



Markus Pichler, BSc

**Automatisierte Quantifizierung der
Schmutzfrachtdynamik des Zentralen Speicherkanals
im Zulauf zur Kläranlage Graz**

**Automated quantification of the pollutant load dynamics of the
central storage tunnel in the inlet to the wastewater treatment plant
Graz**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber

Mitbetreuende Assistenten:

Dipl.-Ing. Thomas Hofer, BSc

David Camhy

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, März 2018

Kontakt:
Markus Pichler, Bsc
ma.pichler@gmx.net

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

20.3.2018

Datum / Date

Markus Pichler

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte mich bei jenen bedanken die mich während des Studiums und beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt haben.

Vor allem möchte ich Dipl.-Ing. Thomas Hofer und David Camhy für ihre hilfsbereite Art und Weise und dem immer offenen Ohr für Fragen danken.

Außerdem möchte ich mich bei Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber für die Möglichkeit der Anstellung während des letzten Jahres am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz und für die geeignete Auswahl des Themas meiner Masterarbeit bedanken.

Ein weiterer Dank gilt dem Labor-, Messtechnik- und IT-Team am Institut für die Gewinnung und Aufbereitung der verwendeten Messdaten und die tolle Unterstützung während der Arbeit.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Familie und im speziellen an meine Eltern für die tolle Möglichkeit dieses Studiums.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Freundin Kathi danken, die mir mit nötigen Ablenkungen vom Studium einen perfekten Ausgleich geschaffen hat.

Kurzfassung

Der Betrieb des Zentralen Speicherkanals (ZSK) in Graz lässt das temporäre Speichern von Entlastungsfrachten aus angeschlossenen Mischwasserüberläufen bei Niederschlagsereignissen zu. Dadurch können Schmutzstoffe - anstatt direkt in die Mur - zur Abwasserreinigungsanlage (ARA) Graz weitergeleitet und dort einer gezielten Reinigung zugeführt werden. Die stoffliche Dynamik dieses Schmutzfrachttransportes und damit auch die Entleerung des ZSK zur ARA Graz kann über zeitlich hoch aufgelöste Online-Messtechnik abgeschätzt werden. Diese Informationen stellen auch für die Grundlagenermittlung für eine zukünftige Erweiterung der ARA Graz einen wesentlichen Punkt dar. Da über direkte Messungen der Frachten im Speicherkanal keine befriedigende Ergebnisse erzielt werden konnten, werden diese nun mehr während und nach den ZSK-Entleerungsereignisse indirekt durch Messungen der Zulauffrachten im Zulauf zur ARA Graz abgeschätzt.

Eine bereits durchgeführte manuelle Auswertung von 15 Entleerungsfrachten diente als Grundlage und Vergleichsbasis für diese Arbeit.

Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer automatisierten Methodik zur Detektion und Frachtabschätzung von ZSK-Entleerungsereignissen im Zulauf zur ARA Graz. Dies beinhaltet eine weitestgehend automatisierte Aufbereitung und Auswertung der Messdaten, eine automatische Ereigniserkennung sowie die eigentlichen Frachtabschätzungen. Basis für die Frachtabschätzungen stellen typische Trockenwettertagesgänge und deren möglicher Schwankungsbereich dar. Damit können die gesamten Messdaten in Trockenwetterperioden, in Regenwetter- und in Entleerungsereignisse unterteilt werden. Aus den ermittelten typischen Trockenwetter-Tagesgängen werden künstliche, durchgehende Trockenwetter-Vergleichsdaten erstellt.

Die automatisierte Ereigniserkennung von Entleerungen basiert aufgrund der aktuellen Betriebsweise des ZSK auf der Wasserhöhenstandsmessung im Mischwasserüberlaufbecken (MÜB) der ARA. Die Entleerungsfrachten werden jeweils aus der Differenz zwischen den Ereignisfrachtraten und den künstlich generierten Trockenwetter-Vergleichsdaten berechnet, wobei Abflussspitzen aus dem Kanalnetz während der Entleerungen nicht, Schmutzfrachtspitzen nach den Entleerungen als Folge von Spül- und Restentleerungen im ZSK und im MÜB allerdings sehr wohl bei den Frachtabschätzungen mitberücksichtigt werden.

Der Vergleich der automatisiert ermittelten Frachtabschätzungen mit den manuell durchgeführten ergab zum Teil relativ große Abweichungen in den abgeschätzten

Frachten und durchschnittlichen Entleerungskonzentrationen. Diese Unterschiede sind vor allem auf unterschiedlich angenommene Entleerungsdauern und unterschiedliche Trockenwetter-Referenzzustände bei den beiden angewandten Methoden zurückzuführen.

Abstract

The operation of the central storage tunnel (CST) in Graz allows temporary storage of discharge loads from connected combined sewer overflows (CSO) during precipitation events. This allows contaminants - instead of directly into the Mur - to be transferred to the wastewater treatment plant (WWTP) Graz for targeted treatment. The pollution load dynamics and thus also the emptying of the CST to WWTP Graz can be estimated using online measuring technology with high temporal resolution. This information also represents an essential point for the determination of the basis for a future expansion of WWTP Graz. Since no satisfying results could be achieved by direct measurements of the loads in the CST, these are now estimated indirectly during and after the CST emptying events by measurements of the inflow loads in the inlet to WWTP Graz.

A manual evaluation of 15 emptying loads that had already been carried out served as a general basis and basis for comparison for this work.

The aim of this master thesis is the development of an automated methodology for the detection and pollution load estimation of CST emptying events in the inflow to WWTP Graz. This includes a largely automated processing and evaluation of the measurement data, automatic event recognition and the actual pollution load estimates. Pollution load estimates are based on typical dry weather daily cycles and their possible fluctuation range. Thus, the entire measurement data can be divided into dry weather periods, storm events and emptying events. Artificial, continuous dry-weather comparison data are generated from the typical dry-weather daily variations determined.

Due to the current operating mode of the CST, the automated event detection of emptying events is based on the water level measurement installed in the CSO tank located at WWTP Graz. The emptying loads are calculated from the difference between the measured event pollution load rates and the artificially generated dry weather comparison data, whereby discharge peaks from the sewer network during emptying are not taken into account, but pollution load peaks after emptying as a result of flushing and residual emptying in the CST and CSO tank are very certainly taken into account in the pollution load estimates.

The comparison of the automatically determined pollution load estimates with the manually performed pollution load estimates resulted in relatively large deviations in the estimated pollution loads and average emptying concentrations. These differences are mainly due to differently assumed emptying times and different dry weather reference conditions for the two methods used.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Motivation	2
1.2 Zielsetzung	4
2 Grundlagen	7
2.1 Begriffe der Datenverarbeitung und der Messtechnik	7
2.2 Substanzen und Parameter	11
2.3 Messgeräte	13
2.3.1 UV/VIS-Spektrometersonde	13
2.3.2 ISE-Sonde	14
2.3.3 Messung des Wasserstandes	16
2.3.4 Magnetisch Induktiver Durchflussmesser (MID)	17
2.4 Datengrundlage	18
2.4.1 Wartung	20
2.4.2 Messkampagnen / Vergleichsanalytik	21
2.4.3 Datenverwaltung	21
2.5 Statistische Begriffe	23
2.5.1 Arithmetisches Mittel	23
2.5.2 Quantil	23
2.5.3 Median	23
2.5.4 Median der absoluten Abweichungen vom Median	24
2.5.5 Interquartilsabstand	24
2.5.6 Kerndichteschätzer	25
2.5.7 Mahalanobis-Distanz	26
2.5.8 Bagplot	27
2.6 Zielfunktion der linearen Regression	28
2.6.1 Methode der kleinsten Quadrate	28
2.6.2 Methoden zur robusten Auswertung von linearen Regres- sionen	29
2.6.3 Elimination von Ausreißern	31
2.6.4 Bestimmtheitsmaß	33

3 Methodik	35
3.1 Datenaufbereitung	39
3.1.1 Globalisierung der Messdaten	40
3.1.2 Kalibrierung der Messdaten	41
3.1.3 Validierung der Messdaten	42
3.1.4 Nachbearbeitung der Messdaten	44
3.2 Datenanalyse	46
3.2.1 Ermittlung des tagesabhängigen Trockenwetterverlaufs	47
3.2.2 Trockenwetter-Kriterium	54
3.3 Ereignisdetektion	58
3.3.1 Detektion eines Mischwasserereignisses	58
3.3.2 Detektion eines Entleerungsereignisses des ZSK	58
3.4 Fremdwasseruntersuchung	60
4 Ergebnisse und Diskussion	63
4.1 Ergebnisse der Datenaufbereitung	64
4.1.1 Ergebnisse der Kalibrierung für ausgewählte Qualitätsparameter	64
4.1.2 Ergebnisse der Validierung für ausgewählte Qualitätsparameter	66
4.1.3 Ergebnisse der Datennachbearbeitung	69
4.2 Ergebnisse der Datenanalyse	73
4.2.1 Ergebnisauswertung der Tagesganglinien	75
4.2.2 Stabilität der Berechnung der Parameter des TW-Tagesgangs	87
4.3 Ergebnisse der saisonalen Trendauswertung	89
4.4 Ergebnisse und Vergleich der Auswertungen der Entleerungsereignisse des ZSK	91
4.4.1 Vergleich des ZSK-Entleerungsereignisses am 2017-02-08	96
4.4.2 Vergleich des ZSK-Entleerungsereignisses am 2017-06-03	99
4.4.3 Vergleich des ZSK-Entleerungsereignisses am 2017-06-08	102
4.5 Ergebnisse der Fremdwasseranalyse	105
5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	109
5.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	109
5.2 Ausblick	112
Literaturverzeichnis	113

Anhang	116
A Python-Code	A-117
A.1 Datenaufbereitung	A-117
A.2 Trockenwetter-Mittel	A-118
A.3 Trockenwetter-Variation	A-118
A.4 Stabilität der Berechnung der Trockenwetter-Tagesgang Parameter	A-119
A.5 Trockenwetter-Kriterium	A-120
A.6 Ereignisdetektion	A-122
B Umwandlungstabellen	B-127
B.1 Sensor Justierung	B-127
B.2 Kalibrierung	B-128
B.3 Experten Kalibrierung	B-128
C Validierungstabellen	C-131
C.1 Ausreißertest	C-131
C.2 Gradiententest	C-132
D Automatisierte Ereignisauswertung	D-133

Abbildungsverzeichnis

1-1 Übersicht des Zentralen Speicherkanals ZSK im Stadtgebiet von Graz (Hofer <i>et al.</i> , 2017)	3
2-1 Messpfad einer UV/VIS-Spektrometersonde (s::can GmbH, 2015, mod.)	13
2-2 Absorptionsspektrum einer UV/VIS-Spektrometersonde (s::can GmbH, 2013, mod.)	14
2-3 Messprinzip einer Ionen-selektiven Sonde (ISE-Sonde) (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, 2012, mod.)	15
2-4 Messkopf einer ISE-Sonde (Vierkanal) (Hach-Lange GmbH, 2017, mod.)	15
2-5 Messanordnung einer Ultraschall-Echolotsonde (DWA-M 181, 2011 mod.)	16
2-6 Übersicht des integralen Messnetzes ZSK und ARA in Graz (Hofer <i>et al.</i> , 2017)	19
2-7 Messstation im Zulauf der ARA Graz (Graz-ARA-Zulauf) (Hofer, 2017)	20
2-8 Beispiel der Mahalanobis-Distanz (MD) in einem Streudiagramm	26
2-9 Beispiel für einen Bagplot anhand 60 unterschiedlicher Kraftfahrzeuge in Abhängigkeit ihres Gewichts und ihrer Leistung	27
2-10 Anwendungsprinzip des RANSAC Algorithmus als robustes Verfahren der linearen Regression	30
2-11 Empfindlichkeit gegen Ausreißer für unterschiedliche robuste Verfahren der linearen Regression (Generalized Linear Models, 2018)	31
2-12 Unterschiedliche M-Schätzer Funktionen zur Darstellung der Wichtung innerhalb des linearen Modells	32
2-13 Falsches Ergebnis nach RANSAC Algorithmus	33
3-1 Grafisches Schema der Methodik von (Metadier & Bertrands-Krajewski, 2011) zur Frachtabschätzung von Mischwasserereignissen	36
3-2 Grafisches Schema der Methodik nach (Hofer <i>et al.</i> , 2017) zur Frachtabschätzung von ZSK-Entleerungsereignissen	37
3-3 Grafisches Schema der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zur automatisierten Frachtabschätzung von Mischwasserereignissen	37
3-4 Flussdiagramm zum Methodenablauf der Datenaufbereitung	39
3-5 Vergleich zwischen den Bearbeitungsebenen der Messdaten	40
3-6 Flussdiagramm zum Methodikablauf der Datenanalyse	47

3-7 Schematisches Beispiel einer Untergruppe zur Ermittlung der TW-Verläufe abhängig von der Tageskategorie und Tageszeit	49
3-8 Schematisches Beispiel einer Untergruppe zur Ermittlung der TW-Variation abhängig von der Tageskategorie und Tageszeit	51
3-9 Asymmetrischer MAD als Verfahren zur Berechnung der TW-Variation	53
3-10 Schematisches Beispiel einer Untergruppe zur Ermittlung der TW-Kriteriums abhängig von der Tageskategorie und Tageszeit	55
3-11 TW-Kontinuum des Durchflusses	57
3-12 Systematik der Teilbedingungen zur Detektion von ZSK-Entleerungsereignissen	60
4-1 Kalibrierungsergebnisse der Qualitätsparameter	65
4-2 Validierungsergebnisse der Messstation Graz-ARA-Zulauf	67
4-3 Validierungsergebnisse aus dem PLS der ARA Graz	67
4-4 Validierungsergebnisse im Fall der Messstation Graz-MÜB-Überlauf	68
4-5 Unterschiede der jeweiligen Wochentage	75
4-6 ARA-TW-Zulauf-Tagesgänge	77
4-7 Tagesgänge von CSB	79
4-8 Tagesgänge von BSB ₅	81
4-9 Tagesgänge von AFS	83
4-10 Tagesgänge von NH ₄ -N	85
4-11 Tagesgang der Abwassertemperatur	86
4-12 Stabilität der TW-Mittel-Berechnungsverfahren	88
4-13 Stabilität der TW-Variation-Berechnungsverfahren	88
4-14 Trockenwetter Level	90
4-15 Vergleich der Ereignisvolumina	93
4-16 Vergleich der Ereignisfrachten (links) und der Konzentrationen (rechts)	94
4-17 Entleerungsereignis am 2017-02-08	98
4-18 Entleerungsereignis am 2017-06-03	101
4-19 Entleerungsereignis am 2017-06-08	104
4-20 Fremdwasser-Analyse	106
4-21 Fremdwasser-Analyse im jährlichen Vergleich	107

Tabellenverzeichnis

2-1	Verwendete Messgrößen je Online-Messstation sowie die aus dem PLS der ARA bereitgestellten Daten	21
3-1	Bearbeitungsebenen der Messdatenverarbeitung	40
3-2	Unterteilung der Tage in Kategorien	48
3-3	Bedeutungen des TW-Kriteriums	55
4-1	Verwendete Sensoren der Messstation Graz-ARA-Zulauf	63
4-2	Verwendete Sensoren aus dem PLS	64
4-3	Verwendete Sensoren der Messstation Graz-MÜB-Überlauf	64
4-4	Verfügbarkeit in % der Daten während des Untersuchungszeitraumes in den Bearbeitungsebenen	69
4-5	Die längsten Lücken in den Daten der Messstation Graz-ARA-Zulauf mit einer Dauer von >5 min.	70
4-6	Die längsten Lücken der Daten im PLS mit einer Dauer von >5 min.	71
4-7	Die längsten Lücken in den Daten der Messstation Graz-MÜB-Überlauf mit einer Dauer von >5 min.	71
4-8	Verwendete Abkürzungen in den Ergebnisplots	73
4-9	Verschiedene Berechnungsverfahren - Bedeutungen von <i>kind</i>	73
4-10	Anzahl der Tage je Kategorie im Auswertungszeitraum	74
4-11	Abgeschätzte Tagesmittelwerte für das TW-Zulaufvolumen zur ARA Graz und für die TW-Stofffrachten CSB, BSB5 und AFS nach Hofer <i>et al.</i> (2017)	76
4-12	TW-Zulaufvolumen	77
4-13	CSB TW-Frachten	78
4-14	BSB ₅ TW-Frachten	80
4-15	AFS TW-Frachten	82
4-16	NH ₄ -N TW-Frachten	84
4-17	Schulferien während des Analyse-Zeitraums	89
4-18	Vergleich der Start- und Endzeiten der Ereignisse der unterschiedlichen Methoden	92
4-19	Dauern der Ereignisse in Stunden	92
4-20	Entleerungsereignis am 2017-02-08	97
4-21	Entleerungsereignis am 2017-06-03	100
4-22	Entleerungsereignis am 2017-06-08	103

Tabellenverzeichnis

B-1	Umwandlungstabelle - Rückrechnung der Justierung (Zulauf)	B-128
B-2	Umwandlungstabelle - Kalibrierung	B-128
B-3	Umwandlungstabelle- Experten Kalibrierung	B-129
C-1	Wertetabelle für Ausreißertest	C-131
C-2	Wertetabelle für Gradiententest	C-132

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abwasserreinigungsanlage
WWTP	Wastewater treatment plant
ZSK	Zentraler Speicherkanal
CST	Central storage tunnel
MÜ	Mischwasserüberlauf
CSO	Combined sewer overflow
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
COD	Chemical oxygen demand
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf
BOD ₅	Biochemical oxygen demand
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff Total organic carbon
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff Dissolved organic carbon
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff Ammonium nitrogen
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff Nitrate nitrogen
AFS	Absetzbare Feststoffe
TSS	Total suspended solids
LF	Elektrische Leitfähigkeit
EC	Electrical conductivity
TU	Trübung Turbidity
Cl	Chlorid Chlorine
T	Temperatur Temperature
TW	Trockenwetter
DW	Dry weather
RW	Regenwetter

Abkürzungsverzeichnis

WW	Wet weather
F	Frachtrate
LR	Loading rate
L	Fracht Load
C	Konzentration Concentration
PLS	Prozessleitsystem
SCADA	Supervisory control and data acquisition system
UTC	Koordinierte Weltzeit Universal time coordinated
TS	Zeitreihe Time series
OLS	Methode der kleinsten Quadrate Method of ordinary least squares
MAD	Median der absoluten Abweichungen vom Median Median absolute deviation
IQR	Interquartilsabstand Interquartile range

1 Einleitung

Um einerseits die Anforderung des durch die **ÖNORM EN 752 (2008)** vorgegebenen Überflutungsschutzes in Siedlungsgebieten sicherzustellen und andererseits die immissionsseitigen Vorgaben für Gewässer zu erfüllen ist eine ordnungsgemäße Abwasserentsorgung unabdinglich. Zu ihren Hauptaufgaben gehören das Ableiten der Abwässer in Kanälen aus den Siedlungsbereichen und die Entfernung eines Großteils der Schmutzstoffe aus dem Abwasser in Abwasserreinigungsanlagen (ARA).

Die Dimensionierung einer ARA zielt darauf ab, den Großteil der Verschmutzungen aus dem Abwasser bis zu einer definierten Abflusskapazität zu entfernen, die in etwa der zweifachen maximalen hydraulischen Trockenwettermenge entspricht (OEWAV, **2009**). Damit kann eine optimale Reinigungsleistung des Abwassers bei Trockenwetter sowie bei kleinen und mittleren Niederschlagsereignissen gewährleistet werden, was in typischen österreichischen Entwässerungssystemen etwa einem durchschnittlichen jährlichen Schmutzfrachtanteil von 85 - 90 % entspricht (Hofer *et al.*, **2015**).

Wenn der Boden das Niederschlagswasser nicht mehr aufnehmen kann (Niederschlagsaufkommen ist größer als die Versickerungsleistung, Sättigung des Bodens erreicht, etc.) kommt es zu einem Oberflächenabfluss. Aufgrund des hohen Versiegelungsgrads und der zu geringen Versickerungsleistung im städtischen Bereich muss ein Großteil der Oberflächenabflüsse in das Kanalsystem eingeleitet werden, um die großen hydraulischen Mengen an Niederschlagswasser sicher abzuleiten.

Hierfür haben sich zwei unterschiedliche Systeme (Trenn- und Mischsystem) etabliert (OEWAV, **2008**). Das Trennsystem sieht eine getrennte Kanalisation für Niederschlagswasser und Schmutzwasser vor. Das Schmutzwasser wird in einer ARA gereinigt und anschließend in ein Gewässer geleitet. Das Niederschlagswasser wird jedoch nicht an die ARA angeschlossen, sondern je nach Behandlungsbedürftigkeit des Niederschlagswassers entweder direkt in ein geeignetes Gewässer abgeführt oder zur Versickerung gebracht. Im Mischsystem hingegen werden alle Abwässer als Mischwasser gesammelt in einem Kanalsystem abgeführt.

Aufgrund der limitierenden Kapazität der maximalen Zulaufmenge zur ARA und der wirtschaftlichen Limitierung der Kanalquerschnitte kann bei Niederschlagsereignissen ein spezifischer Anteil des anfallenden Mischwassers nicht zur ARA weitergeleitet werden. Der überschüssige Anteil wird entweder nach Möglichkeit

1. Einleitung

im Kanalsystem zwischengespeichert oder direkt ins Gewässer über Entlastungsbauwerke abgeschlagen. Dadurch auftretende Mischwasserentlastungen sollen nach derzeitigem Stand der Technik in Österreich (OEWA, 2007a) begrenzt und nach Möglichkeit reduziert werden. Eine Möglichkeit zur Erreichung dieser Vorgaben stellt die Errichtung von zentralen oder dezentralen Speicherbauwerken dar.

Das Grazer Entwässerungssystem steht in nächster Zukunft vor zwei Herausforderungen. Erstens wird sich das Abwasseraufkommen durch die prognostizierten, steigenden Bevölkerungszahlen erhöhen und zweitens wird sich durch die Inbetriebnahme des zentralen Speicherkanals (ZSK) entlang der Mur das Speichervolumen im Kanalnetz und daraus folgend die hydraulische und stoffliche Belastung zur ARA verändern.

Beim zentralen Speicherkanal (ZSK) handelt es sich um ein lineares Mischwasser-Speicherbauwerk am linken Ufer der Mur in Graz. Er dient zum einen dem Fortleiten der Entlastungsmengen in das Unterwasser der beiden Mur-Kraftwerke Gössendorf und Graz-Puntigam und damit zur Sicherstellung des Entwässerungskomforts in den besiedelten Bereich und zum anderen der Zwischenspeicherung der Entlastungsabflüsse aus den angebotenen Mischwasserüberläufen (MÜ). Nach einem Regenereignis können die im ZSK zwischengespeicherten Mischwassermengen gedrosselt zur ARA abgeführt und einer Reinigung zugeführt werden.

Der erste Abschnitt des zentralen Speicherkanals (ZSK I) wurde 2012 fertiggestellt, umfasst ein Speichervolumen von 25 000 m³ und weist eine Länge von 3,2 km auf. In diesem Bauabschnitt beträgt der Querschnitt 3,2 x 2,5 m. Drei der insgesamt 35 MÜs entlang der Mur sind an diesem Bauabschnitt bereits angeschlossen. Der zweite Abschnitt des zentralen Speicherkanals (ZSK II) befindet sich zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Masterarbeit in Bau und wird voraussichtlich 2021 fertiggestellt. Er wird ein zusätzliches Speichervolumen von 69 000 m³ umfassen und es sollen 18 weitere MÜs an ihn angeschlossen werden. In Summe kann im finalen Zustand (ZSK I + ZSK II) ein Gesamtvolumen von 94 000 m³ auf einer Gesamtlänge von 8,4 km aktiviert werden. (Hofer *et al.*, 2017; Kainz *et al.*, 2011)

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Die ARA Graz-Gössendorf (Kurzform: ARA Graz) steht wegen der oben genannten Gründe kurz vor einer Erweiterung und führt deshalb zurzeit eine umfassende Grundlagenermittlung zur Bestimmung der hydraulischen und stofflichen Belastungssituation im Einzugsgebiet von Graz durch. Die zusätzliche Belastung

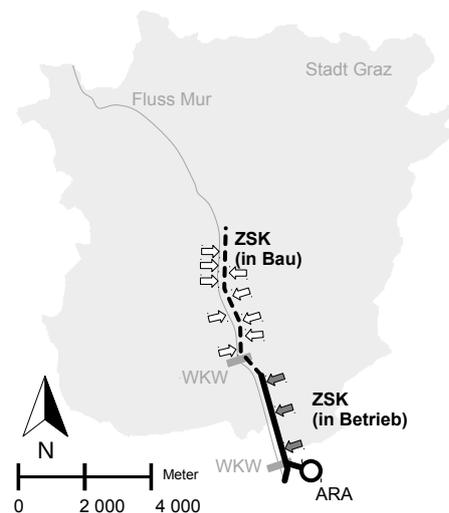


Abbildung 1-1: Übersicht des Zentralen Speicherkanals ZSK im Stadtgebiet von Graz (Hofer *et al.*, 2017)

aufgrund der Bevölkerungszunahme kann über frachtspezifische Einwohnerwerte abgeschätzt werden (ATV-DVWK, 2003). Dies lässt eine Abschätzung über die zukünftig zu erwartenden hydraulischen und stofflichen Frachten zu, aber es können daraus keine Informationen über die dynamische Verteilung der stofflichen Belastung für die ARA abgeleitet werden. Zur Beurteilung der Dynamik und Variabilität im System ist sowohl bei Trockenwetter als auch bei Mischwasserereignissen eine genauere Analyse der zukünftig zu erwartenden Systemsituation notwendig (Gujer, 2013). Eine notwendige Detailbetrachtung der Istsituation kann zum Beispiel über zeitlich hochaufgelöste kontinuierliche Messungen mittels automatischer Messsysteme für hydraulische (Wasserstände, Durchflussraten) und stoffliche (Konzentrationen) Parameter erfolgen.

Aus der Kombination von zeitgleich gemessenen Durchflussraten und Stoffkonzentrationen können aber auch die zeitlichen Verläufe der daraus resultierenden Frachtraten ermittelt werden (Metadier & Bertrand-Krajewski, 2011).

Eine Messung der Stofffrachten direkt im ZSK I wurde bereits in der Vergangenheit angedacht und getestet, konnte aber keine befriedigenden Ergebnisse erzielen (Pointl, 2017). Ein Grund für die Beeinträchtigungen der direkt im ZSK durchgeführten Messungen war das häufige Vorkommen von Verzopfungen und Verlegungen der Sensoren durch die teilweisen hohen Anteile an Grobstoffen und Hygieneartikeln im Mischwasser. Der dadurch notwendige hohe Wartungsaufwand ist im ZSK nur sehr schwer umzusetzen (Zugänglichkeit, Zeitaufwand, etc.), wodurch die Idee entstand, die Abschätzung der Schmutzfrachten aus dem ZSK in Richtung ARA indirekt über Messungen im Zulauf der ARA Graz durchzuführen. Dieser Standort hat mehrere Vorteile. Zum einen kann eine Messstation für Wartungszwecke leicht zugänglich in einem Bypass-System installiert wer-

1. Einleitung

den und zum anderen ist durch eine Anordnung der Messstation nach dem Rechen und dem Sandfang der ARA die Sensorik deutlich besser vor Verzopfungen oder Verlegungen geschützt. Außerdem ist die hydraulische Variabilität an diesem Standort durch die hydraulische Begrenzung der ARA auf rund die zweifache maximale Trockenwettermenge begrenzt. Weiters werden die Zulaufdaten zur ARA kontinuierlich gemessen und auch vom Betreiber zur Verfügung gestellt, da in Österreich eine Zulaufmengenmessung auf Kläranlagen größer 1 000 EW₆₀ laut ÖWAV Regelblatt 38 (ÖWAV, 2007b) generell vorgeschrieben ist.

Aus den gewonnenen Messdaten kann in weiterer Folge die Stofffrachtdynamik sowohl an Trockenwettertagen wie auch während Niederschlagsereignissen erfasst werden. Daraus ist es auch möglich, einen typischen Tagesgang bei Trockenwetter zu generieren. Für den Regenwetterfall können weiters auch Spülstöße (engl. *first-flush-effect*) (Barco *et al.*, 2008) in ihrer Dynamik im Detail festgestellt werden. Es handelt sich hierbei um Konzentrations- bzw. Frachtspitzen im Anfangszeitraum eines Ereignisses hervorgerufen durch verschmutzte Oberflächen sowie Ablagerungen im Kanal. Außerdem können nach einer Entleerung von Mischwasserspeicherbauwerken auch sogenannte „last-flush“-Effekte auftreten und ebenfalls detektiert werden (Hofer, 2012). Diese werden durch die Ablösung der im Sohlbereich sedimentierten Ablagerungen in den Speicherbauwerken durch Reinigungsspülstöße nach der Entleerung verursacht. Ein weiterer Vorteil der hochaufgelösten Messdaten ist die Möglichkeit, sie als Datengrundlage für Simulationsmodelle zu benutzen, wodurch verschiedene Betriebsszenarien der ARA modelltechnisch abgeschätzt und verglichen werden können.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Masterarbeit lag in der Automatisierung der notwendigen Teilprozesse zur Abschätzung von Entleerungsfrachten aus dem ZSK im Zulauf zur ARA Graz. Die damit erzielbaren Ergebnisse sollten entsprechend aufbereitet und mit einer bereits durchgeführten manuellen Auswertung verglichen werden. Die entwickelte Methodik soll zukünftig zur effizienten Auswertung von auftretenden Entleerungsereignissen des ZSK genutzt werden.

Die in dieser Arbeit behandelten Teilaspekte zur automatisierten Abschätzung von ZSK-Entleerungsfrachten werden nachfolgend aufgelistet:

- Automatisierung der Datenaufbereitung und Datenvalidierung
- Methodik zur automatischen Detektion von Trockenwetterperioden inklusive Trendanalysen

- Methodik zu automatischen Erkennung und Auswertung von Mischwasser- und ZSK-Entleerungsereignissen im Zulauf zur ARA Graz
- Analyse und Vergleich mit bereits manuell ausgewerteten ZSK-Entleerungsereignissen im Zeitraum 01.11.2016 bis 26.06.2017
- Analyse von weiteren ZSK-Entleerungsereignissen im Zeitraum vom 26.06.2017 bis 31.07.2017
- Modulare Strukturierung und Erweiterungsmöglichkeit der entwickelten Methodik durch Erstellung von Programmskripten

2 Grundlagen

Es wird nachfolgend auf die Grundlagen eingegangen, die als Voraussetzung für diese Masterarbeit dienen. Zuerst werden allgemeine Begriffe der Datenverarbeitung und der Messtechnik erläutert, danach wird auf die in der Abwassertechnik relevanten Messgrößen und die Möglichkeiten deren messtechnischer Bestimmung eingegangen.

2.1 Begriffe der Datenverarbeitung und der Messtechnik

Nachfolgend werden Begriffe nach ([DWA-M 151, 2014](#); [DWA-M 181, 2011](#)) aufgelistet und beschrieben.

- **Abgeleitete Daten**

Durch Berechnungsregeln ermittelte Daten (z. B. aus Durchfluss und Konzentration berechnete Frachtrate).

- **Aggregierte Daten**

Zeitlich (periodisch) zusammengefasste Daten (z. B. Tagessumme, Monatsdurchschnitt, ...) (Tertiärdaten).

- **Diskretisierungszeitschritt (Zeitintervall)**

Dauer zwischen zwei chronologisch geordneten Datenpunkten bzw. Messwerten. Dieser kann variabel oder äquidistant sein.

- **Äquidistante Daten**

Daten mit gleichbleibendem Zeitintervall.

- **Zeitbezug**

Beschreibt, wie die Werte zwischen zwei Datenpunkten angenommen werden. Er kann linear (kontinuierlich), konstant bzw. stufenförmig (Intervall) oder als nicht möglich (momentan) angenommen werden.

- **Zeitbereich**

Bereich mit definiertem Start und Endzeitpunkt.

- **Bearbeitungsebene**

Stand nach hierarchischer und chronologischer Reihenfolge der Bearbeitung.

- **Datenlücke**

Zeitbereich in dem keine Daten vorliegen.

- **Zeitlicher Gültigkeitsbereich**
Zeitbereich, für den eine bestimmte Eigenschaft definiert ist.
- **Zeitstempel**
Zeitpunkt eines Messwerts.
- **Messdaten**
Kombination aus Messwerten, ihrer Maßeinheit und dem zugehörigen Zeitstempel.
- **Messergebnis**
Aus Messungen gewonnener Schätzwert für den wahren Wert einer Messgröße.
- **Messwert**
Zahlenwert der Messung.
- **Messgröße**
Kombination aus einem Messwert und ihrer Maßeinheit.
- **Messstelle**
Einbauort und Lage des Messaufnehmers einer Messeinrichtung.
- **Messstation**
Gruppierung von Messeinrichtungen, die räumlich sowie funktionell zusammen gehören.
- **Metadaten**
Sind ergänzende und beschreibende Daten.
- **Prozessdaten**
Daten (meist Zeitreihendaten) der zu messenden Prozesse. Sie werden abhängig von der Bearbeitungsstufe eingeteilt in Roh-, Primär-, Sekundär- und Tertiärdaten.
- **Rohdaten**
Werden direkt vom Messgerät erfasst.
- **Primärdaten**
Sind mit Kennlinien umgerechnete Rohdaten.
- **Sekundärdaten**
Sind aus Primärdaten korrigierte und/oder ergänzte Daten.

- **Tertiärdaten**

Tertiärdaten sind aus Sekundärdaten abgeleitete Größen wie Summen, Mittelwerte, Verhältniswerte. Beispiele sind Abflusssummen, Niederschlagssummen, Abflussverhältnisse, mittlere Schmutz- und Fremdwasserganglinien.

- **Eingangsdaten**

Sind neue Daten, die ins System aufgenommen werden und liegen meist als Primärdaten vor.

- **Produktionsdaten**

Sind aus den Eingangsdaten entstandene und bearbeitete Daten.

- **Temporärmessung**

Dauermessung (mindestens 3 Jahre), Langzeitmessung (mindestens 3 Monate) und Kurzzeitmessung.

- **Einzelmessung**

Messungen die nur einmalig statt finden und zur Überprüfung oder Orientierung der Messgrenzen verwendet werden.

- **Justieren**

Ist das direkte Einstellen am Messgerät. Es wird versucht, die Abweichung zu einem Sollwert möglichst gering zu halten.

- **Kalibrieren**

Ist das Feststellen einer Messabweichung ohne am Messgerät einzugreifen.

- **Eichen**

Ist ein amtlicher Vorgang durch die Eichbehörde ohne Eingriff am Messgerät.

- **Instandhaltung**

Ist der Überbegriff für Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung.

- **Wartung**

Bezeichnet die regelmäßige Kontrolle und Reparatur eines Objekts (Gegenstand, Einrichtung oder System). Sie umfasst ebenfalls Einstell-, Reinigungsarbeiten, sowie den geplanten Austausch von Verschleißteilen und das Auffüllen von Verbrauchsstoffen.

- **Inspektion**

Bezeichnet eine rein prüfende Tätigkeit, die den Ist-Zustand eines Objekts beurteilt.

2. Grundlagen

- **Instandsetzung**
Bedeutet das Wiederherstellen des Soll-Zustandes eines Objekts.
- **Verbesserung**
Ist die Kombination aller Maßnahmen der Instandhaltung.

2.2 Substanzen und Parameter

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Parameter und Messgrößen in der Abwassertechnik näher beschrieben. (Fuchs-Hanusch *et al.*, 2014)

Biochemischer Sauerstoffbedarf BSB₅ (mg/L)

Der BSB₅ ist ein Maß für den Gehalt an biologisch abbaubaren Kohlenstoffverbindungen. Er beschreibt den Bedarf an Sauerstoff, der durch Abbau von organischen Inhaltsstoffen innerhalb von 5 Tagen bei 20 °C von Mikroorganismen benötigt wird. Außerdem ist er eine der wichtigsten Kenngrößen für die Bemessung der biologischen Reinigungsstufe einer Kläranlage.

Chemischer Sauerstoffbedarf CSB (mg/L)

Der CSB erfasst alle chemisch oxidierbaren und somit auch biologisch nicht abbaubaren Stoffe. Ein hoher Wert (> 2) im Verhältnis CSB zu BSB₅ deutet auf den Anteil schwer abbaubarer Stoffe hin, wie sie in Giftstoffen oder Industrieabwässern vorhanden sind.

Gesamter organischer Kohlenstoff TOC und DOC (mg/L)

Die Gesamtmenge des organischen Kohlenstoffes wird TOC (engl. *total organic carbon*) genannt und enthält wie der CSB auch schwer abbaubare Kohlenstoffverbindungen. Der Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoff wird DOC (engl. *dissolved organic carbon*) genannt.

Abfiltrierbare Stoffe AFS (mg/L)

AFS sind jene Stoffe, die durch Filtration des Abwassers über eine Filterweite von 0,45 µm abgetrennt und durch Wiegung nach einer bei 105 °C Trocknung bestimmt werden. Es werden dabei alle ungelösten Stoffe mit einer Korngröße von mindestens 0,45 µm erfasst.

Stickstoff in Form von Ammonium NH₄-N (mg/L)

Stickstoff kommt in Form von Ammonium (NH₄-N) vorwiegend aufgrund von menschlichen Ausscheidungen im Abwasser vor. Es gelangt daher über das häusliche Abwasser in den Kanal. Hier kann es durch Mikroorganismen zu einer

2. Grundlagen

Oxidation von Harnstoff zu Ammonium und in geringem Maße auch zur sogenannten Nitrifikation zu Nitrat-Stickstoff $\text{NO}_3\text{-N}$ kommen. Aus dem Abwasser soll Stickstoff in oben genannter Form weitestgehend entfernt werden, da es zu Sauerstoffentzug, Bildung von fischtoxischem Ammoniak oder starkem Algenwachstum kommen kann.

2.3 Messgeräte

Durch die Anforderung an eine Langzeitmessung mit quasi-kontinuierlicher Aufzeichnung werden spezielle Messgeräte benötigt, die eine derartige Messung mit einer gewünschten Genauigkeit erfassen können. Zusätzlich sind die Anforderungen an einen geringen Wartungsaufwand und die Möglichkeit einer Online-Übertragung der Messdaten in Form von Zeitreihen zu berücksichtigen.

Es werden nachfolgend jene Geräte zur messtechnischen Erfassung von Abwasserqualitätsparametern und hydraulische Größen beschrieben, die in dieser Masterarbeit verwendet wurden.

2.3.1 UV/VIS-Spektrometersonde

Die nachfolgend beschriebene Spektrometersonde basiert auf dem Prinzip der Lichtschwächung. Betrachtet werden die Wellenlängen der elektromagnetischen Lichtwellen im ultravioletten (UV) und im sichtbaren (Vis = visuell) Bereich. Durch Messung der Lichtschwächung als Absorption der fotoaktiven Moleküle im Medium kann über einen bekannten linearen Zusammenhang ein Bezug zur Konzentration von unterschiedlichen Qualitätsparametern hergestellt werden.

In der Sonde wird von einer Xenon-Lampe in der Sendeeinheit ein Lichtstrahl erzeugt und durch das Medium zum Detektor in der Empfangseinheit geleitet, womit dieser in Kontakt mit der Abwassermatrix kommt. Parallel dazu geht ein zweiter interner Strahl durch ein Vergleichsmedium innerhalb der Sonde und kompensiert dadurch etwaige Änderungen der Lampe. Der genaue Aufbau einer Sonde kann aus Abbildung 2-1 entnommen werden.

Unterschiedliche Messgrößen bzw. Summenparameter können durch Analyse bestimmter Wellenlängenbereiche (Spektren) charakterisiert werden (siehe Abb. 2-2). Als Ergebnis erhält man Äquivalenz-Konzentrationen, die man im Labor mithilfe von Referenzmessungen von Proben an die lokalen Gegebenheiten der Abwassermatrix weiter anpassen kann (Kalibrieren). Je nach Werkseinstellung der Sonde können damit folgende Parameter erfasst werden: CSB, TOC, BSB₅, AFS, NO₃-N und NO₂-N. (Hochedlinger, 2005; Steger, 2011)



Abbildung 2-1: Messpfad einer UV/VIS-Spektrometersonde (s::can GmbH, 2015, mod.)

2. Grundlagen

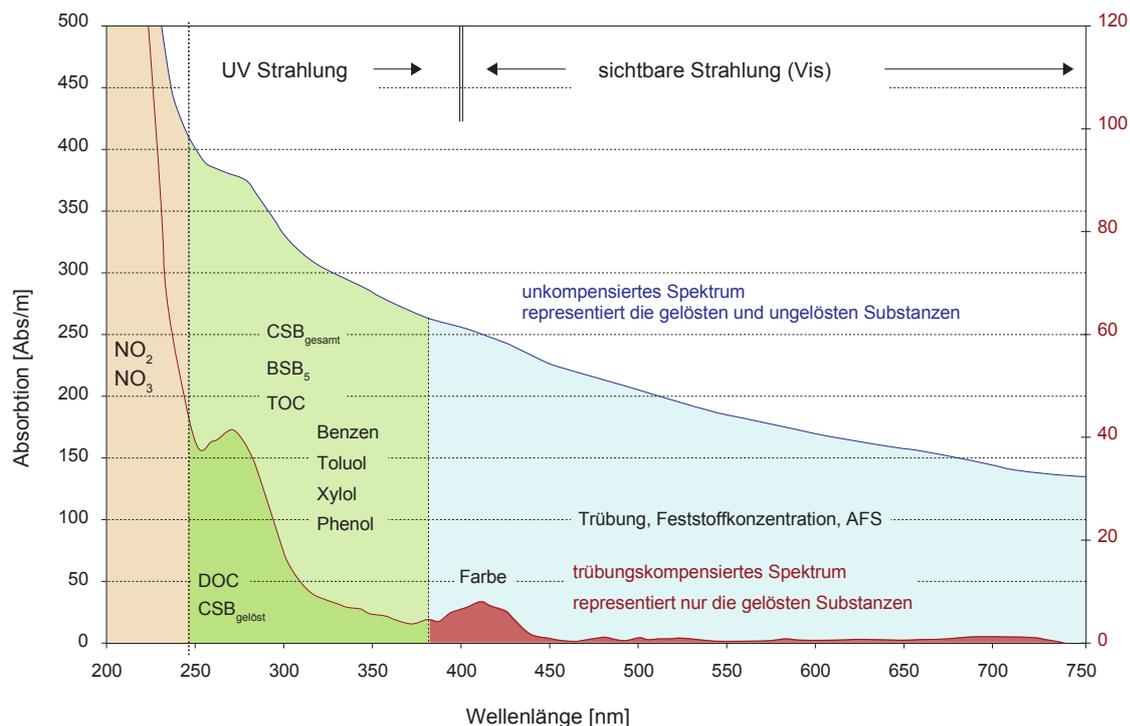


Abbildung 2-2: Absorptionsspektrum einer UV/VIS-Spektrometersonde (s::can GmbH, 2013, mod.)

2.3.2 ISE-Sonde

Die Funktionsweise einer Ionen-selektiven Sonde (ISE-Sonde) ist ähnlich der pH-Messung und basiert auf der Selektivität von Membranen gegenüber speziellen Molekülen bzw. Ionen (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, 2012; Bier, 2010; Rohler, 1997; Umezawa *et al.*, 2009). Die Sonde bestimmt die Konzentration eines bestimmten gelösten Ions, wie zum Beispiel Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) mithilfe von zwei Elektroden (bzw. Halbzellen) pro gesuchtem Ionentyp und einem Temperatursensor, um etwaige Einflüsse intern zu kompensieren. Zwischen der Messelektrode (bzw. Arbeitselektrode) und der Referenzelektrode bildet sich infolge des Eintritts des definierten Ionentyps in die Elektrolytlösung der Messelektrode eine Potenzialdifferenz bzw. Spannung. Diese Spannung kann mithilfe eines Umformers zu einem Messwert konvertiert werden. Zu beachten ist die Querempfindlichkeit durch Störionen, die diese Spannung beeinflussen können. Daher wird bei Ammonium- bzw. Nitrat-Sonden gleichzeitig die Kalium- respektive die Chlorid-Konzentration mitgemessen.

$$\Delta E = E_{ISE} - E_{Ref} \quad (\text{Gleichung 2-1})$$

Mit: E ... Spannungspotenzial (ISE: Sonde, Ref: Referenz)
 ΔE ... Spannung bzw. Potenzialdifferenz

Um die Membran vor Ablagerungen zu schützen und dadurch Messfehler zu vermeiden, werden die Sonden meist mit automatisierten Reinigungssystemen betrieben. Die Reinigung kann zum einen mit Druckluft oder mit Ultraschall erfolgen und wird in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Um bleibende Änderungen in der Potenzialdifferenz der Elektroden zu minimieren, ist es sinnvoll, den Sensor regelmäßig zu kalibrieren.

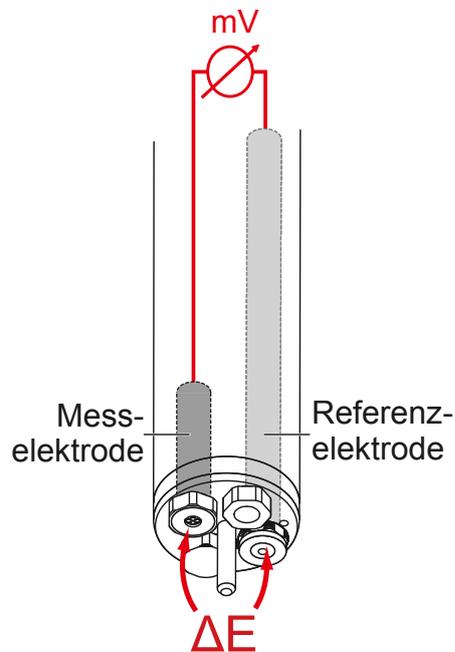


Abbildung 2-3: Messprinzip einer ionen-selektiven Sonde (ISE-Sonde) (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, 2012, mod.)

Der Aufbau des Messkopfs einer ISE-Sonde (Vierkanal) ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

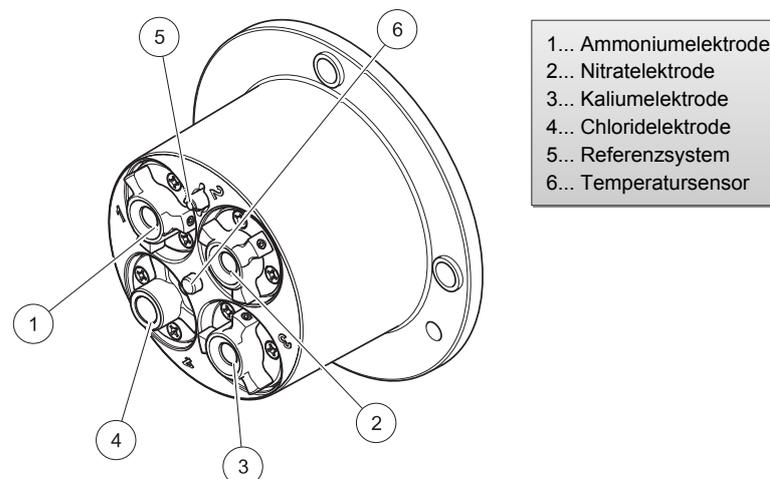


Abbildung 2-4: Messkopf einer ISE-Sonde (Vierkanal) (Hach-Lange GmbH, 2017, mod.)

2.3.3 Messung des Wasserstandes

Eine Wasserstands- bzw. Höhenstandsmessung kann zur Ermittlung des Füllstandes von Behältern oder der Fließtiefe im Entwässerungssystem verwendet werden. In Kombination mit einer parallelen Messung der Fließgeschwindigkeit ist eine indirekte Messung des Durchflusses mithilfe der Kontinuitätsgleichung möglich. Die unterschiedlichen Sondentypen können je nach dem örtlichen Einsatzbereich entweder oberhalb oder unterhalb des Wasserspiegels verwendet werden.

Wasserstandsmessung mit Ultraschall

Diese Sonde nutzt akustische Signale im nichthörbaren Frequenzbereich, um indirekt den Wasserstand zu ermitteln. Es werden Impulse an den freien Wasserspiegel gesendet und von diesem reflektiert. Die Laufzeit oder auch die Phasendifferenz der Impulse können in einen Wasserstand umgerechnet werden. Zu beachten ist dabei die Blockdistanz, die den verfahrensbedingten Mindestabstand zwischen Sensor und Wasserspiegel angibt, sowie die Lufttemperatur, die die Schallgeschwindigkeit wesentlich beeinflusst.

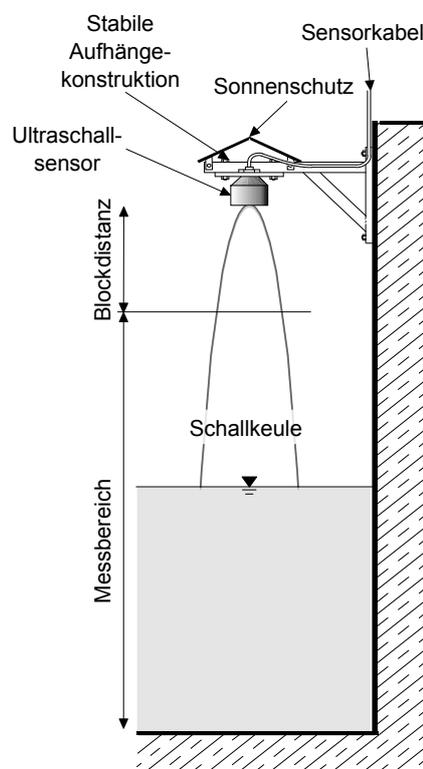


Abbildung 2-5: Messanordnung einer Ultraschall-Echolotsonde (DWA-M 181, 2011 mod.)

Wasserstandsmessung mit Radar- und Mikrowellenecholot

Das Radar- bzw. Mikrowellenecholot funktioniert ähnlich wie eine Ultraschallsonde, mit dem Unterschied, dass es Impulse im Frequenzbereich der Mikrowellen verwendet und dadurch temperaturunabhängig ist.

2.3.4 Magnetisch Induktiver Durchflussmesser (MID)

Bei der Durchflussmessung mittels MID kann zwischen Betrieb bei Vollfüllung und Teilfüllung unterschieden werden. Der MID stellt das genaueste automatische Messsystem für Durchflussmessungen dar ([DWA-M 181](#), [2011](#)).

Bei einem Vollfüllungs-MID ist ein vollständig gefüllter Rohrquerschnitt erforderlich. Dies wird zumeist durch Unterdükerung des Messquerschnittes erreicht. Der Vorteil hierbei ist, dass mithilfe der Kontinuitätsgleichung lediglich die mittlere Geschwindigkeit gemessen werden muss, um den Durchfluss zu ermitteln. Dieser wird nach dem Induktionsprinzip aus der induktiv gewonnenen Messspannung ermittelt.

Bei einem Teilfüllungs-MID wird durch die Anordnung paralleler Elektrodenpaare gleichzeitig zur mittleren Fließgeschwindigkeit auch der Füllstand ermittelt, woraus indirekt der Durchfluss berechnet werden kann.

2.4 Datengrundlage

Die ARA Graz wurde 2001 bei der letzten Erweiterung auf 500 000 Einwohnerwerte ausgelegt und auf einen Trockenwetterzufluss von 1 600 L/s dimensioniert. Die maximale hydraulische Kapazität der ARA bei Regenwetter liegt mit 3 200 L/s bei der zweifachen definierten Trockenwettermenge. Da auch Ereignisse mit einer höheren Zuflussrate auftreten können, ist aus diesem Grund vor der ARA ein Mischwasserüberlaufbecken (MÜB) situiert, das neben einer Entlastungs- auch eine Speicherfunktion bietet. Dieses Becken umfasst ein Volumen von 12 000 m³. Im Endausbau kann der ZSK zu ca. 2/3 rein gravitativ in den Zulaufkanal zur ARA Graz entleert werden. Das restliche 1/3 seines aktivierbaren Volumens wird über das Mischwasserüberlaufbecken entleert. Die Entleerung des bereits in Betrieb befindlichen ZSK I wird durch steuerbare Schieber und Wehre in vier Kontrollstrukturen (KS0 bis KS3) geregelt (siehe Abb. 2-6). Somit ergibt sich im ZSK I aktuell ein speicherbares Gesamtvolumen von 23 000 m³.

In der aktuellen Betriebsweise ist der Schieber im KS0 zwischen dem ZSK I und dem Mischwasserüberlaufbecken und auch der Entleerungsschieber im KS1 zur ARA zumeist offen, wodurch im ZSK I aktuell nur maximal 11 000 m³ gespeichert werden können. Gemeinsam mit den 12 000 m³ Speichervolumen des Mischwasserüberlaufbeckens ergibt das die aktuellen 23 000 m³ speicherbares Gesamtvolumen, welches über die beiden parallel betriebenen Schneckenpumpen mit einer Förderleistung von 2 x 250 L/s in den Zulauf zur ARA entleert werden kann. (Hofer *et al.*, 2015)

Als Datengrundlage wurden in dieser Arbeit zeitlich hochaufgelöste Messdaten aus dem Zulaufbereich der ARA Graz verwendet. Neben Daten aus dem Prozessleitsystem der ARA (PLS) wurden zusätzlich Daten von zwei vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz betreuten Online-Monitoring-Messstationen herangezogen. Die erste Online-Monitoring-Messstation (Graz-ARA-Zulauf) befand sich direkt im Zulauf zur ARA. Die zweite Online-Monitoring-Messstation (Graz-MÜB-Überlauf) befand sich im Entlastungskanal des MÜB in Richtung Mur.

In Abbildung 2-6 ist zur Übersicht das integrale Messnetz aller Stationen im ZSK und im Bereich der ARA Graz abgebildet. Die in der Abbildung farblich hinterlegt dargestellten Messstationen wurden für diese Arbeit verwendet.

Die Messstelle Graz-ARA-Zulauf war ex-situ als Bypass-Wanne ausgeführt. Der Ansaugpunkt dieser Messstation war während der Bearbeitungszeit der Masterarbeit zwischen den Sandfängen und den Vorklärbecken der ARA situiert. Dafür wurden 2 L/s Abwasserstrom kontinuierlich über eine Zuleitung zur 120 Liter großen Bypass-Wanne gepumpt. Dadurch wurde in der Bypass-Wanne eine Ge-

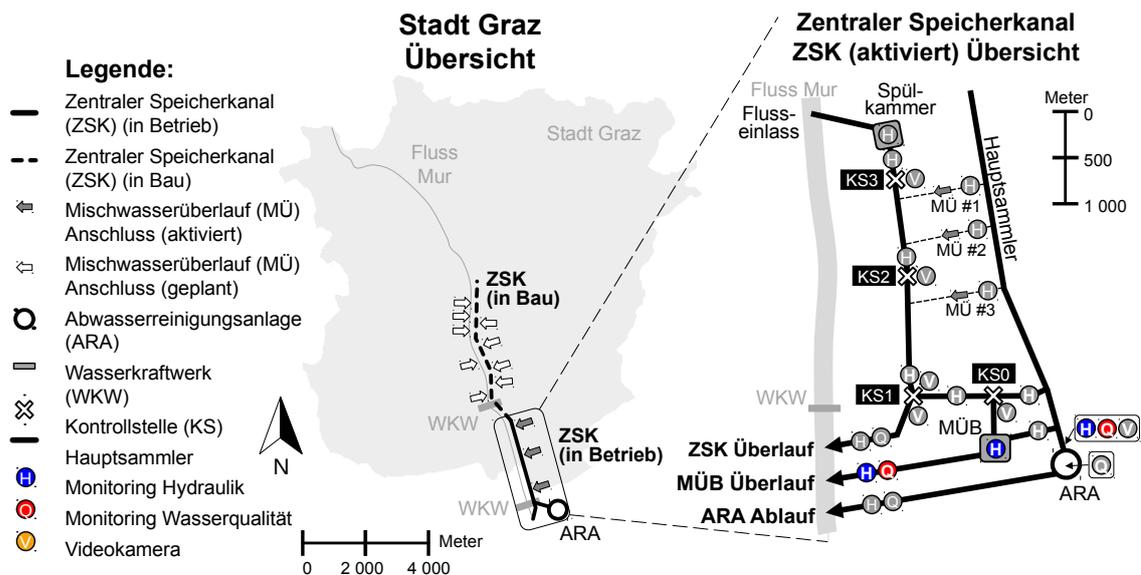


Abbildung 2-6: Übersicht des integralen Messnetzes ZSK und ARA in Graz (Hofer et al., 2017)

schwindigkeit von ca. 3 cm/s erreicht. Der Vorteil dieses Ansaugpunktes war, dass durch den davor situierten Schotterfang und Sandfang jene Grobstoffe aus dem Abwasser bereits zum Großteil abgetrennt wurden, die die Messqualität der im Bypass installierten Sonden negativ beeinflussen können. Ein möglicher Vorabbau der Schmutzstoffe bis zum gewählten Ansaugpunkt wurde dabei als vernachlässigbar angenommen. Als Nachteil dieser Installation muss die Länge der Ansaugleitung mit ca. 70 m angeführt werden.

In der Bypass-Wanne wurden mehrere qualitative Abwasserparameter mit verschiedenen Sondentypen gemessen. Für diese Arbeit wurden die Messgrößen zweier Sonden verwendet. Zum einen wurden mit einer UV/VIS Spektrometersonde (Abschnitt 2.3.1) die Kohlenstoff-Summenparameter BSB₅ und CSB sowie AFS gemessen, zum anderen wurde mit einer ISE-Sonde (Abschnitt 2.3.2) die Ammoniumstickstoff-Konzentration (NH₄-N) gemessen. Die in dieser Masterarbeit verwendeten Sonden sind in Abbildung 2-7 rot markiert.

Die Messstelle Graz-MÜB-Überlauf im Entlastungskanal des MÜB wurde in-situ betrieben und erfasste neben Durchfluss und Höhenstand (Ultraschallmessung) auch die Qualitätsparameter BSB₅, CSB und AFS mithilfe einer UV/VIS-Spektrometersonde.

Im MÜB wird zusätzlich mittels Höhenstandsmessung (siehe Abschnitt 2.3.3) der relative Füllungsgrad der Becken gemessen und an das PLS der ARA übermittelt. Der Zulaufvolumenstrom der ARA wird durch drei parallel betriebene MID-Systemen (Abschnitt 2.3.4) in den Verbindungsleitungen zwischen den 3 belüfteten Sandfängen und der Vorklärung gemessen und ebenfalls über das PLS bereitgestellt. Mittels automatischer Skripte werden die Daten der beiden Online-

2. Grundlagen

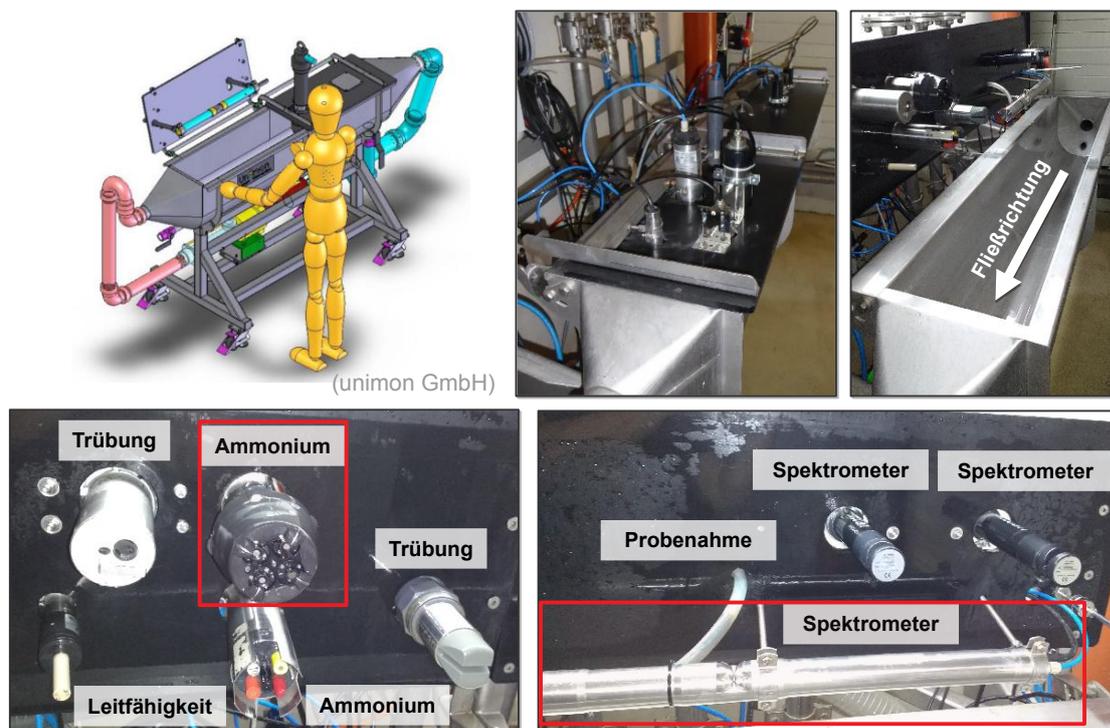


Abbildung 2-7: Messstation im Zulauf der ARA Graz (Graz-ARA-Zulauf) (Hofer, 2017)
Die rot markierten Sonden wurden für diese Arbeit verwendet.

Messstationen und aus dem PLS kontinuierlich auf den Datenserver des Instituts exportiert und dort gespeichert und zur Weiterbearbeitung zur Verfügung gestellt. Die meisten Qualitäts-Sensoren wurden am Messgerät justiert, um möglichst reale Messwerte vor Ort anzuzeigen.

Es wurden Zeitreihen mit äquidistanten Zeitschritten und einer Zeitdistanz (Intervall) von einer bzw. zwei Minuten generiert. In Tabelle [2-1](#) sind die verwendeten Messgrößen je Messstation aufgelistet.

2.4.1 Wartung

Die Messstationen wurden im Untersuchungszeitraum von Mai 2016 bis Juni 2017 in regelmäßigen, meist wöchentlichen Abständen gewartet. Von Juni bis Juli 2017 wurde auf einmonatliches Wartungsintervall umgestellt.

Die Wartung umfasste die Beurteilung des Ist-Zustandes und gegebenenfalls die Wiederherstellung des Sollzustandes. Meist hatte dies eine Reinigung und Entfernung von Ablagerungen an den Messstationen und speziell der Sonden und deren Sensoren zur Folge. Dazu wurde ein genaues Protokoll geführt, in dem alle Metadaten wie Wartungsarbeiten, Plausibilitätskontrollen sowie sonstige Auffälligkeiten der Messwerte aufgezeichnet wurden.

