8.3	6.8	8.3
			7.8	7.6	7.6	7.4	7.0	7.6
	7.6		7.1	6.9	7.1	7.3	7.3	7.2

Anhang G Faktor f_{S,Q_M} pro ARA (Regenmethode)

Tabelle 6: Der Faktor f_{S,Q_M} pro ARA nach der ATV-Methode. Es ist zu berücksichtigen, dass keine ARA-spezifische Auswertung vorgenommen wurde. Zudem können die Werte für Jahre abweichen, wo die Zeitreihe nicht vollständig vorhanden war.

ARA-Nr.	2017	2018	2019	2020	2021	gesamt
alle	2.3	3.9	3.7	3.8	2.3	3.3
			4.1	4.3	2.4	4.1
			1.6	1.9	1.4	1.6
		5.8	4.7	4.7	2.6	4.7
		3.5	2.7	2.7	2.0	2.7
	4.7	7.8	8.0	8.3	3.9	7.8
			5.5	2.6	2.1	2.6
	1.7	3.3	2.7	3.4	1.7	2.7
	3.3	5.3	5.9	6.4	3.6	5.3
					1.3	1.3
				4.0	2.5	3.2
					1.3	1.3
	2.5	5.6	4.7	5.4	3.0	4.7
	0.9	3.1	2.5	2.7	1.5	2.5
	2.1	4.5	4.6	4.6	2.9	4.5
	1.6	4.8	3.8	4.0	2.5	3.8
	3.4	5.4	5.0	5.2	2.0	5.0
			2.7	3.5	1.9	2.7
			3.8	4.6	2.5	3.8
	2.1	3.9	3.0	3.3	1.9	3.0
	1.9	3.4	3.3	3.6		3.3
	5.2	5.5	6.0	4.9	3.4	5.2
			3.5	3.2	1.3	3.2
	2.8	4.1	5.2	5.5	3.0	4.1
	0.0	3.0	5.6	5.3	3.2	3.2
			5.9	5.8	3.3	5.8
			6.2	5.1	9.6	6.2
	9.2	10.4	12.1	11.6		11.0
		3.2	2.8	3.1	2.0	2.9
			4.6	4.5	3.0	4.5
			1.3	1.3	0.7	1.3
		5.5	3.9	3.5	1.8	3.7
			5.8	5.2	3.4	5.2
		3.7	9.5	8.0	5.7	6.8
			3.4	3.8	2.2	3.4
	0.8	1.7	1.9	1.4	0.7	1.4
	2.6	4.6	3.6	4.0	3.6	3.6
	1.7	3.7	2.9	2.7	2.3	2.7
			2.2	3.5	2.4	2.4
			3.2	3.7	4.3	3.7

G. Faktor f_{S,Q_M} pro ARA (Regenmethode)

ARA-Nr.	2017	2018	2019	2020	2021	gesamt
	1.6	4.8	3.6	4.1	3.5	3.6
		6.6	4.3	4.8	3.5	4.5
	1.5	3.7	3.2	3.6	2.3	3.2
				4.8	2.7	3.7
	2.0	3.6	3.1	2.5	1.6	2.5
	5.0	4.6	5.6	5.1	4.4	5.0
	5.4	4.4	4.3	5.7	5.3	5.3
	5.2	3.2	2.7	2.9	2.5	2.9
				3.1	2.8	3.0
				9.7	4.5	7.1
	2.9	2.0	1.7	2.9	1.9	2.0
	6.3	6.9	7.1	7.8	5.6	6.9
	2.6	3.8	4.9	4.8	2.2	3.8
			3.7	3.8	1.8	3.7
		2.1	1.9	2.3	0.9	2.0
	4.0	5.1	5.6	6.5	3.4	5.1
			2.4	3.1	1.9	2.4
			3.7	4.5	2.0	3.7
	2.9	2.5	2.6	2.6	2.5	2.6
	3.3	4.0	4.0	4.1	2.0	4.0
	1.1	2.5	1.9	1.8	1.0	1.8
	1.7	2.9	2.6	2.5	1.3	2.5
	2.0	3.3	4.0	3.6	1.9	3.3
	0.5	1.3	1.3	1.2	0.5	1.2
	0.5	1.3	1.3	1.2	0.5	1.2
			2.7	2.8	1.7	2.7
	1.4	4.0	2.8	3.2	2.0	2.8
	7.0	5.4	4.9	5.8	6.1	5.8

Anhang H Untersuchung zu Korrelationen zum Spreizungsfaktor

Durch den Datensatz der ARAs sind zusätzliche Informationen vorhanden. Sie werden in Beziehung zu f_{S,Q_M} betrachtet.

