



Theresa Felder, BSc

Sensitivitätsanalyse eines Temperaturentnahmемodells im Kanalsystem der Stadt Graz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/In

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla

Mitbetreuende Assistenten:

Dipl.-Ing. Stefan Reinstaller

Dipl.-Ing. Markus Pichler

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, März 2021

Kontakt:
Theresa Felder
theresa.felder@outlook.com

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.

31.3.2021

Datum / Date

Theresa Felder

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Zeit im Studium begleitet, unterstützt und motiviert haben.

Als erstes möchte ich mich bei meinen Betreuern Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Mutschalla und Dipl.-Ing. Stefan Reinstaller für die Ermöglichung meiner Masterarbeit bedanken. Dabei möchte ich Dipl.-Ing. Stefan Reinstaller besonders hervorheben, da er sich bei allen Fragen immer Zeit für mich genommen hat. Des Weiteren möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Markus Pichler und David Camhy für die hilfreichen Informationen zur Programmierung und Datenverarbeitung bedanken. Für das zur Verfügung stellen der Grundlagen und Messdaten des Projekts „Karte thermischer Energie aus Abwasser“ möchte ich ganz herzlich der Holding Graz Wasserwirtschaft danken.

Ein weiterer Dank ergeht an alle des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, die an den Lehrveranstaltungen im Laufe meines Studiums mitgewirkt haben und das Interesse für die Siedlungswasserwirtschaft in mir geweckt haben.

Danke sagen möchte ich auch allen Freunden und Studienkollegen, die mich im Laufe des Studiums begleitet haben. Ein besonderer Dank ergeht dabei an Johannes für die vielen gemeinsamen Lernstunden, die wir schon seit der HTL miteinander verbringen durften und die Erlebnisse während dieser Zeit.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Familie für ihre Hilfe in all den Jahren bedanken. Ein großer Dank gilt meinen Eltern, die mir mit ihrer Unterstützung das Studium ermöglicht haben und immer für mich da waren. Danke auch an Marion und Hubert, die mich stets wie meine eigene Familie unterstützt haben. Ein besonders großes Dankeschön geht an meinen Freund Nicholas, der zusammen mit mir seit Beginn die Höhen und Tiefen des Studiums durchgestanden hat und eine große Stütze in meinem Leben ist. Danke für die unvergessliche Zeit mit dir, deine große Geduld und deine Unterstützung während des Studiums.

Kurzfassung

Neue Technologien und Alternativen zur Energiegewinnung sind ein wichtiger Schritt zur CO₂-neutralen Energieerzeugung. Im Bereich der Raumheizung und Warmwasseraufbereitung bietet die Energiegewinnung aus Abwasser ein großes Potential. Aufbauend auf das entwickelte Temperaturmodell einer früheren Arbeit, zur Ermittlung des hydraulischen Verhaltens und der Veränderung der Abwassertemperatur durch Wärmeaustauschprozesse in einem Kanalsystem, wird in der vorliegenden Arbeit eine Sensitivitätsanalyse des Modells durchgeführt.

Dazu werden mithilfe von Temperaturdaten, die an unterschiedlichen Standpunkten im Grazer Kanalsystem erhoben wurden, Zusammenhänge im Temperaturverlauf identifiziert und das Verhalten der Abwasser-, Kanalluft- und Bodentemperatur untersucht. Anschließend wird das Temperaturmodell mit mehreren verschiedenen Szenarien untersucht.

Daraus resultierend konnte festgestellt werden, dass die Abwassertemperatur in den Zuflüssen die maßgebende Größe für die Temperaturentwicklung im Kanalsystem ist. Weiters wird beobachtet, dass bei sehr kleinen Durchflüssen der Wärmeaustauschprozess zwischen Abwasser und Kanalluft der Maßgebende ist. Infolgedessen sinkt der Einfluss des Wärmeaustauschs mit der Umwelt bei hohen Durchflussraten und nimmt wiederum mit der Länge des Kanalnetzes zu.

Dies bedeutet für eine Energieentnahme im Kanal, dass sich das abgekühlte Abwasser nach der Entnahme von Wärme, oder das erwärmte Abwasser nach einer Zufuhr von Wärme, durch den Wärmeaustausch mit der Umwelt nur langsam wieder erwärmt oder abkühlt. Die Temperatur des Abwassers nach einer Wärmeentnahme oder -zufuhr wird hauptsächlich durch weitere Zuflüsse maßgeblich verändert.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit kann in einem nächsten Schritt die Kalibrierung des Temperaturmodells durchgeführt werden. Daraus folgend kann das größtmögliche Potential einer Energiegewinnung aus dem Abwasser in Graz, durch die Auswahl der bestgeeigneten Standorte, gewonnen werden.

Abstract

New technologies and alternatives for the generation of energy are fundamental for an overall CO₂-neutral energy production. In terms of space heating and domestic hot water generation the heat recovery from wastewater is one option with a big rarely used potential. A novel temperature model was developed in a previous master thesis with the focus on the heat transfer processes in a sewer system. This model assesses the hydraulic performance and the changing temperature of the wastewater throughout a sewer system under the influence of a heat recovery. Based on the temperature model, in this master thesis a sensitivity analysis of the model is performed.

For this purpose, measured data of temperatures in the sewer system of Graz are evaluated by identifying the properties of the wastewater-, in-sewer air- and soil temperature and the relations in the temperature profiles. Additionally, the temperature model is analyzed by multiple scenarios.

This leads to the conclusion, that the wastewater temperature of the inflows could be identified as the leading variable for the temperature development in the sewer system. Furthermore, in smaller flow rates the heat transfer process between wastewater and in-sewer air is dominant. The effect of the heat transfer process with the environment decreases with an increasing flow rate and increases with the length of the sewer network.

For a heat recovery out of wastewater this means that the cooled wastewater after the extraction of thermal energy, or the heated wastewater after supplying thermal energy, is slowly heated or cooled through the heat exchange with the environment. Whereas the main temperature changes of the wastewater occur through further inflows.

Based on the results of this work the next step could be the calibration of the temperature model. Finally, the highest possible potential of using wastewater as a source of energy in Graz, by selecting the most suitable locations, can be obtained.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung.....	4
2	Grundlagen	5
2.1	Technische Grundlagen	5
2.1.1	Unterscheidung Wärmeentnahmestelle.....	6
2.1.2	Unterscheidung Wärmetauscherbauart	7
2.1.3	Unterscheidung Wärmeverteilsysteme	7
2.2	Randbedingungen.....	8
2.2.1	Temperatur auf der Kläranlage.....	8
2.2.2	Abwassertemperatur in der Kanalisation	9
2.2.3	Durchflussmenge in der Kanalisation	10
2.2.4	Eigenschaften des Abwassers	10
2.3	Rechtliche Grundlagen.....	11
2.4	Potential	12
3	Methodik	14
3.1	Situationsanalyse	15
3.1.1	Beschreibung und Aufbau des Temperaturmodells.....	15
3.1.2	Steuerung des Temperaturmodells	18
3.1.3	Beschreibung der Messkampagnen	18
3.2	Analyse der Temperaturdaten.....	20
3.2.1	Datenbereinigung	20
3.2.2	Messstrecke Graz-ARA	20
3.2.3	Messstrecke Graz-Andritz	28
3.2.4	Verhalten der Bodentemperaturen	33
3.2.5	Zusammenfassung	37
3.3	Grundlagen der Sensitivitätsanalyse.....	37
3.3.1	Morris Screening	39
3.3.2	Erstellung der Stichproben	41
3.3.3	Berechnung der Sensitivität.....	42

3.4	Beschreibung der Modellstruktur	42
3.4.1	Kanalstrang ARA	42
3.4.2	Kanalnetz Graz	43
3.4.3	Modellparameter und Wertebereiche	44
3.4.4	Stichprobengröße und Sampling Methode.....	54
3.4.5	Implementierung	56
3.4.6	Simulationsszenarien.....	56
4	Ergebnisse.....	58
4.1	Kanalstrang ARA Szenario A	58
4.2	Kanalstrang ARA Szenario B und C	61
4.3	Kanalstrang ARA Szenario D und E.....	64
4.4	Kanalstrang ARA Szenario F.....	67
4.5	Kanalnetz Graz Szenario G.....	70
5	Diskussion.....	74
6	Schlussfolgerung und Ausblick	76
Anhang A:	Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA	i
Anhang B:	Statistische Kennwerte der Messungen.....	xiii
Anhang C:	Stichprobenausschnitt aus den Simulationen des Kanalstrangs ARA.....	xix
Anhang D:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Seeds	xxi

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Wasserverbrauch von Haushalten nach Art der Verwendung; dunkel: vorwiegend warmes Wasser; hell: vorwiegend kaltes Wasser	2
Abbildung 2-1:	Funktionsweise einer Wärmepumpe (Baunetz Wissen, o. D.).....	5
Abbildung 2-2:	Mögliche Standorte einer Wärmeentnahme aus dem Abwasser; 1: vor Einleitung in die öffentliche Kanalisation; 2: in der Kanalisation; 3: im Ablauf der ARA (Bischofsberger & Seyfried, 1984).....	6
Abbildung 2-3:	Arten der Wärmeverteilsysteme; links: kalte Fernwärme; rechts: warme Fernwärme (Bundesverband WärmePumpe, 2005)	7
Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung zur Vorgehensweise dieser Arbeit: zu Beginn eine Grundlagenrecherche mit einer anschließenden Situationsanalyse; darauffolgend die Analyse der Messergebnisse und eine Zusammenstellung der Grundlagen zur Sensitivitätsanalyse; abschließend die Erstellung der Modelle mit anschließender Simulation und Auswertung.....	14
Abbildung 3-2:	Darstellung der Wärmeaustauschprozesse zwischen Abwasser und Kanalluft (q_{wa}) und Abwasser und Erdreich (q_{ws}) in einem Kanalrohr (Abdel-Aal, 2015)	15
Abbildung 3-3:	Übersichtsplan der Messstrecken und Messstellen	19
Abbildung 3-4:	Lage der Messstellen der Messreihe ARA.....	21
Abbildung 3-5:	Gemessener Verlauf der Kanalluft- und der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17235 mit den Niederschlagswerten der Messstation Flughafen Graz im Jahr 2019.....	22
Abbildung 3-6:	Gemessener Verlauf der Kanalluft- und der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17287 mit Niederschlagswerten der Messstation Flughafen Graz im Jahr 2019; einschließlich einem Sensorausfall bei der Messung der Abwassertemperatur zwischen Februar und April.....	23
Abbildung 3-7:	Streudiagramme der Messdaten Abwassertemperatur, Kanallufttemperatur und Regenmenge	24
Abbildung 3-8:	Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen vom Jahr 2019 bei den Messstellen 17235 und 17287.....	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-9: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen pro Monat im Jahr 2019 bei den Messstellen 17235 und 17287	26
Abbildung 3-10: Histogramme der Kanalluft- und Abwassertemperaturen im Jahr 2019 bei den Messstellen 17235 und 17287	27
Abbildung 3-11: Lage der Messstellen der Messreihe in Andritz.....	28
Abbildung 3-12: Temperaturverlauf der Kanalluft und der Abwassertemperatur bei der Messstelle 3170065 mit Niederschlagswerten vom Bezirk Andritz im Jahr 2019	29
Abbildung 3-13: Streudiagramme der Messdaten	30
Abbildung 3-14: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen vom Jahr 2019 bei der Messstelle 3170065.....	31
Abbildung 3-15: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen pro Monat im Jahr 2019 bei der Messstelle 3170065.....	32
Abbildung 3-16: Histogramme der Kanalluft- und Abwassertemperaturen pro Monat im Jahr 2019 bei der Messstelle 317065	32
Abbildung 3-17: Verlauf der Bodentemperaturen bei den Messstellen Graz-Gritzenweg und Graz-Casino von November 2019 bis April 2020 mit dem Verlauf der Lufttemperatur	33
Abbildung 3-18: Verlauf der Bodentemperaturen bei der Messstelle Casino und der Messstelle Gritzenweg im November 2019 bis Jänner 2020 mit der Differenz zwischen den beiden Temperaturverläufen	35
Abbildung 3-19: Boxplots der Bodentemperaturen von November 2019 bis April 2020; oben: bei der Messstelle Casino; unten: bei der Messstelle Gritzenweg	36
Abbildung 3-20: Systematische Darstellung des Ablaufs einer Sensitivitätsanalyse.....	39
Abbildung 3-21: Darstellung eines k -dimensionalen Untersuchungsraumes Ω , mit $k = 3$ Parameter und einem 4-stufigen Raster mit der Schrittgröße Δ (Saltelli et al., 2008; mod.)	40
Abbildung 3-22: Darstellung des Kanalstrangs ARA in SWMM.....	43
Abbildung 3-23: Darstellung des Kanalnetzes Graz in SWMM	43
Abbildung 3-24: Bodenarten in Graz: Schotter (beige), Sand (blau), sandiger Lehm (grün), Lehm (braun), Ton o. Fels (rot) (Stadtvermessungsamt Graz)	45
Abbildung 3-25: Die drei Pattern für den Verlauf der Abwassertemperatur über einen Tag, eine Woche und ein Jahr	47

Abbildung 3-26: Darstellung der monatlichen Pattern der Lufttemperatur aus den Monatsmedianen bei der MS ARA 17235	49
Abbildung 3-27: Darstellung der monatlichen Pattern aus den Monatsmedianen der Bodentemperaturen bei der MS Gritzenweg	51
Abbildung 3-28: Verteilung der Parameterwerte in den Stichproben für den Kanalstrang ARA bei einer Rastergröße von $p = 6$ und einer Stichprobengröße von $r = 50$	54
Abbildung 3-29: Verteilung der Parameterwerte in den Stichproben für den Kanalstrang ARA bei einer Rastergröße von $p = 6$ und einer Stichprobengröße von $r = 50$ mit der Verwendung optimaler Trajektorien	55
Abbildung 4-1: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über ein Jahr	59
Abbildung 4-2: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA der Simulationen über ein Jahr	60
Abbildung 4-3: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über ein Jahr	61
Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Tag; links: im Sommer; rechts: im Winter	61
Abbildung 4-5: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Tag, oben: im Sommer, unten: im Winter	63
Abbildung 4-6: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Tag, links: im Sommer, rechts: im Winter	64
Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Monat, links: August 2019, rechts: Jänner 2019	64
Abbildung 4-8: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Monat, oben: August 2019, unten: Jänner 2019	66
Abbildung 4-9: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Monat, links: August 2019, rechts: Jänner 2019	67
Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Monat mit modifiziertem Wertebereich des Durchflusses	68
Abbildung 4-11: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Tag mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-12: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Tag mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses	70
Abbildung 4-13: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz	71
Abbildung 4-14: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA der Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz	72
Abbildung 4-15: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz.....	73
Abbildung B-1: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Tag mit unterschiedlichen Seeds.....	xxi
Abbildung B-2: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Tag.....	xxii
Abbildung B-3: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA von Simulationen mit unterschiedlichen Seeds über einen Tag.....	xxiii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Auflistung der spezifischen Haltungseigenschaften im Modell (Schlagbauer, 2018)	17
Tabelle 3-2:	Bearbeitete Bereiche der Inputdatei für das Temperaturmodell	17
Tabelle 3-3:	Durchlässigkeit und Dichte von Bodenarten (Krapfenbauer, 2010)	45
Tabelle 3-4:	Spezifische Wärmekapazität c_p von Bodenarten (Schweizer, 2020a)	46
Tabelle 3-5:	Wärmeleitfähigkeit λ von Bodenarten (Schweizer, 2020b)	46
Tabelle 3-6:	Pattern der Abwassertemperatur aus Zuschlagsfaktoren.....	49
Tabelle 3-7:	Pattern der Kanallufttemperatur aus Monatsmedianen	50
Tabelle 3-8:	Messwerte und Pattern der Bodentemperatur aus Monatsmedianen.....	51
Tabelle 3-9:	Pattern der häuslichen Zuflüsse für das Kanalnetz Graz	52
Tabelle 3-10:	Wertebereiche der Modellparameter für den Kanalstrang ARA.....	53
Tabelle 3-11:	Wertebereiche der Modellparameter für das Kanalnetz Graz	53
Tabelle 3-12:	Szenarien für die Simulation.....	57
Tabelle 4-1:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über ein Jahr	59
Tabelle 4-2:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag im Sommer	62
Tabelle 4-3:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag im Winter	62
Tabelle 4-4:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Monat im Sommer	65
Tabelle 4-5:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Monat im Winter	65
Tabelle 4-6:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag im Winter mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses	68
Tabelle 4-7:	Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz	71
Tabelle B-1:	Statistische Werte der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17235 (ARA Anfang) im Jahr 2019.....	xiii
Tabelle B-2:	Statistische Werte der Kanallufttemperatur bei der Messstelle 17235 (ARA Anfang) im Jahr 2019.....	xiii
Tabelle B-3:	Statistische Werte der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17287 (ARA Ende) im Jahr 2019.....	xiv

Tabellenverzeichnis

Tabelle B-4: Statistische Werte der Kanallufttemperatur bei der Messstelle 17287 (ARA Ende) im Jahr 2019	xiv
Tabelle B-5: Statistische Werte der Abwassertemperatur bei der Messstelle 3170065 (Andritz Ende) im Jahr 2019	xv
Tabelle B-6: Statistische Werte der Kanallufttemperatur bei der Messstelle 3170065 (Andritz Ende) im Jahr 2019	xv
Tabelle B-7: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Gritzenweg in 0.80 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020	xvi
Tabelle B-8: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Gritzenweg in 1.15 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020	xvi
Tabelle B-9: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Gritzenweg in 1.50 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020	xvi
Tabelle B-10: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Casino in 0.80 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020	xvii
Tabelle B-11: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Casino in 1.15 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020	xvii
Tabelle B-12: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Casino in 1.50 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020	xvii

Abkürzungsverzeichnis

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
TU Graz	Technische Universität Graz
ARA	Abwasserreinigungsanlage
SWMM	Storm Water Management Model
KathEA	Karte thermischer Energie aus Abwasser
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
AAEV	Allgemeine Abwasseremissionsverordnung
1. AEV	1. Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
MS	Messstrecke
SA	Sensitivitätsanalyse
GSA	Global Sensitivity Analysis
OAT	one-at-a-time
AAT	all-at-a-time
EET	Elementarer Effekt Test
EE	Elementarer Effekt
LPS	Liters Per Second

1 Einleitung

Im Übereinkommen von Paris, das im Jahr 2015 beschlossen wurde, werden weltweite Ziele zum Schutz des Klimas gesetzt. Dabei soll die weltweite Durchschnittstemperatur, gegenüber vorindustriellen Werten, auf einen Anstieg von 1.5 °C begrenzt werden und die Treibhausgasemissionen sollen stark reduziert werden. Daraus folgt laut dem Bericht „Global Warming of 1.5 °C“ des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dass die Kohlenstoffdioxidemissionen gegenüber dem Jahr 2010 bis zum Jahr 2030 um 45 % reduziert werden müssen, um das 1.5-Grad-Ziel zu erreichen und bis 2050 müssen die Kohlenstoffdioxidemissionen auf null fallen. (UNFCCC, 2015; IPCC, 2018)

Im Jahr 2010 wurden 25 % der weltweiten Kohlenstoffdioxidemissionen von der Strom- und Warmwassererzeugung verursacht (IPCC, 2015). Dieser Wert weicht aber je nach Land ab. Laut Statistik Austria (2019) wurden im Jahr 2018 in Österreich 26 % der Endenergie für Raumwärme und Warmwasser eingesetzt. Dabei stammt in Österreich mehr als die Hälfte der verbrauchten Energie von der Öl- und Gasverbrennung (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018). Infolgedessen sind rasche und drastische Handlungen erforderlich, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen und die negativen Auswirkungen bei Nichterreichen zu minimieren. (IPCC, 2018).

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Durch neue Technologien und Alternativen zur Energiegewinnung kann die Erreichung der Ziele beschleunigt werden (Europäische Kommission, 2018). Nach Buri und Kobel (2004) könnte die Energiegewinnung aus Abwasser im Bereich der Raumheizung und Warmwasseraufbereitung ein großes Potential darstellen. Zum Beispiel könnten in der Schweiz 100 000 Wohnungen mit der Wärme aus Abwasser beheizt werden, wenn die gesamte Abwassermenge um 0.5 °C abgekühlt werden würde (Buri & Kobel, 2004).

Im Allgemeinen wird angenommen, dass der häusliche Schmutzwasserabfluss gleich der Trink- und Nutzwasserbedarf ist. Dabei liegt der tägliche Wasserverbrauch in Österreich bei 120 L bis 130 L pro Haushalt. Dazu kommt noch der Wasserverbrauch von der Industrie und dem Gewerbe. (Kainz et al., 2012)

Weiters ist bekannt, dass in Österreich 39 % des entnommenen Grundwassers dem Haushaltssektor zuzuschreiben ist (Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, o. D.). Wenn der Wasserverbrauch eines Haushalts in die Anteile der Verwendungsart zerlegt wird, wird ersichtlich, dass mehr als die Hälfte des Abwassers warmes Abwasser ist (siehe Abbildung 1-1). Die Daten dazu wurden von der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach übernommen und eine Grafik daraus erstellt, die in Abbildung 1-1 dargestellt ist. Zum warmen Abwasser gehört der Wasserverbrauch vom Baden und Duschen, von

der Waschmaschine, vom Geschirrspüler und von der Körperpflege. Die gesamte Wärme, die noch im Abwasser enthalten ist, wird in die Kanalisation geleitet. Daraus folgt, dass im Winter die Abwassertemperatur im Kanal etwa 10 °C beträgt und im Sommer können die Temperaturen des Abwassers über 20 °C liegen. (Kainz et al., 2012)

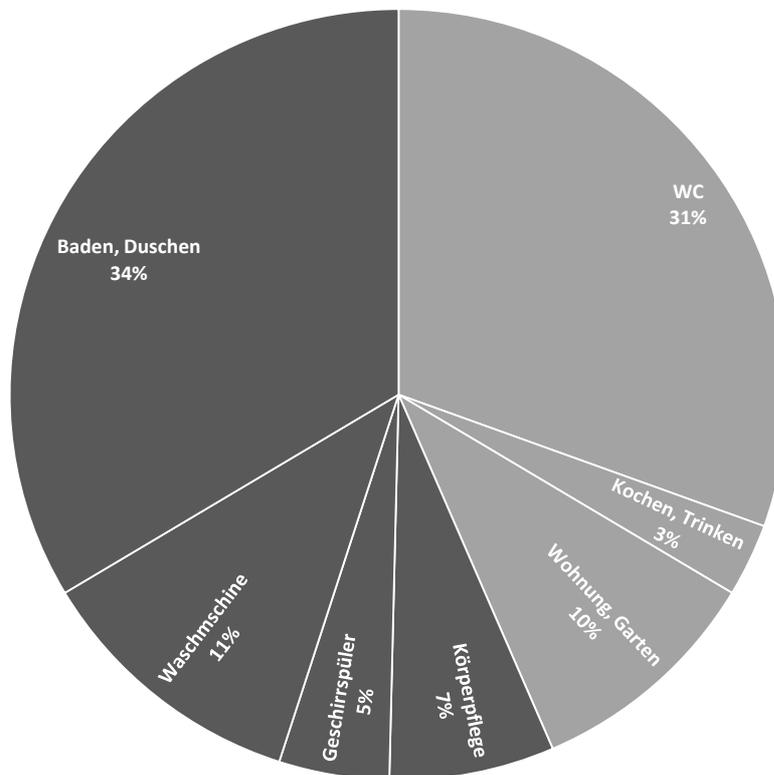


Abbildung 1-1: Wasserverbrauch von Haushalten nach Art der Verwendung; dunkel: vorwiegend warmes Wasser; hell: vorwiegend kaltes Wasser

Die Gewinnung der Wärmeenergie aus dem Abwasser wurde zwar schon weltweit in einzelnen Ländern erprobt, aber nur in einem sehr geringen Ausmaß. Seit Anfang der 1980er Jahren sind Anlagen in Schweden, Norwegen, Deutschland und in der Schweiz in Betrieb. Es wird geschätzt, dass weltweit insgesamt über 500 Anlagen zur Wärmeenergiegewinnung aus Abwasser in Betrieb sind, darunter auch in China, Japan, Canada und in den USA. (Shen et al., 2018)

Auch in Österreich verwenden vereinzelte Gemeinden die Wärmeenergie aus dem Abwasser. Zum Beispiel wird bei der Kläranlage in Weiz vor dem Ablauf in das Gewässer dem gereinigten Wasser Wärme entzogen und im Winter als Heizungswärme verwendet. Im Sommer wird das Abwasser zum Kühlen verwendet. Ein anderes Beispiel sind die Stadtwerke in Amstetten, welche die Wärmeenergie im Abwasserkanal zum Heizen und Kühlen ihrer Gebäude verwenden. (Projektteam Energie aus Abwasser, 2012)

Einige Publikationen (Schmid, 2008; Abdel-Aal, 2015) weisen immer wieder darauf hin, dass diese Art von Energiegewinnung bei richtiger Planung und Ausführung ein großes Potential darstellt. Dabei sollte der Einfluss auf die Temperatur des Abwassers nach der Entnahme von Wärme bekannt sein, bevor ein solches Projekt gestartet wird (Abdel-Aal, 2015). Denn durch die Temperaturentnahme und die daraus resultierende Abkühlung des Abwassers, kann der Reinigungsprozess der ARA (Abwasserreinigungsanlage) beeinträchtigt werden. Da die Stickstoffentfernung in der biologischen Reinigungsstufe von der Temperatur des Abwassers abhängig ist, wird bei einer Abkühlung des Abwassers unter die Bemessungstemperatur der Kläranlage die Nitrifikation beeinträchtigt, was zu einer höheren Ablaufkonzentration von Ammonium führen kann (Wanner et al., 2005a; Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2021).

Im Vergleich zur Anzahl an ausgeführten Anlagen gibt es noch sehr wenige Modelle zur Vorhersage der Temperaturentwicklung im Abwasserkanal bei der Entnahme von Wärme. Eines der ersten Modelle war das mathematische Temperaturmodell von W. Bischofsberger und C. F. Seyfried (1984). Dieses Modell beschreibt die Wärmeaustauschvorgänge zwischen dem Abwasser und der Umgebung, welches die zu erwartende Abwassertemperatur in jeder beliebigen Haltung im Kanalnetz errechnen kann.

Zwei weitere Modelle, welche die zeitliche und räumliche Veränderung der Temperaturen von Abwasser und Kanalluft in einem Kanalisationssystem bestimmen, wurden von O. Wanner (2004) und von D. Dürrenmatt (2006) erstellt. Später implementierten sie gemeinsam ein komplexeres Temperaturmodell in eine selbst entwickelte Simulationssoftware mit dem Namen „TEMPEST“ (Dürrenmatt & Wanner, 2008) zur Berechnung von Abwassertemperaturen im Kanal.

Etwas einfacher anwendbare Temperaturmodelle wurden von J. A. Elías-Maxil et al. (2017) und M. Abdel-Aal (2015) entwickelt. Auf Grundlage des Modells von Abdel-Aal wurde im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität Graz (TU Graz) ein Temperaturmodell in die Niederschlags-Abfluss Modellierungssoftware „EPA Storm Water Management Model (SWMM 5.1)“ (Rossman, 2015) implementiert (Schlagbauer, 2018). Damit kann neben dem hydraulischen Verhalten die Veränderung der Abwassertemperatur in einem Kanalsystem ermittelt werden. Dieses Modell wird im Laufe dieser Arbeit als Modell TU GRAZ bezeichnet.

Zusätzlich wurden im Zuge des Projekts KathEA (Karte thermischer Energie aus Abwasser) der Holding Graz Wasserwirtschaft und der TU Graz seit dem Jahr 2018 an unterschiedlichen Standpunkten im Grazer Kanalsystem Temperaturdaten im Abwasserkanal gesammelt. Anhand dieser Messungen kann das bestehende Modell TU GRAZ (Schlagbauer, 2018) analysiert und bewertet werden.

1.2 Zielsetzung

Die Hauptaufgabe der Masterarbeit von P. Schlagbauer war die Implementierung eines auf Abdel-Aal (2015) basierten Temperaturmodells in SWMM, indem die Wärmeaustauschprozesse, welche innerhalb des Kanalsystems stattfinden, durch mehrere unterschiedliche Parameter beschrieben werden. Dabei wurde das Modell lediglich auf Plausibilität untersucht, aber keine Sensitivitätsanalyse, Kalibrierung, oder Validierung durchgeführt. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Anpassung des bestehenden Temperaturmodells.

Dazu werden aus den Temperaturmesswerten des Testeinzugsgebietes der Stadt Graz Zusammenhänge im Temperaturverlauf identifiziert und eine Sensitivitätsanalyse der Modellparameter durchgeführt. Hierbei werden mehrere Szenarien untersucht und es soll die Frage beantwortet werden, welche Parameter den größten Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Abwasserkanal nach der Wärmeentnahme haben. Die Sensitivitätsanalyse soll, durch Feststellung der maßgeblichen Parameter, den Kalibrierungs- und Validierungsvorgang erleichtern.

2 Grundlagen

Die Grundlagen zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser wurden bereits in zahlreichen Literaturen behandelt. Dieses Kapitel soll eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Funktionen und Randbedingungen geben. Für genauere Informationen wird auf die Fachliteratur (DWA, 2009; Koch et al., 2010) im Literaturverzeichnis verwiesen.

2.1 Technische Grundlagen

Die Wärmeenergiegewinnung aus dem Abwasser funktioniert wie bei den konventionellen Grundwasserwärmepumpen, die vielfach zum Heizen und Erwärmen von Warmwasser genutzt werden. Dabei wird mithilfe einer Wärmepumpe die Temperatur eines Kältemittels auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Die Funktionsweise einer Wärmepumpe ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

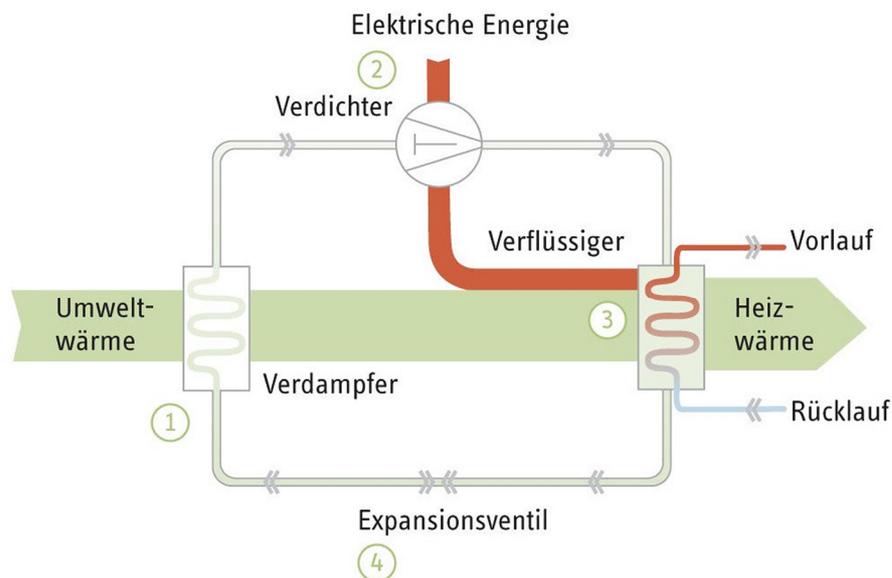


Abbildung 2-1: Funktionsweise einer Wärmepumpe (Baunetz Wissen, o. D.)

Die Wärmepumpe ist ein stetiger Kreislauf und besteht aus einem Kompressor, Verdampfer, Verflüssiger und einem Expansionsventil. Die Siedetemperatur des Kältemittels ist niedriger als die Temperatur des Abwassers, wodurch zwischen Kältemittel und Wärmequelle ein Temperatureaustausch stattfindet. Dabei wird dem Abwasser die Wärme entzogen, während sich das Kältemittel erwärmt und infolgedessen verdampft. Anschließend erhöht sich der Druck durch den Verdichter und die Temperatur des Kältemittels steigt weiter. Der warme Dampf des Kältemittels wird vom kälteren Heizmedium umströmt und es findet wieder ein Wärmeaustausch statt. Die beim Verdichter zugeführte elektrische Energie wird ebenfalls durch das verdampfte Kältemittel dem Heizkreislauf zugeführt. Durch die Abgabe der Wärme kühlt das Kältemittel wieder ab und wird erneut flüssig. Zusätzlich wird der Druck im Expansionsventil reduziert. (DWA, 2009)

2.1.1 Unterscheidung Wärmeentnahmestelle

Das Abwasserentsorgungssystem ist ein großes Netzwerk und besteht aus vielen Bauteilen. Daher gibt es mehrere mögliche Stellen innerhalb des Systems an denen eine Wärmeentnahme aus dem Abwasser durchgeführt werden kann.