Tabelle 2-1: Verwendete Messgrößen je Online-Messstation sowie die aus dem PLS der ARA bereitgestellten Daten

Station	Bezeichnung der Messgrößen mit Einheit	Durchschnittliches Zeitintervall in Minuten	Länge der Zeitreihe in Jahren
Graz-ARA-Zulauf	BSB ₅ , CSB, AFS, NH ₄ -N [mg/L]	2	1,5
Prozessleitsystem (PLS)	H_MÜB [%], Q [L/s]	1	1,5
Graz-MÜB-Überlauf	Q [L/s], BSB ₅ , CSB, AFS [mg/L]	2	1,5

2.4.2 Messkampagnen / Vergleichsanalytik

Innerhalb des Untersuchungszeitraums wurden regelmäßig Messkampagnen in Form von Probenahmen mit zugehöriger Vergleichsanalytik im Labor durchgeführt, deren Ziel es war, die Überprüfung und Kalibrierung der betriebenen Messsysteme durchzuführen. Eine Messkampagne wurde meist über 24 Stunden durchgeführt, wobei stündliche Einzelproben durch einen automatischen Probennehmer entnommen wurden. Durch die Analyse vollständiger Tagesgänge konnte deren volle Variabilität hinsichtlich der Durchfluss- und Konzentrationswerte bei Trockenwetterbedingungen erfasst werden. Ergänzend dazu wurden auch Messkampagnen während Mischwasserereignissen durchgeführt, um auch deren Variabilität im Regenwetterfall erfassen zu können.

2.4.3 Datenverwaltung

Der Datenimport wurde durch einen VPN-Tunnel regelmäßig im 4-Stundentakt ausgeführt. Die Daten wurden über ein Programmskript zum Datentransfer vom Datenlogger der Messstation zum Server am Institut der TU Graz ausgelesen. Die Messdaten wurden in doppelter Ausführung gespeichert. Zum einen wurden die Eingangsdaten der Messstation als .txt-Datei gespeichert und zum anderen in das Datenbanksystem influxDB ([InfluxDB](#), 2018) aufgenommen. Vor dem Speichervorgang wurde die Struktur der Daten in ein einheitliches Format überführt.

Die gemessenen Parameter bekamen den strukturierten Namen SUBSTANZ_SENSORNUMMER. Die Zeitstempel wurden in die koordinierte Welt-

2. Grundlagen

zeit (UTC) überführt. Für die Datenbank wurde ein „Measurement“-zentriertes Layout angewendet. Hier entspricht jede Messstation (Logger) einem „Measurement“. Pro „Measurement“ können beliebig viele Variablen (Messsignal) als „Field“ abgelegt werden. In influxBD können keine Werte mit dem Inhalt NaN (not a number) oder \pm inf (infinity = unendlich) gespeichert werden. Daher wurden je Variable zusätzlich drei weitere Fields, `<variable>#nan`, `<variable>#inf` und `<variable>#-inf` gespeichert. Diese Fields enthalten einen boolean Wert (true/false), um einen derartigen Fehler zu kennzeichnen.

InfluxDB kann nur einen Wert je gleicher - „Measurement“, „Field“, „Tag“ und Zeitpunkt - Kombination speichern. Durch Fehler in der Sensorik oder bei der Verarbeitung im Datenlogger können Messwerte einen identen Zeitstempel (Duplikat) bekommen. Da die Datenbank keine Zeitduplikate speichern kann, wird der `duplicate_nr`-„Tag“ verwendet. Dieser nummeriert etwaige Duplikate mit einer fortlaufenden Nummer. (Camhy *et al.*, [2012](#))

2.5 Statistische Begriffe

2.5.1 Arithmetisches Mittel

Das arithmetische Mittel oder auch der Durchschnitt ist ein Mittelwert und Lageparameter in der Statistik.

Er berechnet sich wie folgt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gleichung 2-2})$$

Mit: \bar{x} ... Mittelwert
 x_i ... i -ter Wert einer Stichprobe
 n ... Stichprobenumfang

Ein Merkmal ist seine Anfälligkeit für Ausreißer.

2.5.2 Quantil

Ein p -Quantil ist der Wert, der größer ist, als ein gewisser Anteil $p*n$ der Gesamtmenge n . Wird der Anteil in Prozent ausgedrückt, spricht man von dem Perzentil. Die beiden Viertelpunkte der Daten bei $p=0,25$ und $p=0,75$ werden als unteres und oberes Quartil bezeichnet.

2.5.3 Median

Der Median oder auch Zentralwert ist ein Mittelwert und Lageparameter in der Statistik. Er beschreibt das 50 % Perzentil und errechnet sich folgendermaßen:

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{\frac{n+1}{2}} & n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} * (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) & n \text{ gerade} \end{cases} \quad (\text{Gleichung 2-3})$$

Mit: \tilde{x} ... Median
 x ... Wert einer geordneten Stichprobe
 n ... Stichprobenumfang

Ein Merkmal des Medians ist die Robustheit gegen Ausreißer. Gegenüber anderen robusten Methoden lässt sich der Median sehr schnell berechnen.

2.5.4 Median der absoluten Abweichungen vom Median

Der Median der absoluten Abweichungen vom Median (engl. *median absolute deviation* MAD) ist ein robustes Streuungsmaß einer Stichprobe (Rousseeuw & Croux, 1993).

$$MAD = \text{median}(|x_i - \tilde{x}|) \quad (\text{Gleichung 2-4})$$

Mit: MAD ... Median der absoluten Abweichungen des Median
 x_i ... Wert der Stichprobe
 \tilde{x} ... Median

Um den MAD mit der Standardabweichung einer Normalverteilung zu vergleichen, gibt es einen Schätzer, der sich wie folgt berechnet:

$$\hat{\sigma} = k * MAD \quad (\text{Gleichung 2-5})$$

Mit: $\hat{\sigma}$... Schätzer der Standardabweichung
 MAD ... Median der absoluten Abweichungen vom Median
 k ... Konstanter Faktor in Abhängigkeit der Verteilungsfunktion

Im Falle der Normalverteilung entspricht dies dem Faktor $k = 1.4826$. (python-Code [A-4](#))

Eine Abwandlung des MAD ist die mittlere absolute Abweichung vom Median (MD) und berechnet sich stattdessen aus $MD = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{x}|$.

2.5.5 Interquartilsabstand

Der Interquartilsabstand (engl. *interquartile range* IQR) ist die Differenz zwischen dem oberen Quartil (75 % Perzentil) und dem unteren Quartil (25 % Perzentil) und enthält somit 50 % aller Daten der gesamten Stichprobe. Er ist ebenfalls eine robuste Berechnungsmethode, um ein empirisches Streuungsmaß einer Stichprobe zu schätzen.

$$IQR = Q_{75\%} - Q_{25\%} \quad (\text{Gleichung 2-6})$$

Mit: IQR ... Interquartilsabstand
 $Q_{75\%}$... Quantil bei $p=0,75$
 $Q_{25\%}$... Quantil bei $p=0,25$

2.5.6 Kerndichteschätzer

Für diesen Abschnitt wurde die Literatur von Nadaraya (1965), Parzen (1962), Scott (2015) verwendet.

Beim Kerndichteschätzer (engl. *kernel density estimation* KDE) handelt es sich um ein statistisches Verfahren, bei dem man aus einem nicht stetigen Histogramm eine stetige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion schätzt. Er wird bei Stichproben verwendet, die einer unbekanntem Verteilung folgen.

Er errechnet sich aus der Summe der sogenannten Kerne. Ein Kern entspricht einem Wert in der Stichprobe und stellt eine Dichteverteilung (Kerndichte) dar. Alle Kerne folgen der gleichen Verteilung.

Ein Beispiel für eine Kerndichte k ist der Gaußkern:

$$k(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \exp\{-\frac{1}{2}t^2\} \quad (\text{Gleichung 2-7})$$

Mit: t ... Variable

Die Kerndichte lässt sich mittels der Bandweite skalieren. Eine große Bandweite bedeutet einen großen Einflussbereich eines Wertes in der gesamten Verteilung und ergibt somit eine ungenauere Auflösung. Wird dieser Einflussbereich zu klein gewählt, wirkt die Verteilung verzerrt und beschreibt nicht die Verteilung der Grundgesamtheit. Zur Ermittlung der Bandweite können folgende Schätzer verwendet werden.

Fall 1: Ansatz nach Scott

$$\frac{1}{n^{d+4}} = n^{-1/(d+4)} = n^{-0.2} \quad (\text{Gleichung 2-8})$$

Mit: n ... Anzahl der Datenpunkte

d ... Anzahl an Dimensionen

Bei einer eindimensionalen Stichprobe wird der Parameter $d = 1$ gesetzt.

Fall 2: Ansatz nach Silverman

$$\left(n * \frac{d+2}{4}\right)^{-1/(d+4)} = (0.75 * n)^{-0.2} \quad (\text{Gleichung 2-9})$$

Mit: n ... Anzahl der Datenpunkte

d ... Anzahl an Dimensionen

2. Grundlagen

Abschließend wird der resultierende Verlauf noch normiert. Ein Beispiel für den Verlauf einer KDE zeigt Abb. 3-7.

Eine Implementation des KDE mit Gaußkern ist im python-Paket `scipy.stats.gaussian_kde` zu finden.

2.5.7 Mahalanobis-Distanz

Die Mahalanobis-Distanz (MD) nach Mahalanobis (1936) ist im Allgemeinen eine relative Distanz zwischen zwei Punkten im mehrdimensionalen Vektorraum.

$$MD_{(x,y)} = \sqrt{(y-x)^T * C^{-1} * (y-x)} \quad (\text{Gleichung 2-10})$$

Mit: $MD_{(x,y)}$... Mahalanobis-Distanz zweier Punkte im mehrdimensionalen Vektorraum
 x ... Vektor „x“ im mehrdimensionalen Raum
 y ... Vektor „y“ im mehrdimensionalen Raum
 C^{-1} ... Inverse Kovarianz-Matrix

Anders ausgedrückt ist die MD die Differenz eines Punktes zum Mittelwert dividiert durch die Standardabweichung.

Sie wird gerne genutzt, um auf Ausreißer zu schließen. Hierfür werden anstatt zweier mehrdimensionaler Vektoren die zwei Dimensionen mehrerer Datenpunkte (x und y) genutzt. In der Abbildung 2-8 ist eine Linie mit konstanter MD als Ellipse dargestellt. Diese lässt sich rein durch die inverse Kovarianz-Matrix konstruieren.

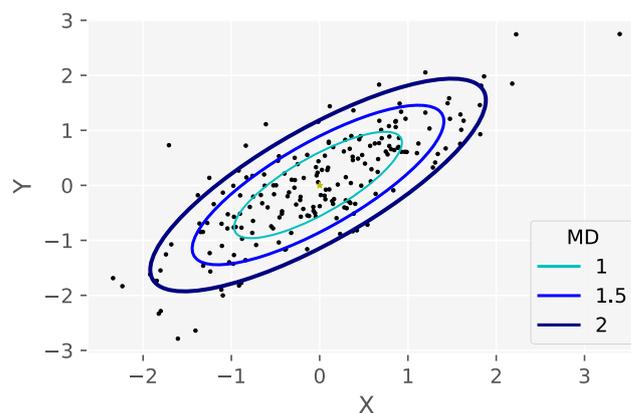


Abbildung 2-8: Beispiel der Mahalanobis-Distanz (MD) in einem Streudiagramm - Eine Linie beschreibt hier die bis zu der gegebenen MD. Das bedeutet innerhalb der innersten Ellipse besitzen alle Punkte eine $MD < 1$. Außerhalb der äußersten Ellipse besitzen alle Punkte eine $MD > 2$.

2.5.8 Bagplot

Der Bagplot ist eine Methode der robusten Statistik zur Auswertung zweidimensionaler Daten und wurde von Rousseeuw *et al.* (1999) entwickelt. Er gilt als 2D-Pendant zum eindimensionalen Boxplot. Es lassen sich Streuung, Schiefe und Ausreißer der Daten darstellen.

Die Konstruktion besteht aus drei ineinander verschachtelten Polygonen und dem mit einem roten Stern gekennzeichneten Halbraummedian (siehe Abb. 2-9). Der innere dunkelblaue Bereich wird „bag“ genannt und beinhaltet bis zu 50 % aller Daten. Der „fence“ wird nicht dargestellt, sondern nur zur Konstruktion benötigt. Seine Größe ist durch das Expandieren des „bag“ mit einem gewissen Faktor bestimmt. Alle Punkte außerhalb des „fence“ werden als Ausreißer definiert (rote Punkte). Der „loop“ beschreibt die konvexe Hülle des „fence“ über die gegebenen Punkte.

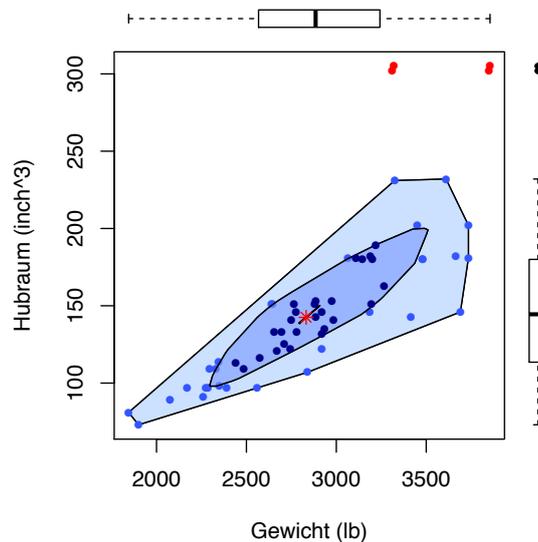


Abbildung 2-9: Beispiel für einen Bagplot anhand 60 unterschiedlicher Kraftfahrzeuge in Abhängigkeit ihres Gewichts und ihrer Leistung - Ausreißer sind als rote Punkte dargestellt. Der innerste Punkt in den Daten ist der Halbraummedian (roter Stern). Der innere dunkelblaue Bereich ist der „bag“ und der äußere hellblaue Bereich wird „loop“ genannt.

2.6 Zielfunktion der linearen Regression

Bei der Regressionsanalyse wird der funktionale Zusammenhang zwischen einer oder mehreren unabhängigen Variablen (x) und der abhängigen Variable (y) analysiert. Sollen mehrere unabhängige Variablen miteinbezogen werden, spricht man von einer multivariaten Regression. Wird nur eine unabhängige Variable verwendet, geht man von einer univariaten Regression aus. Im Zuge der Arbeit wird nur letztere verwendet und in weiterer Folge daher auch nur auf diese näher eingegangen.

Die lineare univariate Regression wird verwendet, um einen linearen funktionalen Zusammenhang zwischen einer unabhängigen und einer abhängigen Variable darzustellen. Sie wird gerne als erster Anhaltspunkt für Abhängigkeiten aufgrund ihrer Einfachheit verwendet.

Die grundlegende Geradengleichung der linearen Regression lautet:

$$y = a + b * x \quad \text{(Gleichung 2-11)}$$

- Mit: y ... Abhängige Variable
 x ... Unabhängige Variable
 a ... Ordinatenabschnitt (intercept)
 b ... Steigung der Geraden

Grundsätzlich lässt sich die Regression auch ohne Ordinatenabschnitt berechnen, wodurch die Gerade dann durch den Nullpunkt verläuft.

2.6.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate (engl. *ordinary least squares* OLS) ist die einfachste und häufigste Zielfunktion zur Lösung einer linearen Regression. Ziel ist es, die Summe aller Abweichungsquadrate in der Regression zu minimieren. Eine Abweichung wird dabei auch als Residuum (Mehrzahl: Residuen) bezeichnet und ist die Differenz zwischen dem wahren und dem geschätzten Wert (Qian, 2017).

Der große Nachteil dieser Methode ist, dass grobe Fehler bzw. Ausreißer durch das Quadrat ihrer Abweichung einen großen negativen Einfluss auf das Ergebnis haben. Bei manueller Betrachtung und Auswertung der Ergebnisse können solche Fehler rechtzeitig korrigiert werden. Da ein Fokus dieser Arbeit auf der Automatisierung der linearen Regression liegt, wurde in weiterer Folge nach robusteren Verfahren gesucht, die Ausreißer automatisiert aus der Datengrundlage für die Regression entfernen können (siehe Abb. 2-11).

$$\begin{aligned}
Q &= \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \\
&= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\
&= \sum_{i=1}^n (y_i - a - b * x_i)^2 \rightarrow \min
\end{aligned}
\tag{Gleichung 2-12}$$

Mit: Q ... Zielfunktion der Minimierung
 δ ... Residuum
 y ... Zielwert
 \hat{y} ... Geschätzter Zielwert

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad a = \bar{y} - b * \bar{x}
\tag{Gleichung 2-13}$$

2.6.2 Methoden zur robusten Auswertung von linearen Regressionen

Robuste Regressionen werden verwendet, wenn Ausreißer oder andere grobe Fehler in den Daten vorliegen. Der Vorteil der robusten Verfahren liegt darin, dass sie die Auswirkungen der vorhandenen Fehler auf die resultierende Regression so gering wie möglich halten. Das Ergebnis ist eine Regression, in der nur Daten verwendet werden, die nicht als Ausreißer erkannt wurden. Nachfolgend werden verschiedene robuste Verfahren vorgestellt.

Hierfür wurde das python-Paket `sklearn.linear_model` verwendet. ([Generalized Linear Models](#), 2018)

RANSAC Algorithmus

RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) ist eine iterative Methode zur Bestimmung der unbekannt Parameter eines gesuchten Modells. Der Algorithmus wählt zufällige Parameter für das Modell aus und beurteilt schrittweise die Anpassung an die Daten. Bei einem linearen Modell sind die verwendeten Parameter die Steigung sowie der Ordinatenabschnitt. Das Ergebnis ist jenes Modell mit der besten Anpassung. (Fischler *et al.*, 1980)

Der Algorithmus legt schrittweise nur eine Funktion über eine gewisse Anzahl an zufälligen Messpunkten. Die Anzahl der Messpunkte ist abhängig von den unbekannt Parametern der gewünschten Zielfunktion. Bei einer Geraden entspricht dies zwei Punkten. Weiters muss ein Schwellenwert (Fehlerschranke) definiert werden, der dem maximalen Abstand zur Funktion entspricht, bei dem ein Wert als Ausreißer definiert wird. Nun wird die Menge an Punkten ermittelt, die sich innerhalb dieses Schwellenwertes befinden. Diese Schritte werden über eine

2. Grundlagen

vorher definierte Anzahl an Iterationsschritten wiederholt. Als Ergebnis wird die Funktion, die am meisten Punkte unterstützt, gewertet (siehe Abb. 2-10). (Randon sample consensus, 2018)

Der beschriebene Algorithmus zeigt gute Ergebnisse bei Ausreißern in y-Richtung, da diese durch die gewählte Fehlerschranke ausgeschlossen werden. Hingegen können sich Ausreißer in x-Richtung negativ auswirken, wenn die Anzahl der dadurch unterstützten Punkte geringfügig höher ist (siehe Abb. 2-11).

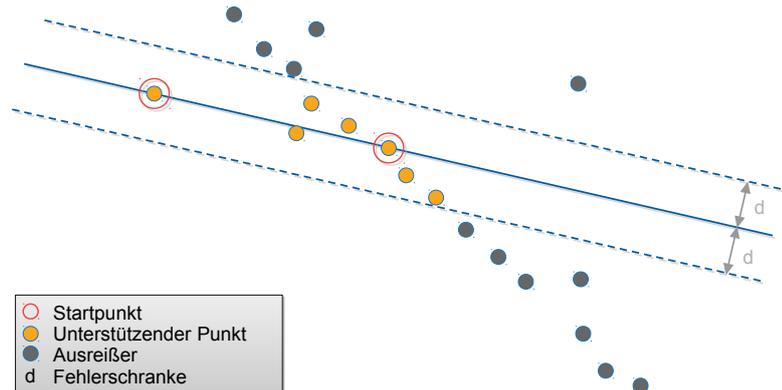


Abbildung 2-10: Anwendungsprinzip des RANSAC Algorithmus als robustes Verfahren der linearen Regression

Theil-Sen Schätzer

Bei diesem Schätzverfahren werden ähnlich wie beim RANSAC Algorithmus anfangs nur zwei Punkte betrachtet und von diesen die Steigung berechnet. Dies geschieht dann für jede mögliche Paarung. Das Ergebnis der Steigung k ist dann der Median aller berechneten Steigungen. Der Achsabstand d berechnet sich anschließend wie folgt: $d = \text{median}(y_i - k * x_i)$

Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es keine Eingangsparameter benötigt. (Rousseeuw & Leroy, 2003)

Es zeigt gute Ergebnisse bei kleinen Ausreißern in x und y-Richtung, weist aber bei großen Ausreißern schlechtere Ergebnisse als die OLS-Methode aus.

In Abbildung 2-11 sind zusammenfassend die unterschiedlichen Verfahren (OLS, RANSAC, Theil-Sen) und deren Auswirkungen auf Ausreißer in der linearen Regression dargestellt. In der linken Grafik besitzen die Daten Ausreißer in y-Richtung. Hier zeigen die robusten Verfahren eine gleichermaßen gute Anpassung. Das Verfahren mit OLS wird durch die vorhandenen Fehler in ihrer Steigung abgelenkt. In der rechten Grafik weisen die Daten Ausreißer in der x-Richtung auf. Die OLS-Methode wird dadurch wieder am stärksten abgelenkt. Die RANSAC Methode wird nur leicht abgelenkt, da die Anzahl der unterstützten Punkte

mit den Ausreißern vergrößert werden kann. Der Theil-Sen Schätzer zeigt hier ebenfalls ein gutes Resultat.

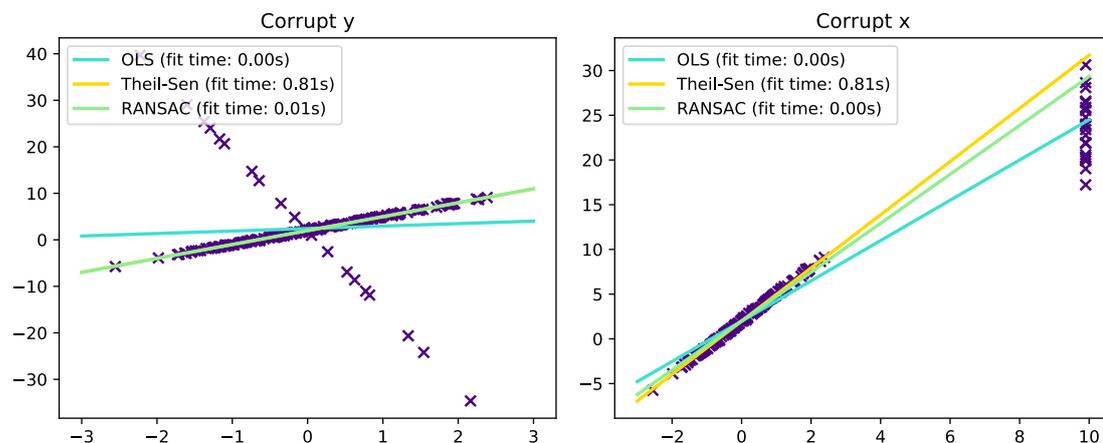


Abbildung 2-11: Empfindlichkeit gegen Ausreißer für unterschiedliche robuste Verfahren der linearen Regression ([Generalized Linear Models, 2018](#))

M-Schätzer für robuste Lineare Modelle

Die Vorgangsweise mit M-Schätzern ist ähnlich wie bei der Methode der kleinsten Quadrate. (Fox & Weisberg, [2011](#), [2013](#)) Anstatt die Summe der quadrierten Fehler minimieren die M-Schätzer die Funktion:

$$Q(e_i, \rho) = \sum_i \rho\left(\frac{e_i}{s}\right) \quad (\text{Gleichung 2-14})$$

- Mit:
- Q ... Zielfunktion der Minimierung
 - ρ ... Symmetrische Wichtungsfunktion der Fehler
 - e_i ... Residuum (Fehler)
 - s ... Schreunungsschätzer

Dies bewirkt eine Minimierung der Einflüsse von Ausreißern. Beispiele für verschiedene Wichtungsfunktionen sind „Andrew’s Wave“, „Hapel’s 17A“, „Huber’s T“, „Ramsay’s Ea“, „Trimmed Mean“ und „Tukey’s Biweight“. Diese sind in [Abbildung 2-12](#) dargestellt. Im Vergleich würde die Methode der kleinsten Quadrate eine horizontale Gerade bei 1,0 als Funktion aufweisen und somit keine Wichtung der Fehler vornehmen.

Hierfür wurde das python-Paket `statsmodels` verwendet. ([Robust Models, 2018](#))

2.6.3 Elimination von Ausreißern

Eine weitere robuste Möglichkeit ist das Entfernen von Ausreißern vor der eigentlichen Regression. Da nach dieser Bereinigung keine Fehler mehr vorliegen,

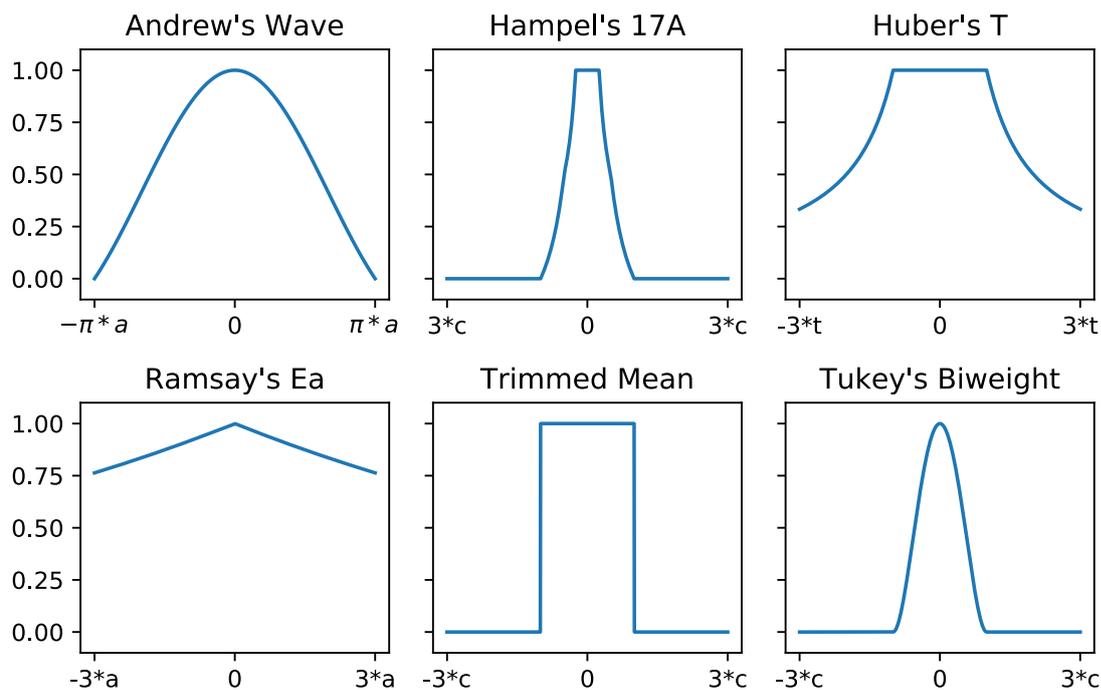


Abbildung 2-12: Unterschiedliche M-Schätzer Funktionen zur Darstellung der Wichtigkeit innerhalb des linearen Modells

kann zur Regression die Methode der kleinsten Quadrate (OLS) verwendet werden, ohne eine Verfälschung des Ergebnisses zu erhalten.

Nachfolgend werden ausgewählte Methoden zur robusten Ermittlung und Vorentfernung von Ausreißern aufgelistet.

- **Mahalanobis Distanz** (siehe Abschnitt [2.5.7](#))

Nach dem Berechnen der MD für jeden Punkt muss für diese ein Grenzwert festgelegt werden. Für die vorliegende Masterarbeit wird dieser auf Basis einer Voranalyse der Daten mit 1,65 definiert. Jeder Punkt der nun eine größere MD aufweist, kann als Ausreißer gewertet werden. Dies bedeutet, dass jene Punkte, die außerhalb der gewählten Ellipse in [Abbildung 2-8](#) liegen, als Ausreißer gewertet werden.

- **RANSAC Algorithmus** (siehe Abschnitt [2.6.2](#))

Abgesehen von einer robusten Methode zur Ermittlung einer linearen Funktion, gibt der Algorithmus die Anzahl an Ausreißern aus.

Dies kann bei Betrachtung des Ergebnisses in [Abb. 2-13](#) durchaus Sinn machen. Der Algorithmus findet in diesem Beispiel bereits ein gutes Ergebnis, aber die wahre Funktion ist etwas steiler. Hier kann mit einer nachgehenden OLS-Regression eine wesentliche Verbesserung des Ergebnisses erreicht werden.

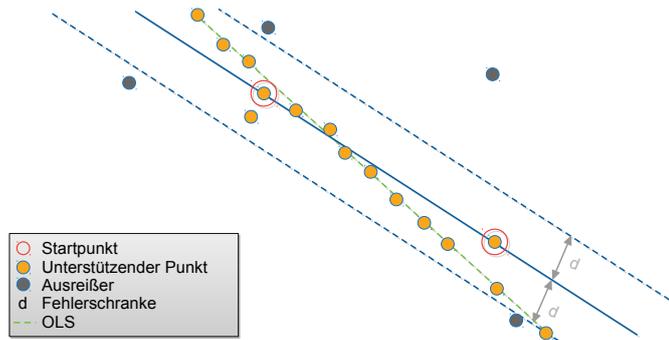


Abbildung 2-13: Falsches Ergebnis nach RANSAC Algorithmus - Im Vergleich dazu zeigt die OLS Methode eine bessere Anpassung.

- **Bagplot** (siehe Abschnitt [2.5.8](#))
Ein wesentliches Ergebnis des Bagplots ist die Detektion von Ausreißern. Diese Ausreißer werden in weiterer Folge aus den Daten entfernt. Mit den restlichen Daten wird, wie oben beschrieben, eine OLS-Regression durchgeführt.
- Weitere Methoden sind im python-Paket `statsmodels` unter `regression.linear_model.OLSResults.outlier_test` integriert. ¹

2.6.4 Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß R^2 (Determinationskoeffizient) ist eine Kennzahl zur Beurteilung der Güte einer linearen Regression und wird definiert als Quotient aus der Streuung der Schätzwerte und der Streuung der Messwerte.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Gleichung 2-15})$$

- Mit: R^2 ... Bestimmtheitsmaß
 y_i ... Zielwert
 \bar{y} ... Mittlerer Zielwert
 \hat{y}_i ... Geschätzter Zielwert
 n ... Anzahl der Werte

Der Wert kann zwischen 0 und 1 liegen (0 - 100%), wobei 1 eine perfekte Anpassung bedeutet. Zu beachten ist die Abhängigkeit des R^2 von der Anzahl der Messpunkte. Daher kann nur ein Vergleich zweier Stichproben mit dem selben Umfang zu einem plausiblen Ergebnis führen. Bei der univariaten linearen Regression entspricht er dem Quadrat des Pearson-Korrelationskoeffizienten.

¹http://www.statsmodels.org/stable/generated/statsmodels.regression.linear_model.OLSResults.outlier_test.html

3 Methodik

Das Ziel dieser Arbeit ist die automatisierte Erkennung und Schmutzfrachtabschätzung von Entleerungsereignissen des ZSK zur ARA Graz durch zeitlich hochaufgelöste, indirekte Messungen der hydraulischen und stofflichen Gesamtbelastung im Zulaufbereich der ARA. Als Vorbild dienen die Methoden zweier Veröffentlichungen, die nachfolgend näher beschrieben werden.

Die ursprüngliche Methode nach Metadier & Bertrand-Krajewski (2011) betrachtet Regenereignisse im Kanal eines Mischsystems im urbanen Bereich. Ziel dabei ist die Abschätzung der durch die Mischwasserereignisse zusätzlich auftretenden Frachten im Vergleich zur Trockenwetterfracht. Es werden in dieser Veröffentlichung CSB-, Trübungs- und Durchflussmessungen ausgewertet. Für die Ereigniserkennung wird keine vorhergehende statistische Auswertung benötigt. Auf Basis der vorhandenen Zeitreihen werden in einem ersten Schritt die Ereignisse (Start, Ende) manuell identifiziert. In einem zweiten Schritt werden den Ereignissen zeitlich naheliegende Trockenwetterperioden (TW-Perioden) auf Vollständigkeit der Daten kontrolliert. In einem dritten Schritt werden die Verläufe dieser TW-Perioden mit den umliegenden TW-Verläufen der anderen Mischwasserereignisse verglichen. Dieser Zeitbereich wird Anpassungsperiode (engl. *fitting period*) genannt und muss im Vorhinein definiert werden. In erster Linie wird auf einen ähnlichen Verlauf geachtet. Bei mehreren in Frage kommenden Perioden, wird diejenige herangezogen, die dem Wertebereich am ähnlichsten ist. Ein Beispiel für dieses Auswahlverfahren kann Abbildung 3-1 entnommen werden. Hat man die beste Anpassungsperiode gefunden, wird das TW-Vergleichssignal soweit gehoben oder gesenkt, bis die Differenz in der Anpassungsperiode minimal wird. Die Differenz zwischen der RW-Stofffracht und der TW-Stofffracht ist dann die resultierende Ereignisfracht.

Basierend auf der beschriebenen Methodik entwickelten Hofer *et al.* (2017) einen Ansatz, den vergleichenden theoretischen TW-Verlauf aus den historischen Daten von vorhandenen Online-Monitoring-Messdaten statistisch zu berechnen. Nach dieser Methode werden die Ereignisse (Start, Ende) ebenfalls manuell identifiziert. Als Grundlage dienen Online-Messdaten aus dem Zulauf zur ARA Graz. Dabei werden jene Tage als Trockenwettertage definiert, die eine Tagessumme von 80 000 m³ und ein Tagesmaximum von 1400 L/s des Durchflusses nicht überschreiten sowie einen Mindestanteil an verfügbaren und validen Daten aufweisen. Weicht das TW-Signal in der Anpassungsperiode (Fitting Periode) vom realen

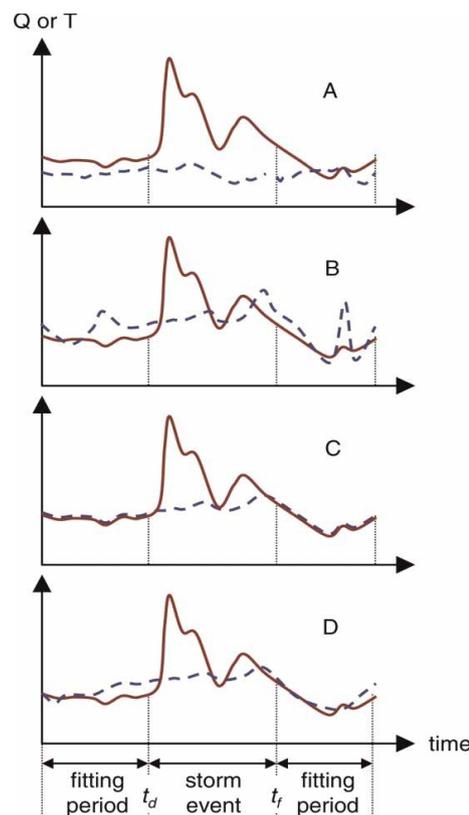


Abbildung 3-1: Grafisches Schema der Methodik von (Metadier & Bertrand-Krajewski, 2011) zur Frachtabschätzung von Mischwasserereignissen

RW-Verlauf ($F_{real,RW}$, $Q_{real,RW}$) im Mischwasserereignis ab, wird dies durch Heben oder Senken der Vergleichswerte minimiert, um eine vergleichbare Situation zu schaffen. Die Dauer der Anpassungsperiode wird mit 60 min definiert. Das Schema dieser Auswertung ist in [Abbildung 3-2](#) dargestellt.

Zur Abschätzung der Ereignisfrachten wird ein mittlerer TW-Tagesgang für den Durchfluss ($Q_{Median,TW}$), die dazu korrespondierenden Stoffkonzentrationen ($C_{Median,TW}$) und die daraus durch Multiplikation resultierende Stofffrachtrate ($F_{Median,TW}$) berechnet. Anschließend wird je Ereignis der TW-Tagesgang so verschoben, dass die Frachtabweichung (ΔF) in der Anpassungsperiode vor und nach dem Ereignis möglichst gering wird ($\Delta F < 1\%$). Die Differenz der gesamten Stofffracht und der Vergleichs-TW-Fracht ist wiederum die Ereignisfracht. Da in dieser Methodik das Hauptaugenmerk auf Entleerungsereignissen des ZSK zur ARA Graz liegt, wird die Ereigniszeit auch als Entleerungszeit bezeichnet.

Aufbauend auf den beiden vorab beschriebenen Ansätzen zur Frachtabschätzung von Mischwasserereignissen wurde im Rahmen dieser Masterarbeit eine eigenständige Methodik mit dem Ziel eines weitestgehend automatisierten Ablaufs der Frachtabschätzung entwickelt. Diese Methodik sieht nicht nur eine Berechnung der historischen mittleren TW-Tagesgänge (TW-Mittel - $Q_{Mittel,TW}$,

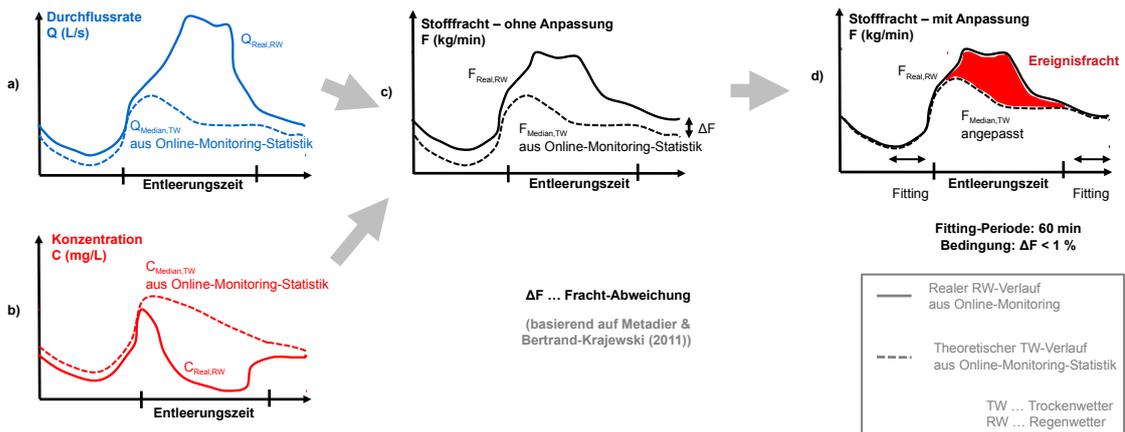


Abbildung 3-2: Grafisches Schema der Methodik nach (Hofer *et al.*, 2017) zur Frachtabschätzung von ZSK-Entleerungsereignissen

$F_{Mittel,TW}$) vor, sondern es wird zusätzlich dazu auch noch ein theoretischer TW-Bereich ermittelt, in dem auf Basis einer statistischen Auswertung der historischen Messdaten automatisiert Trockenwetterbedingungen angenommen werden können. Weicht nun der reale RW-Verlauf ($F_{real,RW}$, $Q_{real,RW}$) vom statistisch ermittelten TW-Bereich ab, wird von einem Mischwasserereignis ausgegangen (siehe Abb. 3-3). Um damit auch Ereignisfrachten ermitteln zu können, wird als Bezugsbasis ein theoretischer TW-Verlauf (fiktives TW-Kontinuum) erstellt. Die Differenz zwischen der realen RW-Fracht und der Fracht aus dem TW-Kontinuum ($F_{Kont,TW}$) ist dann die Ereignisfracht.

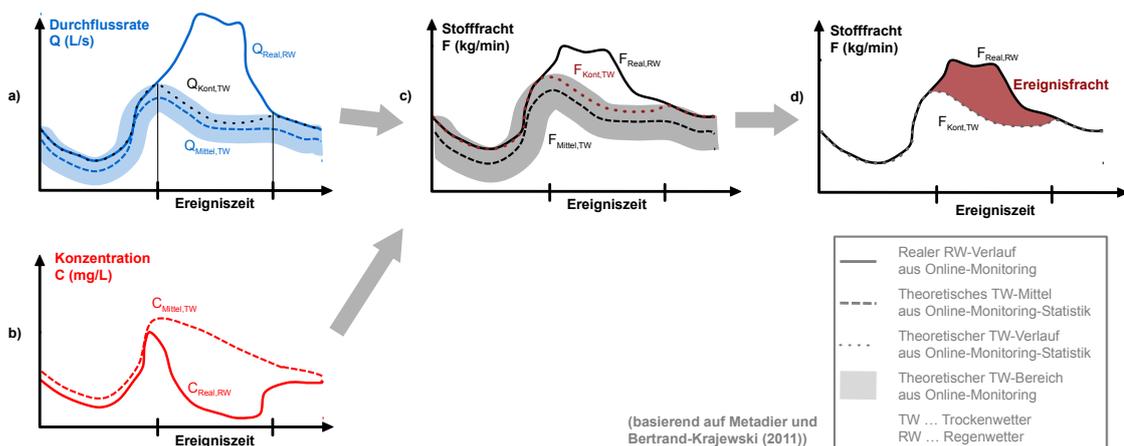


Abbildung 3-3: Grafisches Schema der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zur automatisierten Frachtabschätzung von Mischwasserereignissen

Die Methodik wurde mithilfe der Programmiersprache `python` umgesetzt. Einige Vorteile dieser Programmiersprache werden nachfolgend aufgelistet:

- Python ist eine Open-Source Software und somit kostenlos verfügbar und einsetzbar.

3. Methodik

- Python ist eine leicht lesbare Programmiersprache.
- Python ist weit verbreitet und bietet eine große Community, die eine schnelle Hilfestellung bei Problemen sicherstellt.
- Python bietet eine große Bibliothek an vorgefertigten Programmpaketen zur Funktionserweiterung an.
- Python ist beim Ausführen des Codes im Vergleich zu anderen Programmiersprachen, die in der Wissenschaft Verwendung finden, schneller (Wie etwa R, Matlab, usw.).
- Python ist eine objektorientierte Programmiersprache, womit komplexere Programme komfortabel entwickelt werden können.

Für die Umsetzung des Codes wurde auf ausgewählte, bereits bewährte Programmpakete zurückgegriffen, um eine gesicherte, effiziente und nachvollziehbare Erweiterung der Programmbestandteile zu gewährleisten.

Das `pandas`- Paket wurde zum Einlesen und Verwalten der Daten verwendet. Es arbeitet mit datenbankähnlichen Operationen, womit es sehr schnelle Berechnungen ermöglicht. Das `NumPy`- und `SciPy`- Paket wurden für grundlegende Berechnungen verschiedenster Arten verwendet. Das `matplotlib`- Paket wurde zum Plotten der Grafiken verwendet.

Um den Programmcode allgemein verständlich zu gestalten, wurde dieser ausschließlich in englischer Sprache geschrieben und kommentiert.

Daher werden auch alle damit generierten Grafiken in dieser Masterarbeit in englischer Sprache dargestellt. Die zugehörigen Begriffe werden dabei sowohl in Deutsch wie auch in Englisch angegeben, um den Bezug zwischen dem Text und dem Code sicherzustellen.

Zu den Details der programmtechnischen Umsetzung der Methodik wird auf Abschnitt [3.2](#) verwiesen. Nachfolgend wird der Ablauf der Datenvorbereitung zur Anwendung der entwickelten Methodik beschrieben.

3.1 Datenaufbereitung

In diesem Abschnitt wird auf die Aufbereitung, Prüfung und Korrektur der Messdaten eingegangen. Dies geschieht teilweise manuell, großteils jedoch mithilfe automatischer Tests und Korrekturfunktionen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurden manuell auf **Konsistenz** geprüft. Dies geschah durch visuelle Kontrolle der Messdaten. Ein Beispiel für Konsistenz ist der Einfluss der erhöhten Durchflussmenge durch ein Regenereignis auf die gemessene Konzentration im Zulauf zur ARA. Etwaige Fehler aus Inkonsistenz werden durch grobe Fehler ausgelöst, die vor der Weiterverarbeitung bereinigt werden müssen. Bereiche in denen diese Fehler aufgetreten sind, wurden in einem Protokoll (siehe Abschnitt [3.1.3.1](#)) eingetragen. Diese Datei enthält außerdem weitere Metadaten zu den Messstationen. Außerdem wurden die Daten auf **Richtigkeit** kontrolliert. Dies umfasst das richtige Anwenden der Gerätekenlinien, Messen im vordefinierten Messbereich, Bedienung laut Herstelleranleitungen und der Messung laut Betriebsvorschrift.

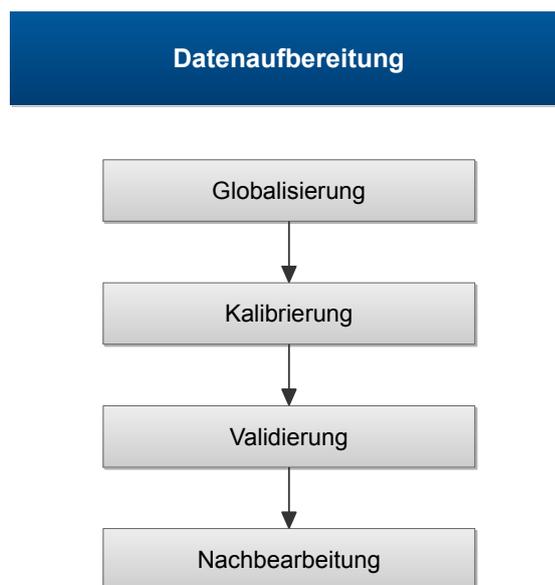


Abbildung 3-4: Flussdiagramm zum Methodenablauf der Datenaufbereitung

Die Eingangsdaten (input) für die weiterführende Bearbeitung liegen prinzipiell nicht als Rohdaten sondern bereits als Primärdaten vor, wobei bei einigen Messgeräten die Messgrößen der Qualitätsparameter über Justierung am Gerät eingestellt wurden, womit es sich in diesem Fall bereits um Sekundärdaten handelt.

In Tabelle [3-1](#) sind die einzelnen Bearbeitungsebenen der Messdatenverarbeitung aufgelistet. Sie werden im Rahmen der Datenaufbereitung immer in dieser Reihenfolge chronologisch abgearbeitet. Es handelt sich hierbei um ein hierarchisches System, da sich die Qualität der Daten von Ebene zu Ebene steigert.

3. Methodik

Tabelle 3-1: Bearbeitungsebenen der Messdatenverarbeitung

1	input	Eingangsdaten (ev. mit Justierung)
2	global	Primärdaten ohne Justierung
3	local	Daten nach lokaler Kalibrierung
4	validated	Fehlerhafte Daten entfernt
5	analyse	Kurze Lücken aufgefüllt und Daten geglättet
6	analyse_local_time	Daten in MEZ/MESZ konvertiert und Bereich der Zeitumstellung entfernt

In Abbildung [3-5](#) ist ein Beispiel für die Auswirkung der einzelnen Bearbeitungsebenen dargestellt. In den Bearbeitungsebenen 3 bis 4 handelt es sich um Sekundärdaten.

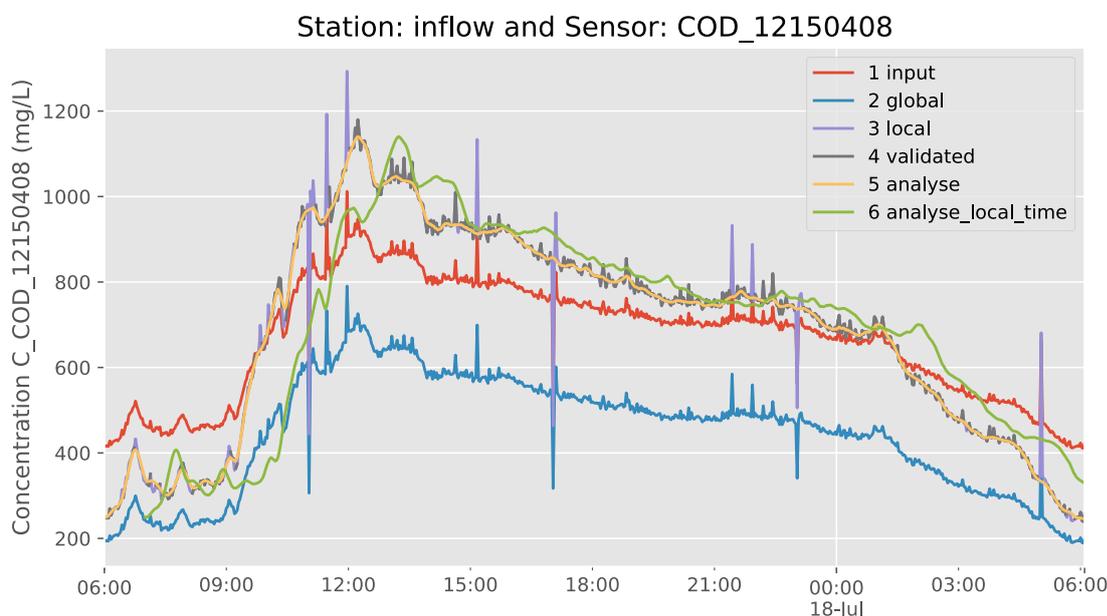


Abbildung 3-5: Vergleich zwischen den Bearbeitungsebenen der Messdaten am Beispiel der CSB-Konzentration von 17.07.2016 06:00 Uhr - 18.07.2016 06:00 Uhr

3.1.1 Globalisierung der Messdaten

Bei manchen Sensoren wurde innerhalb des Untersuchungszeitraums vor Ort eine lokale Kalibrierung mit anschließender Justierung vorgenommen. Diese Daten werden in dieser Bearbeitungsebene mit der bekannten Kalibrierungsfunktion auf den „globalen Status“ zurück gerechnet. Global bedeutet dabei die Einstellung auf die ursprüngliche Werkseinstellung des Herstellers. Die Kalibrierungsfunktion hat, abhängig vom Zeitpunkt der Justierung, einen zeitlichen Gültigkeitsbereich.

Der Grund für diesen Schritt wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

Für weitere Informationen zur Umsetzung in Kombination mit einem Beispiel siehe Anhang [B](#) und Tab. [B-1](#).

3.1.2 Kalibrierung der Messdaten

In diesem Schritt werden die zuvor ermittelten Primärdaten an die vorhandene (lokale) Abwassermatrix mithilfe von Ergebnissen aus einer Referenzanalytik auf Basis von parallel durchgeführten Messkampagnen angepasst.

Das hat den Vorteil, dass die nachgehend berechnete Kalibrierung laut Caradot *et al.* ([2015](#)), unter Berücksichtigung aller historischen Daten, bei jeder Messkampagne stabiler wird, was bedeutet, dass das Ergebnis weniger anfällig auf Ausreißer in Form von Fehlern ist.

Eine Kalibrierung muss nur für jene Sonden durchgeführt werden, die mit der Abwassermatrix in Berührung kommen. Zu den Daten die nicht fortlaufend nach jeder Messkampagne kalibriert werden, gehören der Durchfluss, die Temperatur und der Luftdruck der automatischen Sensorreinigung (Betriebsparameter). Wobei die Durchflussmengenmessung im Zulauf zur ARA nach der Inbetriebnahme kalibriert und im Rahmen der jährlichen ÖWAV RB 38 Überprüfung kontrolliert wird (OEWAV, [2007b](#)).

Es werden die Online-Daten der Sonden mit den Messergebnissen der aus den Messkampagnen (siehe Abschnitt [2.4.2](#)) resultierenden und im Labor ausgewerteten Proben verglichen und deren Abweichung bestimmt. Bei der Gegenüberstellung werden die Sensordaten mittels Regression (siehe Abschnitt [2.6](#)) bestmöglich den Labordaten angenähert. Aufgrund der Einfachheit, der besseren Vergleichbarkeit und der großteils guten Anpassung werden ausschließlich lineare Zielfunktionen verwendet (Lepot *et al.*, [2016](#)). Durch das Anstreben einer möglichst automatisierten Durchführung der Kalibrierung wird es notwendig, die Regression über robuste Funktionen zu ermitteln, um den Einfluss von Fehlern und Ausreißern möglichst gering zu halten.

Als Ergebnis erhält man eine Tabelle mit den Regressionsparametern je Messgröße und einem Bewertungskriterium (siehe Tab. [B-2](#)). Diese Tabelle wird dann beim Auslesen der Daten aufgerufen und die lokale Anpassung der Daten durchgeführt. Ein Beispiel für so eine Tabelle und weitere Informationen zur Umsetzung sind im Anhang [B](#) zu finden.

Kalibrierung über Expertenwissen

Zeigt das Ergebnis der Kalibrierung keinen zufriedenstellenden Zusammenhang, dann ist es sinnvoll, die Daten anhand anderer Messwerte anzupassen. Im Falle von Redundanzen sind die Ergebnisse ebenfalls unzufriedenstellend, wenn die Messdaten einer zweiten Sonde, welche denselben Inhaltstoff am selben Einbauort misst (z. B. aus dem PLS der ARA), sich nicht im selben Messwertbereich bewegen. Ein weiterer Grund für eine Bearbeitung ist, wenn sich die aus der Umwandlung resultierenden Daten in einem nicht möglichen (z. B. negativen) Wertebereich befinden. Diese Kontrollen sind auch notwendig, wenn das Bewertungskriterium der Regression auffallend schlecht ist. Etwaige manuelle Kalibrierungsfunktionen werden in Tabellen (siehe Tab. **B-3**) zusammengefasst. Bei der Umrechnung der Daten werden die manuellen Funktionen hierarchisch über die automatisierten Funktionen gestellt und somit Letztere ignoriert.

Bewertungskriterien

Zum Vergleich der verschiedenen Regressionen müssen Bewertungskriterien definiert werden. Diese Kriterien sind ein Maß dafür, wie gut die durchgeführte lineare Regression die Daten repräsentiert. Hierfür wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 (siehe Abschnitt **2.6.4**) verwendet.

3.1.3 Validierung der Messdaten

In diesem Schritt werden vermeintliche Fehler in der gesamten Zeitreihe einer Messgröße detektiert und entfernt. Basis für diesen Vorgang ist die Identifikation des messstellenspezifischen Verhaltens, wie zum Beispiel des maximal möglichen Durchflusses im Zulauf zur ARA und die Informationen über sensorspezifische Eigenschaften, wie zum Beispiel die Messbereichsgrenzen einer Sonde. Dieses Wissen wurde verwendet, um die Grenzen für die Validierung je Messstelle und Messgröße festzulegen.

Durch den starken Einfluss von Niederschlagsereignissen, den industriellen Einleitern in das Kanalsystem und die daraus resultierende große mögliche Schwankungsbreite der Daten ist eine Prüfung über längere Zeitspannen durch Bilanzen, Tagesganglinien oder Trends nicht oder nur sehr schwer möglich.

3.1.3.1 Manuelle Datenprüfung

Die manuelle Datenprüfung beschreibt die Identifikation all jener Auffälligkeiten, die nicht durch Regeln beschreibbar sind. Hierzu wurde ein Logbuch (Protokoll)

angelegt, in dem derartige Fehler eingetragen wurden. Zu diesen Auffälligkeiten gehören zum Beispiel stationsspezifische Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, Rauschen eines Signals oder aber auch Störungen und Ausfälle. Außerdem wurden in diesem Protokoll Wartungen und sonstige Arbeiten an den Stationen dokumentiert.

Zur automatisierten Einbeziehung dieser Metadaten in die Datenaufbereitung wurde jedem Eintrag eine Kennung beigefügt. Diese kennzeichnet, wie mit den Daten in weiterer Folge umzugehen ist.

Die gewählten Kennungen sind:

- **info**

Der Eintrag enthält nur Informationen zu den Sensoren oder zur Station. Die Daten bleiben im betroffenen Zeitbereich unverändert.

- **error**

Es liegt ein Fehler vor. Die Daten werden aus dem Messergebnis entfernt.

- **maintenance**

An der Station wurde eine Wartung durchgeführt, die meist ein temporäres Entfernen der Sensoren aus dem Abwasser zur Folge hatte. Daher werden auch diese Daten entfernt.

- **calibration**

Der Eintrag enthält Informationen zur Justierung eines Sensors oder der Durchführung einer Probenahme zur Kalibrierung. Die Daten bleiben im betroffenen Zeitbereich unverändert. Die Informationen zur Justierung wurden ebenfalls in einer separaten Datei gesammelt (siehe in Abschnitt [3.1.1](#)).

- **organization**

Der Eintrag markiert den Zeitpunkt, ab wann z. B. ein Sensor oder eine Station in oder außer Betrieb genommen wurde. Daten die außerhalb dieser Zeitpunkte liegen, werden ebenfalls als ungültig verworfen und aus dem Messergebnis genommen.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird bei jedem Eintrag ins Logbuch der Verfasser und eine aussagekräftige Beschreibung hinzugefügt.

Durch die manuelle Datenprüfung wurden wertvolle Informationen zur Formulierung der automatisierten messstellenspezifischen Prüfungsroutinen gesammelt.

3.1.3.2 Automatisierte Datenprüfung

In der automatisierten Datenprüfung werden die Messdaten je Variable (Messgröße) auf ihre numerische Plausibilität geprüft und bei einem negativen Testergebnis aus der weiteren Verarbeitung entfernt.

Nach der Definition der sonden- und messstellenspezifischen Gültigkeitsbereiche werden diese in Form von Metadaten als `.csv` Dateien gespeichert und vom Programmcode automatisch miteinbezogen. Damit können die Grenzwerte der Gültigkeitsbereiche einfach und nachvollziehbar angepasst werden, ohne näher in den Programmcode einsteigen zu müssen.

In dieser Arbeit wurden folgende Tests für die einzelnen Messgrößen formuliert und konsequent durchgeführt:

- Ausreißertest: Kontrolle über das Einhalten möglicher Minimum- und Maximum-Werte im Untersuchungszeitraum.
- Gradiententest: Kontrolle über das Einhalten der maximal möglichen Werteanstiege oder -abfälle zwischen zwei Messwerten.

In weiterer Folge wird ein separater Ausreißertest für übergeordnete Messgrößen definiert, die für den ordnungsgemäßen Betrieb der Messstationen essenziell sind. Diese sind nachfolgend aufgelistet:

- Durchflusssignal im ARA-Zulauf
- Durchflusssignal der Bypass-Wanne
- Luftdruck der automatisierten Sondenreinigung

Zusätzlich werden in diesem Arbeitsschritt die Zeitbereiche der automatisierten Reinigung der Bypass-Wanne mit Reinwasser aus den Daten entfernt.

3.1.4 Nachbearbeitung der Messdaten

Im abschließenden Schritt der Datenaufbereitung werden fehlende oder fehlerhafte Daten (Lücken) in den Zeitreihen je Messgröße aufgefüllt sowie die Messgrößen geglättet.

Beim Auffüllen von Daten ist darauf zu achten, dass dabei keine unplausiblen Daten generiert werden. Dies kann passieren, wenn z. B. zu lange Lücken gefüllt werden. Daher ist es sinnvoll eine maximale Dauer der zu füllenden Lücken zu definieren. Für die vorhandenen Daten wurden vier Stunden definiert

(python-Code [A-1](#)). Dabei können die Daten auf Basis unterschiedlicher Funktionen gefüllt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine lineare Interpolation angewandt. Weitere Möglichkeiten wären Daten über ein Regressionsmodell, ein Prozessmodell oder eine Schätzung zu füllen.

Um das Rauschen der Daten zu minimieren, werden sie abschließend vor einer Weiterverarbeitung noch geglättet. Geglättet wird zuerst mithilfe eines gleitenden Medians. Dieser hat den Vorteil, kleine momentane Ausreißer zu entfernen. Abschließend wird auch noch mit einem arithmetischen Mittel geglättet, wodurch sich ein stetiger, runder Verlauf einstellt. Ein wichtiger Parameter für die Parametrierung des Glättens ist die Länge des gewählten Zeitfensters, über welches das Mittel berechnet wird. Wird es zu groß gewählt, kann die Glättungsfunktion wichtige Ausprägungen im Signal entfernen, was zu einer Missinterpretation der Daten führen kann. Wird es zu klein gewählt, hat es keinen spürbaren Glättungseffekt auf die Daten. Für die Arbeit wurde auf Basis von Voruntersuchungen eine Dauer von fünf Minuten gewählt (python-Code [A-2](#)).

Für die Datenanalyse (Abschnitt [3.2](#)) ist das Vergleichen der Tagesgänge notwendig. Da die Tagesgänge stark vom Arbeitsrhythmus und den Gewohnheiten der Bevölkerung im Einzugsgebiet abhängen, werden die Zeitstempel auf die herrschende lokale Sommer- beziehungsweise Winterzeit bezogen und eingestellt.

3.2 Datenanalyse

In diesem Abschnitt werden jene Schritte der Methodik erklärt, die vor der Ereignisdetektion notwendig sind, um die Frachten einer Entleerung abschätzen zu können.

Dabei wird angenommen, dass die Entleerungsfracht aus den ZSK zusätzlich zur TW-Fracht gebildet wird und daher immer größer als die theoretisch auftretende TW-Fracht ist. Die TW-Fracht ist jene Fracht, die unter TW-Bedingungen der ARA zur Reinigung zugeführt wird (Metadier & Bertrand-Krajewski, 2011). Diese TW-Fracht entsteht unabhängig von Niederschlagsereignissen und Entleerungen und besteht hauptsächlich aus häuslichem und industriellem Schmutzwasser.

In der vorgestellten Methodik wird zunächst ein theoretisch durchgehender TW-Verlauf (TW-Kontinuum) auf Basis einer statistischen Auswertung der Online-Monitoring-Messdaten generiert. Das TW-Kontinuum wird für den gesamten Untersuchungszeitraum erstellt und setzt sich aus dem mittleren historischen TW-Verlauf (TW-Mittel) und dem aktuellen Trend des TW-Verlaufs (TW-Level) zusammen.

Die Stofffrachtrate errechnet sich aus dem Produkt des Durchflusses und der korrespondierenden Konzentration.

$$LR_X = Q * C_X \quad (\text{Gleichung 3-1})$$

Mit: LR ... Stofffrachtrate (Load rate)
 Q ... Durchfluss
 C ... Konzentration
 X ... Betrachteter Qualitätsparameter

Die Stofffracht zwischen einem Anfangs- und Endzeitpunkt berechnet sich über die Summe der Stofffrachtrate über die betrachtete Zeitspanne.

$$L_X = \sum_{i=t_{Anfang}}^{t_{Ende}} Q_i * C_{X,i} * \Delta t_i * 10^3 \quad (\text{Gleichung 3-2})$$

Mit: L ... Stofffracht in [kg/min]
 Q ... Durchfluss in [m³/s]
 C ... Konzentration in [mg/L $\hat{=}$ g/m³]
 Δt ... Zeit zwischen den benachbarten Zeitstempeln in [s] (Intervall)
 X ... Betrachteter Qualitätsparameter
 i ... Zeitpunkt oder Zeitstempel

Die Ereignisfracht errechnet sich aus der Differenz zwischen der gesamten gemessenen Fracht und der Vergleichsfracht (TW-Kontinuum) über die Ereignisdauer.