- Angeschlossene Einwohner bzw. Einwohnerwerte: Für den empfohlenen Bereich von f_{S,Q_M} werden die ARAs nach Anzahl der angeschlossenen Einwohnern unterschieden.
- Höhe und Fläche des Einzugsgebiets: Die Höhe einer Kläranlage bzw. ihres Einzugsgebiets könnte das Abflussverhalten beeinflussen, z.B. durch Schneefall und Schneeschmelze.
- Flussordnungszahl (FLOZ): Durch die Flussordnungszahl wird die Grösse des Gewässers charakterisiert, in welches das gereinigte Abwasser einer Kläranlage eingeleitet wird.
- zeitliche Auflösung der Rohdaten: Hat die zeitliche Auflösung der Rohdaten einen Einfluss auf den Faktor f_{S,Q_M}

Basierend auf dem GeoIG werden durch den Bund auch Daten zur Siedlungsentwässerung veröffentlicht. Ein Vorabzug dieser Daten stand für diese Arbeit zur Verfügung. Mit den Daten kann der Faktor f_{S,Q_M} im Verhältnis zum i-Wert betrachtet werden (Abb. 14 nach Holinger 2019). Der i-Wert ist das EZG-spezifische Speichervermögen ($\text{m}^3/\text{ha}_{\text{red}}$). Im Vorabzug der GEP-Daten sind nicht Informationen für jede ARA verfügbar, z.B. die reduzierte Fläche des EZG. Für diese Anlagen wurde als Abflusskoeffizient das arithmetische Mittel der verfügbaren Anlagen angenommen. Abbildung 14 könnte ähnlich wie Abbildung 6 strukturelle Defizite von Anlagen aufzeigen. zusätzlich würde das Speichervolumen des Einzugsgebiets berücksichtigt. Der Bereich von hohem f_{S,Q_M} und hohem i-Wert deutet auf die Bewirtschaftung des Gesamtsystems hin.

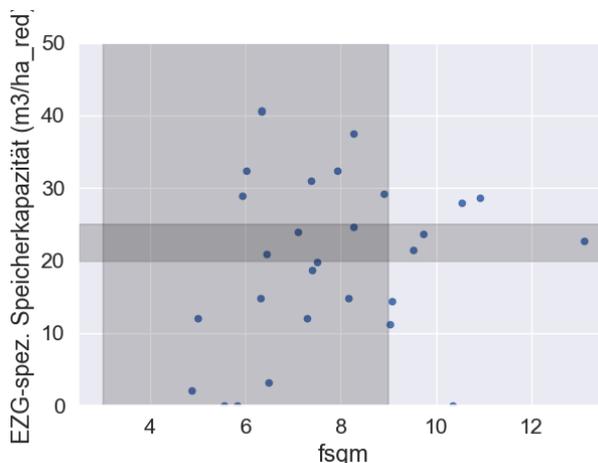


Abbildung 14: i-Wert im Verhältnis zum Faktor f_{S,Q_M} (nach Holinger 2019). Die Abbildung deutet darauf hin, dass wenige Anlagen mit dem Fokus auf das Gesamtsystem betrieben werden (Bereich bei hohem f_{S,Q_M} und hohem i-Wert).