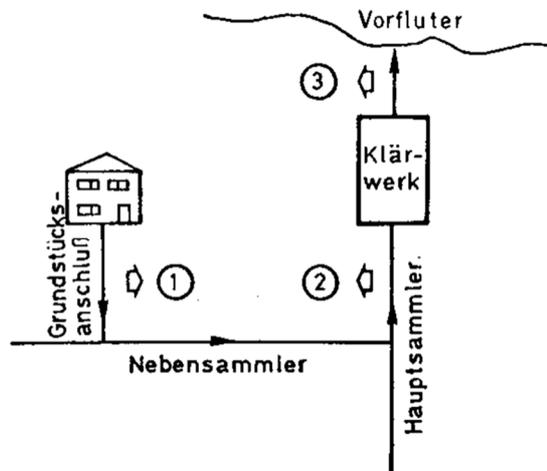


Abbildung 2-2: Mögliche Standorte einer Wärmeentnahme aus dem Abwasser; 1: vor Einleitung in die öffentliche Kanalisation; 2: in der Kanalisation; 3: im Ablauf der ARA (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

Wie in Abbildung 2-2 ersichtlich, kann die Wärmerückgewinnung grundsätzlich an drei Orten stattfinden. Eine Möglichkeit ist vor der Einleitung in die öffentliche Kanalisation, welche durch relativ hohe Abwassertemperaturen bei geringem Abfluss mit großen Schwankungen charakterisiert ist. Die Entfernung zwischen Wärmeentnahme und Wärmenutzung ist klein, daher sind die Wärmeverluste gering. Das Abwasser kann hier jedoch stark mit Feststoffen belastet sein. Der Einfluss von Feststoffen auf die Wärmerückgewinnung wird in Kapitel 2.2.4 näher erläutert. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

Eine weitere Möglichkeit ist die Wärmerückgewinnung im Abwasserkanal. Hier kann die Wärmerückgewinnungsanlage direkt im Kanal oder in einem Bypass eingebunden werden. Im Verlauf des Kanalsystems nimmt die Durchflussmenge zu. Dabei werden die Temperaturschwankungen geringer jedoch wird ein Teil der Wärme durch den Temperatursausgleich an die Umgebung abgegeben. In den Hauptsammlern sind die Kanalquerschnitte größer und durch Verdünnung und Zerkleinerung nimmt der Feststoffanteil ab. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

Weiters kann die Energierückgewinnung im Ablauf der ARA erfolgen. In diesem Abwasser sind keine störenden Feststoffe enthalten und die vorhandene Abwassermenge ist auch bei Trockenwetter relativ groß, da hier das gesamte Abwasser des Einzugsgebiets durchfließt. Zusätzlich ist die Abwassertemperatur im Ablauf der ARA das ganze Jahr über geringeren Schwankungen ausgesetzt, da hier annähernd die gleichen Temperaturen wie in der biologischen Reinigung der ARA herrschen (Buri & Kobel, 2004). Bei einer Entnahme von Wärme an dieser

Stelle muss darauf geachtet werden, dass die Distanz zwischen möglicher Wärmeentnahme und Wärmenutzung nicht zu groß ist. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

2.1.2 Unterscheidung Wärmetauscherbauart

Neben dem Ort der Entnahme wird auch die Form des Wärmetauschers unterschieden. Dabei wird entweder das Kältemittel selbst vom Abwasser erwärmt, oder ein Wärmeträgermedium in einem Sekundärkreislauf entnimmt dem Abwasser die Wärme, welches anschließend das Kältemittel erwärmt. Es gibt zahlreiche Konstruktionsarten von Wärmetauschen, die je nach Anforderungen verwendet werden (Bischofsberger & Seyfried, 1984). Die größte Herausforderung ist hierbei die optimale Konstruktion zu finden, die den Wärmeaustausch zwischen zwei Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Temperaturen ermöglicht. (Cipolla & Magliorico, 2014)

Wärmetauscher können nachträglich in ein bestehendes Kanalrohr eingebaut oder in einem neuen Kanalrohr integriert werden. Beim nachträglichen Einbau wird der Wärmetauscher auf der Sohle des Kanals eingebaut. Hier wird der Wärmetauscher direkt vom Abwasser überströmt. Bei vorgefertigten Kanalrohren mit integrierten Wärmetauschern liegt zusätzlich eine Mörtelschicht zwischen Abwasser und Wärmeträgermedium. Sie werden bei Kanalneubauten, Erneuerungen oder Bypass-Lösungen eingesetzt. (DWA, 2009)

2.1.3 Unterscheidung Wärmeverteilsysteme

Die Wärme kann zwischen Wärmetauscher und Verbraucher auf zwei Arten transportiert werden: Als kalte Fernwärme oder als warme Fernwärme. Beide Wärmeverteilsysteme sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

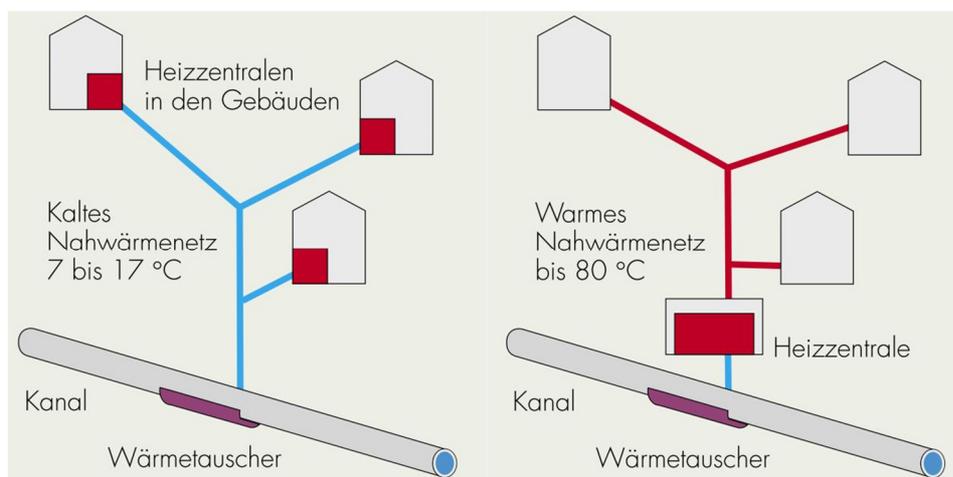


Abbildung 2-3: Arten der Wärmeverteilsysteme; links: kalte Fernwärme; rechts: warme Fernwärme (Bundesverband WärmePumpe, 2005)

Bei der kalten Fernwärme wird die Energie auf einem Temperaturniveau von 7 °C bis 17 °C transportiert und hauptsächlich bei großen Distanzen zwischen Energiegewinnung und Energienutzung angewendet. Dies hat den Vorteil, dass die Wärmeverluste geringer sind und es können kostengünstigere, ungedämmte Rohrleitungen verwendet werden. Bei der Anwendung von kalter Fernwärme können mehrere Gebäude mit einer dezentralen Energieerzeugung ausgestattet werden und so auf die Bedürfnisse der einzelnen Nutzer abgestimmt werden. Bei der warmen Fernwärme wird nahe dem Wärmetauscher die Temperatur des Trägermediums auf ein Niveau von 65 °C bis 80 °C gebracht und anschließend zu den Nutzern transportiert. Dieses Verteilsystem wird hauptsächlich bei kurzen Distanzen zwischen Energiegewinnung und Energienutzung angewendet. Die Vorteile einer warmen Fernwärme sind die einfache zentrale Steuerung und Wartung und die geringeren Investitionskosten, da im Gegensatz zu dezentralen Anlagen nur eine zentrale Energiegewinnungsanlage benötigt wird. (Koch et al., 2010)

2.2 Randbedingungen

Bei der Wärmeentnahme von Abwasser müssen einige Randbedingungen beachtet werden. Die Nutzung von Wärme aus Abwasser ist mit vielen Wechselwirkungen im ganzen Abwasserentsorgungssystem verbunden. Diese müssen beachtet werden, um eine erfolgreiche und wirtschaftliche Nutzung erreichen zu können und um die Umwelt und das Kanalsystem nicht zu beeinträchtigen. In diesem Kapitel wird genauer auf die Eigenschaften und Folgen einer Temperaturentnahme aus dem Abwasser eingegangen.

2.2.1 Temperatur auf der Kläranlage

Die Wärmeentnahme im Abwasserkanal führt zu einer Abkühlung des Abwassers. Dies kann, je nach Grad der Abkühlung, negative Auswirkungen auf die biologische Reinigung der ARA haben. Bei niedrigen Temperaturen wird hauptsächlich die Nitrifikation beeinträchtigt. Dabei ist die Temperatur beim Zulauf der ARA abhängig von der Menge der Wärmeentnahme, der Temperatur der verschiedenen Abwasserzuflüsse im Kanal und vom Austausch der Wärme mit der Umgebung. Die Abwassertemperatur im Zulauf der ARA ist niedriger als die Temperatur im Ablauf (Wanner et al., 2005b). Bei einer kurzfristigen Absenkung der Abwassertemperatur im Zulauf der ARA, ist der Einfluss auf die Reinigungsleistung gering. Kleine Schwankungen der Abwassertemperatur können während des Reinigungsprozesses ausgeglichen werden. In der ARA werden kurzzeitige Schwankungen der Zulauftemperatur von 2 °C bis 3 °C bei Trockenwetter auf Schwankungen von 0.5 °C verringert (Buri & Kobel, 2004). Dabei entspricht die Temperatur des Wassers im Ablauf der ARA ungefähr der Temperatur in der biologischen Reinigung (Buri & Kobel, 2004). Tiefe Abwassertemperaturen im Zulauf, die länger anhalten, haben Auswirkungen auf den Nitrifikationsprozess. Eine

Abkühlung des Abwassers um 1 °C hat eine Reduktion der Nitrifikationsleistung von 10 % zur Folge. Dies führt, ohne weitere Maßnahmen, zu einer höheren Ablaufkonzentration von Ammonium. (Wanner et al., 2005a)

Nicht nur kaltes Abwasser hat einen Einfluss auf die Reinigungsleistung der ARA. Bei der Verwendung des Abwassers zum Kühlen im Sommer wird dem Abwasser Wärme hinzugefügt. Diese Wärme führt zu einer höheren Nitrifikationsleistung durch eine höhere Aktivität des Belebtschlammes. Da der benötigte Sauerstoffeintrag mit steigender Temperatur zunimmt, muss bei der biologischen Reinigungsstufe mehr Energie aufgewendet oder zusätzlich chemische Zusätze verwendet werden. (Koch et al., 2010)

Wird das Abwasser nach dem Ablauf der ARA zum kühlen verwendet muss beachtet werden, dass sich das Abwasser durch die Energiezufuhr erwärmt und so die Ökologie des Vorfluters negativ beeinflusst werden kann. Denn je nach Umfang der Wärmezufuhr kann sich die Temperatur des Gewässers erhöhen, was sich schon bei einer Temperaturänderung von wenigen Graden negativ auf die Fischfauna auswirkt. (Koch et al., 2010; Melcher et al., 2013)

2.2.2 Abwassertemperatur in der Kanalisation

Damit die Energie aus dem Abwasser genutzt werden kann, sollte die Abwassertemperatur nicht zu niedrig sein. Im Gegensatz zu anderen Wärmequellen, weist das Schmutzwasser in der Kanalisation sogar im Winter relativ hohe Temperaturen auf. Dabei werden selten Temperaturen von unter 10 °C erreicht. Im Sommer liegen die Temperaturen des Abwassers über 20 °C aber unter 30 °C. Dadurch kann das Abwasser mit einer Wärmepumpe auch zum Kühlen verwendet werden. (Schmid, 2008)

Die Temperatur vom Abwasser hängt von vielen Faktoren ab. So verändert sie sich über den Tag, je nach Wassernutzung und Wasserverbrauch der Bevölkerung. In der Nacht, wenn der Wasserverbrauch gering ist, sind die Temperaturen vom Abwasser in der Kanalisation meist 2 – 3 °C geringer als am Tag (Schmid, 2008).

Die Abwassertemperatur verändert sich auch über den Verlauf des Kanals. Am Anfang des Kanalnetzes, bei den Einleitungen, sind die Temperaturen vom Abwasser höher und werden durch den Temperatureaustausch mit der Umwelt im Laufe des Kanales Richtung ARA kontinuierlich niedriger. Die Temperaturabnahme ist umso kleiner, je größer die Durchflussrate ist. (Wanner et al., 2005a)

Die wesentlichen Faktoren beim Wärmeaustausch des Abwassers mit der Umgebung, sind die Anfangstemperatur und Durchflussmenge des Abwassers, Luftfeuchtigkeit, Luftströmung und Temperatur der Luft, die Temperatur des Kanalrohres und die des umgebenden Erdreiches. (Dürrenmatt & Wanner, 2008)

Bei der Nutzung der thermischen Energie aus Abwasser in der Kanalisation muss beachtet werden, dass eine Erhöhung der Abwassertemperatur zu einer Erhöhung der biologischen Aktivität führt und es dadurch vor allem im Sommer vermehrt zu einer Bildung von Schwefelwasserstoff kommen kann. Dies stellt nicht nur eine Geruchsbelästigung und Gesundheitsgefährdung dar, sondern begünstigt auch die Korrosion bei Betonbauwerken durch Schwefelsäure. Eine Abkühlung des Abwassers führt zu einer verstärkten Ablagerung von Ölen und Fetten aus dem Abwasser. (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2021)

2.2.3 Durchflussmenge in der Kanalisation

Ein wichtiger Parameter für die Planung einer Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist der Durchfluss. Die Durchflussmenge von Abwasser im Kanal verändert sich über den Tag und ist vom Wasserverbrauch der Bevölkerung abhängig. In einem Mischwasserkanal variiert die Durchflussmenge sehr stark zwischen dem Nachtminimum und dem Maximum bei einem Starkregen. Daher sollte, bei der Planung und Dimensionierung einer Wärmerückgewinnungsanlage im Kanal, die vorhandene Durchflussmenge analysiert werden. Bei der Dimensionierung einer Wärmerückgewinnungsanlage in einem Mischwasserkanal wird normalerweise der Tagesmittelwert bei Trockenwetter als Dimensionsgröße verwendet. Dazu wird noch ein Wert zur Verminderung dazugerechnet, um die Schwankung über den Tag zu berücksichtigen. (Schmid, 2008; Cipolla & Maglionico, 2014)

Laut der Leitlinie der Baudirektion vom Kanton Zürich und der AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich) (Koch et al., 2010) ist bei einer Wärmeentnahme ein Abwasserdurchfluss von 10 L/s erforderlich, das ist in etwa das Nachtminimum von 5000 Einwohner. Dabei sollte der Innendurchmesser vom Abwasserkanal mindestens 800 mm aufweisen. Jedoch darf beim Einbau vom Wärmetauscher in die Kanalisation der Abfluss nicht maßgeblich beeinflusst werden und auch die Reinigungs- und Wartungsarbeiten dürfen dadurch nicht beeinträchtigt werden. (Koch et al., 2010; Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2021)

2.2.4 Eigenschaften des Abwassers

Die Eigenschaften und die Zusammensetzung des Abwassers spielen bei der Auswahl des Wärmetauschers eine große Rolle, da dieser in direktem Kontakt mit dem Abwasser stehen kann. Dabei wird der Wärmetauscher durch die im Abwasser gelösten Säuren angegriffen und sollte daher korrosionsbeständig sein. Weiters wirkt eine starke mechanische Belastung, durch Feststoffe wie Sand und Grobteile im Abwasser, auf den Wärmetauscher. Schwebstoffe und Schwimmstoffe können zu einer Verstopfung führen. Durch das Um- und Überfließen des Abwassers bildet sich nach kurzer Zeit ein Biofilm auf den Oberflächen. Dieser Biofilm behindert die Wärmeübertragung vom Abwasser auf den

Wärmetauscher und muss daher regelmäßig von den Wärmetauscherflächen entfernt werden. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

2.3 Rechtliche Grundlagen

Die Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV) (Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, 1996b) schreibt eine Höchsttemperatur von Abwässern, die in eine Kanalisation geleitet werden, von 35 °C vor. Laut 1. Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser (1. AEW) (Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, 1996a) soll bei einer ARA, die für weniger als 5000 EW₆₀ ausgelegt ist, eine Bemessungstemperatur von 10 °C eingehalten werden und bei einer ARA, die für mehr als 5000 EW₆₀ ausgelegt ist, soll eine Bemessungstemperatur von 8 °C für die Nitrifikation und 12 °C für die Denitrifikation eingehalten. Diese Werte sollten auch bei einer Wärmerückgewinnung vor der Abwasserreinigung eingehalten werden, damit die vorgeschriebenen Ablaufkonzentrationen eingehalten werden können und die Umwelt so wenig wie möglich belastet wird.

Für die thermische Energiegewinnung aus Abwasser selbst gibt es derzeit in Österreich keine Richtlinien. In der Schweiz wurde von der Baudirektion vom Kanton Zürich und der AWEL (Koch et al., 2010) ein Leitfaden erstellt, in der die technischen Voraussetzungen, die Auswirkungen und die rechtlichen Rahmenbedingungen erläutert werden. So darf in der Schweiz die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA nicht unter 10 °C sinken. Ebenso darf die Temperatur des Gewässers, in das die ARA einleitet, nicht über 25 °C steigen. Industrieabwässer dürfen nicht über 60 °C in die Kanalisation geleitet werden und nach der Vermischung darf das Abwasser keine Temperaturen von über 40 °C aufweisen. Für die Wärmeentnahme aus Wasser bilden in der Schweiz die Umweltschutz- und Gewässerschutzgesetzgebung die gesetzlichen Grundlagen (Buri & Kobel, 2004). Der Leitfaden „Heizen und Kühlen mit Abwasser“ (Koch et al., 2010) bildet auch eine Hilfestellung zur Planung, Bewilligung und Realisierung von Abwasserwärmerückgewinnungsanlagen. (Koch et al., 2010)

In Deutschland hat die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) ein Regelwerk zur Energiegewinnung aus Abwasser erstellt (DWA, 2009). Der Schwerpunkt dieses Regelwerkes liegt bei der Wärmeenergiegewinnung aus Abwasserleitungen und Abwasserkanälen. Das Regelwerk beschreibt die Planung, den Bau und den Unterhalt solcher Anlagen. In vielen Abschnitten wird auf die wichtigen Verordnungen, Gesetze und Normen verwiesen, wie zum Beispiel die Abwasserverordnung und das Erneuerbare-Energien-Wärmeengesetz. Weiters wird darauf hingewiesen, dass die erforderliche hydraulische Leistungsfähigkeit nicht beeinträchtigt werden darf und es dürfen sich keine Zonen bilden, bei denen es zu Ablagerungen und Verstopfungen kommt. Der Zugang, Unterhalt und die Wartung müssen im gesamten Kanalisationsbereich auch mit eingebauten Wärmerückgewinnungsanlagen möglich sein. Die erfolgreiche Nutzung einer

Anlage wird ab einem Mindestabwasserdurchfluss von 15 L/s angegeben. Es wird auch auf die Abwasserverordnung von Deutschland verwiesen, in der die Anforderungen der ARA beschreiben werden. Dabei muss eine weitgehende Stickstoffelimination gewährleistet sein und der Ablauf der ARA sollte Temperaturen von $\geq 12\text{ °C}$ aufweisen. Im Winter kann dieser Wert auch zwischen 8 °C und 10 °C liegen. (DWA, 2009)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Einflüsse einer Wärmerückgewinnungsanlage die gesetzlichen Regelungen des jeweiligen Landes in den davon betroffenen Bereichen immer eingehalten werden müssen.

2.4 Potential

Das Potential der thermischen Energiegewinnung aus Abwasser ist größer als das Potential vom Biogas der ARA. Aus 1 m^3 Abwasser das durch Wärmeentzug um 1 °C abgekühlt wird, können 1.5 kWh Wärmeenergie gewonnen werden. Auf der Kläranlage können aus 1 m^3 Abwasser ungefähr 0.05 m^3 Klärgas erzeugt werden. Daraus können 0.3 kWh Energie erzeugt werden. (Buri & Kobel, 2004)

Die Energieeffizienz einer Abwasserwärmepumpe hängt von der Vorlauftemperatur des Heizsystems und von der Temperatur des Abwassers ab. Je geringer die Differenz dieser beiden Temperaturen, desto energieeffizienter, umweltfreundlicher und kostengünstiger ist das System. (DWA, 2009)

Laut DWA (2009) sollen mit der Wärmeenergie im Abwasser 10 % aller Gebäude in Deutschland beheizt werden können. Eine interne Wärmerückgewinnung von Abwasser im Gebäude ist nur sinnvoll, wenn große Abwassermengen mit hohen Temperaturen vorhanden sind, wie zum Beispiel in der Industrie. Es hat sich gezeigt, dass für die Abwasserwärmenutzung größere Abnehmer am besten geeignet sind. Dabei ist es wirtschaftlicher die Heizsysteme mit niedrigeren Vorlauftemperaturen bei kleinen Distanzen zwischen Wärmerückgewinnung und Abnehmer zu betreiben. Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmerückgewinnung wird erhöht, wenn die Abwasserwärmepumpe zum Heizen und Kühlen eingesetzt wird. Zusätzlich ist eine Abwasserwärmepumpe am wirtschaftlichsten, wenn eine Kanalanierung oder ein Neubau geplant ist (Buri & Kobel, 2004).

Die wesentlichen Kostenanteile für eine Abwasserwärmenutzung sind die Investitionskosten, Unterhaltskosten und die Energiekosten. Die Investitionskosten für die Anlage sind höher als bei den konventionellen Heizungen wie Erdgas und Erdöl. Im Gegensatz dazu sind die Wartungskosten und die Energiekosten geringer. Die benötigte Antriebsenergie für die Wärmepumpe ist deutlich geringer als die von der Wärmepumpe erzeugte Wärmeenergie. Schlussendlich zahlen sich mit der langen Lebensdauer einer solchen Anlage die Investitionskosten wieder aus. (DWA, 2009)

Für Abwasserwärmetauscher kann mit einer Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren gerechnet werden (Buri & Kobel, 2004). Die Lebensdauer einer Erdwärmepumpe, die gleich wie eine Abwasserwärmepumpe funktioniert, ist höher als bisher angenommen und liegt im Durchschnitt bei 27 Jahren (Habbuch & Vecsei, 2019).

3 Methodik

Dieses Kapitel behandelt alle nötigen Grundlagen und Elemente zur Vorbereitung der Sensitivitätsanalyse. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt. Basierend auf die Grundlagenanalyse aus Kapitel 2, bildet eine Situationsanalyse den Ausgangspunkt für den weiteren Ablauf. Hier wird eine kurze Übersicht über das in SWMM implementierte Temperaturmodell TU GRAZ von Schlagbauer (2018) und die im Rahmen des Projekts KathEA durchgeführten Messkampagnen gegeben. Nach einer anschließenden Analyse der Messergebnisse werden die Grundlagen der Sensitivitätsanalyse und die gewählte Methode behandelt. Basierend auf den gesammelten Informationen aus den Modellgleichungen und den Temperaturdaten werden die Parameter und Wertebereiche festgelegt. Damit werden die Modelle für die Sensitivitätsanalyse erstellt und der Ablauf für die anschließende Simulation vorbereitet.

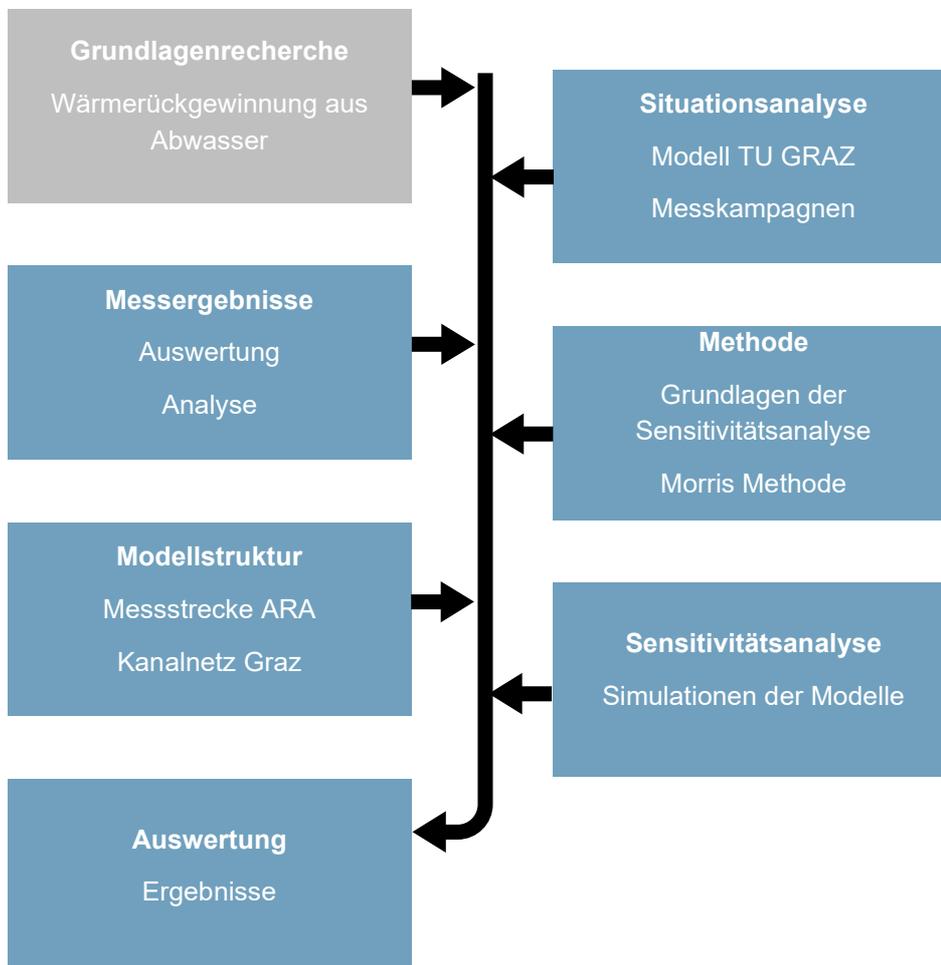


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung zur Vorgehensweise dieser Arbeit: zu Beginn eine Grundlagenrecherche mit einer anschließenden Situationsanalyse; darauffolgend die Analyse der Messergebnisse und eine Zusammenstellung der Grundlagen zur Sensitivitätsanalyse; abschließend die Erstellung der Modelle mit anschließender Simulation und Auswertung

3.1 Situationsanalyse

Die Grundlage, auf der diese Arbeit aufbaut, ist das entwickelte Temperaturmodell TU GRAZ von Schlagbauer (2018), das in SWMM integriert wurde. Mit diesem Modell kann bei einer hydrodynamischen Modellierung eines Abwassernetzes zusätzlich die Temperaturentwicklung im Kanalsystem nach einer Wärmeentnahme simuliert werden. Dazu müssen neben den hydraulischen Randbedingungen neue Parameter für die Temperatur hinzugefügt werden. (Schlagbauer, 2018)

Im Folgenden wird ein Überblick über den Aufbau und die Anwendung des Modells gegeben. Für eine detailliertere Beschreibung der Prozesse und der Implementierung in SWMM wird auf die Masterarbeit von Schlagbauer (2018) verwiesen.

3.1.1 Beschreibung und Aufbau des Temperaturmodells

Es wurde ein zeitdiskretes Temperaturmodell formuliert, um die Entwicklung der Abwassertemperatur im Kanalsystem zu bewerten. Um die Rechenzeit möglichst gering zu halten, wurden nur die beiden Wärmeaustauschprozesse zwischen Abwasser und Kanalluft und Abwasser und Erdreich bei Trockenwetter berücksichtigt (Schlagbauer, 2018). Diese beiden Wärmeaustauschprozesse sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

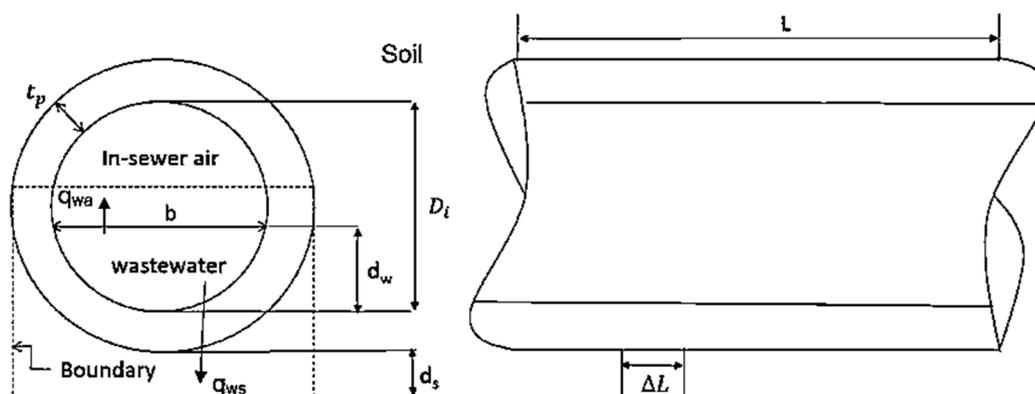


Abbildung 3-2: Darstellung der Wärmeaustauschprozesse zwischen Abwasser und Kanalluft (q_{wa}) und Abwasser und Erdreich (q_{ws}) in einem Kanalrohr (Abdel-Aal, 2015)

Neben der Abwassertemperatur sind die Bodentemperatur und die Kanallufttemperatur maßgebende Eingangsparameter bei der Modellierung des Wärmeaustauschprozesses. Denn die im Abwasser vorhandene Wärmeenergie wird über Austauschprozesse mit der Kanalluft und dem umliegenden Erdreich verändert. Im Zuge der Bearbeitung des Projekts KathEA wurde in der Arbeit von Schlagbauer (2018) ein Fehler bei der Herleitung der Gleichung für den Wärmeaustauschprozess in einer Haltung bemerkt. Dabei wurde bei der Koppelung der einzelnen Prozesse fälschlicherweise die Länge der Haltung dazu multipliziert, jedoch wurde im Modell die richtige Gleichung implementiert. Nach einer Kontrolle

seitens des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau wird der Wärmeaustauschprozess innerhalb einer Haltung durch folgende verbesserte Gleichung (3-1) im Modell definiert.

$$T_1 = \frac{\frac{T_{\text{air}} - T_{\text{water}}}{R_{\text{wa}}} + \frac{T_{\text{soil}} - T_{\text{water}}}{R_{\text{ws}}}}{\rho_w \cdot Q \cdot c_p} + T_0 \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

T_1 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_1 innerhalb der Haltung (K), T_0 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_0 innerhalb der Haltung (K), T_{soil} ... Temperatur des Erdreichs (K oder °C), T_{air} ... Lufttemperatur im Kanal (K oder °C), ρ_w ... Dichte des Mediums (kg/m³), c_p ... spezifische Wärmekapazität (J/kg.K), Q ... Zu- und Abflussrate (m³/s), R_{ws} ... Wärmewiderstand Abwasser - Erdreich (m.K/W), R_{wa} ... Wärmewiderstand Abwasser - Kanalluft (m.K/W)

Der Wärmeaustauschprozess erfolgt über konvektive und konduktive Vorgänge. Diese werden durch den Wärmewiderstand zwischen Abwasser und Erdreich bzw. Abwasser und Kanalluft beschrieben. In Gleichung 3-2 ist der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Kanalluft dargestellt. Dieser wird durch einen konvektiven Prozess beschrieben. Dabei fließt die Luftgeschwindigkeit in die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten mit ein.

$$R_{\text{wa}} = \frac{1}{h_{\text{wa}} \cdot b \cdot L} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

R_{wa} ... Wärmewiderstand zwischen Abwasser – Kanalluft (m.K/W), h_{wa} ... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abwasser und Kanalluft (W/m².K), b ... Wasserspiegelbreite (m), L ... Länge der Haltung (m)

In Gleichung 3-3 ist der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Erdreich dargestellt. Dabei finden konvektive und konduktive Vorgänge statt, bei denen die Wärmeleitfähigkeiten der vorhandenen Stoffe von großer Bedeutung sind.

$$R_{\text{ws}} = \left(\frac{t_p}{k_p} + \frac{d_s}{k_s} \right) \cdot \frac{1}{L \cdot \text{wet. } p} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:

R_{ws} ... Wärmewiderstand zwischen Abwasser – Erdreich (m.K/W), t_p ... Wandstärke der Haltung (m), d_s ... Eindringtiefe (m), k_p ... Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand (W/m.K), k_s ... Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (W/m.K), $\text{wet. } p$... benetzter Umfang (m), L ... Länge der Haltung (m)

Die in den Modellgleichungen enthaltenen Parameter sind jene, die bei der Implementierung den Haltungen neu hinzugefügt wurden. In Tabelle 3-1 sind die Modellparameter nach ihrer Bezeichnung als Haltungseigenschaften beschrieben.

Tabelle 3-1: Auflistung der spezifischen Haltungseigenschaften im Modell (Schlagbauer, 2018)

Inputvariable	Einheit	Beschreibung
Thickness	[m]	Wandstärke des Rohres
k_Pipe	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit des Rohres
k_Soil	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit des umliegenden Erdreichs
specHcSoil	[J/kg.K]	Spezifische Wärmekapazität des umliegenden Erdreichs
densitySoil	[kg/m ³]	Dichte des umliegenden Erdreichs
AirPattern	-	Ganglinie für die Lufttemperatur im Kanal
SoilPattern	-	Ganglinie für die Temperatur des umliegenden Erdreichs
thermalEnergy	[K oder kW]	Temperatur oder Leistung in Bezug auf die thermische Energiegewinnung

In einem Inputfile (Eingabedatei) werden alle Informationen über das Abwassernetz und die Simulationseinstellungen für das Modell definiert, welche im Anschluss in SWMM eingelesen werden. In Tabelle 3-2 sind die Bereiche beschrieben, die speziell für das Temperaturmodell angepasst werden müssen. Ein Beispiel für ein Inputfile kann im Anhang A entnommen werden.

Tabelle 3-2: Bearbeitete Bereiche der Inputdatei für das Temperaturmodell

Bereich	Beschreibung	Beschreibung des Inhalts
OPTIONS	Simulationseinstellungen	Einheit des Durchflusses, Simulationsdauer, Zeitschritte, Aktivierung oder Deaktivierung des Temperaturmodells, Definition von Konstanten
CONDUITS	Einstellungen für die Haltungen	Eigenschaften der Haltungen
DWF	Trockenwetterzufluss am Knoten	Definition der Zuflussmenge am Anfangsknoten, Definition der Abwassertemperatur beim Zufluss
POLLUTANTS	Einstellungen für die Schmutzfrachten	Definition der Einheit Celsius für die Temperatur als Schmutzfracht
PATTERNS	Multiplikatoren für Ganglinien	Definition der Ganglinien bestehend aus Multiplikatoren für die Bodentemperatur, die Kanallufttemperatur in den Haltungen und die Abwassertemperatur bei den Zuflüssen

Die Parameter werden im Inputfile den Haltungen als Eigenschaften zugewiesen. Beim Trockenwetterabfluss (DWF – Dry Weather Flow) wird der Zufluss an einem bestimmten Knoten und die im Zufluss auftretende Temperatur des Abwassers, in Abhängigkeit von sogenannten Pattern, definiert. Mithilfe einer Schmutzfracht wird die Einheit Celsius für die Temperatur erstellt und kann so einem Abfluss zugeordnet werden. Der Verlauf der Kanallufttemperatur und der Bodentemperatur werden genauso wie die Abwassertemperatur mittels Pattern definiert, da sie von der Zeit abhängig sind, und den Haltungen zugeordnet werden.

3.1.2 Steuerung des Temperaturmodells

Das Temperaturmodell wurde im Rahmen der Arbeit von Schlagbauer (2018) nicht in die grafische Benutzeroberfläche von SWMM integriert. Daher werden mittels Script-basierter Inputdateien die Eingangsparameter erstellt und die Modellergebnisse von SWMM ausgewertet. Die Ausführung des Modells, also das Einlesen der Input-Datei, die anschließende Simulation des Modells und das Erstellen der Output-Datei, wird mithilfe eines automatisierten Python-Scripts gesteuert.

3.1.3 Beschreibung der Messkampagnen

Für die Durchführung und Bewertung der Sensitivitätsanalyse sind reale Messdaten notwendig. In der Stadt Graz wurden im Rahmen des Projektes KathEA von der Holding Graz Wasserwirtschaft eine Messkampagne durchgeführt, wobei mehrere Messstrecken mit einzelnen Messstationen aufgebaut wurden. Im Zuge dessen wurden die Abwassertemperaturen, die Kanallufttemperaturen und die Temperaturen im Erdreich gemessen. Zur Modellkalibrierung über einen längeren Zeitraum wurden an folgenden Messstrecken Daten für die Abwassertemperatur und die Kanallufttemperatur erhoben:

- Messstrecke Graz-Andritz
- Messstrecke Graz-Brolli
- Messstrecke Graz-ARA
- Messstrecke Graz-Augarten

Um die Temperaturpattern, die an jeder Einleitstelle angesetzt werden, für das Modell ableiten zu können, wurden zusätzliche punktuelle Messungen für die Abwassertemperatur durchgeführt. Dabei wurde versucht die Messungen in möglichst unbeeinflussten Gebieten (Randgebiete) durchzuführen. Dazu wurden an den zwei folgenden Orten Messungen für die Abwassertemperatur durchgeführt:

- Messstelle Graz-Baiernstraße
- Messstelle Graz-Peterstalstraße

Die Temperatur im Erdreich wurde jeweils in drei unterschiedlichen Tiefen gemessen, um den Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Tiefe zu erhalten. Dafür wurde an folgenden Orten, je eine Messstelle im Stadtzentrum und eine am Stadtrand, Messungen durchgeführt:

- Messstelle Graz-Gritzenweg
- Messstelle Graz-Casino

Gemessen wurde in den Tiefen von 0.80 m, 1.15 m und 1.50 m von der Geländeoberkante. In Abbildung 3-3 ist eine Übersicht von allen Messstrecken und Messstellen dargestellt.



Abbildung 3-3: Übersichtsplan der Messstrecken und Messstellen

Seit Mitte 2018 stehen Messdaten zur Verfügung, jedoch gab es immer wieder Messausfälle aufgrund beschädigter Sensoren oder entleerter Batterien. Daher sind nur vereinzelt durchgehende Temperaturverläufe über den gesamten Messzeitraum aller Messstrecken vorhanden. Die Messungenaugigkeit der Temperatursensoren liegt, laut Herstellerangaben, bei $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer Drift von $< 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2 Analyse der Temperaturdaten

Um das Verhalten der Temperatur genauer betrachten zu können, wird in diesem Kapitel eine Analyse der Temperaturdaten durchgeführt. Dabei wird festgestellt, wie sich der Temperaturverlauf über die Jahreszeiten verändert und ob es einen Zusammenhang zwischen den Messergebnissen unterschiedlicher Temperaturarten gibt. Dabei wird zusätzlich ein möglicher Zusammenhang zwischen den gemessenen Temperaturen und dem Niederschlag überprüft.