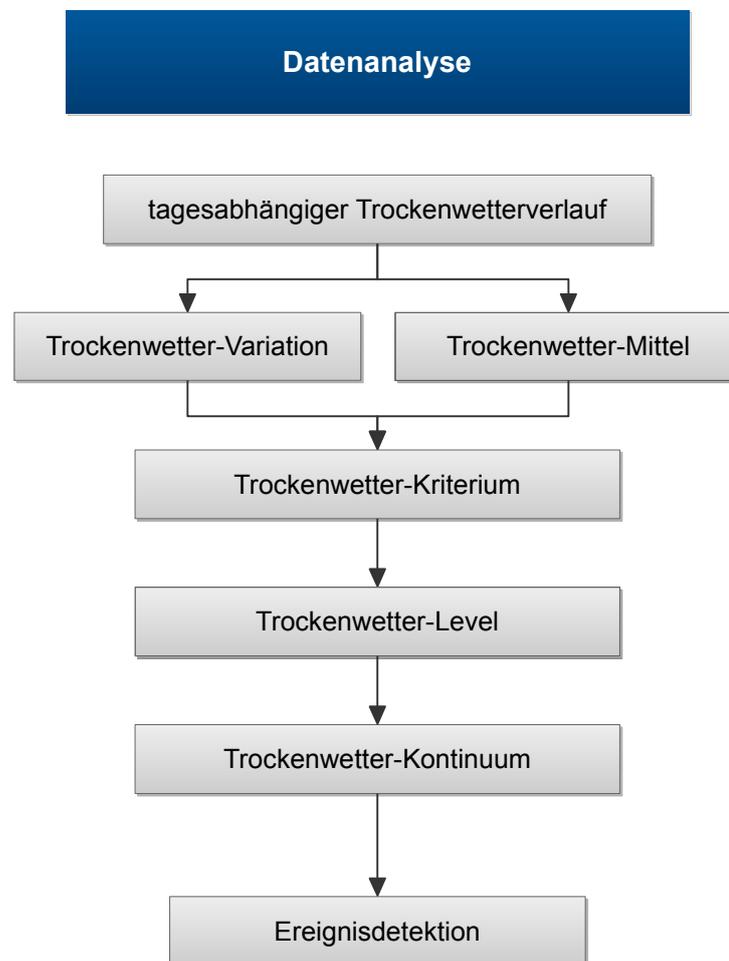


Abbildung 3-6: Flussdiagramm zum Methodikablauf der Datenanalyse

3.2.1 Ermittlung des tagesabhängigen Trockenwetterverlaufs

Da sich der Tagesgang je nach Art des Wochentages unterscheidet, wurden die Daten in die Tageskategorien Werkzeuge, Wochenendtage und Feiertage unterteilt und zur weiteren Analyse getrennt betrachtet. Als Feiertage wurden die gesetzlichen Feiertage in der Steiermark gewertet.

Wenn zwei Tageskategorien einen ähnlichen Verlauf besitzen, kann man sie zu einer gemeinsamen Gruppe vereinen. Damit ergibt sich die stärkste Vereinfachung dadurch, wenn man nur von einem einzigen TW-Tagesverlauf ausgeht. Die detaillierteste Unterteilung erhält man, wenn zwischen jedem Wochentag und zusätzlich auch noch zwischen den Feiertagen unterschieden wird. Eine Unterteilung zwischen diesen beiden Varianten ist nach Belieben möglich.

3. Methodik

Im Code wird zur Unterteilung die Nummer der ersten Spalte in der Tabelle [3-2](#) verwendet und als `day_kind_detail` bezeichnet. Sie deutet in erster Linie auf die Anzahl der verwendeten Unterkategorien der Tageskategorien hin. Die Entscheidung, welche Unterteilung verwendet wird, muss manuell festgelegt werden und ist abhängig von den aus den Messdaten vorhandenen Verläufen der TW-Tagesgänge. Da die Höhe des maximalen Werts der Tagesgänge je Messgröße saisonal abhängig sein kann, ist es zielführend, die Tage nach der Uhrzeit, bei der der Maximalwert auftritt, zu unterscheiden.

Wichtig ist darauf zu achten, die Untergruppen bezüglich der enthaltenen Tage nicht zu klein zu wählen (zu geringe Anzahl an Tagen), da die Unsicherheiten der geschätzten TW-Verläufe mit abnehmender Datengrundlage zunehmen (siehe Abschnitt [3.2.1.3](#)).

Eine Unterteilung mithilfe einer Clusteranalyse führte zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis, da die betrachteten Mischwasserereignisse keine einheitlichen Muster aufwiesen und daher keine qualitative Aussage über einzelne Cluster getroffen werden konnte.

Tabelle 3-2: Unterteilung der Tageskategorien nach ihrem charakteristischen Tagesgang zur weiteren statistischen Auswertung. Die Bezeichnung `day_kind_detail` bezieht sich dabei auf den Programmcode.

<code>day_kind_detail</code>	Art der Tagesgliederung
1	Tag
2	Arbeitsfreier Tag (mit Samstag) Arbeitstag (ohne Samstag)
3	Feiertag Wochenende Arbeitstag
3.1	Samstag Sonn- und Feiertage Arbeitstag
8	Montag Dienstag Mittwoch Donnerstag Freitag Samstag Sonntag Feiertag

Für die Berechnung werden die gesamten Daten abhängig vom Zeitpunkt (HH:MM) und der Tagesart (Tab. [3-2](#)) unterteilt. Je Untergruppe wird dann

ein Mittel und eine Variation berechnet. Durch das Wiederausammenführen der Ergebnisse erhält man je Tagesart einen spezifischen TW-Tagesgang. Ein Beispiel für eine solche Untergruppe ist in der Abbildung 3-7 zu sehen. Entlang der Abszisse sind die einzelnen Werte aufgetragen. In Grau ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung (siehe Abschnitt 2.5.6) dargestellt. Jeder der schwarzen vertikalen Striche entspricht dem Wert an einem Tag (TT.MM.JJJJ) zum selben Zeitpunkt (HH:MM) und der selben Untergruppe der Tagesgliederung.

Bei der Schätzung des TW-Tagesgangs wird zunächst die gesamte Datengrundlage verwendet. Durch das Verwenden robuster Berechnungsmethoden werden Ausreißer in Form von Mischwasserereignissen ausgeschlossen oder zumindest ihr Einfluss minimiert. Eine weitere Möglichkeit für das Auftreten eines Ausreißers ist die Abnahme des Volumenstroms durch das Schließen eines Schiebers. Im Fall der ARA Graz kommt hier zum Beispiel der Zulaufschieber infrage (siehe Abbildung 3-7).

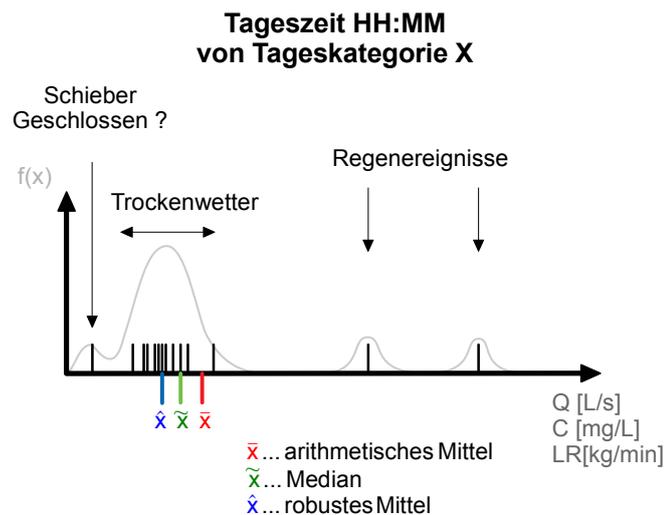


Abbildung 3-7: Schematisches Beispiel einer Untergruppe zur Ermittlung der TW-Verläufe abhängig von der Tageskategorie und Tageszeit

3.2.1.1 Trockenwetter-Mittel

Das Trockenwetter-Mittel (TW-Mittel) entspricht dem Wert, der in Trockenwetterperioden des Betrachtungszeitraums durchschnittlich auftritt. Durch die starken Abweichungen bei Mischwasserereignissen ist das **arithmetische Mittel** (siehe Abschnitt 2.5.1) dafür kein repräsentativer Wert. Ein brauchbares Ergebnis würde dabei nur entstehen, wenn sich in den Daten nur TW-Tage befinden würden und diese keine nennenswerten Ausreißer nach oben oder unten besitzen. Da

3. Methodik

dies bei Verwendung der Datengrundgesamtheit nicht der Fall ist, wurde nach robusteren Methoden gesucht.

Der **Median** (siehe Abschnitt [2.5.3](#)) ergibt eine erste gute und robuste Abschätzung. Dieser überschätzt tendenziell den wahren Wert, je nachdem wie das Verhältnis TW- zu RW-Tage ist. Bei einer geringen Datenbasis, wie es bei Feiertagen der Fall ist, kann es allerdings dazu kommen, dass der Median bereits ein Mischwasserereignis darstellt. Daher sollte es zu jedem Regenwettertag zumindest zweimal so viele Trockenwettertage geben, damit der Median ein brauchbares Resultat ergibt.

Um nun möglichst unabhängig von der Datenbasis zu sein, wurde die Berechnung eines **robusten Mittels** in die Methodik implementiert. Hierzu wird zuerst die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Daten geschätzt (siehe Abschnitt [2.5.6](#)). Der Wert bei dem das Maximum der Verteilung, auftritt ist dann das gesuchte TW-Mittel. Hintergrund dieser Herangehensweise ist der Ansatz, dass die Trockenwettertage in ihren Werten wesentlich dichter aneinander liegen als es bei Regenwetter der Fall ist. (python-Code [A-3](#))

3.2.1.2 Trockenwetter-Variation

Da sich der Tagesgang bei Trockenwetter nicht auf ein Mittel einstellt, sondern um dieses Mittel variiert, wird versucht das Ausmaß dieser Variation (TW-Variation) zu quantifizieren. Später wird dieser Bereich als **TW-Bereich** bezeichnet. In erster Linie wird davon ausgegangen, dass der TW-Verlauf symmetrisch um das ermittelte TW-Mittel variiert. Die errechneten Variationen beschreiben jedoch noch nicht die Variation des Trockenwetters, sondern beschreiben vielmehr die Dichte der TW-Werte.

In Abbildung [3-8](#) ist das zuvor berechnete TW-Mittel der Datengruppe eingezeichnet. Die berechnete Variation muss nun je nach Verfahren mit einem Faktor multipliziert werden, um den entsprechenden TW-Bereich beschreiben zu können. (siehe Verfahren 1-4). Mischwasserereignisse sowie Messungen mit geschlossenem Zulaufschieber der ARA Graz liegen im Fall der betrachteten Datengrundlage außerhalb des definierten TW-Bereichs.

$$TW-Variation = limit * Variation_{Berechnung} \quad (\text{Gleichung 3-3})$$

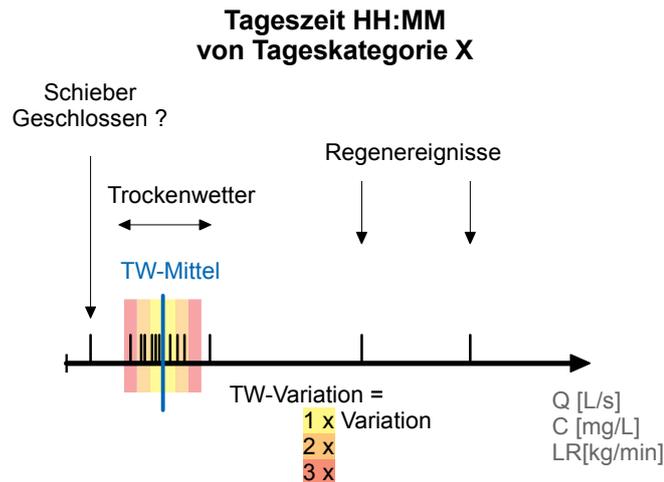


Abbildung 3-8: Schematisches Beispiel einer Untergruppe zur Ermittlung der TW-Variation abhängig von der Tageskategorie und Tageszeit

- Mit: *TW-Variation* ... Je Tagesart und Zeitstempel
limit ... Zu wählender Faktor je nach Berechnungsverfahren
Variation_{Berechnung} ... Je Tagesart und Zeitstempel

Durch die starken Abweichungen bei Mischwasserereignissen ergibt die Standardabweichung keinen repräsentativen Wert für die TW-Variation. Außerdem streuen die TW-Werte nicht nach der Normalverteilung, sondern sind bei Trockenwetterbedingungen annähernd gleich verteilt. Daher wurde die Standardabweichung zur Charakterisierung des TW-Verlaufs nicht verwendet.

Die Verfahren 1 bis 3 setzen eine symmetrische Verteilung der TW-Werte voraus.

Verfahren 1: Median der absoluten Abweichung vom Median (MAD)

Der Median der absoluten Abweichung vom Median MAD (siehe Abschnitt [2.5.4](#)) ergab sich als ideale Berechnungsmethode für diesen Anwendungsbereich.

Bei einer symmetrischen Verteilung entspricht der MAD genau der Differenz zwischen dem 75 %-Quartil (bzw. dem 25 %-Quartil) und dem Median (50 %-Quartil).

Da die TW-Werte annähernd symmetrisch um das TW-Mittel streuen und für dieses Verfahren die Anzahl an TW-Werten wesentlich größer sein soll als jene an Regenwettertagen (RW-Tagen), wird sich der MAD ungefähr als Differenz zwischen TW-Mittel und Viertelpunkt der TW-Werte einstellen. Um nun alle TW-Werte in die TW-Variation einzubeziehen, muss der MAD noch mit *limit* = 2 multipliziert werden.

Verfahren 2: Median der absoluten Abweichung vom robusten Mittel (mod-MAD)

Wird das TW-Mittel über das Berechnungsverfahren des robusten Mittels ermittelt, wird anstatt für die Berechnung des MAD nicht die Abweichungen vom Median verwendet, sondern für dieses das Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Abweichungen vom robusten Mittels verwendet. Dieser modifizierte MAD wird in weiterer Folge nur modMAD bezeichnet. Der Vorteil dabei ist, dass der Bezug zum vorher ermittelten TW-Mittel nicht verloren geht und dadurch der errechnete modMAD symmetrisch um das TW-Mittel angesetzt wird.

Verfahren 3: Interquartilsabstand IQR

Der Interquartilsabstand IQR (siehe Abschnitt [2.5.5](#)) ist ebenfalls von dem Verhältnis TW-Tage zu RW-Tage abhängig.

Um über den IQR die Variation des TW-Verlaufs beschreiben zu können, darf der IQR nicht durch RW-Tage beeinflusst werden. Dazu ist eine Datengrundlage von mit mindestens 75 % TW-Anteil notwendig.

Der Grund dafür wird am Beispiel des Durchflusses erklärt. Hier sind alle vom RW beeinflussten Werte größer als die bei TW-Bedingungen. Damit der IQR nun nur den TW-Bereich beschreibt, darf der größte TW-Wert maximal dem 75 %-Quartil entsprechen. All jene Werte, die größer als der größte TW-Wert sind, sind während RW-Ereignissen entstanden. Sind zum Beispiel 30 % der Werte aus RW-Ereignissen, sind bereits 5 % dieser Ereigniswerte im IQR enthalten.

Hier ist für $limit = 1$ einzusetzen.

Verfahren 4: Median der getrennten Abweichungen (asymmetrische)

Zu Tageszeiten in denen ein Signal stark ansteigt und somit der Verlauf steil ist, kann eine leichte zeitliche Variation das Ergebnis einer symmetrischen Berechnung stark negativ beeinflussen. Um diese Fehler zu vermeiden, wird in dem genannten Zeitbereich die Variation getrennt berechnet, was bedeutet, dass eine Variation unterhalb des TW-Mittels und eine oberhalb des TW-Mittels ermittelt wird. Ein Nachteil dabei ist, dass der Datensatz zur Berechnung der einzelnen Variationen dadurch ungefähr halbiert wird und somit einer stärkeren Unsicherheit unterliegt.

In Abbildung [3-9](#) ist die Problematik des symmetrischen MAD im Bereich des maximalen TW-Werts dargestellt. Der asymmetrische MAD überwindet dieses Problem.

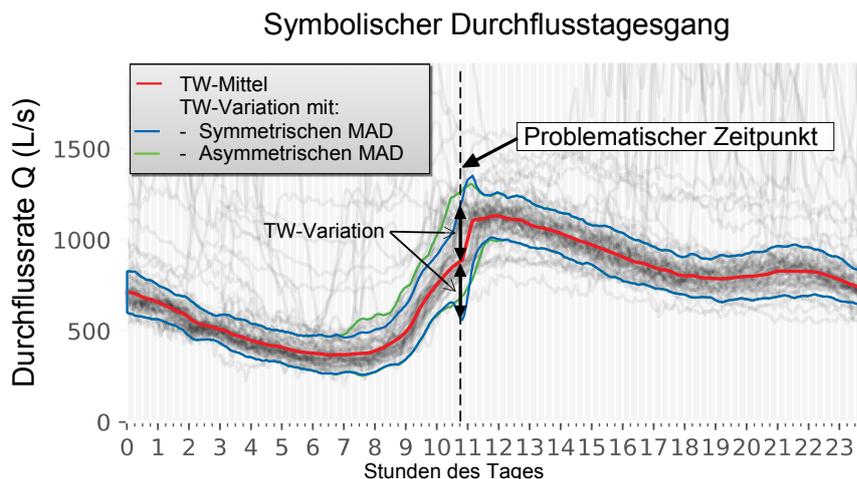


Abbildung 3-9: Asymmetrischer MAD als Verfahren zur Berechnung der TW-Variation und die Problematik des Symmetrischen MAD

Eine solche einseitige Berechnung kann nur mit dem MAD sinnvoll durchgeführt werden (siehe python-Code [A-5](#)).

3.2.1.3 Stabilität der Berechnung der Parameter zur Charakterisierung des TW-Tagesgangs

Um einen objektiven Vergleich der Berechnungsverfahren für den TW-Tagesgang, beschrieben durch die Parameter TW-Mittel und TW-Variation, zu erhalten, wurde ein Verfahren zur Beurteilung der Stabilität der Parameterberechnung in Abhängigkeit der vorhandenen Messwerte angewandt. In anderen Worten soll dabei je nach Berechnungsmethode eine notwendige Mindestanzahl an Messtagen ermittelt werden, ab der die Anwendung des jeweiligen Berechnungsverfahrens eine zufriedenstellende Restunsicherheit ergibt. Außerdem wird die Unsicherheit der einzelnen Methoden, durch den Verlauf der relativen Abweichungen der Zwischenergebnisse (nach $i=1 \dots n$ berücksichtigten Werten) zu dem Endergebnis (nach n berücksichtigten Werten) veranschaulicht.

Es wird zuerst das Ergebnis des Berechnungsverfahrens (Abschnitt [3.2.1.1](#); Abschnitt [3.2.1.2](#)) mit der gesamten Datengrundlage einer Analysegruppen (je Zeitpunkt und Tagesart) berechnet (Endergebnis). Dann werden mehrmals zufällige Stichproben genommen und mit dem gleichen Verfahren berechnet. Die Stichprobe wird in weiterer Folge Schritt für Schritt vergrößert. Dadurch kann die Abhängigkeit der Anzahl der Messwerte an der Unsicherheit des Verfahrens veranschaulicht werden. Um die Zwischenergebnisse der verschiedenen Analysegruppen vergleichen zu können, werden nur die relativen Abweichungen zu den Endergebnissen der Gruppe gewertet. Zum Schluss werden alle relativen Ergebnisse miteinander verglichen.

3. Methodik

So wird versucht, mit realen Messdaten realistische Zufallszahlen zu generieren. Die Zufallszahlen werden deshalb benötigt, um eine allgemein gültige Aussage zu den Verfahren treffen zu können.

3.2.2 Trockenwetter-Kriterium

Um nun die Messdaten aller TW-Tageszeitpunkte miteinander vergleichen zu können, muss eine neue relative Variable eingeführt werden. Zu diesem Zweck wurde das Trockenwetter-Kriterium (TW-Kriterium) definiert, das sich auf das Durchflusssignal im ARA-Zulauf bezieht. Es wird berechnet, indem man von den ursprünglichen Messdaten das TW-Mittel abzieht und durch die TW-Variation dividiert.

$$TW\text{-Kriterium} = \frac{X - TW\text{-Mittel}}{TW\text{-Variation}} * 100 \quad (\text{Gleichung 3-4})$$

Mit: *TW-Kriterium* ... Des aktuellen Werts
X ... Aktueller Messwert
TW-Mittel ... Je Tagesart und Zeitstempel
TW-Variation ... Je Tagesart und Zeitstempel

Zur besseren Veranschaulichung und mit dem Bezug zur Prozentrechnung wird der Grenzwert mit 100 definiert (siehe python-Code [A-7](#)).

Ist der Abstand des aktuellen Werts zum TW-Mittel genau gleich groß wie zur TW-Variation ergibt sich der Wert 100 und ist gleichzeitig der Grenzwert zwischen Trockenwetter TW und Regenwetter RW. Somit kann dieser Wert als Filterfunktion zur Unterscheidung von Trocken- und Regenwettertagen bzw. -perioden verwendet werden.

Mit dem TW-Kriterium des Durchflusses wird in weiterer Folge definiert ob es sich um Trockenwetter handelt oder nicht.

In [Abbildung 3-10](#) ist ein grafisches Beispiel für die Berechnung des TW-Kriteriums dargestellt. Die Steigung der Funktion des TW-Kriteriums ist dabei abhängig von der TW-Variation. Die Fixpunkte der Funktion sind TW-Kriterium = 0 beim TW-Mittel, -100 bei der unteren Grenze des TW-Bereichs und 100 bei der oberen Grenze der TW-Bereichs. Die Steigung der Funktion ist bei der asymmetrischen Berechnung der TW-Variation oberhalb der x-Achse unterschiedlich zu der Steigung unterhalb der x-Achse. Ist der Zulaufschieber der ARA geschlossen, ergibt das ein negatives TW-Kriterium.

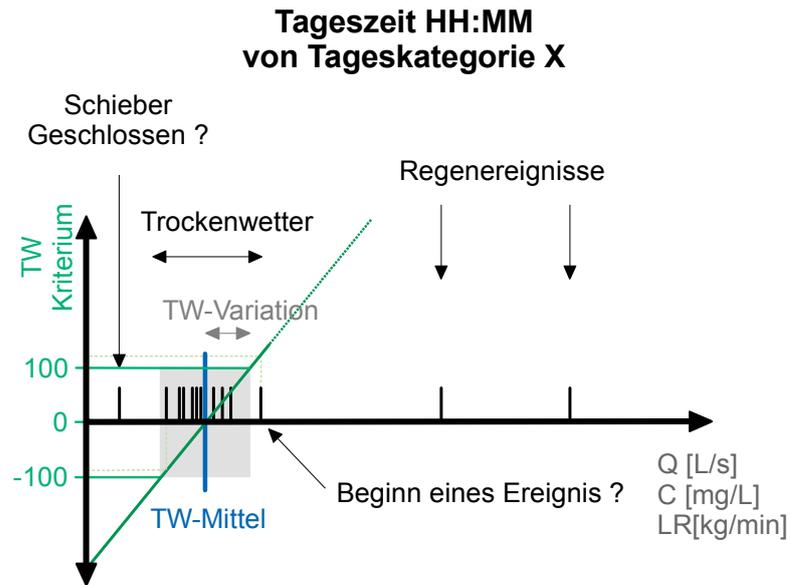


Abbildung 3-10: Schematisches Beispiel einer Untergruppe zur Ermittlung der TW-Kriteriums abhängig von der Tageskategorie und Tageszeit

3.2.2.1 Trockenwetter-Periode

Um eine Trockenwetter-Periode (TW-Periode) handelt es sich dann, wenn ein Mindestabstand von vier Stunden bis zum nächsten Regenereignis (Definition siehe Abschnitt [3.3.1](#)) vorhanden ist. (python-Code [A-8](#))

Tabelle 3-3: Bedeutungen des TW-Kriteriums

TW-Kriterium	Bedeutung
< -100	Werte niedriger als der statistische TW-Bereich (ev. kurzzeitiges Schließen des Zulaufschlebers zur ARA)
-100 ÷ 100	Werte im Trockenwetter Bereich
0	Das statistische Trockenwetter-Mittel
> 100	Niederschlagsereignis oder Entleerung von Speicherbauwerken

Somit lässt sich sehr genau definieren, wann das Ereignis begonnen und geendet hat.

3.2.2.2 Trockenwetter-Level

Das Trockenwetter-Level (TW-Level) beschreibt, ob sich das Niveau des aktuellen TW-Tagesgangs eher am oberen Ende des TW-Bereichs (TW-Kriterium = 100), am unteren Ende (TW-Kriterium = -100) oder um das TW-Mittel (TW-Kriterium = 0) befindet.

3. Methodik

Das TW-Level leitet sich aus dem TW-Kriterium ab. Es werden jedoch nur die TW-Perioden gewertet. Die Lücken, die durch die Mischwasserereignisse entstehen, werden durch eine lineare Interpolation wieder ausgefüllt. Das entstehende Signal wird abschließend geglättet.

Dieses Ergebnis kann in weiterer Folge verwendet werden, um saisonale Schwankungen (Trend) der Messwerte zu erkennen. (python-Code [A-9](#))

In [Abbildung 3-11](#) ist in den oberen zwei Teilgrafiken das TW-Level mit dem TW-Kriterium dargestellt.

In [Abbildung 4-14](#) ist der Verlauf des TW-Levels zu sehen. Gelb markierte Stellen entsprechen den Schulferien.

3.2.2.3 Trockenwetter-Kontinuum

Um nun schlussendlich zu einen durchgehenden TW-Verlauf zu kommen, wurde die künstliche Zeitserie des Trockenwetter-Kontinuums (TW-Kontinuum) definiert.

Mithilfe des TW-Levels wird das TW-Mittel je nach saisonalen oder aktuellen TW-Perioden entweder vergrößert oder vermindert.

$$\begin{aligned} \textit{Kontinuum} &= \textit{Mittel} + (X - \textit{Mittel}) * \frac{\textit{Level}}{\textit{Kriterium}} \\ &= \textit{Mittel} + \textit{Variation} * \frac{\textit{Level}}{100} \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 3-5})$$

Mit:	<i>Kontinuum</i>	...	Aktuelles TW-Kontinuum
	<i>Kriterium</i>	...	Aktuelles TW-Kriterium
	<i>X</i>	...	Aktueller Messwert
	<i>Mittel</i>	...	TW-Mittel der aktuellen Tagesart und Zeitstempel
	<i>Level</i>	...	Aktuelles TW-Level
	<i>Variation</i>	...	TW-Variation der aktuellen Tagesart und Zeitstempel

Beispielhaft ist in [Abbildung 3-11](#) ein Mischwasserereignis dargestellt. Es ist zu sehen, wie sich das Vergleichssignal (blau) an die vor dem Ereignis vorhandene TW-Periode anpasst und somit einen besseren Vergleichswert liefert als das TW-Mittel. Die reale Messung (Real Weather) weicht während einem Mischwasserereignis vom TW-Bereich deutlich ab. Dieser Bereich ist durch die obere sowie untere TW-Grenze (TW-Border) bestimmt. Das TW-Kontinuum (DW-Continuum, DW: dry weather) liefert einen künstlichen TW-Vergleichswert und weicht abhängig vom TW-Level vom TW-Mittel (DW-Mean) ab.

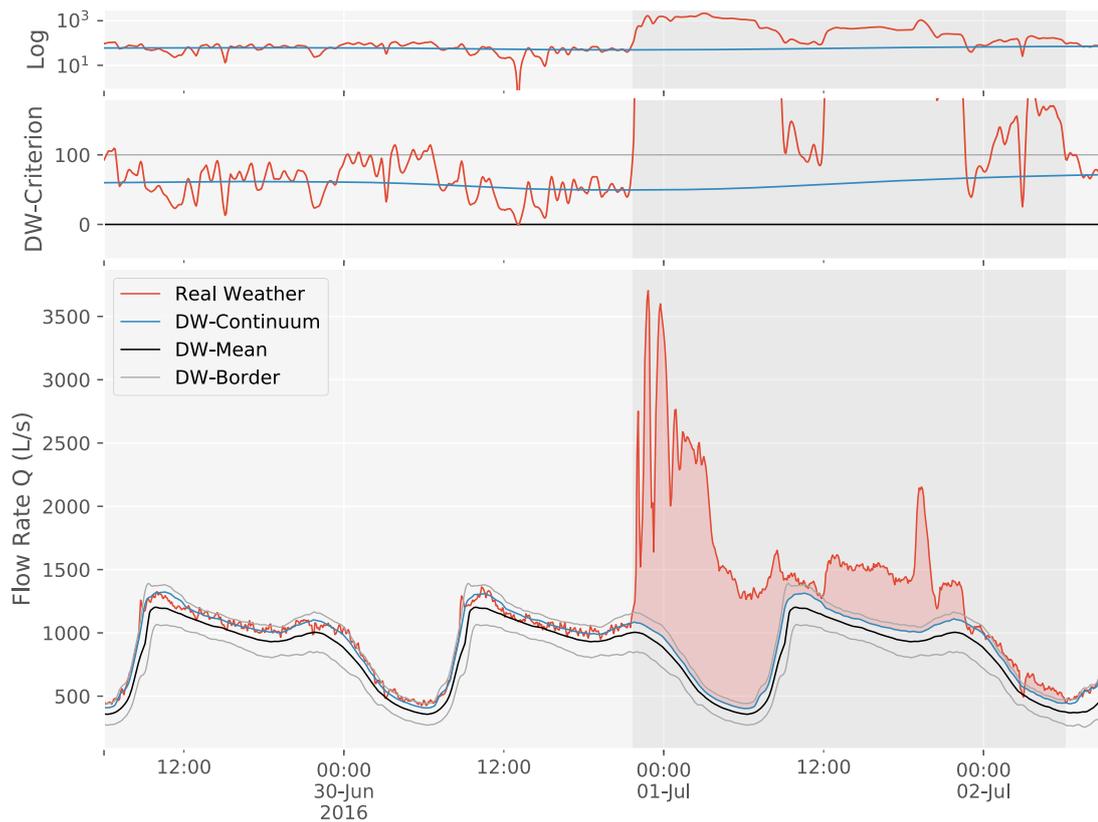


Abbildung 3-11: Trockenwetter Kontinuum des Durchflusses, wobei der grau hinterlegte Bereich der Ereigniszeitraum ist und die rote Fläche das Ereignisvolumen darstellt. Die oberen zwei Grafiken in dieser Abbildung zeigen das TW-Kriterium in orange und den TW-Level in blau.

3.3 Ereignisdetektion

Das Prinzip bei der Ereignisdetektion ist das Erfüllen der Abfolge von definierten Bedingungen, die im Folgenden beschrieben werden. Es wurden mit einem Mischwasserereignis und einem Entleerungsereignis des ZSK zwei verschiedene Ereignistypen definiert.

3.3.1 Detektion eines Mischwasserereignisses

Niederschlagsereignisse haben bei Mischwassersystemen den Effekt, dass sie ab einer gewissen Niederschlagsmenge den Kanal mit Regenwasser füllen. Der Kanal und die Kläranlage werden dadurch hydraulisch stärker belastet. Diese Belastung widerspiegelt sich im Durchflussmengenmesssignal im Zulauf zur ARA. Da hier nur Ereignisse mit Auswirkungen auf die ARA von Interesse sind, werden sie hier allgemein als Mischwasserereignisse bezeichnet.

Um Mischwasserereignisse in der vorhandenen Datenserie zu detektieren, wird nur das Durchflussmengenmesssignal benötigt. Nach der Ermittlung des TW-Kriteriums werden dafür nur die erhöhten Durchflusswerte (TW-Kriterium > 100) betrachtet. Um sicherzustellen, dass kurze Durchflussspitzen nicht miteinbezogen werden, werden nur durchgehende Bereiche mit einer Dauer von mindestens zwei Stunde ausgewertet. Beträgt nun der Abstand zweier Ereignisse weniger als vier Stunden, werden diese pragmatisch als ein Ereignis gewertet und vereint. (python-Code [A.6](#))

3.3.2 Detektion eines Entleerungsereignisses des ZSK

Bei der Entleerung des ZSK über das Schneckenpumpwerk des MÜB vor der ARA Graz spielt das Durchflussmengenmesssignal eine Nebenrolle. Das entleerte Mischwasser aus dem ZSK fließt zunächst direkt in das MÜB und wird von dort über die beiden Schneckenpumpen zum Zulauf der Kläranlage gefördert. Die daraus abgeleitete Hauptbedingung der Methode zur Erkennung von ZSK-Entleerungsereignissen ist daher in erster Linie die Abnahme des Höhenstands bzw. des Füllungsgrads im MÜB während des Entleerungsvorgangs.

Durch längere Aufenthaltszeiten des Mischwassers im ZSK und im MÜB kommt es zur Sedimentation der im Abwasser befindlichen absetzbaren Stoffe. Die Frachten dieser abgesetzten Stoffe werden meist erst am Ende einer Entleerung durch die Reinigungsspülvorgänge mobilisiert und damit zur Kläranlage weiterbefördert. Sie sind anhand der auftretenden Konzentrationsspitzen des Parameters AFS ohne einer Zunahme des Durchflusses zur ARA nach dem Ende einer

Entleerung deutlich zu erkennen. Aus diesem Grund empfiehlt sich die Einführung eines zusätzlichen Eingangsparmeter, der der Dauer zwischen dem Ende einer ZSK-Entleerung und dem spätest möglichen Zeitpunkt für das Auftreten einer Konzentrationsspitze infolge einer Spülung entspricht. Diese Dauer ist stark von der Betriebsweise des Spülvorgangs im MÜB abhängig und daher nur sehr schwer allgemein zu definieren. Für die Arbeit wurde dieser Nachlauf mit acht Stunden gewählt. Dies entspricht genau dem definierten, doppelten Abstand zwischen einer TW-Periode und einem nachfolgenden Niederschlagsereignis

Falls während eines ZSK-Entleerungsvorgangs eine zusätzliche Abflusswelle aus dem Kanalnetz im Zulauf zur ARA Graz ankommt, sind die gemessenen Konzentrationen und Frachten nicht mehr eindeutig auf die Entleerung des ZSK zurückzuführen. Daher werden diese Zeitbereiche von der Ereignisauswertung ausgenommen, sobald dieser zusätzliche Durchfluss zum TW-Durchfluss (TW-Kontinuum) die Förderleistung der Pumpen im MÜB übersteigt. Bei den Pumpen handelt es sich um zwei Archimedes-Schneckenpumpen mit je einer Nennförderleistung von 250 L/s. Da das Durchflussmengenmesssignal Schwankungen unterliegt und geringe Schwankungen das Detektionsergebnis allerdings nicht beeinflussen, wird eine fiktive maximale Förderleistung in dem Ausschlusskriterium der Ereignisdetektion verwendet. (python-Code [A-12](#))

$$Q_{Ereignis} - Q_{Trockenwetter} \stackrel{!}{<} Q_{Pumpen} \quad (\text{Gleichung 3-6})$$

Mit: $Q_{Ereignis}$... Durchfluss während dem Ereignis in [L/s]
 $Q_{Trockenwetter}$... Durchfluss bei Trockenwetterbedingung in [L/s]
 Q_{Pumpen} ... Gesamte Förderleistung der Schneckenpumpen in [L/s]

Als Mischwasser- oder Entleerungsereignisse werden nur jene Zeitbereiche in der vorhandenen Datengesamtheit von der entwickelten Methodik detektiert, in denen alle Teilbedingungen (Abahme des Füllungsgrades als Hauptindikator der Entleerung, Konzentrationsspitzen des „last-flush“-Effekts nach dem Ereignis und ohne Einfluss aus dem Kanal durch neue Abflusswellen) erfüllt sind. Detektierte Ereigniszeitbereiche werden bei einem zeitlichen Abstand zueinander von weniger als vier Stunden zu einem einzigen Ereignis zusammengefasst (siehe Abbildung [3-12](#)).

Damit auftretende, kleinere betriebliche Entleerungen der MÜB nicht fälschlicherweise als ZSK-Entleerungsereignis detektiert werden, wurden zusätzliche Eingangsparmeter definiert. Zum einen muss ein minimaler Höhenstand im MÜB erreicht werden, um es auf den ZSK zurückzuführen und zum anderen ist eine minimale Entleerungsdauer erforderlich, da kleine und kurze Änderungen im Höhenstand meist auf hydraulische Wellen zurückzuführen sind.

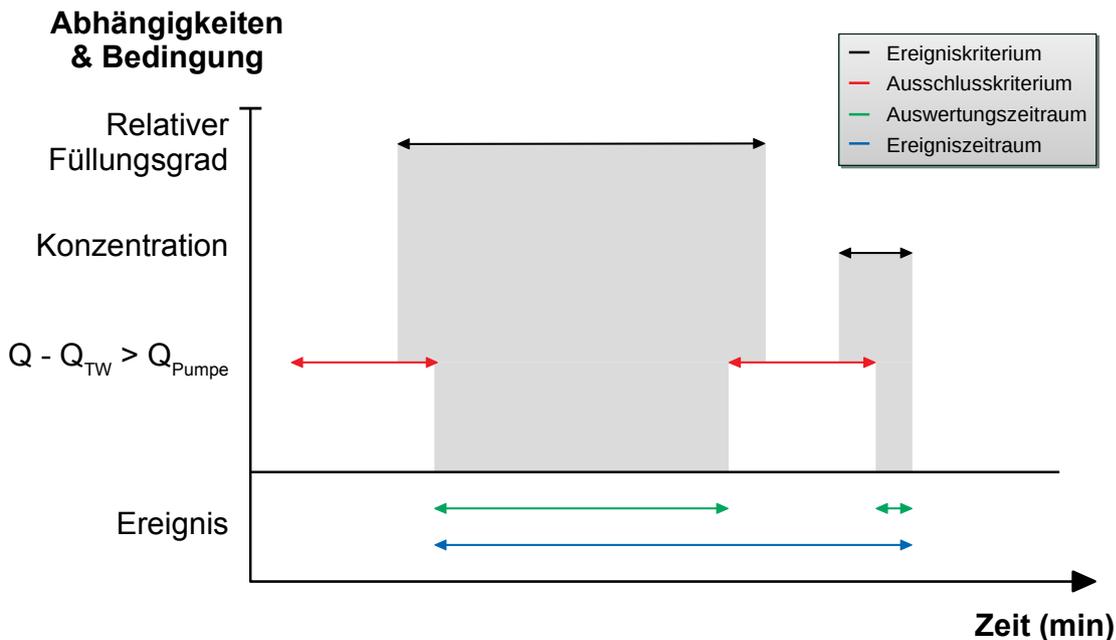


Abbildung 3-12: Systematik der Teilbedingungen zur Detektion von ZSK-Entleerungsereignissen

In weiterer Folge können verschiedene Auswertungen für die Ereignisse durchgeführt werden, die sich auf das Ereignisvolumen, die Ereignisfrachten je Qualitätsparameter, die ereignisabhängigen mittleren Konzentrationen je Qualitätsparameter sowie auf die Dauer der TW-Periode vor den Ereignissen beziehen.

3.4 Fremdwasseruntersuchung

Fremdwasser ist jener Anteil am gesamten Zufluss zur ARA, der aus anderen Quellen als den planmäßigen Anschlüssen unerwünscht ins Kanalsystem gelangt. Wenn es sich dabei nicht um illegale Fremdwassereinleitungen, sondern um undichte Stellen im Kanal handelt, sind die Fremdwassereinleitungen vor allem von der Höhe des umliegenden Grundwasserspiegels abhängig. Dieser ist wiederum abhängig vom Wasserspiegel umliegender Fließ- und Stehgewässer und auch vom aktuellen Sickerwasser durch Niederschlag. Der Anteil des Fremdwassers am gesamten Durchfluss zu einer ARA kann am besten während der Nachtstunden, während des sogenannten Nachtminimums, abgeschätzt werden. Daher eignet sich dieser Zeitraum bei TW-Bedingungen für seine mengenmäßige Abschätzung sehr.

Das Nachtminimum wird aus dem TW-Kontinuum mit jener Tageszeit bestimmt, zu der das Tagesminimum im Durchfluss auftritt. Im Fall der ARA Graz liegt dieser Zeitpunkt zumeist zwischen 03:00 Uhr und 06:00 Uhr.

Vergleicht man nun die Durchfluss-Nachtminima mit den Niederschlags-Tagessummen und dem Wasserstand naheliegender Gewässer, können daraus die Fremdwassermengen abgeschätzt werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Anwendung der entwickelten Methodik zur Abschätzung von Entleerungsfrachten des ZSK erfolgt für ausgewählte Qualitätsparameter, die in Tabelle 4-1 aufgelistet sind. Die Bezeichnung der Messdaten verfolgt dabei nach dem Muster <Englische Abkürzung der Substanz>_<Sonden Nummer>. Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich von 01.05.2016 - 31.07.2017.

Die Daten aus dem Zulauf zur ARA Graz (Tab. 4-1) werden ebenfalls nach der oben beschriebenen Methodik dieser Arbeit aufbereitet (Abschnitt 3.1), analysiert (Abschnitt 3.2) und danach für die Ereignisdetektion (Abschnitt 3.3) verwendet.

Von den gemessenen Stickstoff-Parametern wird lediglich Ammonium-Stickstoff (siehe Abschnitt 2.2) ausgewertet, da die Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen im Zulauf zur ARA Graz vernachlässigbar niedrig sind.

Die Ammonium-Sonde der Station Graz-ARA-Zulauf wurde allerdings erst im Laufe des Untersuchungszeitraums am 26.08.2016 installiert.

Die Temperaturdaten werden nur als zusätzliche Information in den Ereignisplots mitdargestellt und spielen sicherlich für die biologischen Reinigungsvorgänge auf der ARA eine wichtige Rolle.

Tabelle 4-1: Verwendete Sensoren der Messstation Graz-ARA-Zulauf

Parameter	Einheit	Bezeichnung	Sonde	Hersteller
BSB ₅	mg/L	BOD_12150408		
CSB	mg/L	COD_12150408	UV/VIS-	s::can Messtechnik
AFS	mg/L	TSS_12150408	Spektrometersonde	GmbH
Temperatur	°C	T_12150408		
NH ₄ -N	mg/L	NH ₄ -N_1588367	ISE-Sonde	Hach Lange GmbH

Die Daten aus dem PLS der ARA Graz (Tab. 4-2) müssen nicht umgerechnet werden und werden im Zuge der Datenaufbereitung nur validiert (Abschnitt 3.1.3) und falls erforderlich nachbearbeitet (Abschnitt 3.1.4). Der relative Füllstand des MÜB wird daher sowohl für die Ereignisdetektion (Abschnitt 3.3) als auch zur Berechnung des Entleerungsvolumens verwendet.

Die verfügbaren Messdaten der Messstation Graz-MÜB-Überlauf (Tab. 4-3) wurden ebenfalls nach der oben beschriebenen Methodik aufbereitet und ausgewertet und den Ereignisdetektionen aus den Messdaten der Messstation Graz-ARA-Zulauf gegenüber gestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-2: Verwendete Sensoren aus dem PLS

Parameter	Einheit	Bezeichnung	Sonde
Durchfluss	L/s	Q_inflow	MID
Relativer Höhen-/ Füllstand MÜB	%	H_csotank_rel	Ultraschall-Echolotsonde

Tabelle 4-3: Verwendete Sensoren der Messstation Graz-MÜB-Überlauf

Parameter	Einheit	Bezeichnung	Sonde	Hersteller
BSB ₅	mg/L	BOD_12150407	UV/VIS- Spektrometersonde	s::can
CSB	mg/L	COD_12150407		Messtechnik
AFS	mg/L	TSS_12150407		GmbH
Durchfluss	L/s	Q_csotank_overflow	-	-

4.1 Ergebnisse der Datenaufbereitung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Methodik aus Abschnitt [3.1](#) grafisch aufbereitet und erläutert.

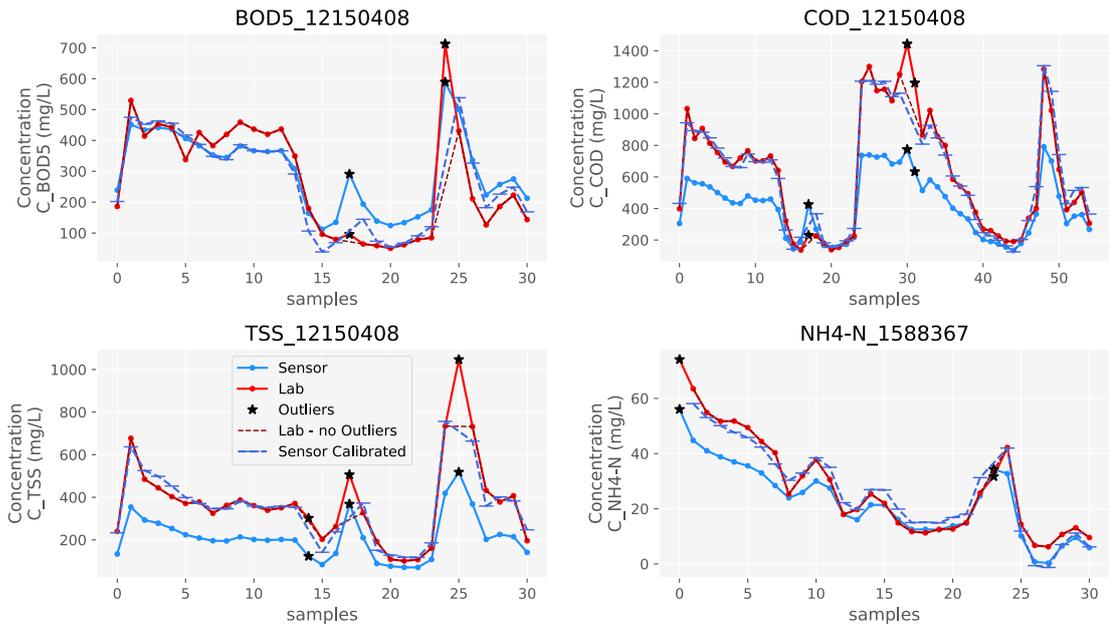
4.1.1 Ergebnisse der Kalibrierung für ausgewählte Qualitätsparameter

In den Abbildungen [4-1a](#) und [4-1b](#) sind die Gegenüberstellungen der Online-Sensordaten (blaue Linie) mit den analytischen Laborergebnissen (rote Linie) dargestellt. Das Ergebnis der Kalibrierung wird strichliert in den gleichen Farben abgebildet. In den dargestellten Ergebnissen sind die Ausreißer (schwarze Sterne) bereits entfernt.

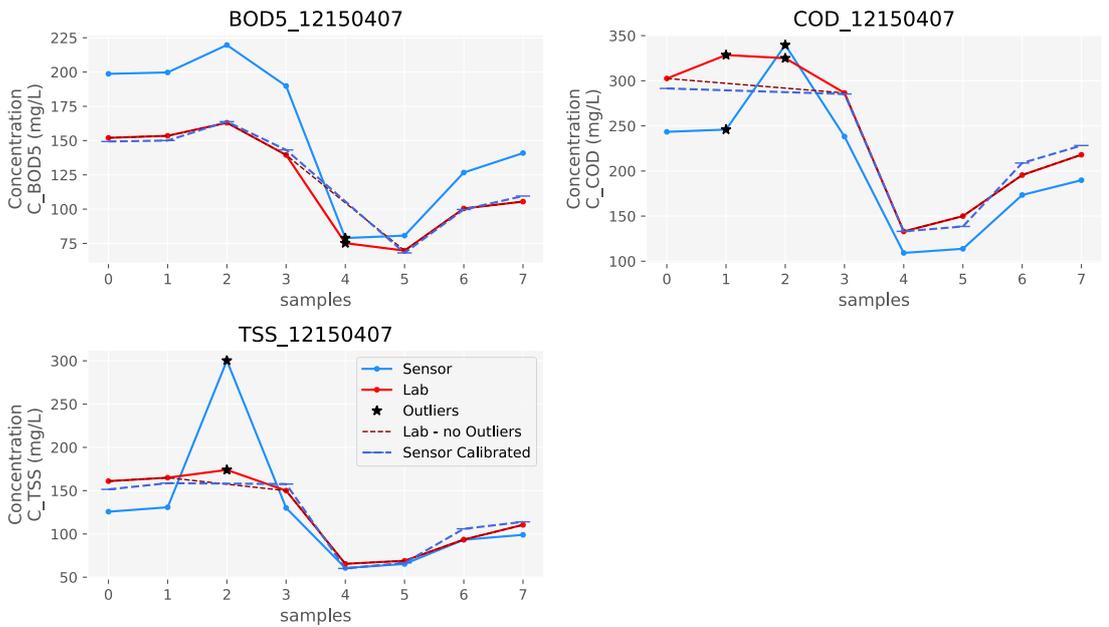
Die enthaltenen Ausreißer wurden auch bereits vor den durchgeführten Regressionen aus den Daten entfernt. Zur Ausreißerdetektion wurde die Bagplot Methode verwendet (Abschnitt [2.6.3](#)). Daran anschließend wurde die Regression mit den bereinigten Daten durchgeführt. Als Methode für die Regression wurde die OLS-Methode verwendet (Abschnitt [2.6](#)).

Durch die durchgeführten Kalibrierungen kam es zu einer deutlichen Annäherung zwischen den Labor- und Sensorwerten.

Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Werte des Online-Monitorings nach erfolgter Kalibrierung gut an die Labor-Ergebnisse anpassen.



(a) Im Fall der Messstation Graz-ARA-Zulauf für BSB₅, CSB, AFS und NH₄-N



(b) Im Fall der Messstation Graz-MÜB-Überlauf für BSB₅, CSB und AFS

Abbildung 4-1: Kalibrierungsergebnisse der Qualitätsparameter

4.1.2 Ergebnisse der Validierung für ausgewählte Qualitätsparameter

In den Abbildungen [4-2](#) bis [4-4](#) sind die aufgetretenen Fehler, die durch die Validierung herausgefiltert werden, kumulativ aufsummiert und als Grafiken dargestellt.

Zur besseren Orientierung sind dafür nachfolgend zwei Umrechnungen angeführt. Tritt eine 1-monatige Lücke durch Fehler auf, so entspricht diese 21 600 fehlender Messpunkte.

$$30 \left[\frac{\text{Tage}}{\text{Monat}} \right] * 24 \left[\frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} \right] * 30 \left[\frac{\text{Messpunkte}}{\text{Stunde}} \right] \approx 21600 \left[\frac{\text{Messpunkte}}{\text{Monat}} \right]$$

Werden 10 000 Messpunkte als Fehler erkannt, so entspricht das einer 330 Stunden langen Lücke.

$$\frac{10000 \text{ [Messpunkte]}}{30 \text{ [Messpunkte pro Stunde]}} \approx 330 \text{ [Stunden]}$$

In den folgenden Abbildungen sind die unterschiedlichen Fehler nicht an eine Farbe gebunden. Daher muss auf die jeweiligen Legenden der Grafiken geachtet werden.

In Abbildung [4-2](#) ist das Validierungsergebnis der Messstation Graz-ARA-Zulauf dargestellt. Der Großteil der Fehler der Kohlenstoff-Summenparameter ist durch den automatisierten Gradiententest entstanden. Beim NH₄-N resultierte der Großteil der Fehler ebenfalls aus dem Gradiententest. Ein weiterer großer Teil der Fehler ist durch Ausreißer in den negativen Wertebereich im Zeitraum zwischen Dezember 2016 und Jänner 2016 entstanden. Die Messstation selbst wies im gesamten Untersuchungszeitraum 4 000 Fehler aus der manuellen Validierung, 75 000 Fehler durch Wartungen, 150 000 Fehler aus der automatisierten Validierung und 11 000 Fehler aus den automatisierten Reinigungsvorgängen auf.

In Abbildung [4-3](#) ist das Validierungsergebnis der analysierten Messgrößen aus dem PLS der ARA Graz dargestellt.

Um valide Qualitätsparameter in der Bypass-Wanne der Messstation Graz-ARA-Zulauf gewährleisten zu können, muss ein Abwasserteilstrom kontinuierlich über eine Saugleitung zur Bypass-Wanne transportiert werden. Zur Sicherstellung des Abwasserzulaufstromes wurde auch der Abwassermenge in der Bypass-Leitung mit einem MID gemessen und überwacht.

Bei einem zu geringen Durchfluss an Abwasser zur ARA sind die Daten nicht mehr repräsentativ für eine Auswertung der TW-Tagesgänge. Daher wird ein Mindestwert von $> 100 \text{ L/s}$ für die Auswertungen vorausgesetzt. Da das Aufzeich-

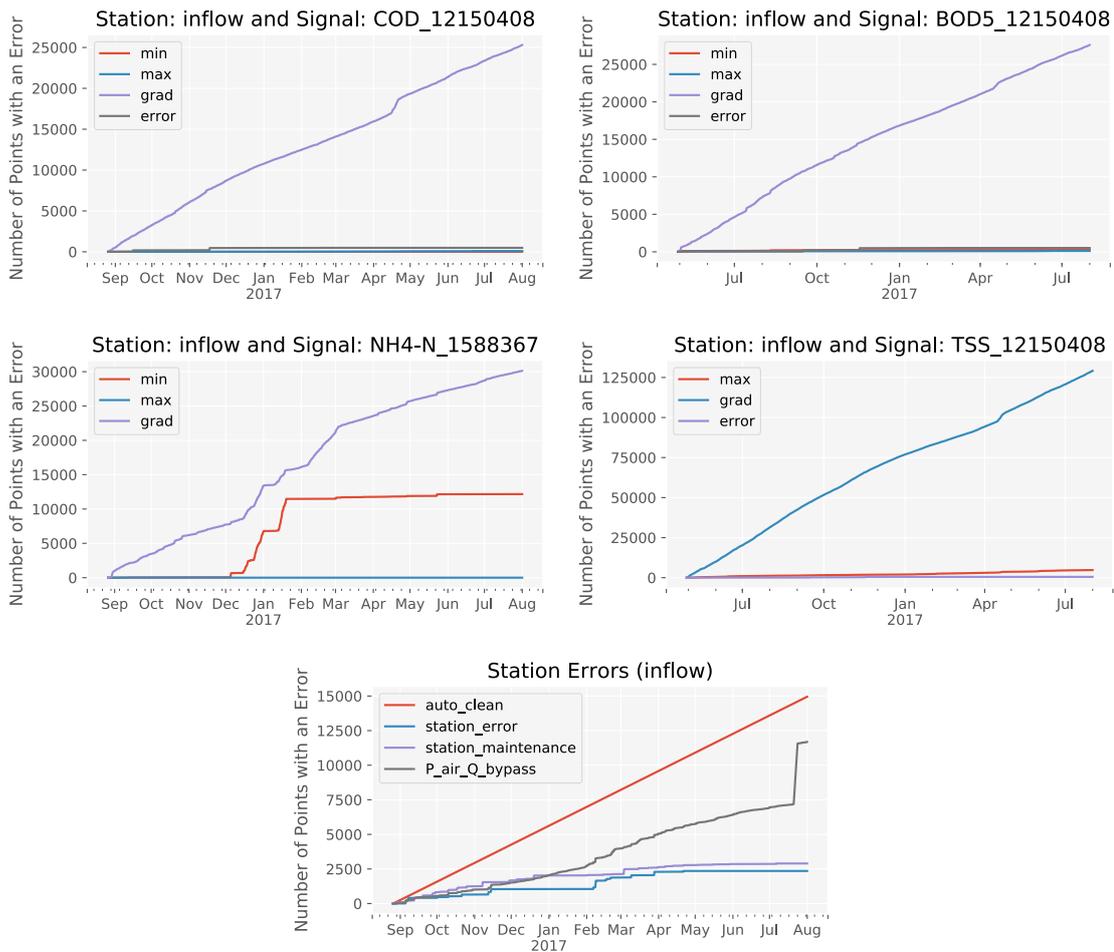


Abbildung 4-2: Validierungsergebnisse der Messstation Graz-ARA-Zulauf

nungsintervall bei einer Minute liegt, bedeutet das, dass die ARA über den Aufzeichnungszeitraum in Summe den Zulauf ≈ 9 Stunden gestoppt oder zumindest unter 100 L/s gedrosselt hatte.

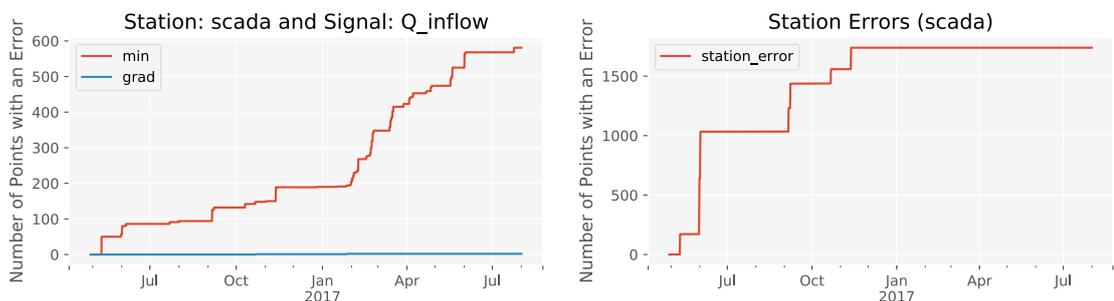


Abbildung 4-3: Validierungsergebnisse aus dem PLS der ARA Graz

In [Abbildung 4-4](#) ist das Validierungsergebnis der Messstation Graz-MÜB-Überlauf dargestellt. Die Messstation weist nur Fehler aus der manuellen Validierung auf. Ein geringer Anteil davon ist durch Wartungsarbeiten entstanden. Der Großteil mit insgesamt 80 000 Fehlern ist zwischen November 2016 und Fe-

4. Ergebnisse und Diskussion

bruar 2017 aufgetreten. Der Parameter CSB weist zusätzlich noch über 40 000 Fehlerwerte auf, welche alle aus der manuellen Validierung resultieren und im Wesentlichen in den drei Zeiträumen (Mai 2016, Dezember 2016 und Jänner 2017) entstanden sind.

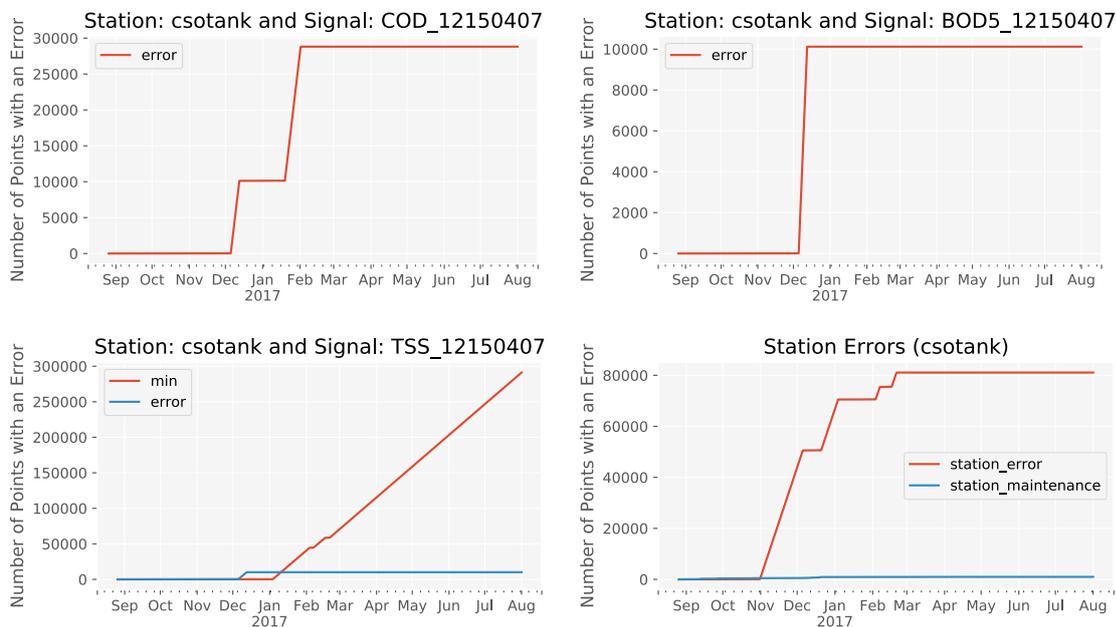


Abbildung 4-4: Validierungsergebnisse im Fall der Messstation Graz-MÜB-Überlauf

4.1.3 Ergebnisse der Datennachbearbeitung

In der Tabelle 4-4 sind die relativen Verfügbarkeiten der einzelnen Parameter nach der Bearbeitungsebene (siehe Tab. 3-1) aufgelistet. Unter Verfügbarkeit wird der relative Anteil an validen und vorhandenen Werten in der zur Verfügung stehenden Datengesamtheit verstanden. Der Unterschied zwischen *validated* und *input* ist auf die durchgeführten Validierungen zurückzuführen. Zwischen *validated* und *analyse_local_time* liegt das Wiederauffüllen mit Daten und somit ein Anstieg der Verfügbarkeit.

Die Eingangsdaten der Parameter aus dem PLS der ARA Graz sowie der Messstation Graz-ARA-Zulauf besitzen eine hohe Verfügbarkeit. Dies bedeutet, dass es wenige Ausfälle, wie Unterbrechungen der Aufzeichnung, gab. Die Messstation Graz-MÜB-Überlauf hingegen hatte wesentlich mehr Ausfälle. Durch das Validieren der Daten werden nochmals viele Werte als ungültig gesetzt. Durch das Auffüllen mit Daten in der Datennachbearbeitung (siehe Abschnitt 3.1.4) können bessere Verfügbarkeiten erreicht werden, als sie bei den Eingangsdaten vorliegen.

Tabelle 4-4: Verfügbarkeit in % der Daten während des Untersuchungszeitraumes in den Bearbeitungsebenen

	input	validated	analyse
H_csotank_rel	96.22	95.96	96.90
Q_inflow	99.09	98.87	99.21
Q_csotank_overflow	68.03	65.95	74.10
COD_12150407	89.50	80.49	80.83
BOD5_12150407	83.66	83.33	83.62
TSS_12150407	83.66	83.33	83.62
BOD5_12150408	99.87	91.21	98.56
TSS_12150408	99.89	76.76	98.55
T_12150408	99.89	93.56	98.60
NH4-N_1588367	99.89	88.27	97.25
COD_12150408	99.89	89.68	98.56

In den Tabellen 4-5 bis 4-7 sind die Lücken, die nach der Datenaufbereitung vorhanden waren, stationsweise aufgelistet.

Die Ammonium-Sonde wurde erst im Laufe des Untersuchungszeitraums am 26.08.2016 installiert.

In der Tabelle 4-5 sind die längsten Lücken der Messstation Graz-ARA-Zulauf

4. Ergebnisse und Diskussion

aufgelistet. Die Kohlenstoffparameter dieser Station wies jeweils 19 Lücken auf, wobei sich die längste über 3 Tage erstreckte. Das Temperatursignal der gleichen Sonde besitzt eine Lücke weniger. Das NH₄-N Signal dieser Station besitzt 27 Lücken, wobei sich die längste ebenfalls über 3 Tage erstreckte.

Tabelle 4-5: Die längsten Lücken in den Daten der Messstation Graz-ARA-Zulauf mit einer Dauer von >5 min.