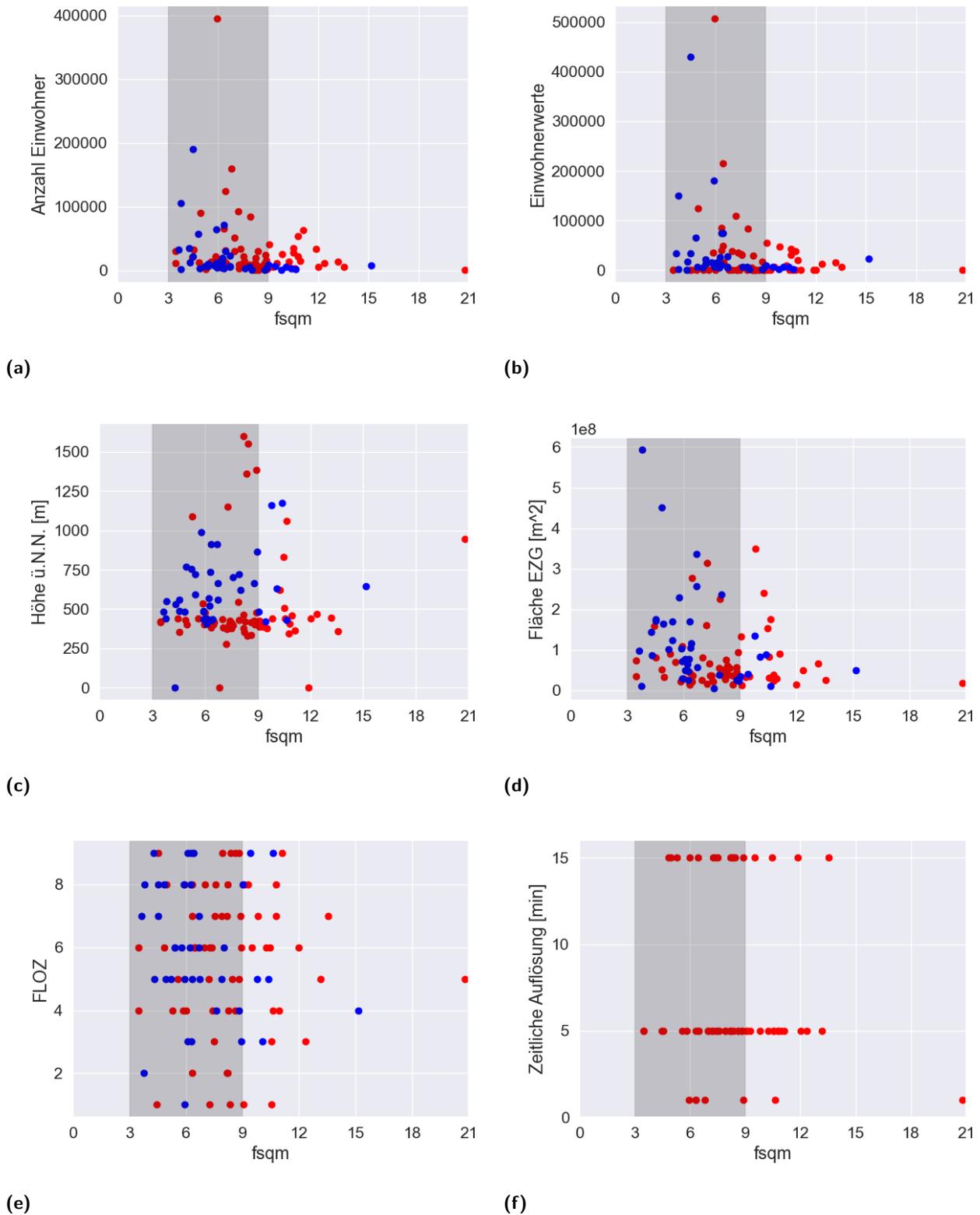


Abbildung 15: Untersuchung möglicher Korrelationen der berechneten Spreizungsfaktoren mit ausgewählten Informationen aus der ARA Datenbank. In rot sind die nach ATV berechneten f_{S,Q_M} -Werte, in blau die Werte von Marc Bast dargestellt.

Anhang I Schreiben an ARA Betreiber

Die folgenden Schreiben wurden im September 2021 an die ARA Betreiber bzw. die Leitsystem-Hersteller versendet. Ein Reminder wurde Anfang November 2021 versendet.

An alle ARA Betreiber der Schweiz

Dübendorf, 17.09.2021

Zulaufdaten für studentische Arbeit zur Analyse des Mischwasserzulaufs auf ARAs

Bei Regenwetter wird der Abwasserreinigungsanlage eine erhebliche Menge Mischabwasser zur Reinigung zugeführt. Einerseits reduziert ein hoher ARA-Zulauf bei Regenwetter die Entlastungen aus Regenüberlaufbecken. Andererseits erhöht sich das Risiko für Schlammabtrieb und eine verringerte Nitrifikationsleistung auf der ARA.

Mittlerweile liegen etablierte Methoden zur Analyse der Mischwasserbelastung vor [1,2] und einige Kantone haben bereits entsprechende Grundlagen aufbereitet [3,4]. **Wir untersuchen zur Zeit mit zwei studentischen Arbeiten die schweizweite Mischwasserbehandlung auf ARAs** und bitten Sie, zusammen mit dem VSA, uns 2-5 Jahre Zulaufmessungen zur Verfügung zu stellen.