3.2.1 Datenbereinigung

Es wird jener Zeitraum mit der geringsten Ausfallsrate ausgewertet. Fehlerhafte Daten werden nicht in die Auswertung miteinbezogen. Einzelne offensichtliche Ausreißer (z.B. ein Wert, der innerhalb von 5 Minuten um einige Grad steigt/fällt) werden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Da zum Zeitpunkt der Analyse bei der Messstrecke Graz-Brolli und Graz-Augarten keine durchgehenden Messdaten für beide Messungen Abwasser und Kanalluft in einem Jahr vorhanden sind, werden im Folgenden nur die Messstrecke Graz-Andriz und Graz-ARA für die Datenanalyse herangezogen. Die Messstrecke bei der Brolli GesmbH ist generell von den anderen Messungen zu unterscheiden, da dies der Schmutzwasserabfluss einer Großwäscherei ist und die Hydraulik und Abwassertemperaturen anderen Schwankungen als dem häuslichen Schmutzwasser ausgesetzt ist. Die Abwassertemperatur wird daher nicht nur durch das häusliche Schmutzwasser beeinflusst, sondern Großteils auch von den angeschlossenen Gewerbebetrieben. Daher müssen Gewerbe- und Industriebetriebe stets bei der Temperaturentwicklung mitberücksichtigt werden.

3.2.2 Messstrecke Graz-ARA

Die Messstrecke Graz-ARA befindet sich im Süden außerhalb der Stadt Graz, kurz vor der Abwasserreinigungsanlage Gössendorf. Bei dieser Strecke handelt es sich um den Kanalstrang kurz vor dem Zulauf der ARA. Um einen redundanten Betrieb gewährleisten zu können, sind an dieser Stelle zwei parallele Kanalstränge eingebaut. Daher fließt in diesem Strang die Hälfte des Abwassers der Stadt Graz und einzelner Nachbargemeinden in Richtung Kläranlage. In Abbildung 3-4 ist eine Übersicht der Messstationen der Messreihe ARA dargestellt.



Abbildung 3-4: Lage der Messstellen der Messreihe ARA

Auf Grund von Messausfällen sind auch bei dieser Messstrecke nicht bei allen Messstellen durchgehende Messungen vorhanden. Daher werden im Zuge der Datenanalyse die Daten der Messstelle ARA 17235, am Anfang der Strecke, und der Messstelle ARA 17287, am Ende der Strecke, bewertet. In Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 sind die Messwerte der Temperaturen bei den Messstationen ARA 17235 und ARA 17287 der Messreihe Graz-ARA als Zeitverlauf dargestellt. Für die Niederschlagswerte werden die Regendaten der Station am Flughafen Graz verwendet, da sich der Flughafen in der unmittelbaren Umgebung befindet. Die Bodentemperaturen werden getrennt von den anderen Daten in einem eigenen Kapitel behandelt, da die Messungen an einer anderen Stelle im Stadtgebiet durchgeführt wurden.

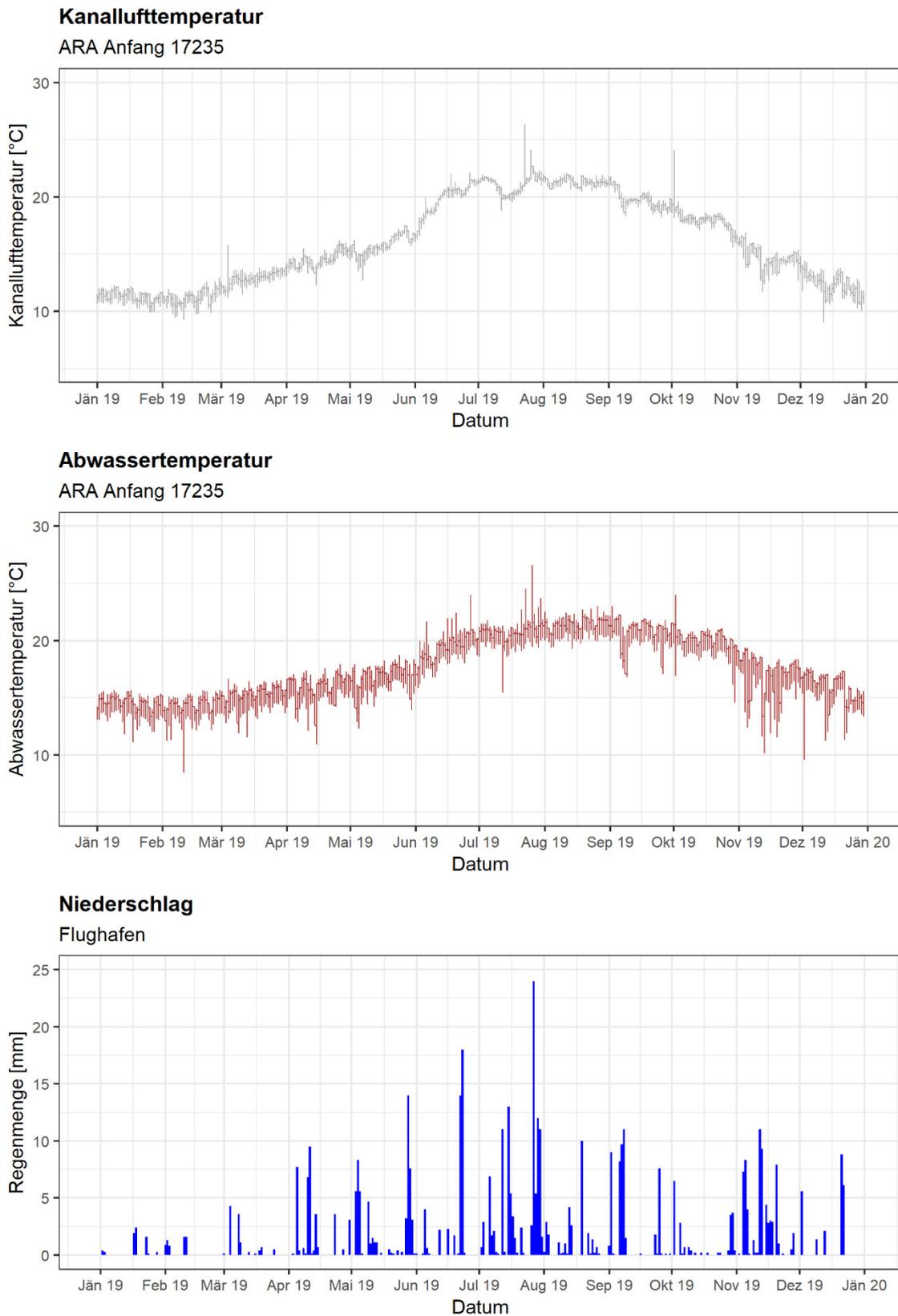


Abbildung 3-5: Gemessener Verlauf der Kanalluft- und der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17235 mit den Niederschlagswerten der Messstation Flughafen Graz im Jahr 2019

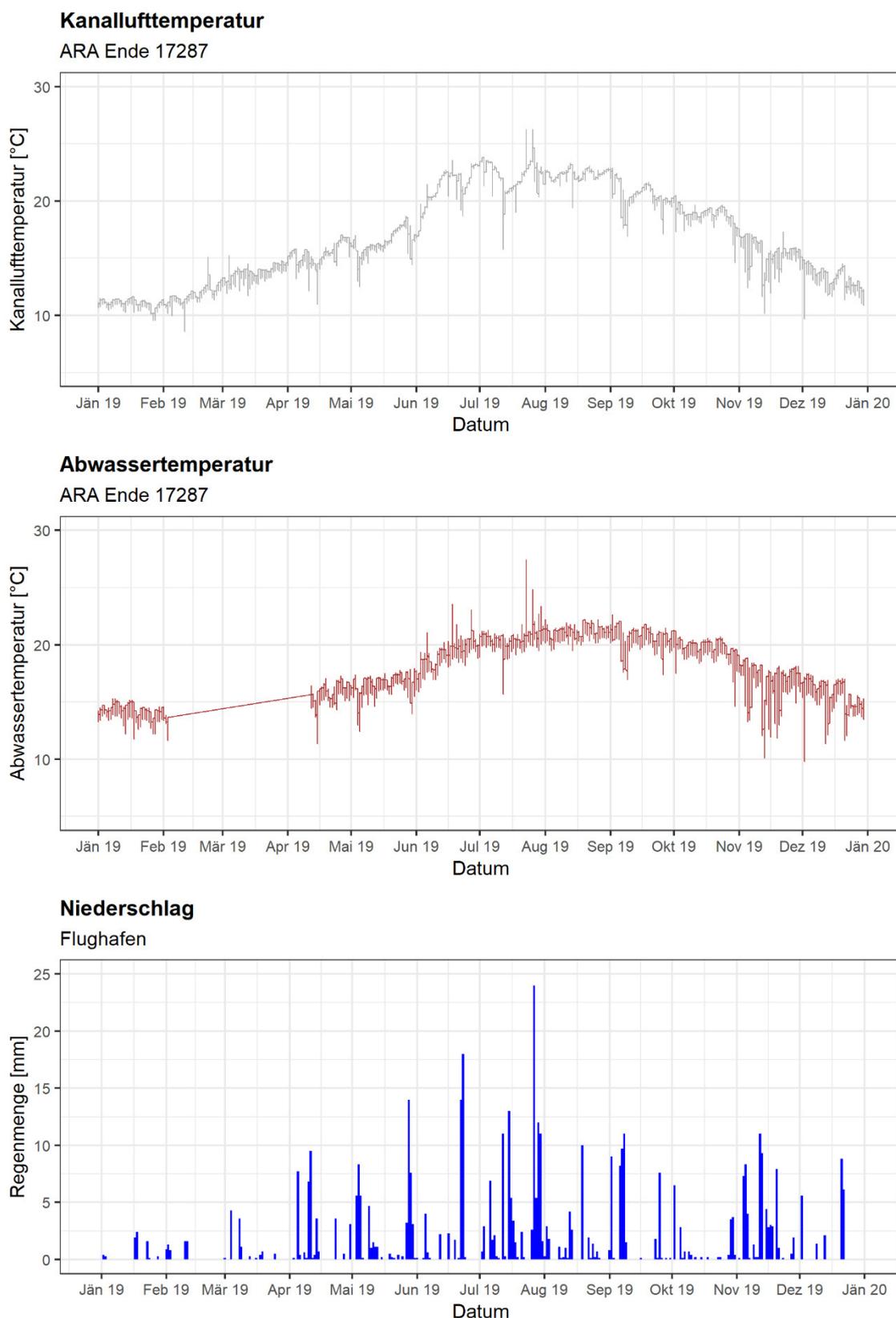


Abbildung 3-6: Gemessener Verlauf der Kanalluft- und der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17287 mit Niederschlagswerten der Messstation Flughafen Graz im Jahr 2019; einschließlich einem Sensorausfall bei der Messung der Abwassertemperatur zwischen Februar und April

Es ist zu erkennen, dass die Kanallufttemperatur im Winter kältere und im Sommer wärmere Temperaturen annimmt als die Abwassertemperatur. Außerdem ist ersichtlich, dass an Tagen mit auffallend hoher Abwassertemperatur auch die Lufttemperatur höher ist. Eine abfallende Abwassertemperatur durch den Regen ist nur an manchen Ereignissen erkennbar, wie zum Beispiel im September und im November. Es kann auch beobachtet werden, dass die Abwassertemperatur gegenüber der Kanallufttemperatur größere Schwankungen innerhalb von einem Tag erfährt. Der Verlauf der Abwassertemperatur über das Jahr befindet sich hauptsächlich zwischen 12 °C und 22 °C. Beim Verlauf der Abwasser- und Kanallufttemperaturen kann kein Unterschied der beiden Messstellen erkannt werden. Eine größere Änderung der Temperaturen auf der Strecke zwischen den Messstellen ist nicht feststellbar.

Durch eine Korrelationsanalyse soll geklärt werden, wie und ob die Messdaten der Abwassertemperatur, der Kanallufttemperatur und der Niederschlagsmenge zusammenhängen. Es wird die Spearman-Korrelationsanalyse durchgeführt, da die Daten nicht normalverteilt sind (Abbildung 3-10). Diesbezüglich sind in Abbildung 3-7 die Streudiagramme dargestellt.

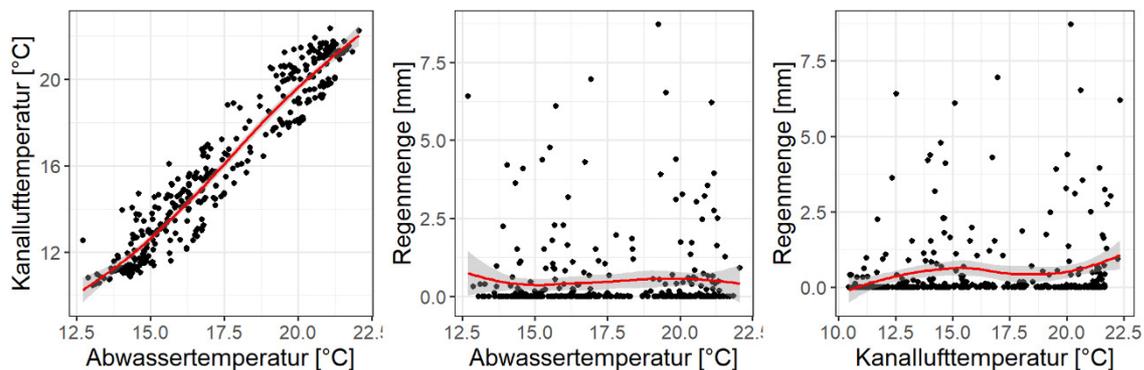


Abbildung 3-7: Streudiagramme der Messdaten Abwassertemperatur, Kanallufttemperatur und Regenmenge

Die Analyse ergibt, dass die Abwassertemperatur und die Kanallufttemperatur einen starken positiven und linearen Zusammenhang haben. Das bestätigt, dass die Temperatur des Abwassers gemeinsam mit der Temperatur der Kanalluft ansteigt. Mit den Regendaten kann anhand der Korrelationsanalyse nur ein sehr schwacher positiver Zusammenhang festgestellt werden. In Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 ist zu erkennen, dass ein länger anhaltender Regen zu einer Abkühlung von Abwasser und Kanalluft führt. Dieses Erkenntnis ist wichtig für die Annahme, dass nur der Trockenwetterabfluss im Modell berücksichtigt wird. Bei einem größeren Einfluss durch den Niederschlag müssten die dadurch entstehenden hydrologischen Prozesse im Modell mitberücksichtigt werden, was wiederum zu einem komplexeren Aufbau des Modells und zu längeren Simulationszeiten führen würde.

Um den Unterschied der Temperaturdaten vom Abwasser und der Kanalluft genauer darzustellen, sind in Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 Boxplots über ein Jahr und über jeden einzelnen Monat der Messdaten dargestellt. Dabei fällt an den Quartilen auf, dass die Temperaturen der Kanalluft über das Jahr gesehen größere Streuung aufweisen als die Temperaturen des Abwassers. Daher ist der Verlauf der Abwassertemperatur konstanter und die Kanallufttemperatur ist viel größeren Schwankungen ausgesetzt. Die Abwassertemperaturen bei der Messstelle ARA 17287 scheint noch konstantere Werte zu haben als bei der Messstelle ARA 17235. Dies könnte auf die fehlenden Daten zwischen den Monaten Februar und April zurückzuführen sein. Eine Übersicht aller statistischen Kennwerte der Messungen kann in Anhang B entnommen werden.

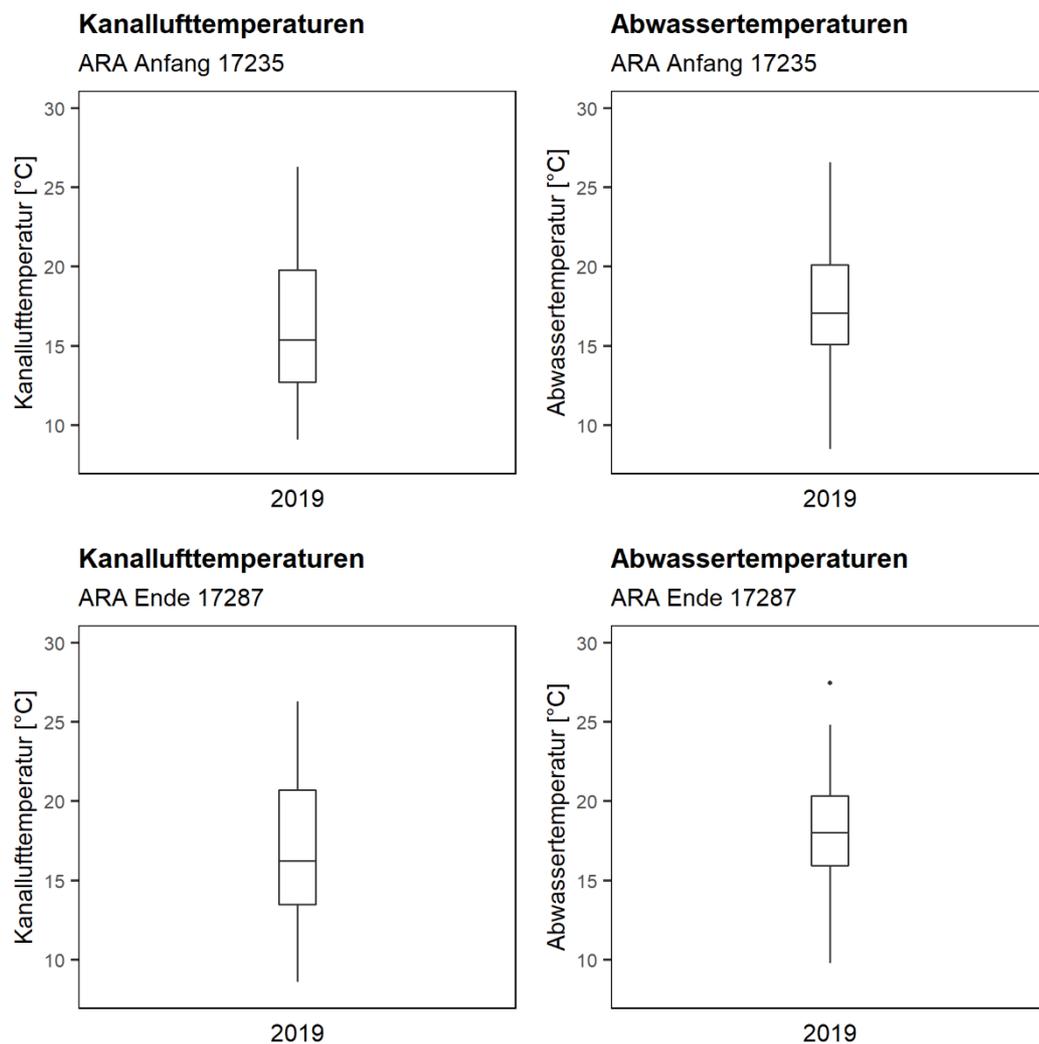


Abbildung 3-8: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen vom Jahr 2019 bei den Messstellen 17235 und 17287

Bei den monatlichen Darstellungen der Boxplots in Abbildung 3-9 kann der Temperaturverlauf über die Jahreszeiten beobachtet werden. Es wird gezeigt, in welchem Bereich die Temperaturen pro Monat liegen. Die wärmsten Monate sind für das Abwasser der Juli, der August und der September (Median Juli: ~20.6 °C, Median August: ~21.1 °C, Median September: ~20.7 °C) und für die Kanalluft der

Juni, der Juli und der August (Median Juni: ~21.0 °C, Median Juli: ~22.3 °C, Median August: ~22.1 °C). Wie auch schon bei den Temperaturverläufen beobachtet wurde, nimmt die Kanallufttemperatur im Sommer und im Winter wärmere bzw. kältere Temperaturen an als die Abwassertemperatur.

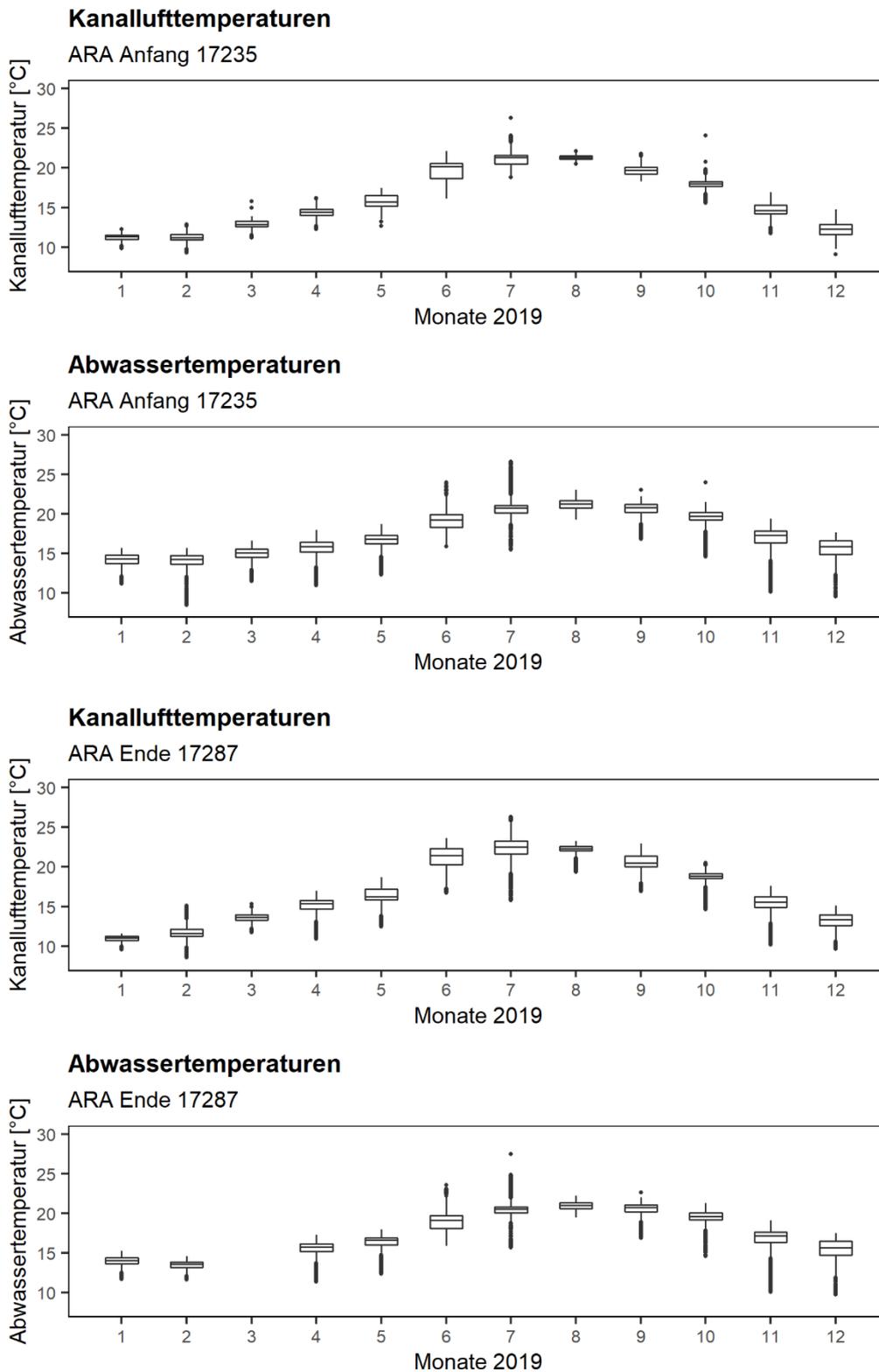


Abbildung 3-9: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen pro Monat im Jahr 2019 bei den Messstellen 17235 und 17287

In den Histogrammen in Abbildung 3-10 ist die Häufigkeit der Kanalluft- und der Abwassertemperaturen dargestellt. Es ist eine Verteilung der Daten mit zwei Hochpunkten erkennbar, was bedeutet, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Diese Hochpunkte entstehen, ähnlich wie beim Temperaturverlauf von Abwasser und Kanalluft, durch die Saisonale Veränderung der Temperaturen. Deutlich ist auch die größere Streuung der Kanallufttemperaturen ersichtlich. Bei der Messstelle ARA 17287 ist auch wieder das Fehlen von Messdaten durch den Sensorausfall erkennbar, da hier der Hochpunkt zwischen 10 °C und 15 °C kleiner ausfällt.

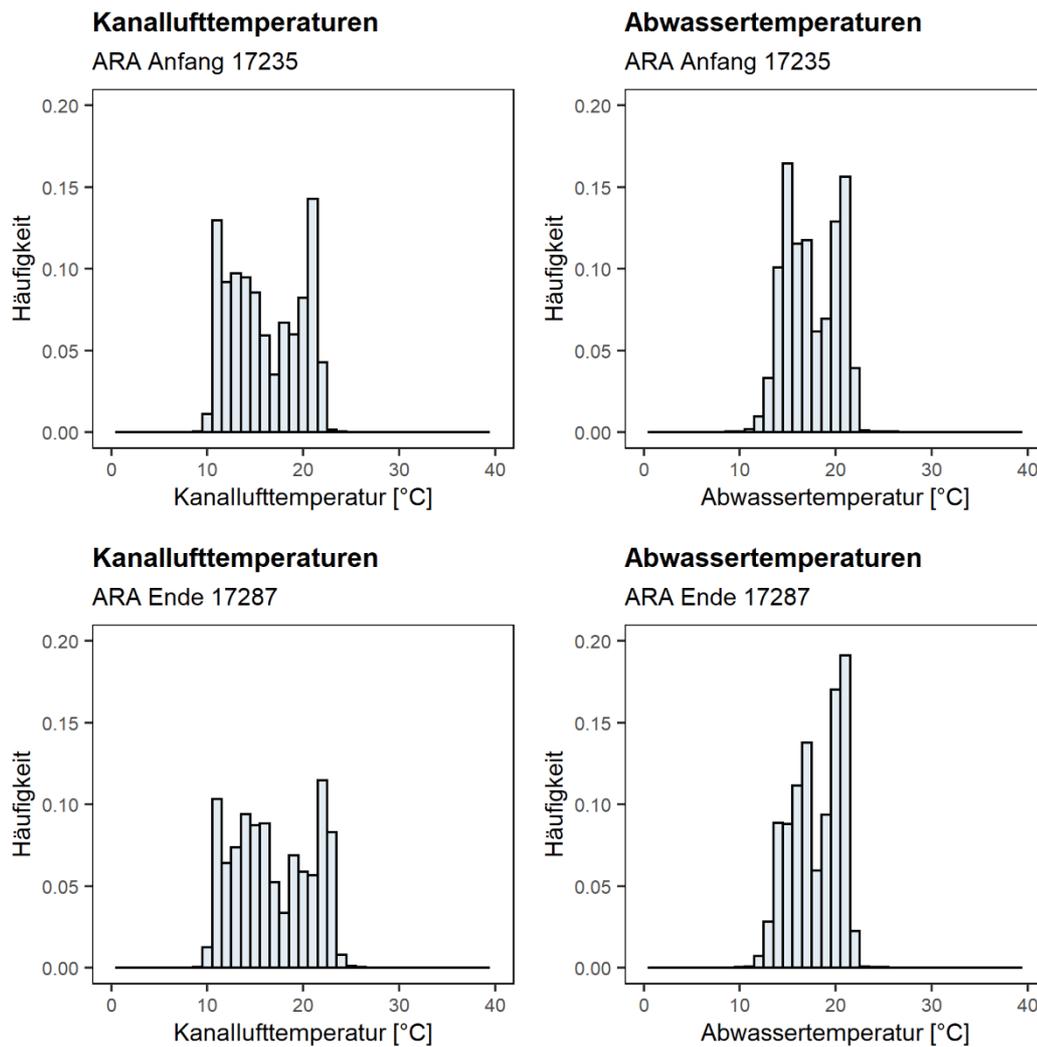


Abbildung 3-10: Histogramme der Kanalluft- und Abwassertemperaturen im Jahr 2019 bei den Messstellen 17235 und 17287

3.2.3 Messstrecke Graz-Andritz

Die Messstrecke Graz-Andritz befindet sich im nördlichen Teil der Stadt Graz, welcher einen urbanen Charakter aufweist. An diesem Strang ist ein kleineres Einzugsgebiet angeschlossen, daher ist die Durchflussrate geringer. In Abbildung 3-11 ist eine Übersicht der Messstationen der Messreihe Graz-Andritz dargestellt.

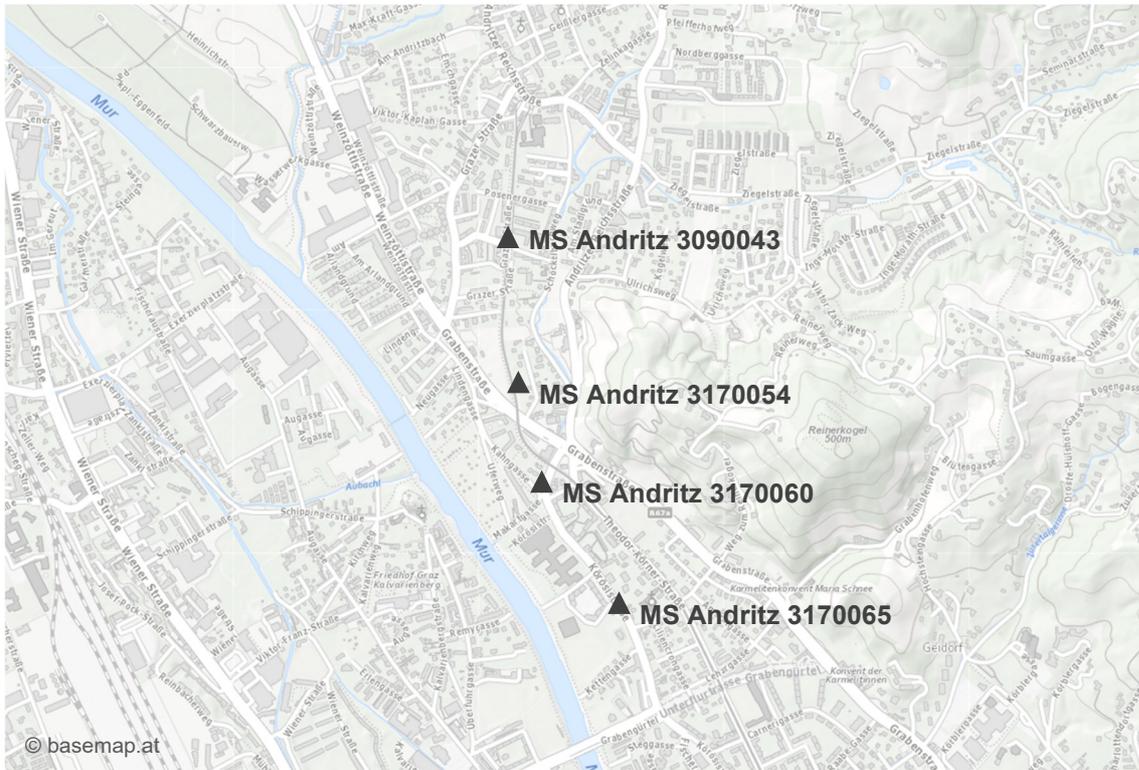


Abbildung 3-11: Lage der Messstellen der Messreihe in Andritz

Auf Grund von Messausfällen sind auch bei dieser Messstrecke nicht bei allen Messstellen durchgehende Messungen vorhanden. Daher werden im Zuge der Datenanalyse die Daten der Messstelle Andritz 3170065, die am Ende der Strecke liegt, bewertet. In Abbildung 3-12 sind die Messwerte der Temperaturen bei dieser Messstelle als Zeitverlauf dargestellt. Für die Niederschlagswerte werden die Regendaten der Station Andritz verwendet.

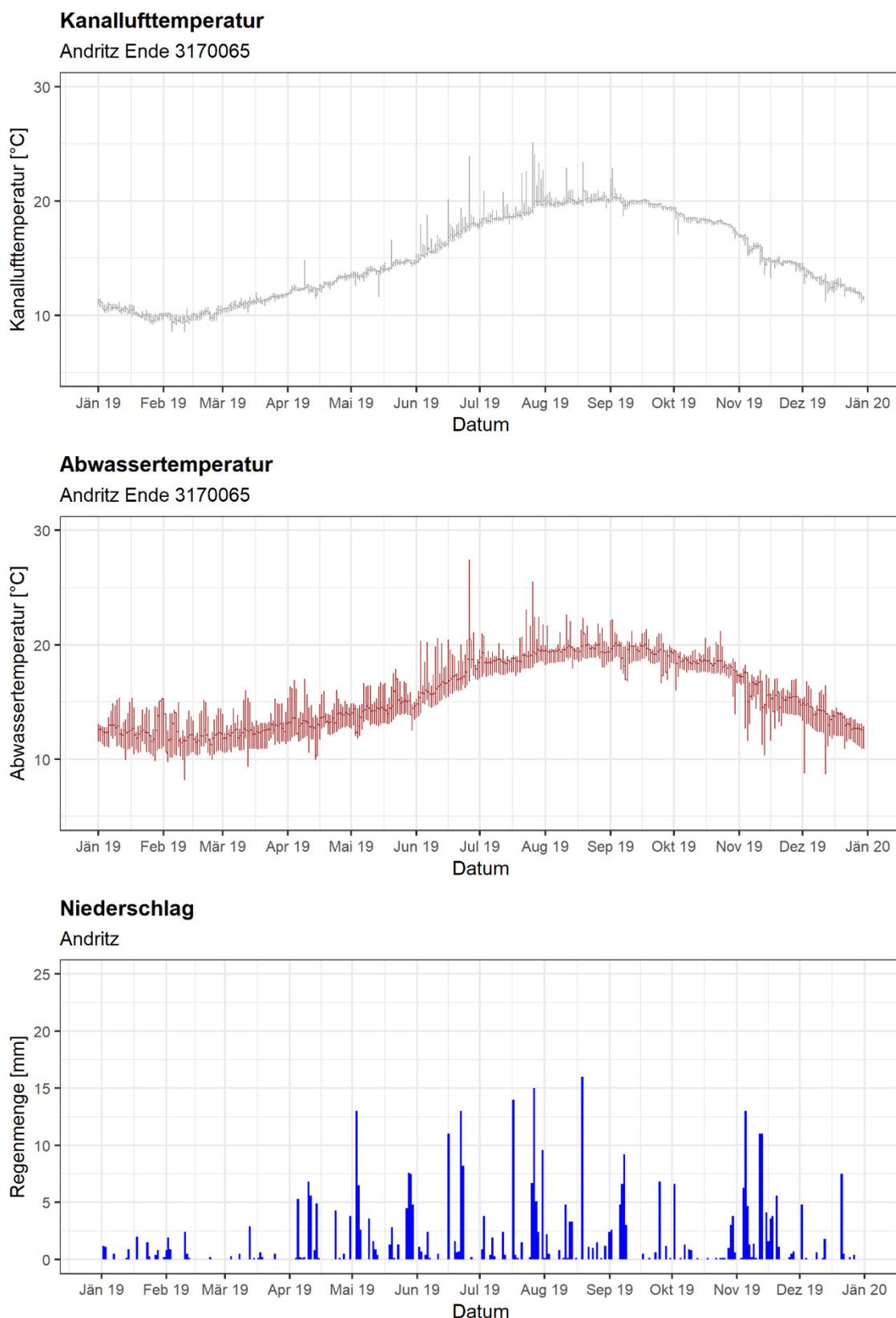


Abbildung 3-12: Temperaturverlauf der Kanalluft und der Abwassertemperatur bei der Messstelle 3170065 mit Niederschlagswerten vom Bezirk Andritz im Jahr 2019

Anders als bei der Messstrecke Graz-ARA ist die Kanallufttemperatur im Winter und im Sommer fast gleich wie die Abwassertemperatur. Der Verlauf der Abwassertemperatur und der Kanallufttemperatur über das Jahr befindet sich hauptsächlich zwischen 10 °C und 20 °C, also generell kühler als bei der Messreihe ARA. Weiters ist erkennbar, dass die Abwassertemperatur viel größeren Schwankungen ausgesetzt ist als die Kanallufttemperatur. Die Temperatur der Kanalluft bei der Messstelle Graz-Andritz 3170065 weist viel geringere Schwankungen auf als bei den Messstellen der Messstrecke Graz-ARA. Ein Grund dafür könnte die Lage der Messstrecke in der Stadt sein. Durch die Bebauungen wird die Temperatur konstanter gehalten. Die Abwassertemperatur hat größere Schwankungen als bei der ARA. Dies ist auf die geringere Durchflussrate zurückzuführen. Dadurch sind die Schwankungen über den Tag größer, da auch der Durchfluss stark schwankt.