		Start	Dauer	Gesamt
BOD5 12150408	2017-07-20	22:49	3 Tage 00:40	19 Lücken
	2017-02-08	00:58	07:59	
	2016-05-31	05:57	07:42	
	2016-06-01	06:29	07:14	
	2016-07-25	06:39	07:00	
	2017-03-03	08:03	05:54	
TSS 12150408	2017-07-20	22:49	3 Tage 00:40	19 Lücken
	2017-02-08	00:58	07:59	
	2016-05-31	05:55	07:44	
	2016-06-01	06:29	07:14	
	2016-07-25	06:38	07:01	
	2017-03-03	08:03	05:54	
T 12150408	2017-07-20	22:49	3 Tage 00:40	18 Lücken
	2017-02-08	00:58	07:59	
	2016-05-31	05:57	07:42	
	2016-06-01	06:29	07:14	
	2016-07-25	06:39	07:00	
	2017-03-03	08:03	05:54	
NH4-N 1588367	2017-07-20	22:50	3 Tage 00:39	26 Lücken
	2017-01-15	16:28	18:03	
	2017-01-14	16:24	11:04	
	2017-01-19	00:15	10:55	
	2017-01-17	00:15	09:45	
	2016-12-05	03:42	08:12	
COD 12150408	2017-07-20	22:49	3 Tage 00:40	19 Lücken
	2017-02-08	00:58	07:59	
	2016-05-31	05:57	07:42	
	2016-06-01	06:29	07:14	
	2016-07-25	06:39	07:00	
	2017-03-03	08:03	05:54	

In der Tabelle 4-6 sind die längsten Lücken im PLS aufgelistet. Das Höhenstandssignal im MÜB besitzt 13 Lücken, wobei sich die längste über 3 Tage erstreckte. Das Durchflussmengenmesssignal des Zulaufs zur ARA Graz besitzt nur 5 Lücken, wobei sich die längste über 2 Tage erstreckte.

Tabelle 4-6: Die längsten Lücken der Daten im PLS mit einer Dauer von >5 min.

	Start	Dauer	Gesamt
H csotank_rel	2016-10-14 20:08	3 Tage 15:30	13 Lücken
	2017-07-21 00:04	2 Tage 23:53	
	2016-10-05 15:08	2 Tage 02:30	
	2016-10-01 08:46	1 Tage 20:31	
	2016-09-27 12:07	1 Tage 00:04	
	2016-10-22 20:58	21:43	
Q inflow	2017-07-21 00:04	2 Tage 23:53	5 Lücken
	2016-05-31 05:57	07:42	
	2016-06-01 07:17	06:26	
	2016-10-30 01:59	01:01	
	2017-03-26 01:59	01:01	

In der Tabelle 4-7 sind die längsten Lücken der Messstation Graz-MÜB-Überlauf aufgelistet. Die Kohlenstoffparameter dieser Station besitzen jeweils zwischen 12 und 13 Lücken, wobei sich die längste über 42 Tage erstreckte. Das Durchflussmengenmesssignal dieser Station wies 11 Lücken auf, wobei sich die längste über 35 Tage erstreckte.

Tabelle 4-7: Die längsten Lücken in den Daten der Messstation Graz-MÜB-Überlauf mit einer Dauer von >5 min.

	Start	Dauer	Gesamt
Q csotank_overflow	2016-10-31 09:30	35 Tage 02:27	11 Lücken
	2016-12-20 15:25	13 Tage 20:32	
	2017-02-16 13:03	3 Tage 21:36	
	2017-02-03 09:46	3 Tage 10:11	
	2016-07-25 06:39	07:00	
	2016-08-22 06:23	05:13	
COD	2016-10-31 09:30	42 Tage 01:47	13 Lücken

4. Ergebnisse und Diskussion

	Start	Dauer	Gesamt
12150407	2016-12-20 15:25	13 Tage 20:32	
	2017-01-19 10:51	12 Tage 23:26	
	2017-02-16 13:03	3 Tage 21:36	
	2017-02-03 09:46	3 Tage 10:11	
	2016-07-25 06:39	07:00	77 Tage 13:13
BOD5	2016-10-31 09:30	42 Tage 01:47	12 Lücken
12150407	2016-12-20 15:25	13 Tage 20:32	
	2017-02-16 13:03	3 Tage 21:36	
	2017-02-03 09:46	3 Tage 10:11	
	2016-07-25 06:39	07:53	
	2016-06-13 08:27	06:23	64 Tage 18:09
TSS	2016-10-31 09:30	42 Tage 01:47	12 Lücken
12150407	2016-12-20 15:25	13 Tage 20:32	
	2017-02-16 13:03	3 Tage 21:36	
	2017-02-03 09:46	3 Tage 10:11	
	2016-07-25 06:39	07:53	
	2016-06-13 08:27	06:23	64 Tage 18:09

4.2 Ergebnisse der Datenanalyse

Die Daten wurden nach der in der Masterarbeit im Abschnitt 3.2 beschriebenen Methodik analysiert. Hauptziele dabei sind das Finden von Verlaufsmustern bei Trockenwetter sowie die Frachtauswertungen von Entleerungsereignissen des ZSK zur ARA Graz.

Zur Unterscheidung verschiedener Berechnungsarten der durchgeführten Analysen wurden die Abkürzungen in Tabelle 4-8 sowohl in den ausgewerteten Grafiken als auch in gleicher Form im Programmcode verwendet.

Tabelle 4-8: Verwendete Abkürzungen in den Ergebnisplots

<code>kind</code>	Art der Berechnung für Mittel und Variation des TW-Tagesgangs
<code>limit</code>	Faktor der TW-Variation
<code>smooth</code>	Faktor für die Glättung der Ergebnisse in [min]

Es wurden verschiedene Kombinationen von Berechnungsverfahren zur Ermittlung des TW-Mittels (siehe Abschnitt 3.2.1.1) und der TW-Variation (siehe Abschnitt 3.2.1.2) angewandt.

Tabelle 4-9: Verschiedene Berechnungsverfahren - Bedeutungen von `kind`

<code>kind</code>	TW-Mittel	TW-Variation
0	Median	MAD
2	Robustes Mittel	modMAD
6	Median	Getrennte Median-Abweichung zwischen 7h und 12 h - ansonsten MAD
7	Robustes Mittel	Getrennte Median-Abweichung zwischen 7h und 12 h - ansonsten modMAD
97	Median	IQR
98	Median	0.25-Quantil + 0.75-Quantil
99	Arithmetisches Mittel	Standardabweichung

Die Anzahl der Tage der unterschiedlichen **Tageskategorien** (siehe Tab. 3-2) sind in Tabelle 4-10 ausgewertet. Zusätzlich wird der Anteil an Trockenwetterperioden (TW-Perioden) angegeben. Als Trockenwetter wurde die Zeit definiert, zu der es mindestens vier Stunden vorher kein Regenereignis gegeben hat. Als Datengrundlage wurde die Durchflussmengenmessung im ARA-Zulauf verwendet. Um nur wesentliche Ereignisse miteinzubeziehen, wurde von einer Mindestdauer eines Regenereignisses von zwei Stunde ausgegangen (python-Code A-8).

4. Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurden 73 % aller Daten als TW-Perioden kategorisiert. Damit konnten insgesamt 459 Tage (65,5 Wochen) analysiert werden. Um die insgesamt 17 Feiertage nicht separat beurteilen zu müssen, wurden diese mit den Sonntagen zusammengefasst. Die verschiedenen Anzahlen der Wochentage sind auf die getrennte Auswertung der Feiertage zurückzuführen.

Tabelle 4-10: Anzahl der Tage je Kategorie im Auswertungszeitraum

day_kind_detail	Art der Unterscheidung	Anzahl an Tagen	Trockenwetter (%)
1	Tag	459	73
2	Arbeitsfreier Tag	146	75
	Arbeitstag	313	72
3	Feiertag	17	78
	Wochenende	129	74
	Arbeitstag	313	72
3.1	Samstag	66	75
	Sonn- und Feiertag	80	75
	Arbeitstag	313	72
8	Montag	60	69
	Dienstag	64	69
	Mittwoch	64	74
	Donnerstag	60	74
	Freitag	64	72
	Samstag	66	75
	Sonntag	63	74
	Feiertag	17	78

4.2.1 Ergebnisauswertung der Tagesganglinien

Nachfolgend werden die Ergebnisse der nach unterschiedlichen Methoden ausgewerteten TW-Tagesganglinien dargestellt.

4.2.1.1 Tagesganglinien bei Vergleich der einzelnen Wochentage und der Feiertage

Bei der Betrachtung der einzelnen Wochentage und der Feiertage kann man einige Muster und Unterschiede erkennen. Die Werktage Montag bis Freitag zeigen nahezu den gleichen TW-Tagesgang. Wobei sich an Freitagen bereits ab 20 Uhr ein Durchfluss vergleichbar mit jenem an Sonntagen einstellt. Die Wochenend- und Feiertage zeigen etwas weniger Übereinstimmung bzw. verfügen diese nur für gewisse Zeitspannen über einen ähnlichen Verlauf.

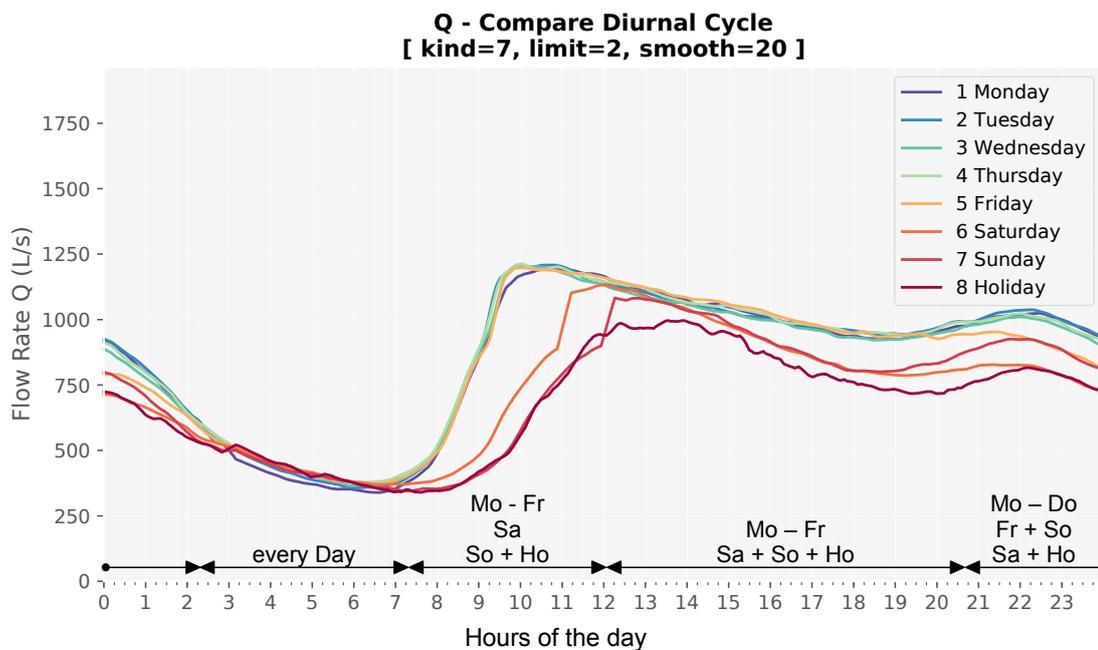


Abbildung 4-5: Unterschiede der jeweiligen Wochentage

Auffallend ist der beinahe idente Verlauf für alle Tage im Bereich zwischen 03:00 Uhr und 06:30 Uhr. Es kann angenommen werden, dass es sich hier zu einem großen Teil um Fremdwasserzufluss handelt. In diesem Zeitbereich treten auch die Nachtminima auf der ARA Graz auf, was daher auch zur Abschätzung der Fremdwassermengen verwendet werden kann.

Die TW-Tagesgänge der Arbeitstage sind nahezu ident. Samstage weichen speziell während dem Anstieg vor der Mittagszeit von den restlichen arbeitsfreien Tagen ab. Sonntage und Feiertage zeigen einen ähnlichen Verlauf. Da aufgrund des Berechnungsverfahrens Tage mit abweichendem Verlauf in steilen Teilstücken

4. Ergebnisse und Diskussion

des Tagesgangs getrennt betrachtet werden sollten, wurden für die weiteren Analysen die Daten nach `day_kind_detail = 3.1`, in Arbeitstage, Samstag und Sonntage inklusive der Feiertage unterteilt.

Die farbigen Linien und Flächen in den Abbildungen 4-6 bis 4-11 sind die berechneten statistischen Mittel über den Betrachtungszeitraum. Die leicht transparenten schwarzen Linien zeigen die realen Verläufe über den gesamten Zeitraum. Es kann in weiterer Folge angenommen werden, dass Bereiche in denen sich die Tagesgänge häufig überlagern, einen Trockenwettertag darstellen. Die farbige Linie beschreibt den mittleren TW-Tagesgang und die dazugehörige Fläche den Bereich, den die angewandte Methodik noch als TW erkennt. Ein vertikaler Schnitt zu einem beliebigen Zeitpunkt ist in Abbildung 3-7 symbolhaft dargestellt.

In den Grafiken der stofflichen Tagesgänge in den Abbildungen 4-7a bis 4-11 wurden Mischwasserereignisse anstatt in einer schwarzen Linie in cyan abgebildet.

In Tabelle 4-11 sind die abgeschätzten Tagesmittelwerte für das Zulaufvolumen sowie für die Zulauffrachten für CSB, BSB₅ und AFS im Zulauf zur ARA Graz aus der Studie von Hofer *et al.* (2017) dargestellt. Die Ergebnisse dieser Studie werden in weiterer Folge mit den erzielten Ergebnissen dieser Masterarbeit gegenübergestellt und miteinander verglichen, wobei diese in Tageskategorien gliedert und mit Angabe von Unter- bzw. Obergrenzen dargestellt werden (siehe Tabelle 4-12 bis 4-16).

Tabelle 4-11: Abgeschätzte Tagesmittelwerte für das TW-Zulaufvolumen zur ARA Graz und für die TW-Stofffrachten CSB, BSB₅ und AFS nach Hofer *et al.* (2017)

Mittleres Zulaufvolumen [m ³]		71 000
Mittlere Konzentration [mg/L]	Tagesfracht [kg]	
CSB	820	58 000
BSB ₅	460	33 000
AFS	350	25 000

Die Zahlenwerte sind zur übersichtlicheren Darstellung und der vorhandenen Unsicherheiten in der Abschätzung nur auf zwei signifikante Ziffern dargestellt.

4.2.1.2 Auswertung der Tagesganglinien für den Parameter ARA-Zulauf Q

Der ARA-TW-Zulauf-Tagesgang in der Abbildung 4-6 wurde mit dem robusten Mittel und dem MAD ermittelt, wobei der MAD am Vormittag jeweils asymmetrisch berechnet wurde.

Tabelle 4-12: TW-Zulaufvolumen

			Samstag	Sonn- und Feiertag	Arbeitstag
Volumen	[m ³]	Min	53 000	50 000	62 000
		Mittel	63 000	61 000	73 000
		Max	75 000	73 000	84 000
Mittlerer Durchfluss	[L/s]	Min	610	580	720
		Mittel	730	710	840
		Max	860	850	980

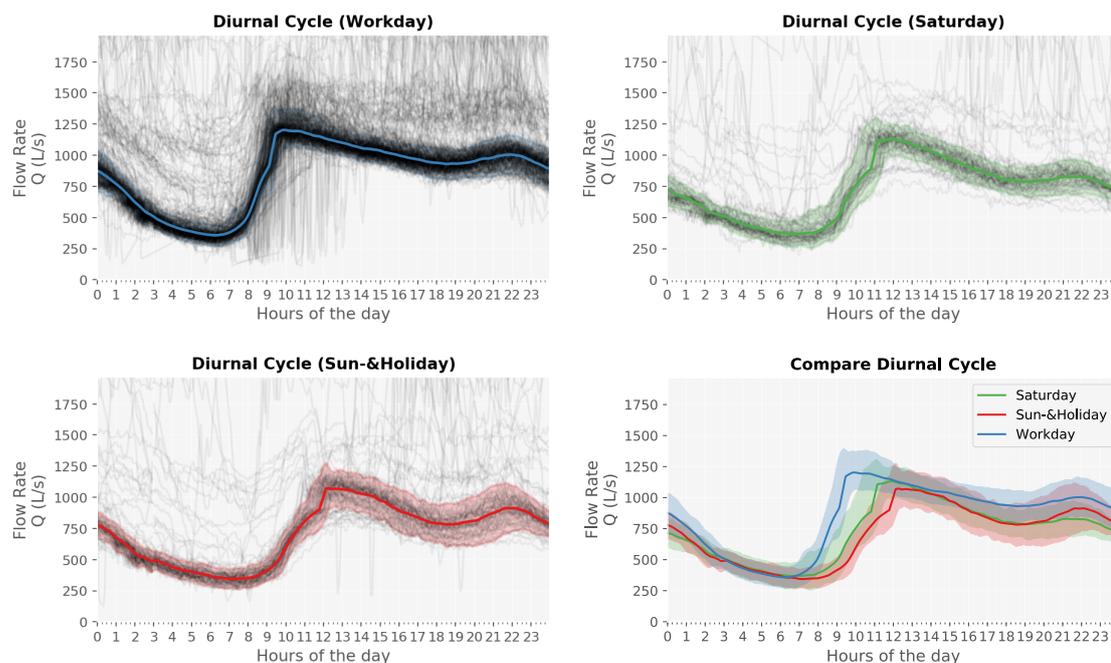


Abbildung 4-6: ARA-TW-Zulauf-Tagesgänge - Die vielen dünnen, schwarzen Linien sind die einzelnen Tagesgänge im Untersuchungszeitraum. Die farbigen, durchgezogenen Linien sind das TW-Mittel und die farblich dazugehörige Schraffur ist der ermittelte TW-Bereich.

4. Ergebnisse und Diskussion

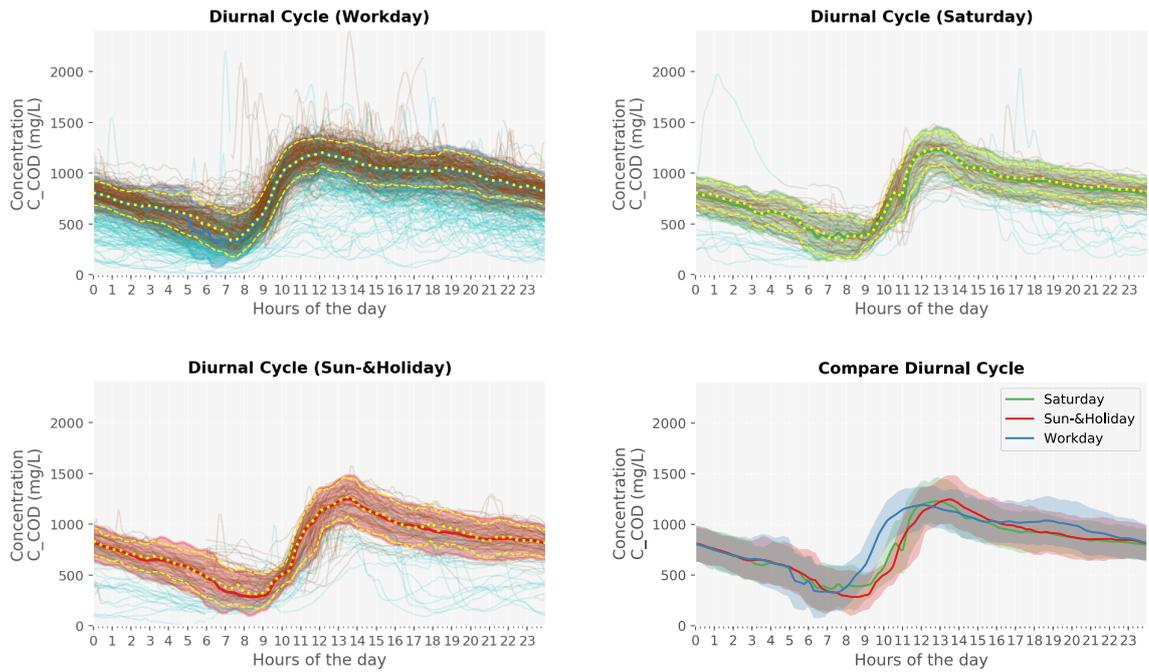
4.2.1.3 Auswertung der Tagesganglinien für den Parameter Chemischer Sauerstoffbedarf CSB

Ähnlich wie bei den Darstellungen der ARA-Zulauf-Tagesgänge wird nachfolgend der Tagesgang der TW-Stofffrachtraten für den Qualitätsparameter CSB (engl. *COD*) präsentiert. Dabei wurden zusätzlich auch noch die einzelnen Tagesgänge bei Regenwetter farblich von jenen bei Trockenwetter unterscheidbar dargestellt.

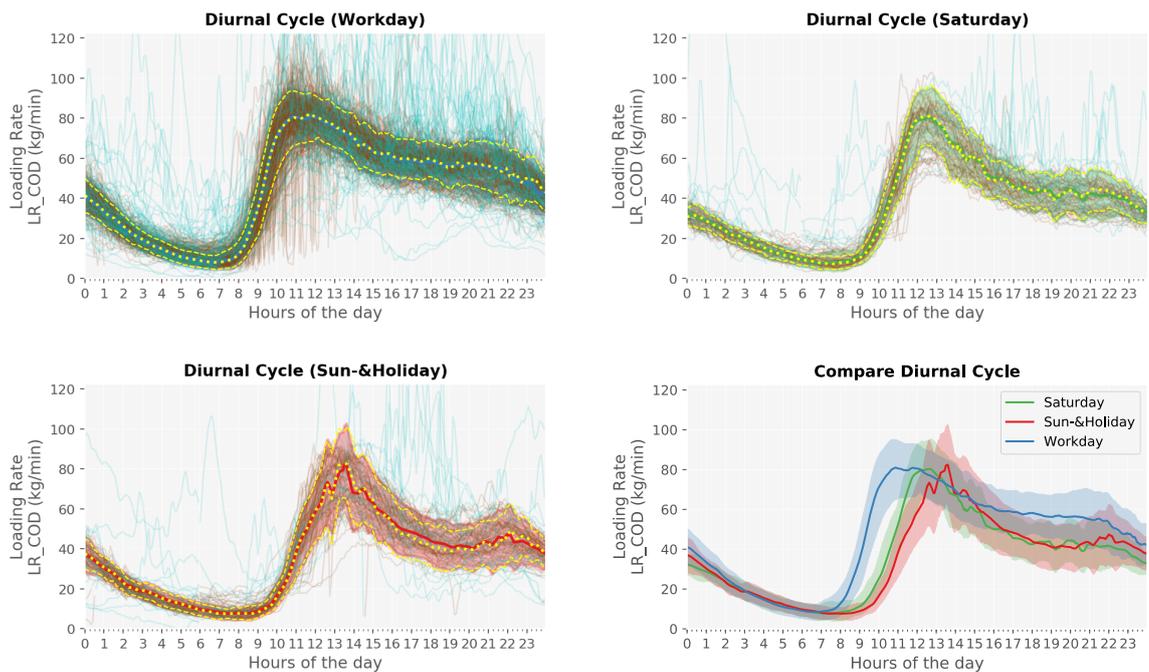
Der Tagesgang des CSB sowie die Frachtrate für den CSB in den Abbildungen [4-7a](#) und [4-7b](#) wurde mit dem robusten Mittel und dem MAD ermittelt, wobei der MAD am Vormittag jeweils asymmetrisch berechnet wurde.

Tabelle 4-13: CSB TW-Frachten

			Samstag	Sonn- und Feiertag	Arbeitstag
Konzentrationen	[mg/L]	Mittel	750	760	810
Summen	[t]	Min	39	38	51
		Mittel	52	51	66
		Max	65	65	81
Mittlere Frachtraten	[kg/min]	Min	27	26	36
		Mittel	36	36	46
		Max	45	45	56



(a) Konzentration-Tagesgänge von CSB



(b) Frachtraten-Tagesgänge von CSB

Abbildung 4-7: Tagesgänge von CSB - Die vielen dünnen, schwarzen Linien sind die einzelnen TW-Tagesgänge im Untersuchungszeitraum. Die RW-Ereignisse sind in cyan dargestellt. Die farbigen, durchgezogenen Linien sind das TW-Mittel und die farblich dazugehörige Schraffur ist der ermittelte TW-Bereich. Die gelb strichlierten Linien sind jeweils das - nur mit TW-Werte berechnete - TW-Mittel und die Grenzen des TW-Bereichs.

4. Ergebnisse und Diskussion

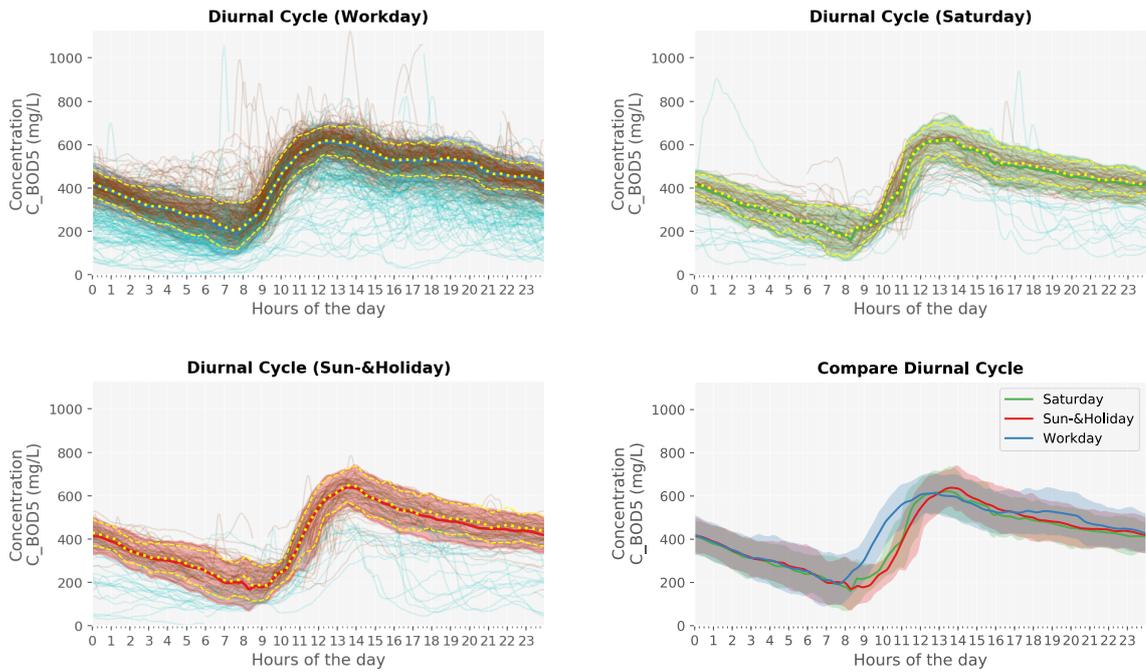
4.2.1.4 Auswertung der Tagesganglinien für den Parameter Biologischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tages BSB₅

Der Tagesgang des BSB₅ sowie die Frachtrate für den BSB₅ in den Abbildungen 4-8a und 4-8b wurde mit dem robusten Mittel und dem MAD ermittelt, wobei der MAD am Vormittag jeweils asymmetrisch berechnet wurde.

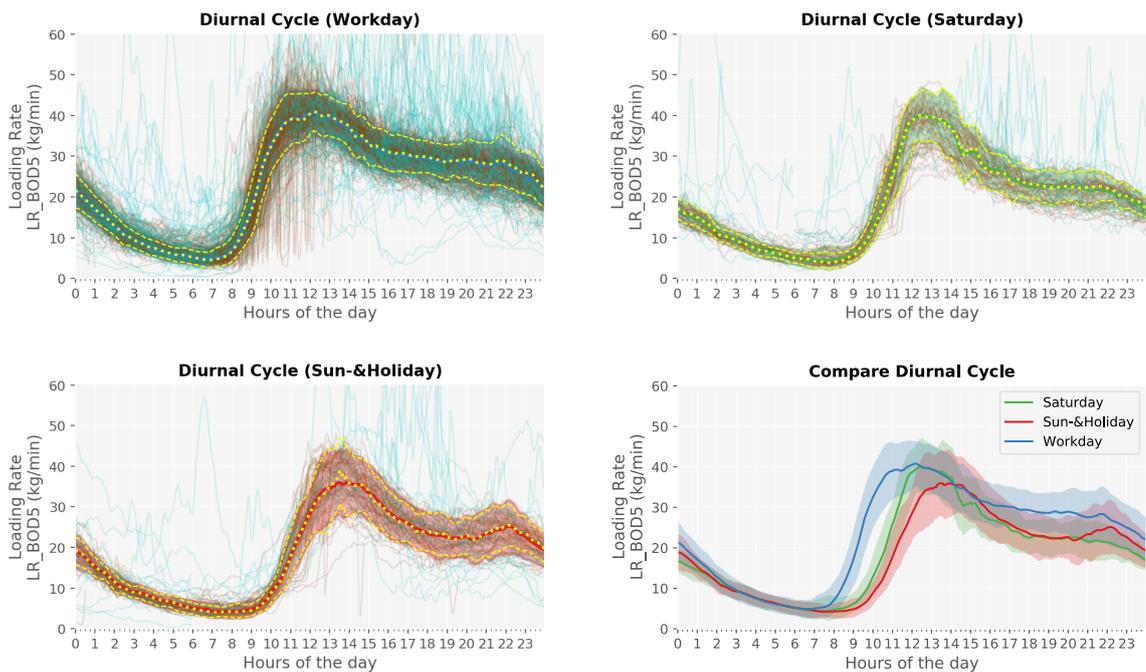
Der BSB₅-Tagesgang verläuft nahezu parallel zum CSB und ist nur um einen Faktor von ca. 2 kleiner.

Tabelle 4-14: BSB₅ TW-Frachten

			Samstag	Sonn- und Feiertag	Arbeitstag
Konzentration	[mg/L]	Mittel	390	390	420
Summe	[t]	Min	21	20	27
		Mittel	27	26	34
		Max	33	33	40
Mittlere Frachtrate	[kg/min]	Min	15	14	19
		Mittel	19	18	23
		Max	23	23	28



(a) Konzentration-Tagesgänge von BSB₅



(b) Frachtraten-Tagesgänge von BSB₅

Abbildung 4-8: Tagesgänge von BSB₅ - Die vielen dünnen, schwarzen Linien sind die einzelnen TW-Tagesgänge im Untersuchungszeitraum. Die RW-Ereignisse sind in cyan dargestellt. Die farbigen, durchgezogenen Linien sind das TW-Mittel und die farblich dazugehörige Schraffur ist der ermittelte TW-Bereich. Die gelb strichlierten Linien sind jeweils das - nur mit TW-Werte berechnete - TW-Mittel und die Grenzen des TW-Bereichs.

4. Ergebnisse und Diskussion

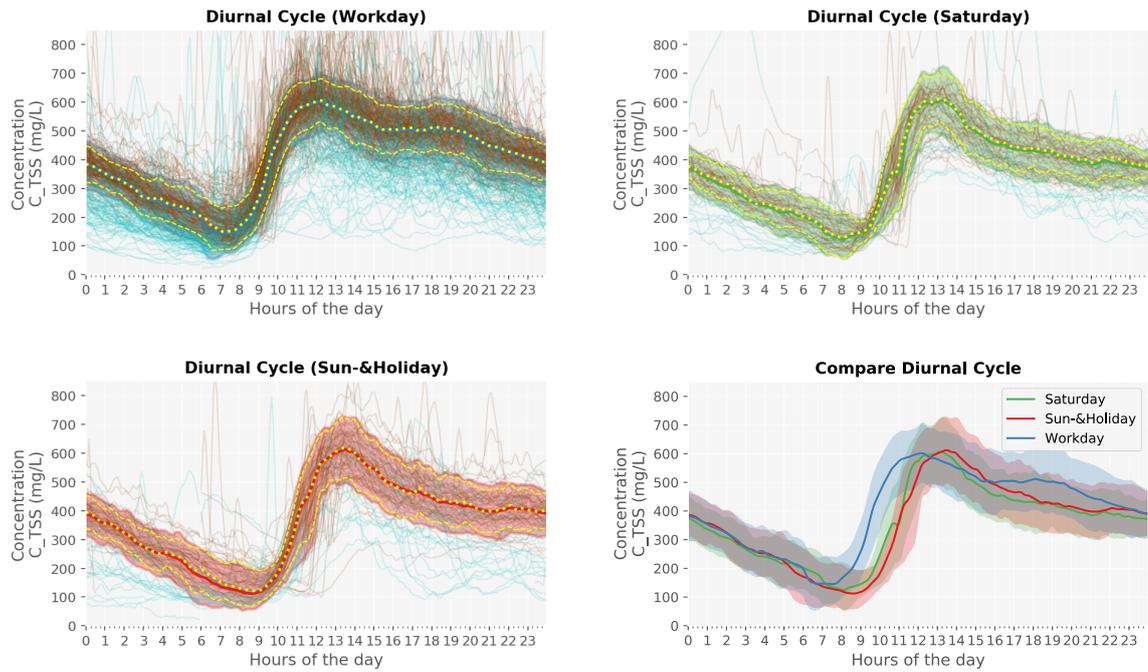
4.2.1.5 Auswertung der Tagesganglinien für den Parameter Abfiltrierbare Stoffe AFS

Der Tagesgang des AFS sowie die Frachtrate für den AFS in den Abbildungen [4-9a](#) und [4-9b](#) wurde mit dem robusten Mittel und dem MAD ermittelt, wobei der MAD am Vormittag jeweils asymmetrisch berechnet wurde.

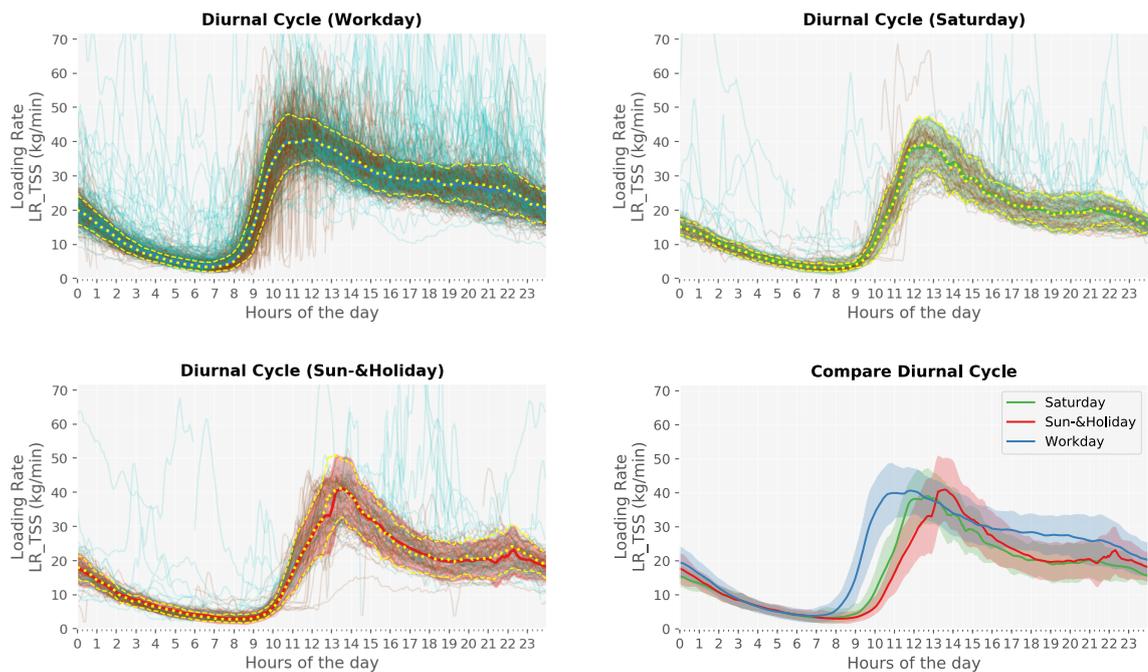
Der Tagesgang verläuft nahezu parallel zum CSB und ist nur um einen Faktor von ca. 2 kleiner.

Tabelle 4-15: AFS TW-Frachten

			Samstag	Sonn- und Feiertag	Arbeitstag
Konzentration	[mg/L]	Mittel	350	350	390
Summe	[t]	Min	18	18	25
		Mittel	25	25	32
		Max	31	31	40
Mittlere Frachtrate	[kg/min]	Min	13	12	17
		Mittel	17	17	22
		Max	21	22	27



(a) Konzentration Tagesgänge von AFS



(b) Frachtraten Tagesgänge von AFS

Abbildung 4-9: Tagesgänge von AFS - Die vielen dünnen, schwarzen Linien sind die einzelnen TW-Tagesgänge im Untersuchungszeitraum. Die RW-Ereignisse sind in cyan dargestellt. Die farbigen, durchgezogenen Linien sind das TW-Mittel und die farblich dazugehörige Schraffur ist der ermittelte TW-Bereich. Die gelb strichlierten Linien sind jeweils das - nur mit TW-Werte berechnete - TW-Mittel und die Grenzen des TW-Bereichs.

4.2.1.6 Auswertung der Tagesganglinien für den Parameter Ammonium-Stickstoff NH₄-N

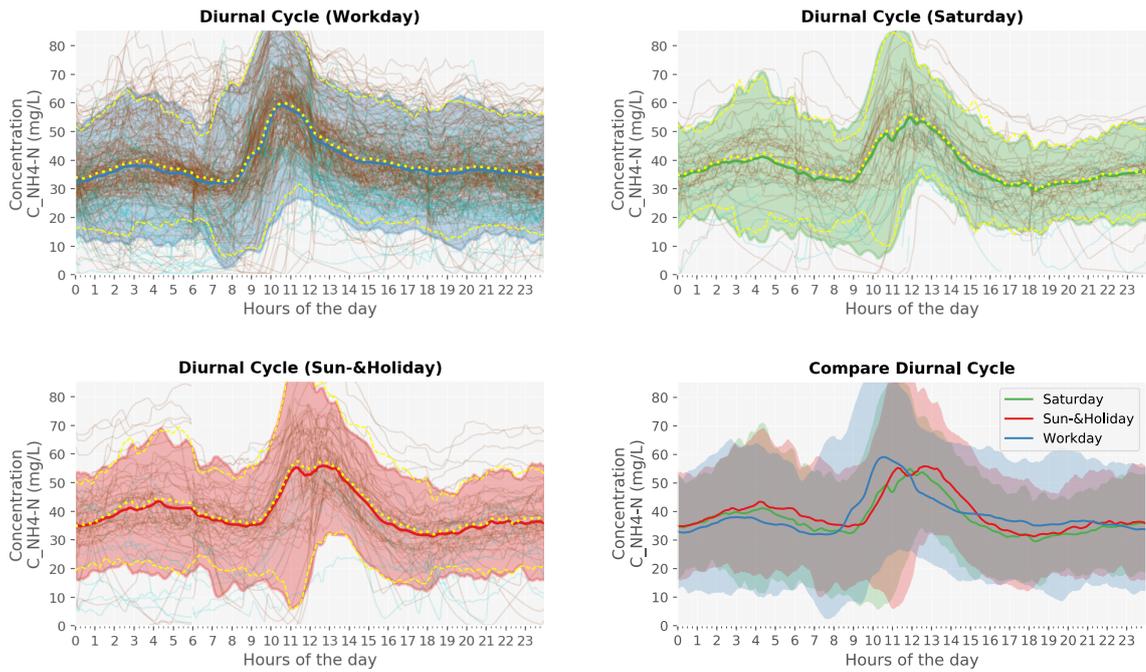
Der Tagesgang des NH₄-N sowie die Frachtrate für den NH₄-N in den Abbildungen [4-10a](#) und [4-10b](#) wurde mit dem Median und dem MAD ermittelt. Der Median wurde für NH₄-N deshalb gewählt, da der Verlauf über das ganze Jahr stark schwankt und es dadurch kein ausgeprägtes TW-Mittel gibt.

Der Tagesgang vom NH₄-N weicht jenem von den Kohlenstoffparametern wesentlich ab. Beim NH₄-N ist der Wert - bis auf die Konzentrationsspitze zur Mittagszeit - über den Tag nahezu konstant. Sams-, Sonn- und Feiertage verlaufen bei den NH₄-N-Konzentrationen wie bei den Frachraten sehr ähnlich. Die Frachtspitze der Arbeitstage findet im Vergleich dazu ein paar Stunden früher statt.

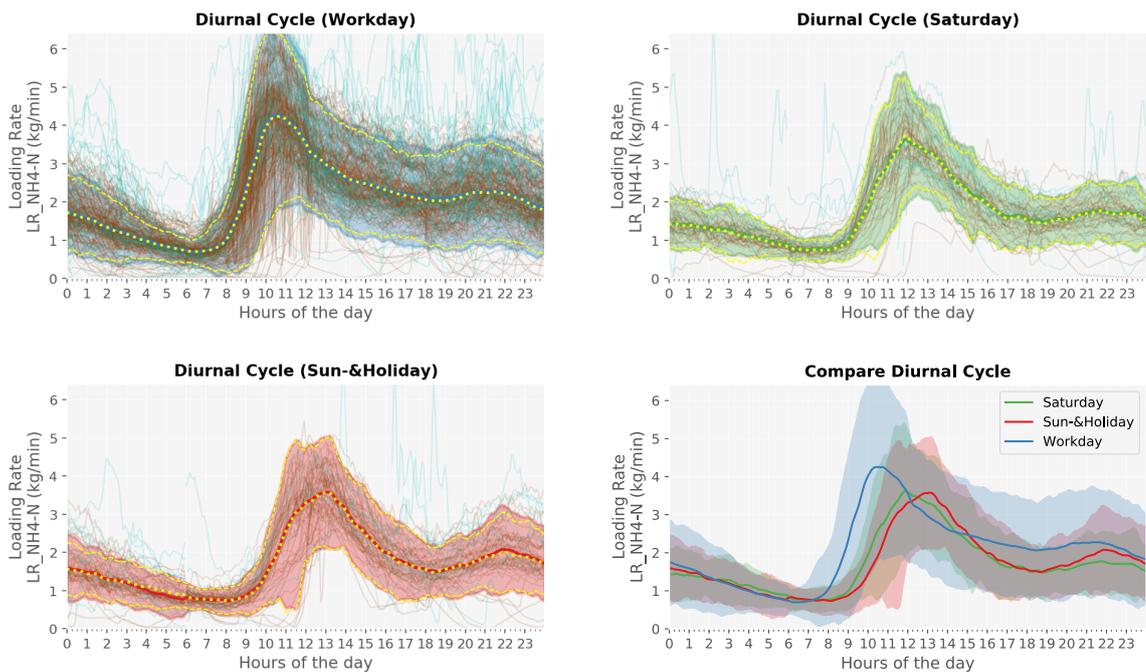
Durch den hohen Unterschied der Konzentration zwischen Sommer- und Wintermonaten wird beim Ammonium-Stickstoff für die TW-Variation das Limit auf 3 gesetzt, was einer 50 % Verbreiterung des TW-Bereichs entspricht. Der Vorteil dabei ist, dass sich dadurch das TW-Level über das ganze Jahr besser anpasst.

Tabelle 4-16: NH₄-N TW-Frachten

			Samstag	Sonn- und Feiertag	Arbeitstag
Konzentration	[mg/L]	Mittel	38	39	39
Summe	[t]	Min	1.3	1.2	1.1
		Mittel	2.5	2.5	3.0
		Max	3.7	3.8	4.8
Mittlere Frachtrate	[kg/min]	Min	0.9	0.8	0.8
		Mittel	1.7	1.7	2.1
		Max	2.5	2.6	3.4



(a) Konzentration-Tagesgänge von $\text{NH}_4\text{-N}$



(b) Frachtraten-Tagesgänge von $\text{NH}_4\text{-N}$

Abbildung 4-10: Tagesgänge von $\text{NH}_4\text{-N}$ - Die vielen dünnen, schwarzen Linien sind die einzelnen TW-Tagesgänge im Untersuchungszeitraum. Die RW-Ereignisse sind in cyan dargestellt. Die farbigen, durchgezogenen Linien sind das TW-Mittel und die farblich dazugehörige Schraffur ist der ermittelte TW-Bereich. Die gelb strichlierten Linien sind jeweils das - nur mit TW-Werte berechnete - TW-Mittel und die Grenzen des TW-Bereichs.

4.2.1.7 Auswertung der Tagesganglinien für den Parameter Temperatur T

Der Tagesgang der Temperatur wird in Abbildung [4-11](#) dargestellt und ist nicht vom Wochentag abhängig. Vielmehr hat die jeweilige Jahreszeit bzw. die Luftaußentemperatur einen Einfluss auf die Abwasserzulauftemperatur. Sie verläuft bei TW-Bedingungen nahezu konstant. Bei RW-Ereignissen ist der Einfluss der Luftaußentemperatur ebenfalls erkennbar.

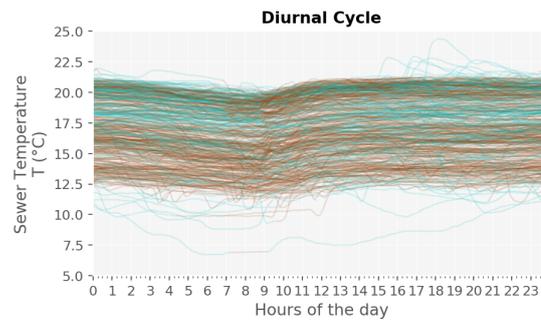


Abbildung 4-11: Tagesgang der Abwassertemperatur - Die vielen dünnen, schwarzen Linien sind die einzelnen TW-Tagesgänge im Untersuchungszeitraum. Die RW-Ereignisse sind in cyan dargestellt.

4.2.2 Stabilität der Berechnung der Parameter des TW-Tagesgangs

Dieses Testverfahren (siehe Abschnitt [3.2.1.3](#)) wurde am Durchflussmengenmesssignal durchgeführt und beschreibt die Unsicherheit bzw. die Stabilität der verwendeten Berechnungsverfahren für jeden betrachteten Parameter in Abhängigkeit von der Anzahl an Messwerten.

In den Abbildungen [4-12](#) und [4-13](#) sind Quantilwerte aller Berechnungsergebnisse dargestellt.

Zwischen den Linien liegen α % der Ergebnisse. Die obere Grenze ist somit das $1 - \frac{\alpha}{2}$ Quantil aller Ergebniswerte und die untere Grenze respektive das $\frac{\alpha}{2}$ Quantil.

Die **Ordinaten-Achse** zeigt die relative Abweichung vom berechneten Endergebnis mit allen Werten.

$$Y_i = \frac{R_i - R_n}{R_n} * 100\% \text{ für } i := 1 \dots n \quad (\text{Gleichung 4-1})$$

Mit: Y_i ... Relative Abweichung zum Endergebnis mit i berücksichtigten Werten

R_i ... Absolutes Zwischenergebnis mit i berücksichtigten Werten

R_n ... Absolutes Endergebnis mit n berücksichtigten Werten

Die **X-Achse** gibt die Anzahl der verwendeten Messwerte an (python-Code [A-6](#)).

Es wurden nur Berechnungsansätze mit symmetrischer TW-Variation (DW-Variation) (Abschnitt [3.2.1.2](#)) getestet. In den Ergebnissen des Testverfahrens für die Durchflusswerte ist eine stabilere Berechnung über das robuste Mittel und dem MAD zu erkennen. Welches TW-Mittel (DW-Mean) dem MAD übergeben wird, ist für die Stabilität nicht wesentlich.

In der Abbildung [4-12](#) ist der Verlauf der Unsicherheiten der Berechnungsverfahren zur Ermittlung des TW-Mittels abgebildet. Die linke Grafik zeigt die Berechnung über den Median (kind=0) und die rechte Grafik nach dem robusten Mittel (kind=1).

In der Abbildung [4-13](#) ist der Verlauf der Unsicherheiten der Berechnungsverfahren zur Ermittlung der TW-Variationen abgebildet. Die linke obere Grafik zeigt die Berechnung über den MAD (kind=0), die rechte Grafik nach dem IQR (kind=97) und die linke untere Grafik nach dem modMAD (kind=2).

4. Ergebnisse und Diskussion

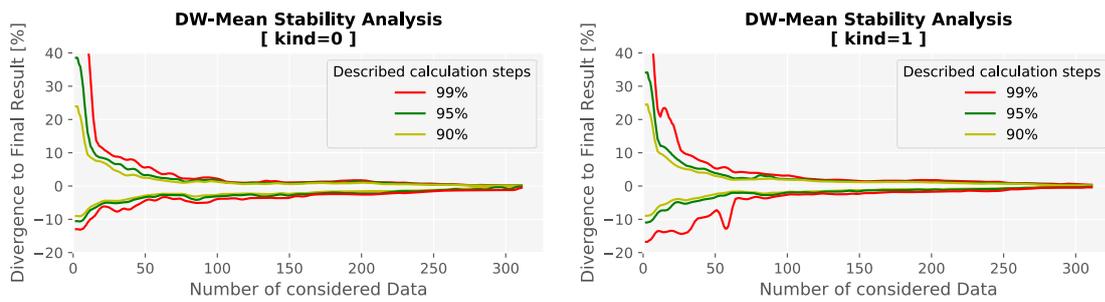


Abbildung 4-12: Stabilität der TW-Mittel- Berechnungsverfahren - Links: Berechnung des Medians, rechts: Berechnung des robusten Mittels.

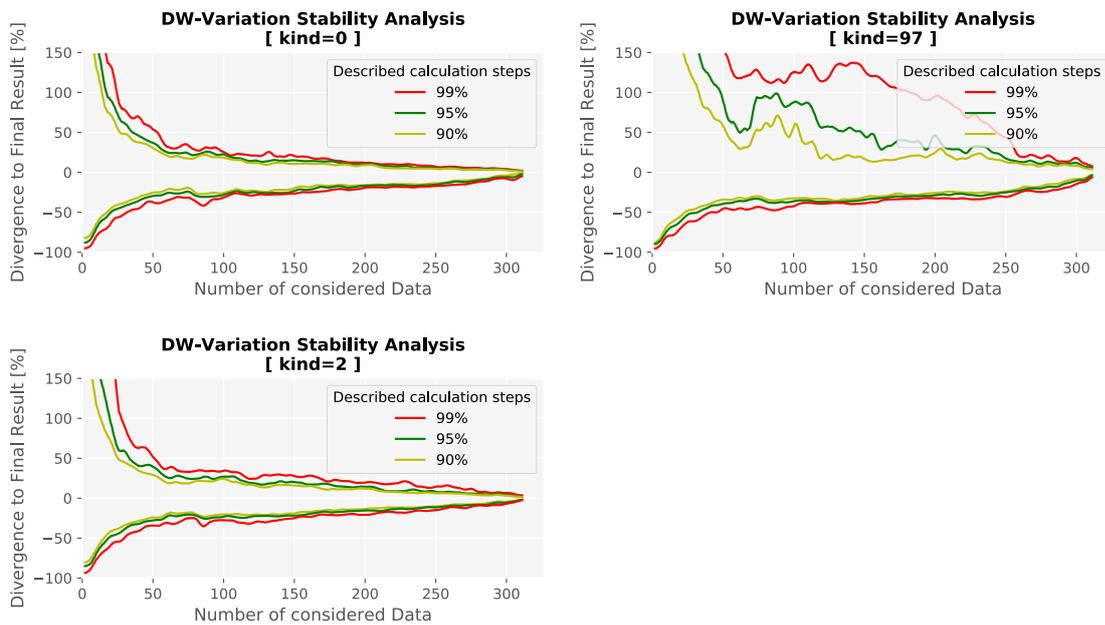


Abbildung 4-13: Stabilität der TW-Variation- Berechnungsverfahren - Links oben: die Berechnung des MAD, rechts: die Berechnung des IQR und unten: die Berechnung des modMAD.

4.3 Ergebnisse der saisonalen Trendauswertung

Ein saisonaler Trend kann über den TW-Level (siehe Abschnitt [3.2.2.2](#)) ermittelt werden. In den zur Verfügung stehenden Daten konnte nur bei den Kohlenstoffparametern ein saisonaler Trend beobachtet werden. Um zu überprüfen, ob es sich wirklich um einen wiederkehrenden saisonalen Trend handelt, müssten die Daten allerdings mit anderen Jahren verglichen werden. Daher kann im Rahmen dieser Arbeit darüber keine Aussage getroffen werden.

In nahezu allen Parametern ist der Einfluss der Schulferien (siehe Tabelle [4-17](#)) im TW-Level zu erkennen. In Abbildung [4-14](#) sind die TW-Level der einzelnen Parameter dargestellt. Am stärksten ist der Einfluss der Schulferien bei den Weihnachtsferien und den Osterferien zu erkennen. In diesen Perioden sinkt das Durchflussmengenmesssignal im Zulauf zur ARA Graz bis ans untere Ende des TW-Bereichs. Bei den Kohlenstoffparametern sind die Winterferien durch einen merkbaren Abfall der Frachtraten gekennzeichnet.

Tabelle 4-17: Schulferien während des Analyse-Zeitraums

	Beginn	Ende
Pfingsten	2016-05-14	2016-05-17
Sommerferien	2016-07-09	2016-09-11
Weihnachtsferien	2016-12-24	2017-01-08
Semesterferien	2017-02-20	2017-02-26
Josefitag	2017-03-19	2017-03-19
Osterferien	2017-04-08	2017-04-18
Pfingsten	2017-06-03	2017-06-06
Schulautonom	2017-05-26	2017-05-26
Schulautonom	2017-06-16	2017-06-16
Sommerferien	2017-07-08	2017-09-10

4. Ergebnisse und Diskussion

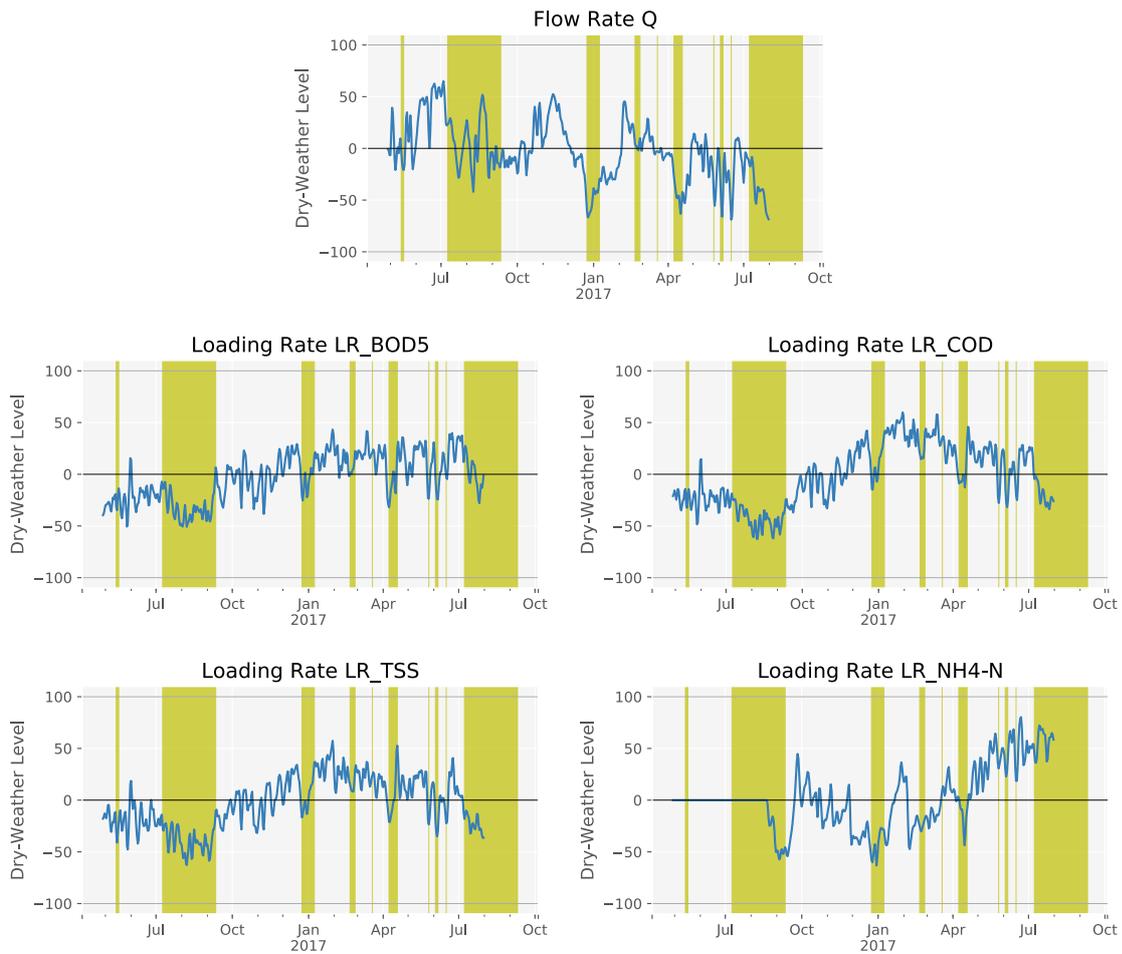


Abbildung 4-14: Trockenwetter Level - Die gelb hinterlegten Bereiche markieren die Schulferien in der Steiermark (siehe Tab. 4-17).

4.4 Ergebnisse und Vergleich der Auswertungen der Entleerungsereignisse des ZSK

Es wurde Entleerungen des ZSK im Zeitraum zwischen November 2016 und Juli 2017 untersucht.

Zur Auswertung und zum Vergleich der ermittelten Ereignisauswertungen werden als Referenz die Ergebnisse einer manuellen Auswertung aus Hofer *et al.* (2017) mit jenen aus der automatisierten Auswertung nach der in dieser Arbeit beschriebenen Methodik miteinander verglichen.

In der Referenz-Publikation wurden im Zeitraum zwischen November 2016 und Juni 2017 15 valide Entleerungsereignisse erkannt und ausgewertet. Bei der automatisierten Detektion wurden im selben Zeitraum 30 Ereignisse erkannt und ausgewertet. Zusätzlich fanden weitere fünf Entleerungen im Juli 2017 statt.

Es wurden nur Ereignisse ausgewertet, mit einem Anfangsfüllstand des MÜB von mindestens 25 %, einer kleinsten Abnahme von 18 % und mit mindestens einem Entleerungsvolumen von 7 500 m³.

In der Tab. 4-18 sind die Start- und Endzeitpunkte und in der Tabelle 4-19 die Dauern der 15 vergleichbaren Entleerungsereignisse gegenübergestellt. Aufgrund der unterschiedlich angewandten Ereignisdefinitionen unterscheiden sich diese mehr oder weniger stark voneinander.

Ein Grund für einen späteren Startzeitpunkt in der automatisierten Auswertung ist z. B. ein noch relativ hoher Durchfluss im Zulauf zur ARA zu Beginn der MÜB-Becken-Entleerung. Wenn bereits eine Teilentleerung kurz vor der restlichen Entleerung stattfindet, werden diese bei der automatisierten Auswertung zusammengefasst. Bei der manuellen Auswertung werden nur durchgehende Entleerungen ausgewertet und man beschränkte sich dabei meist nur auf die größeren Entleerungen.

Der Grund für einen späteren Endzeitpunkt ist die Berücksichtigung einer Konzentrationsspitze nach der Entleerung. Diese wird „last flush“-Effekt genannt und entsteht durch Reinigungsspülvorgänge im MÜB.

In Tabelle 4-19 sind die Ereignisdauern der beiden unterschiedlichen Auswertungen gegenübergestellt. Die Dauer der Ereignisse wird bei der automatisierten Methode nur aus den Zeitbereichen, wo alle Ereignisbedingungen erfüllt sind, errechnet. Daher ist die errechnete Dauer zumeist zu dem Abstand zwischen Start- und Endzeit unterschiedlich.

4. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-18: Vergleich der Start- und Endzeiten der Ereignisse der unterschiedlichen Methoden

Nr.	Autom. Methode		Referenz-Methode	
	Start	Ende	Start	Ende
1	2016-11-21 07:32	2016-11-21 21:30	2016-11-21 07:30	2016-11-21 20:23
2	2017-02-08 09:11	2017-02-09 12:30	2017-02-08 08:00	2017-02-09 06:30
3	2017-02-17 23:41	2017-02-18 13:20	2017-02-17 23:40	2017-02-18 13:00
4	2017-03-01 05:34	2017-03-01 18:09	2017-03-01 05:40	2017-03-01 15:22
5	2017-04-04 23:05	2017-04-05 22:15	2017-04-05 09:12	2017-04-05 19:15
6	2017-04-29 00:22	2017-04-29 21:38	2017-04-29 10:09	2017-04-29 22:42
7	2017-05-23 05:49	2017-05-24 19:28	2017-05-23 00:37	2017-05-24 20:00
8	2017-06-03 03:35	2017-06-04 09:25	2017-06-03 03:29	2017-06-04 09:30
9	2017-06-04 23:39	2017-06-05 07:14	2017-06-04 23:39	2017-06-05 07:54
10	2017-06-07 07:06	2017-06-07 11:20	2017-06-07 06:20	2017-06-07 11:27
11	2017-06-08 07:08	2017-06-08 16:05	2017-06-08 07:06	2017-06-08 16:20
12	2017-06-10 13:33	2017-06-11 11:41	2017-06-10 16:00	2017-06-11 05:30
13	2017-06-13 07:13	2017-06-13 19:35	2017-06-13 07:12	2017-06-13 17:00
14	2017-06-23 17:41	2017-06-24 20:29	2017-06-23 23:08	2017-06-24 18:06
15	2017-06-25 06:56	2017-06-26 23:54	2017-06-25 18:53	2017-06-26 23:21

Tabelle 4-19: Dauern der Ereignisse in Stunden

Nr.	Autom. Methode	Referenz-Methode
1	14.0	13.0
2	21.7	22.5
3	13.7	13.3
4	10.6	9.7
5	14.9	10.1
6	18.0	12.5
7	26.0	43.4
8	29.0	30.0
9	7.6	8.2
10	4.2	5.1
11	8.0	9.2
12	16.2	13.5
13	10.5	9.8
14	20.2	19.0
15	26.7	28.5

In Abbildungen 4-15 sind die Ergebnisse der unterschiedlich ermittelten Entleerungsvolumina dargestellt.

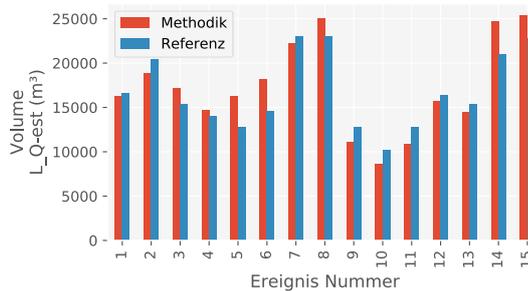


Abbildung 4-15: Vergleich der Ereignisvolumina

Der Grund für die Unterschiede zwischen den Entleerungsvolumina besteht in der unterschiedlichen Berechnung dieser.

Basis für die Berechnung der Volumina in dieser Arbeit ist der Zusammenhang zwischen dem relativen Füllstand und dem dadurch genutzten Speichervolumen. Bei einem ausgespiegelten Füllstand von 90 % im MÜB werden 23 000 m³ Speichervolumen genutzt. Ist der Wasserspiegel höher, wird bereits über den MÜB-Überlauf entlastet. Außerdem können kurzfristige Erhöhungen im Füllstand auf Abflusswellen zurückgeführt werden.