Das konkrete Ziel der Arbeiten ist, im Rahmen einer Querschnittstudie mit möglichst vielen Teilnehmern zu analysieren

- wie die Datengrundlage zur Mischwasserbehandlung auf ARAs in der Schweiz ist
- wie die reale betriebliche Situation bei den ARAs aussieht

Es ist weiterhin angedacht, an wenigen Einzelfällen weitergehende Analysen durchzuführen, um gegebenenfalls Methoden zur Datenbereinigung und -analyse zu testen. Mittelfristig wird angestrebt, die Ergebnisse der studentischen Arbeiten in die technischen Empfehlungen des VSA zum integrierten Gewässerschutz einfließen zu lassen [5, 6].

Wir bitten Sie, uns dazu 2-5 Jahre Zulaufzeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 1-15min im csv/xlsx-Format zur Verfügung zu stellen. Die Daten sollten im .zip Format mit der Bezeichnung

[uploadDatum]_[ARA_name].zip geschickt werden. Sie können entweder ihrem Leitsystemhersteller erlauben, uns die Daten zu übermitteln, oder sie auf unseren upload-Ordner im SWITCHdrive¹ hochladen.

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie die Studentinnen Frau Stutz und Frau Baum bei ihrer Arbeit unterstützen könnten. Wir stehen ihnen selbstverständlich jederzeit für Fragen zur Verfügung.

Freundliche Grüsse



Dr. Jörg Rieckermann

Abteilung für Siedlungswasserwirtschaft

Literatur:

- [1] Binggeli, S und Hans-Peter Diener (2016). Definition und Standardisierung von Kennzahlen für die Abwasserentsorgung. In: Empfehlung herausgegeben vom Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Zürich und der Organisation Kommunale Infrastruktur, Bern
- [2] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 - Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen - April 2003; Stand: korrigierte Fassung Dezember 2004
- [3] Grimon, Elisabeth (2017). Auswertung der Abwassermengen auf Solothurner ARA. In: Technischer Bericht, Holinger.
- [4] Bast, Marc (2021) Regenabwasserbehandlung auf Berner Abwasserreinigungsanlagen Studie anhand von ARA-Daten, BSc Arbeit, ETH Zürich
- [5] VSA - Optimierung Netz – ARA – Gewässer (NAG) im Rahmen einer integralen Wasserbewirtschaftung, <https://gire.ch/de/>
- [6] VSA – Integrale Betrachtung ARA-Netz-Gewässer <https://vsa.ch/fachbereiche-cc/siedlungsentwaesserung/integrale-betrachtung-ara-netz-gewaesser/>

¹ Upload Ordner: <https://drive.switch.ch/index.php/s/Hnzbh2mllCakg3L>

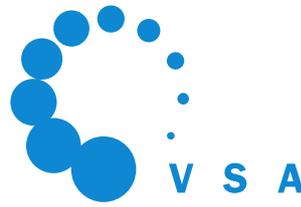
Kurz-URL: <https://tinyurl.com/miwara-ch>

Verband Schweizer
Abwasser- und
Gewässerschutz-
fachleute

Association suisse
des professionnels
de la protection
des eaux

Associazione svizzera
dei professionisti
della protezione
delle acque

Swiss Water
Association



Europastrasse 3
Postfach, 8152 Glattbrugg
sekretariat@vsa.ch
www.vsa.ch
T: 043 343 70 70

An alle ARA-Betreiber der Schweiz

Glattbrugg, 10. September 2021

Unterstützung Studentenarbeit zu Mischwasserzulauf

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen

Im beiliegenden Brief erhalten Sie Erläuterungen zu einem Forschungsprojekt der ETH Zürich / Eawag. Mit einer möglichst breiten Erhebung kann der erste Schritt zu einer guten und soliden Datenbasis gelegt werden. Damit erlaubt sie einen Einblick in die Funktionsweise der Schweizer ARA bei Regenwetter. Darüber hinaus erwarten wir längerfristig wertvolle Hinweise zur gemeinsamen Optimierung von Netz, ARA und Gewässer. Diese gemeinsame Betrachtung erlaubt teilweise mit geringem Aufwand deutliche Verbesserungen beim Gewässerschutz.

Das CC Abwasserreinigung unterstützt diese Pilotstudie zum Stand der Mischwasserbehandlung in Schweizer ARA ausdrücklich. Wir bitten Sie/Euch daher, den Studentinnen die benötigten Messdaten zur Verfügung zu stellen.

Wir danken Euch für Eure Hilfe.

Freundliche Grüsse

Christian Abegglen
Leiter CC Abwasserreinigung