Eine abfallende Abwassertemperatur durch den Regen ist nur an manchen Ereignissen erkennbar, wie zum Beispiel im November. Durch eine Korrelationsanalyse soll geklärt werden, wie und ob die Messdaten der Abwassertemperatur, der Kanallufttemperatur und der Niederschlagsmenge zusammenhängen. Es wird abermals die Spearman-Korrelationsanalyse durchgeführt, da die Daten nicht normalverteilt sind (Abbildung 3-16). Diesbezüglich sind in Abbildung 3-13 die Streudiagramme dargestellt.

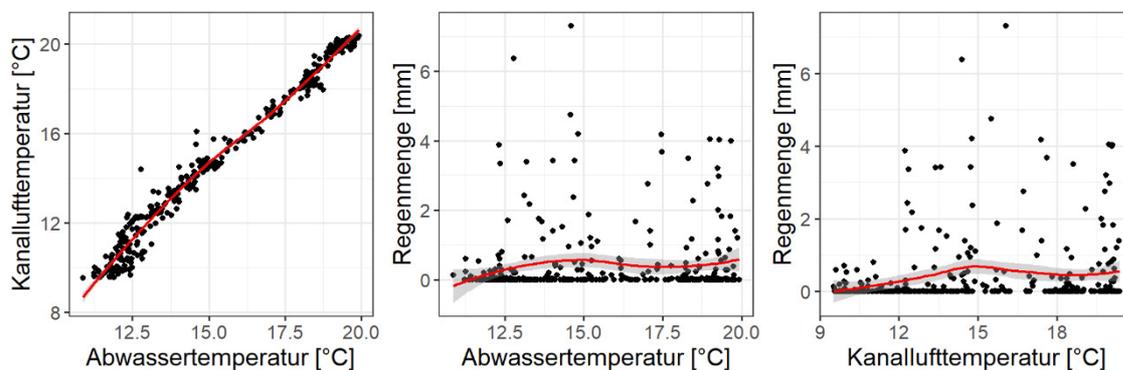


Abbildung 3-13: Streudiagramme der Messdaten

Auch bei der Messreihe Andritz ergibt die Korrelationsanalyse, dass die Abwassertemperatur und die Kanallufttemperatur einen starken positiven und linearen Zusammenhang haben. Das bestätigt, dass die Temperatur des Abwassers gemeinsam mit der Temperatur der Kanalluft ansteigt. Mit den Regendaten kann anhand der Korrelationsanalyse nur ein sehr schwacher positiver Zusammenhang festgestellt werden. In Abbildung 3-12 ist zu erkennen, dass ein länger anhaltender Regen, wie der im November, zu einer Abkühlung von Abwasser und Kanalluft führt.

Um den Unterschied der Temperaturdaten genauer darzustellen, sind in Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15 Boxplots der Messdaten über ein Jahr und über jeden einzelnen Monat dargestellt. Dabei fällt an den Quartilen auf, dass die Temperaturen der Kanalluft über das Jahr gesehen nur ein wenig größere Streuung aufweisen als die Temperaturen des Abwassers. Eine Übersicht aller statistischen Kennwerte der Messungen kann in Anhang B entnommen werden.

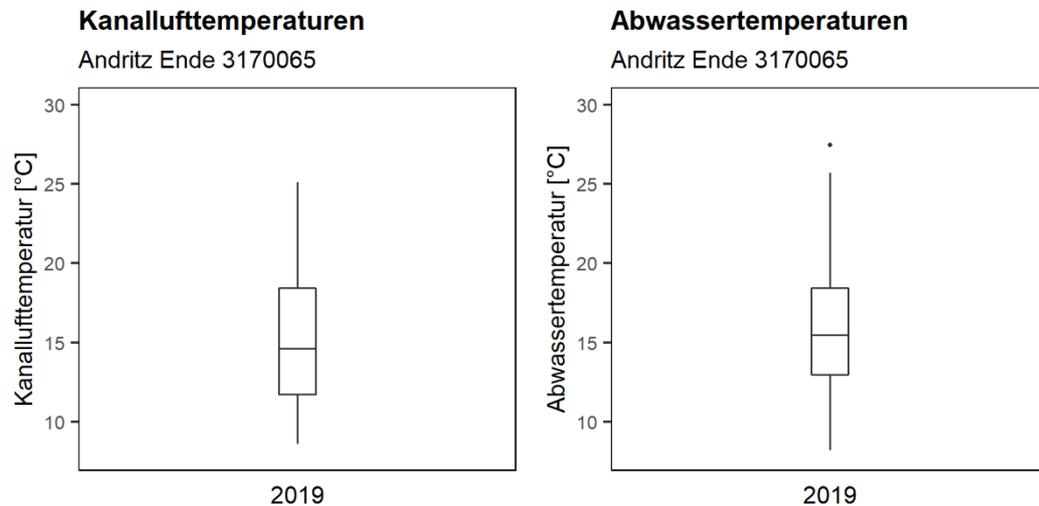


Abbildung 3-14: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen vom Jahr 2019 bei der Messstelle 3170065

Bei den monatlichen Darstellungen der Boxplots in Abbildung 3-15 ist der Temperaturverlauf über die Jahreszeiten ersichtlich. Hier kann beobachtet werden, in welchem Bereich die Temperaturen pro Monat liegen. Die wärmsten Monate sind sowohl für das Abwasser (Median Juli: ~18.4 °C, Median August: ~19.4 °C, Median September: ~18.3 °C) als auch für die Kanalluft (Median Juli: ~18.6 °C, Median August: ~20.0 °C, Median September: ~19.9 °C) im Juli, August und September. Es fällt auf, dass die Kanallufttemperatur innerhalb eines Monats generell kleinere Streuungen aufweist als die Abwassertemperatur.

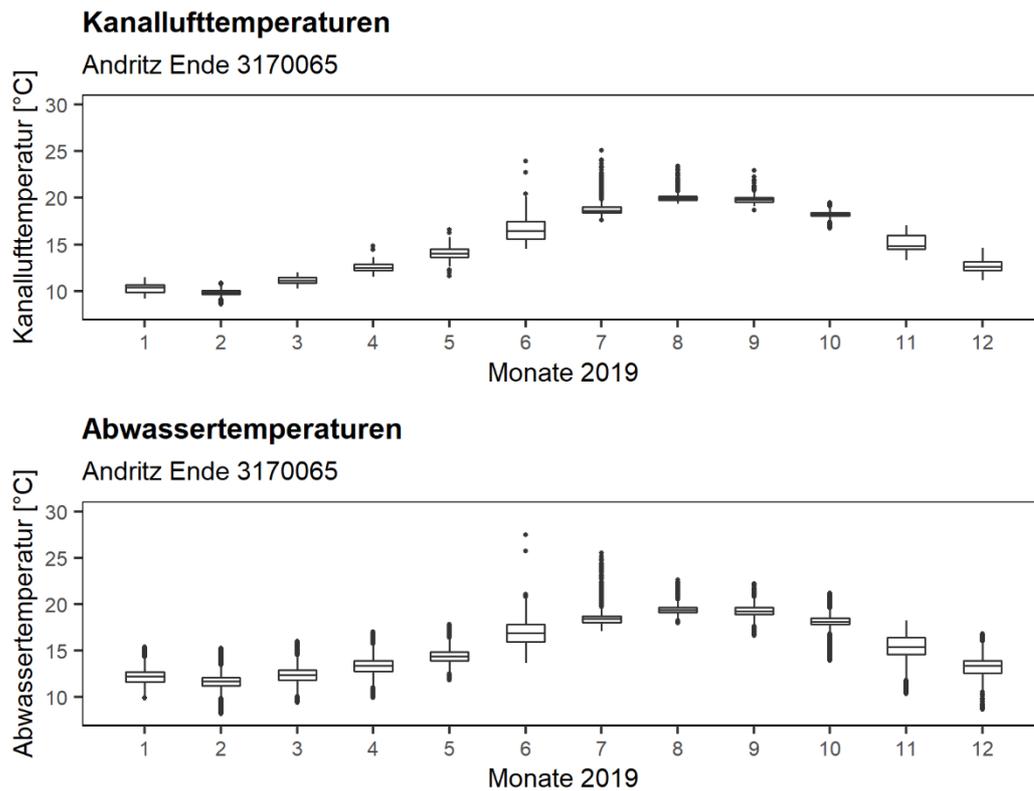


Abbildung 3-15: Boxplots der Kanalluft- und Abwassertemperaturen pro Monat im Jahr 2019 bei der Messstelle 3170065

In den Histogrammen in Abbildung 3-16 ist die Häufigkeit der Kanalluft- und der Abwassertemperaturen dargestellt. Es ist eine Verteilung der Daten mit zwei Hochpunkten erkennbar, was bedeutet, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Diese Hochpunkte entstehen, gleich wie beim Temperaturverlauf von Abwasser und Kanalluft, durch die Saisonale Veränderung der Temperaturen. Auch hier ist eine Ähnlichkeit der Temperaturverteilungen zwischen Kanalluft und Abwasser erkennbar.

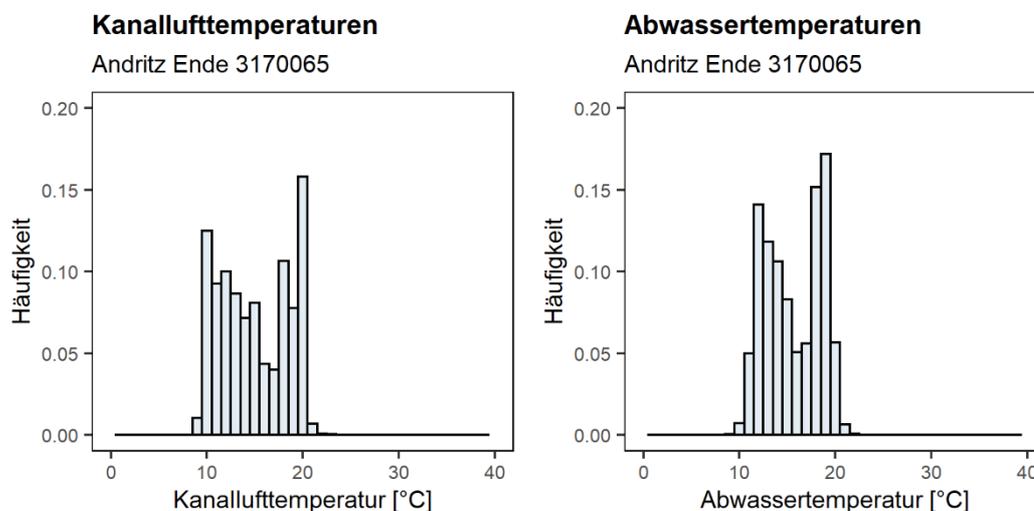


Abbildung 3-16: Histogramme der Kanalluft- und Abwassertemperaturen pro Monat im Jahr 2019 bei der Messstelle 317065

3.2.4 Verhalten der Bodentemperaturen

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der Bodentemperaturen bei den Messstellen Graz-Gritzenweg und Graz-Casino bewertet. Dabei werden die Ergebnisse vom Zeitraum November 2019 bis April 2020 ausgewertet. Hierbei handelt es sich um jenen Zeitraum, zu dem die längsten durchgehenden Verläufe der Bodentemperatur zum Zeitpunkt der Auswertung vorhanden sind.

Die Temperatur im Erdreich wurde in drei unterschiedlichen Tiefen gemessen. In Abbildung 3-17 sind die gemessenen Temperaturverläufe der Messstellen Graz-Gritzenweg, die sich außerhalb der Stadt befindet, und Graz-Casino, die sich im Stadtzentrum befindet, dargestellt. Es kann beobachtet werden, dass in den kälteren Jahreszeiten von November bis April der Boden in der Tiefe eine höhere Temperatur aufweist als der Boden näher an der Oberfläche. Im April bis geschätzt Oktober kehrt sich dies um, sodass es an der Bodenoberfläche wärmer ist als in 1.50 m Tiefe.

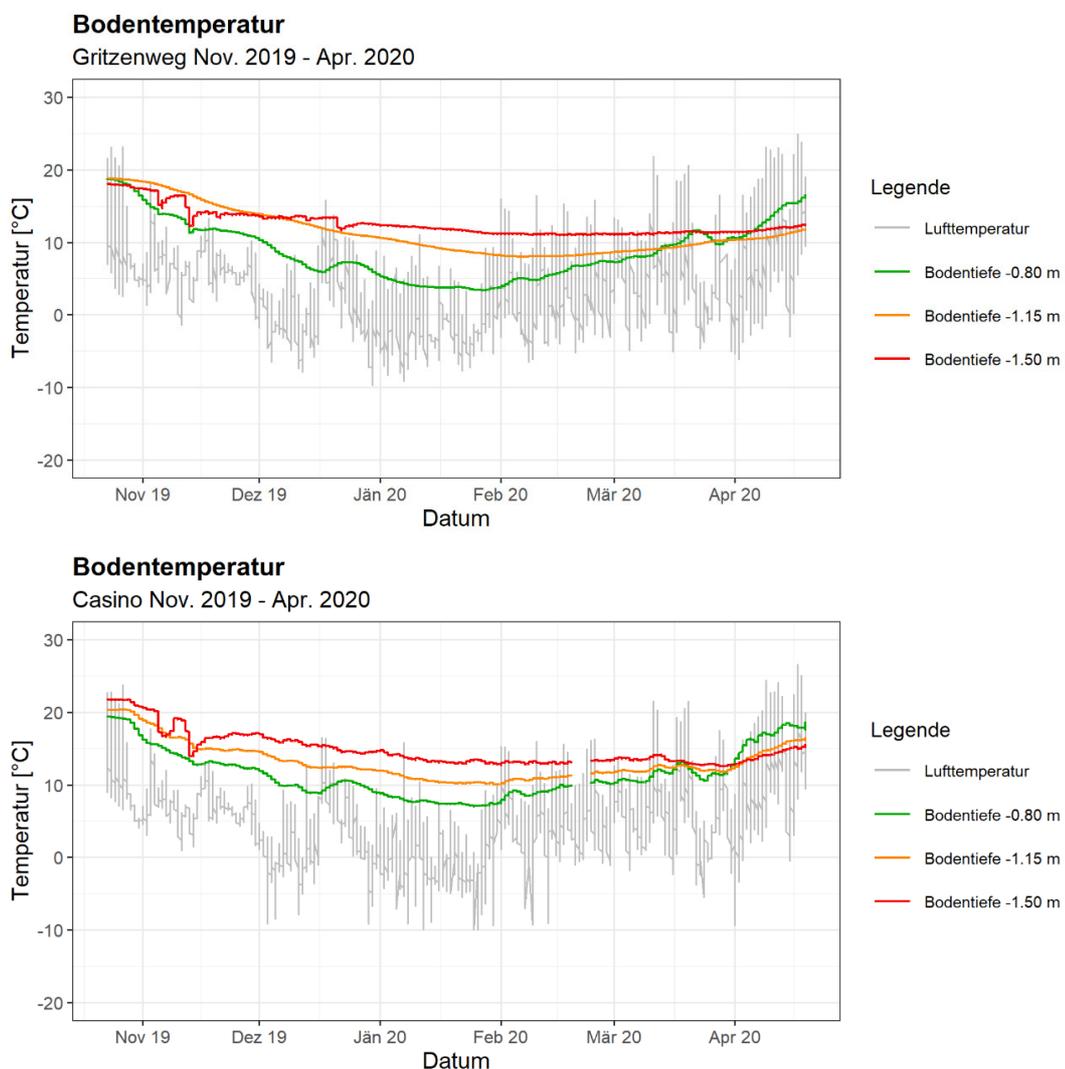


Abbildung 3-17: Verlauf der Bodentemperaturen bei den Messstellen Graz-Gritzenweg und Graz-Casino von November 2019 bis April 2020 mit dem Verlauf der Lufttemperatur

Zusätzlich zu den Bodentemperaturen ist in Abbildung 3-17 der Verlauf der Lufttemperatur eingezeichnet. Dazu werden die Daten der Wetterstation Flughafen Graz (Meteorologische Messdaten der ZAMG, 2021) mit der Messstelle Gritzenweg verglichen. Die Wetterstation Flughafen Graz wird gewählt, da diese Daten am besten mit einem Punkt am Stadtrand vergleichbar sind. Bei der Messstelle Casino werden zum Vergleich die Messdaten der Lufttemperatur bei der Messstation Stremayrgasse der TU Graz verwendet. Beim Vergleich der Messwerte der Bodentemperatur in 0.80 m Tiefe und der Lufttemperatur ist erkennbar, dass sich die Bodentemperatur nahe der Oberfläche an die Lufttemperatur angleicht.

Mit Hilfe der Differenzenplots in Abbildung 3-18 werden die beiden Temperaturverläufe der Messungen der Bodentemperaturen bei der Messstelle Graz-Casino und der Messstelle Graz-Gritzenweg gegenübergestellt. Dazu wird in rot die Differenz zwischen den beiden Messstellen dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Bodentemperatur im Stadtzentrum beim Casino größtenteils höher ist als am Stadtrand bei der Messstelle Gritzenweg.

Die Abweichungen zwischen den gemessenen Temperaturen der beiden Messstellen weisen auf eine Abhängigkeit von der Tiefe des Messpunktes hin. Dabei nimmt die Abweichung mit der Tiefe ab. In 0.80 m Tiefe gibt es Abweichungen von bis zu 5.1 °C, in 1.15 m Tiefe von bis zu 4.8 °C und in 1.50 m Tiefe gibt es Abweichungen von bis zu 3.2 °C zwischen den beiden Messstellen.

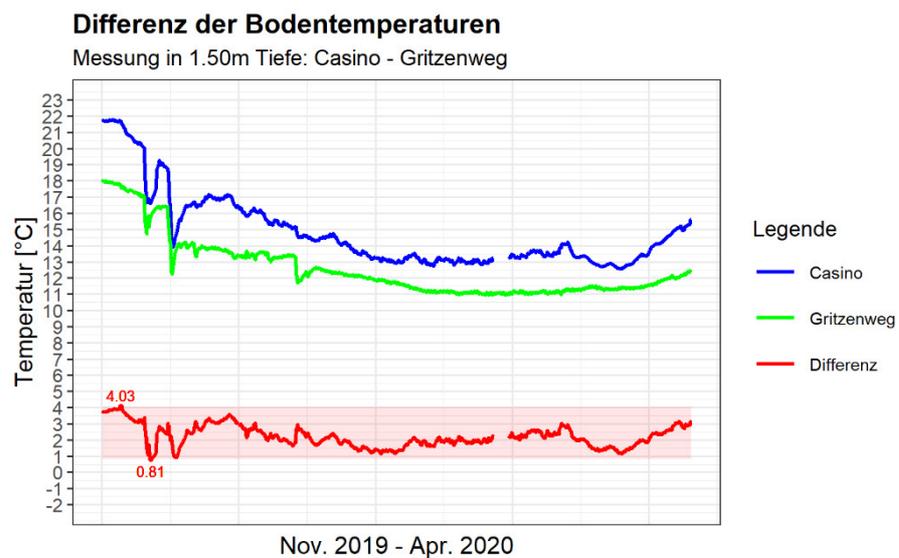
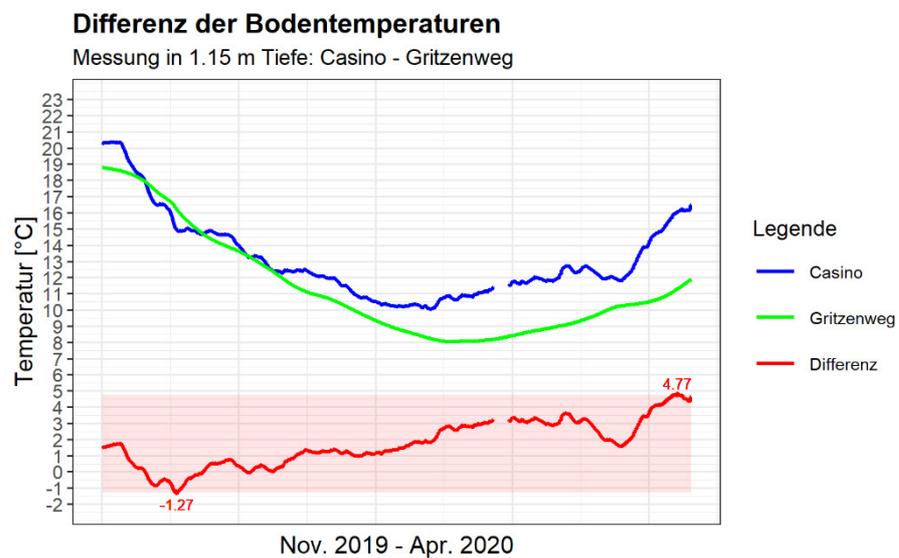
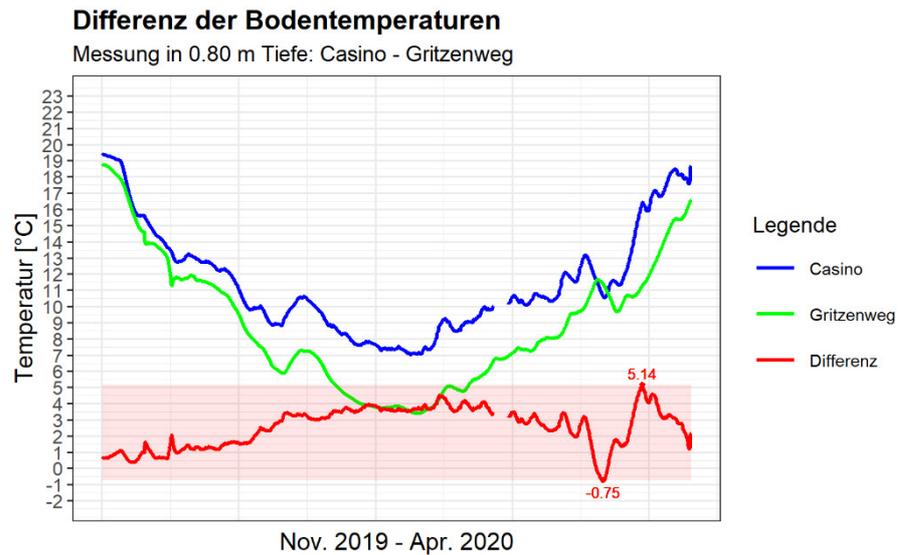


Abbildung 3-18: Verlauf der Bodentemperaturen bei der Messstelle Casino und der Messstelle Gritzenweg im November 2019 bis Jänner 2020 mit der Differenz zwischen den beiden Temperaturverläufen

In Abbildung 3-19 sind die Boxplots der Temperaturmessungen vom Erdreich von November 2019 bis April 2020 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Form der Verteilungen bei beiden Messstellen sehr ähnlich ist. Lediglich die Streuungen sind unterschiedlich. Wie beim Temperaturverlauf ist auch hier der Temperaturunterschied der Messstellen in und außerhalb der Stadt zu sehen. Der Median bei der Messstelle Graz-Casino liegt in allen drei Messtiefen höher als bei der Messstelle Graz-Gritzenweg.

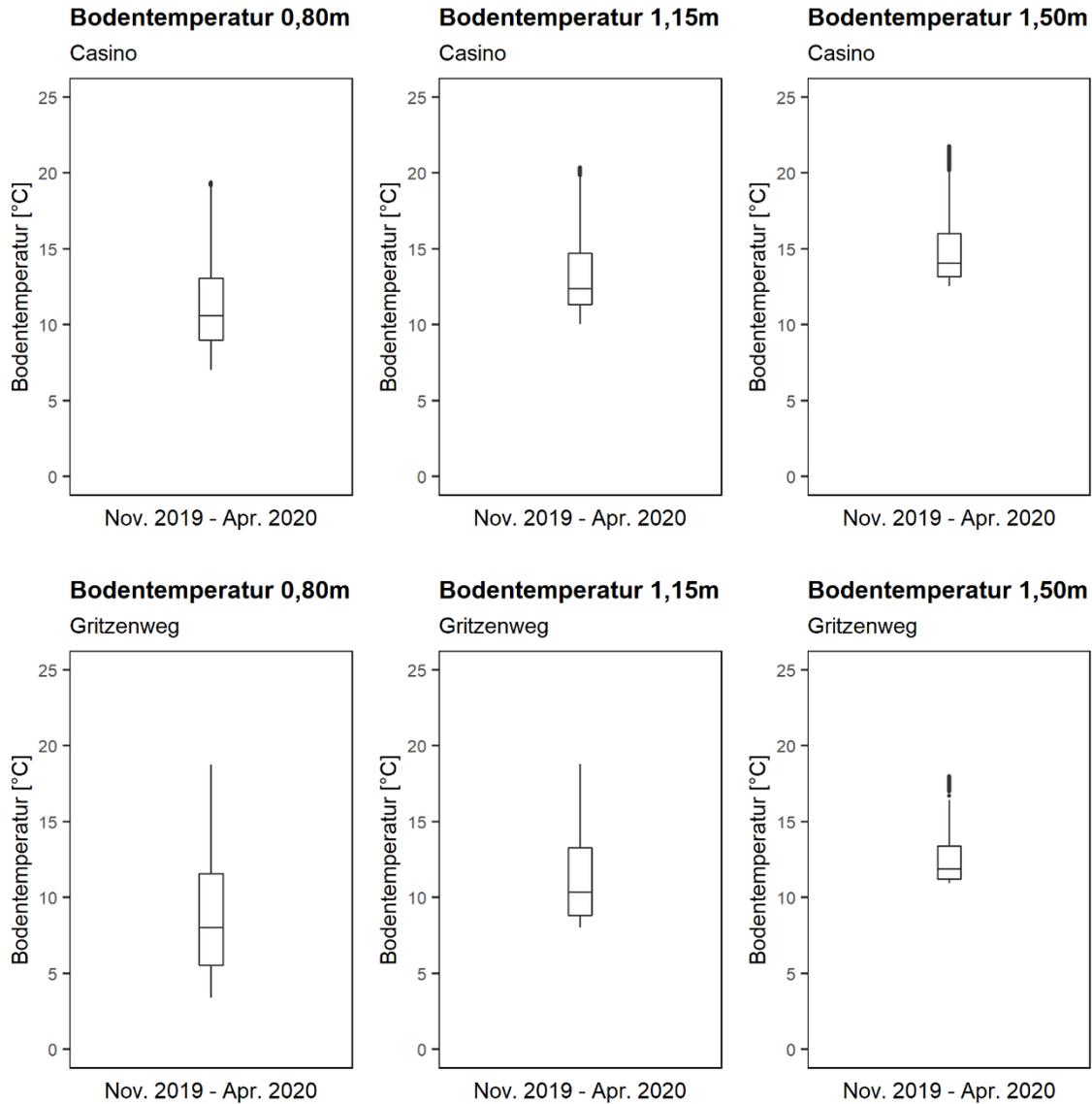


Abbildung 3-19: Boxplots der Bodentemperaturen von November 2019 bis April 2020; oben: bei der Messstelle Casino; unten: bei der Messstelle Gritzenweg

3.2.5 Zusammenfassung

Es wurde festgestellt, dass sich die Temperaturen am Anfang des Kanalnetzes von den Temperaturen am Ende des Kanalnetzes unterscheiden. Am Beginn des Systems, wo erst wenige Zuflüsse in einem Strang transportiert werden, gibt es größere Schwankungen der Abwassertemperatur über den Tag als kurz vor der ARA, wo die Menge des Durchflusses hoch ist. Bei der Kanallufttemperatur verhalten sich die Schwankungen andersherum. Dabei ist die Temperatur der Kanalluft außerhalb der Stadt größeren Schwankungen über den Tag ausgesetzt als am Anfang des Kanalnetzes innerhalb der Stadt. Die Temperatur vom Abwasser und von der Kanalluft sind am Beginn des Kanalnetzes im Durchschnitt niedriger als beim Zulauf der ARA. Aus den Messungen geht hervor, dass die Abwassertemperatur im Kanalsystem ungefähr zwischen 8 °C und 28 °C schwankt, sich aber hauptsächlich zwischen 10 °C und 20 °C befindet. Grundsätzlich ist die Kanallufttemperatur im Sommer höher und im Winter niedriger als die Temperatur des Abwassers. Beide Temperaturen sind von der Jahreszeit abhängig, daher steigen und fallen die Kanallufttemperatur und Abwassertemperatur immer ungefähr zur selben Zeit. Ein Einfluss auf die Temperaturen durch den Niederschlag konnte nicht signifikant festgestellt werden.

Durch die Lufttemperatur und die Sonneneinstrahlung wird die Bodentemperatur beeinflusst. Daher ist die Temperatur an der Oberfläche im Sommer höher als im Erdreich und im Winter ist die Temperatur an der Oberfläche geringer als im Erdreich. Mit der Tiefe nehmen die Temperaturschwankungen ab und werden konstanter. Durch die Besiedelung wird mehr Wärme dem Boden abgegeben und gespeichert. Daher ist die Bodentemperatur im Stadtzentrum allgemein höher als am Stadtrand, vor allem im Sommer können sich in der Stadt sogenannte „urbanen Hitzeinseln“ bilden, welche auch in den Messdaten erkennbar sind.

3.3 Grundlagen der Sensitivitätsanalyse

Ein Modell ist ein rechnerischer Arbeitsablauf, bei dem das Verhalten eines Systems simuliert wird. Mit Eingangsgrößen (Inputdaten) werden Randbedingungen und Anfangszustände beschrieben. Zu diesen zählen zum Beispiel Parameter, die in den Modellgleichungen auftreten. Der Output (Ausgangsgröße, Ergebnis) ist eine Zustandsvariable, die das Ergebnis zusammenfasst und nach der Ausführung des Modells gewonnen wird. Die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen kann mit folgender Formel erklärt werden. (Pianosi et al., 2016)

$$y = g(x) \qquad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

y ... Ausgangsgröße (Output), x ... $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ der Vektor der Eingangsparameter im Untersuchungsraum Ω , g ... die Funktion, die die Eingangsgrößen in die Ausgangsgröße umsetzt

Weiters sind Modelle abgeleitete Darstellungen der Wirklichkeit. Dabei verhält sich ein Modell nie genau gleich wie das echte System. Daraus ergeben sich Unsicherheiten im Aufbau, im Ablauf und in den Ergebnissen des Modells. Dennoch kann ein Modell zur Erklärung oder Vorhersage des Verhaltens eines Systems verwendet werden. Mit einer Sensitivitätsanalyse (SA) werden jene Modellparameter ermittelt, welche die Unsicherheit im Modellergebnis am meisten beeinflussen. (Saltelli et al., 2008)

Grundsätzlich läuft eine Sensitivitätsanalyse so ab, dass die Modellparameter verändert werden und die daraus resultierende Änderung im Modellergebnis bewertet wird. Dabei wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt. Durch diese Analyse kann erforscht werden, welche Parameter den größten Einfluss auf das Modellergebnis haben, ob es Parameter gibt, die einen vernachlässigbaren kleinen Einfluss auf das Modellergebnis haben und ob es Parameter gibt, die einen anderen Parameter beeinflussen und so die Auswirkung dieses individuellen Parameters auf das Modellergebnis verändern. Die Sensitivitätsanalyse kann auch zur Unterstützung für eine Modellkalibrierung herangezogen werden. Diese hat das Ziel das Modell so anzupassen, dass das errechnete Ergebnis mit gemessenen Werten übereinstimmt. (Pianosi et al., 2016)

Je nach dem welcher Aspekt aus der Analyse gezogen werden will, gibt es verschiedene Methoden für die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse. Es kann zum Beispiel eine lokale oder eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Bei der Lokalen Sensitivitätsanalyse wird nur ein Parameter um einen bestimmten Wert variiert, um die Auswirkung auf die Änderung des Outputs zu untersuchen. Bei der Globalen Sensitivitätsanalyse (GSA - Global Sensitivity Analysis) werden mehrere Eingangsparameter um ihren gesamten Wertebereich variiert.

Weiters kann zwischen einer quantitativen und einer qualitativen SA unterschieden werden. Mit der quantitativen Sensitivitätsanalyse wird der relative Einfluss jedes Parameters durch nachvollziehbare Sensitivitätsmaße beschrieben. Bei der qualitativen Sensitivitätsanalyse wird die Sensitivität der Parameter in bildlichen Datendarstellungen abgebildet. Es kann auch zwischen der „one-at-a-time“ (OAT) – Methode und der „all-at-a-time“ (AAT) – Methode unterscheiden werden. Hierbei geht es um die Strategie, nach der die Stichproben einer stichprobenbasierten Sensitivitätsanalyse erstellt werden. Bei der OAT-Methode wird jeweils ein Parameter variiert, während die anderen Parameter einen fixen Wert behalten. Bei der AAT-Methode werden alle Parameter gleichzeitig variiert. Dabei kann der direkte Einfluss jedes einzelnen Parameters auf den Output und der Einfluss durch Interaktionen zwischen Parametern festgestellt werden. Dies ist jedoch mit einem größeren Rechenaufwand verbunden als bei der OAT-Methode, die keinen derartig detaillierten Überblick verschafft. (Pianosi et al., 2016)

In Abbildung 3-20 ist der gewählte Ablauf für die Sensitivitätsanalyse systematisch dargestellt. Dabei werden aus dem Temperaturmodell TU GRAZ und den Messdaten der Messkampagnen bzw. Kennwerten aus der Literatur Wertebereiche für die Parameter gewählt. Anschließend werden aus den Modellparametern mehrere Stichproben erstellt, die alle unterschiedliche Werte innerhalb des definierten Bereichs enthalten. Infolgedessen kann das Modell mit jeder Stichprobe simuliert werden und die Ergebnisse werden anschließend analysiert.

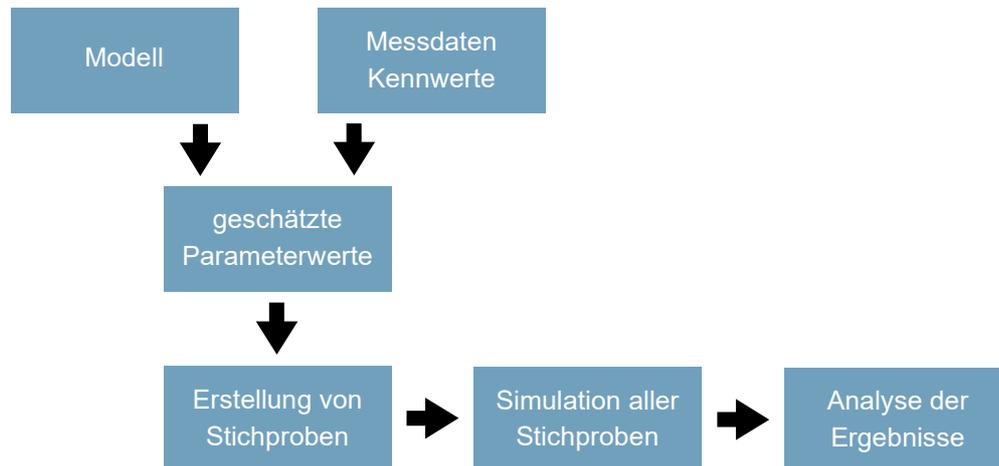


Abbildung 3-20: Systematische Darstellung des Ablaufs einer Sensitivitätsanalyse

3.3.1 Morris Screening

Um den größten Einfluss auf die Temperaturänderung vom Abwasser in einer Haltung zu festzustellen, wird die Morris-Methode (Morris, 1991) für die Analyse gewählt.