Bei der Referenzmethode wird von einer vollständigen Entleerung ausgegangen. Dabei ist das Volumen nur vom Anfangsfüllstand abhängig. Dieser wurde wie folgt berechnet:

$$L_{_Q} = h_{max} * \frac{23\,000\,m^3}{90\%} \quad (\text{Gleichung 4-2})$$

Mit: $L_{_Q}$... Volumen eines ZSK-Entleerungsereignisses in m³
 h_{max} ... relativer Füllungsgrad zum Ereignisstart in %

Bei der Methode dieser Masterarbeit wurde nur die Abnahme des Füllungsgrades während der Ereignisdauer gewertet.

$$L_{_Q} = \int_{t=Start}^{Ende} (h_{(t-1)} - h_t) * \frac{23000\,m^3}{90\%} \quad (\text{Gleichung 4-3})$$

Mit: $L_{_Q}$... Volumen eines ZSK-Entleerungsereignis in m³
 h_t ... relativer Füllungsgrad zum Zeitpunkt t in %

Aber nur in jene Zeitdauern in denen alle Bedingungen eines Entleerungsereignisses erfüllt sind.

4. Ergebnisse und Diskussion

Falls nun kleine Teilentleerungen nach einer Hauptentleerung folgen, werden die Auswertungen dieser Entleerungsdauern additiv jenen der gesamten Auswertung dazugezählt.

Da bei der automatisierten Auswertung Bereiche mit erhöhten Durchfluss, die nicht durch die Schneckenpumpen erklärbar sind, aus der Auswertung entfernt wurden, ergeben sich großteils geringere Entleerungsvolumina wie auch Entleerungsfrachten.

In der 4-16 sind die Ergebnisse der Entleerungsfrachten sowie auch die aus den Ereignisvolumina berechenbaren durchschnittlichen Entleerungskonzentrationen dargestellt.

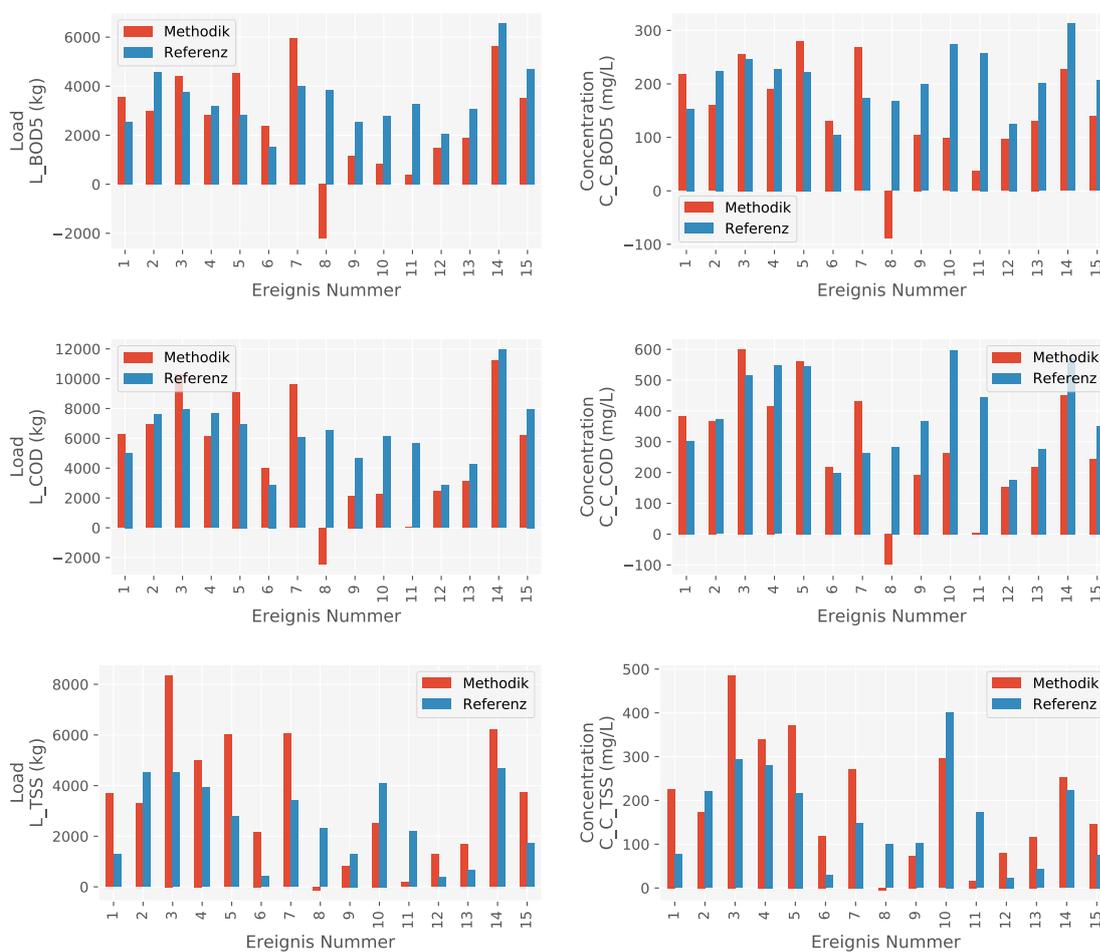


Abbildung 4-16: Vergleich der Ereignisfrachten (links) und der Konzentrationen (rechts)

Da der AFS als Schlüsselparameter für die Detektion des „last-flush“-Effekts gewählt wurde, sind auch diese Frachten im Vergleich höher. Der AFS wurde dafür deshalb gewählt, da die beobachteten „last-flush“-Effekt bei der Restbeckenentleerung der MÜBs hauptsächlich von den abgesetzten, partikulären Stoffen resultieren.

Den stärksten Einfluss auf die Frachtermittlungen hat allerdings die geschätzte

TW-Fracht während der Entleerungsereignisse, die von den gesamten Frachten, die während der Entleerungsdauern gemessen werden, abgezogen wird.

Da diese TW-Fracht bei der manuellen Auswertung je Ereignis separat betrachtet angepasst wird, ist diese im Vergleich zur der automatisierten Auswertung von Ereignis zu Ereignis unterschiedlich. Hierfür wurde in dieser Masterarbeit ein kontinuierlicher TW-Verlauf erstellt, das heißt die Anpassung an die aktuellen TW-Perioden wird immer konstant gleich beurteilt und obliegt daher keiner subjektiven manuellen Einschätzung.

Bei den CSB- und BSB₅-Frachten gibt es sowohl Ereignisse mit guter als auch mit schlechter Übereinstimmung. Beim AFS ist die Übereinstimmung zumeist noch schlechter.

Die Entleerungsvolumina wurden bei diesem Vergleich bei beiden Methoden über die Höhenstandsabnahme im Überlaufbecken bestimmt, um eine Vergleichbarkeit der beiden Ergebnisse zu gewährleisten.

Zusätzlich wurde das Entleerungsvolumen parallel auch noch über das Durchflussmengenmesssignal abgeschätzt. Die Herangehensweise dabei ist gleich wie bei der Schätzung der Ereignisfrachten. Die Auswertung für die Entleerungsvolumina ist jedoch nur für den Vergleich mit der Schätzung des Volumens aus dem Füllstandssignal angegeben, weshalb die Alternativvariante über das Durchflussmengenmesssignal keinen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse dieser Masterarbeit hat. Diese Art der Entleerungsvolumenabschätzung kann jedoch zur Anwendung kommen, sobald der ZSK im Vollbetrieb ist und eine alleinige Entleerungsvolumenabschätzung nur über den Füllstand der Mischwasserüberlaufbecken nicht mehr möglich sein wird.

Beim Vergleich der 15 mit beiden Methoden ausgewerteten Ereignisse gibt es kein Ereignis, bei dem sich die manuelle und die automatisierte Auswertung bei allen untersuchten Parameter gleichen. Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse von drei Ereignissen näher betrachtet und auch im Detail beschrieben, wovon eines eine gute Übereinstimmung zeigte und die zwei anderen eine eher schlechte.

Im Anhang [D](#) sind die Ergebnisse aller 35 detektierten Entleerungsereignisse dargestellt.

Ein schematisches Beispiel der unterschiedlichen Verläufe der Frachtraten ist auch in [Abbildung 3-10](#) dargestellt.

4.4.1 Vergleich des ZSK-Entleerungsereignisses am 2017-02-08

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis nach der in dieser Arbeit definierten Ereignisdefinition zwischen Mittwoch 2017-02-08 09:11 und Donnerstag 2017-02-09 12:30 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 21,7 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 9,7 Stunden nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung 4-17 im Detail dargestellt. Dieses Ereignis hatte in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 2. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 08:00 Uhr und das Ende mit 06:30 Uhr definiert, wodurch die Entleerungsdauer nach dieser Definition nur 22,5 Stunden betrug. Das automatisierte Ergebnis ergab bei diesem Entleerungsereignis Konzentrationen und Frachten in einem ähnlichen Wertebereich wie bei der manuelle Auswertung.

Die automatisierten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 6,9 t, für den BSB₅ bei 3,0 t und für den AFS bei 3,3 t (siehe Tab. 4-20). Auf das Entleerungsvolumen von 18 500 m³bezogen, ergaben sich daraus mittlere Entleerungskonzentrationen für den CSB von 375 mg/L, für den BSB₅ von 163 mg/L und für den AFS von 177 mg/L. Die NH₄-N-Frachten lagen bei dieser Auswertung im negativen Bereich.

Ein Grund dafür könnte das mit NH₄-N deutlich geringer belastete Mischwasser aus dem ZSK sein. Die Entleerung wurde einmal für ca. 1 Stunde unterbrochen, wo die Schneckenpumpen offensichtlich abgeschaltet wurden. Am Ende der Entleerung konnte ein deutlicher „last-flush“-Effekt bei den Kohlenstoff-Parameter und beim AFS festgestellt werden und wurde daher bei der Ereignisauswertung mitberücksichtigt, wohingegen diese Frachtspitze bei der manuellen Auswertung nicht berücksichtigt wurde. Die Daten kurz vor dem Ereignis wurden in der Validierung aufgrund einer Schließung des Zulaufschiebers als ungültig gewertet und entfernt. Diese Lücke hat einen direkten negativen Einfluss auf die Genauigkeit des berechneten TW-Kontinuums. Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Ereignisstart war 77 %.

Tabelle 4-20: Entleerungsereignis vom 2017-02-08 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte Mögliche Frachten			Autom. Methode		Referenz-Methode	
	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Fracht	Konzentr.
Q= f(ΔQ)	17 800	27 900	38 300	23 300	-	-	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	18 500	-	20 400	-
CSB	581	12 700	27 300	6 920	375	7 610	372
BSB₅	-2 220	3 350	10 300	3 010	163	4 580	224
AFS	-1 660	4 440	11 900	3 270	177	4 500	220
NH₄-N	-2 470	-234	869	-4	0	-	-

4. Ergebnisse und Diskussion

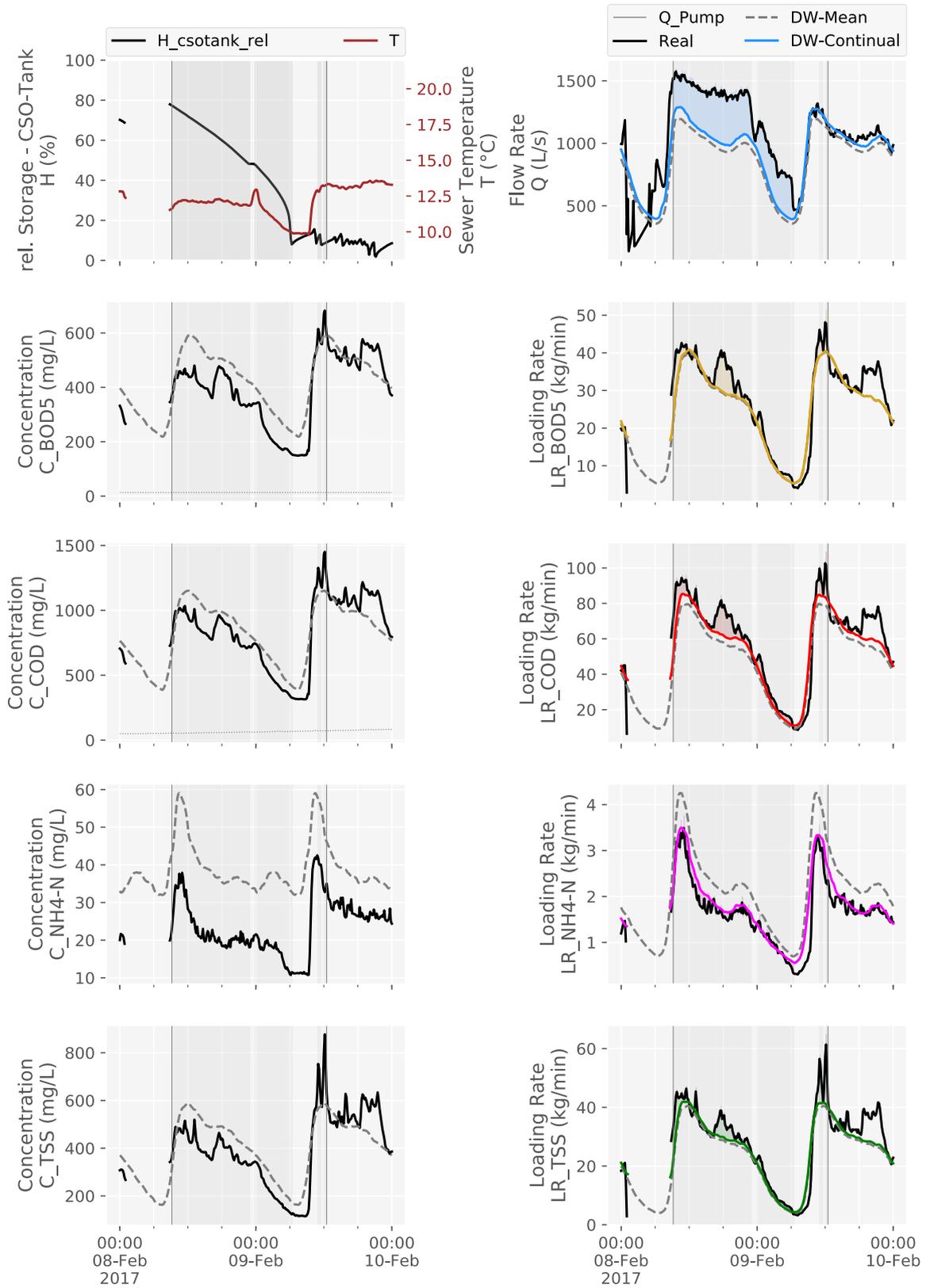


Abbildung 4-17: Entleerungsereignis am 2017-02-08

4.4.2 Vergleich des ZSK-Entleerungsereignisses am 2017-06-03

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis am Pfingswochende zwischen Samstag 2017-06-03 03:35 und Sonntag 2017-06-04 09:21 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung nach der Ereignisdefinition dieser Arbeit 29,0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 2 Tage 5,3 Stunden nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung 4-18 im Detail dargestellt. Dieses Ereignis hatte in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 8. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-03 03:29 und das Ende mit 2017-06-04 09:30 definiert, hatte also eine Entleerungsdauer von Die automatisierten Ergebnisse wiesen bei diesem Ereignis im Vergleich zur manuellen Auswertung größere Unterschiede bei den Konzentrationen und Frachten auf. .

Die automatisierten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den $\text{NH}_4\text{-N}$ bei 50 kg (siehe Tab. 4-21). Auf das Entleerungsvolumen von 25 000 m^3 bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den $\text{NH}_4\text{-N}$ von 2 mg/L. Die CSB-, BSB₅- und AFS-Frachten lagen bei dieser Auswertung im negativen Bereich, was zu einer ungünstigen Bewertung führte.

Ein Grund für diese großen Unterschiede und auch für die negativen Kohlenstofffrachten könnte das zu hohe TW-Level und somit das zu hohe TW-Kontinuum sein, wodurch die TW-Frachten größer als die gesamten Entleerungsfrachten werden. Nachdem das Ereignis am Pfingswochenende auftrat, dürfte der Abwasseranfall an diesem sehr beliebten Kurzurlaubswochenende geringer sein als an sonstigen Wochenenden. Auffällig bei diesem Ereignis war weiters, dass das entleerte Mischwasser aus dem ZSK bei diesem Ereignis nur gering belastet war. Am Ende der Entleerung konnte auch bei diesem Ereignis wieder ein „last-flush“-Effekt bei den Kohlenstoff-Parameter und beim AFS festgestellt werden und wurde daher zum Ereignis wieder hinzugefügt. Diese Frachtspitze wurde bei der manuellen Auswertung bei diesem Ereignis ebenfalls mitberücksichtigt. Am Ende der Entleerung kann ein Anstieg der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und -Fracht festgestellt werden. Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Ereignisstart war ca. 90 %. Da das MÜB durch das Mischwasserereignis bereits vollständig gefüllt wurde, gab es bei diesem Ereignis auch eine kurzzeitige Entlastung in den Vorfluter.

4. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-21: Entleerungsereignis am 2017-06-03 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte Mögliche Frachten			Autom. Methode		Referenz-Methode	
	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Fracht	Konzentr.
Q= f(ΔQ)	8 380	21 000	35 500	25 400	-	-	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	25 000	-	23 000	-
CSB	-19 500	-4 630	7 760	-2 450	-98	6 510	283
BSB₅	-8 880	-2 190	3 750	-2 220	-89	3 860	168
AFS	-8 890	-1 800	4 430	-140	-6	2 300	100
NH₄-N	-821	470	1 720	50	2	-	-

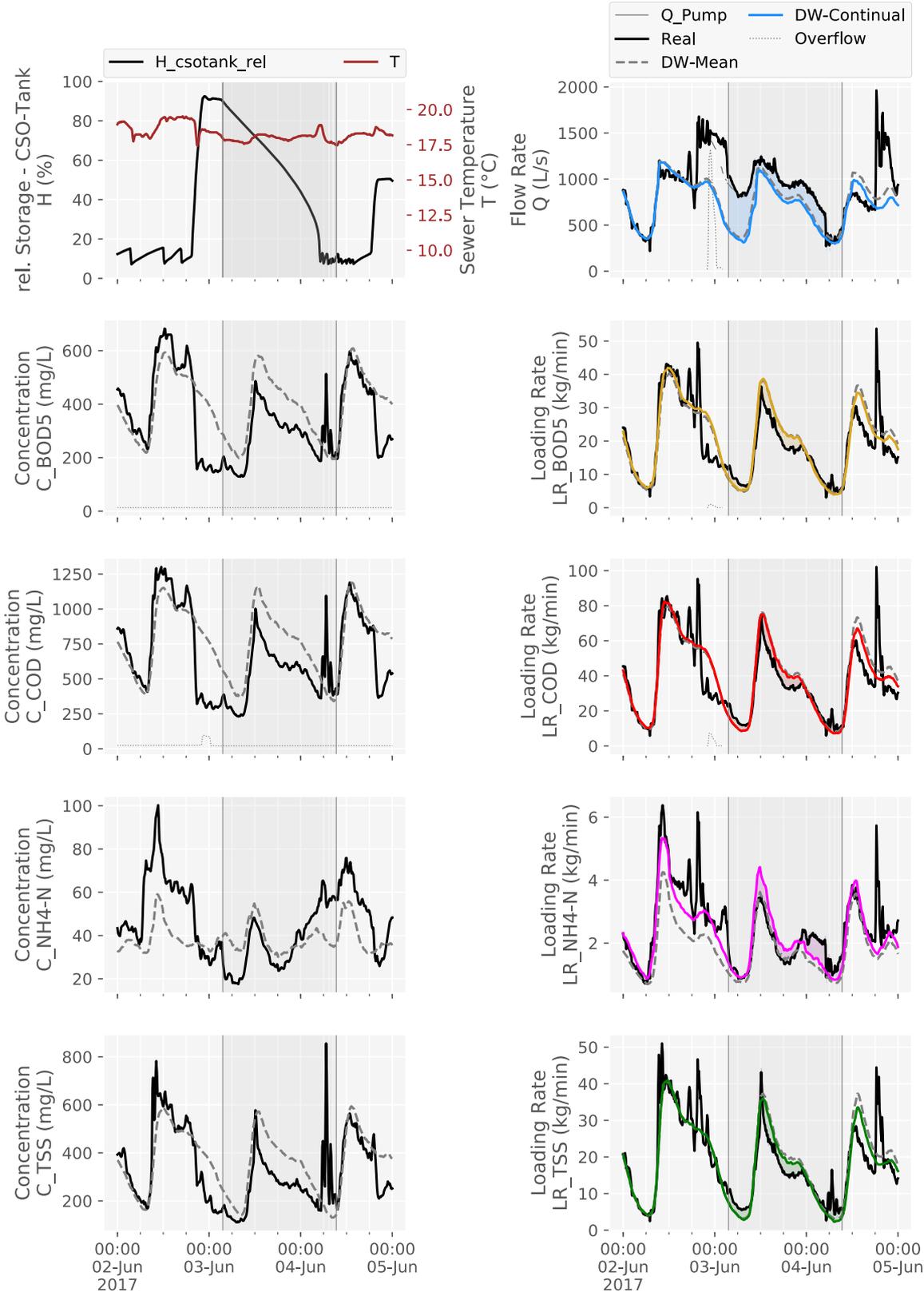


Abbildung 4-18: Entleerungsereignis am 2017-06-03

4.4.3 Vergleich des ZSK-Entleerungsereignisses am 2017-06-08

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-06-08 07:08 und 16:05 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung nach der Ereignisdefinition dieser Arbeit 8 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 7,5 Stunden nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung 4-19 im Detail dargestellt. Dieses Ereignis hatte in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 11. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 07:06 Uhr und das Ende mit 16:20 Uhr definiert, woraus sich eine Entleerungsdauer von ... ergab. Die automatisierten Ergebnisse wiesen bei diesem Ereignis im Vergleich zu den manuellen Auswertungen größere Unterschiede bei den Konzentrationen und Frachten auf.

Die automatisierten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 66 kg, für den BSB₅ bei 403 kg, für den AFS bei 174 kg und für den NH₄-N bei 467 kg (siehe Tab. 4-22). Auf das Entleerungsvolumen von 10 900 m³ bezogen; ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 6 mg/L, für den BSB₅ von 37 mg/L, für den AFS von 16 mg/L und für den NH₄-N von 43 mg/L.

Bei diesem Ereignis ergaben sich deutlich höhere Stofffrachtraten als bei den dazugehörigen TW-Kontinua. Bei der manuellen Auswertung der Konzentrationen und Frachten ergaben sich bei den Kohlenstoffparametern deutlich höhere Werte als bei der Anwendung der automatisierten Methodik dieser Arbeit. Der Grund dafür ist ein deutlich niedriger geschätzter theoretischer TW-Verlauf bei der manuellen Auswertung. Am Ende der Entleerung konnte wieder ein „last-flush“-Effekt bei den Kohlenstoff-Parametern und beim AFS festgestellt werden und wurde zum Ereignis wieder hinzugefügt. Diese Frachtspitze wurde bei der manuellen Auswertung ebenfalls mitberücksichtigt. Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Ereignisstart war ca. 50 %. Um ca. 10:00 Uhr wurde der Zulauf zur ARA kurz gedrosselt, wodurch ein kurzer Abfall der Durchflussrate entstand.

Tabelle 4-22: Entleerungsreignis am 2017-06-08 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte Mögliche Frachtbereiche			Autom. Methode		Referenz-Methode	
	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Fracht	Konzentr.
Q= f(ΔQ)	865	6 260	11 600	5 780	-	-	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	10 900	-	12 800	-
CSB	-4 930	493	6 670	66	6	5 680	444
BSB₅	-2 100	333	3 300	403	37	3 290	258
AFS	-2 750	353	3 440	174	16	2 200	172
NH₄-N	119	1 050	1 910	467	43	-	-

4. Ergebnisse und Diskussion

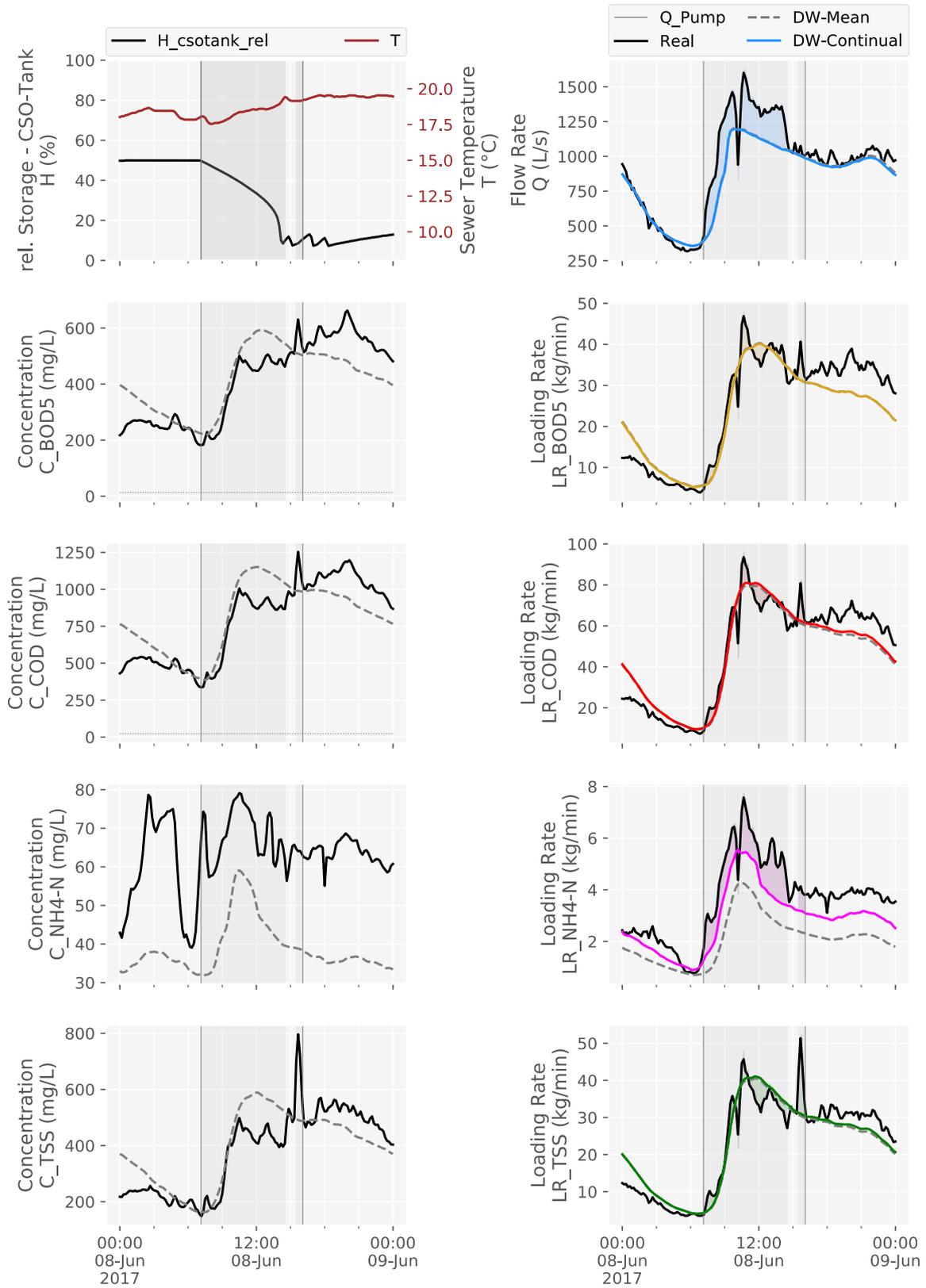


Abbildung 4-19: Entleerungsereignis am 2017-06-08

4.5 Ergebnisse der Fremdwasseranalyse

In Abhängigkeit des Wasserstandes in der Mur und der Niederschlagssumme einer Messstation in Graz wurde eine Fremdwasseranalyse durchgeführt.

Verglichen wurden diese Werte mit dem minimalen Abwasserzulauf zur ARA Graz, über den der Fremdwasseranfall im Kanalnetz abgeschätzt werden kann (siehe Abschnitt [3.4](#)).

Der Untersuchungszeitraum für diese Auswertung umfasste den Zeitraum zwischen Dezember 2013 und September 2017. Dies wurde durch die lange Verfügbarkeit des Durchflussmengenmesssignals der ARA Graz-Gössendorf möglich.

In [Abbildung 4-20](#) sind alle gemessenen täglichen Nachtminima im Zulauf zur ARA Graz zum einen dem Wasserspiegel in der Mur und zum anderen den täglichen Niederschlagstagesummen der Niederschlagsmessstation Graz-Prochaskagasse gegenübergestellt. Obwohl über die vier Jahre hinweg betrachtet zumeist Spitzen Mitte Februar und auch sehr streuende Minima Mitte April festzustellen sind, kann man keinen wiederkehrenden Trend in den Daten erkennen. Die Spitzen im Februar könnten auf die Schneeschmelze am Ende des Winters hinweisen, wodurch ein erhöhter Grundwasserspiegel den Fremdwasseranteil steigen ließ. Für eine bessere Darstellung wurden die enthaltenen Datenlücken durch lineares Interpolieren mit Werten befüllt und über ein 7 Tage langes Fenster geglättet (blaue Linie).

In der [Abbildung 4-21](#) sind die geglätteten Verläufe der oben genannten Signale jährlich gegenübergestellt. Im Trockenwetterverlauf kann kein saisonaler Trend bei den ARA-Zulaufdaten erkannt werden. Demgegenüber ist im Wasserstand der Mur ein eindeutiger Trend erkennbar. Dabei ist der Wasserstand in den Sommermonaten deutlich höher als in den Wintermonaten. Die Tagesniederschlagssummen sind während den Sommermonaten wesentlich höher als in den Wintermonaten.

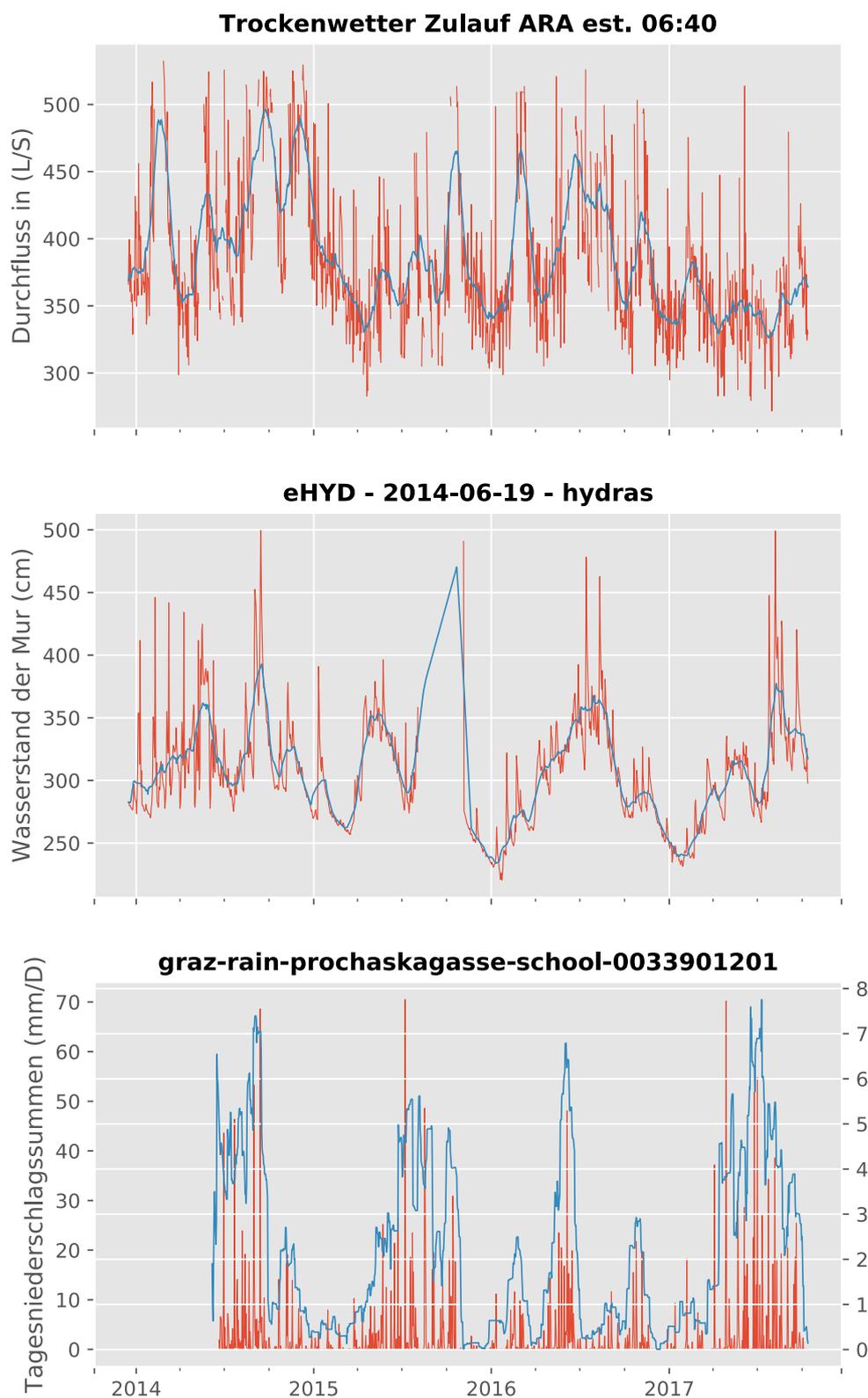


Abbildung 4-20: Fremdwasser-Analyse - Die roten Linien resultieren aus tagesbezogenen Werten. Beim Durchfluss handelt es sich um die gemessenen Tagesminima, beim Wasserstand um die Tagesmittel und beim Niederschlag um die Tagessummen. Die blauen Linien sind jeweils das rollende Mittel dieser Tageswerte über sieben Tage.

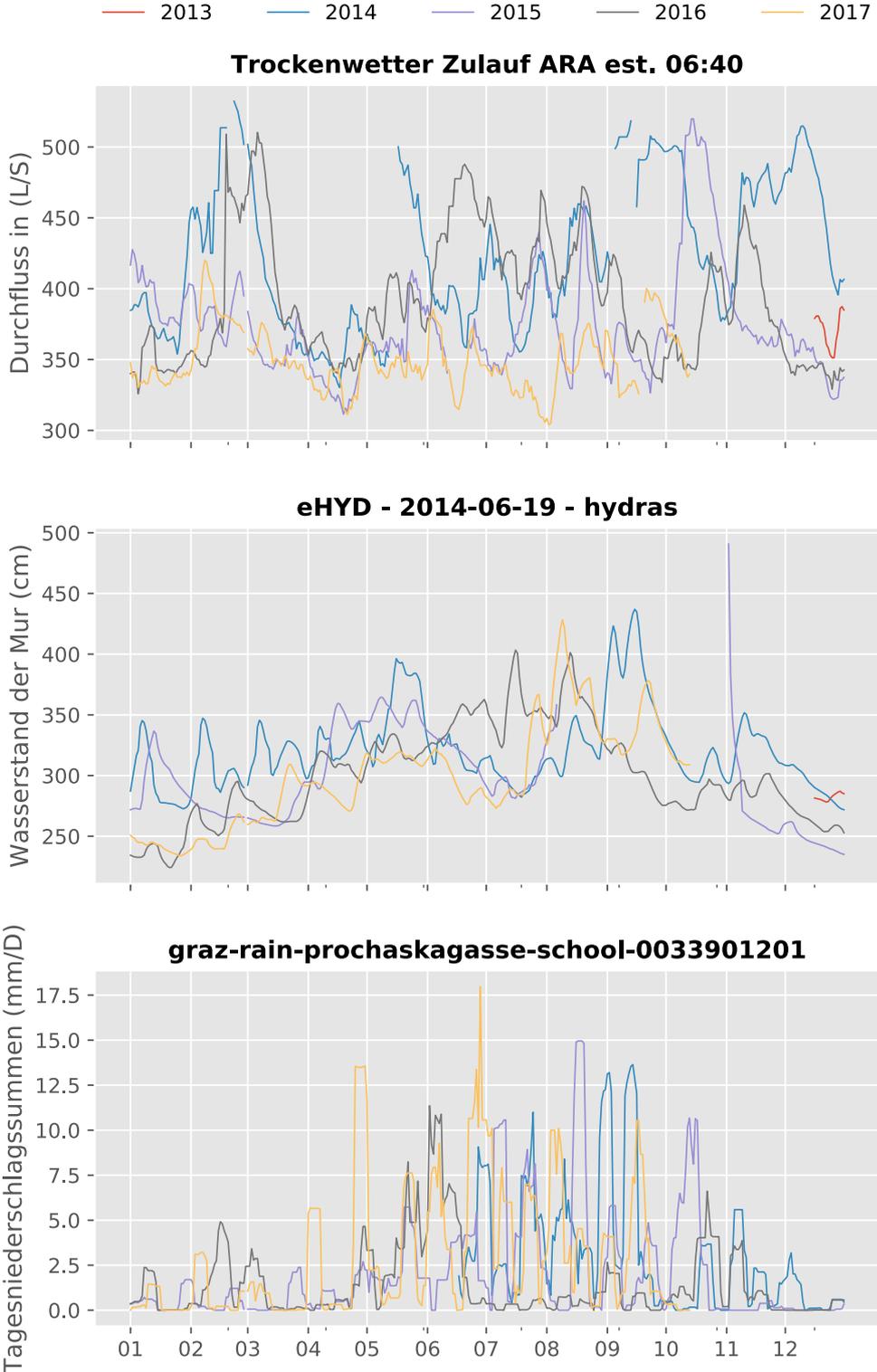


Abbildung 4-21: Fremdwasser-Analyse im jährlichen Vergleich - auf der x-Achse sind die Monate aufgetragen.

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Masterarbeit konnten die zwischen November 2016 und Juli 2017 aufgetretenen 35 Entleerungen des Zentralen Speicherkanals (ZSK) zur Abwasserreinigungsanlage (ARA) Graz-Gössendorf direkt im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf messtechnisch aufgezeichnet und mit einer im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelten Methode automatisiert erkannt und hinsichtlich ihres zusätzlichen Schmutzfrachteintrages in die ARA Graz ausgewertet werden.

Die Hauptzielsetzung dieser Masterarbeit lag bei einer weitestgehenden Automatisierung aller notwendigen Teilprozesse zur Abschätzung von Entleerungsfrachten aus dem ZSK im Zulauf zur ARA Graz-Gössendorf. Die damit erzielbaren Ergebnisse sollen entsprechend aufbereitet und mit einer bereits durchgeführten manuellen Auswertung verglichen werden.

Die Auswertung umfasst zunächst die Erstellung von typischen Tagesgängen bei Trockenwetter (TW) und deren möglicher Schwankungsbereich. Daraus können die gesamten Daten in TW-Perioden und in Regenwetterereignisse unterteilt werden. Durch das alleinige Betrachten von TW-Perioden konnte damit ein möglicher Trend für die Belastung bei TW-Bedingungen erstellt werden. Aus den ermittelten typischen TW-Tagesgängen und dem TW-Trend wurden schließlich ein künstlicher (theoretischer), durchgehender TW-Verlauf als TW-Kontinuum generiert, welcher nicht nur tageszeit- und wochentagsabhängige Unterschiede, sondern auch jahreszeitliche Veränderungen berücksichtigt.

Die automatisierte Ereigniserkennung für ZSK-Entleerungen basiert aufgrund der aktuellen ZSK-Betriebsweise bei der Entleerung auf der Wasserhöhenstandsmessung des Mischwasserüberlaufbeckens MÜB bei der ARA. Die durch die ZSK-Entleerungen entstehenden zusätzlichen Stofffrachten im Zulauf zur ARA Graz werden dann aus der Differenz zwischen der real gemessenen Frachtrate und dem ermittelten TW-Kontinuum über die Entleerungszeit hinweg berechnet, wobei im Zuge der Entleerung auftretende Abflussspitzen aus dem Kanalnetz bei den Frachtabschätzungen nicht berücksichtigt werden.

Darüber hinaus können aus den Auswertungen auch Jahrestrends für den TW-Verlauf sowie auch Fremdwasserabschätzungen während der Nachtminima abgeleitet und untersucht werden.

5. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Die damit im Entleerungsvolumen abschätzbaren, durchschnittlichen CSB-Konzentrationen lagen bei Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zwischen 40 und 560 mg/L, wobei drei abgeschätzte CSB-Konzentrationen sogar negative Werte ergeben hatten und damit mit 0 mg/L bewertet wurden. Diese unrealistisch kleinen Konzentrationen, ergeben sich aus einem zu hoch angenommenen TW-Kontinuum. Mit 600 und 620 mg/L gab es auch zwei CSB-Ausreißer-Konzentrationen nach oben.

Einer davon kann auf die Nichtlinearität des Zusammenhangs zwischen Wasserhöhenstand im MÜB und dem entleerten Volumen zurückgeführt werden, was eine Grundannahme für diese Auswertung war. Der Grund dafür ist, dass durch das erforderliche Gefälle im ZSK und im MÜB ein trichterförmiges Entleerungsvolumen entsteht. Dieselbe Höhenstandsabnahme entspricht damit bei vollem MÜB mehr Entleerungsvolumen, als dies bei einem teilgefüllten MÜB der Fall ist. Das daraus berechnete Volumen wurde daher unterschätzt und damit die abgeschätzte, mittlere Entleerungskonzentration überschätzt.

Der zweite Ausreißer wurde durch ein sehr kurzes Starkregenereignis verursacht, wobei sich hier der „first-flush“- und „last-flush“-Effekt vermutlich überschneiden haben. Dadurch ergab sich eine sehr hohe Ereignis-Konzentration. Die getroffenen Aussagen zu diesen beiden Ereignissen sind ebenfalls für die beiden Parameter AFS und BSB₅ gültig. Die BSB₅-Konzentrationen variieren zwischen 20 und 280 mg/L. Dabei ist auch ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen den BSB₅-, CSB- und AFS-Entleerungskonzentrationen erkennbar. Der Faktor liegt beim CSB/BSB₅-Verhältnis bei 2,01 und beim CSB/AFS-Verhältnis bei 1,72.

Ein ähnlicher linearer Zusammenhang konnte beim großteils gelösten NH₄-N nicht festgestellt werden. Anstattdessen sind die NH₄-N-Ergebnisse stärker von der Saison abhängig. So ergeben sich bei diesem negative mittlere Konzentrationen für beinahe alle Ereignisse zwischen November und April. Diese negativen Konzentrationen kommen aufgrund eines zu hoch angesetzten TW-Kontinuums bei diesem Parameter zustande. Bei den ausgewerteten Ereignissen zwischen Mai und September lagen die durchschnittlichen NH₄-N-Konzentrationen zwischen 0 und 44 mg/L. Diese zu hohen Ereigniskonzentrationen werden durch ein in dieser Periode zu niedrig angesetztes TW-Kontinuum verursacht. Daher kann man beim Ammonium-Stickstoff nicht von einem jährlich leicht um ein Mittel schwankendes TW-Signal ausgehen. Hier sollte dezidiert zwischen Sommer- und Wintermonaten unterschieden werden.

Die Unterschiede in den Ergebnissen der in dieser Masterarbeit entwickelten automatisierten Methode zur Abschätzung der ZSK-Entleerungsfracht und der manuellen Methode nach Hofer *et al.* (2017) sind durch mehrere Gründe beschreibbar:

Zum einen ist die detaillierte Gruppierung der Wochen- und Feiertage (Tagesarten) in dieser Arbeit zu nennen, wohingegen die manuelle Auswertung nur zwischen Wochentagen und Wochenendtagen unterscheidet. Im Gegensatz dazu unterscheidet die automatisierte Auswertung zusätzlich noch zwischen Feiertagen, die mit den Sonntagen gleichgesetzt werden, und Samstagen, die ebenfalls separat beurteilt werden.

Zum anderen wurden die Tagesgänge bei der manuellen Auswertung in einem Zeitraum von 00:00 - 23:59 Uhr zusammengesetzt, wodurch sich eine Unstetigkeitsstelle im Verlauf zwischen Tagen unterschiedlicher Tageskategorien ergeben hat. Diese hat jedoch nur auf Ergebnisse einen Einfluss, wenn das Ereignis an Freitagen bzw. Sonntagen zwischen 0 und 3 Uhr stattgefunden hat, da die Unstetigkeit bei 0 Uhr entsteht und ab 3 Uhr die Verläufe der Tagesgänge weitestgehend identisch sind und zwar unabhängig davon, welcher Wochentag ist.

Außerdem wurde eine unterschiedliche Herangehensweise für den TW-Vergleichsverlauf verwendet. Dieser soll einen künstlichen TW-Verlauf darstellen, der entstanden wäre, wenn keine Mischwasserereignisse stattgefunden hätten. Dafür wurde bei der manuellen Referenz-Methode der Verlauf des TW-Medians so lange parallel verschoben, dass er sich möglichst gut am gemessenen Verlauf der Frachtrate vor und nach der Entleerung anpasst. Bei der automatisierten Auswertung wird zwar auch der mittlere TW-Verlauf angepasst, aber nicht parallel, sondern abhängig vom TW-Trend und ist daher über die Zeit variabel. Außerdem benötigt die automatisierte Auswertung einen validen TW-Bereich vor und nach dem Ereignis, ansonsten wird mit dem TW-Mittel verglichen, da ohne TW-Daten kein TW-Trend ermittelt werden kann und das TW-Mittel der wahrscheinlichste Verlauf ist.

Ein Beispiel hierfür ist das Ereignis am 2017-06-03, wo der Sonntag und Montag nach der Entleerung die Feiertage zu Pfingsten waren. Dadurch wurde vermutlich der künstliche TW-Verlauf bei der manuellen Auswertung stärker gesenkt, als es bei der automatisierten Auswertung der Fall war, wo der Montag als Feiertag mit geringeren Verschmutzungsraten angesetzt wurde.

Als Resümee der Arbeit lässt sich ziehen, dass eine vollständig automatisierte Auswertung nur bedingt möglich ist, da es zu viele, auch betriebliche Abhängigkeiten gibt, die nur sehr schwer alle erfasst und mitberücksichtigt werden können. So ist es zum Beispiel wichtig zu wissen, wann die abschließende Reinigungsspülung des MÜB nach einer Entleerung stattfindet, um auch die Schmutzfrachten jener Stoffe miteinzubeziehen zu können, die sich bereits abgesetzt hatten („last-flush“-Effekt).

5.2 Ausblick

Im Rahmen der Masterarbeit konnte nur ein ZSK-Teilbetrieb unter ganz speziellen Randbedingungen untersucht werden, der sich noch ganz grundsätzlich von einem ZSK-Vollbetrieb unterscheidet. Sollte sich der Betrieb mit Entleerungen des ZSK ausschließlich über das MÜB verändern, müssen auch neue Bedingungen für die Ereigniserkennung definiert werden, da damit die Ereigniserkennung und -Definition alleinig über die Wasserstandshöhenabnahme im MÜB nicht mehr funktioniert. Hierfür wurde bereits eine Schätzung des Entleerungsvolumens über das Durchflussmengenmesssignal im Zulauf zur ARA in die entwickelte Methodik implementiert, jedoch weicht diese dzt. noch relativ stark von den aktuellen Schätzungen über den Wasserhöhenstand ab. Grund dafür sind die Unsicherheiten bei der Ermittlung des TW-Kontinuums. Für eine Ereignisdefinition einer Entleerung über das Q-Signal müssten noch weitere Abhängigkeiten untersucht und miteinbezogen werden.

Der empfindlichste Parameter für die Abschätzung von Entleerungsfrachten ist das TW-Level, der die lokale Anpassung des Vergleichsverlaufs regelt. Daher sollte bei einer Erweiterung der Methodik besonders auf dessen Sensitivität Rücksicht genommen werden.

Eine weitere Verbesserung ließe das Implementieren einer Füllung von Lücken über das TW-Kriterium erwarten. Dies hätte den Vorteil, dass die wiederaufgefüllten Werte stetig und abhängig vom TW-Tagesgang verlaufen würden.

Um die entwickelte Methodik noch stabiler automatisieren zu können, könnte der optimale Zeitpunkt, zu dem die Tagesgänge miteinander verknüpft werden, berechnet und optimiert werden. Die zu minimierende Bedingung wäre der Abstand des TW-Mittels der unterschiedlichen Tageskategorien zueinander, sowie eine möglichst gleiche TW-Variation. Dieser Punkt liegt wahrscheinlich im Bereich des Nachtminimums.

Die Entscheidung der ARA Graz die im Zuge des ZSK-MONITORING-Projektes installierten Sensoren zur Abschätzung von Entleerungsfrachten aus dem ZSK weiter betreiben zu wollen, lässt eine Ausweitung der Datenbasis für zukünftige Auswertungen erwarten, wodurch sich auch die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der in der Masterarbeit entwickelten Methodik weiter verbessern wird.

Nachdem der Ansaugpunkt für die ARA-Zulauf-Messstation im Herbst 2017 für einen Dauerbetrieb der Messstation noch einmal verändert worden ist, sollten dafür die Messdaten vor und nach diesen Umbauarbeiten auf jeden Fall auf Konsistenz und Vergleichbarkeit überprüft werden. Die durchgeführten Änderungen betreffen sowohl den Ansaugpunkt als auch die Leitungslänge zwischen diesem Punkt und der Bypass-Wanne.

Literaturverzeichnis

- ATV-DVWK (2003). *Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 - Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*. Hennef, Germany: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Barco, J., Papiri, S. & Stenstrom, M. K. (2008). „First flush in a combined sewer system“. In: *Chemosphere* 71.5, S. 827–833. DOI: [10 . 1016 / j . chemosphere.2007.11.049](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.049). URL: <http://www.wos.org/doi/abs/10.1016/j.chemosphere.2007.11.049>.
- Bier, A. (1. Feb. 2010). *Einführung in die Ionenselektive Messung*. Broschüre. URL: <https://de.hach.com/asset-get.download.jsa?id=25593611952>.
- Camhy, D., Gamerith, V., Steffelbauer, D., Muschalla, D. & Gruber, G. (2012). „Scientific Data Management with Open Source Tools – An Urban Drainage Example“. In: *9th International Conference on Urban Drainage Modelling (UDM)*. Hrsg. von J. Plavšić. Belgrade, Serbia: Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade.
- Caradot, N., Sonnenberg, H., Rouault, P., Gruber, G., Hofer, T., Torres, A., Pesci, M. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2015). „Influence of local calibration on the quality of online wet weather discharge monitoring: feedback from five international case studies“. In: *Water Science and Technology* 71.1, S. 45–51. ISSN: 0273-1223, 1996-9732. DOI: [10.2166/wst.2014.465](https://doi.org/10.2166/wst.2014.465). URL: <http://wst.iwaponline.com/content/71/1/45> (besucht am 23. 03. 2016).
- DWA-M 151 (2014). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Merkblatt DWA-M 151 - Messdatenmanagementsysteme (MDMS) in Entwässerungssystemen.
- DWA-M 181 (2011). DWA-M 181. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Merkblatt DWA-M 181 - Messung von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen.
- Fischler, M. A., Sri International Menlo Park Ca Artificial Intelligence Center & Bolles, R. C. (1980). *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. SRI International. 40 S.
- Fox, J. & Weisberg, S. (2011). *An R Companion to Applied Regression*. SAGE Publications. 473 S. ISBN: 978-1-4129-7514-8.
- (2013). *Robust Regression*. URL: <http://users.stat.umn.edu/~sandy/courses/8053/handouts/robust.pdf> (besucht am 01. 03. 2018).
- Fuchs-Hanusch, D., Gruber, G. & Kauch, E. P. (2014). *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft*. 6. überarbeitete Auflage. Wien, Österreich.: MANZ Verlag Schulbuch GmbH. 379 S. ISBN: 978-3-7068-4688-2.

- Generalized Linear Models* (2018). scikit-learn.org. URL: http://scikit-learn.org/stable/modules/linear_model.html (besucht am 01.03.2018).
- Gujer, W. (2. Juli 2013). *Siedlungswasserwirtschaft*. Springer-Verlag. 412 S. ISBN: 978-3-662-12991-3.
- Hach-Lange GmbH (2017). *AN-ISE sc Sensor AISE sc Sensor NISE sc Sensor - Betriebsanleitung*. URL: <https://de.hach.com/asset-get.download.jsa?id=25593622175> (besucht am 18.02.2018).
- Hochedlinger, M. (2005). *Assessment of Combined Sewer Overflow Emissions*. Hrsg. von H. Kainz. Bd. 44. 44. Graz, Austria: Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau. 275 S. ISBN: 3-85444-044-8.
- Hofer, T. (2012). *Validierung, Charakterisierung und Klassifizierung von Mischwasserereignissen für das Einzugsgebiet Graz-West R05*. Graz, Austria: Master Thesis, Graz University of Technology. 143 S.
- Hofer, T., Maier, R., Gamerith, V. & Gruber, G. (2015). *Projekt iZSK - Gemeinsame Betrachtung der Emissionen aus dem System Zentraler Speicherkanal und Kläranlage Graz durch integrierte Modellierung (Endbericht)*. Graz, Austria: Graz University of Technology.
- Hofer, T., Gruber, G. & Muschalla, D. (2017). „Quantifizierung der Schmutzfrachtdynamik des Zentralen Speicherkanals ZSK bei Mischwasserereignissen im Zulauf zur Kläranlage Graz“. In: *Aqua Urbanica 2017 - Urbanes Niederschlagswassermanagement zwischen zentralen und dezentralen Maßnahmen*. Aqua Urbanica 2017. Graz, Austria: TU Graz, S. 16.
- InfluxDB* (2018). InfluxData. URL: <https://www.influxdata.com/time-series-platform/influxdb/> (besucht am 14.03.2018).
- Kainz, H., Sprung, W., Maurer, G., Pirkner, W., Gamerith, V. & Gruber, G. (2011). „Speicherkanäle für die Mischwasserbewirtschaftung in Graz“. In: *Aqua Urbanica 2011*. Graz, Austria, S. 44.
- Lepot, M., Torres, A., Hofer, T., Caradot, N., Gruber, G., Aubin, J.-B. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2016). „Calibration of UV/Vis spectrophotometers: A review and comparison of different methods to estimate TSS and total and dissolved COD concentrations in sewers, WWTPs and rivers“. In: *Water Research* 101, S. 519–534. ISSN: 0043-1354. DOI: [10.1016/j.watres.2016.05.070](https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.070).
- Mahalanobis, P. C. (1936). „On the generalized distance in statistics“. In: *Proceedings of the National Institute of Science of India*. Vol. 2, Nr. 1: National Institute of Science of India, S. 49–55.
- Metadier, M. & Bertrand-Krajewski, J. (2011). „Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm events loads in combined sewer systems“. In: *Water Science and Technology* 63.12, S. 2983–2991. ISSN: 0273-1223. DOI: [10.2166/wst.2011.185](https://doi.org/10.2166/wst.2011.185).

- Nadaraya, (1965). „On Non-Parametric Estimates of Density Functions and Regression Curves“. In: *Theory of Probability & Its Applications* 10.1, S. 186–190. ISSN: 0040-585X. DOI: [10.1137/1110024](https://doi.org/10.1137/1110024), URL: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/1110024> (besucht am 10.03.2018).
- OEWAV (2007a). *ÖWAV - Regelblatt 19 - Richtlinien für die Bemessung von Mischwasserentlastungen*. Wien, Österreich: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. 47 S.
- (2007b). *ÖWAV - Regelblatt 38 - Überprüfung stationärer Durchflussmess-einrichtungen auf Abwasserreinigungsanlagen*. Vienna, Austria: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. 72 S.
- (2008). *ÖWAV - Regelblatt 9 - Richtlinien für die Anwendung der Entwässerungsverfahren*. Viena, Austria: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.
- (2009). *ÖWAV - Regelblatt 11 - Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen*. Wien, Österreich: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. 97 S.
- Parzen, E. (1962). „On Estimation of a Probability Density Function and Mode“. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 33.3, S. 1065–1076. ISSN: 0003-4851, 2168-8990. DOI: [10.1214/aoms/1177704472](https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472), URL: <https://projecteuclid.org/euclid.aoms/1177704472> (besucht am 10.03.2018).
- Pointl, M. (2017). *Operational behaviour of UV-VIS spectrometer probes exposed to alternating conditions in the Central Storage Tunnel CST in Graz, Austria*. Graz, Austria: Master Thesis, Graz University of Technology. 198 S.
- Qian, L. (2017). *Skriptum Wahrscheinlichkeit und Statistik*. Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz.
- Random sample consensus* (2018). Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_sample_consensus&oldid=827766640 (besucht am 01.03.2018).
- Robust Models* (2018). statsmodels.org. URL: http://www.statsmodels.org/stable/examples/notebooks/generated/robust_models_1.html (besucht am 01.03.2018).
- Rohler, H. (1997). *Konzeption und Einsatz ionenselektiver Bohrlochmesssonden*. Kassel University Press. 99 S. ISBN: 978-3-933146-03-8. URL: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-933146-03-8.volltext.frei.pdf> (besucht am 21.02.2018).
- Rousseeuw, P. J. & Croux, C. (1993). „Alternatives to the Median Absolute Deviation“. In: *JOURNAL- AMERICAN STATISTICAL ASSOCIATION* 88.424. OCLC: 203723922, S. 1273. ISSN: 0162-1459.
- Rousseeuw, P. J. & Leroy, A. M. (2003). *Robust Regression and Outlier Detection*. John Wiley & Sons. 358 S. ISBN: 978-0-471-48855-2.

- Rousseeuw, P. J., Ruts, I. & Tukey, J. W. (1. Nov. 1999). „The Bagplot: A Bivariate Boxplot“. In: *The American Statistician* 53.4, S. 382–387. ISSN: 0003-1305. DOI: [10.1080/00031305.1999.10474494](https://doi.org/10.1080/00031305.1999.10474494). URL: <http://amstat.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00031305.1999.10474494> (besucht am 25.11.2016).
- s::can GmbH (2013). „Anwendungen Abwasser“. Broschüre - Ausgabe 2013-05. URL: http://v005033.vhost-vweb-02.sil.at/medialibrary/pdf/d_App_WW_influent_effl_2013.pdf (besucht am 20.02.2018).
- (2015). *Wasserqualität OnLine; Abwasser*. Broschüre - Ausgabe 2015-03. URL: http://www.s-can.at/images/service/downloads/catalogs/catalog_wastewater_DE_web.pdf (besucht am 20.02.2018).
- Scott, D. W. (2015). *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. John Wiley & Sons. 381 S. ISBN: 978-1-118-57548-2.
- Steger, B. (2011). *Validierung und Einfluss unterschiedlicher UV/VIS-Spektrometer-Kalibrierungsmodelle auf die Schmutzfrachtmodellierung des Teileinzugsgebietes Graz West*. Graz, Austria: Master Thesis, Graz University of Technology.
- Umezawa, Y., Bühlmann, P., Umezawa, K., Tohda, K. & Amemiya, S. (2009). „Potentiometric Selectivity Coefficients of Ion-Selective Electrodes. Part I. Inorganic Cations (Technical Report)“. In: *Pure and Applied Chemistry* 72.10, S. 1851–2082. ISSN: 0033-4545. DOI: [10.1351/pac200072101851](https://doi.org/10.1351/pac200072101851). URL: <https://www.degruyter.com/view/j/pac.2000.72.issue-10/pac200072101851/pac200072101851.xml> (besucht am 21.02.2018).
- Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH (2012). *On-line Messtechnik*. URL: https://static.wtw.com/fileadmin/upload/Service/Downloads/Kataloge/Online/999105D-WTW-Onlinekatalog_2012-web.pdf.
- ÖNORM EN 752 (2008). *Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden*. Wien, Österreich: Österreichisches Normungsinstitut (ON).

Anhang A Python-Code

Für Informationen zu Funktionen, die aus dem institutsinternen Paket `sww` stammen, siehe Camhy *et al.* (2012).

A.1 Datenaufbereitung

Nachbearbeitung der Messdaten

Angewandt in Methodik siehe Abschnitt 3.1.4.

```

1 def fill_data(_data, limit=pd.Timedelta(hours=4), method='linear'):
2     """
3     fill data in a time-linear way
4     :param _data: _pandas.DataFrame_ validated data
5     :param limit: _pandas.Timedelta_ filling limit
6     :param method: _str_ {'linear', 'spline'}
7     :return: _pandas.DataFrame_ filled data
8     """
9     data = _data.copy()
10    freq = guess_freq(data.index, to_str=False,
11                      default=pd.Timedelta(minutes=1))
12    data = data.asfreq(freq)
13    limit = int(limit/freq.delta)
14
15    # -----
16    # source = "https://stackoverflow.com/a/30538371"
17    # fill gaps with a size less the the given limit
18    # default interpolate function fills gaps up to the limit
19    mask = data.copy()
20    grp = ((mask.notnull() != mask.shift().notnull()).cumsum())
21    grp['ones'] = 1
22    for i in data.columns:
23        mask[i] = (grp.groupby(i)['ones'].transform('count') < limit) |
24                  data[i].notnull()
25
26    # -----
27
28    if method == 'linear':
29        return data.interpolate('linear')[mask]
30    elif method == 'spline':
31        return data.interpolate('spline', order=3)[mask]

```

Listing A-1: Daten Füllen

```
1 data = data.rolling(5, min_periods=1, center=True).median()
2 data = data.rolling(5, min_periods=1, center=True).mean()
```

Listing A-2: Daten Glätten

A.2 Trockenwetter-Mittel

Angewandt in Methodik siehe Abschnitt [3.2.1.1](#).