Die Morris-Methode ist ein angemessenes Analyseverfahren mit geringer Rechenkapazität für das „screening“, also das Identifizieren von Eingangsparameter mit vernachlässigbarem Einfluss auf das Modellergebnis, und das „ranking“, das Finden der Parameter mit dem größten Einfluss mithilfe einer Rangordnung. Diese Methode wird auch Elementarer Effekt Test (EET) genannt und ist eine detailliertere OAT-Methode, die auch Hinweise auf mögliche Wechselbeziehungen von Parametern und auf nicht-lineare Zusammenhänge zwischen Parameter und Output gibt. Die Morris-Methode liefert quantitative Ergebnisse, es kann also nicht genau festgestellt werden, um wie viel ein Parameter mehr Einfluss hat als ein anderer. Es kann nur bewertet werden, ob eine Änderung um einen Wert vom Output auf Basis einer Änderung vom Input bedeutend ist oder nicht. (Morris, 1991; Pianosi et al., 2016)

Bei dieser Methode wird ein Modell mit k voneinander unabhängigen Parametern x_1, x_2, \dots, x_k betrachtet. Die Parameter werden innerhalb eines Wertebereiches variiert, der durch einen k -dimensionalen Untersuchungsraum Ω beschrieben wird und in einen p -stufigen Raster unterteilt ist. Die Rastergrößen stellen die

Schrittgrößen Δ bei einer Änderung eines Parameters dar. Jede Kombination von Inputparametern beschreibt einen Punkt X_i im Untersuchungsraum. In Abbildung 3-21 ist ein Beispiel für einen Untersuchungsraum Ω eines Modells mit 3 Parametern und einem 4-stufigen Raster dargestellt.

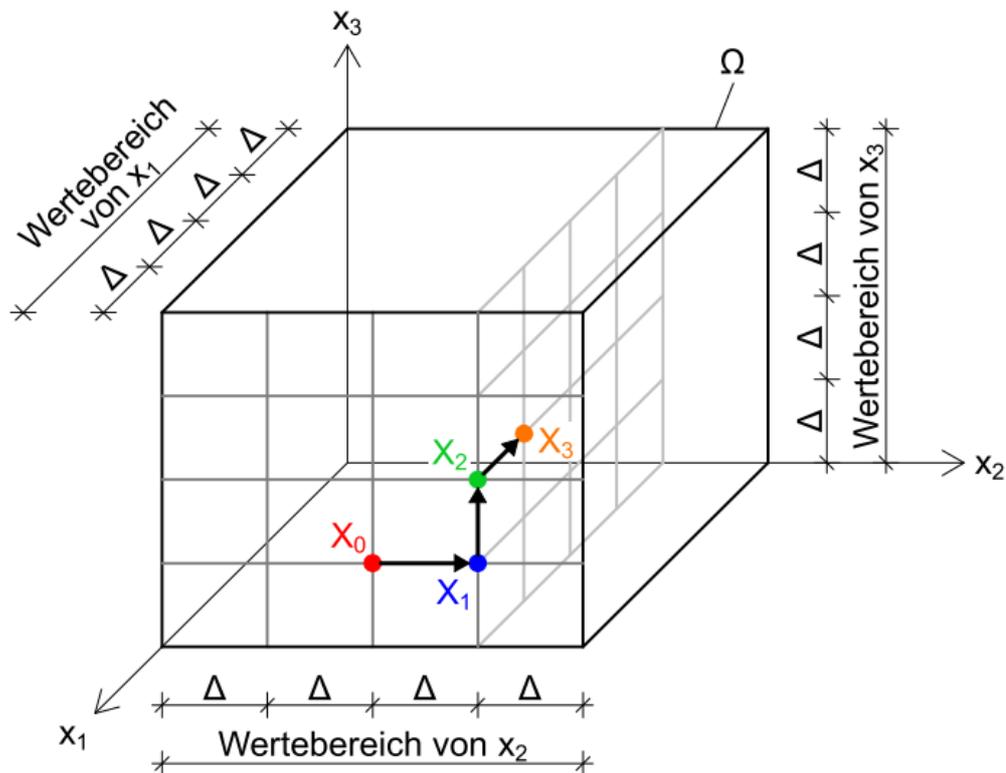


Abbildung 3-21: Darstellung eines k -dimensionalen Untersuchungsraumes Ω , mit $k = 3$ Parameter und einem 4-stufigen Raster mit der Schrittgröße Δ (Saltelli et al., 2008; mod.)

Innerhalb dieses Untersuchungsraumes werden die Parameter variiert. Der Elementare Effekt ergibt sich, wie in Gleichung (3-5) ersichtlich, aus dem Verhältnis von der Änderung vom Output durch die Variation eines Parameters um den Wert Δ , zur Schrittgröße Δ . (Saltelli et al., 2008)

$$EE_i = \frac{|f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta, \dots, x_k) - f(x_1, x_2, \dots, x_k)|}{\Delta} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

EE_i ... Elementare Effekt des i -ten Parameters, $y=f(x)$... Ausgangsvariable (Output), x_i ... Eingangsparameter (Input), k ... Anzahl der Eingangsparameter, Δ ... Schrittgröße

Ein großer Elementarer Effekt (EE) bedeutet eine große Änderung des Outputs durch die Änderung um Δ eines Parameters. Mit den ermittelten Elementaren Effekten werden die Sensitivitätsmaße μ und δ berechnet, mit denen die Sensitivität der Parameter quantitativ bewertet werden kann.

3.3.2 Erstellung der Stichproben

Um die Sensitivitätsmaße berechnen zu können, muss für jeden Parameter eine Anzahl an Elementaren Effekten berechnet werden. Die Anzahl r an Elementaren Effekten pro Parameter wird abhängig von den Anforderungen an die Genauigkeit der Analyse gewählt. Der Wert r beschreibt auch die Stichprobengröße pro Parameter. Um eine Verteilung von EE pro Parameter zu erhalten, werden zufällige Stichproben X_m bestehend aus Parameterkombinationen aus dem Untersuchungsraum Ω erstellt. Die Sampling-Strategie beschreibt, wie die Inputparameter x_n ausgewählt werden. Ein Beispiel dazu ist in Abbildung 3-21 dargestellt. Die Stichproben X_m werden durch Kurven im Untersuchungsraum, die jeweils $m = k+1$ Punkte enthalten, erstellt. Jeder dieser Punkte X_m beschreibt eine Parameterkombination. Der Startpunkt X_0 jeder Kurve wird in einem gleichmäßigen Raster zufällig ausgewählt. Die restlichen Punkte der Kurve werden durch Veränderung eines zufälligen Parameters nach dem anderen um den fixen Wert Δ in eine zufällige Richtung erstellt, bis alle Parameter eine Änderung erfahren haben. Daraus ergeben sich $k+1$ Parameterkombinationen. Die Anzahl an benötigten Kurven ist gleich der Stichprobengröße r . Daraus ergibt sich eine Verteilung von EEs pro Parameter. Der dafür benötigte Rechenaufwand, und damit die Anzahl an erforderlichen Modellsimulationen, kann mit folgender Gleichung berechnet werden. (Morris, 1991; Saltelli et al., 2008; Pianosi et al., 2016)

$$N = r * (k + 1) \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit:

N ... Anzahl der benötigten Simulationen, r ... Stichprobengröße pro Parameter, k ... Anzahl der Parameter

Um das Verhalten der Effekte auf den Output angemessen analysieren zu können, muss eine ausreichende Anzahl an Modellevaluationen ausgeführt werden. Wenige Simulationen bei einer hohen Anzahl an vorhandenen Parametern führt zu geringen Informationen zum Einfluss auf den Output. Aus diesem Grund wird die Stichprobengröße r proportional zur Anzahl an Inputs k gewählt. Ein weiterer wichtiger Schritt bei der Anwendung dieser Methode ist die Wahl der Schrittweite Δ und der Anzahl der Rasterstufen p , die vor dem Sampling definiert werden müssen. Dabei ist die Wahl von p von der Anzahl r der EE pro Parameter abhängig. Eine große Anzahl p an möglichen Stufen bedeutet eine höhere Genauigkeit der Stichprobe. Wenn gleichzeitig ein kleiner Wert für r gewählt werden würde, würden viele mögliche Stufen nicht in die Bewertung miteinbezogen. Laut Campolongo et al. (2007) ist $p/(2*(p-1))$ eine geeignete Wahl für die Schrittweite Δ und für die Anzahl an Stufen p wird eine gerade Zahl gewählt. (Campolongo et al., 2007; Saltelli et al., 2008)

3.3.3 Berechnung der Sensitivität

Aus jeder Kurve können k Elementare Effekte bestimmt werden. Dabei werden, wie in Gleichung (3-5) dargestellt, immer zwei Punkte der Kurve betrachtet. Nach jeder Änderung eines Parameters wird der EE berechnet. Mit den berechneten Elementaren Effekten können die Sensitivitätsmaße ermittelt werden. Dabei wird aus den Verteilungen von EE die Mittelwerte μ und die Standardabweichung δ pro Parameter bestimmt und anschließend bewertet. Der Mittelwert stellt den allgemeinen Einfluss vom Parameter auf den Output dar. Ein großer Wert μ bedeutet einen großen Einfluss vom Modellparameter auf den Output. Ein großer Wert δ bedeutet, dass der Einfluss vom Modellparameter auf den Output stark von anderen Parametern abhängt oder ein nicht-linearer Einfluss vom Parameter auf den Output vorhanden ist. Eine alternative Methode zur Berechnung von μ wurde von Campologno et al. (2007) weiterentwickelt. Hier wird ein neues Sensitivitätsmaß μ^* vorgestellt, das den absoluten Wert des Mittelwertes aus den Verteilungen von EEs darstellt. Mit diesem Sensitivitätsmaß soll vermieden werden, dass sich die Einflüsse durch negative Vorzeichen gegenseitig aufheben. Weiters wurde die Auswahl der Startpunkte X_0 optimiert, sodass die Verteilung der Punkte im gesamten Parameterraum maximiert wird.

3.4 Beschreibung der Modellstruktur

Auf Grundlage des Temperaturmodells TU GRAZ werden zwei Abwassernetze erstellt, die einen Teil oder das gesamte Kanalsystem von Graz nachbilden. Durch diese Abwassernetze kann nach einer Simulation festgestellt werden, wie sich die Temperaturen im Kanalsystem entwickeln. Anhand von Literaturen und Tabellenwerken können die Wertebereiche der Modellparameter auf die realen Gegebenheiten abgestimmt werden. Die Simulation der Kanalnetze erfolgt mit verschiedenen Szenarien, die ebenfalls in diesem Abschnitt festgelegt werden. Mit der Untersuchung zweier stark unterschiedlicher Systeme soll das Verhalten der Parameter besser bewertet werden können.

3.4.1 Kanalstrang ARA

Das erste Kanalnetz stellt eine Nachbildung des etwa 2 km langen Kanalstranges kurz vor der ARA Gössendorf dar. Der Aufbau des Systems bestehend aus Hal-tungen und Knoten ist in Abbildung 3-22 dargestellt. Dabei ist diese Strecke durch jeweils einen Zufluss und einen Auslass charakterisiert. Dadurch wird der gesamte Abschnitt mit derselben Abwassermenge durchströmt. Der Durchfluss beinhaltet die Hälfte des Abwassers der Stadt Graz mit dem Abwasser aus einzelnen Nachbargemeinden und Gewerbegebieten. Der Auslass des Kanalstranges endet beim Zulauf der ARA.

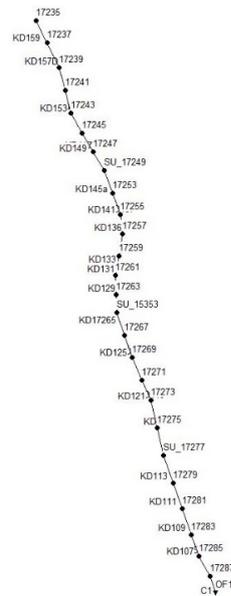


Abbildung 3-22: Darstellung des Kanalstrangs ARA in SWMM

3.4.2 Kanalnetz Graz

Um den Effekt der Länge zu berücksichtigen, wird beim zweiten Abwassernetz das gesamte Kanalnetz der Stadt Graz, bestehend aus 860 km Kanal, erstellt. Das System aus Zuflüssen, Haltungen und Knoten ist in Abbildung 3-23 dargestellt. Dabei endet das Netz wieder mit einem Auslass beim Zulauf der ARA GösSENDorf. Die Durchflüsse berechnen sich für jede Haltung je nach den vorhandenen Zuläufen aus den Einleitpunkten. Die Zuflüsse ergeben sich aus den häuslichen Zuflüssen der Stadt Graz und aus zusätzlich insgesamt 22 weiteren externen Zuläufen aus den Nachbargemeinden und Gewerbegebieten.



Abbildung 3-23: Darstellung des Kanalnetzes Graz in SWMM

3.4.3 Modellparameter und Wertebereiche

Aus den in 3.1.1 besprochenen Gleichungen ergeben sich neun veränderliche Modellvariablen, die durch Variierung einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden können. Die sechs Modellparameter Bodendichte, Spezifische Wärmekapazität Boden, Wärmeleitfähigkeit Boden, Wärmeleitfähigkeit Rohr, Wandstärke Rohr und Zufluss sind durch eine skalare Größe charakterisiert.

Die Abwassertemperatur, Kanallufttemperatur und Bodentemperatur fließen als Ganglinien in das Modell ein. Für die Boden- und Kanallufttemperatur gibt es je ein sogenanntes Pattern das den Temperaturverlauf jedes Monats in einer Haltung beschreibt. Diese Pattern werden aus den gemessenen Daten durch einen Skript basierten Algorithmus erstellt, welcher im Rahmen einer Masterarbeit von M. Pichler (2018) entwickelt wurde. Bei der Anfangsabwassertemperatur gibt es je ein Pattern das den Temperaturverlauf über den Tag, über die Woche und über ein Jahr beschreibt. Weiters wird der Zufluss über ein Tagespattern, oder durch eine skalare Größe für externe Zuflüsse aus den Nachbargemeinden und Gewerbegebieten definiert.

Im Folgenden werden die Wertebereiche der Parameter der örtlichen und geometrischen Gegebenheiten angepasst. Die Grenzwerte werden aus Tabellenwerken entnommen oder aus den Messergebnissen abgeleitet. Für die Sensitivitätsanalyse stellen die Wertebereiche einen Richtwert für den Parameter dar, da nur der Einfluss der Parameter auf das Modellergebnis analysiert wird. Erst bei der Kalibrierung müssen die genauen Werte für die Modellparameter definiert werden.

3.4.3.1 Bodendichte

Ein Boden ist ein uneinheitliches Gemisch aus festen Teilchen, die sich bewegen können, und mit Wasser und Luft gefüllten Poren. Dabei können die Feststoffe im Boden unterschiedlich locker oder dicht gelagert sein. Je nach Anteil und Eigenschaften von Feststoffen, Wasser und Luft ergibt sich die Dichte des Bodens in kg/m^3 . (Zilch et al., 2013).

In der Arbeit von Schlagbauer (2018) wurde bei der Untersuchung der Szenarien für die Plausibilitätskontrolle ein lehmiger Boden herangezogen. Jedoch sind im Stadtgebiet von Graz verschiedenste Bodenarten vorhanden. Der Boden auf der westlichen Seite der Mur besteht zu einem großen Teil aus Schotter. Weiters kommen sandiger Kies, schluffige und lehmige Sande vor. Der Boden auf der östlichen Seite der Mur besteht aus Schotter mit einer starken Inhomogenität aus Lehm und Sand. (Stadt Graz Stadtvermessungsamt, 2008)

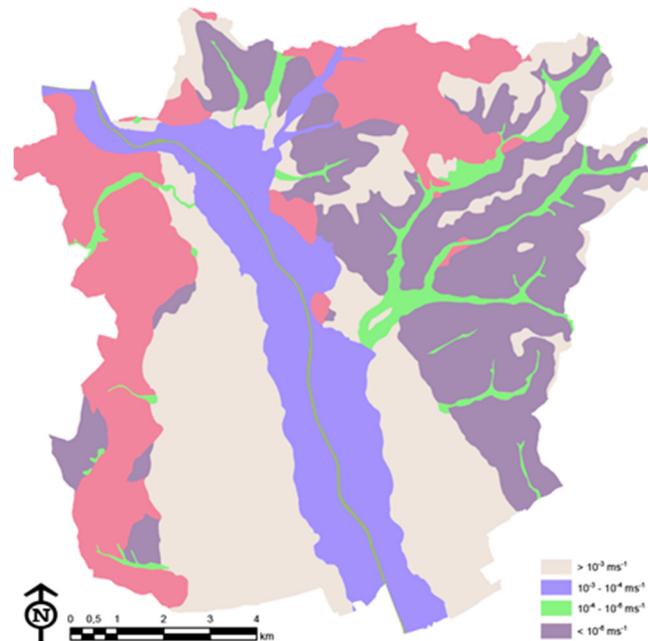


Abbildung 3-24: Bodenarten in Graz: Schotter (beige), Sand (blau), sandiger Lehm (grün), Lehm (braun), Ton o. Fels (rot) (Stadtvermessungsamt Graz)

In Abbildung 3-24 ist die Durchlässigkeit der vorkommenden Bodenarten im Stadtgebiet Graz in der Einheit m/s dargestellt. Die dazugehörige Dichte der Bodenarten kann aus Tabelle 3-3 entnommen werden.

Tabelle 3-3: Durchlässigkeit und Dichte von Bodenarten (Krapfenbauer, 2010)

	Ton	Lehm	sandiger Lehm	Sand	Schotter
K_r-Wert m/s	< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁶	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ – 10 ⁻³	> 10 ⁻³
Dichte g/cm ³	1.7 – 1.9	1.9 – 2.1	1.9 – 2.0	1.8 – 1.9	1.6 – 1.8
Dichte kg/m ³	1700 - 1900	1900 - 2100	1900 - 2000	1800 - 1900	1600 - 1800

Je nach Lagerungsdichte sind auch höhere oder niedrigere Dichten möglich. Im Talgebiet liegt das Grundwasser in 10 m – 17 m Tiefe von der Geländeoberkante. Daher wird kein gesättigter Zustand der Böden um das Kanalsystem erwartet. Für diese Arbeit wird der Parameter Bodendichte ρ_s zwischen 1500 kg/m³ und 2100 kg/m³ variiert.

3.4.3.2 Spezifische Wärmekapazität Boden

Die spezifische Wärmekapazität c beschreibt die Wärmemenge, die einem Stoff mit einer Masse von 1 kg zugeführt werden muss, um die Temperatur dieses Stoffes um 1 K zu erhöhen (Zilch et al., 2013). Diese Wärmemenge pro Masse von verschiedenen Bodenarten wird in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Spezifische Wärmekapazität c_p von Bodenarten (Schweizer, 2020a)

	Ton	Lehm	Sand	Kies	Erdreich Sand und Kies
c_p [J/kg*K]	880	1000	835	840	910 - 1180

Dabei handelt es sich um die spezifische Wärmekapazitäten der Bodenarten in trockenem Zustand. Bei feuchten Böden erhöht sich die spezifische Wärmekapazität. Daher wird in dieser Arbeit der Parameter spezifische Wärmekapazität vom Boden c_s zwischen 600 – 1700 J/kg*K variiert.

3.4.3.3 Wärmeleitfähigkeit Boden

Die Wärmeleitfähigkeit ist die physikalische Kenngröße für die Wärmeleitung eines Stoffes und beschreibt, wie gut ein Stoff Wärme leiten kann. Die Wärmeleitfähigkeit vom Boden ist abhängig von der Dichte und der Feuchtigkeit. In Tabelle 3-5 ist die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Bodenarten dargestellt. (Zilch et al., 2013)

Tabelle 3-5: Wärmeleitfähigkeit λ von Bodenarten (Schweizer, 2020b)

	Ton	Lehm	Sand	Kies
λ [W/mK]	1.0 – 2.6	0.5 – 1.5	0.7 – 1.9	0.7 – 2.1

Je nach Bodenzusammensetzung und feuchtegehalt kann die Wärmeleitfähigkeit höher oder niedriger sein. Der Parameter Wärmeleitfähigkeit vom Boden k_s wird in dieser Arbeit zwischen 0.3 – 2.5 W/mK variiert.

3.4.3.4 Wärmeleitfähigkeit Rohr

In der Stadt Graz sind größtenteils Kanalrohre aus Beton und Mauerstein eingebaut. Für ein Betonrohr wird das Material zu Kiesbeton oder Stahlbeton angenommen. Somit beträgt die Wärmeleitfähigkeit eines Betonrohres zwischen 1.22 – 2.32 W/mK. Die gemauerten Kanalrohre haben die Eigenschaften eines normalen Klinkerziegelmauerwerks. Hier beträgt die Wärmeleitfähigkeit zwischen 0.79 – 1.13 W/mK. (Krapfenbauer, 2010)

Aus diesen festgelegten Werten wird ein Wertebereich zwischen 0.8 W/mK und 2.3 W/mK für die Wärmeleitfähigkeit vom Rohr k_p angenommen.

3.4.3.5 Wandstärke Rohr

Wanddicken von Kanalrohren aus Beton sind genormt und liegen je nach Nennweite zwischen 0.03 – 0.19 m (Kainz et al., 2012). Die Stärke der gemauerten Kanalrohre wird gleich einer normalen Wandstärke angenommen. Diese beträgt zwischen 0.15 – 0.35 m. Für die Definition des Parameters Wandstärke Rohr t_p wird der Wert zwischen 0.03 m und 0.35 m festgelegt.

3.4.3.6 Abwassertemperatur

Um den Verlauf der Abwassertemperatur im Modell zu beschreiben wird ein Stunden-, Tages- und Monatspattern erstellt. Mit einem Stundenpattern wird die Ganglinie der Abwassertemperatur für jede Stunde am Tag festgelegt. Das Tagespattern beschreibt den Verlauf der Abwassertemperatur für jeden Tag in der Woche. Mithilfe eines Monatspattern wird für jeden Monat im Jahr eine Grundtemperatur festgelegt. Folgend kann zusammen aus allen Patterns ein Temperaturverlauf von Abwasser über einen Zeitraum erstellt werden. Die Darstellung einer Ganglinie mit der Abbildung aller Patterns ist in Abbildung 3-25 ersichtlich.

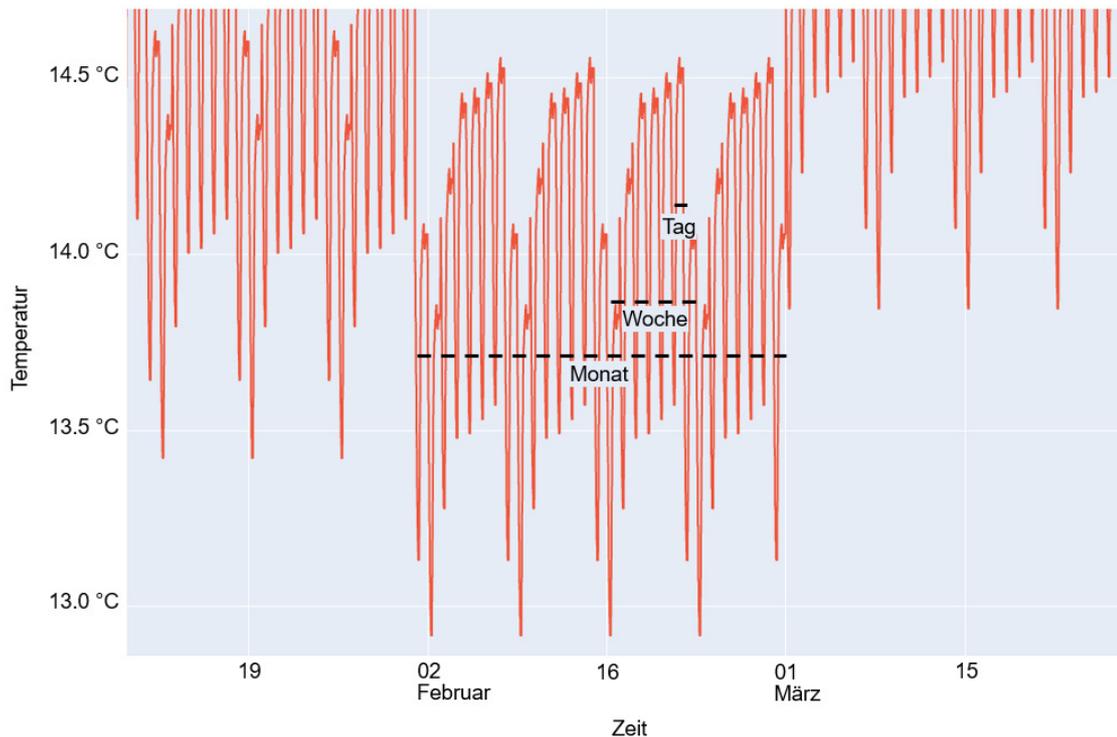


Abbildung 3-25: Die drei Pattern für den Verlauf der Abwassertemperatur über einen Tag, eine Woche und ein Jahr

Die Abwassertemperatur wird beim Modell als Schmutzfracht ($POLLUTANTS$) bei der Berechnung des Trockenwetterabflusses (DWF – Dry Weather Flow) im Zulauf definiert. Hier wird der Ganzjahresmedian als Basiswert ($base$) verwendet. Zum Basiswert werden für jedes Pattern Zuschlagsfaktoren multipliziert. Durch diese Multiplikation wird die typische Form einer Ganglinie von Abwassertemperaturen erstellt. Jeder Punkt auf einer Ganglinie wird durch die Multiplikation von Zuschlagsfaktoren beschrieben. Dabei gibt es für jedes Pattern mehrere Faktoren. So hat das Stundenpattern 24 Faktoren, das Tagespattern 7 Faktoren und das Monatspattern hat 12 Faktoren. Die einzelnen Faktoren je Pattern sind in Tabelle 3-6 dargestellt. Um die Abwassertemperatur an einem bestimmten Zeitpunkt zu erhalten wird der Basiswert mit je einem Faktor pro Pattern multipliziert. Somit kann die Abwassertemperatur im Anfangsknoten definiert werden.

Die Grundlage für die Pattern sind die gemessenen Abwassertemperaturen bei der Messstelle ARA Anfang in einem Zeitraum von Juli 2018 bis Juni 2020. Der Verlauf der Abwassertemperatur wird hauptsächlich durch den zeitlich veränderlichen Wasserverbrauch der Bevölkerung charakterisiert. Daher wird für den Kanalstrang ARA und die häuslichen und externen Zuflüsse vom Kanalnetz Graz dasselbe Pattern verwendet.

Um bei der Sensitivitätsanalyse die Abwassertemperatur variieren zu können, wird der Basiswert, also der Jahresmedian, verändert. Dabei werden Absolutwerte definiert, zwischen denen der Median variiert wird.

Wenn der Median um 1 °C erhöht oder gemindert wird, ändern sich die gesamte Ganglinie um 1 °C. Laut den Messungen bei der Messstelle ARA Anfang befindet sich die Abwassertemperatur in 50 % der Zeit innerhalb eines Jahres zwischen 15 °C und 20 °C. Der Jahresmedian liegt bei einem Wert von 17 °C. Aus diesem Grund werden die Absolutwerte des Medians für das Abwassernetz Kanalstrang ARA mit 15 °C und 19 °C gewählt. Das ist jeweils ein Delta von ± 2 °C zum Median.

Für das Kanalnetz Graz werden unterschiedliche Wertebereiche für den Median gewählt. Bei den häuslichen Zuflüssen und den Zuläufen aus den Nachbargemeinden liegt der Jahresmedian bei einem Wert von 18.5 °C. Da die Abwassertemperaturen der häuslichen Zuflüsse größeren Schwankungen unterlaufen, wird auch ein größeres Delta für die Variation des Parameters gewählt. Dabei wird der Wertebereich zwischen 14 °C und 22 °C mit einem Delta von ungefähr ± 4 °C festgelegt.

Im Zuge der Messkampagnen wurde die Abwassertemperatur im Zulauf der Firma Bolli gemessen. Hierbei handelt es sich um den Abwasserzufluss einer Großwäscherei mit einem Jahresmedian von 30.5 °C. Die großen auftretenden Schwankungen im Temperaturverlauf werden im Modell mit einem eigenen Stunden-, Tages- und Monatspattern für den gewerblichen Zufluss der Firma Bolli definiert. Dadurch kann bei der Sensitivitätsanalyse festgestellt werden, wie groß der Einfluss eines einzelnen Gewerbes auf die Abwassertemperatur ist. Die Pattern sind in Tabelle 3-6 dargestellt. Der Wertebereich für den Median wird mit 28 °C und 32 °C gewählt.

Tabelle 3-6: Pattern der Abwassertemperatur aus Zuschlagsfaktoren

	MONTHLY	DAILY	HOURLY		MONTHLY	DAILY	HOURLY
FACTORS	0.855	0.970	1.011	FACTORS	0.729	0.656	0.905
INFLOW	0.823	0.997	1.001	BROLI	0.640	1.025	0.941
	0.882	1.012	0.988		0.692	1.140	0.928
	0.922	1.013	0.975		0.614	1.100	0.907
	0.997	1.016	0.963		0.900	1.020	0.900
	1.103	1.019	0.956		1.050	1.094	0.780
	1.195	0.986	0.952		1.100	0.780	0.999
	1.239		0.952		1.100		1.000
	1.213		0.964		1.267		1.081
	1.155		0.980		1.141		1.095
	1.034		0.998		0.856		1.095
	0.916		1.010		0.850		1.088
			1.013				1.033
			1.016				1.075
			1.018				1.074
			1.020				1.077
			1.021				1.058
			1.018				1.033
			1.016				0.981
			1.017				0.946
			1.019				0.989
			1.018				1.019
			1.019				0.947
			1.019				0.939

3.4.3.7 Kanallufttemperatur

Da der Verlauf der Kanallufttemperatur nur in einzelnen Punkten des Kanalnetzes bekannt ist, wird für die Temperatur der Kanalluft in den Haltungen nur ein Pattern erstellt, das die Höhe der Temperatur monatlich festlegt. Grundlage für das Monatspattern sind die gemessenen Kanallufttemperaturen bei der Messstelle ARA 17235 in einem Zeitraum von Juli 2018 bis Juni 2020. Dabei wird für jeden Monat im Jahr ein Median berechnet. Der gemessene Temperaturverlauf mit den dazugehörigen Monatsmedianen ist in Abbildung 3-26 dargestellt.

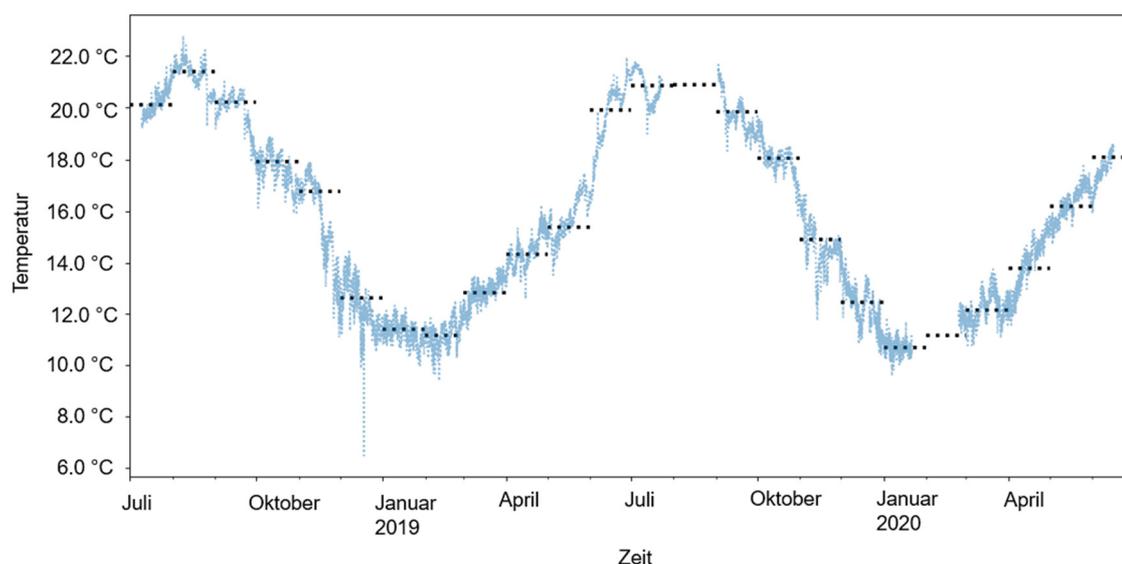


Abbildung 3-26: Darstellung der monatlichen Pattern der Lufttemperatur aus den Monatsmedianen bei der MS ARA 17235

Die Kanallufttemperatur wird im Temperaturmodell den Rohrleitungen zugeordnet. Das Pattern für die Kanallufttemperatur setzt sich aus 12 Faktoren zusammen, die in Tabelle 3-7 dargestellt sind. Hier wird, je nachdem welcher Monat gerade simuliert wird, der Median dieses Monats als Kanallufttemperatur gewählt.

Tabelle 3-7: Pattern der Kanallufttemperatur aus Monatsmedianen

FACTORS	MONTHLY
	11.035
	11.144
	12.450
	14.070
	15.774
	18.997
	19.805
	21.163
	20.044
	17.971
	15.835
	12.513

Um bei der Sensitivitätsanalyse die Kanallufttemperatur variieren zu können, wird der Monatsmedian verändert. Dabei werden Absolutwerte definiert, zwischen denen der Median variiert wird. Aus der Analyse der Temperaturdaten ist bekannt, dass die Kanallufttemperatur im Durchschnitt höhere bzw. niedrigere Temperaturen als die Abwassertemperatur annimmt. Daher wird für die Variation der Kanallufttemperatur ein Delta von ± 3 °C gewählt.

3.4.3.8 Bodentemperatur

Auch der Verlauf der Bodentemperaturen ist nur an zwei Punkten der Stadt Graz bekannt. Aus diesem Grund wird auch hier nur ein Pattern erstellt. Für die Bodentemperatur gibt es zu jeder Tiefe ein Pattern, das sich aus den Durchschnitten der Monatsmediane über den Betrachtungszeitraum von Oktober 2019 bis August 2020 ergibt. Grundlage für die Mediane sind die gemessenen Bodentemperaturen bei der Messstation Gritzenweg, da die Messwerte hier am wenigsten Lücken aufweisen. Die gemessenen Temperaturverläufe aller Tiefen mit den dazugehörigen Monatsmedianen sind in Abbildung 3-27 dargestellt.

Im Modell ist der Verlauf die Bodentemperatur nur durch ein Pattern definiert, daher muss zuerst ein einheitliches Pattern erstellt werden, welches den Rohrleitungen zugeordnet wird. Innerhalb des gesamten Kanalnetzes liegen die Kanalrohre hauptsächlich in einer Tiefe unter 1.5 m. Zum Beispiel liegen die Kanalrohre im Bereich der ARA zwischen 2.3 m und 4.5 m tief. Daher wird für die Sensitivitätsanalyse das Pattern aus den Messungen in 1.5 m tiefe verwendet, welches in Tabelle 3-8 dargestellt ist.