Robustes Mittel

```
1 from scipy.stats import gaussian_kde
2 def robust_mean(ts):
3     a = ts.dropna().values
4     densities = gaussian_kde(a).evaluate(a)
5     return a[np.argmax(densities)]
```

Listing A-3: Robustes Mittel

A.3 Trockenwetter-Variation

Angewandt in Methodik siehe Abschnitt [3.2.1.2](#).

modMAD

```
1 def mad(variation):
2     """
3     median absolute deviation
4     :param variation: _np.array_ = values - mean_of_values
5     :return:
6     """
7     return np.median(np.abs(variation))
```

Listing A-4: modMAD

```
1 def split_mad(variation):
2     """
3     calculate split median absolute deviation
```

```

4     median deviation split for values above and below the mean value
5     :param variation: _np.array_ = values - mean_of_values
6     :return:
7     """
8     return np.abs(np.median(variation[variation > 0])),
           np.abs(np.median(variation[variation < 0]))

```

Listing A-5: asymmetrischer modMAD

A.4 Stabilität der Berechnung der Trockenwetter-Tagesgang Parameter

Angewandt in Methodik siehe Abschnitt [3.2.1.3](#)

```

1 def mean_calc_analysis(ts, kind=1, var=False):
2     time_dist = pd.DataFrame()
3     groups = ts.groupby([what_day(ts.index), ts.index.time]) #
4         .apply(show_distribution)
5     for g in groups.groups:
6         day, time = g # s.name
7         if time.minute != 0:
8             continue
9         check()
10        series = groups.get_group(g)
11        s = series.replace(0, np.NaN).dropna()
12
13        # hour = time.hour
14        # label = '{}-{}h'.format(day, hour)
15
16        new_dist = pd.Series(index=range(len(s)))
17        # new_dist.name = label
18
19        all_mean = dry_mean(s, kind)
20
21        if var:
22            all_var = dry_variation(s, kind, mean=all_mean)
23
24        for n in range(5):
25            news = s.sample(frac=1, random_state=n).reset_index(drop=True)
26
27            for i in np.arange(5, len(s), 2):
28                x = news.iloc[0:i]
29                m = dry_mean(x, kind)
30                if var:
31                    v = dry_variation(x, kind, mean=m)
32                    new_dist.iloc[i] = v / all_var * 100

```

```
32     else:
33         new_dist.iloc[i] = m/all_mean * 100
34
35         time_dist = pd.concat([time_dist, new_dist], axis=1)
36
37     # ax = time_dist.plot( legend=False, color='b', alpha=0.2)
38     ranges = time_dist.quantile([0.995, 0.975, 0.95, 0.05, 0.025, 0.005],
39                                 axis=1).T
40     ranges = ranges.rolling(4, min_periods=1,
41                             center=True).median().rolling(5, min_periods=1, center=True).mean()
```

Listing A-6: Stabilität der Berechnung der TW-Parameter

A.5 Trockenwetter-Kriterium

Angewandt in Methodik siehe Abschnitt [3.2.2](#).

```
1 def calc_criterion(_array, kind, time_stamp, limit=1):
2     dry_mean = _calc_dry_mean(_array, kind=kind)
3     diff = _array - dry_mean
4     upper_var, lower_var = calc_dry_variation_split(diff, kind=kind,
5                                                     time_stamp=time_stamp)
6     lower = diff < 0
7     upper = diff > 0
8     crit = diff.copy()
9     crit[lower] = crit[lower] / lower_var
10    crit[upper] = crit[upper] / upper_var
11    return crit * 100 / limit
```

Listing A-7: Trockenwetter Kriterium

Trockenwetter-Perioden

```
1 def get_dry_weather_bool(criterion, extra_range=pd.Timedelta(hours=4),
2                           min_rain_period=pd.Timedelta(hours=1)):
3     """
4     mark dry weather periods with True and everything else False
5     :param criterion: _pd.Series_ dry-weather criterion (<100 =
6     DW-conditions)
7     :param extra_range: _Timedelta_ extra time between a dry period and wet
8     weather (no more influence)
9     :param min_rain_period: _Timedelta_ minimum period to count as an
10    rain-event
```

```

7  :return: _pd.Series_ with _bool_ condition of DW-period
8  """
9  # it is only a rain event when it rains longer than "min_rain_period"
10 # ww -> Wet Weather
11 ww_period_table = span_table(criterion.index, span_bool=criterion >
    100, min_span=min_rain_period)
12
13 # combine close events
14 ww_period_table['new_index'] = (ww_period_table['start'] -
    ww_period_table['end']).shift() > extra_range
15 ww_period_table['new_index'] = ww_period_table['new_index'].cumsum() + 1
16 ww_period_table = ww_period_table.groupby('new_index').agg({'start':
    'min', 'end': 'max'})
17 ww_period_table.reset_index(drop=True, inplace=True)
18
19 # extend rain events
20 ww_period_table['start'] -= extra_range
21 ww_period_table['end'] += extra_range
22
23 ww_period_table['start'] =
    ww_period_table['start'].clip(lower=criterion.index[0])
24 ww_period_table['end'] =
    ww_period_table['end'].clip(upper=criterion.index[-1])
25
26 # make dry period bool series
27 dry_weather_bool = pd.Series(index=criterion.index, data=0)
28 dry_weather_bool[ww_period_table['start']] = 1
29 dry_weather_bool[ww_period_table['end']] = -1
30 return dry_weather_bool.cumsum() == 0

```

Listing A-8: Trockenwetterperioden-Detektion

Trockenwetter-Level

```

1  criterion = get_criterion(limit=self.limit)
2  dry_weather_bool = get_dry_weather_bool(criterion)
3
4  criterion[~dry_weather_bool | (criterion > 100)] = np.NaN
5  criterion_level = criterion.interpolate()

```

Listing A-9: Trockenwetter Level

A.6 Ereignisdetektion

Mischwasserereignis

```
1 def mark_rain_event(criterion, dry_weather_marker, rain_event_marker):
2     """
3     mark rain events
4     :param criterion: _pandas.Series_ criterion of a rain event_analysis
5     :param dry_weather_marker:
6     :param rain_event_marker:
7     :return: _pandas.Series_ marked events
8     """
9     rain_event_criterion = criterion > 100
10
11     if isinstance(dry_weather_marker, pd.Series):
12         filled = dry_weather_marker.copy()
13     else:
14         filled = pd.Series(index=criterion.index, data=dry_weather_marker)
15
16     if isinstance(rain_event_marker, pd.Series):
17         filled.loc[rain_event_criterion] =
18             rain_event_marker[rain_event_criterion]
19     else:
20         filled.loc[rain_event_criterion] = rain_event_marker
21
22     filled.name = 'FILLED'
23     return filled
```

Listing A-10: Zeitbereich eines Niederschlagsereignis markieren

Mit `combine_event` lassen sich einzelne Ereignisse, die näher als `new_event_after` zusammen liegen, kombinieren. Die Funktion `span_table` erstellt aus durchgehenden TRUE Einträgen einen Ereigniseintrag in der Ergebnistabelle.

```
1 def storm_event_table(criterion, new_event_after=pd.Timedelta(hours=4),
2                       min_event_duration=pd.Timedelta(hours=1)):
3     """
4     make a table with all rain events
5     :param criterion: _pandas.Series_ criterion of a rain event_analysis
6     :param new_event_after: _Timedelta_ combine events which are closer to
7     each other
8     :param min_event_duration: _Timedelta_ remove events which are shorter
9     :return: _pandas.DataFrame_ columns(start, end, delta, count{combined
10     events})
```

```

8     """
9     event_bool = mark_storm_event(criterion, dry_weather_marker=False,
10                                rain_event_marker=True).values
11     event_table = span_table(criterion.index, span_bool=event_bool,
12                              min_span=min_event_duration)
13     event_table = combine_events(event_table,
14                                 new_event_after=new_event_after)
15     return event_table[[START, END]]

```

Listing A-11: Niederschlagsereignis Tabelle

Entleerungsereignis des ZSK

```

1  def emptying_event_table(criterion, rel_storage, flow, flow_reference,
2                          concentration, concentration_reference,
3                          new_event_after=pd.Timedelta(hours=6),
4                          min_event_duration=pd.Timedelta(minutes=30),
5                          max_slope=0.01, # 0.05
6                          min_discharge_dur_minutes=15,
7                          follow_up_time=pd.Timedelta(minutes=15),
8                          max_flow_diff=500,
9                          criterion_max_limit=150):
10     """
11     Event table sorted by storm event_analysis. Every storm event_analysis
12     has inside discharge events.
13     :param criterion: _pandas.Series_ criterion of a rain event_analysis
14     (0=dry_mean; +-100=dry_border)
15     :param rel_storage: _pandas.Series_ of the relative storage of the cso
16     tank in (%)
17     :param flow: _pandas.Series_ in (L/s)
18     :param flow_reference: _pandas.Series_ dry mean of the flow in (L/s)
19     :param concentration: _pandas.Series_ concentration or load_rate of
20     representative parameter
21     :param concentration_reference: _pandas.Series_ reference (i.e. mean)
22     concentration or load_rate of representative parameter
23     :param new_event_after: _Timedelta_ minimum duration between events (if
24     it is less, they will get combined)
25     :param min_event_duration: _Timedelta_ minimum duration of constant
26     fulfillment of the criterion to get recognized
27     :param max_slope: _int_ maximum slope in (%/min)
28     :param min_discharge_dur_minutes: _int_ minimum duration in (min) of
29     observed slope window
30     :param follow_up_time: _Timedelta_ considered duration after the
31     detected event_analysis for the data_analysis
32     :param max_flow_diff: _int_ maximum difference of flow and flow_mean -
33     describes the pumping flow in (L/s)

```

A. Python-Code

```
24 :param criterion_max_limit: _int_ maximum dw-criterion for
    concentration peak after emptying
25 :return: _pd.DataFrame_ table of events
26 """
27
28 h_bool = rel_storage.diff(min_discharge_dur_minutes) <
    (min_discharge_dur_minutes * -max_slope)
29 q_limit_bool = (flow - flow_reference) < max_flow_diff
30 event_bool = h_bool & q_limit_bool
31
32 event_table = span_table(event_bool.index, span_bool=event_bool,
    min_span=min_event_duration)
33
34 c_bool = (concentration > concentration_reference) & (criterion <
    criterion_max_limit)
35 c_table = span_table(c_bool.index, span_bool=c_bool,
    min_span=min_event_duration/3)
36
37 event_table['new_index'] = (event_table[START] -
    event_table[END].shift()) > new_event_after
38 event_table['new_index'] = event_table['new_index'].cumsum() + 1
39
40 def _combine(e):
41     start, end = e[START].min(), e[END].max()
42
43     h = rel_storage[start:end]
44     h_max = h.max()
45     h_min = h.min()
46     delta_h_abs = h_max - h_min
47
48     if (h.max() <= 25) | ((h_max - h_min) <= 18):
49         return pd.Series(index=[START, END, SUB_EVENTS])
50
51     c_sub_table = c_table[((c_table[START] > start) & (c_table[END] <
    (end + new_event_after)))]
52
53     sub_event_table = e[[START, END]].append(c_sub_table[[START, END]],
    ignore_index=True)
54     sub_event_table.sort_values(by=START, inplace=True)
55     sub_event_table = combine_events(sub_event_table,
    new_event_after=follow_up_time)
56     new_end = sub_event_table[END].max()
57
58     return pd.Series(index=[START, END, SUB_EVENTS], data=[start,
    new_end, [sub_event_table]])
59
60 event_table = event_table.groupby('new_index').apply(_combine)
61 event_table = event_table.dropna()
```

```
62  
63     event_table.reset_index(drop=True, inplace=True)  
64  
65     return event_table[[START, END, SUB_EVENTS]]
```

Listing A-12: Entleerungsereignis

Anhang B Umwandlungstabellen

Die Umwandlungstabellen werden als `.csv`-Dateien gespeichert, um sie einerseits unabhängig von der Plattform und dem verwendeten Programm lesbar und schreibbar gestalten.

Für das automatisierte Auslesen mit `python` wird eine Zeile, die mit einem Fragezeichen (?) beginnt, als Kommentar definiert.

Weiters steht in jeder Datei in der ersten Zeile die Umwandlungsfunktion der Daten als Kommentar.

Die Eingangsdaten für die Umrechnung werden über „x“ symbolisiert.

Alle weiteren Parameter müssen in der Tabelle mit gleichem Namen definiert werden.

In den Spalten der Tabelle stehen „sensor“, „start“, „end“ und die in der Formel benötigten Parameter. Unter „sensor“ steht die Bezeichnung des Sensors, für den die Umrechnung gilt. „start“ und „end“ grenzen den zeitlichen Gültigkeitsbereich der jeweiligen Zeile ein. Wenn kein Eintrag in der „start“ Spalte steht, gilt die Umrechnung vom Anfang der Aufzeichnung bis zum gegebenen Endzeitpunkt. Umgekehrt wenn kein Eintrag in der „end“ Spalte steht, gilt die Umrechnung bis zum Ende der Aufzeichnung.

B.1 Sensor Justierung

In diesem Beispiel wurde nur eine lineare Rückrechnung umgesetzt, um auf die Daten vor den Justierungen zu erlangen.

Der vertikale Achsabstand wird „intercept“ und die Steigung „slope“ bezeichnet.

Erste Zeile mit Umwandlungsfunktion:

```
? GLOBAL=(x+intercept)/slope
```

Bei dieser Tabelle handelt es sich um Parameter die berechnet und statisch im Sensor eingestellt wurden. Der Grund ist, um Daten vor Ort kontrollierbar und mit dem Leitsystem vergleichbar zu machen.

Tabelle B-1: Umwandlungstabelle - Rückrechnung der Justierung (Zulauf)

sensor	start	end	intercept	slope
COD_12150408	2016-05-04 14:09	2016-08-24 15:48	-221.653	1
COD_12150408	2016-08-24 15:49	2016-12-20 14:29	-4.2041	1.483
COD_12150408	2016-12-20 14:30		88.31	1.783
BOD5_12150408	2016-05-04 14:34	2016-08-24 16:35	-1.496	1
BOD5_12150408	2016-08-24 16:36	2016-12-20 14:29	43.392	1.1612
BOD5_12150408	2016-12-20 14:30		54.278	1.231
NH4-N_1588367	2016-08-30 00:00	2017-02-06 23:59	-5	1.1
NH4-N_1588367	2017-02-07 00:00	2017-04-13 07:59	-15	1.2
NH4-N_1588367	2017-04-13 08:00	2017-04-27 11:40	-32	1.3
NH4-N_1588367	2017-04-27 11:41		-10	1.1
TSS_12150408	2016-05-04 14:36	2016-08-24 16:38	-74.515	1
TSS_12150408	2016-08-24 16:36	2016-12-20 14:29	3.0488	1.7222
TSS_12150408	2016-12-20 14:30		34.756	1.609

B.2 Kalibrierung

Diese Tabelle wurde automatisiert berechnet und zwischengespeichert. Bei jeder weiteren Messkampagne muss diese Tabelle aktualisiert werden.

Erste Zeile als Umwandlungsfunktion:

? LOCAL=slope*x+intercept

Tabelle B-2: Umwandlungstabelle - Kalibrierung

sensor	start	end	slope	intercept
BOD5_12150408			1.1529	-51.5808
COD_12150408			1.7525	-92.1098
NH4-N_1588367			1.3068	-3.0811
TSS_12150408			1.7770	-6.8432

B.3 Experten Kalibrierung

Diese Tabelle wurde manuell aus Expertenwissen erstellt, da der Vergleich zwischen Sensorwerten und Laborwerten kein eindeutiges Bild zeigt.

Erste Zeile als Umwandlungsfunktion:

? LOCAL=slope*x+intercept

Tabelle B-3: Umwandlungstabelle- Experten Kalibrierung

sensor	start	end	slope	intercept
NH4-N_1588367			1.2	0

Anhang C Validierungstabellen

C.1 Ausreißertest

Tabelle C-1: Wertetabelle für Ausreißertest

(a) Station: Graz-ARA-Zulauf

min	max	name	unit	sensor	comment
0	2500	COD	mg/L	12150408	s::can
0	1200	BOD5	mg/L	12150408	s::can
0	150	NH4-N	mg/L	1588367	Hach-Lange
0	1000	TSS	mg/L	12150408	s::can
200	4000	Q	L/s	inflow	
0	3	Q	L/s	bypass	
2	7	P	bar	compressed_air	
0	40	T	°C	12150408	s::can

(b) PLS der ARA

min	max	name	unit	sensor	comment
200	4000	Q	L/s	inflow	

(c) Station: Graz-MÜB-Überlauf

min	max	name	unit	sensor	comment
0	5000	Q	L/s	wwtp_csotank_overflow	
0	1000	COD	mg/L	12150407	
0	500	BOD5	mg/L	12150407	
0	800	TSS	mg/L	12150407	

C.2 Gradiententest

Tabelle C-2: Wertetabelle für Gradiententest

(a) Station: Graz-ARA-Zulauf

slope	name	unit	sensor	comment
10	COD	mg/L	12150408	s::can
10	BOD5	mg/L	12150408	s::can
10	NH4-N	mg/L	1588367	Hach-Lange
10	TSS	mg/L	12150408	s::can

(b) PLS der ARA

slope	name	unit	sensor	comment
1000	Q	L/s	inflow	

(c) Station: Graz-MÜB-Überlauf

slope	name	unit	sensor	comment
1000	Q	L/s	wwtp_csotank_overflow	
10	COD	mg/L	12150407	s::can
10	BOD5	mg/L	12150407	s::can
10	TSS	mg/L	12150407	s::can

Anhang D Automatisierte Ereignisauswertung

Nachfolgend alle 35 automatisiert detektierten Entleerungsereignisse.

Nr.	Startzeit	Endzeit	Dauer in min	MÜB-Füllstand zu Entleerungsbeginn in %
1	2016-11-09 16:59	2016-11-09 23:47	408	86
2	2016-11-10 15:22	2016-11-10 21:10	325	50
3	2016-11-11 09:41	2016-11-11 12:34	173	31
4	2016-11-13 07:30	2016-11-13 17:58	628	62
5	2016-11-21 07:32	2016-11-21 21:30	838	65
6	2016-11-29 07:23	2016-11-29 16:22	466	48
7	2016-12-08 17:34	2016-12-08 21:49	255	40
8	2016-12-29 16:34	2016-12-29 18:43	129	32
9	2017-01-15 15:22	2017-01-15 21:56	394	44
10	2017-01-19 11:28	2017-01-19 20:06	162	30
11	2017-02-08 09:11	2017-02-09 12:30	1300	77
12	2017-02-16 11:50	2017-02-16 14:09	139	34
13	2017-02-17 23:41	2017-02-18 13:20	819	60
14	2017-03-01 05:34	2017-03-01 18:09	634	55
15	2017-03-28 11:38	2017-03-28 16:58	288	40
16	2017-04-04 23:05	2017-04-05 22:15	895	71
17	2017-04-29 00:22	2017-04-29 21:38	1080	90
18	2017-05-04 19:10	2017-05-04 22:41	211	38
19	2017-05-05 18:18	2017-05-06 10:05	667	56
20	2017-05-14 19:23	2017-05-16 03:53	1070	62
21	2017-05-23 05:49	2017-05-24 19:28	1560	88
22	2017-06-03 03:35	2017-06-04 09:21	1740	90
23	2017-06-04 23:39	2017-06-05 07:14	455	50
24	2017-06-07 07:06	2017-06-07 11:20	254	40
25	2017-06-08 07:08	2017-06-08 16:05	478	50
26	2017-06-10 13:33	2017-06-11 11:41	970	69
27	2017-06-13 07:13	2017-06-13 19:35	632	60
28	2017-06-23 17:41	2017-06-24 20:29	1210	82
29	2017-06-25 06:56	2017-06-26 23:54	1600	90
30	2017-06-29 05:02	2017-06-30 10:06	1590	83
31	2017-07-02 03:23	2017-07-02 22:45	876	87
32	2017-07-06 20:06	2017-07-07 21:36	1010	70
33	2017-07-12 03:18	2017-07-13 07:15	1190	80
34	2017-07-24 19:42	2017-07-25 21:57	1240	90
35	2017-07-28 22:56	2017-07-29 02:59	243	40

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-11-09

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Mittwoch 2016-11-09 16:59 und Mittwoch 2016-11-09 23:47 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 6.8 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 6.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2010 kg, für den BSB₅ bei 312 kg, für den AFS bei 986 kg und für den NH₄-N bei 0 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 9 320 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 216 mg/L, für den BSB₅ von 34 mg/L, für den AFS von 106 mg/L und für den NH₄-N bei 0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 85.7 %.

Tabelle D-1: Entleerungsereignis am 2016-11-09 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	8 690	12 100	15 400	10 700	-
Q=f(H)	-	-	-	9 320	-
CSB	-2 410	989	6 880	2 010	216
BSB5	-1 670	147	2 690	312	34
AFS	-1 230	555	3 420	986	106
NH4-N	-583	0	522	0	0

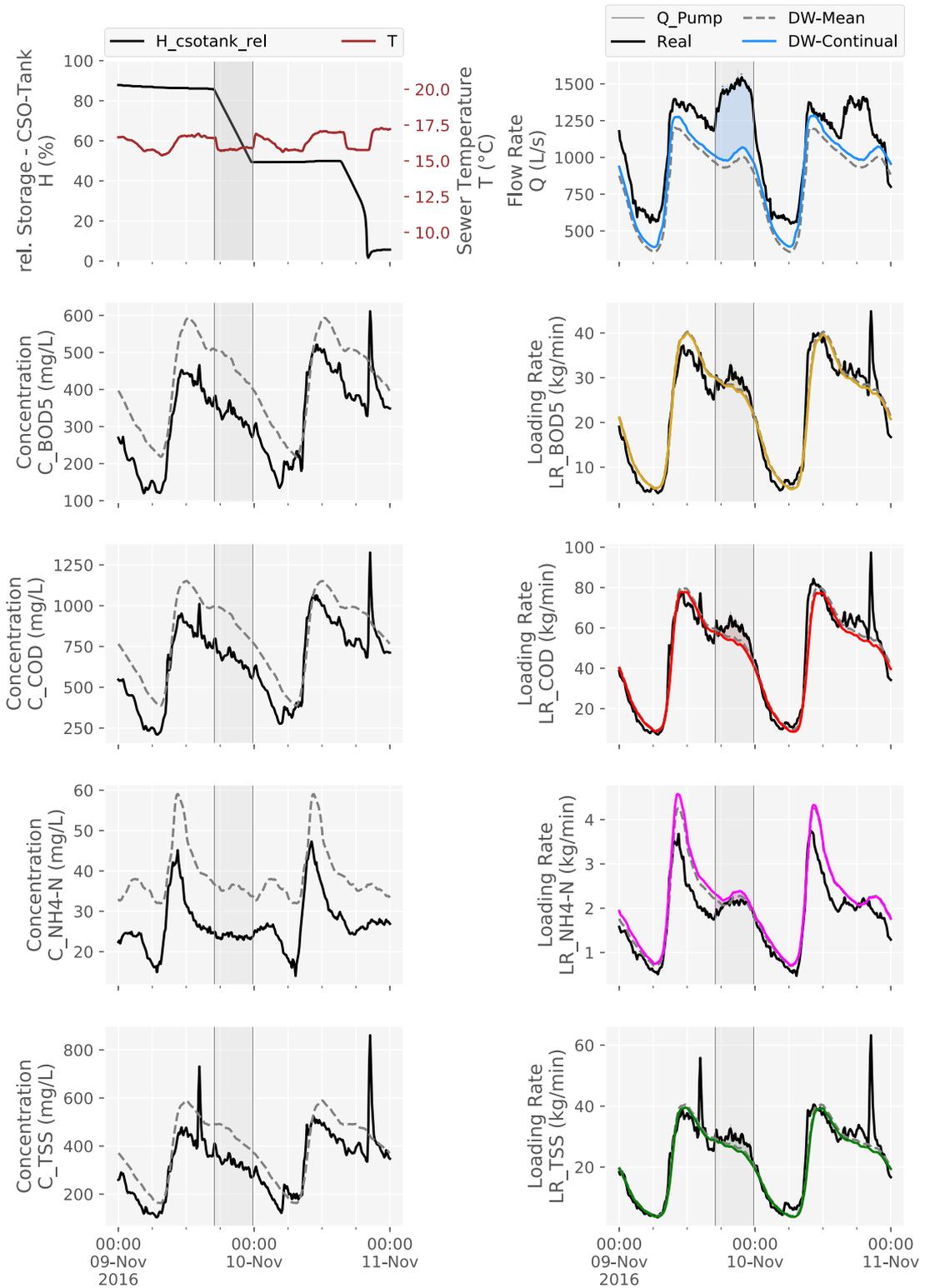


Abbildung D-1: Entleerungsereignis am 2016-11-09

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-11-10

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2016-11-10 15:22 und Donnerstag 2016-11-10 21:10 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 5.4 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 8.2 Stunden nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2080 kg, für den BSB₅ bei 508 kg, für den AFS bei 1 260 kg und für den NH₄-N bei 1 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 12 500 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 166 mg/L, für den BSB₅ von 41 mg/L, für den AFS von 101 mg/L und für den NH₄-N bei 0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 49.8 %.

Tabelle D-2: Entleerungsereignis am 2016-11-10 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	4 950	7 330	9 650	6 160	-
Q=f(H)	-	-	-	12 500	-
CSB	-1 400	1 340	5 460	2 080	166
BSB5	-1 050	298	2 150	508	41
AFS	-628	888	2 950	1 260	101
NH4-N	-475	1	402	1	0

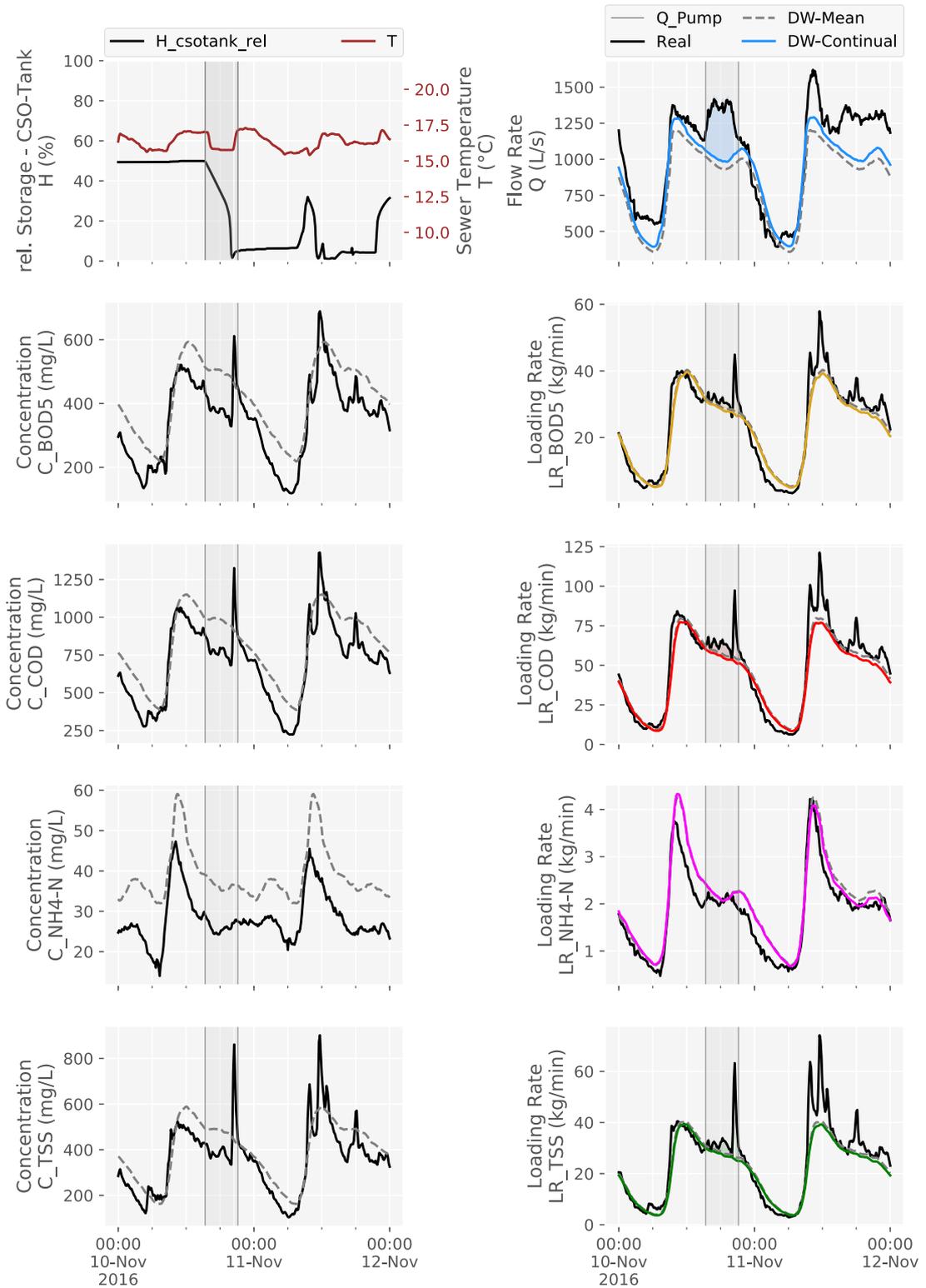


Abbildung D-2: Entleerungsereignis am 2016-11-10

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-11-11

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Freitag 2016-11-11 09:41 und Freitag 2016-11-11 12:34 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 2.9 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 12.4 Stunden nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 3 710 kg, für den BSB₅ bei 1 490 kg, für den AFS bei 2 970 kg und für den NH₄-N bei -0 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 9 880 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 375 mg/L, für den BSB₅ von 151 mg/L, für den AFS von 300 mg/L und für den NH₄-N bei -0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 31.1 %.

Tabelle D-3: Entleerungsereignis am 2016-11-11 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	980	3 050	4 910	1 870	-
Q=f(H)	-	-	-	9 880	-
CSB	921	3 070	5 690	3 710	375
BSB ₅	219	1 220	2 510	1 490	151
AFS	1 440	2 660	4 080	2 970	300
NH ₄ -N	-431	-3	309	-0	-0

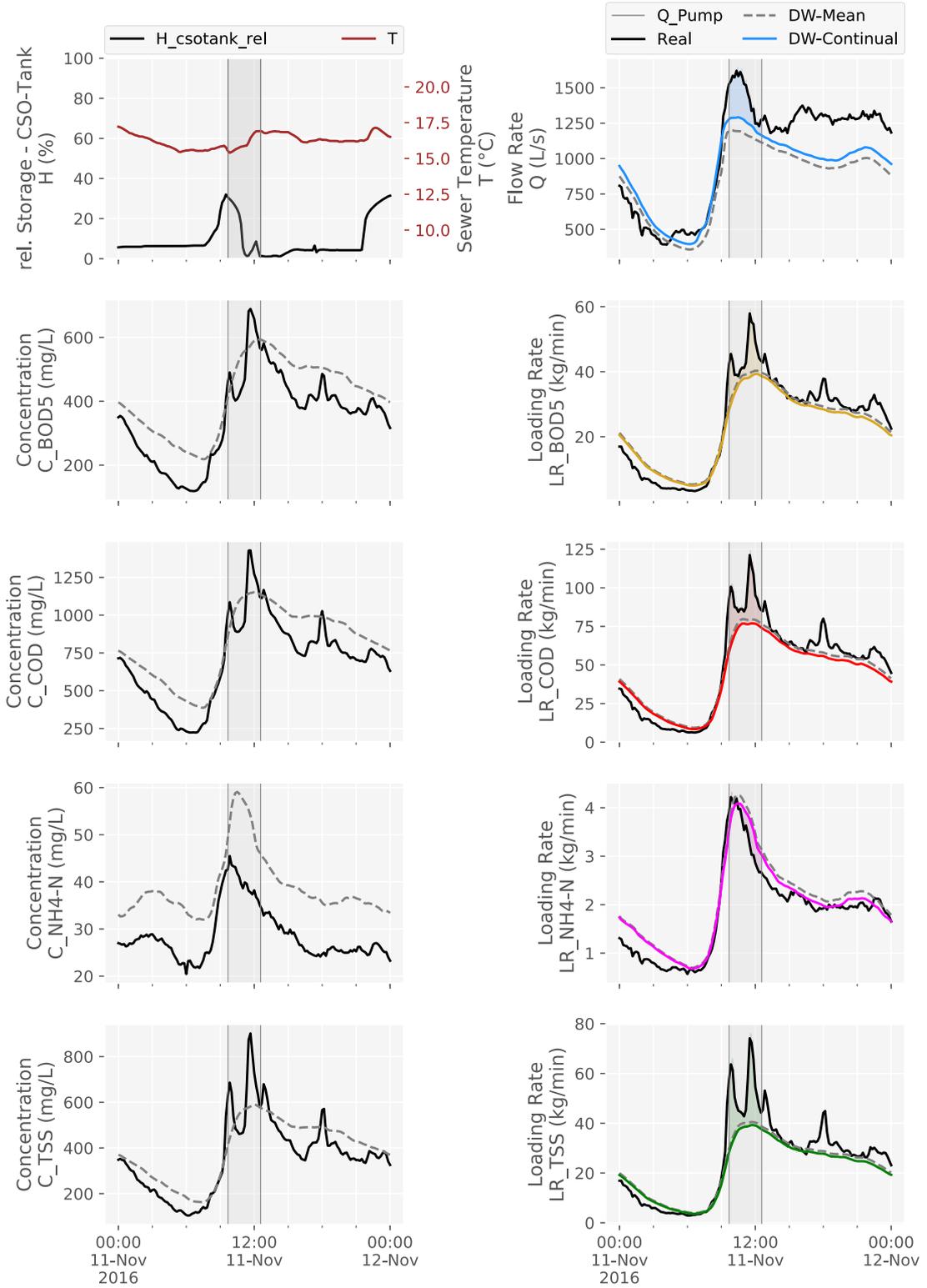


Abbildung D-3: Entleerungsereignis am 2016-11-11

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-11-13

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Sonntag 2016-11-13 07:30 und Sonntag 2016-11-13 17:58 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 10.5 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 2.0 Tage 10.2 Stunden nicht geregnet.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 4 450 kg, für den BSB₅ bei 2 120 kg, für den AFS bei 1 710 kg und für den NH₄-N bei 35 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 15 500 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 286 mg/L, für den BSB₅ von 137 mg/L, für den AFS von 110 mg/L und für den NH₄-N bei 2 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 61.7 %.

Tabelle D-4: Entleerungsereignis am 2016-11-13 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	12 000	18 400	24 400	14 500	-
Q=f(H)	-	-	-	15 500	-
CSB	-3 060	2 280	10 900	4 450	286
BSB ₅	-1 400	1 190	5 050	2 120	137
AFS	-1 870	962	5 630	1 710	110
NH ₄ -N	-640	5	725	35	2

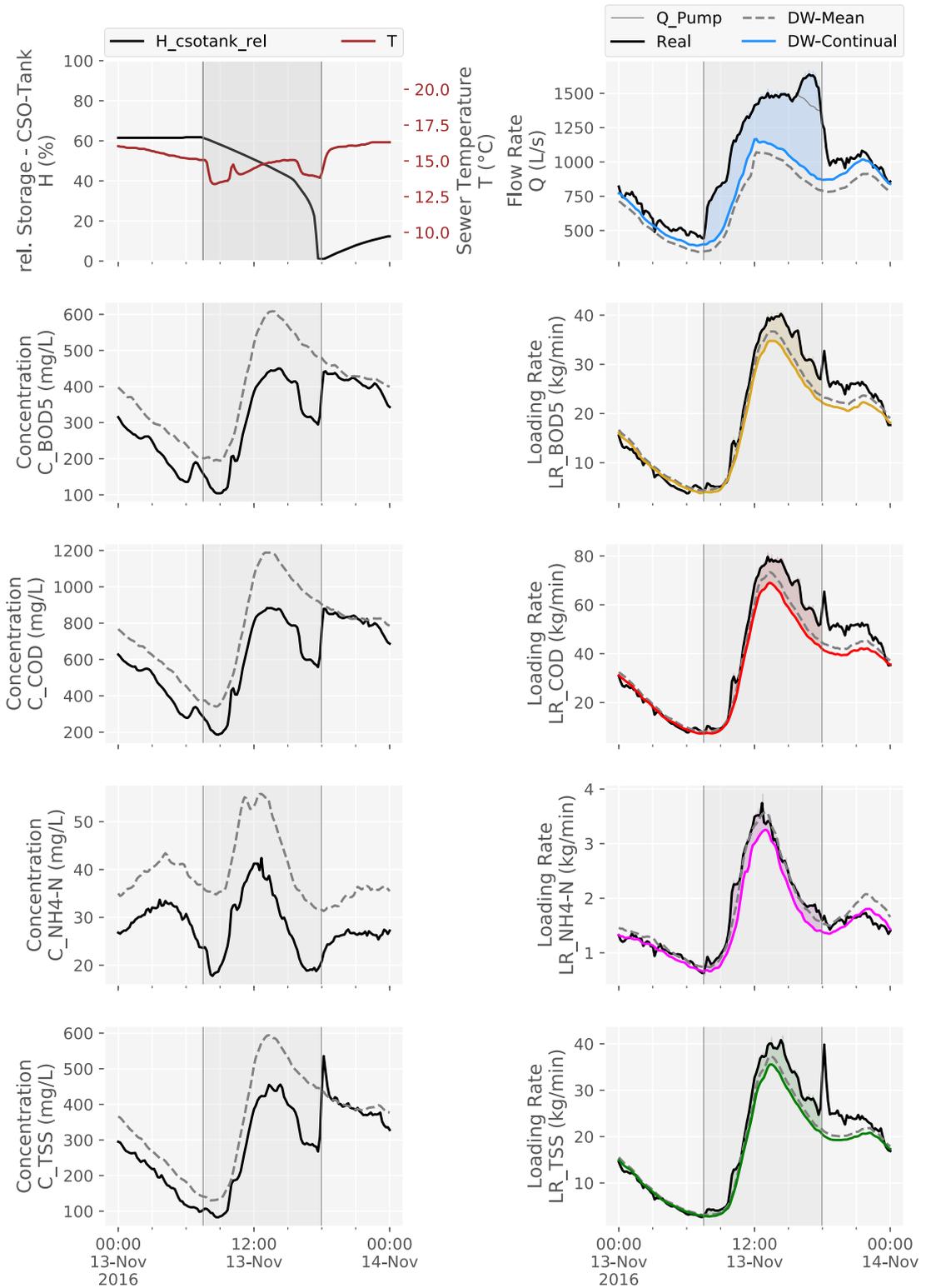


Abbildung D-4: Entleerungsereignis am 2016-11-13

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-11-21

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Montag 2016-11-21 07:32 und Montag 2016-11-21 21:30 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 14.0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 22.8 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 1. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2016-11-21 07:30 und das Ende mit 2016-11-21 20:29 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 6 250 kg, für den BSB₅ bei 3 550 kg, für den AFS bei 3 680 kg und für den NH₄-N bei 1 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 16 300 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 384 mg/L, für den BSB₅ von 218 mg/L, für den AFS von 226 mg/L und für den NH₄-N bei 0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 64.6 %.

Tabelle D-5: Entleerungsereignis am 2016-11-21 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	10 600	18 900	26 600	14 800	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	16 300	-	16 600	-
CSB	-4 230	4 300	15 500	6 250	384	5 020	302
BSB ₅	-1 470	2 630	7 510	3 550	218	2 550	154
AFS	-1 950	2 590	8 430	3 680	226	1 280	77
NH ₄ -N	-1 350	1	1 330	1	0	-	-

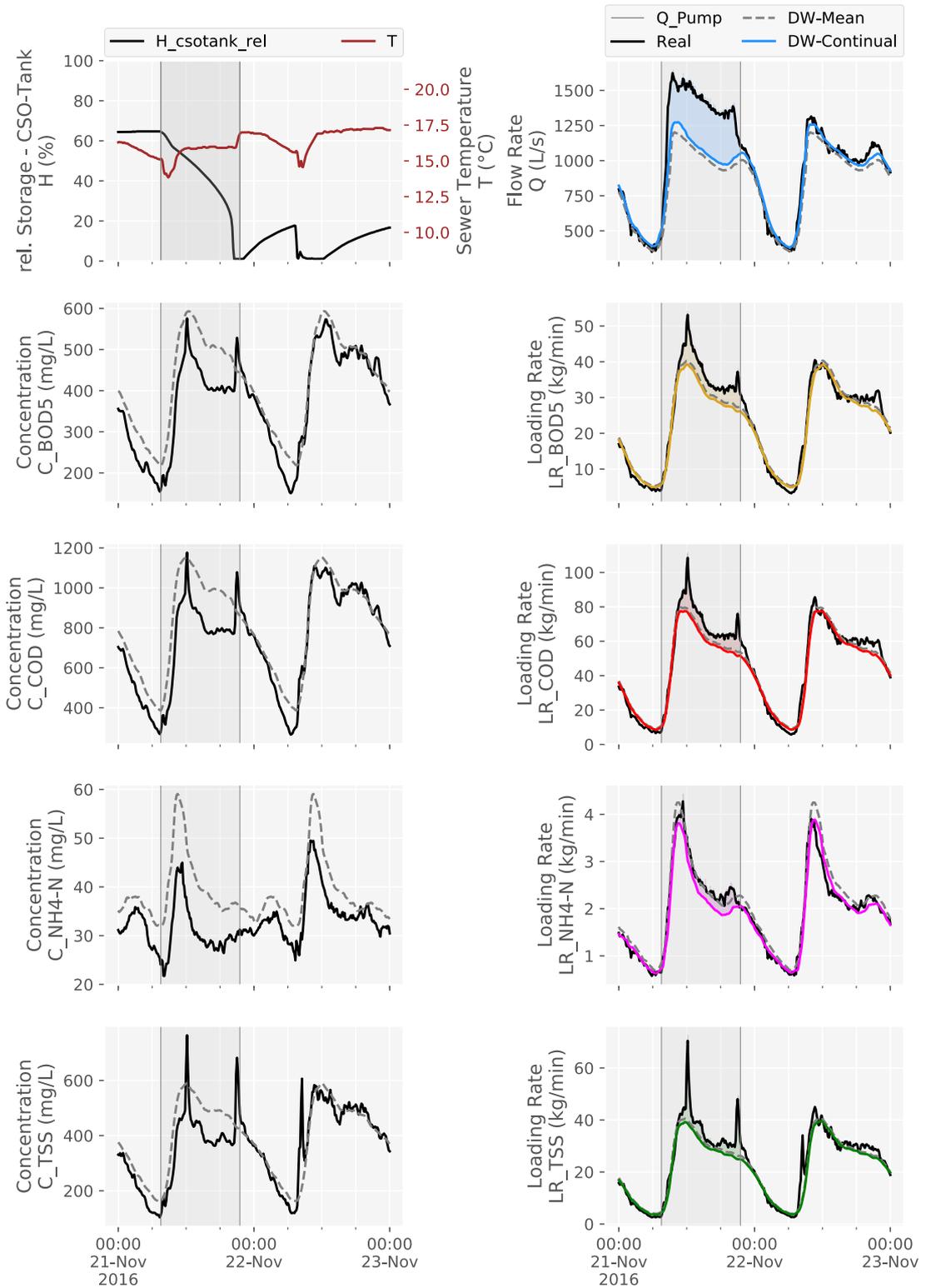


Abbildung D-5: Entleerungsereignis am 2016-11-21

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-11-29

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Dienstag 2016-11-29 07:23 und Dienstag 2016-11-29 16:22 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 7.8 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 3.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei -489 kg, für den BSB₅ bei -407 kg, für den AFS bei -60 kg und für den NH₄-N bei -152 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 17 500 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von -28 mg/L, für den BSB₅ von -23 mg/L, für den AFS von -3 mg/L und für den NH₄-N bei -9 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 47.5 %.

Tabelle D-6: Entleerungsereignis am 2016-11-29 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	1 630	6 690	11 700	4 680	-
Q=f(H)	-	-	-	17 500	-
CSB	-6 160	-303	5 900	-489	-28
BSB ₅	-3 040	-200	2 440	-407	-23
AFS	-2 810	201	3 420	-60	-3
NH ₄ -N	-1 310	-443	228	-152	-9

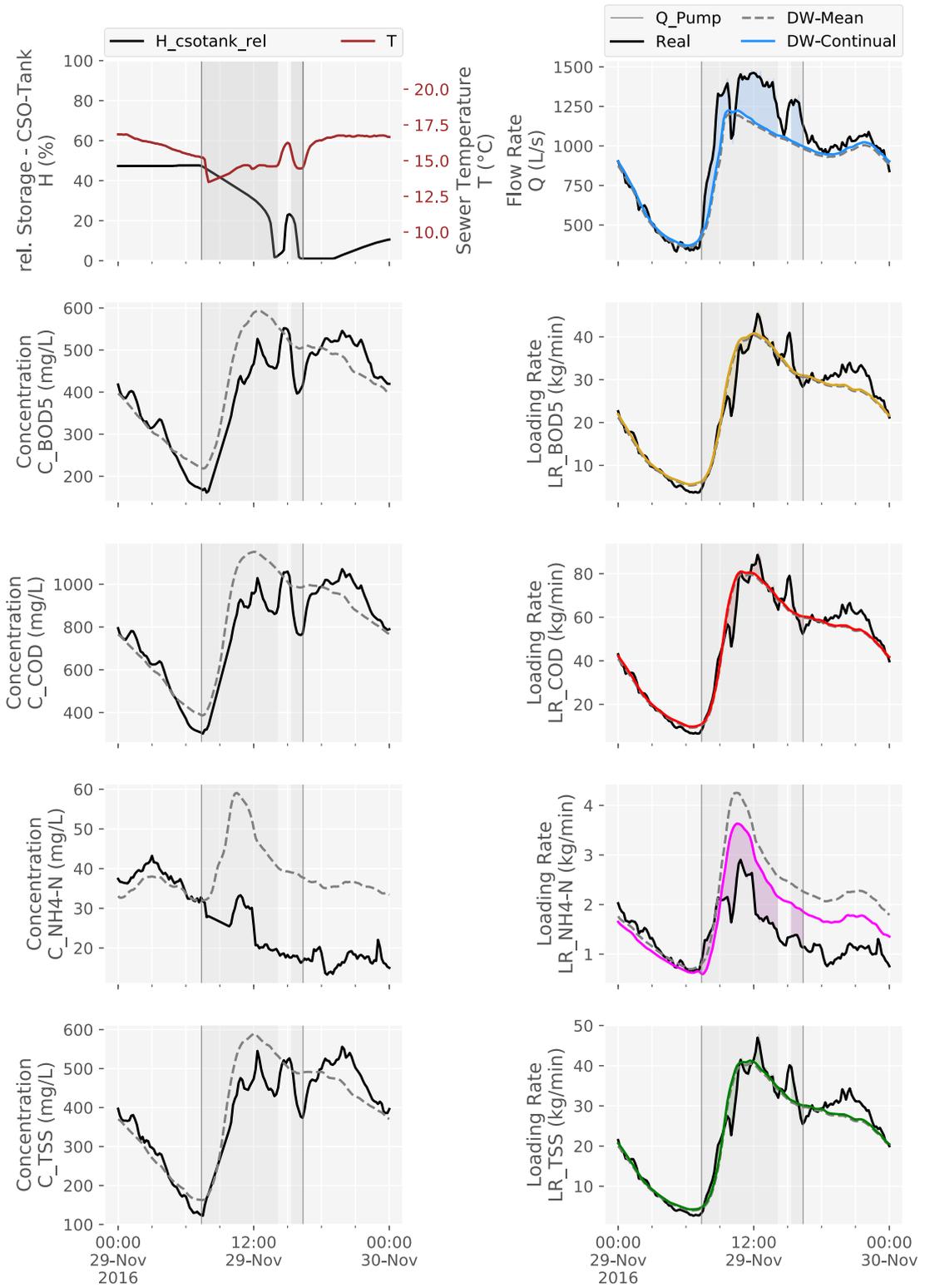


Abbildung D-6: Entleerungsereignis am 2016-11-29

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-12-08

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2016-12-08 17:34 und Donnerstag 2016-12-08 21:49 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 4.3 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 9.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 419 kg, für den BSB₅ bei 208 kg, für den AFS bei 218 kg und für den NH₄-N bei -131 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 9 760 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 43 mg/L, für den BSB₅ von 21 mg/L, für den AFS von 22 mg/L und für den NH₄-N bei -13 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 39.7 %.

Tabelle D-7: Entleerungsereignis am 2016-12-08 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	1 220	4 530	7 440	4 740	-
Q=f(H)	-	-	-	9 760	-
CSB	-1 410	757	4 540	419	43
BSB5	-788	316	2 030	208	21
AFS	-773	334	2 040	218	22
NH4-N	-430	-213	-14	-131	-13

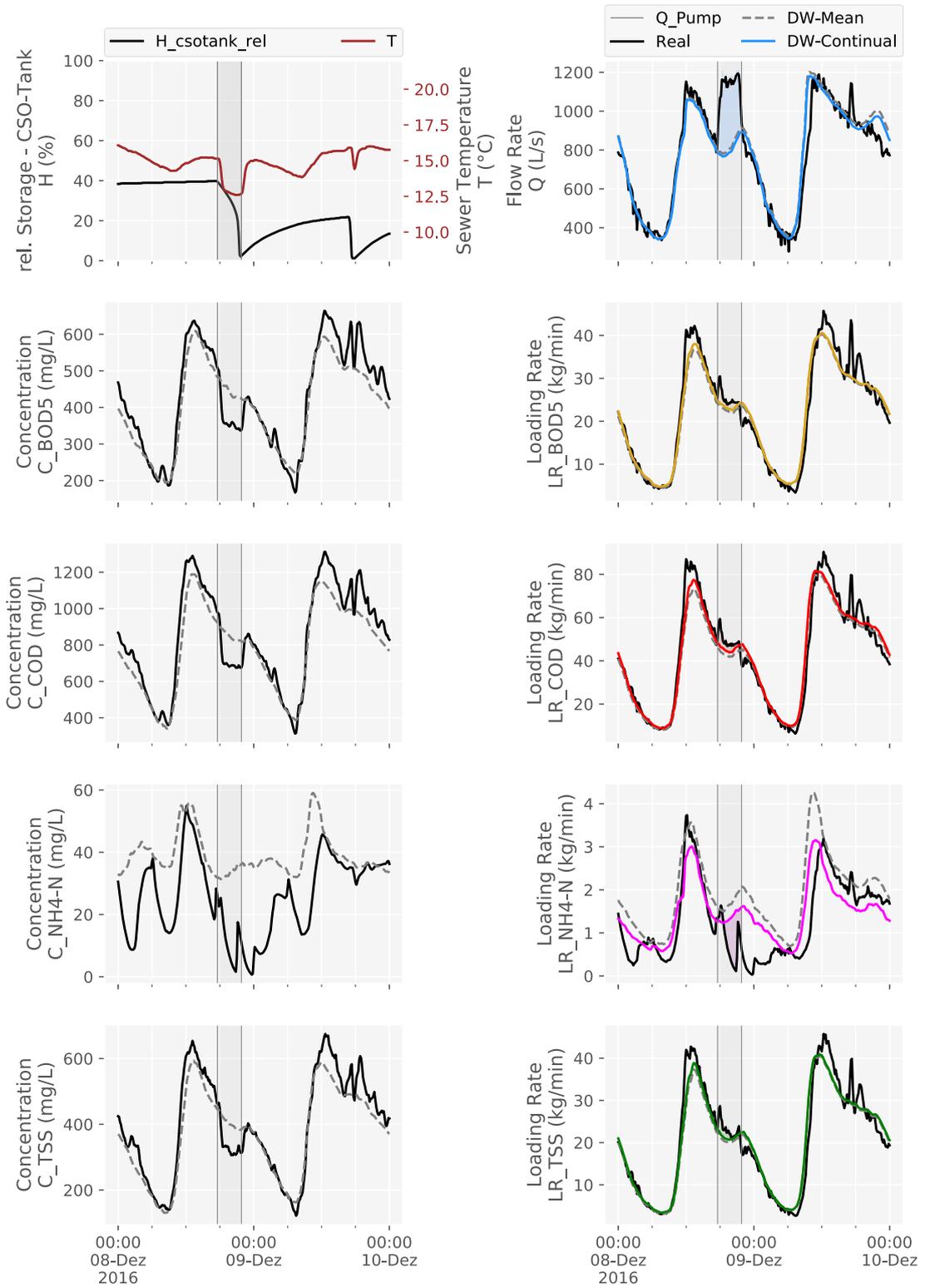


Abbildung D-7: Entleerungsereignis am 2016-12-08

ZSK-Entleerungsereignis am 2016-12-29

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2016-12-29 16:34 und Donnerstag 2016-12-29 18:43 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 2.2 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 0.5 Stunden nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei -666 kg, für den BSB₅ bei -329 kg, für den AFS bei -336 kg und für den NH₄-N bei -101 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 7 830 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von -85 mg/L, für den BSB₅ von -42 mg/L, für den AFS von -43 mg/L und für den NH₄-N bei -13 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 31.6 %.

Tabelle D-8: Entleerungsereignis am 2016-12-29 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	392	1 460	2 400	1 990	-
Q=f(H)	-	-	-	7 830	-
CSB	-2 090	-756	606	-666	-85
BSB5	-1 060	-440	189	-329	-42
AFS	-1 110	-444	252	-336	-43
NH4-N	-370	-200	0	-101	-13

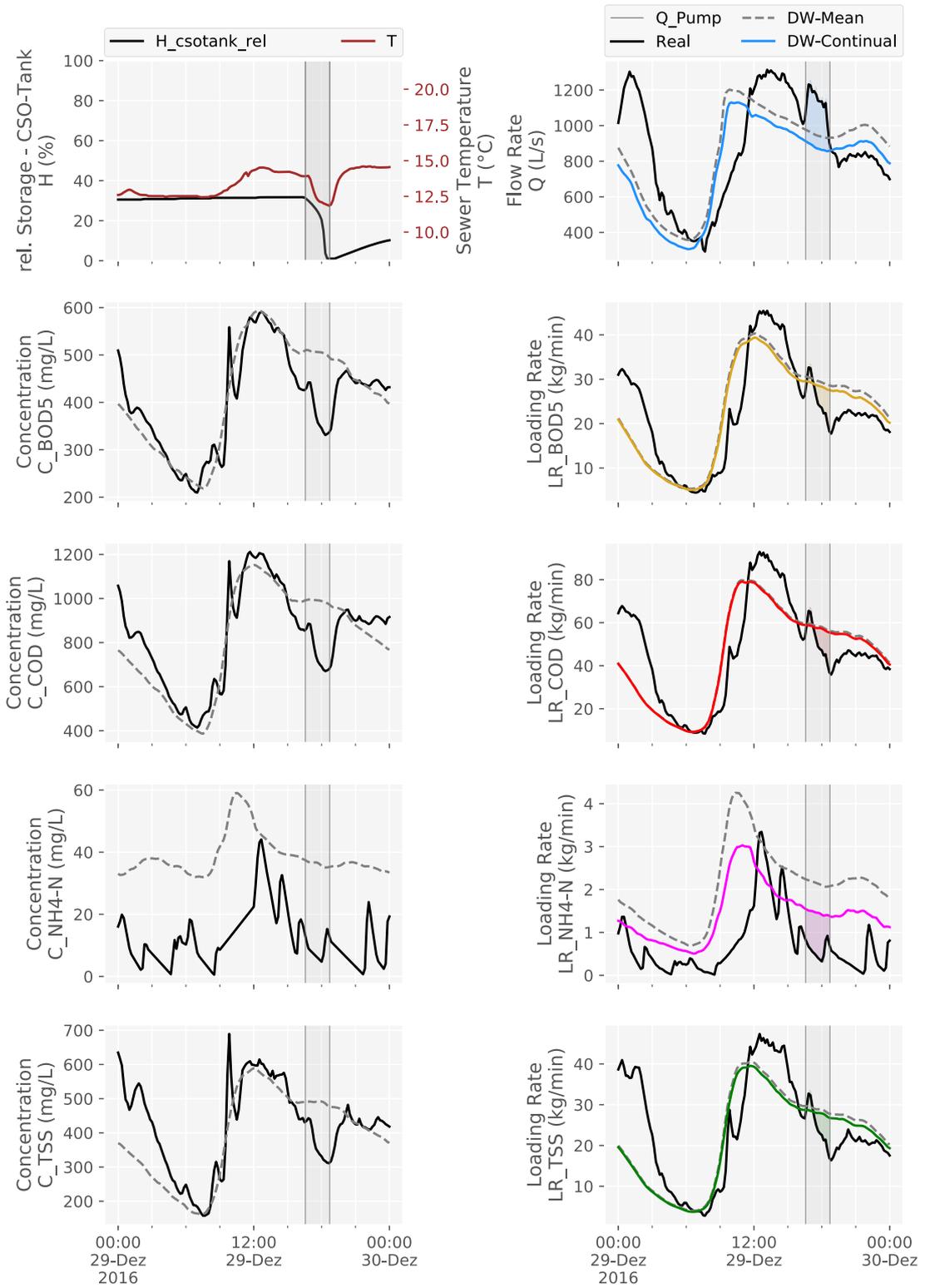


Abbildung D-8: Entleerungsereignis am 2016-12-29

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-01-15

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Sonntag 2017-01-15 15:22 und Sonntag 2017-01-15 21:56 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 6.6 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 16.1 Stunden nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 5 550 kg, für den BSB₅ bei 2 860 kg, für den AFS bei 3 210 kg und für den NH₄-N bei -42 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 10 900 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 508 mg/L, für den BSB₅ von 261 mg/L, für den AFS von 293 mg/L und für den NH₄-N bei -4 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 43.7 %.

Tabelle D-9: Entleerungsereignis am 2017-01-15 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	3 090	6 930	11 400	7 920	-
Q=f(H)	-	-	-	10 900	-
CSB	1 880	7 400	12 300	5 550	508
BSB ₅	280	2 810	5 070	2 860	261
AFS	1 090	3 730	6 110	3 210	293
NH ₄ -N	-181	-89	-5	-42	-4

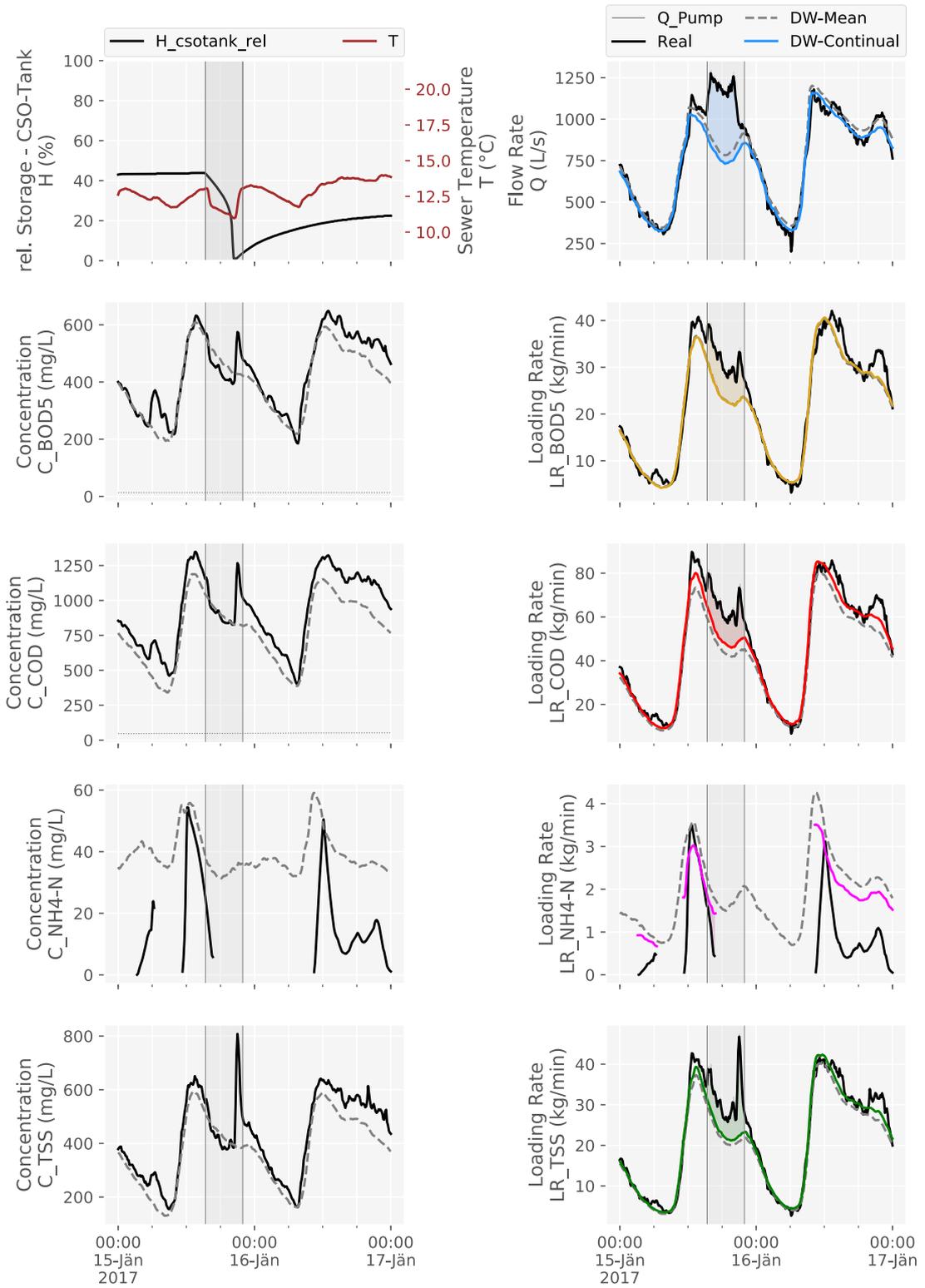


Abbildung D-9: Entleerungsereignis am 2017-01-15

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-01-19

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-01-19 11:28 und Donnerstag 2017-01-19 20:06 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 2.7 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 3.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 711 kg, für den BSB₅ bei 311 kg, für den AFS bei 341 kg und für den NH₄-N bei 3 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 7 900 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 90 mg/L, für den BSB₅ von 39 mg/L, für den AFS von 43 mg/L und für den NH₄-N bei 0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 29.6 %.

Tabelle D-10: Entleerungsereignis am 2017-01-19 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	-8	909	2 190	1 090	-
Q=f(H)	-	-	-	7 900	-
CSB	-519	1 410	3 350	711	90
BSB5	-495	414	1 270	311	39
AFS	-593	524	1 480	341	43
NH4-N	-220	3	299	3	0

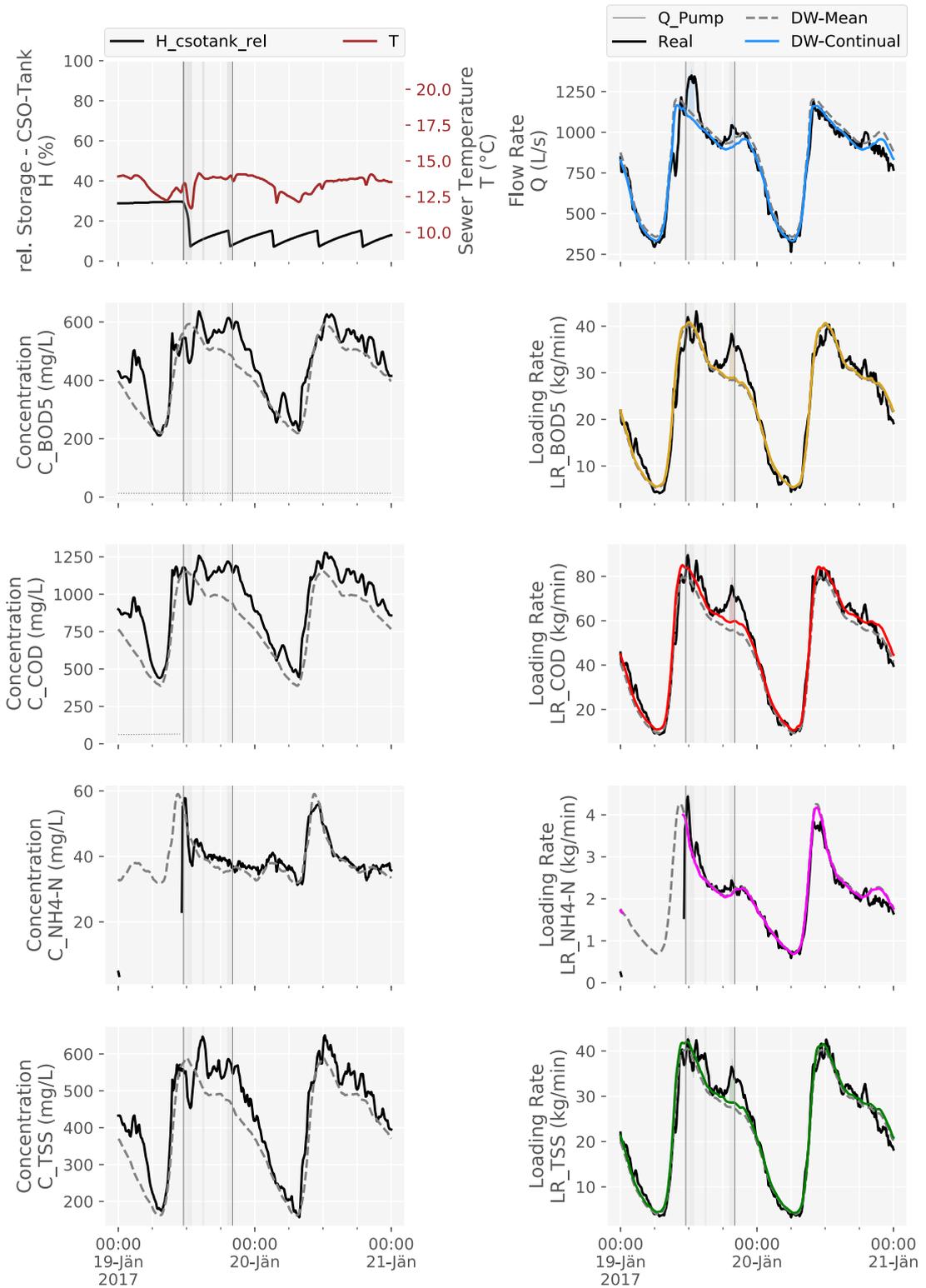


Abbildung D-10: Entleerungsereignis am 2017-01-19

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-02-08

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Mittwoch 2017-02-08 09:11 und Donnerstag 2017-02-09 12:30 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 21.7 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 9.7 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 2. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-02-08 08:00 und das Ende mit 2017-02-09 06:30 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 6 920 kg, für den BSB₅ bei 3 010 kg, für den AFS bei 3 270 kg und für den NH₄-N bei -4 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 18 500 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 375 mg/L, für den BSB₅ von 163 mg/L, für den AFS von 177 mg/L und für den NH₄-N bei -0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 77.4 %.

Tabelle D-11: Entleerungsereignis am 2017-02-08 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	17 800	27 900	38 300	23 300	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	18 500	-	20 400	-
CSB	581	12 700	27 300	6 920	375	7 610	372
BSB ₅	-2 220	3 350	10 300	3 010	163	4 580	224
AFS	-1 660	4 440	11 900	3 270	177	4 500	220
NH ₄ -N	-2 470	-234	867	-4	-0	-	-

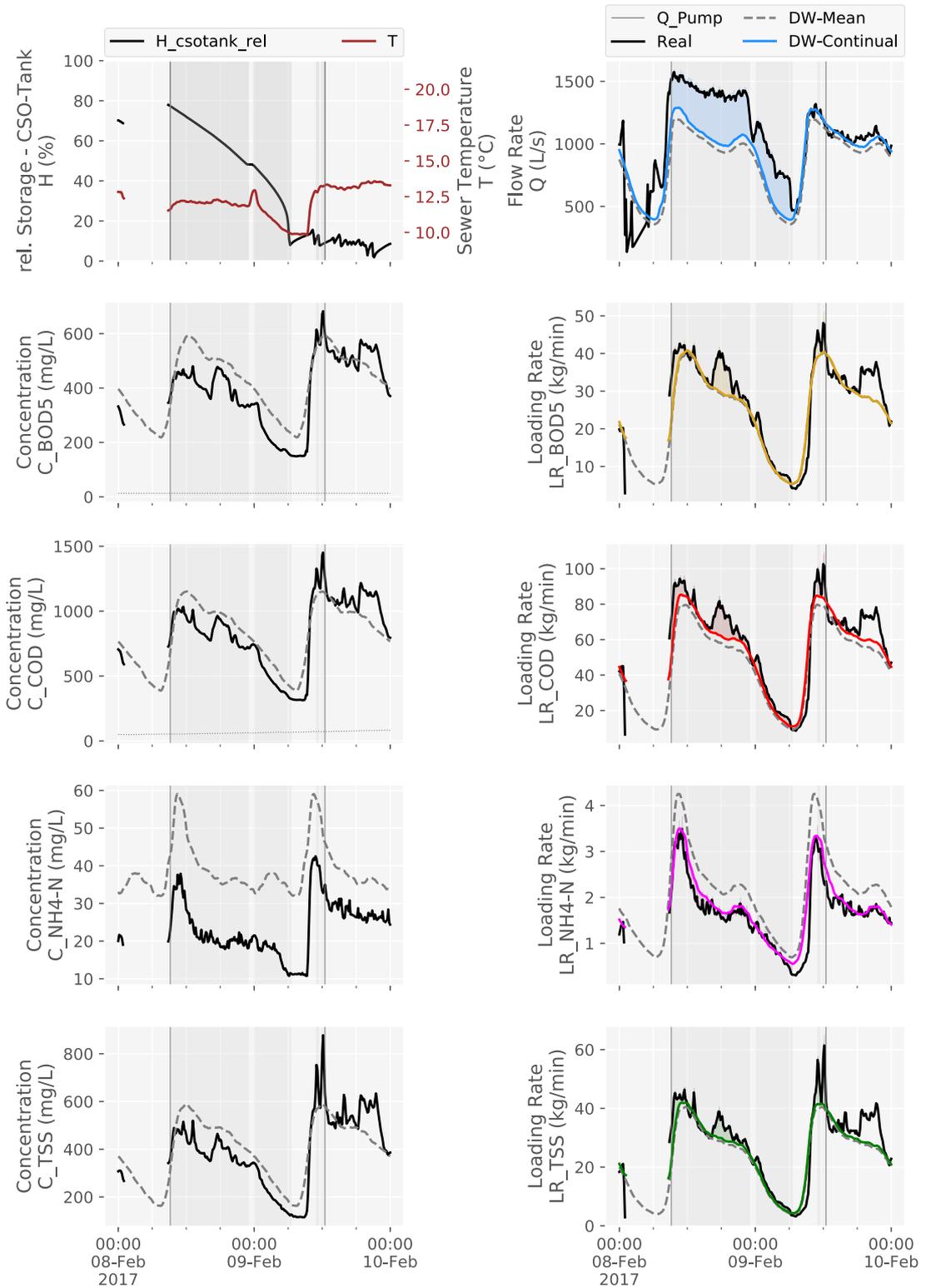


Abbildung D-11: Entleerungsereignis am 2017-02-08

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-02-16

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-02-16 11:50 und Donnerstag 2017-02-16 14:09 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 2.3 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 4.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 1 420 kg, für den BSB₅ bei 636 kg, für den AFS bei 717 kg und für den NH₄-N bei -3 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 8 370 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 170 mg/L, für den BSB₅ von 76 mg/L, für den AFS von 86 mg/L und für den NH₄-N bei -0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 33.6 %.

Tabelle D-12: Entleerungsereignis am 2017-02-16 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	2 270	3 200	4 130	2 990	-
Q=f(H)	-	-	-	8 370	-
CSB	460	2 180	3 850	1 420	170
BSB ₅	114	877	1 700	636	76
AFS	104	952	1 850	717	86
NH ₄ -N	-235	-10	192	-3	-0

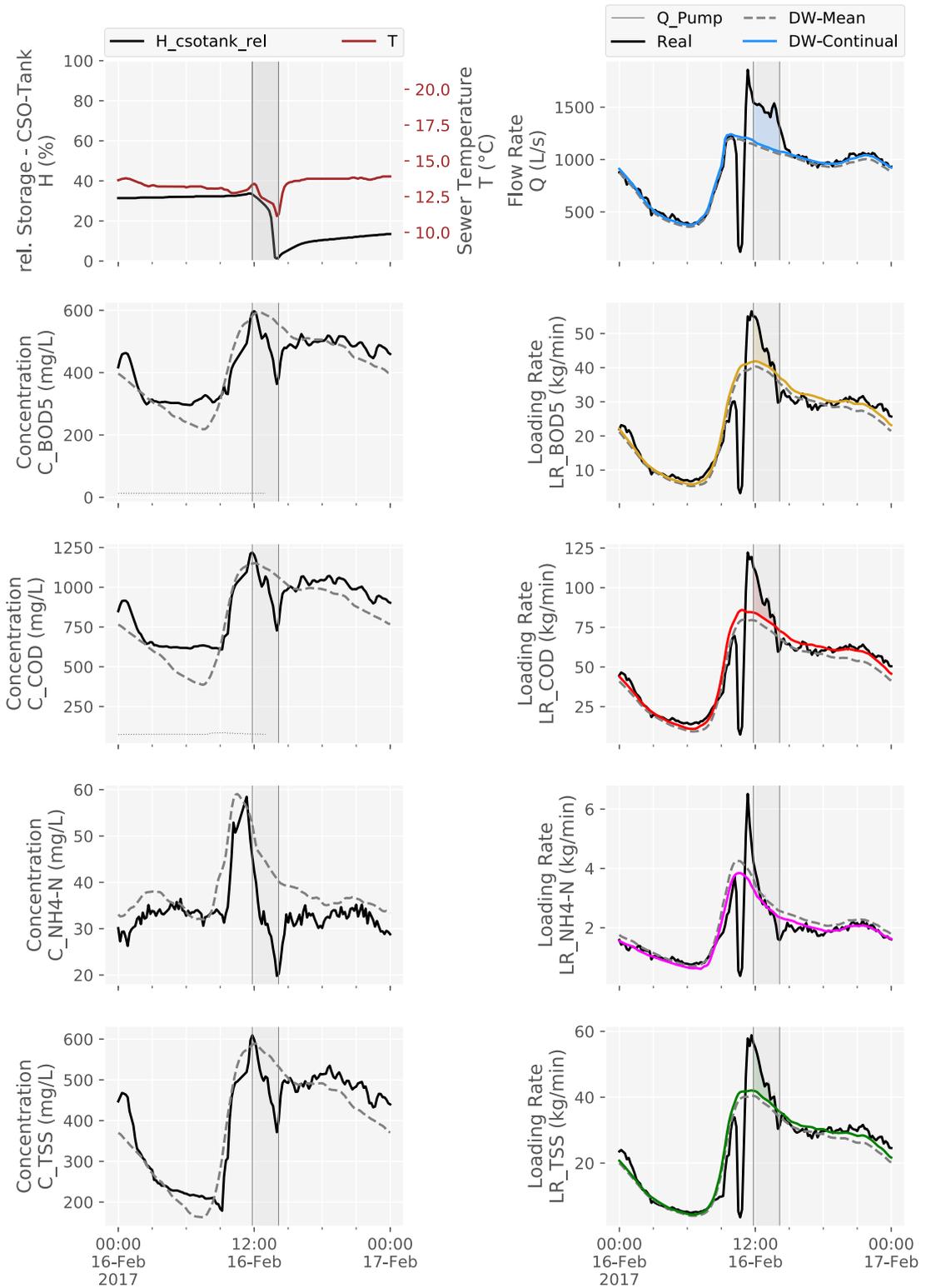


Abbildung D-12: Entleerungsereignis am 2017-02-16

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-02-17

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Freitag 2017-02-17 23:41 und Samstag 2017-02-18 13:20 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 13.7 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 1.0 Tage 9.0 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 3. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-02-17 23:39 und das Ende mit 2017-02-18 12:59 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 10 300 kg, für den BSB₅ bei 4 400 kg, für den AFS bei 8 350 kg und für den NH₄-N bei -9 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 17 200 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 600 mg/L, für den BSB₅ von 256 mg/L, für den AFS von 485 mg/L und für den NH₄-N bei -0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 60.5 %.

Tabelle D-13: Entleerungsereignis am 2017-02-17 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	8 130	14 800	23 900	12 900	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	17 200	-	15 300	-
CSB	5 880	12 600	19 500	10 300	600	7 910	516
BSB ₅	1 780	4 780	8 050	4 400	256	3 780	247
AFS	5 810	9 150	12 400	8 350	485	4 500	294
NH ₄ -N	-844	-67	549	-9	-0	-	-

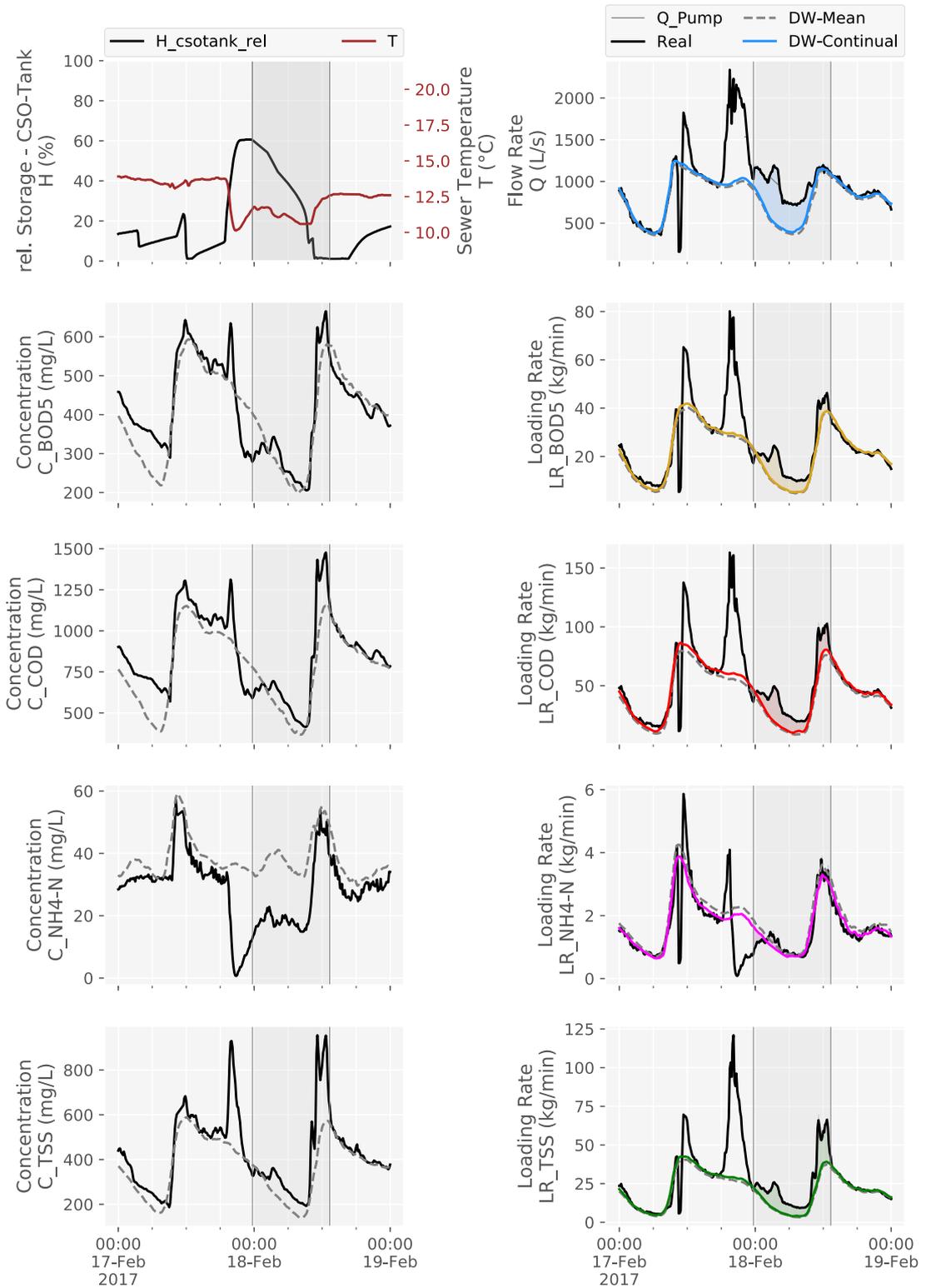


Abbildung D-13: Entleerungsereignis am 2017-02-17

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-03-01

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Mittwoch 2017-03-01 05:34 und Mittwoch 2017-03-01 18:09 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 10.6 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 10.0 Tage nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 4. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-03-01 05:39 und das Ende mit 2017-03-01 15:22 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 6 100 kg, für den BSB₅ bei 2 800 kg, für den AFS bei 5 000 kg und für den NH₄-N bei -119 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 14 700 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 415 mg/L, für den BSB₅ von 190 mg/L, für den AFS von 339 mg/L und für den NH₄-N bei -8 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 55.4 %.

Tabelle D-14: Entleerungsereignis am 2017-03-01 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	6 340	12 900	19 400	12 000	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	14 700	-	14 100	-
CSB	2 410	9 120	16 400	6 100	415	7 690	547
BSB ₅	211	3 180	6 830	2 800	190	3 200	228
AFS	2 500	5 810	9 610	5 000	339	3 940	280
NH ₄ -N	-1 240	-145	580	-119	-8	-	-

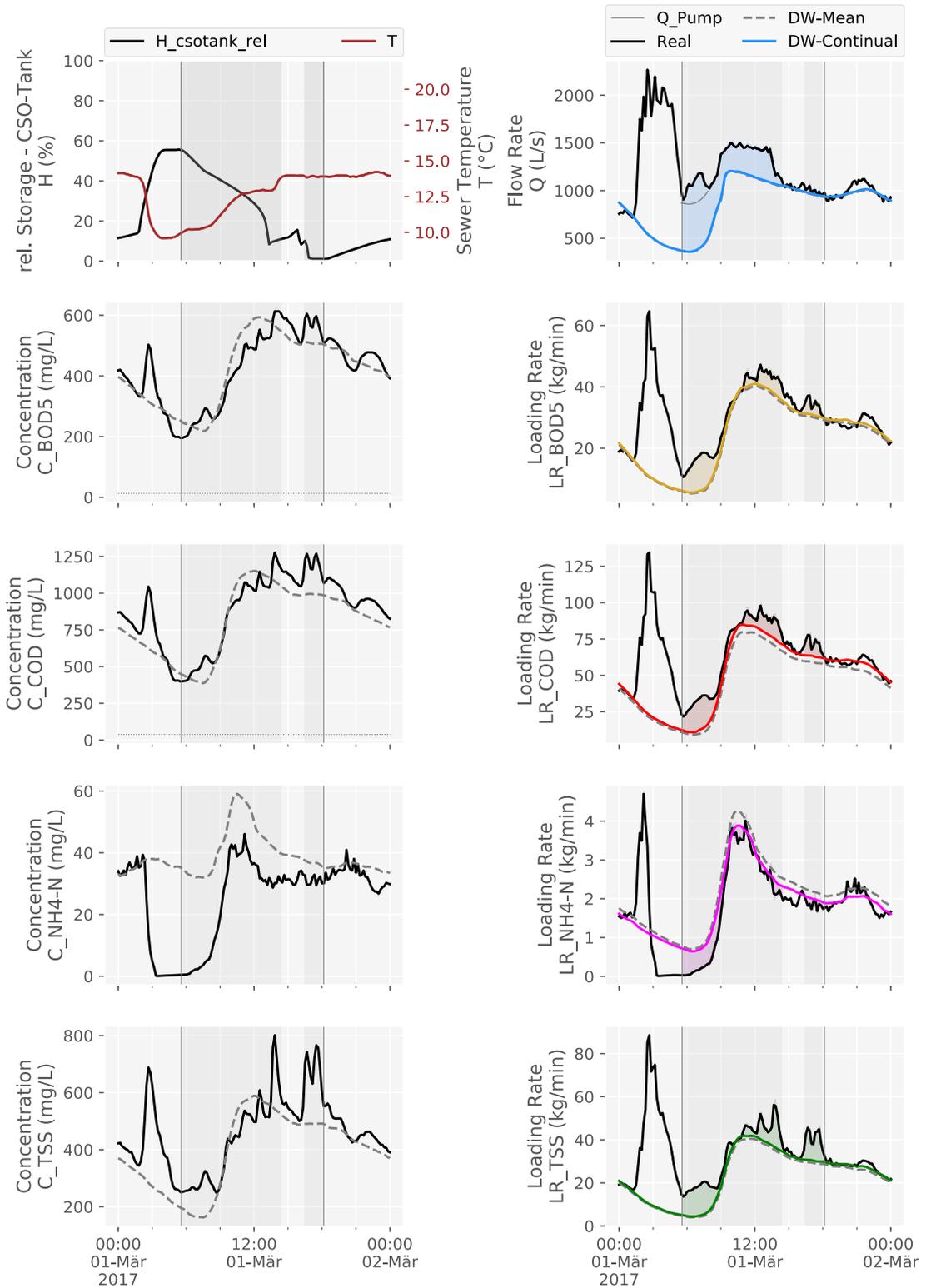


Abbildung D-14: Entleerungsereignis am 2017-03-01

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-03-28

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Dienstag 2017-03-28 11:38 und Dienstag 2017-03-28 16:58 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 4.8 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 1.0 Tage 10.8 Stunden nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 5 830 kg, für den BSB₅ bei 3 040 kg, für den AFS bei 2 750 kg und für den NH₄-N bei 146 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 9 370 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 622 mg/L, für den BSB₅ von 325 mg/L, für den AFS von 294 mg/L und für den NH₄-N bei 16 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 40.1 %.

Tabelle D-15: Entleerungsereignis am 2017-03-28 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	2 990	5 030	6 930	5 140	-
Q=f(H)	-	-	-	9 370	-
CSB	3 240	6 740	10 200	5 830	622
BSB ₅	1 730	3 390	5 030	3 040	325
AFS	1 120	3 020	4 810	2 750	294
NH ₄ -N	-85	214	699	146	16

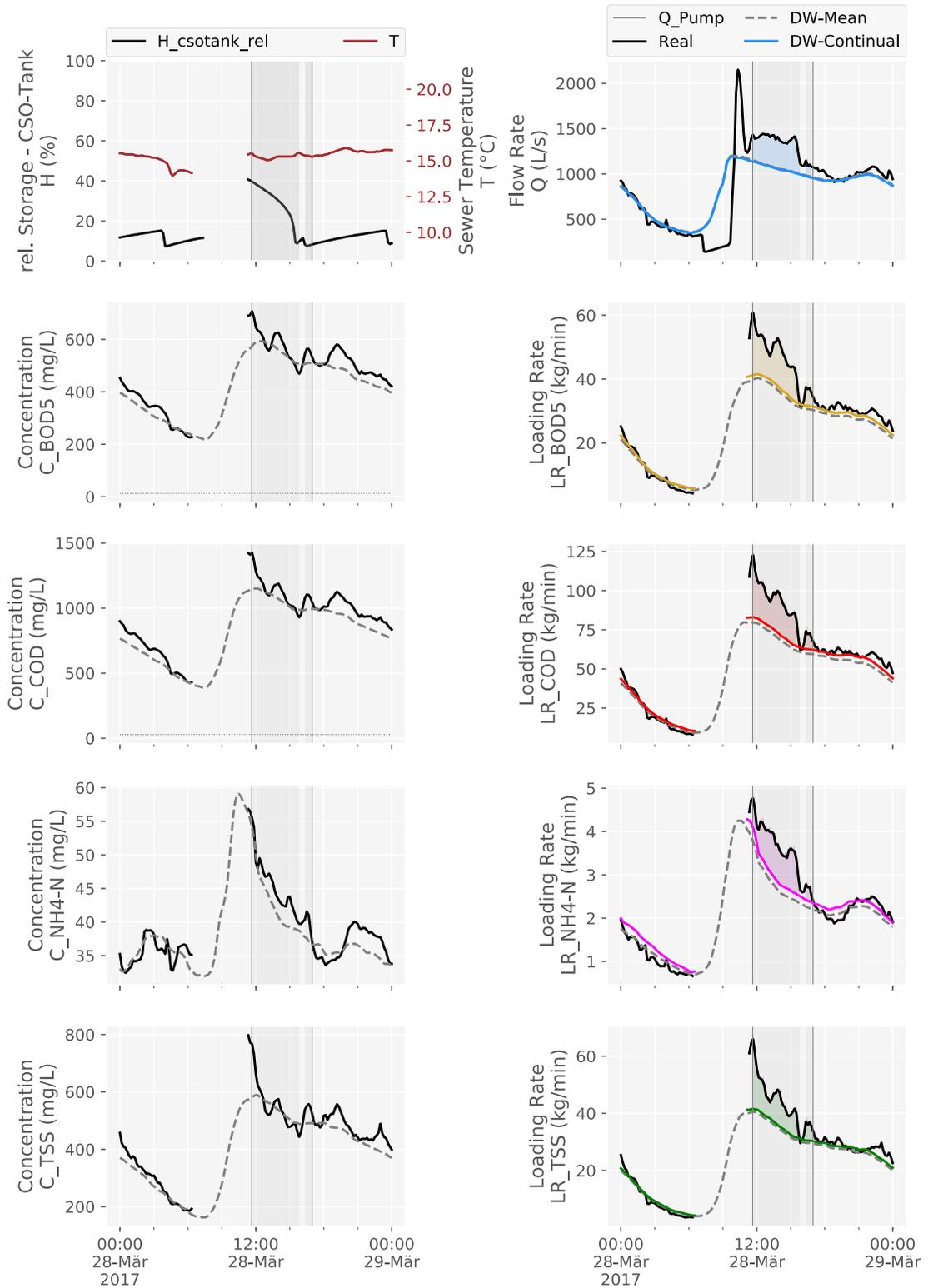


Abbildung D-15: Entleerungsereignis am 2017-03-28

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-04-04

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Dienstag 2017-04-04 23:05 und Mittwoch 2017-04-05 22:15 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 14.9 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 7.0 Tage nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 5. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-04-05 09:11 und das Ende mit 2017-04-05 19:15 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 9 040 kg, für den BSB₅ bei 4 500 kg, für den AFS bei 5 980 kg und für den NH₄-N bei -68 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 16 100 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 560 mg/L, für den BSB₅ von 279 mg/L, für den AFS von 370 mg/L und für den NH₄-N bei -4 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 71.2 %.

Tabelle D-16: Entleerungsereignis am 2017-04-04 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	13 600	21 100	28 600	21 300	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	16 100	-	12 800	-
CSB	1 580	10 100	20 300	9 040	560	6 970	545
BSB ₅	288	4 190	8 910	4 500	279	2 840	222
AFS	1 370	6 040	11 000	5 980	370	2 770	217
NH ₄ -N	-1 250	-62	1 110	-68	-4	-	-

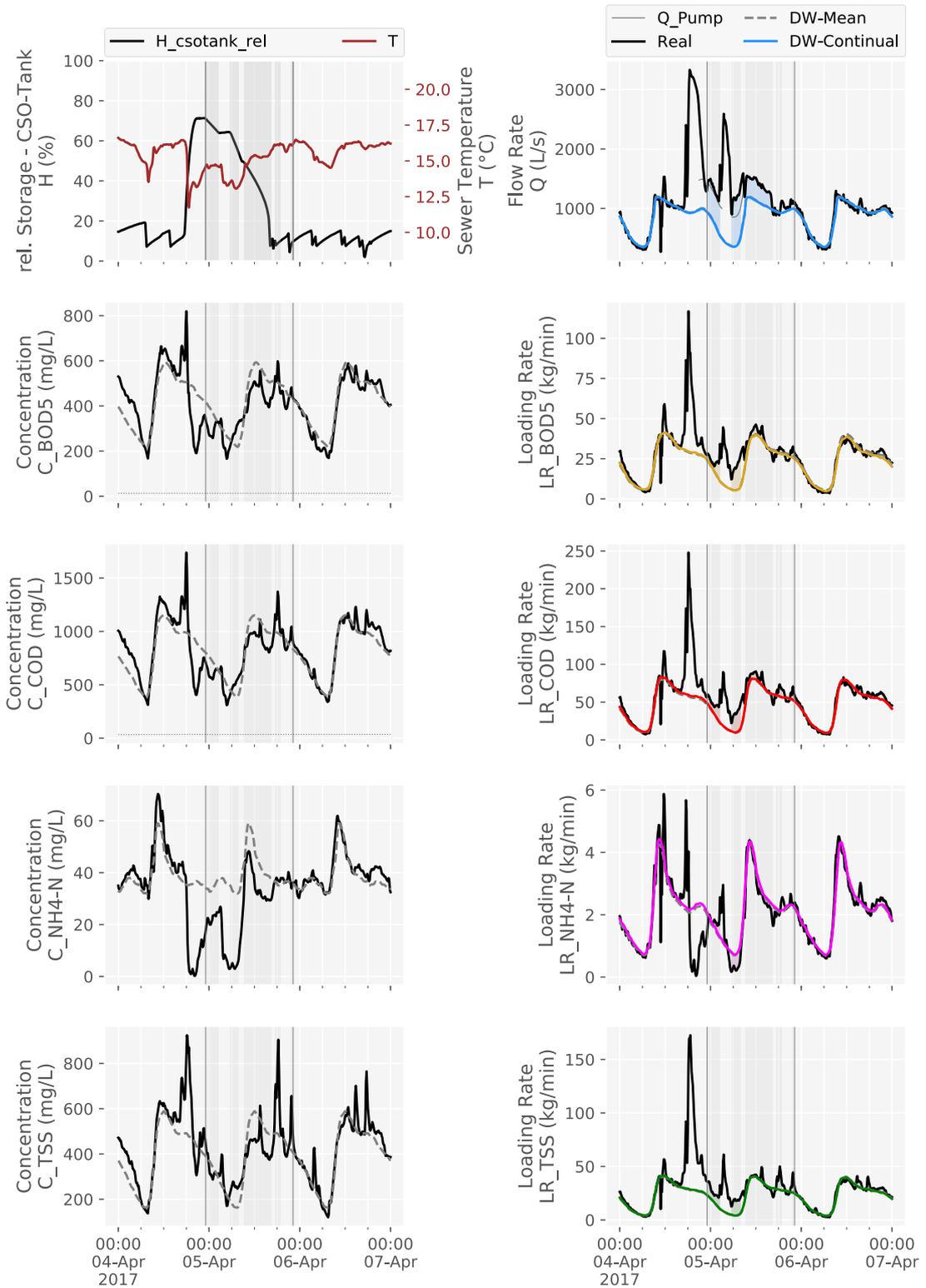


Abbildung D-16: Entleerungsereignis am 2017-04-04

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-04-29

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Samstag 2017-04-29 00:22 und Samstag 2017-04-29 21:38 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 18.0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 13.0 Tage nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 6. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-04-29 10:09 und das Ende mit 2017-04-29 22:41 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 3 930 kg, für den BSB₅ bei 2 360 kg, für den AFS bei 2 150 kg und für den NH₄-N bei 391 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 18 100 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 217 mg/L, für den BSB₅ von 130 mg/L, für den AFS von 119 mg/L und für den NH₄-N bei 22 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 90.0 %.

Tabelle D-17: Entleerungsereignis am 2017-04-29 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	26 200	34 700	43 200	33 900	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	18 100	-	14 600	-
CSB	-5 250	3 890	15 900	3 930	217	2 890	198
BSB ₅	-3 230	1 420	6 640	2 360	130	1 530	105
AFS	-3 360	1 820	7 120	2 150	119	420	29
NH ₄ -N	-592	291	1 230	391	22	-	-

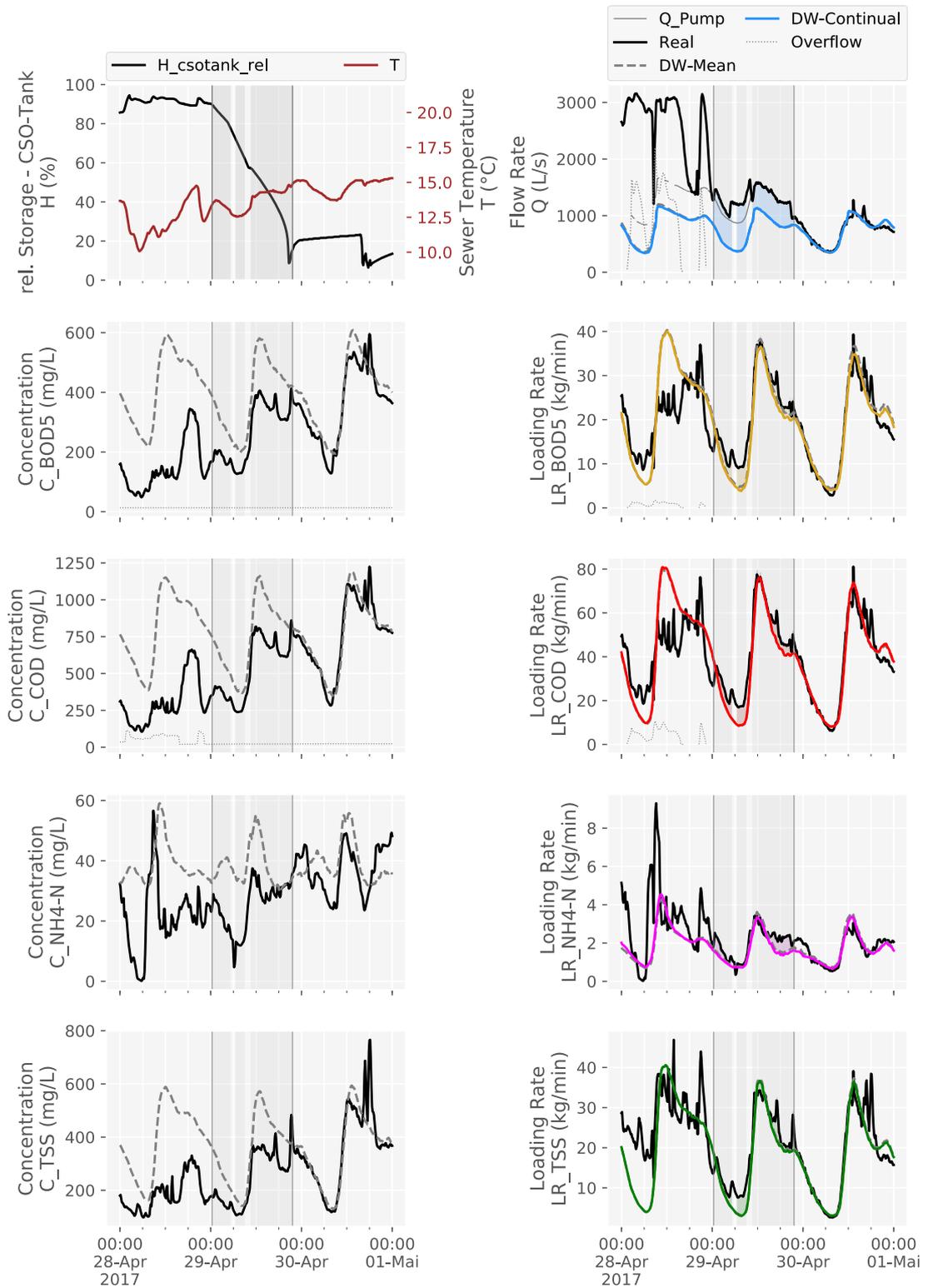


Abbildung D-17: Entleerungsereignis am 2017-04-29

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-05-04

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-05-04 19:10 und Donnerstag 2017-05-04 22:41 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 3.5 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 4.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2 230 kg, für den BSB₅ bei 1 220 kg, für den AFS bei 1 480 kg und für den NH₄-N bei 1 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 7 880 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 283 mg/L, für den BSB₅ von 154 mg/L, für den AFS von 188 mg/L und für den NH₄-N bei 0 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 37.7 %.

Tabelle D-18: Entleerungsereignis am 2017-05-04 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	2 370	4 210	6 010	4 090	-
Q=f(H)	-	-	-	7 880	-
CSB	-31	2 630	5 490	2 230	283
BSB ₅	88	1 300	2 570	1 220	154
AFS	333	1 620	3 090	1 480	188
NH ₄ -N	-57	136	471	1	0

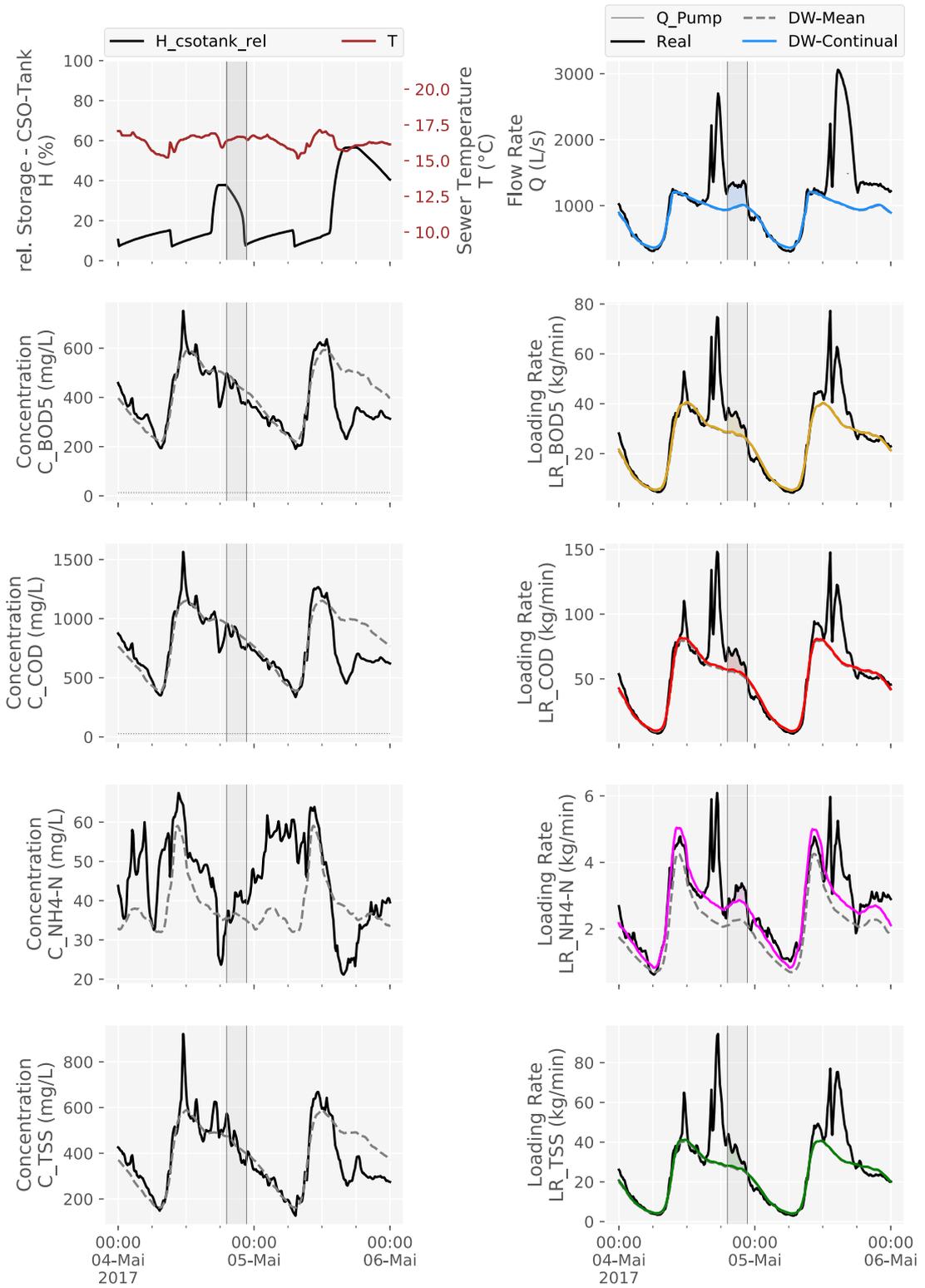


Abbildung D-18: Entleerungsereignis am 2017-05-04

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-05-05

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Freitag 2017-05-05 18:18 und Samstag 2017-05-06 10:05 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 11.1 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 19.6 Stunden nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 1 980 kg, für den BSB₅ bei 853 kg, für den AFS bei 677 kg und für den NH₄-N bei 239 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 12 600 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 157 mg/L, für den BSB₅ von 68 mg/L, für den AFS von 54 mg/L und für den NH₄-N bei 19 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 56.5 %.

Tabelle D-19: Entleerungsereignis am 2017-05-05 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	7 160	12 100	17 600	11 900	-
Q=f(H)	-	-	-	12 600	-
CSB	-4 540	2 160	8 090	1 980	157
BSB ₅	-2 370	812	3 450	853	68
AFS	-2 780	706	3 230	677	54
NH ₄ -N	-148	426	1 280	239	19

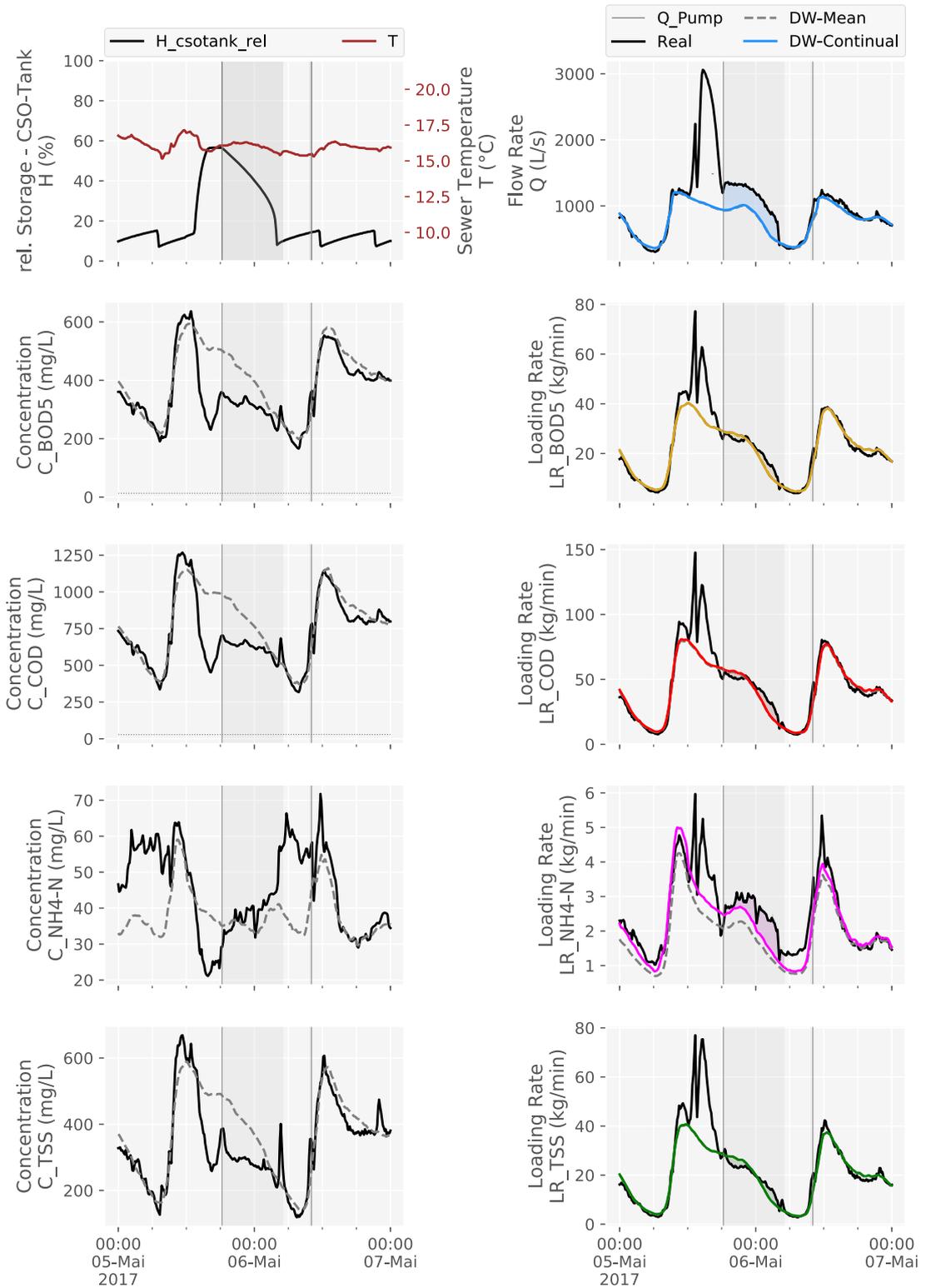


Abbildung D-19: Entleerungsereignis am 2017-05-05

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-05-14

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Sonntag 2017-05-14 19:23 und Dienstag 2017-05-16 03:53 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 17.9 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 5.0 Tage nicht geregnet.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 6 890 kg, für den BSB₅ bei 3 590 kg, für den AFS bei 3 930 kg und für den NH₄-N bei 584 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 16 500 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 416 mg/L, für den BSB₅ von 217 mg/L, für den AFS von 237 mg/L und für den NH₄-N bei 35 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 62.3 %.

Tabelle D-20: Entleerungsereignis am 2017-05-14 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.
Q=f(Q)	17 400	25 600	34 200	25 300	-
Q=f(H)	-	-	-	16 500	-
CSB	739	10 000	21 200	6 890	416
BSB ₅	808	5 310	10 500	3 590	217
AFS	364	5 070	10 500	3 930	237
NH ₄ -N	72	1 190	2 340	584	35

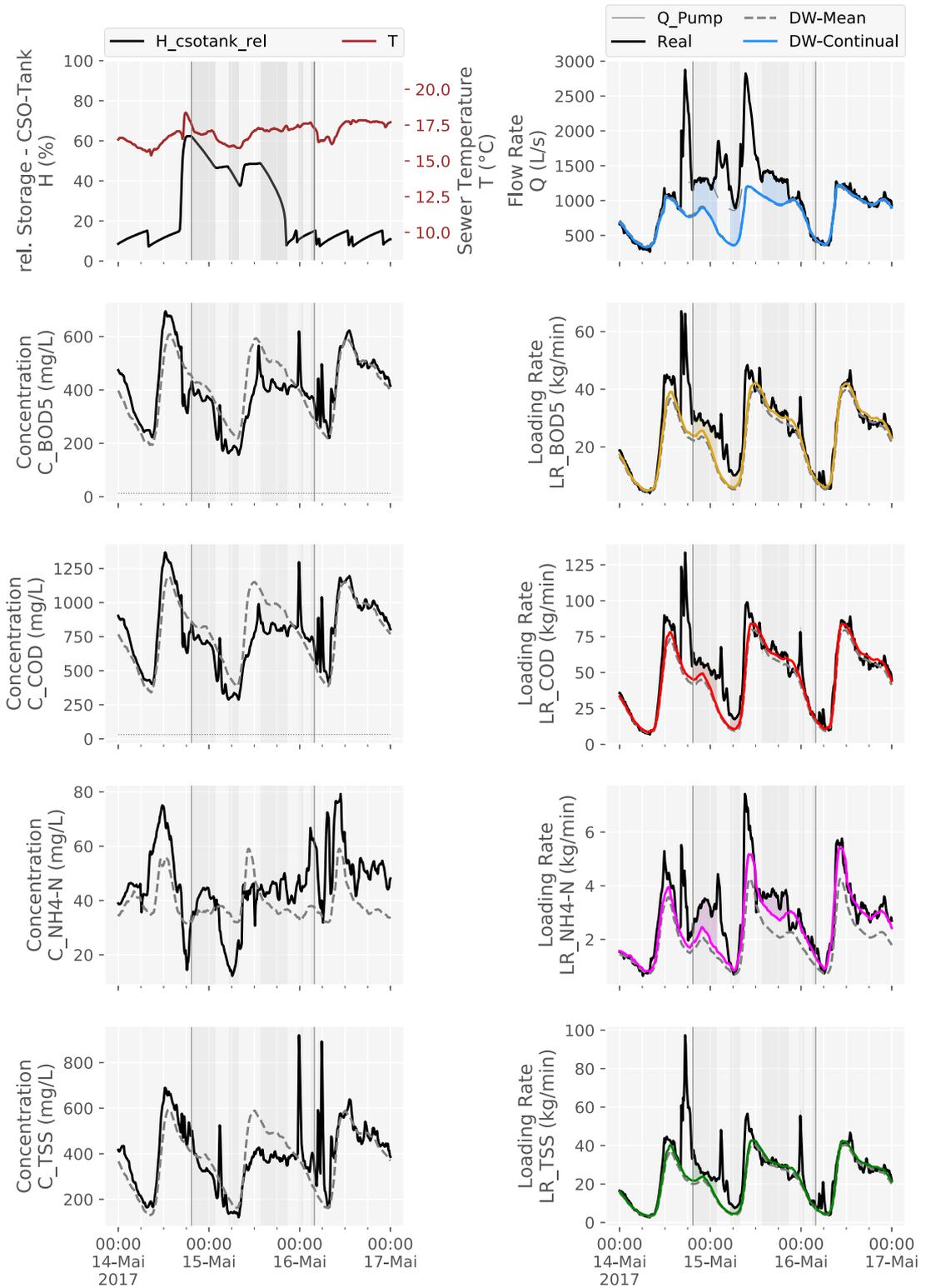


Abbildung D-20: Entleerungsereignis am 2017-05-14

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-05-23

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Dienstag 2017-05-23 05:49 und Mittwoch 2017-05-24 19:28 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 26.0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 1.0 Tage 20.5 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 7. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-05-23 00:36 und das Ende mit 2017-05-24 20:00 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 9 530 kg, für den BSB₅ bei 5 900 kg, für den AFS bei 5 990 kg und für den NH₄-N bei 298 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 22 100 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 430 mg/L, für den BSB₅ von 266 mg/L, für den AFS von 271 mg/L und für den NH₄-N bei 14 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 87.9 %.

Tabelle D-21: Entleerungsereignis am 2017-05-23 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	26 900	40 300	53 100	41 400	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	22 100	-	23 000	-
CSB	-3 620	9 710	25 500	9 530	430	6 060	263
BSB ₅	-1 210	5 170	12 600	5 900	266	3 990	173
AFS	-1 190	5 690	13 100	5 990	271	3 420	149
NH ₄ -N	-88	1 510	3 410	298	14	-	-

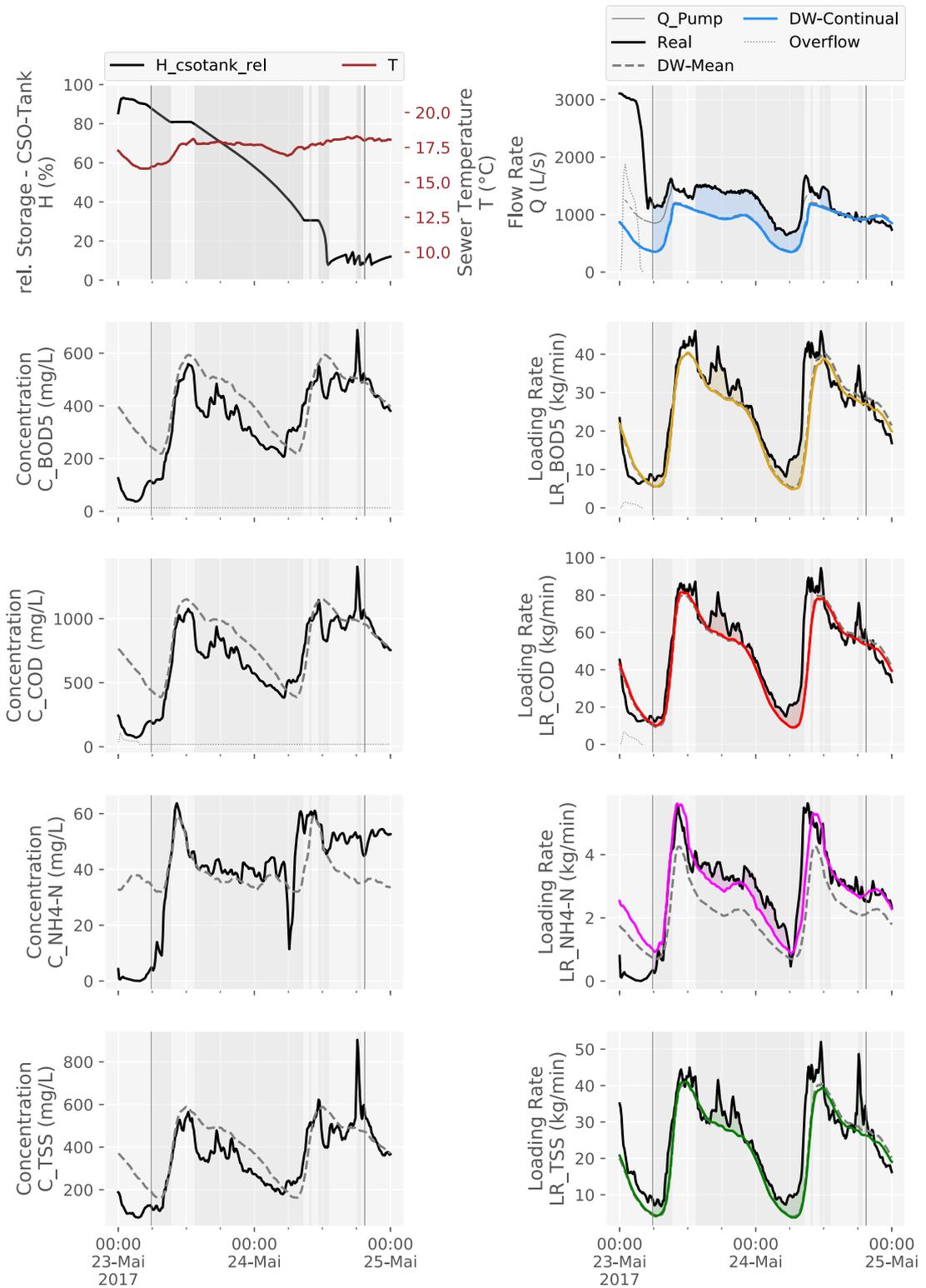


Abbildung D-21: Entleerungsereignis am 2017-05-23

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-03

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Samstag 2017-06-03 03:35 und Sonntag 2017-06-04 09:21 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 29.0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 2.0 Tage 5.3 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 8. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-03 03:29 und das Ende mit 2017-06-04 09:30 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei -2 450 kg, für den BSB₅ bei -2 220 kg, für den AFS bei -140 kg und für den NH₄-N bei 50 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 25 000 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von -98 mg/L, für den BSB₅ von -89 mg/L, für den AFS von -6 mg/L und für den NH₄-N bei 2 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 90.0 %.

Tabelle D-22: Entleerungsereignis am 2017-06-03 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	8 380	21 000	35 500	25 400	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	25 000	-	23 000	-
CSB	-19 500	-4 630	7 760	-2 450	-98	6 510	283
BSB ₅	-8 880	-2 190	3 750	-2 220	-89	3 860	168
AFS	-8 890	-1 800	4 430	-140	-6	2 300	100
NH ₄ -N	-821	470	1 720	50	2	-	-

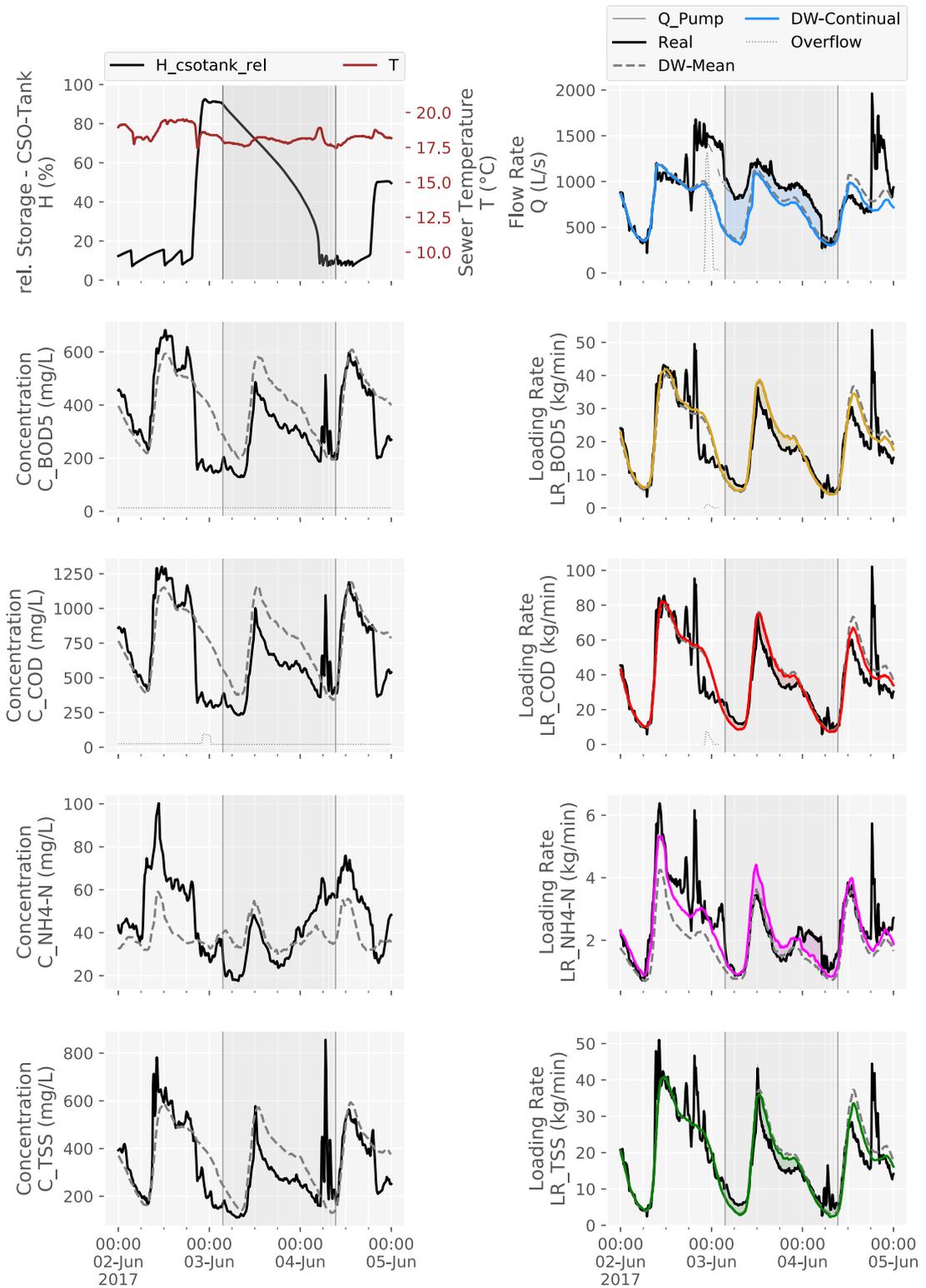


Abbildung D-22: Entleerungsereignis am 2017-06-03

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-04

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Sonntag 2017-06-04 23:39 und Montag 2017-06-05 07:14 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 7.6 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 18.5 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 9. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-04 23:39 und das Ende mit 2017-06-05 07:54 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2 150 kg, für den BSB₅ bei 1 160 kg, für den AFS bei 827 kg und für den NH₄-N bei 299 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 11 100 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 193 mg/L, für den BSB₅ von 105 mg/L, für den AFS von 74 mg/L und für den NH₄-N bei 27 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 50.4 %.

Tabelle D-23: Entleerungsereignis am 2017-06-04 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	4 910	7 280	9 650	8 790	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	11 100	-	12 800	-
CSB	-741	1 490	3 480	2 150	193	4 690	367
BSB ₅	-166	865	1 850	1 160	105	2 540	199
AFS	-617	402	1 260	827	74	1 310	102
NH ₄ -N	83	363	625	299	27	-	-

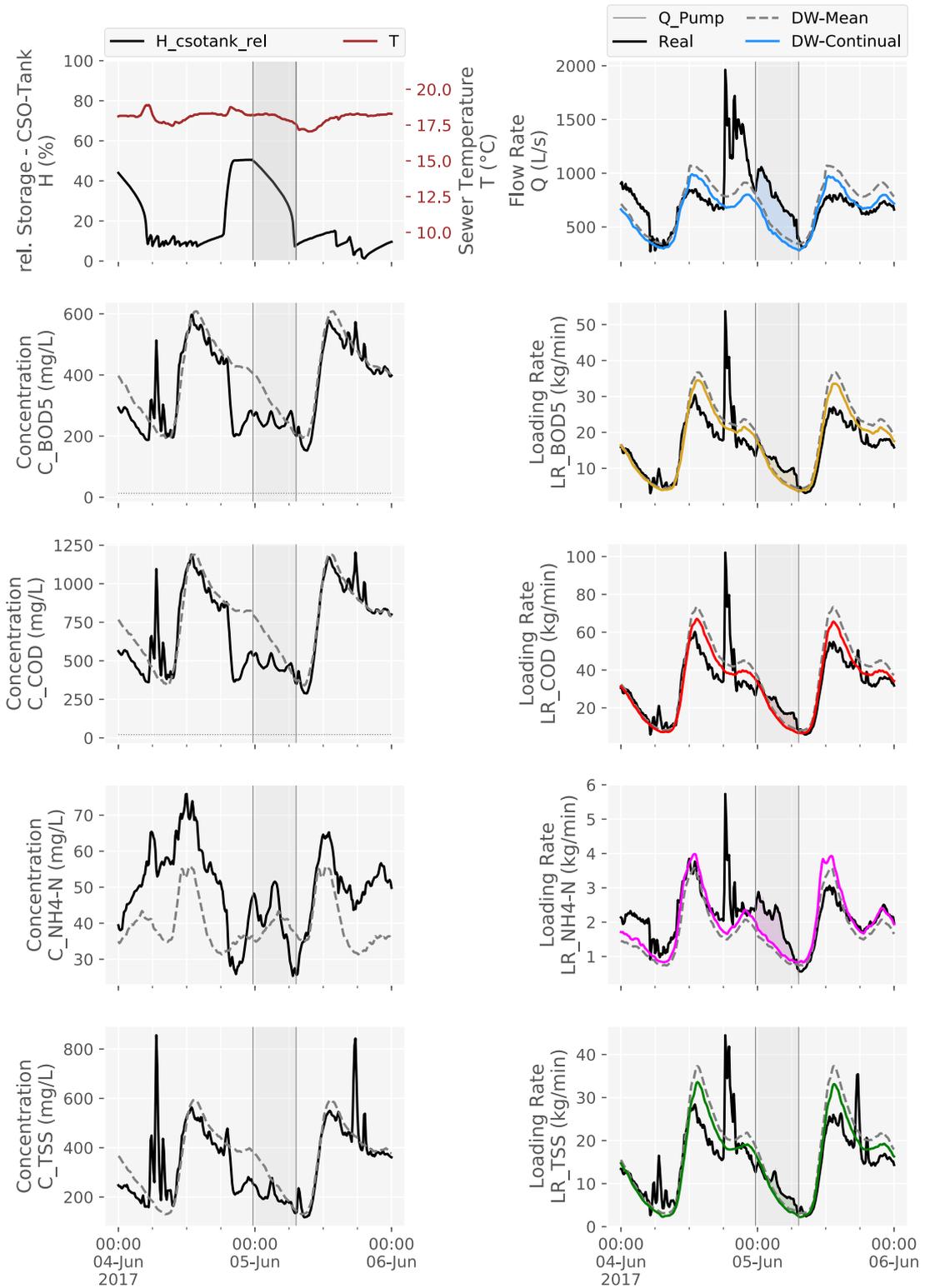


Abbildung D-23: Entleerungsereignis am 2017-06-04

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-07

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Mittwoch 2017-06-07 07:06 und Mittwoch 2017-06-07 11:20 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 4.2 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 3.6 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 10. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-07 06:20 und das Ende mit 2017-06-07 11:26 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2 290 kg, für den BSB₅ bei 852 kg, für den AFS bei 2 540 kg und für den NH₄-N bei 58 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 8 570 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 267 mg/L, für den BSB₅ von 99 mg/L, für den AFS von 296 mg/L und für den NH₄-N bei 7 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 40.3 %.