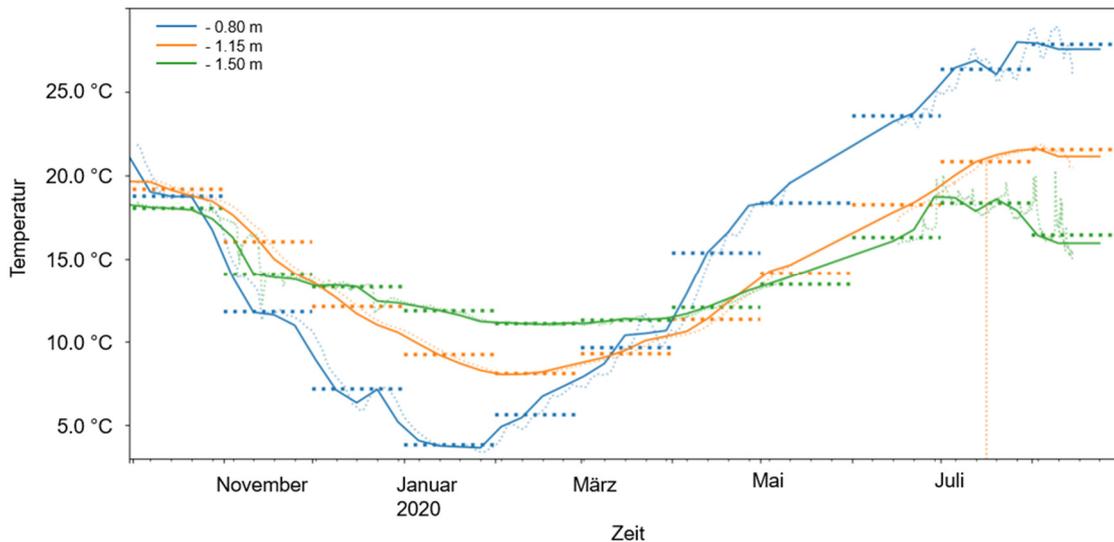


Abbildung 3-27: Darstellung der monatlichen Pattern aus den Monatsmedianen der Bodentemperaturen bei der MS Gritzenweg

Da für den Monat September bei der Messstation Gritzenweg keine Messdaten zur Verfügung stehen, wird dieser Wert als der Durchschnitt der beiden Monate August und Oktober angenommen. An den Messwerten in Abbildung 3-27 kann man erkennen, dass es kurz vor dem Sensorausfall zu größeren Temperaturschwankungen in 1.50 m tiefe kam. In dieser Tiefe sind die Temperaturen im Normalfall nicht derart hohen Schwankungen ausgesetzt. Dies deutet auf einen fehlerhaften Messwert für den Median im August hin, da dieser niedriger ist als im Juli und Oktober. Aus diesem Grund wird der Median des Monats August für das Pattern um 2 °C erhöht und im Oktober zur Anpassung um 1 °C gesenkt.

Tabelle 3-8: Messwerte und Pattern der Bodentemperatur aus Monatsmedianen

MEASURED TEMPERATURE	MONTHLY	FACTORS	MONTHLY
	11.869		11.035
	11.097		11.144
	11.282		12.450
	12.054		14.070
	13.434		15.774
	16.279		18.997
	18.340		19.805
	16.450		21.163
	-		20.044
	18.014		17.971
	14.090		15.835
	13.281		12.513

Um bei der Sensitivitätsanalyse die Temperatur im Erdreich variieren zu können, wird der Monatsmedian verändert. Dazu werden Absolutwerte festgelegt. Bei der Analyse der Temperaturdaten wurde festgestellt, dass die Bodentemperatur über ein Jahr gesehen kleinere Schwankungen erfährt als die Abwassertemperatur. Generell nimmt die Schwankung der Temperatur mit der Tiefe ab. Daher wird ein Delta von $\pm 1^\circ\text{C}$ gewählt.

3.4.3.9 Zufluss

Für den Kanalstrang ARA wird der Zufluss dem Anfangsknoten zugeordnet. Dieser geht nicht als Zeitserie ins Modell ein, sondern wird für die Sensitivitätsanalyse zwischen zwei Absolutwerten variiert. Der Wertebereich für den Zufluss wird aus der Analyse des Trockenwetterganges beim Zufluss der ARA Graz in einem Zeitraum von einem Jahr ermittelt. Dabei ist das Nachtminimum einer durchschnittlichen Woche nicht kleiner als $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Maximalwert am Tag nicht größer als $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Damit werden die Absolutwerte mit einem Minimum von $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem Maximum von $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt (entspricht 300 L/s bis 1300 L/s). Somit kann der Verlauf über den Tag simuliert werden.

Bei der Sensitivitätsanalyse für das Kanalnetz Graz wird der Zufluss nicht variiert, da dieser Parameter hier nicht als unsicher eingestuft wird. Dadurch, dass die Abwassermenge von Graz und auch die Anzahl der Einwohner bekannt ist, kann der Abfluss relativ gut abgeschätzt werden. Für die Zuflüsse aus den Nachbargemeinden und Gewerbegebieten wird der Jahresmedian der Zuflussmenge in den Einleitpunkten gewählt. Der zeitabhängige Verlauf der häuslichen Zuflüsse wird, wie bei den Temperaturen, durch ein Stundenpattern beschrieben. Dieses Pattern besteht aus 24 Faktoren die in Tabelle 3-9 dargestellt sind. Je nach Zeitpunkt der Simulation wird einer dieser Faktoren mit dem Basiswert multipliziert. Als Basiswert wird wieder der Jahresmedian gewählt, der je nach Einleitung einen anderen Wert annimmt.

Tabelle 3-9: Pattern der häuslichen Zuflüsse für das Kanalnetz Graz

FACTORS	HOURLY
	0.588
	0.506
	0.461
	0.451
	0.523
	0.838
	1.253
	1.366
	1.356
	1.330
	1.291
	1.258
	1.219
	1.171
	1.126
	1.106
	1.116
	1.152
	1.183
	1.162
	1.070
	0.960
	0.823
	0.691

3.4.3.10 Zielgröße

Die Zielgröße der Sensitivitätsanalysen ist die errechnete durchschnittliche Abwassertemperatur am Ende des Netzes beim Zulauf der ARA. Beim Kanalstrang ARA kann daraus festgestellt werden, wie groß die Temperaturabnahme bzw. Temperaturzunahme des Abwassers beim Durchfluss durch die Haltungen ist. Generell kann so die Entwicklung der Abwassertemperatur im gesamten Netz bewertet werden.

3.4.3.11 Zusammenfassung der Wertebereiche

Die Zusammenfassung aller gewählter Grenzen der Parameter für den Kanalstrang ARA sind in Tabelle 3-10 ersichtlich. Weiters werden neue Kürzel der Parameter, für die Verwendung in den Skripten, festgelegt.

Tabelle 3-10: Wertebereiche der Modellparameter für den Kanalstrang ARA

Parameter	Beschreibung	Einheit	Delta	untere Grenze	obere Grenze
densitySoil	Bodendichte	[kg/m ³]	-	1500	2100
specHcSoil	Spezifische Wärmekapazität Boden	[J/kgK]	-	600	1700
k_Soil	Wärmeleitfähigkeit Boden	[W/mK]	-	0.3	2.5
k_Pipe	Wärmeleitfähigkeit Rohr	[W/mK]	-	0.8	2.3
Thickness	Wandstärke Rohr	[m]	-	0.03	0.35
DWFPattern	Abwassertemperatur Jahresmedian	[°C]	-	15	19
AirPattern	Kanallufttemperatur Monatsmedian	[°C]	±3	-	-
SoilPattern	Bodentemperatur Monatsmedian	[°C]	±1	-	-
Inflow	Zufluss	[m ³ /s]	-	0.3	1.3

Für das Kanalnetz Graz werden die Grenzen der Parameter in Tabelle 3-11 zusammengefasst. An dieser Stelle werden auch die neuen Kürzel für die weitere Verwendung definiert.

Tabelle 3-11: Wertebereiche der Modellparameter für das Kanalnetz Graz

Parameter	Beschreibung	Einheit	Delta	untere Grenze	obere Grenze
densitySoil	Bodendichte	[kg/m ³]	-	1500	2100
specHcSoil	Spezifische Wärmekapazität Boden	[J/kgK]	-	600	1700
k_Soil	Wärmeleitfähigkeit Boden	[W/mK]	-	0.3	2.5
k_Pipe	Wärmeleitfähigkeit Rohr	[W/mK]	-	0.8	2.3
Thickness	Wandstärke Rohr	[m]	-	0.03	0.35
IndustryPattern	Gewerbliche Abwassertemperatur Jahresmedian	[°C]	-	28	32
DomesticPattern	Häusliche Abwassertemperatur Jahresmedian	[°C]	-	14	22
ExternalPattern	Externe Abwassertemperatur Jahresmedian	[°C]	-	14	22
AirPattern	Kanallufttemperatur Monatsmedian	[°C]	±3	-	-
SoilPattern	Bodentemperatur Monatsmedian	[°C]	±1	-	-

3.4.4 Stichprobengröße und Sampling Methode

Vor der Erstellung der Stichproben müssen die drei Werte r , p und Δ definiert werden, Dabei wird laut Literatur für die Stichprobengröße r üblicherweise ein Wert zwischen 10 und 50 gewählt. Typische Werte für p sind 4 bis 8. Eine geeignete Wahl für den Wert Δ wird mit $p / (2 \times (p - 1))$ definiert. (Campolongo et al., 2007; Saltelli et al., 2008; Pianosi et al., 2016)

Für die Simulation des Kanalstrang ARA sind $k = 9$ (x_1, x_2, \dots, x_9) Parameter zu untersuchen und für die Simulation des Kanalnetzes Graz sind $k = 10$ (x_1, x_2, \dots, x_{10}) Parameter zu untersuchen. Um eine ausreichende Auflösung für die Stichproben zu erreichen, wird die Stichprobengröße r mit 50 gewählt. Eine Darstellung der Verteilung der Stichproben je Parameter für den Kanalstrang ARA ist als Beispiel in Abbildung 3-28 ersichtlich.

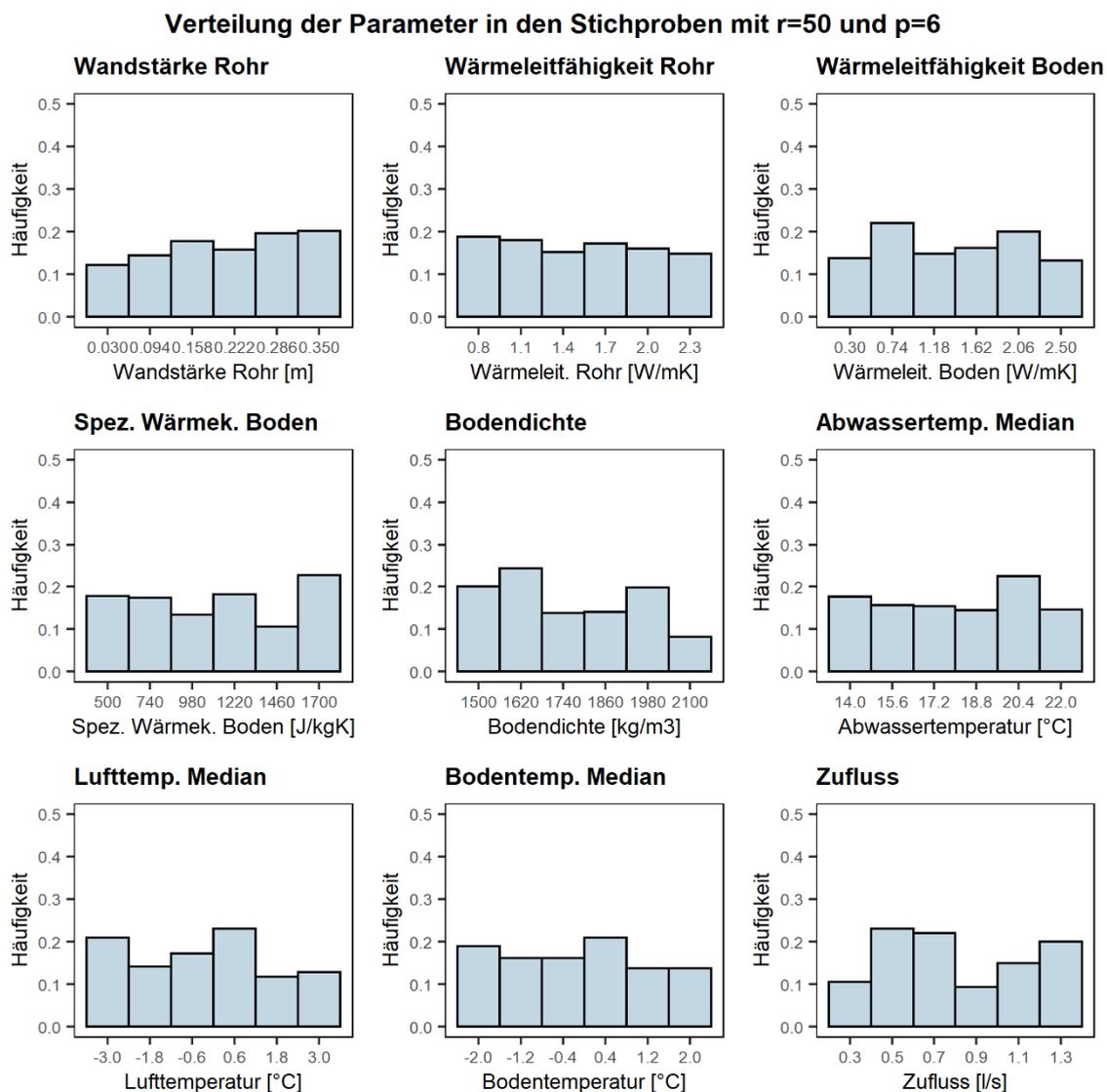


Abbildung 3-28: Verteilung der Parameterwerte in den Stichproben für den Kanalstrang ARA bei einer Rastergröße von $p = 6$ und einer Stichprobengröße von $r = 50$

An den gezeigten Histogrammen ist erkennbar, wie die Parameterwerte in den Stichproben zwischen den Grenzen verteilt sind. Also wie oft kommt ein Parameterwert in den Stichproben vor. Idealerweise sind alle Balken ungefähr gleich hoch, das heißt alle Parameterwerte kommen in einer Stichprobe gleich oft vor.

Die Maximierung der Ausbreitung der Trajektorien (Kurven) im Untersuchungsraum bei der Erstellung der Stichproben soll laut Campolongo et al. (2007) eine Verbesserung in der Verteilung der Parameter ergeben. In Abbildung 3-29 ist ersichtlich, dass dies hier nicht der Fall ist. Es werden hauptsächlich die Randwerte für die Stichprobe ausgewählt, weil versucht wird, die Parameterwerte maximal im Raum zu verteilen. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren in dieser Arbeit nicht angewendet.

Verteilung der Parameter in den Stichproben mit $r=50$, $p=6$ und opt. Trajektorien

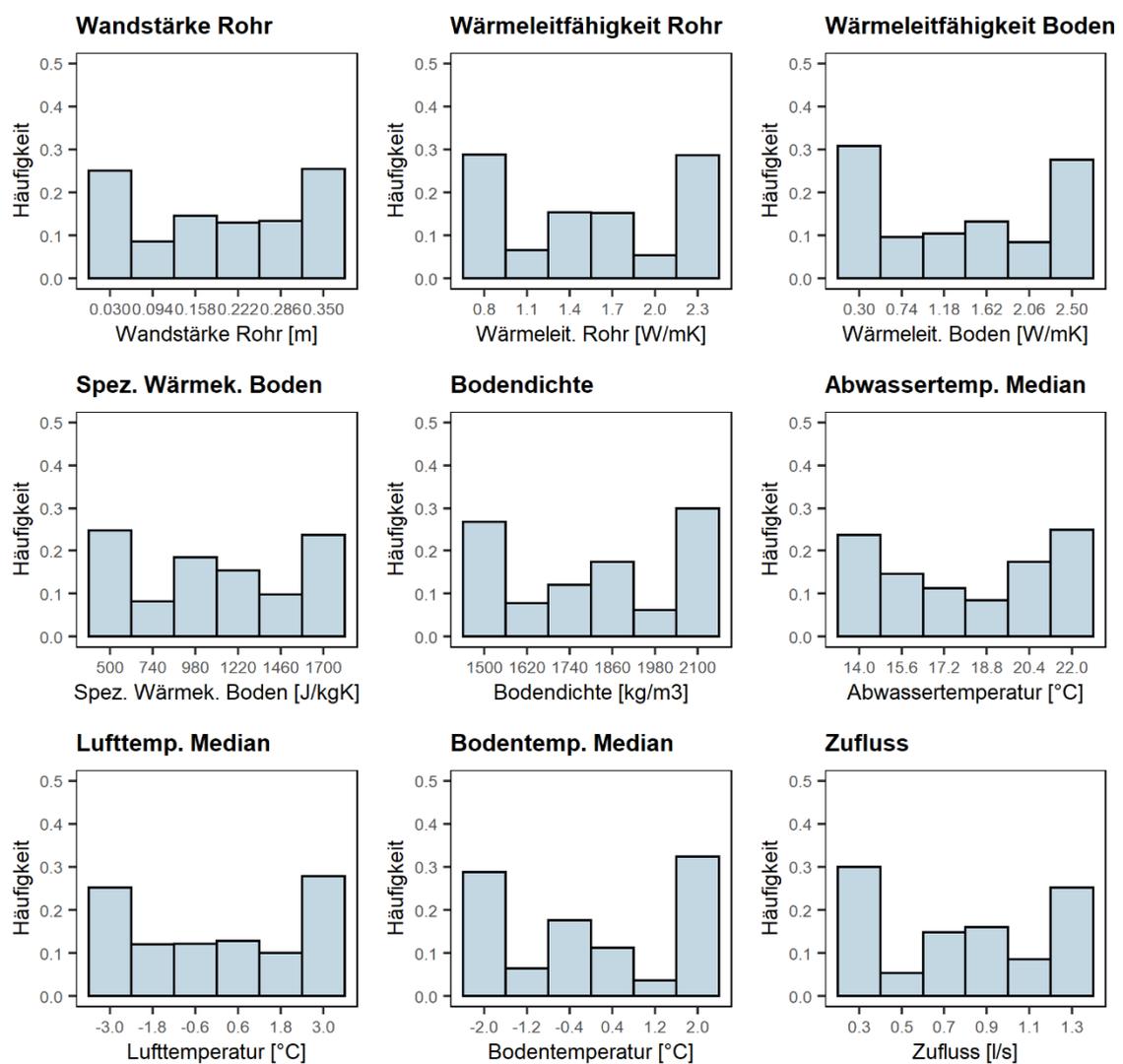


Abbildung 3-29: Verteilung der Parameterwerte in den Stichproben für den Kanalstrang ARA bei einer Rastergröße von $p = 6$ und einer Stichprobengröße von $r = 50$ mit der Verwendung optimaler Trajektorien

Bei der Erstellung von Stichproben mit einer Rastergröße von $p = 4$ fällt auf, dass es wenig Variation in den Werten der Abwasser-, Boden-, und Kanallufttemperatur gibt, das heißt die Auflösung ist klein. Daher wird eine Rastergröße p von 6 gewählt. Die Änderung von x_i bei jeder Simulation wird mit einer Schrittweite Δ von $3/5$ festgelegt. Daraus ergibt sich der Rechenaufwand für den Kanalstrang ARA zu $N = r \times (k + 1) = 50 \times (9 + 1)$, das sind 500 Modellsimulationen für eine Sensitivitätsanalyse. Für das Kanalnetz Graz ergibt sich ein Rechenaufwand von 550 Simulationen. Im Anhang C ist beispielhaft ein Ausschnitt einer Stichprobe mit den Modellergebnissen dargestellt.

3.4.5 Implementierung

Das Skript für das Erstellen der Input-Dateien für die Sensitivitätsanalyse wird in der Entwicklungsumgebung PyCharm erstellt. Dabei wird die open-source Bibliothek SALib für Python verwendet, um die Stichproben zu erstellen und die Sensitivitätsmaße zu berechnen. Es werden die Parameter und ihre Wertebereiche definiert um anschließend mit der `sample`-Funktion die Modellinputs zu generieren. Nach der Simulation des Modells durch SWMM wird mit einer Liste von den Modellergebnissen und den dazugehörigen Eingangsgrößen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dazu wird die `analyze`-Funktion verwendet, um mit der Morris Methode die Sensitivitätsmaße zu berechnen. (Herman et al., 2019)

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden anschließend mithilfe der Entwicklungsumgebung RStudio ausgewertet. Damit werden die Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse grafisch und tabellarisch dargestellt und anschließend bewertet.

3.4.6 Simulationsszenarien

Vor der Simulation des Modells müssen weitere Grundeinstellungen und Anfangsbedingungen definiert werden. Dazu gehört die Einheit für den Durchfluss, die auf Grund der Implementierung des Temperaturmodells in SWMM mit LPS (Liters Per Second, L/s) gewählt werden muss. Der verwendete Zeitschritt bei der Berechnung beträgt 5 Minuten. Wie in der Arbeit von Schlagbauer (2018) wird die Kanalluftgeschwindigkeit mit 0.25 m/s, die Dichte des Abwassers mit 1000 kg/m³ und die Spezifische Wärmekapazität des Abwassers mit 4190 J/kgK festgelegt. Bei allen Simulationen wird von einem reinen Trockenwetterabfluss ohne Niederschlag ausgegangen. Eine Energieentnahme- oder zufuhr wird nicht vorgenommen, daher wird in den Haltungseigenschaften kein Wert dafür definiert.

In Tabelle 3-12 sind die Simulationsszenarien beschrieben, die ausgeführt werden. Nach den Simulationen können die Ergebnisse von zeitlich gleichlangen Simulationen miteinander verglichen werden. Zur Reproduzierbarkeit wird für jede Simulation ein individueller Seed definiert, der jeweils nur für ein Szenario verwendet wird. Im Rahmen der Simulationen des Modells wird überprüft, ob die

Szenarien mit verschiedenen Seeds zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Sensitivitätsanalyse führen. Weiters wird durch eine erneute Simulation mit veränderten Wertebereichen überprüft, ob sich dadurch der Einfluss der einzelnen Parameter bei der Sensitivitätsanalyse ändert. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse des Modells vom Kanalstrang ARA, welche in Kapitel 4.1 bis 4.4 detailliert erläutert werden, wurde für das Modell des gesamten Kanalnetzes nur ein Tag betrachtet.

Tabelle 3-12: Szenarien für die Simulation

Szenario	Zeitraum	Seed	Beschreibung
Kanalstrang ARA			
0	1 Tag 13.02.2019	1,3,4,9	Simulation eines gesamten Tages mit unterschiedlichen Seeds
A	1 Jahr 01.01.2019 – 31.12.2019	1	Simulationen über ein gesamtes Jahr
B	1 Tag 13.02.2019	4	Simulation eines gesamten Tages im Winter
C	1 Tag 10.07.2019	5	Simulation eines gesamten Tages im Sommer
D	1 Monat 01.01.2019 – 31.01.2019	7	Simulation eines gesamten Monats im Winter
E	1 Monat 01.08.2019 – 31.08.2019	8	Simulation eines gesamten Monats im Sommer
F	1 Tag 13.02.2019	2	Simulation eines gesamten Tages mit modifizierten Wertebereichen
Kanalnetz Graz			
G	1 Tag 06.02.2019	1	Simulation eines gesamten Tages im Winter

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse, die in Kapitel 3.4 beschrieben und ausgeführten Simulationen, dargestellt und erläutert. Weiters wird über die Informationen, die daraus gezogen werden können, diskutiert und es wird die Frage beantwortet, welcher Prozess beim Wärmeaustausch maßgebend ist.

Um zu überprüfen, ob das Verwenden unterschiedlicher Seeds zu unterschiedlichen Ergebnissen führt, wird zu Beginn ein Szenario mit vier unterschiedlichen Seeds simuliert und anschließend bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass ein anderer Seed keinen Einfluss auf die Rangordnung der Parameter hat. Der einzige auffallende Unterschied ist die Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA, welche sich durch die unterschiedlichen Stichproben aus den Parametern ergeben. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit vier unterschiedlichen Seeds können im Anhang D entnommen werden. Es wird angenommen, dass durch die hohe Anzahl an Stichproben pro Parameter genug Variation der Parameter in der Analyse vorhanden ist. Somit gibt es keine große Veränderung durch die Wahl des Seeds.

4.1 Kanalstrang ARA Szenario A

Im ersten Szenario wird das Verhalten der Abwassertemperatur im Zulauf der ARA bei der Simulation des Modells über ein Jahr bewertet. In Abbildung 4-1 werden die Sensitivitätsgrößen μ^* und δ , berechnet aus den Verteilungen der Elementaren Effekte pro Parameter, gegenübergestellt. Es gibt je einen Punkt pro Parameter. Die Punkte werden alle relativ zueinander betrachtet, da die Ergebnisse nur quantitativ bewertet werden können.

Mit diesem Plot kann bewertet werden, ob durch die Änderung eines Parameters um Δ , die daraus folgende durchschnittliche Änderung der Abwassertemperatur am Zulauf der ARA bedeutungsvoll ist. Man kann erkennen, dass die Anfangstemperatur des Abwassers im Zufluss im Gegensatz zu den anderen Parametern einen großen Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA hat. Die restlichen Parameter befinden sich nahe Null, was einen geringen Einfluss bedeutet.

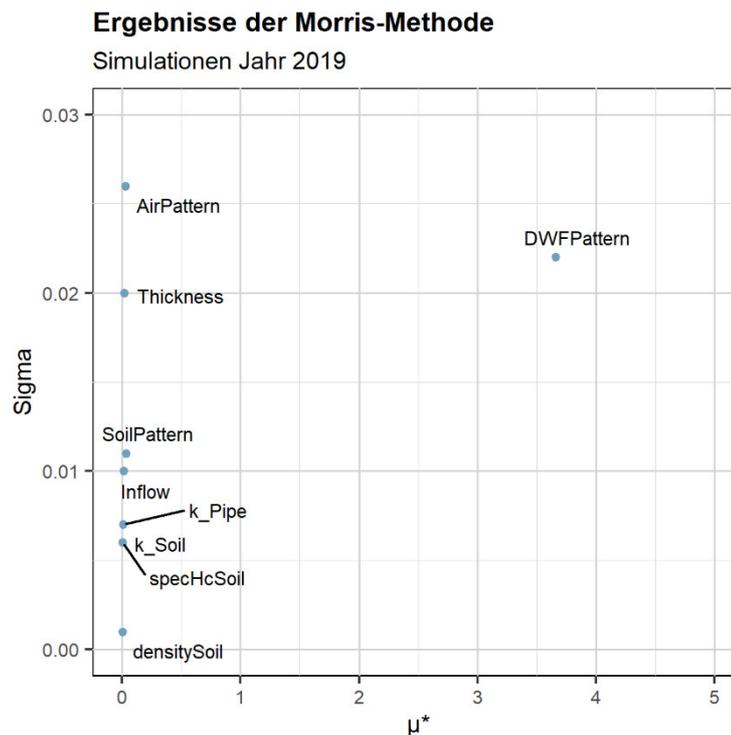


Abbildung 4-1: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über ein Jahr

Die größeren Standardabweichungen der Parameter Abwassertemperatur, Kanallufttemperatur und Wandstärke bedeuten, dass der Einfluss dieser Parameter mit einer größeren Wahrscheinlichkeit von anderen Parameterwerten abhängig ist. Oder es kann auch bedeuten, dass ein nicht-linearer Einfluss dieser Parameter auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA besteht. Diese Wahrscheinlichkeiten sind allerdings relativ gering, da die Werte nahe null liegen. Die Zahlenwerte der Sensitivitätsgrößen können aus Tabelle 4-1 entnommen werden. Dabei steht μ für den durchschnittlichen EE, μ^* für den absoluten Wert des durchschnittlichen EE und δ für die Standardabweichung des EE. Ein negativer Wert für μ bedeutet, dass eine Änderung des Parameters um Δ im Durchschnitt eine Reduktion der Abwassertemperatur bei Zufluss der ARA verursacht.

Tabelle 4-1: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über ein Jahr

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.019	0.019	0.02
k_Pipe	-0.008	0.008	0.007
k_Soil	-0.008	0.008	0.007
specHcSoil	-0.003	0.003	0.006
densitySoil	-0.001	0.001	0.001
DWFPattern	3.661	3.661	0.022
AirPattern	0.023	0.027	0.026
SoilPattern	0.031	0.031	0.011
Inflow	0.012	0.012	0.010

Ergebnisse

Um zu vermeiden, dass sich die Einflüsse durch negative Vorzeichen gegenseitig aufheben, wird bei der Bewertung der Rangordnung das Sensitivitätsmaß μ^* herangezogen. Die Reihung der einzelnen Parameter nach der Größe ihres Einflusses ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Dabei wird für die Darstellung von μ^* eine logarithmische Skala verwendet, damit die kleinen Werte besser sichtbar sind. Auch hier ist zu erkennen, dass die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA am sensitivsten gegenüber einer Änderung der Anfangsabwassertemperatur im Zufluss reagiert. Eine kleine Änderung dieses Parameters bewirkt eine große Änderung der Temperatur am Ende des Stranges. Die restlichen Parameter haben im Gegensatz zu der Abwassertemperatur im Zufluss einen wesentlich kleineren Einfluss, da die Werte für μ^* nahe Null liegen.

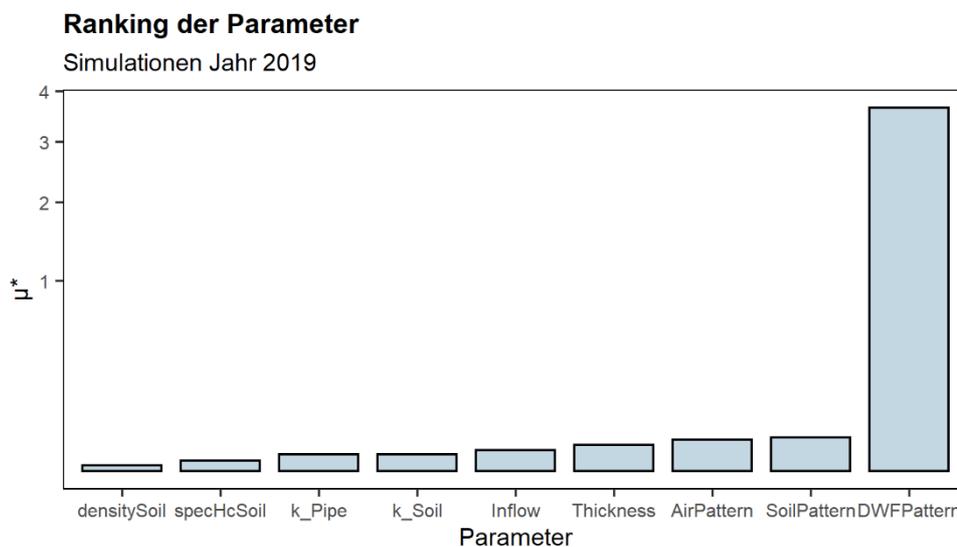


Abbildung 4-2: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA der Simulationen über ein Jahr

Das Histogramm in Abbildung 4-3 beschreibt die Verteilung der Ergebnisse über die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Stichproben. Es ist erkennbar, dass die Ergebnisse durch Variierung der Parameter gleichmäßig verteilt sind. Dabei streut die durchschnittliche Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA innerhalb eines Jahres zwischen 15 °C und 20 °C. Das heißt, es gibt keine Parameterkombinationen, die für die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA auffälligere Werte verursachen als die restlichen Kombinationen. Für die Unsicherheit im Ergebnis mit einer Streuung von 5 °C ist die Abwassertemperatur am Anfang im Zufluss verantwortlich.

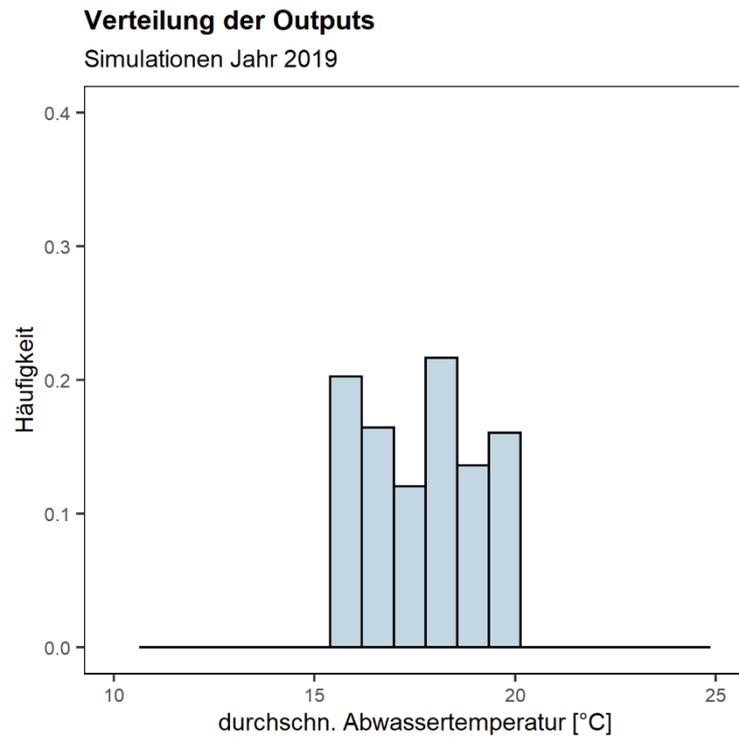


Abbildung 4-3: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über ein Jahr

4.2 Kanalstrang ARA Szenario B und C

Bei den Szenarien B und C wird ein Zeitraum von einem Tag simuliert und bewertet. Dabei wird ein Tag im Sommer und ein Tag im Winter betrachtet. In Abbildung 4-4 werden die Sensitivitätsgrößen μ^* und δ , berechnet aus den Verteilungen der Elementaren Effekte pro Parameter, gegenübergestellt.

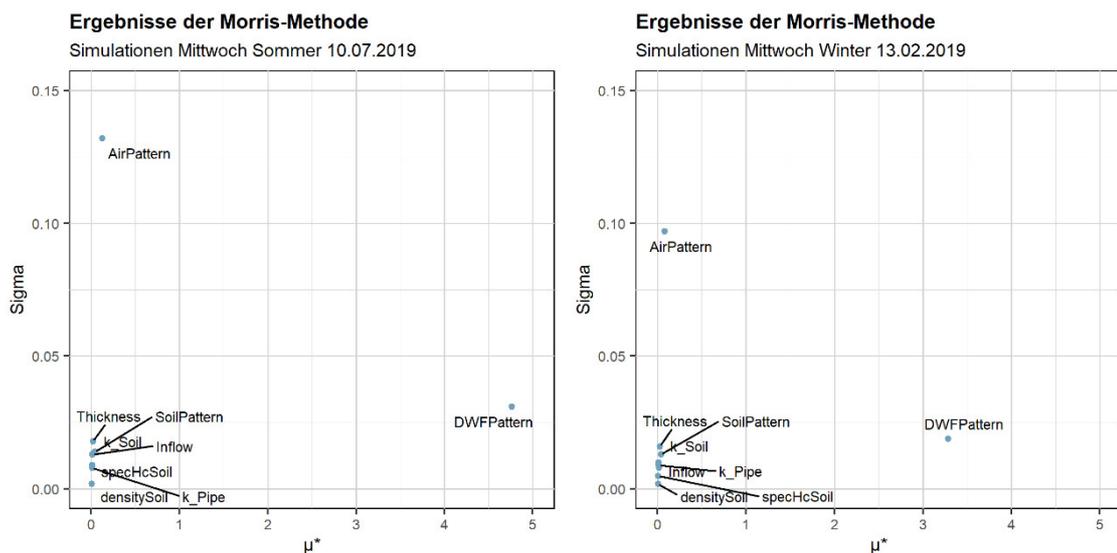


Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Tag; links: im Sommer; rechts: im Winter

Ergebnisse

Das Ergebnis dieser Szenarien ist ähnlich zu den Simulationen über ein Jahr. Auch hier ist ersichtlich, dass die Abwassertemperatur im Zufluss des Kanalstrangs im Gegensatz zu den anderen Parametern einen großen Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA hat. Im Sommer kann ein größerer Einfluss der Anfangsabwassertemperatur als im Winter beobachtet werden. Bei den restlichen Parametern befindet sich der Wert μ^* nahe Null, was auf einen geringen Effekt der Parameter deutet.