Tabelle D-24: Entleerungsereignis am 2017-06-07 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	-46	2 120	6 540	1 740	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	8 570	-	10 200	-
CSB	-1 190	2 000	5 540	2 290	267	6 110	598
BSB ₅	-775	667	2 280	852	99	2 800	274
AFS	661	2 390	4 270	2 540	296	4 100	401
NH ₄ -N	-16	372	875	58	7	-	-

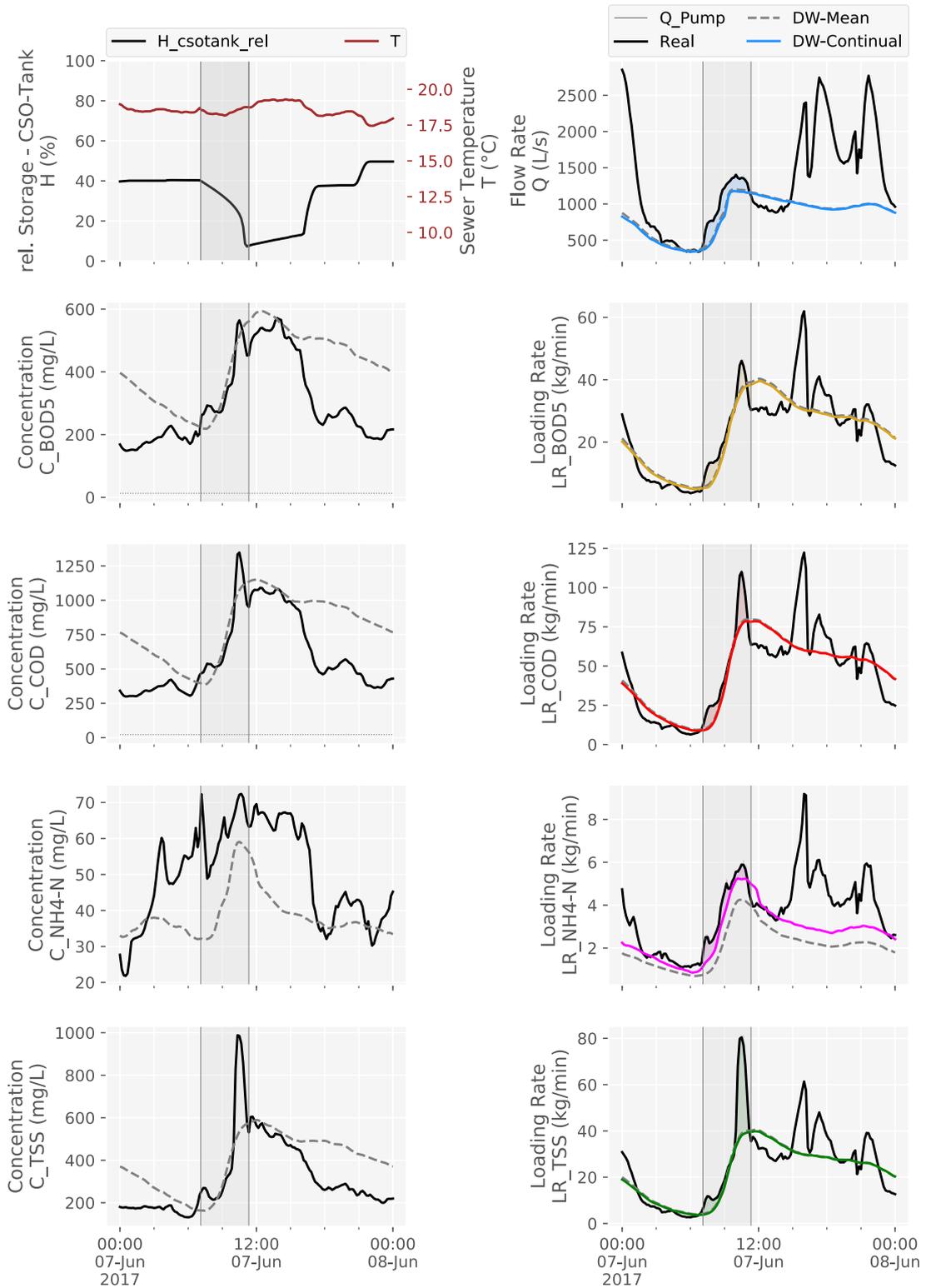


Abbildung D-24: Entleerungsereignis am 2017-06-07

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-08

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-06-08 07:08 und Donnerstag 2017-06-08 16:05 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 8.0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 7.5 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 11. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-08 07:05 und das Ende mit 2017-06-08 16:20 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 66 kg, für den BSB₅ bei 403 kg, für den AFS bei 174 kg und für den NH₄-N bei 467 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 10 900 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 6 mg/L, für den BSB₅ von 37 mg/L, für den AFS von 16 mg/L und für den NH₄-N bei 43 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 49.8 %.

Tabelle D-25: Entleerungsereignis am 2017-06-08 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	865	6 260	11 600	5 780	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	10 900	-	12 800	-
CSB	-4 930	493	6 670	66	6	5 680	444
BSB ₅	-2 100	333	3 300	403	37	3 290	258
AFS	-2 750	353	3 440	174	16	2 200	172
NH ₄ -N	119	1 050	1 910	467	43	-	-

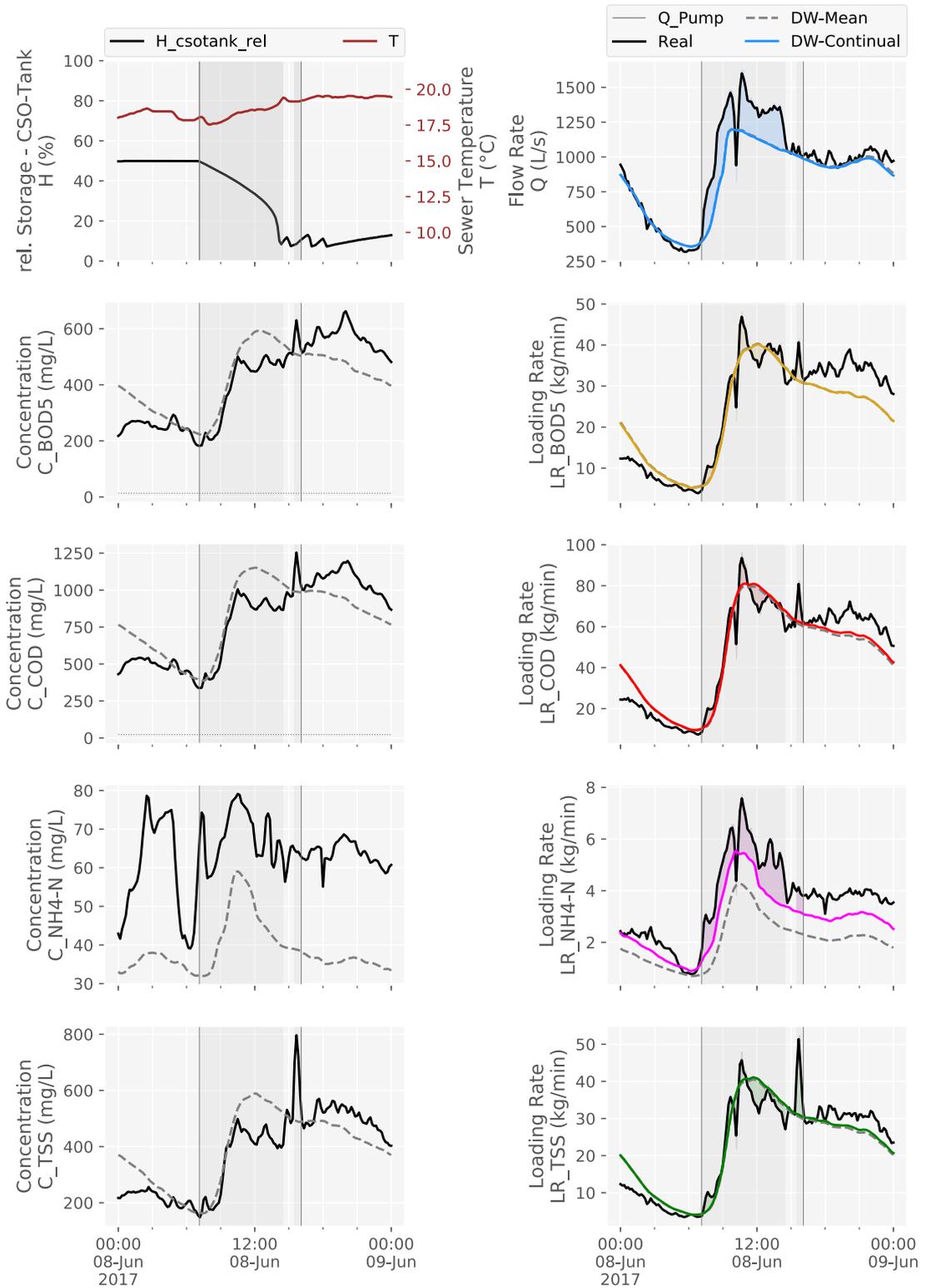


Abbildung D-25: Entleerungsereignis am 2017-06-08

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-10

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Samstag 2017-06-10 13:33 und Sonntag 2017-06-11 11:41 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 16.2 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 1.0 Tage 23.0 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 12. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-10 15:59 und das Ende mit 2017-06-11 05:29 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2 430 kg, für den BSB₅ bei 1 500 kg, für den AFS bei 1 270 kg und für den NH₄-N bei 142 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 15 700 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 154 mg/L, für den BSB₅ von 95 mg/L, für den AFS von 81 mg/L und für den NH₄-N bei 9 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 68.6 %.

Tabelle D-26: Entleerungsereignis am 2017-06-10 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	12 600	19 000	25 300	21 000	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	15 700	-	16 400	-
CSB	-6 790	2 180	10 800	2 430	154	2 870	176
BSB ₅	-2 390	1 510	5 360	1 500	95	2 040	125
AFS	-3 730	975	4 540	1 270	81	385	24
NH ₄ -N	-28	709	1 460	142	9	-	-

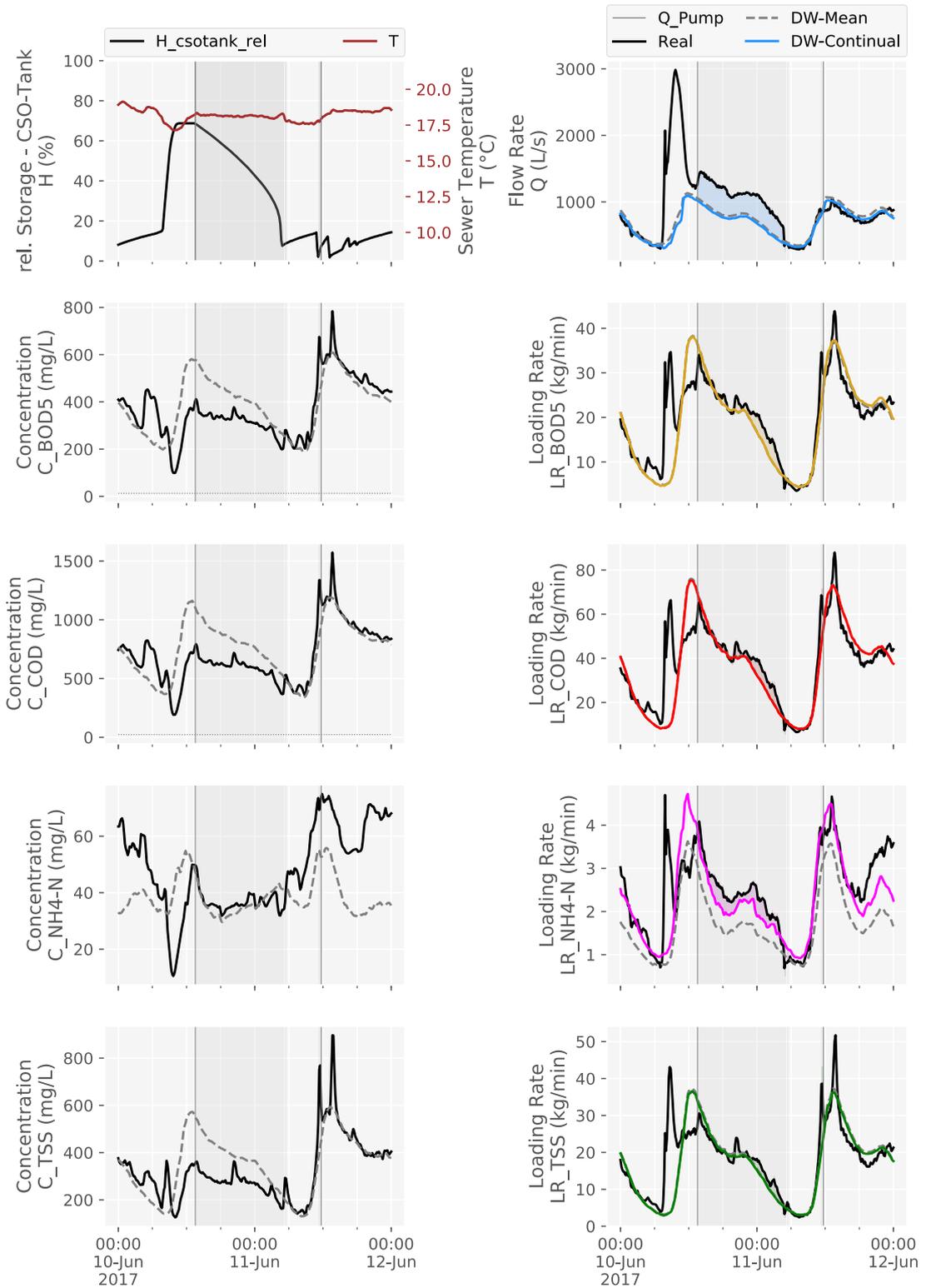


Abbildung D-26: Entleerungsereignis am 2017-06-10

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-13

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Dienstag 2017-06-13 07:13 und Dienstag 2017-06-13 19:35 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 10.5 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 5.8 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 13. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-13 07:12 und das Ende mit 2017-06-13 17:00 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 3 150 kg, für den BSB₅ bei 1 900 kg, für den AFS bei 1 690 kg und für den NH₄-N bei 526 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 14 500 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 218 mg/L, für den BSB₅ von 131 mg/L, für den AFS von 117 mg/L und für den NH₄-N bei 36 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 60.0 %.

Tabelle D-27: Entleerungsereignis am 2017-06-13 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	3 910	10 300	16 500	11 300	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	14 500	-	15 300	-
CSB	-3 210	3 330	11 500	3 150	218	4 240	277
BSB ₅	-589	2 490	6 220	1 900	131	3 090	201
AFS	-2 530	1 570	5 280	1 690	117	659	43
NH ₄ -N	158	1 330	2 380	526	36	-	-

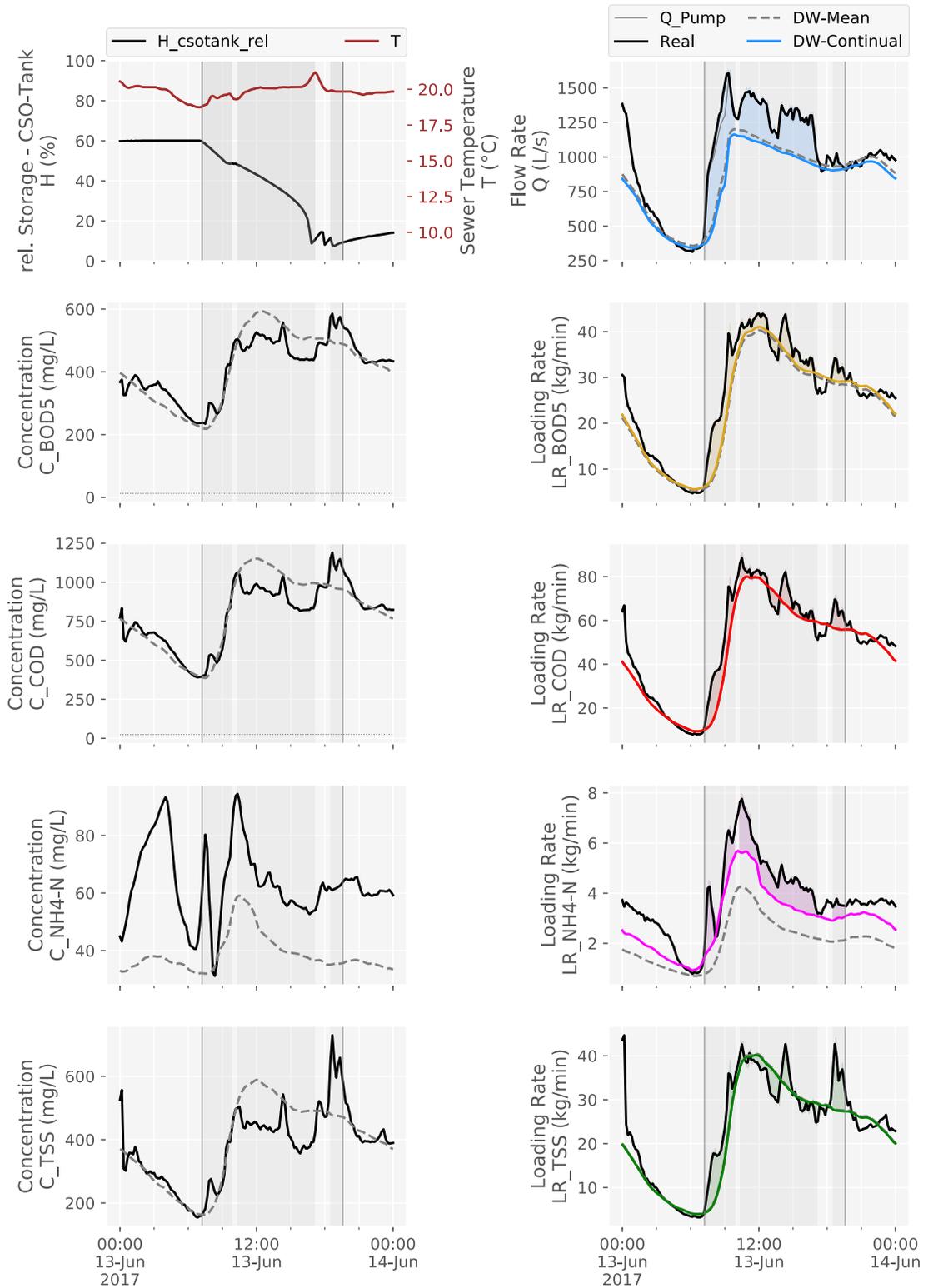


Abbildung D-27: Entleerungsereignis am 2017-06-13

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-23

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Freitag 2017-06-23 17:41 und Samstag 2017-06-24 20:29 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 20.2 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 10.0 Tage nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 14. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-23 23:08 und das Ende mit 2017-06-24 18:06 definiert.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 11 200 kg, für den BSB₅ bei 5 620 kg, für den AFS bei 6 200 kg und für den NH₄-N bei 1 030 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 24 700 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 452 mg/L, für den BSB₅ von 228 mg/L, für den AFS von 251 mg/L und für den NH₄-N bei 42 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 81.7 %.

Tabelle D-28: Entleerungsereignis am 2017-06-23 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	17 100	27 800	38 800	25 500	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	24 700	-	21 000	-
CSB	3 950	14 600	26 700	11 200	452	12 000	571
BSB ₅	2 710	7 590	13 100	5 620	228	6 560	313
AFS	2 400	7 490	13 300	6 200	251	4 670	223
NH ₄ -N	673	1 830	2 930	1 030	42	-	-

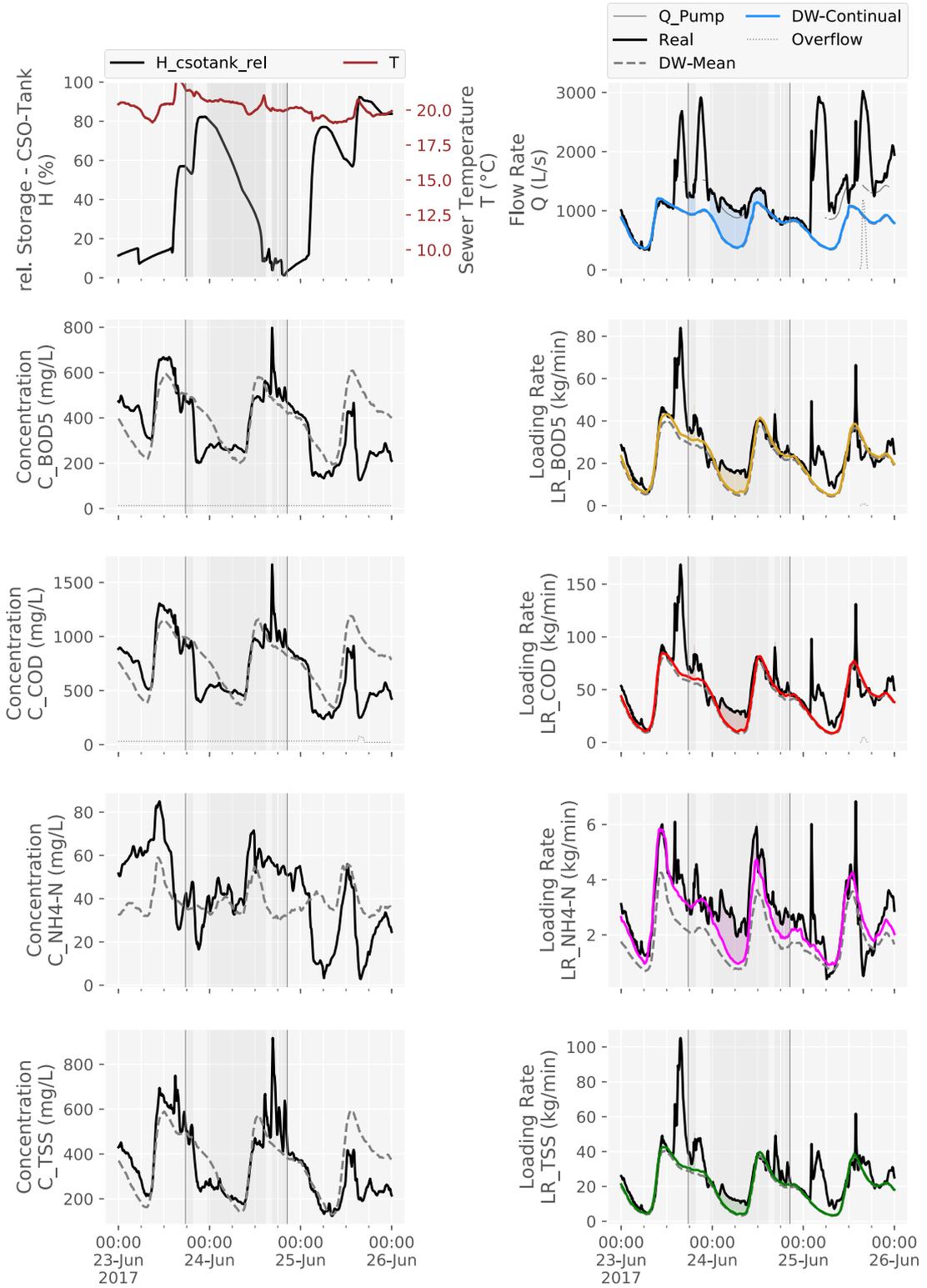


Abbildung D-28: Entleerungsereignis am 2017-06-23

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-25

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Sonntag 2017-06-25 06:56 und Montag 2017-06-26 23:54 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 26.7 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 16.7 Stunden nicht geregnet.

Dieses Ereignis hat in der Referenz-Publikation (Hofer *et al.*, 2017) die Nummer 15. Bei der manuellen Auswertung wurde der Start bei diesem Ereignis mit 2017-06-25 18:53 und das Ende mit 2017-06-26 23:21 definiert.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 6 180 kg, für den BSB₅ bei 3 510 kg, für den AFS bei 3 710 kg und für den NH₄-N bei 92 kg. Auf das Entleerungsvolumen von 25 400 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 244 mg/L, für den BSB₅ von 138 mg/L, für den AFS von 146 mg/L und für den NH₄-N bei 4 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei 89.8 %.

Tabelle D-29: Entleerungsereignis am 2017-06-25 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehende TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Min	Mittel	Max	Fracht	Konzentr.	Ref-Fracht	Ref-Konzentr.
Q=f(Q)	37 400	50 900	64 400	49 700	-	-	-
Q=f(H)	-	-	-	25 400	-	22 700	-
CSB	-8 200	6 930	22 700	6 180	244	7 970	350
BSB ₅	-3 190	4 010	11 300	3 510	138	4 710	207
AFS	-4 050	3 800	11 400	3 710	146	1 720	76
NH ₄ -N	-527	664	2 720	92	4	-	-

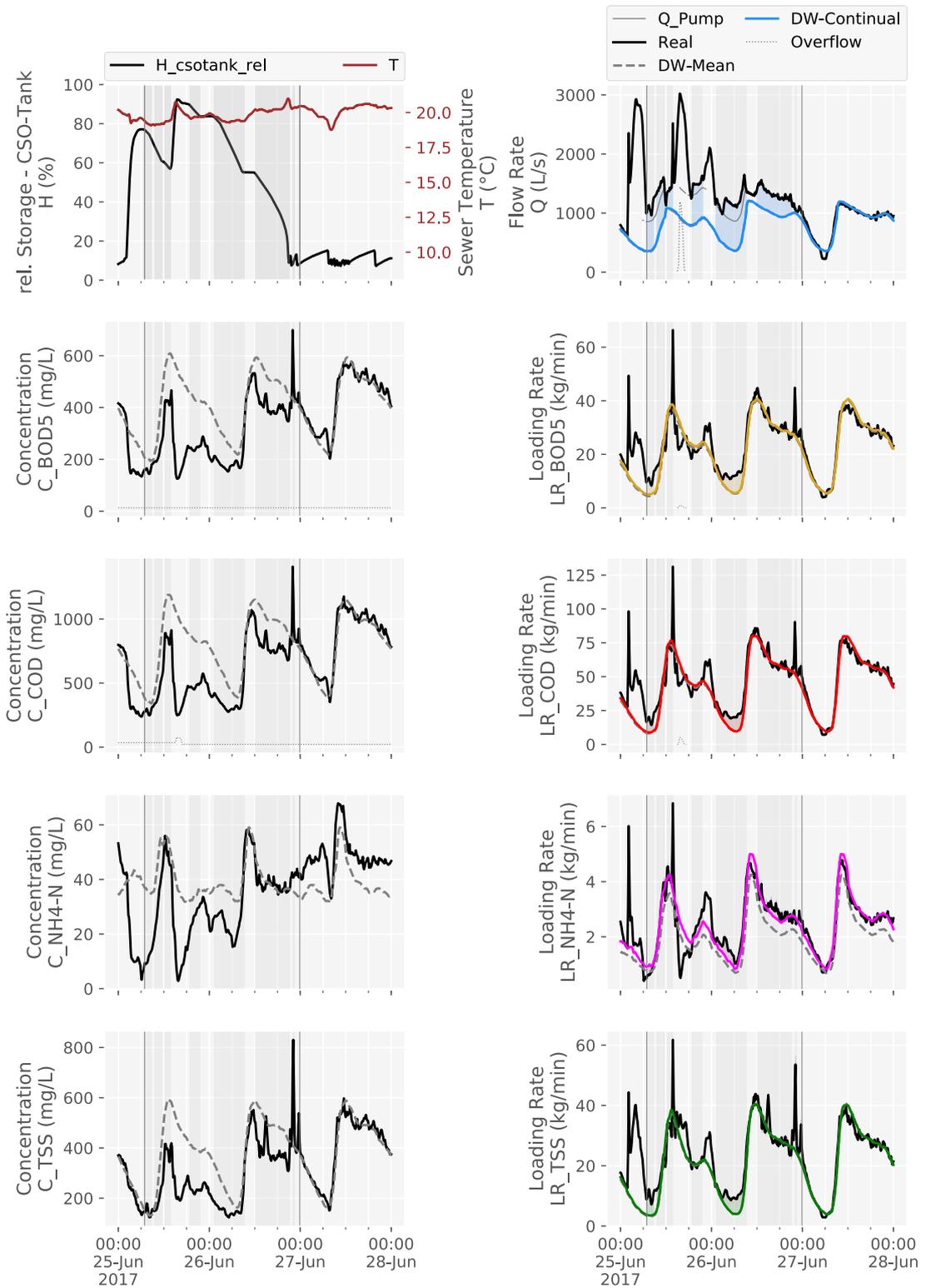


Abbildung D-29: Entleerungsereignis am 2017-06-25

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-06-29

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-06-29 05:02 und Freitag 2017-06-30 10:06 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 26,4 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 2,0 Tage 7,7 Stunden nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung **D-30** im Detail dargestellt.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 12,3 t, für den BSB₅ bei 7,2 t, für den AFS bei 4,6 t und für den NH₄-N bei 1,0 t (siehe Tab. **D-30**). Auf das Entleerungsvolumen von 23 000 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 532 mg/L, für den BSB₅ von 314 mg/L, für den AFS von 200 mg/L und für den NH₄-N von 43 mg/L.

Der Entleerungsvorgang wurde bei diesem Ereignis einmal unterbrochen, worauf der temporäre horizontale Verlauf des Wasserhöhenstands im MÜB hinweist. Die Entleerung begann bei einem relativen Höhenstand des MÜB von rund 80 %. Am Ende der Entleerung konnte wieder ein deutlicher „last-flush“-Effekt bei den Kohlenstoff-Parametern und beim AFS festgestellt werden und wurde zur Ereignisauswertung wieder hinzugefügt. Die angewandte Methode konnte jedoch die zwei darauf nachfolgenden Konzentrationsspitzen dann nicht mehr erkennen, weshalb diese beiden dann unberücksichtigt blieben.

Tabelle D-30: Entleerungsereignis am 2017-06-29 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte			Autom. Methode	
	Mögliche Frachtbereiche			Fracht	Konzentr.
	Min	Mittel	Max		
Q= f(ΔQ)	15 400	28 400	42 800	29 700	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	23 000	-
CSB	-432	13 900	29 900	12 300	532
BSB₅	2 240	9 110	16 500	7 220	314
AFS	-2 650	4 730	12 400	4 590	200
NH₄-N	-76	1 970	4 020	1 000	44

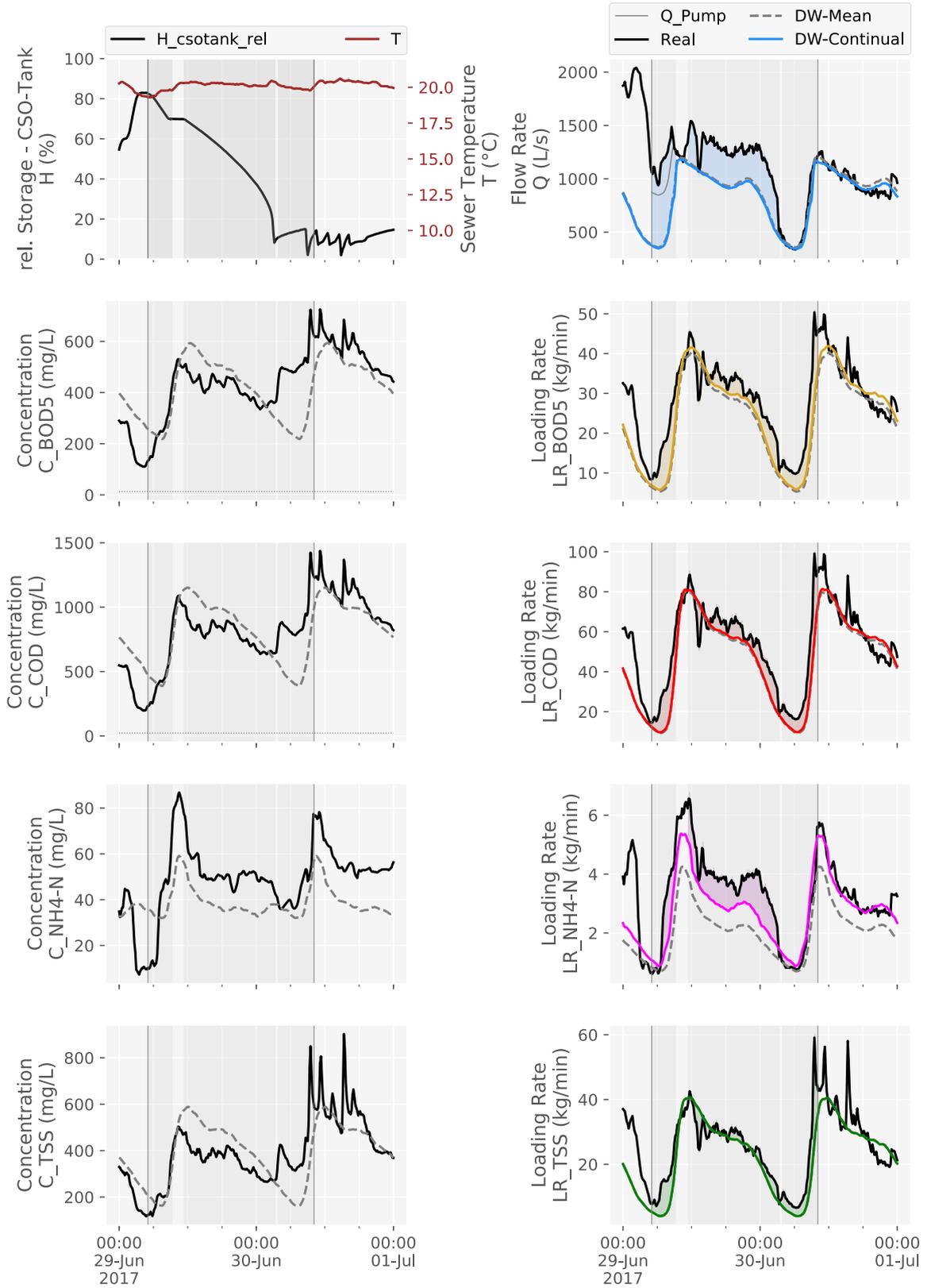


Abbildung D-30: Entleerungsereignis am 2017-06-29

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-07-02

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Sonntag 2017-07-02 03:23 und Sonntag 2017-07-02 22:45 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 14,6 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 2 Tage 0 Stunden nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung **D-31** im Detail dargestellt.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 2,9 t, für den BSB₅ bei 2,6 t, für den AFS bei 0,7 t und für den NH₄-N bei ca. 71 kg (siehe Tab. **D-31**). Auf das Entleerungsvolumen von 18 600 m³ bezogen ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 157 mg/L, für den BSB₅ von 139 mg/L, für den AFS von 39 mg/L und für den NH₄-N von 4 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Entleerungsbeginn lag bei ca. 90 %. Da das MÜB durch das Mischwasserereignis bereits vollständig gefüllt wurde, gab es bei diesem Ereignis auch eine Entlastung in den Vorfluter aus dem MÜB. Zwei Zeitbereiche wurden bei diesem Ereignis aus der Auswertung entfernt, da aufgrund der erhöhten Durchflussrate ($> Q_{Pumpen}$) der Einfluss aus dem Kanal zu groß war und nachdem zwischen dem Ende der Entleerung und dem auftretenden „last-flush“-Effekt mehr als 8 Stunden vergingen, wurde dieser nicht in die Auswertung miteinbezogen.

Tabelle D-31: Entleerungsereignis am 2017-07-02 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte			Autom. Methode	
	Mögliche Frachtbereiche			Fracht	Konzentr.
	Min	Mittel	Max		
Q = f(ΔQ)	22 100	31 500	40 400	31 500	-
Q = f(ΔH)	-	-	-	18 600	-
CSB	-4 980	4 280	15 800	2 910	157
BSB₅	-1 090	2 940	8 230	2 590	139
AFS	-4 730	753	5 370	721	39
NH₄-N	-179	542	1 530	71	4

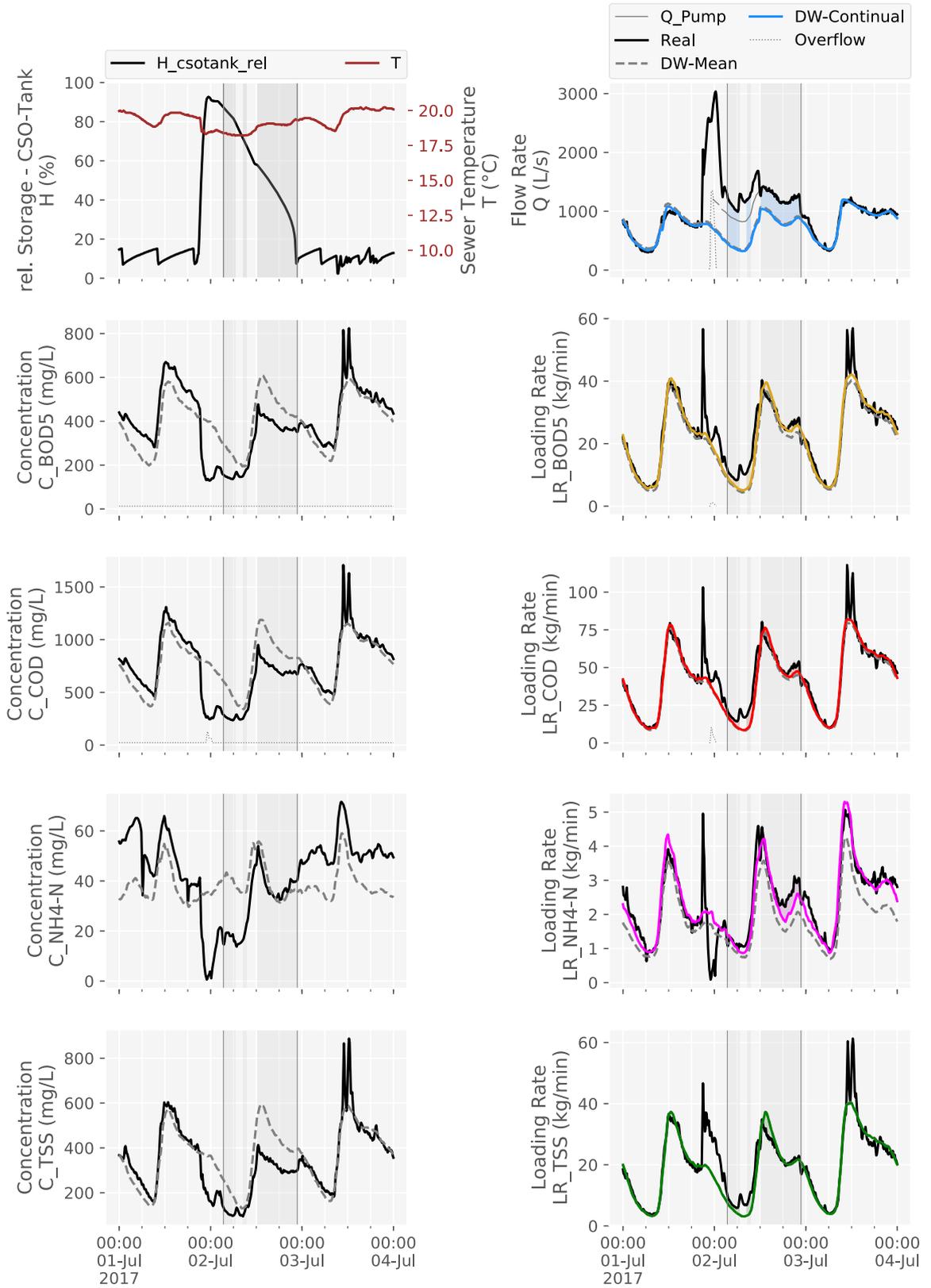


Abbildung D-31: Entleerungsereignis am 2017-07-02

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-07-06

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Donnerstag 2017-07-06 20:06 und Freitag 2017-07-07 21:36 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 16,8 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 3,0 Tage nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung [D-32](#) im Detail dargestellt.

Die automatisch ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 7,3 t, für den BSB₅ bei 4,1 t, für den AFS bei 4,5 t und für den NH₄-N bei 0,6 t (siehe Tab. [D-32](#)). Auf das Entleerungsvolumen von 23 700 m³ bezogen ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 306 mg/L, für den BSB₅ von 173 mg/L, für den AFS von 188 mg/L und für den NH₄-N von 25 mg/L.

Der erste Teil der Entleerung fand bereits bei einem relativen Füllungsgrad des MÜB von ca. 57 % statt und es wurden dabei nur ca. 5 % entleert. Dann folgte eine weitere Belastung aus dem Kanal und eine weitere Füllung des MÜB. Die Hauptentleerung begann dann bei ca. 70 %. Kurz nach der Entleerung wurde das MÜB wieder bis ca. 30 % gefüllt und kurze Zeit später vollkommen entleert. Aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen diesen drei Entleerungen wurden diese zu einem Ereignis zusammengefasst. Es konnten mehrere „first-flush“-Effekte erkannt werden. Da diese jedoch bei einer hohen Durchflussrate im Kanal auftraten, wurden sie nicht in die Auswertungen miteinbezogen. Weiters konnte ein „last-flush“-Effekt bei den Kohlenstoff-Parametern und beim AFS festgestellt werden, weshalb dieser dem Ereignis hinzugerechnet wurde.

Tabelle D-32: Entleerungsereignis am 2017-07-06 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte			Autom. Methode	
	Mögliche Frachtbereiche			Fracht	Konzentr.
	Min	Mittel	Max		
Q= f(ΔQ)	18 100	27 600	36 300	28 400	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	23 700	-
CSB	-1 940	7 950	18 400	7 250	306
BSB₅	964	5 480	10 400	4 090	173
AFS	-1 010	3 870	8 950	4 450	188
NH₄-N	117	1 350	2 710	600	25

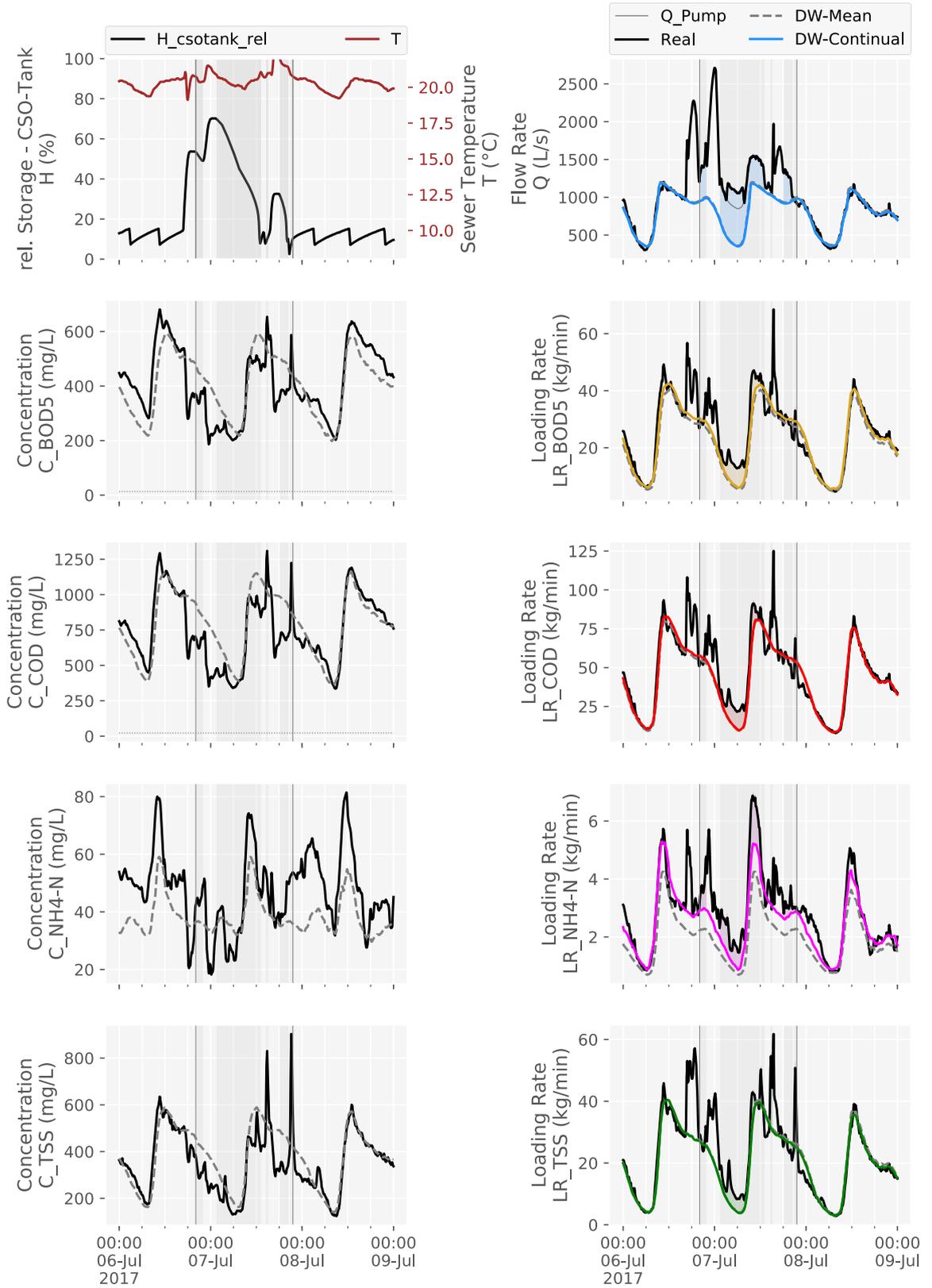


Abbildung D-32: Entleerungsereignis am 2017-07-06

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-07-12

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Mittwoch 2017-07-12 03:18 und Donnerstag 2017-07-13 07:15 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 19,9 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 4,0 Tage nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung **D-33** im Detail dargestellt.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 5,6 t, für den BSB₅ bei 2,7 t, für den AFS bei 2,5 t und für den NH₄-N bei 1,0 t (siehe Tab. **D-33**). Auf das Entleerungsvolumen von 25 300 m³ bezogen, ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 223 mg/L, für den BSB₅ von 106 mg/L, für den AFS von 99 mg/L und für den NH₄-N von 41 mg/L.

Die erste Entleerung fand bei einem relativen Füllungsgrad des MÜB von ca. 80 % statt. Das MÜB wurde kurz nach der Entleerung wieder bis 50 % gefüllt und danach dann wieder entleert. Aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen diesen beiden Entleerungen, wurden diese zu einem Ereignis zusammengefasst. Kurz nach dem ersten Entleerungsstart wurde ein Zeitbereich mit erhöhter Durchflussrate aus der Auswertung entfernt. Um ca. 18:00 Uhr ist eine Konzentrationsspitze bei den Kohlenstoffparametern zu erkennen. Bei diesem Ereignis konnte kein „last-flush“-Effekt festgestellt werden.

Tabelle D-33: Entleerungsereignis am 2017-07-12 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte			Autom. Methode	
	Mögliche Frachtbereiche			Fracht	Konzentr.
	Min	Mittel	Max		
Q= f(ΔQ)	21 200	29 500	37 900	30 700	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	25 300	-
CSB	-8 060	3 580	13 100	5 650	223
BSB₅	-2 480	2 820	7 530	2 680	106
AFS	-4 210	1 500	6 150	2 510	99
NH₄-N	423	1 940	3 320	1 040	41

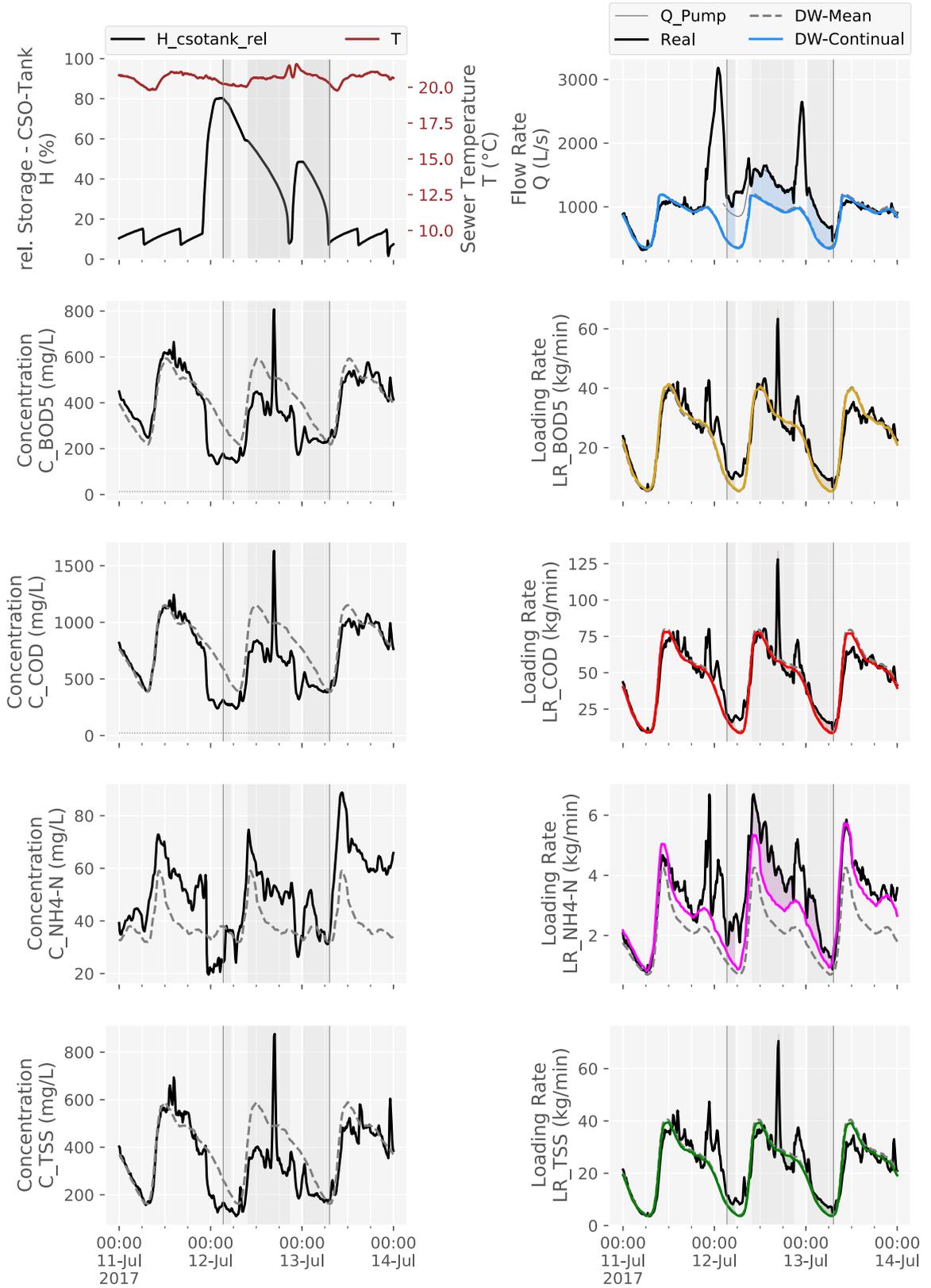


Abbildung D-33: Entleerungsereignis am 2017-07-12

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-07-24

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Montag 2017-07-24 19:42 und Dienstag 2017-07-25 21:57 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 20,6 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 3,0 Tage nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung [D-34](#) im Detail dargestellt.

Die automatisierten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 1,9 t, für den BSB₅ bei 1,5 t und für den NH₄-N bei ca. 45 kg (siehe Tab. [D-34](#)). Auf das Entleerungsvolumen von 21 900 m³ bezogen ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 86 mg/L, für den BSB₅ von 69 mg/L und für den NH₄-N bei 2 mg/L.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den AFS im negativen Bereich, was bei diesem Ereignis zu einer ungünstigen Bewertung führte. Ein Grund für dieses Ergebnis könnte sein, dass während dieses Entleerungsereignisses ein zu hohes TW-Level und damit auch ein zu hohes TW-Kontinuum angenommen wurde, wodurch die AFS-TW-Fracht größer als die gesamte Ereignisfracht wurde. Außerdem wies das entleerte Mischwasser bei diesem Ereignis nur eine relativ geringe Verschmutzung auf. Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Ereignisstart betrug ca. 90 %. Da das MÜB durch das Mischwasserereignis bereits vollständig gefüllt wurde, gab es auch bei diesem Ereignis eine kurzzeitige Entlastung aus dem MÜB in den Vorfluter. Am Ende der Entleerung konnte wieder ein deutlicher „last-flush“-Effekt bei den Kohlenstoffparametern und beim AFS festgestellt werden und wurde daher zum Ereignis wieder hinzugerechnet.

Tabelle D-34: Entleerungsereignis am 2017-07-24 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L

	Abgeschätzte			Autom. Methode	
	Mögliche Frachtbereiche			Fracht	Konzentr.
	Min	Mittel	Max		
Q= f(ΔQ)	22 200	32 100	42 000	36 000	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	21 900	-
CSB	-16 300	-2 750	7 610	1 880	86
BSB₅	-6 270	-109	4 990	1 520	69
AFS	-9 510	-3 020	2 550	-1 270	-58
NH₄-N	-279	934	2 680	45	2

D. Automatisierte Ereignisauswertung

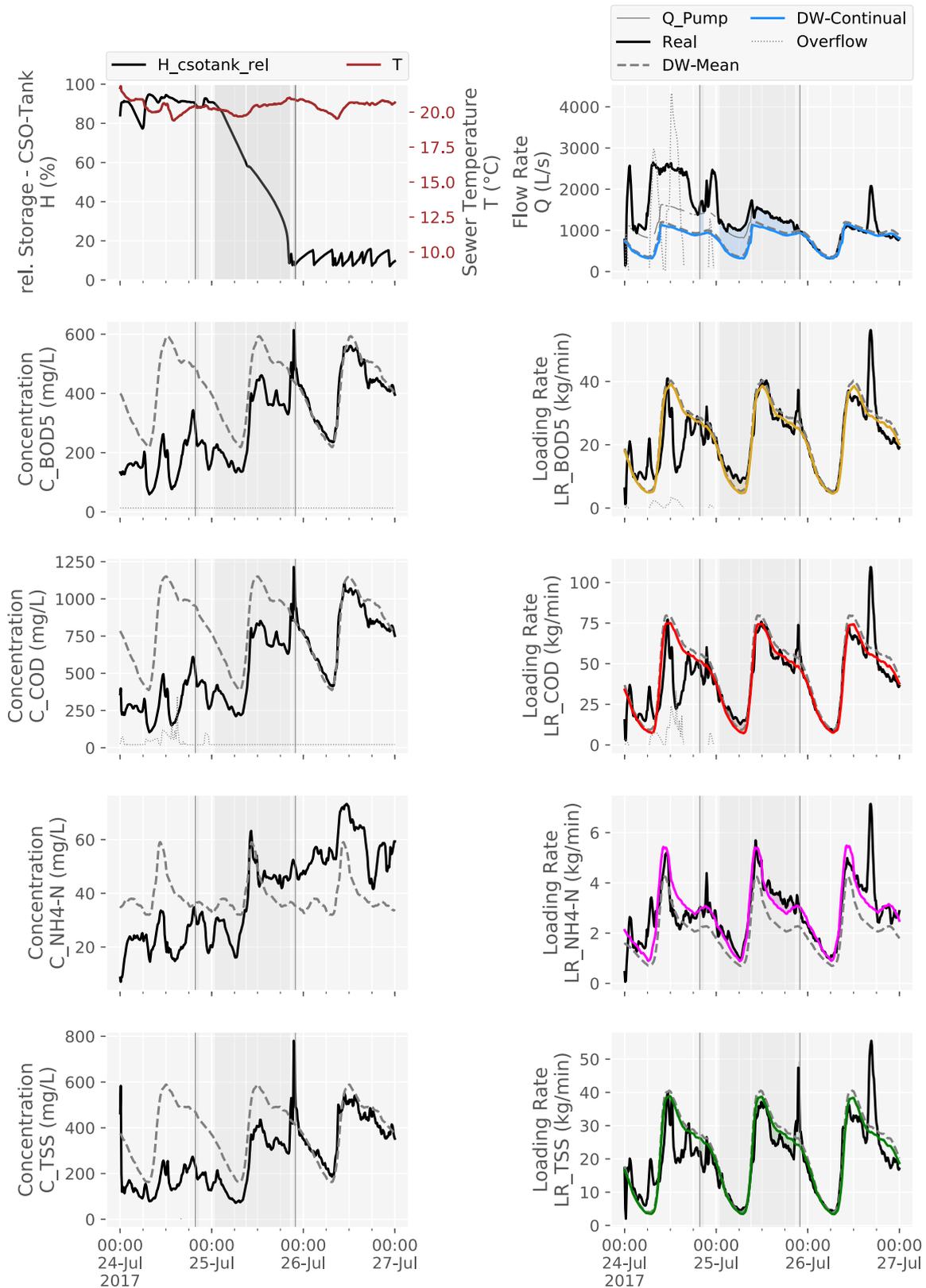


Abbildung D-34: Entleerungsereignis am 2017-07-24

ZSK-Entleerungsereignis am 2017-07-28

Die Entleerung fand bei diesem Ereignis zwischen Freitag 2017-07-28 22:56 und Samstag 2017-07-29 02:59 statt. Insgesamt dauerte die Entleerung 4,0 Stunden. Vor dem dazugehörigen Niederschlagsereignis hatte es insgesamt 2,0 Tage 4,7 Stunden nicht geregnet. Das Ereignis ist in Abbildung **D-35** im Detail dargestellt.

Die automatisiert ausgewerteten ZSK-Entleerungsfrachten lagen für den CSB bei 0,7 t, für den BSB₅ bei 0,5 t, für den AFS bei 0,2 t und für den NH₄-N bei 0,3 t (siehe Tab. **D-35**). Auf das Entleerungsvolumen von 8 390 m³ bezogen ergaben sich daraus Konzentrationen für den CSB von 89 mg/L, für den BSB₅ von 64 mg/L, für den AFS von 29 mg/L und für den NH₄-N bei 31 mg/L.

Der relative Füllungsgrad des MÜB beim Ereignisstart lag bei ca. 40 %. Bei diesem Ereignis konnte kein „last-flush“-Effekt festgestellt werden.

Tabelle D-35: Entleerungsereignis am 2017-07-28 - Die angegebenen abgeschätzten Frachten beziehen sich jeweils auf die Parameter des TW-Tagesgangs. Dabei wird das ausgewiesene abgeschätzte Frachtminimum auf Basis der durchgehenden TW-Obergrenze ermittelt. Analog wird die maximale abgeschätzte Fracht auf Basis der durchgehenden TW-Untergrenze und die mittlere Fracht auf Basis des TW-Mittels berechnet. Stofffrachten in kg, Volumen in m³ und Konzentrationen in mg/L.

	Abgeschätzte			Autom. Methode	
	Mögliche Frachtbereiche			Fracht	Konzentr.
	Min	Mittel	Max		
Q= f(ΔQ)	1 320	3 580	5 550	4 820	-
Q= f(ΔH)	-	-	-	8 390	-
CSB	-1 730	276	1 940	747	89
BSB₅	-545	464	1 390	535	64
AFS	-1 060	-161	691	247	29
NH₄-N	153	434	695	260	31

D. Automatisierte Ereignisauswertung

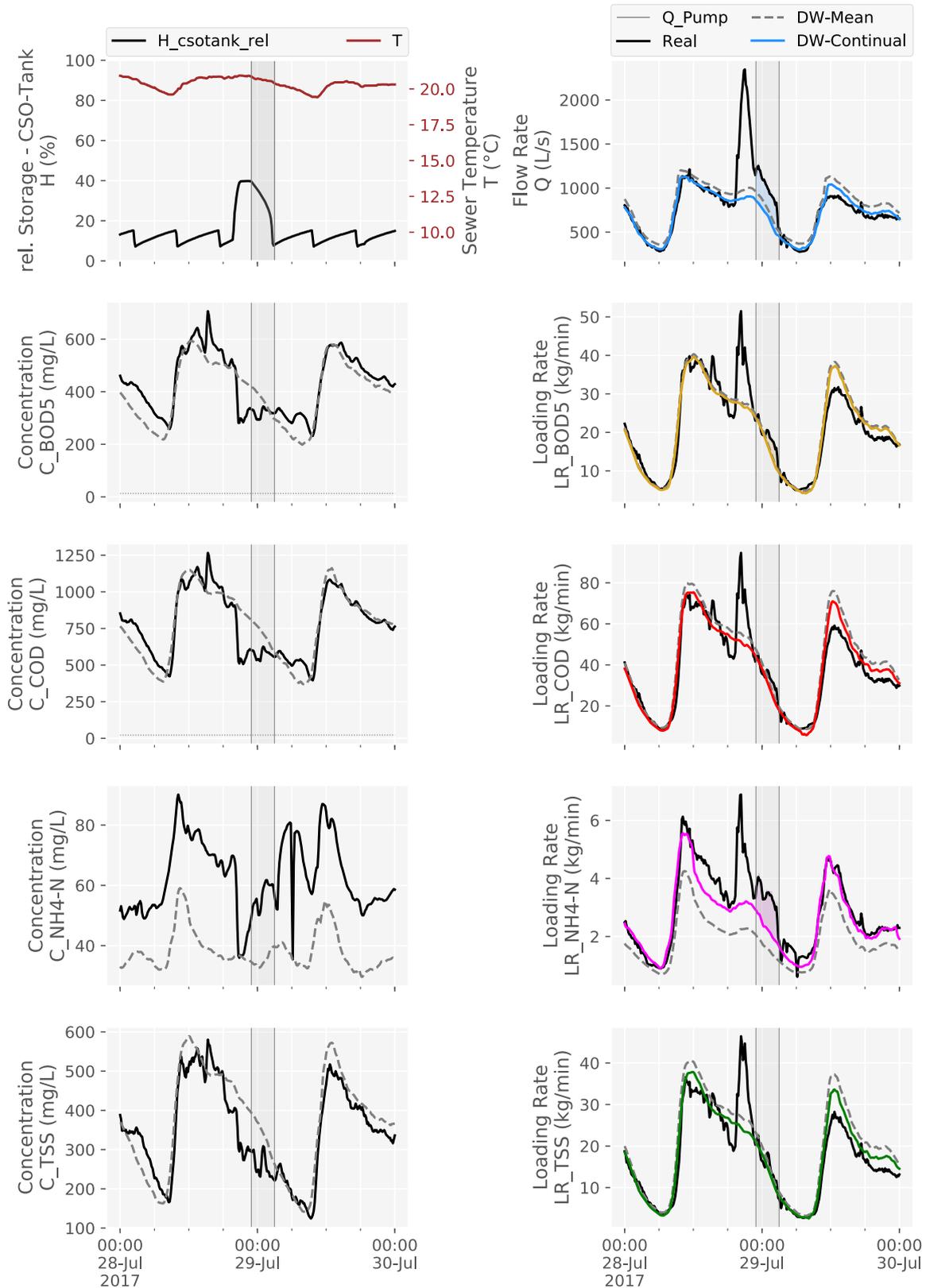


Abbildung D-35: Entleerungsereignis am 2017-07-28