Die größere Standardabweichung des Parameters Kanallufttemperatur bedeutet, dass der Einfluss dieses Parameters mit einer größeren Wahrscheinlichkeit von anderen Parameterwerten abhängig ist oder, dass ein nicht-linearer Einfluss dieses Parameters auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA besteht. Die Zahlenwerte der Sensitivitätsgrößen für die Simulationen über einen Tag können aus Tabelle 4-2 und aus Tabelle 4-3 entnommen werden.

Tabelle 4-2: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag im Sommer

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.017	0.018	0.018
k_Pipe	-0.007	0.008	0.008
k_Soil	-0.010	0.010	0.013
specHcSoil	-0.006	0.006	0.009
densitySoil	-0.001	0.001	0.002
DWFPattern	4.764	4.764	0.031
AirPattern	-0.002	0.120	0.132
SoilPattern	0.038	0.038	0.014
Inflow	0.015	0.015	0.013

Tabelle 4-3: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag im Winter

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.022	0.022	0.016
k_Pipe	-0.009	0.009	0.009
k_Soil	-0.009	0.009	0.01
specHcSoil	-0.004	0.004	0.005
densitySoil	-0.001	0.001	0.002
DWFPattern	3.284	3.284	0.019
AirPattern	0.027	0.079	0.097
SoilPattern	0.037	0.037	0.013
Inflow	0.013	0.013	0.008

Die Reihung der einzelnen Parameter nach der Größe ihres Einflusses der Simulationen im Sommer und Winter ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass ähnlich zum Szenario A die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA am sensitivsten gegenüber einer Änderung der Abwassertemperatur im Zufluss des Strangs reagiert. Eine kleine Änderung dieses Parameters bewirkt eine große Änderung des Outputs. Die restlichen Parameter haben im Gegensatz dazu einen wesentlich kleineren Einfluss.

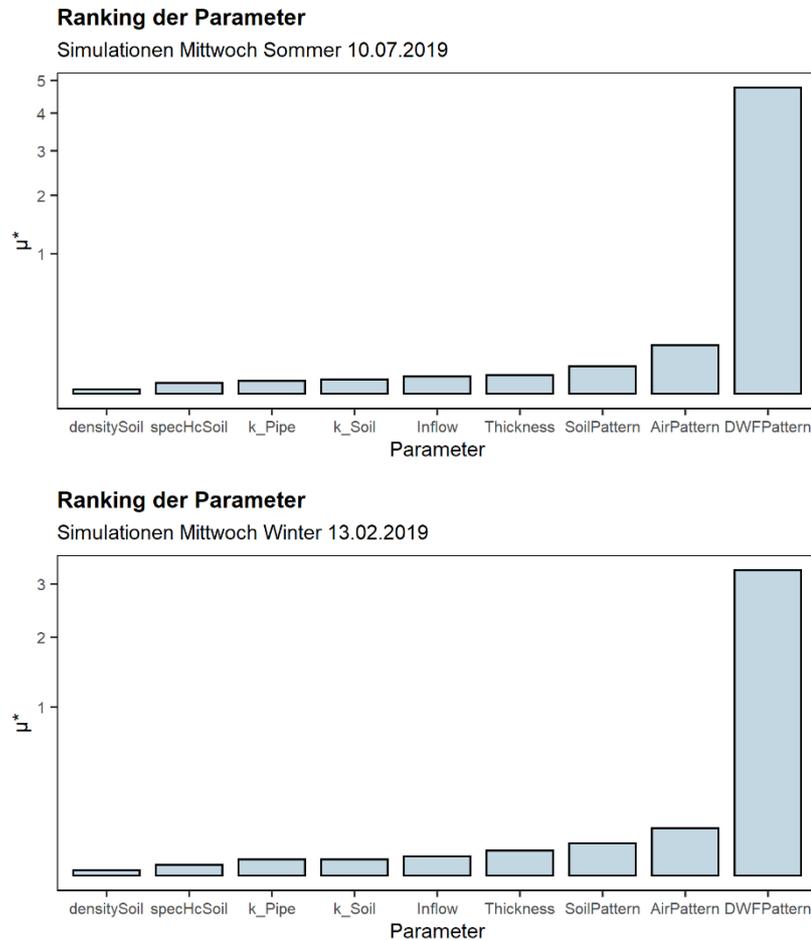


Abbildung 4-5: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Tag, oben: im Sommer, unten: im Winter

Das Histogramm in Abbildung 4-6 beschreibt die Verteilung der Ergebnisse aller Stichproben über die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA. Bei den Simulationen im Sommer verursachen die Parameterkombinationen eher höhere oder niedrigere Temperaturen in einem Bereich zwischen 18 °C und 23 °C. Die Parameterkombinationen der Simulationen im Winter liegen in einem Bereich zwischen 12 °C und 16 °C und weisen eine leichte linksschiefe auf. Das heißt, im Winter gibt es mehr Parameterkombinationen, die zu einer kühleren Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA führen. Ähnlich zum Szenario A gibt es auch hier eine Streuung von ungefähr 5 °C im Ergebnis. Dies lässt sich durch die Sensitivitätsanalyse auf die Abwassertemperatur im Zufluss zurückführen.

Ergebnisse

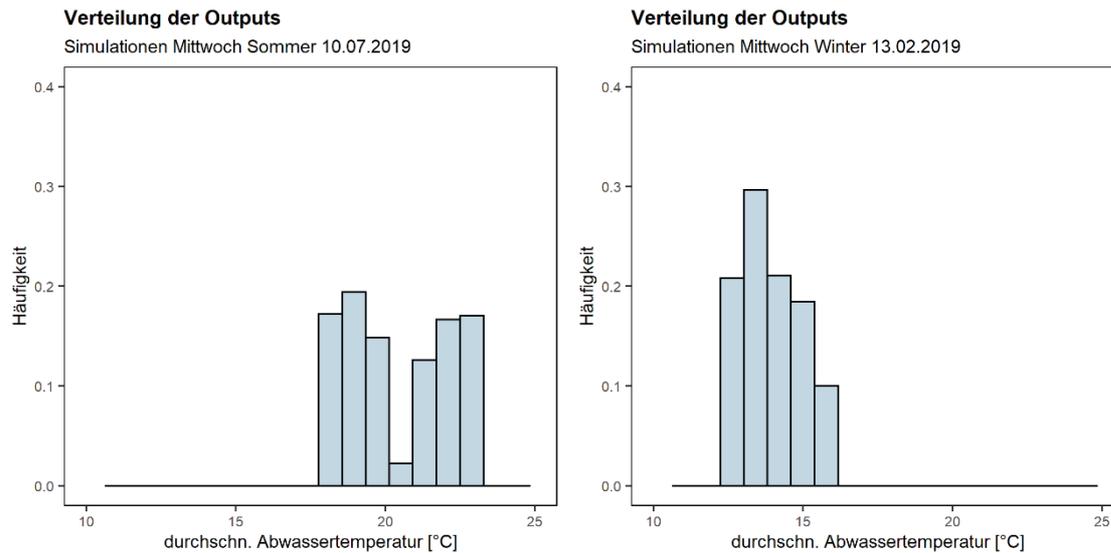


Abbildung 4-6: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Tag, links: im Sommer, rechts: im Winter

4.3 Kanalstrang ARA Szenario D und E

Für die nächsten beiden Szenarien wurde ein Zeitraum von jeweils einem Monat gewählt. Um die saisonalen Unterschiede abzubilden, wird ein Monat im Sommer und ein Monat im Winter untersucht. In Abbildung 4-7 werden die Sensitivitätsgrößen μ^* und δ , berechnet aus den Verteilungen der Elementaren Effekte pro Parameter, gegenübergestellt.

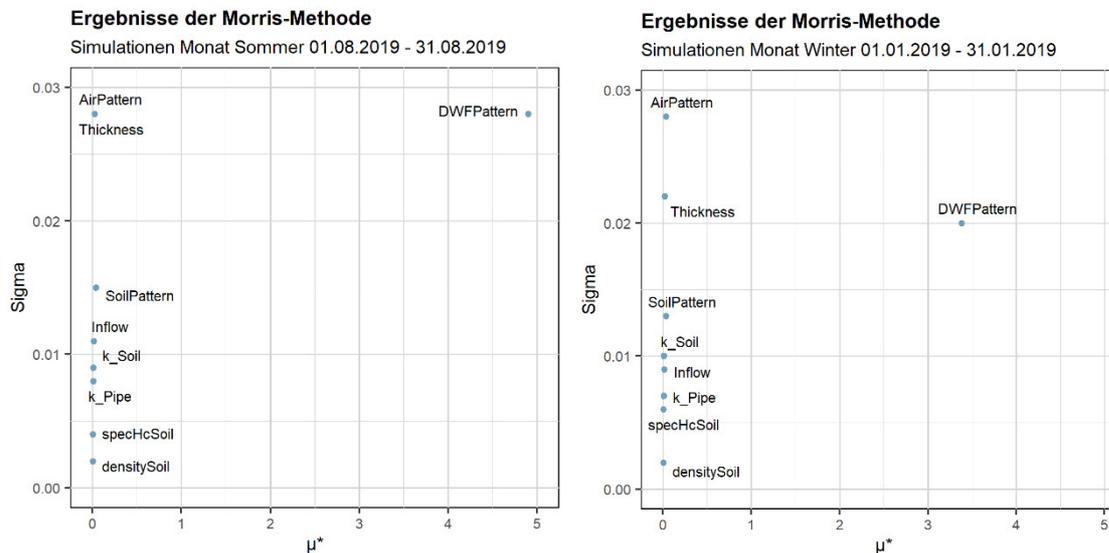


Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Monat, links: August 2019, rechts: Jänner 2019

Das Ergebnis dieser Szenarien ist ähnlich zu denen die davor ausgewertet wurden. Auch hier ist ersichtlich, dass die Abwassertemperatur im Zufluss des Stranges im Gegensatz zu den anderen Parametern einen großen Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA hat. Dieser Einfluss ist im Sommer etwas größer als im Winter. Der Wert μ^* der restlichen Parameter befindet sich nahe Null, was abermals auf einen geringen Einfluss schließen lässt.

Die Werte von δ sind bei diesen Simulationen ähnlich wie bei den Simulationen über ein Jahr. Die größeren Standardabweichungen bei den Parametern Abwassertemperatur im Zufluss, Kanallufttemperatur und Wandstärke deuten auf eine mögliche Interaktion mit anderen Parametern oder ein nicht-linearer Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA hin, welche aber nicht maßgebend sind. Die Zahlenwerte der Sensitivitätsgrößen für die Simulationen über einen Monat können aus Tabelle 4-2 und aus Tabelle 4-3 entnommen werden.

Tabelle 4-4: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Monat im Sommer

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.023	0.023	0.028
k_Pipe	-0.009	0.009	0.008
k_Soil	-0.007	0.007	0.009
specHcSoil	-0.003	0.004	0.004
densitySoil	-0.001	0.001	0.002
DWFPattern	4.900	4.900	0.028
AirPattern	0.009	0.022	0.028
SoilPattern	0.039	0.039	0.015
Inflow	0.014	0.014	0.011

Tabelle 4-5: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Monat im Winter

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.018	0.018	0.022
k_Pipe	-0.006	0.006	0.007
k_Soil	-0.007	0.007	0.01
specHcSoil	-0.005	0.005	0.006
densitySoil	-0.002	0.002	0.002
DWFPattern	3.382	3.382	0.02
AirPattern	0.032	0.032	0.028
SoilPattern	0.033	0.033	0.013
Inflow	0.012	0.012	0.009

Ergebnisse

Die Reihung der einzelnen Parameter nach der Größe ihres Einflusses der Simulationen im Sommer und Winter ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA am sensitivsten gegenüber einer Änderung der Abwassertemperatur am Anfang im Zufluss reagiert. Eine kleine Änderung dieses Parameters bewirkt eine große Änderung des Outputs. Die restlichen Parameter haben im Gegensatz dazu einen wesentlich kleineren Einfluss.

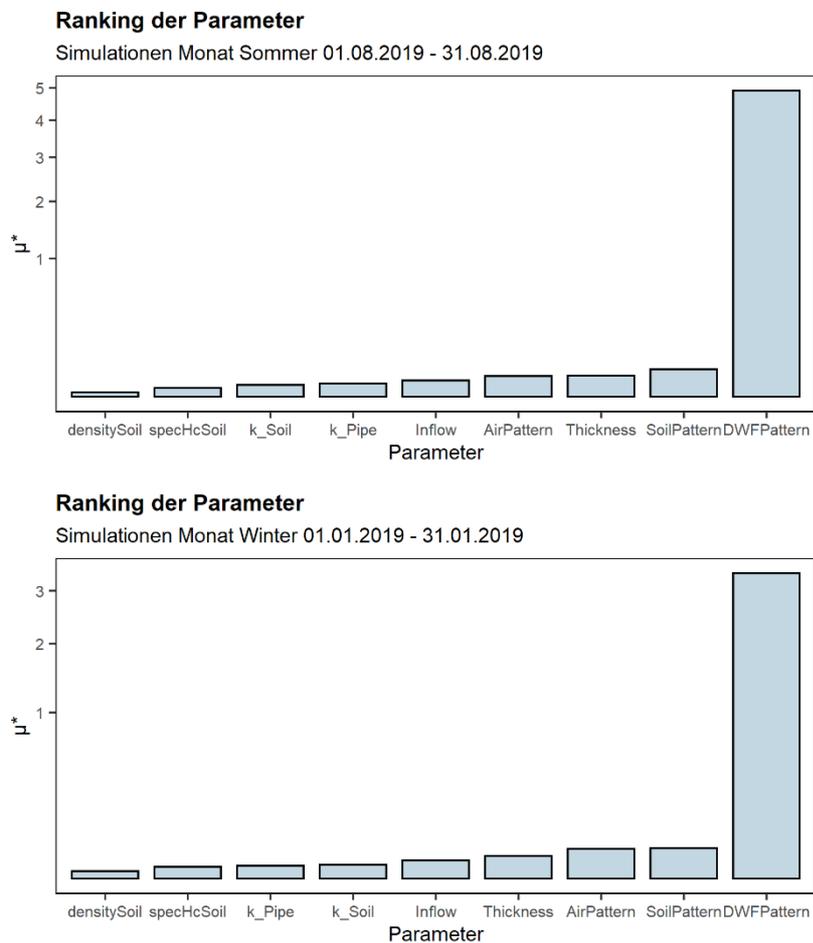


Abbildung 4-8: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Monat, oben: August 2019, unten: Jänner 2019

Das Histogramm in Abbildung 4-9 beschreibt die Verteilung der Ergebnisse aller Stichproben über die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA. Ähnlich wie bei Szenario B verursachen die Parameter bei der Simulation im Sommer eher höhere oder niedrigere Abwassertemperaturen in einem Bereich zwischen 18 °C und 24 °C. Die Ergebnisse der Simulationen im Winter liegen in einem Bereich zwischen 13 °C und 16 °C und weisen eine leichte linksschiefe auf. Das heißt, es gibt mehr Parameterkombinationen, die im Winter zu einer kühleren Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA führen.

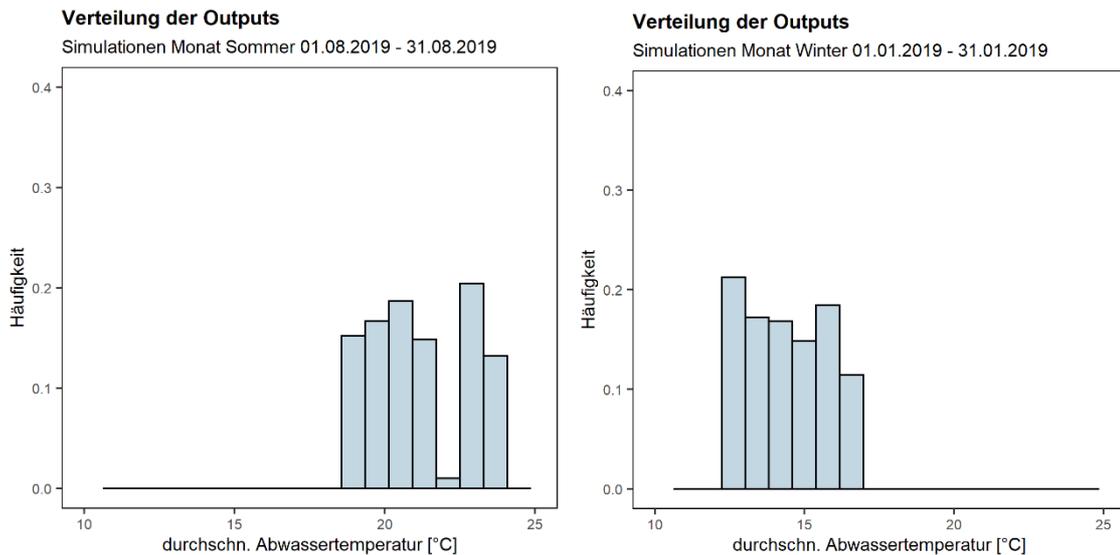


Abbildung 4-9: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Monat, links: August 2019, rechts: Jänner 2019

4.4 Kanalstrang ARA Szenario F

Nachdem, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, der Durchfluss eine wichtige Größe für den Wärmetransport darstellt, wird eine erneute Simulation über einen Tag im Winter mit modifizierten Wertebereichen des Zuflusses durchgeführt. Dabei wird der Wert zwischen 0.001 m^3 und 2.0 m^3 (entspricht 1 L/s bis 2000 L/s) variiert. Die Gegenüberstellung der berechneten Sensitivitätsgrößen nach der Simulation ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Dabei soll festgestellt werden, inwiefern sich das Ergebnis durch die Änderung des Wertebereichs verändert.

Wie zu erkennen ist, gewinnt die Kanallufttemperatur an Bedeutung. Auch der Zufluss und die Wandstärke vom Rohr haben einen größeren Einfluss als bei den vorherigen Szenarien. Dennoch hat die Anfangsabwassertemperatur im Zufluss noch immer den mit Abstand größten Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA. Die restlichen Parameter befinden sich nahe Null, was einen geringen Einfluss bedeutet.

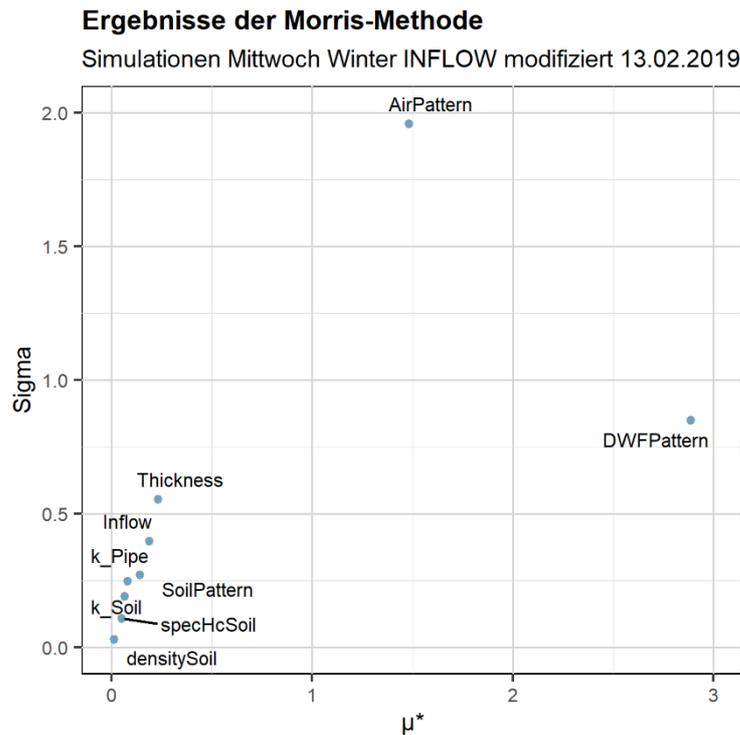


Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Monat mit modifiziertem Wertebereich des Durchflusses

Auch die Möglichkeit einer Interaktion der Parameter oder eines nicht-linearen Einflusses der Parameter auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA hat zugenommen. Dieser vorher vernachlässigbar kleine Effekt hat jetzt deutlich an Einfluss gewonnen. Vor allem beim Parameter Kanallufttemperatur ist die Wahrscheinlichkeit hoch. Das kann bedeuten, dass der Einfluss von der Kanallufttemperatur auf die Abwassertemperatur im Zulauf der ARA von den Werten anderer Parameter abhängt. Die Zahlenwerte der Sensitivitätsgrößen für diese Simulationen können aus Tabelle 4-6 entnommen werden.

Tabelle 4-6: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag im Winter mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.229	0.229	0.555
k_Pipe	-0.078	0.078	0.249
k_Soil	-0.064	0.064	0.191
specHcSoil	-0.050	0.050	0.109
densitySoil	-0.012	0.012	0.030
DWFPattern	2.885	2.885	0.851
AirPattern	1.481	1.481	1.959
SoilPattern	0.139	0.139	0.272
Inflow	0.188	0.188	0.398

Die Reihung der einzelnen Parameter nach der Größe ihres Einflusses des Szenarios mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA am sensitivsten gegenüber einer Änderung der Anfangsabwassertemperatur im Zufluss reagiert. Eine kleine Änderung dieses Parameters bewirkt eine große Änderung des Outputs. Die Zunahme des Einflusses der Kanallufttemperatur auf die Abwassertemperatur kann durch die niedrigen Durchflussraten ausgelöst werden. Dabei nimmt der Temperatúraustausch mit der Luft bei einem geringen Durchfluss zu.

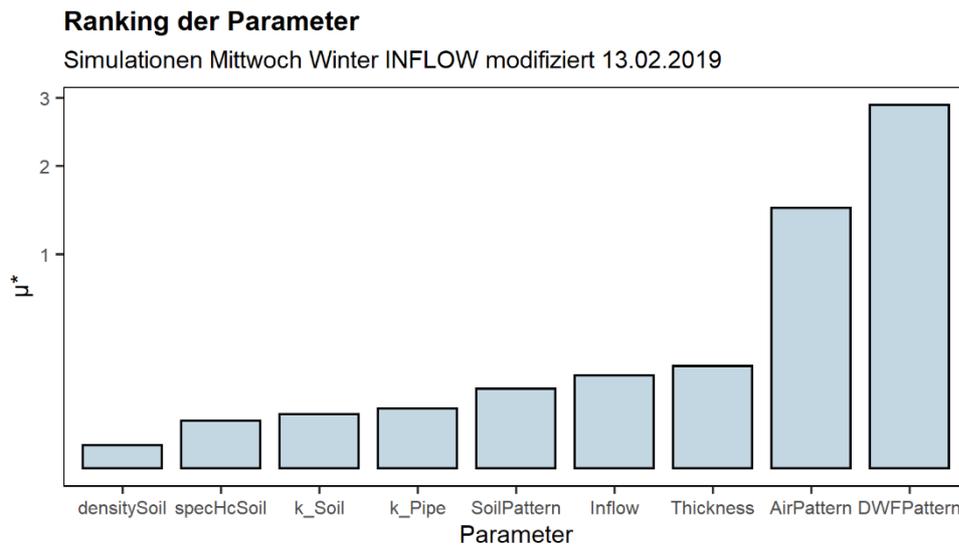


Abbildung 4-11: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Tag mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses

Das Histogramm in Abbildung 4-12 beschreibt die Verteilung der Ergebnisse aller Stichproben über die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA. Dabei liegen die Temperaturen der Ergebnisse in einem Bereich zwischen 10 °C und 16 °C. Eine Häufigkeit der Temperaturen im mittleren Bereich ist erkennbar. Beim Vergleich mit den Ergebnissen des vorherigen Szenario über einen Tag im Winter fällt auf, dass die Unsicherheit im Ergebnis mit einer Streuung von 6 °C zugenommen hat. Die Maßgebenden Parameter, die das Ergebnis beeinflussen, sind dabei die Kanallufttemperatur und die Abwassertemperatur im Zufluss.

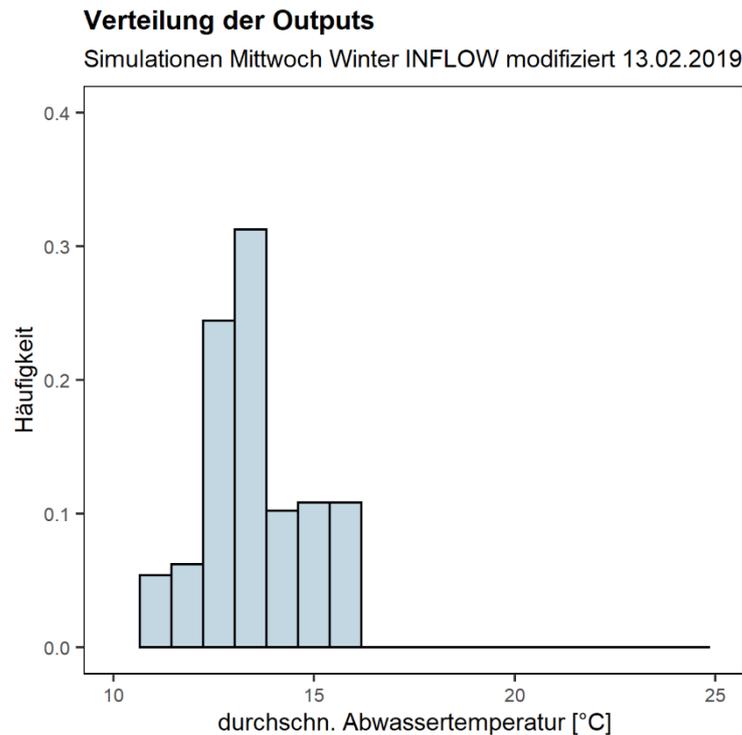


Abbildung 4-12: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Tag mit modifiziertem Wertebereich des Zuflusses

4.5 Kanalnetz Graz Szenario G

Als letztes Szenario wird das Verhalten der Abwassertemperatur im Zulauf der ARA bei der Simulation des Modells über das gesamte Kanalnetz von Graz bewertet. Die zuvor analysierten Szenarien deuten nicht darauf hin, dass der Simulationszeitraum einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Daher wird nur eine Simulation über einen Zeitraum von einem Tag im Winter gewählt, um die Rechenzeit gering zu halten. Durch die Erhöhung der Kanallänge wird der Effekt des Wärmeenergieaustausches über eine größere Länge bewertet. In Abbildung 4-13 werden die Sensitivitätsgrößen μ^* und δ , berechnet aus den Verteilungen der Elementaren Effekte pro Parameter, gegenübergestellt. Es gibt je einen Punkt pro Parameter. Die Punkte werden alle relativ zueinander betrachtet, da die Ergebnisse nur quantitativ bewertet werden können.

Das Ergebnis dieses Szenarios weist Ähnlichkeiten zum Ergebnis des Kanalstrangs ARA auf. Dabei ist die Abwassertemperatur bei den häuslichen Zuflüssen der Parameter mit dem größten Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA. Durch die Zunahme der Länge des Kanalnetzes haben aber auch die restlichen Parameter an Einfluss gewonnen, welcher aber nicht auffällig maßgebend ist.

Ergebnisse der Morris-Methode

Simulationen Mittwoch Winter 06.02.2019

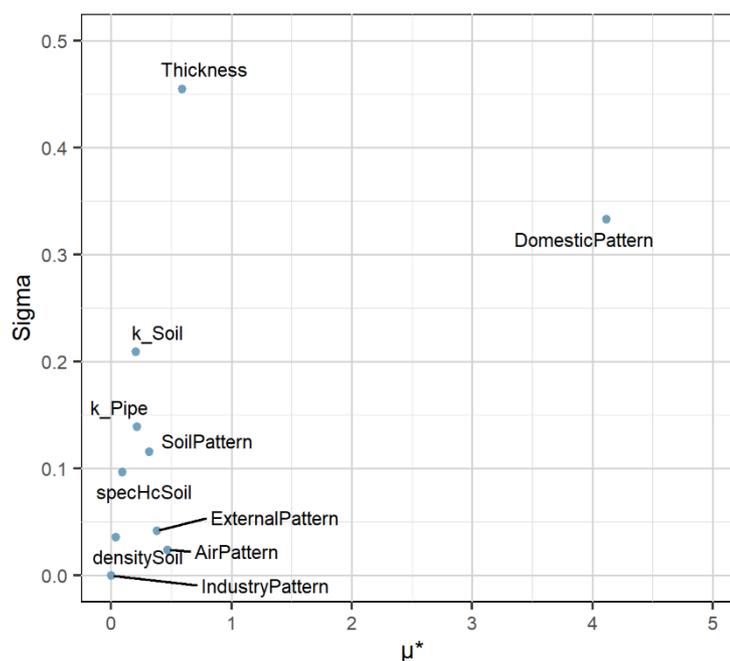


Abbildung 4-13: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz

Mit der Lage hat auch die Wahrscheinlichkeit einer Interaktion zwischen den Parameter zugenommen. Vor allem der Parameter Rohrwandstärke hat eine größere Wahrscheinlichkeit von anderen Parameterwerten abhängig zu sein, oder einen nicht-linearen Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA zu haben. Die Zahlenwerte der Sensitivitätsgrößen für die Simulationen über einen Tag können aus Tabelle 4-7 entnommen werden.

Tabelle 4-7: Berechnete Sensitivitätsparameter der Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz

Parameter	μ	μ^*	δ
Thickness	0.587	0.590	0.455
k_Pipe	-0.214	0.216	0.139
k_Soil	-0.202	0.204	0.209
specHcSoil	-0.092	0.092	0.097
densitySoil	-0.036	0.036	0.036
IndustryPattern	0.000	0.000	0.000
DomesticPattern	4.113	4.113	0.333
ExternalPattern	0.380	0.380	0.042
AirPattern	0.469	0.469	0.024
SoilPattern	0.314	0.314	0.116

Ergebnisse

Die Reihung der einzelnen Parameter nach der Größe ihres Einflusses der Simulationen ist in Abbildung 4-14 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA am sensitivsten gegenüber einer Änderung der Abwassertemperatur in den Zuflüssen reagiert. Der Zufluss des Abwassers bei der Firma Brolli hat auf das ganze System gesehen keinen Einfluss auf die Abwassertemperatur bei der ARA. Zusätzlich haben die Stärke der Rohrwand, die Kanallufttemperatur und die Bodentemperatur einen größeren Einfluss. Beim Vergleich mit den anderen Szenarien ist eine Zunahme der Relevanz der einzelnen Parameter durch die Länge erkennbar.

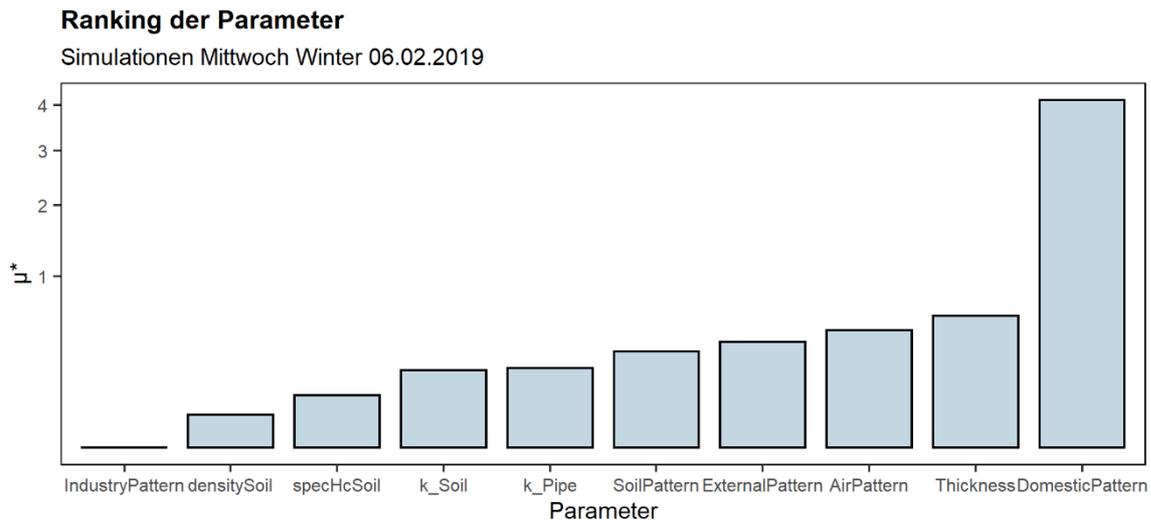


Abbildung 4-14: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA der Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz

Das Histogramm in Abbildung 4-3 beschreibt die Verteilung der Ergebnisse aller Stichproben über die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse durch die Variation der Parameter gleichmäßig zwischen 10 °C und 16 °C verteilt sind. Dabei gibt es nur weniger Parameterkombinationen, die eine höhere Abwassertemperatur beim Zufluss der ARA verursachen. Die Streuung im Ergebnis von ungefähr 5 °C lässt sich hauptsächlich auf die Abwassertemperatur in den Zuflüssen zurückführen.

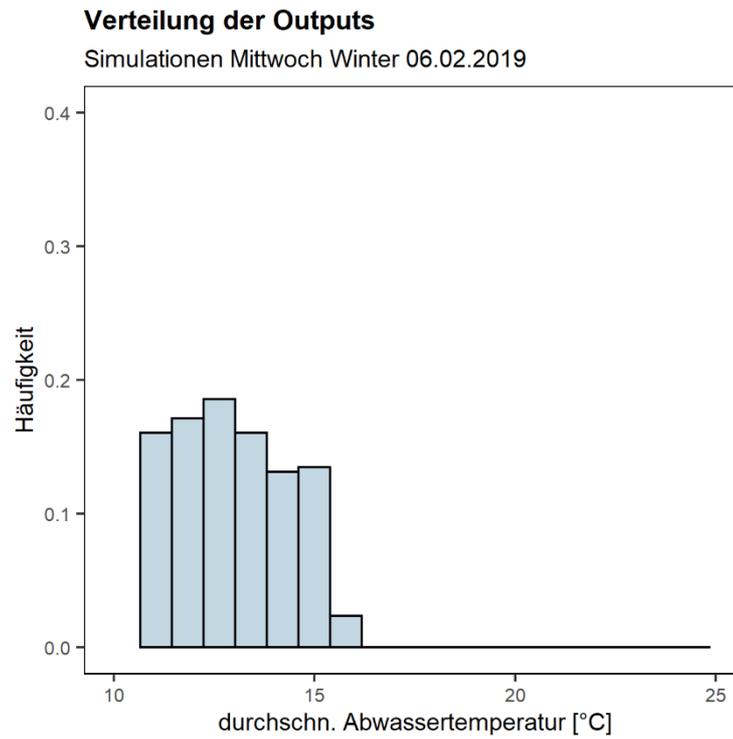


Abbildung 4-15: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA aller Simulationen über einen Tag des Kanalnetzes Graz

5 Diskussion

Aus der Sensitivitätsanalyse geht ein klares Ergebnis hervor. Dabei wird festgestellt, dass die Abwassertemperatur in den Einleitpunkten des Netzes den größten Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA haben. Dieser Einfluss hat im Sommer ein wenig mehr Bedeutung als im Winter. Die Einwirkung der restlichen Parameter auf die Temperatur des Abwassers ist im Vergleich dazu kleiner. Daraus lässt sich ableiten, dass die Wärmeaustauschprozesse mit der Umwelt gegenüber der Anfangsabwassertemperatur eine geringere Einwirkung auf die Temperaturveränderung des Abwassers in einer Haltung haben. Jedoch nimmt der Einfluss der Wärmeaustauschprozesse mit der Länge des Kanalnetzes zu. Dabei sind die Stärke der Rohrwand, die Kanallufttemperatur und die Bodentemperatur von Bedeutung.

Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens und des Rohres ist annähernd gleich. Das heißt, der Wärmeaustauschprozess zwischen Abwasser und Erdreich wird durch beide Parameter gleich beeinflusst. Keiner der beiden Parameter führt zu einer größeren Zunahme oder Abnahme des Austauschprozesses als der andere.

Die Bodendichte sowie die Spezifische Wärmekapazität des Bodens wurden im Zuge der Sensitivitätsanalyse als nicht-sensitive Modellparameter identifiziert. Im Durchschnitt ist durch eine Änderung dieser Parameter nur eine sehr kleine Veränderung im Ergebnis erkennbar. Daraus folgt, dass bei der Kalibrierung des Modells diese Parameter mit einer geringeren Genauigkeit beachtet werden können.

Weiters wird beobachtet, dass bei einem kleinen Durchfluss der Wärmeaustauschprozess zwischen Abwasser und Luft der Maßgebende ist. Dabei wird immer derselbe Wert für die Luftgeschwindigkeit im Kanal angenommen. Auch in der Auswertung der Messkampagnen geht hervor, dass die Kanalluft- und die Abwassertemperatur miteinander im Zusammenhang stehen. Im Gegensatz dazu ist bei größeren Durchflussmengen, wie beispielsweise kurz vor dem Zulauf der ARA, kein Unterschied des Einflusses zwischen den beiden untersuchten Wärmeaustauschprozessen erkennbar.

Damit kann gesagt werden, dass umso höher der Durchfluss ist, desto weniger beeinflusst der Wärmeaustausch mit der Umwelt die Abwassertemperatur in der Haltung. Jedoch nimmt der Einfluss des Wärmeaustausches mit der Länge zu. Daraus folgt, dass beim Betrachten eines kurzen Kanalabschnitts mit einer mittleren Durchflussrate die Abwassertemperatur nur sehr wenig vom Wärmeaustausch mit der Umgebung beeinflusst wird. Bei einer langen Strecke ist der Effekt des Wärmeaustausches mit der Umwelt größer, jedoch ist die Abwassertemperatur am Anfang beim Zufluss die maßgebende Größe.

Für eine Wärmeentnahme aus dem Abwasser bedeutet dies, dass sich das abgekühlte Abwasser nach der Entnahme durch den Wärmeaustausch mit der Umwelt nur langsam wieder erwärmt. Derselbe Effekt gilt auch bei einer Erwärmung des Abwassers durch Verwendung der Energie zum Kühlen. Die Temperatur des Abwassers nach einer Wärmeentnahme oder -zufuhr wird hauptsächlich durch weitere Zuflüsse maßgeblich verändert. Für eine Wärmeenergieentnahme kurz vor der ARA bedeutet das, dass die vorgegebenen Temperaturen auf der Kläranlage nach der Entnahme oder Zufuhr durch Kühlen oder Heizen mit Abwasser im Zufluss nicht unter oder überschritten werden sollte. Bei einer Energieverwendung aus dem Abwasser im Hauptsammler und anschließender Durchmischung mit zusätzlichen Abwasserzuflüssen kann die Abwassertemperatur wieder abgekühlt oder erwärmt werden. Jedoch sollten auch hier die vorgegebenen maximalen und minimalen Abwassertemperaturen im Kanal eingehalten werden.

Für die Unsicherheit im Ergebnis ist die Abwassertemperatur am Anfang im Zufluss hauptverantwortlich. Dieser Wert variiert über den Tag, je nach Wasserverbrauch und Zweck des Verbrauches. Eine Verringerung der Modellunsicherheit könnte durch mehr Messstellen für die Abwassertemperatur und die Zuflussmenge in den Einleitpunkten im Grazer Kanalnetz erzielt werden, um geeignete Pattern für das Modell ableiten zu können. Dazu könnten weitere vereinzelte Messstellen für die Kanallufttemperatur, Kanalluftgeschwindigkeit und Bodentemperatur eine weitere Verbesserung in der Modellgenauigkeit hervorrufen. Parallel dazu könnte die Beziehung zwischen Abwasser- und Kanallufttemperatur genauer untersucht werden, um herauszufinden bei welcher Durchflussmenge die Kanallufttemperatur im Austausch mit der Abwassertemperatur maßgebend ist. Weiters könnten die Stärken der Rohrwände im gesamten Kanalnetz von Graz streckenweise erhoben und im Modell definiert werden.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Neue Technologien und Alternativen zur Energiegewinnung sind ein wichtiger Schritt zur CO₂-neutralen Energieerzeugung. Im Bereich der Raumheizung und Warmwasseraufbereitung könnte die Energiegewinnung aus Abwasser ein großes Potential darstellen. Um das hydraulische Verhalten und die Veränderung der Abwassertemperatur im Kanalsystem bei einer Wärmeentnahme ermitteln zu können, wurde in einer früheren Arbeit ein Temperaturmodell über die Wärmeaustauschprozesse in einem Kanalnetz entwickelt und in SWMM implementiert. Jedoch wurde das Modell lediglich mit fiktiven Abwassernetzen auf Plausibilität untersucht. In der vorliegenden Arbeit wurde auf Grundlage von Temperaturmessdaten, die im Zuge des Projekts KathEA im Grazer Kanalnetz erhoben wurden, eine Sensitivitätsanalyse des Temperaturmodells durchgeführt. Dabei wurden zwei Abwassernetze erstellt und mittels verschiedener Szenarien untersucht.

Infolge einer Analyse der Messdaten wurde festgestellt, dass die Temperatur vom Abwasser und von der Kanalluft in den Randgebieten des Kanalnetzes, wo erst wenige Zuflüsse in einem Strang transportiert werden, im Durchschnitt niedriger sind als beim Zulauf der ARA. Dabei ist die Abwassertemperatur bei geringeren Durchflussmengen höheren Schwankungen über den Tag ausgesetzt. Die Kanallufttemperatur ist im Allgemeinen im Sommer höher und im Winter niedriger als die Temperatur des Abwassers. Beide Temperaturen sind von der Jahreszeit abhängig, daher steigen und fallen die Kanallufttemperatur und Abwassertemperatur immer ungefähr zur selben Zeit. Ein Einfluss auf die Temperaturen durch den Niederschlag konnte nicht signifikant festgestellt werden.

Zusätzlich konnte bei den Messergebnissen der Bodentemperaturen beobachtet werden, dass die Temperaturschwankungen mit der Tiefe abnehmen und konstanter werden. Dabei wird in dicht besiedelten Gebieten dem Boden mehr Wärme abgegeben und gespeichert als außerhalb der Stadt. Daher ist die Bodentemperatur im Stadtzentrum allgemein höher als am Stadtrand, vor allem im Sommer können sich dadurch in der Stadt sogenannte „urbanen Hitzeinseln“ bilden.

Resultierend aus der Sensitivitätsanalyse konnte festgestellt werden, dass die Abwassertemperatur in den Zuflüssen die maßgebende Größe für die Temperaturentwicklung im Kanalsystem ist. Weiters wurde beobachtet, dass bei sehr kleinen Durchflüssen der Wärmeaustauschprozess zwischen Abwasser und Luft der Maßgebende ist. Infolgedessen sinkt der Einfluss des Wärmeaustauschs mit der Umwelt mit der Zunahme des Durchflusses. Zusätzlich steigt der Einfluss der Wärmeaustauschprozesse mit der Länge des Kanalnetzes.

Dies bedeutet für eine Energieentnahme im Kanal, dass sich das abgekühlte Abwasser nach der Entnahme von Wärme, oder das erwärmte Abwasser nach einer

Zufuhr von Wärme, durch den Wärmeaustausch mit der Umwelt nur langsam wieder erwärmt oder abkühlt. Die Temperatur des Abwassers nach einer Wärmeentnahme oder -zufuhr wird hauptsächlich durch weitere Zuflüsse maßgeblich verändert.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit sollte in einem nächsten Schritt die Kalibrierung des Temperaturmodells TU GRAZ durchgeführt werden. Dabei kann die Modellunsicherheit durch mehr Messwerte der Abwassertemperatur in den Einleitpunkten im Grazer Kanalnetz reduziert werden. Weitere Messstellen für die Kanallufttemperatur, Kanalluftgeschwindigkeit und Bodentemperatur können eine weitere Verbesserung in der Modellgenauigkeit hervorrufen. Zusätzlich sollten die Rohrwandstärken im Modell des Abwassernetzes von Graz genauer den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

Letztendlich kann nach einer erfolgreichen Kalibrierung des Temperaturmodells die Entwicklung der Abwassertemperatur nach einer Wärmeentnahme oder -zufuhr im Kanalnetz von Graz prognostiziert werden. Dadurch können die Standorte für eine mögliche Wärmerückgewinnungen so gewählt werden, dass die Auswirkungen auf die Kläranlage, das Kanalsystem und das Gewässer möglichst gering sind. Infolgedessen kann das größtmögliche Potential einer Energiegewinnung aus dem Abwasser in Graz gewonnen werden.

Literaturverzeichnis

- Abdel-Aal M. (2015) Modelling the Viability of Heat Recovery from Underground Pipes - Deterministic modelling of wastewater temperatures in a 3000 sewer pipe network, Faculty of Engineering and Informatics, Universität Bradford.
- Baunetz Wissen (o. D.) Baunetz Wissen. [online] <https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/erneuerbare-energien/waermepumpen-2446145> (Zugegriffen 18. Februar 2021).
- Bischofsberger W. & Seyfried C. F. (1984) Wärmeentnahme aus Abwasser, TU München.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018) Energie in Österreich 2018 - Zahlen, Daten, Fakten,
- Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft (1996a) 1. Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010980> (Zugegriffen 17. Juli 2020).
- Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft (1996b) Allgemeine Abwasseremissionsverordnung, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010977> (Zugegriffen 17. Juli 2020).
- Bundesverband WärmePumpe (2005) Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauherren und Kommunen, München.
- Buri R. & Kobel B. (2004) Wärmenutzung aus Abwasser - Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen, Energie in Infrastrukturanlagen, Bern/Zürich.
- Campolongo F., Cariboni J., & Saltelli A. (2007) An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 1509–1518.
- Cipolla S. S. & Maglionico M. (2014) Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. *Energy Procedia*, **45**, 288–297.
- Dürrenmatt D. J. (2006) Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr, Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich.
- Dürrenmatt D. J. & Wanner O. (2008) Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science and Technology*, **57**(11), 1809–1815.
- DWA (2009) Merkblatt DWA-M 114 Energie aus Abwasser - Wärme- und Lageenergie, Hennef.

- Elías-Maxil J. A., Hofman J., Wols B., Clemens F., Van der Hoek J. P., & Rietveld L. (2017) Development and performance of a parsimonious model to estimate temperature in sewer networks. *Urban Water Journal*, **14**(8), 829–838.
- Europäische Kommission (2018) Ein sauberer Planet für alle - Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft, Brüssel.
- Habbuch M. & Vecsei P. M. (2019) Lebenszykluskosten von Wärmepumpen - Kurzfassung, Institut für Facility Management, Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Herman J., Usher W., Mutel C., Trindade B., Hadka D., Woodruff M., Rios F., & Hyams D. (2019) SALib - Sensitivity Analysis Library in Python. [online] <https://salib.readthedocs.io/en/latest/basics.html#what-is-salib> (Zugegriffen 15. Februar 2021).
- IPCC (2015) Climate Change 2014: Synthesis Report, World Meteorological Organization, Geneva.
- IPCC (2018) Global Warming of 1.5°C: Summary for Policymakers, World Meteorological Organization, Geneva.
- Kainz H., Kauch E. P., Fuchs-Hanusch D., & Gruber G. (2012) Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft - Trinkwasser, Abwasser, Abfall und Recycling, MANZ, Wien.
- Koch M., Nietlisbach A., Känel B., Calderoni M., Wille B., Müller R., Bretscher P., Wanner O., Siegrist H., Peter A., Müller E. A., Kobel B., & Roth Y. (2010) Heizen und Kühlen mit Abwasser - Leitfaden für die Planung, Bewilligung und Realisierung von Anlagen zur Abwasserenergienutzung, Baudirektion Kanton Zürich und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, Zürich.
- Krapfenbauer T. (2010) Bautabellen, Jugend & Volk, Wien.
- Melcher A., Pletterbauer F., Kremser H., & Schmutz S. (2013) Temperaturansprüche und Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischfauna in Flüssen und unterhalb von Seen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, **65**, 408–417.
- Meteorologische Messdaten der ZAMG (2021) Open Data Österreich. [online] <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/9b40a0af-a6fe-47ff-9624-2ea8f40c746f> (Zugegriffen 8. März 2021).
- Morris M. D. (1991) Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, **33**(2), 161–174.
- Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (o. D.) Trinkwasser-Verwendung. WASSERWERK.at. [online] <http://www.wasserwerk.at/home/alles-ueber-wasser/verbrauch> (Zugegriffen 27. Juni 2020).

- Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2021) Energetische Nutzung des thermischen Potentials von Abwasser, Wien.
- Pianosi F., Beven K., Freer J., Hall J. W., Rougier J., Stephenson D. B., & Wagener T. (2016) Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, **79**, 214–323.
- Pichler M. (2018) Automatisierte Quantifizierung der Schmutzfrachtdynamik des Zentralen Speicherkanals im Zulauf zur Kläranlage Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz.
- Projektteam Energie aus Abwasser (2012) Energie aus Abwasser - Abwasserwärme- und -kältenutzung mittels hocheffizienter Großwärmepumpen, Wien.
- Rossmann L. A. (2015) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, U.S. Environmental Protection Agency, Office Management Research Laboratory, Ohio.
- Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Tarantola M. S., & Tarantola S. (2008) *Global Sensitivity Analysis: The primer*, John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Schlagbauer P. (2018) Thermische Energiegewinnung aus Abwasser - Entwicklung eines Temperaturmodells für SWMM, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz.
- Schmid F. (2008) Sewage Water: Interesting Heat Source for Heat Pumps and Chillers. 9th International IEA Heat Pump Conference in Zürich.
- Schweizer A. (2020a) Wärmekapazität verschiedener Materialien. [online] https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php (Zugegriffen 4. November 2020).
- Schweizer A. (2020b) Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien. schweizer-fn. [online] https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php#wleitf_erdreich (Zugegriffen 4. November 2020).
- Shen C., Lei Z., Wang Y., Zhang C., & Yao Y. (2018) A review on the current research and application of wastewater source heat pumps in China. *Thermal Science and Engineering Progress*, **6**, 140–156.
- Stadt Graz Stadtvermessungsamt (2008) Baugrundatlas Graz, Magistrat Graz, Graz.
- Statistik Austria (2019) Nutzenergieanalyse. [online] http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html (Zugegriffen 13. Juni 2020).

- UNFCCC (2015) The Paris Agreement. United Nations Climate Change. [online] <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (Zugegriffen 3. August 2020).
- Wanner O. (2004) Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf, Schweiz.
- Wanner O., Clavadetscher P., & Siegrist H. (2005a) Auswirkungen der Abwasserabkühlung auf den Kläranlagenbetrieb. *GWA Gas, Wasser, Abwasser*, **85**(2), 111–118.
- Wanner O., Panagiotidis V., Clavadetscher P., & Siegrist H. (2005b) Effect of heat recovery from raw wastewater on nitrification and nitrogen removal in activated sludge plants. *Water Research*, **39**, 4725–4734.
- Zilch K., Diederichs C. J., & Katzenbach R. (2013) *Handbuch für Bauingenieure* (K. J. Beckmann, Hrsg.), Springer, Berlin, Heidelberg.

Anhang A: Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

Im Folgenden wird ein Beispiel für das Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA dargestellt, welches im Zuge der Sensitivitätsanalyse in SWMM eingelesen und simuliert wird.

```
;/
[
[TITLE]
MA Theresa Felder

;/
[
[OPTIONS]
FLOW_UNITS          LPS
INFILTRATION        HORTON
FLOW_ROUTING        DYNWAVE
LINK_OFFSETS        DEPTH
MIN_SLOPE            0
ALLOW_PONDING       NO
SKIP_STEADY_STATE   NO
START_DATE           01/01/2019
START_TIME            00:00:00
REPORT_START_DATE    01/01/2019
REPORT_START_TIME    00:00:00
END_DATE              01/01/2020
END_TIME              00:00:00
SWEEP_START           1/1
SWEEP_END             12/31
DRY_DAYS              0
REPORT_STEP           00:05:00
WET_STEP              00:05:00
DRY_STEP              00:05:00
ROUTING_STEP          5
INERTIAL_DAMPING      PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED  BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION   H-W
VARIABLE_STEP         0.75
LENGTHENING_STEP     0
]
```

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

```
MIN_SURFAREA      0
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      0.5
THREADS           1
TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190
UA                0.25
EXT_UNIT          P

;
[REPORT]
INPUT            NO
CONTINUITY       NO
FLOWSTATS       NO
CONTROLS         NO
SUBCATCHMENTS   NONE
NODES            OF1
LINKS           NONE

;
[EVAPORATION]
CONSTANT 0
DRY_ONLY NO

;
[JUNCTIONS]
;      Elevation MaxDepth InitDepth SurDepth Aponded
;Name
17235      327.82      3      0      0      0
17237      327.59      2.89    0      0      0
17239      327.51      2.9     0      0      0
17241      327.39      2.82    0      0      0
```

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

17243	327.26	2.82	0	0	0
17245	327.16	2.97	0	0	0
17247	327.08	2.78	0	0	0
17253	326.82	2.77	0	0	0
17255	326.74	2.88	0	0	0
17257	326.6	2.86	0	0	0
17259	326.52	2.82	0	0	0
17261	326.42	2.8	0	0	0
17263	326.34	2.93	0	0	0
17267	326.12	2.82	0	0	0
17269	326	2.8	0	0	0
17271	325.88	2.83	0	0	0
17273	325.78	2.92	0	0	0
17275	325.62	2.79	0	0	0
17279	325.35	2.84	0	0	0
17281	325.2	2.84	0	0	0
17283	325.05	2.87	0	0	0
17285	324.93	2.78	0	0	0
17287	324.84	3	0	0	0
SU_15353	326.3	3.09	0	0	0
SU_17249	326.97	3.02	0	0	0
SU_17277	325.49	3.18	0	0	0
;					
[OUTFALLS]					
; Elevation Type Data FlapGate RouteTo					
;Name					
OF1	324	FREE		NO	
;					
[CONDUITS]					
; FromNode ToNode Length Roughness InOffset OutOffset					
InitFlow MaxFlow Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil Air-					
Pattern SoilPattern thermalEnergy					
;Name					

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

C1		17287	OF1	50.35	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD105		17285	17287	68.921	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD107		17283	17285	68.365	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD109		17281	17283	80.868	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD111		17279	17281	80.777	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD113	SU_17277	17279	17279	86.809	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD117	17275	SU_17277	84.054	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD119	17273	17275	83.741	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD121	17271	17273	65.76	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD123	17269	17271	74.216	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD125	17267	17269	68.478	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD129	17263	SU_15353	52.007	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD131	17261	17263	58.543	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD133	17259	17261	58.109	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD136	17257	17259	66.732	0.012	0	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

KD137		17255	17257	56.821	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD141		17253	17255	68.46	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD145a	SU_17249		17253	71.339	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD147		17247	SU_17249	63.967	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD149		17245	17247	65.718	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD151		17243	17245	68.213	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD153		17241	17243	68.187	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD155		17239	17241	71.588	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD157		17237	17239	80.79	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD159		17235	17237	73.154	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
KD17265	SU_15353		17267	72.112	0.012	0	0
0	0	0.19	1.15	1.5	1500	2000	A_GN
S_GN							
;							
[XSECTIONS]							
;							
			Shape	Geom1	Curve	Tsect	Geom2 Geom3 Geom4 Culvert Barrels
;Link							
C1	CIRCULAR		2			0	0 0 0 1
KD105	CIRCULAR		2			2	0 0 0 1
KD107	CIRCULAR		2			2	0 0 0 1
KD109	CIRCULAR		2			2	0 0 0 1

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

KD111	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD113	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD117	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD119	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD121	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD123	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD125	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD129	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD131	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD133	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD136	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD137	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD141	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD145a	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD147	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD149	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD151	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD153	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD155	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD157	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD159	CIRCULAR	2	2	0	0	1
KD17265	CIRCULAR	2	2	0	0	1
;						
[DWF]						
;Node	Type	Base	pattern1	pattern2	pattern3	
17235	temperature	17.000	T_Hourly	T_Monthly	T_Daily	
17235	FLOW	1000.00				
;						
[POLLUTANTS]						
;SnowOnly	Units	Crain	Cgw	Crzii	Kdecay	
	Co_Pollutant	Co_Frac	Cdwf	Cinit		
;Name						

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

```

temperature      CELSIUS      0          0          0          0          NO
*                0          15.99      0
;
;
[PATTERNS]
;
;Name                                     Type
Factors
S_GN                                     MONTHLY
11.869 11.097 11.282 12.054 13.434 16.279 18.340 18.450 18.232 17.014
14.090 13.281
A_GN          MONTHLY          11.03469
11.14407 12.45042 14.06965 15.7739 18.99723 19.80478 21.16266 20.0435
17.97138 15.83521 12.51286
T_Hourly          HOURLY  1.011 1.001 0.988 0.975 0.963 0.956 0.952
0.952 0.964 0.98 0.998 1.01 1.013 1.016 1.018 1.02 1.021 1.018 1.016
1.017 1.019 1.018 1.019 1.019
T_Monthly          MONTHLY
0.855 0.823 0.882 0.922 0.997 1.103 1.195 1.239 1.213 1.155 1.034 0.916
T_Daily          DAILY
0.97 0.997 1.012 1.013 1.016 1.019 0.986
;
;
[TAGS]
Node  17235      KM
Node  17237      KM
Node  17239      KM
Node  17241      KM
Node  17243      KM
Node  17245      KM
Node  17247      KM
Node  17253      KM
Node  17255      KM
Node  17257      KM
Node  17259      KM
Node  17261      KM
Node  17263      KM

```

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

Node	17267	KM
Node	17269	KM
Node	17271	KM
Node	17273	KM
Node	17275	KM
Node	17279	KM
Node	17281	KM
Node	17283	KM
Node	17285	KM
Node	17287	KM
Node	SU_15353	KM
Node	SU_17249	KM
Node	SU_17277	KM
Link	KD105	KM
Link	KD107	KM
Link	KD109	KM
Link	KD111	KM
Link	KD113	KM
Link	KD117	KM
Link	KD119	KM
Link	KD121	KM
Link	KD123	KM
Link	KD125	KM
Link	KD129	KM
Link	KD131	KM
Link	KD133	KM
Link	KD136	KM
Link	KD137	KM
Link	KD141	KM
Link	KD145a	KM
Link	KD147	KM
Link	KD149	KM
Link	KD151	KM
Link	KD153	KM
Link	KD155	KM
Link	KD157	KM

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

Link KD159 KM

Link KD17265 KM

;

[MAP]

DIMENSIONS 535312.604775398 5205027.72891287 535895.191716643
5206894.92871843

UNITS Meters

;

[COORDINATES]

17235 535339.086 5206810.056

17237 535371.294 5206744.542

17239 535407.067 5206672.146

17241 535424.944 5206602.877

17243 535441.296 5206536.712

17245 535474.935 5206477.449

17247 535508.002 5206420.692

17253 535565.191 5206298.592

17255 535588.458 5206234.244

17257 535594.191 5206177.761

17259 535583.319 5206111.966

17261 535573.205 5206054.773

17263 535575.309 5205996.333

17267 535600.019 5205876.094

17269 535622.147 5205811.324

17271 535651.502 5205743.195

17273 535677.696 5205682.911

17275 535696.878 5205601.475

17279 535743.511 5205437.486

17281 535769.726 5205361.109

17283 535795.987 5205284.664

17285 535818.311 5205220.082

17287 535852.386 5205160.211

SU_15353 535577.205 5205944.383

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

```
SU_17249 535539.72 5206365.175
SU_17277 535715.065 5205519.449
OF1 535868.71 5205112.602

; _____
[VERTICES]
KD105 535818.449 5205219.708
KD105 535818.789 5205218.791
KD105 535852.182 5205160.597
KD107 535796.118 5205284.287
KD107 535818.18 5205220.459
KD109 535769.855 5205360.731
KD109 535795.858 5205285.042
KD111 535743.64 5205437.108
KD111 535769.597 5205361.487
KD113 535716.512 5205514.192
KD113 535743.38 5205437.862
KD117 535696.966 5205601.086
KD119 535677.868 5205682.552
KD119 535678.336 5205681.579
KD119 535696.788 5205601.864
KD121 535651.661 5205742.829
KD121 535677.537 5205683.278
KD123 535622.291 5205810.952
KD123 535622.653 5205810.021
KD123 535651.344 5205743.562
KD125 535600.148 5205875.716
KD125 535622.017 5205811.702
KD129 535575.332 5205995.934
KD131 535573.139 5206054.379
KD131 535572.929 5206053.139
KD131 535575.292 5205996.732
KD133 535583.25 5206111.573
KD133 535573.274 5206055.166
KD136 535594.216 5206177.363
KD136 535594.277 5206176.401
```

Inputfile des Modells vom Kanalstrang ARA

KD136	535583.386	5206112.359
KD137	535588.567	5206233.86
KD137	535588.835	5206232.909
KD137	535594.152	5206178.159
KD141	535565.326	5206298.216
KD141	535588.323	5206234.618
KD145a	535542.196	5206359.99
KD145a	535565.051	5206298.966
KD147	535508.2	5206420.346
KD149	535475.136	5206477.103
KD149	535507.801	5206421.037
KD151	535441.396	5206536.325
KD151	535441.686	5206535.307
KD151	535474.736	5206477.794
KD153	535425.039	5206602.489
KD153	535441.2	5206537.1
KD155	535407.231	5206671.782
KD155	535407.422	5206671.36
KD155	535424.845	5206603.263
KD157	535371.471	5206744.185
KD157	535406.89	5206672.504
KD159	535339.513	5206809.881
KD159	535371.119	5206744.901
KD17265	535577.325	5205942.559
KD17265	535578.939	5205935.866
KD17265	535599.887	5205876.47

Anhang B: Statistische Kennwerte der Messungen

In diesem Anhang sind die statistischen Kennwerte der Messungen in Tabellen zusammengefasst. Die Zeilen ohne Werte sind jene Monate, in denen Messstörungen aufgetreten sind und daher nicht in der Auswertung berücksichtigt wurden.

Tabelle B-1: Statistische Werte der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17235 (ARA Anfang) im Jahr 2019

Monat	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1	15,66	11,14	14,23	14,33	13,75	14,80
2	15,66	8,48	14,09	14,23	13,65	14,71
3	16,62	11,53	15,00	15,09	14,52	15,57
4	17,95	10,94	15,72	15,86	15,19	16,43
5	18,71	12,30	16,64	16,81	16,24	17,28
6	23,97	15,86	19,08	19,28	18,33	19,95
7	32,29	15,47	20,61	20,71	20,14	21,09
8	23,00	19,28	21,16	21,28	20,71	21,66
9	23,00	16,81	20,66	20,81	20,23	21,19
10	23,97	14,61	19,70	19,76	19,28	20,23
11	19,38	10,16	16,83	17,28	16,33	17,86
12	17,67	9,57	15,64	15,86	14,90	16,62
1-12	32,29	8,48	17,47	17,09	15,09	20,14

Tabelle B-2: Statistische Werte der Kanallufttemperatur bei der Messstelle 17235 (ARA Anfang) im Jahr 2019

Monat	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1	12,30	9,57	11,07	11,14	10,85	11,33
2	15,09	8,58	11,48	11,43	11,04	11,82
3	15,76	11,24	13,39	13,46	12,98	13,75
4	17,09	10,94	15,01	14,90	14,42	15,47
5	18,71	12,50	16,26	16,14	15,66	16,90
6	23,58	16,14	20,21	20,42	18,90	21,76
7	30,36	15,76	22,04	21,95	21,28	22,91
8	23,29	19,38	21,98	22,05	21,47	22,43
9	22,91	16,90	20,43	20,23	19,57	21,28
10	24,06	14,61	18,43	18,43	18,05	18,90
11	18,24	10,16	15,09	15,19	14,52	15,76
12	15,09	9,08	12,85	12,79	12,21	13,56
1-12	30,36	8,58	17,02	16,52	13,65	21,09

Statistische Kennwerte der Messungen

Tabelle B-3: Statistische Werte der Abwassertemperatur bei der Messstelle 17287 (ARA Ende) im Jahr 2019

Monat	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1	15.28	11.72	14.00	14.04	13.65	14.42
2	14.61	11.63	13.50	13.65	13.27	13.94
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	17.95	12.40	16.39	16.62	16.05	16.90
6	23.58	15.86	18.94	19.09	18.14	19.76
7	27.47	15.66	20.44	20.52	20.04	20.81
8	22.24	19.47	20.98	21.00	20.62	21.38
9	22.62	16.90	20.57	20.71	20.23	21.09
10	21.28	14.61	19.56	19.57	19.19	20.04
11	19.09	10.06	16.77	17.19	16.33	17.67
12	17.48	9.77	15.54	15.66	14.71	16.52
1-12	27.47	9.77	18.41	17.57	15.28	20.42

Tabelle B-4: Statistische Werte der Kanallufttemperatur bei der Messstelle 17287 (ARA Ende) im Jahr 2019

Monat	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1	11.63	9.57	10.95	11.04	10.75	11.24
2	15.09	8.58	11.66	11.63	11.24	12.11
3	15.28	11.72	13.62	13.65	13.27	13.94
4	17.00	10.94	15.28	15.38	14.71	15.76
5	18.71	12.50	16.38	16.24	15.86	17.19
6	23.58	16.71	21.04	21.47	20.33	22.33
7	26.29	15.76	22.36	22.53	21.66	23.29
8	23.29	19.38	22.34	22.33	22.05	22.62
9	22.91	16.90	20.67	20.52	20.04	21.38
10	20.52	14.61	18.80	18.81	18.52	19.19
11	17.57	10.16	15.40	15.57	14.90	16.24
12	15.09	9.67	13.26	13.37	12.59	13.94
1-12	26.29	8.58	16.85	16.24	13.46	20.71

Statistische Kennwerte der Messungen

Tabelle B-5: Statistische Werte der Abwassertemperatur bei der Messstelle 3170065 (Andritz Ende) im Jahr 2019

Monat	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1	15.38	9.87	12.23	12.21	11.63	12.69
2	15.28	8.18	11.78	11.72	11.24	12.11
3	16.05	9.37	12.37	12.40	11.82	12.88
4	17.00	9.97	13.33	13.37	12.79	13.94
5	17.86	11.82	14.44	14.42	13.94	14.90
6	27.47	13.65	16.93	16.90	15.95	17.86
7	25.51	17.09	18.44	18.43	18.05	18.71
8	22.62	17.95	19.38	19.38	19.09	19.66
9	22.24	16.62	19.27	19.28	18.90	19.66
10	21.19	13.94	18.17	18.14	17.86	18.52
11	18.24	10.36	15.39	15.38	14.61	16.43
12	16.81	8.68	13.31	13.37	12.59	13.94
1-12	27.47	8.18	15.64	15.47	12.98	18.43

Tabelle B-6: Statistische Werte der Kanallufttemperatur bei der Messstelle 3170065 (Andritz Ende) im Jahr 2019

Monat	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1	11.43	9.18	10.30	10.36	9.87	10.65
2	10.85	8.58	9.89	9.87	9.67	10.06
3	12.01	10.26	11.15	11.14	10.85	11.43
4	14.80	11.53	12.59	12.50	12.21	12.88
5	16.62	11.63	14.06	14.04	13.65	14.52
6	23.97	14.52	16.51	16.43	15.57	17.48
7	25.13	17.57	18.84	18.62	18.43	19.00
8	23.39	19.38	19.99	19.95	19.76	20.14
9	22.91	18.71	19.81	19.85	19.57	20.04
10	19.47	16.71	18.23	18.24	18.05	18.43
11	17.09	13.27	15.21	14.80	14.52	15.95
12	14.61	11.14	12.70	12.59	12.21	13.17
1-12	25.13	8.58	14.98	14.61	11.72	18.43

Statistische Kennwerte der Messungen

Tabelle B-7: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Gritzenweg in 0.80 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020

Monat/ Jahr	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1/20	5.53	3.39	3.99	3.81	3.71	4.18
2/20	7.44	3.78	5.81	5.64	4.93	6.78
3/20	11.68	7.24	9.41	9.66	8.05	10.52
4/20	16.55	10.59	13.35	13.37	11.44	15.35
10/19	18.76	16.44	18.03	18.19	17.65	18.60
11/19	16.41	10.62	12.59	11.78	11.52	13.85
12/19	10.61	5.54	7.37	7.16	6.41	7.96
Summe	18.76	3.39	8.89	8.01	5.54	11.57

Tabelle B-8: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Gritzenweg in 1.15 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020

Monat/ Jahr	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1/20	10.67	8.21	9.31	9.21	8.66	9.94
2/20	8.61	8.03	8.19	8.12	8.06	8.28
3/20	10.29	8.61	9.38	9.27	8.91	9.88
4/20	11.88	10.30	10.85	10.70	10.44	11.22
10/19	18.81	18.42	18.63	18.65	18.55	18.73
11/19	18.42	13.91	16.10	16.05	14.68	17.44
12/19	13.90	10.68	12.17	12.11	11.17	13.14
Summe	18.81	8.03	11.37	10.36	8.82	13.29

Tabelle B-9: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Gritzenweg in 1.50 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020

Monat/ Jahr	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1/20	12.43	11.11	11.81	11.87	11.53	12.13
2/20	11.22	10.94	11.09	11.10	11.05	11.14
3/20	11.51	10.98	11.26	11.28	11.14	11.36
4/20	12.52	11.32	11.79	11.79	11.48	12.02
10/19	18.00	17.33	17.75	17.82	17.58	17.91
11/19	17.44	12.23	14.89	14.09	13.82	16.34
12/19	13.67	11.68	13.03	13.28	12.54	13.40
Summe	18.00	10.94	12.60	11.90	11.24	13.40

Tabelle B-10: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Casino in 0.80 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020

Monat/ Jahr	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1/20	8.88	7.03	7.65	7.49	7.35	7.81
2/20	10.68	7.50	9.33	9.19	8.84	9.96
3/20	13.18	10.11	11.37	11.41	10.63	11.92
4/20	18.69	12.70	16.79	17.05	16.07	17.95
10/19	19.37	16.87	18.82	19.10	18.65	19.28
11/19	16.84	12.16	13.66	13.11	12.74	14.55
12/19	12.15	8.81	9.97	9.90	9.37	10.43
Summe	19.37	7.03	11.52	10.59	9.00	13.08

Tabelle B-11: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Casino in 1.15 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020

Monat/ Jahr	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1/20	11.99	10.05	10.67	10.38	10.26	10.92
2/20	11.78	10.09	11.02	10.90	10.74	11.29
3/20	12.70	11.67	12.14	12.01	11.89	12.41
4/20	16.48	12.22	14.74	14.82	13.86	15.96
10/19	20.36	19.13	20.14	20.31	20.13	20.33
11/19	19.12	14.62	15.92	15.01	14.82	16.61
12/19	14.64	11.94	12.82	12.44	12.36	13.28
Summe	20.36	10.05	13.16	12.37	11.32	14.73

Tabelle B-12: Statistische Werte der Bodentemperatur bei der Messstelle Casino in 1.50 m Tiefe von Oktober 2019 bis April 2020

Monat/ Jahr	Maximum	Minimum	Mittelwert	Median	25% Quartil	75% Quartil
1/20	14.76	12.78	13.45	13.28	13.08	13.66
2/20	13.45	12.73	13.10	13.09	12.98	13.22
3/20	14.20	12.55	13.26	13.32	12.82	13.58
4/20	15.62	12.80	14.16	14.13	13.40	14.95
10/19	21.77	20.80	21.53	21.69	21.44	21.72
11/19	20.79	13.92	17.39	16.92	16.49	18.80
12/19	17.11	14.28	15.39	15.35	14.57	16.06
Summe	21.77	12.55	14.86	14.05	13.20	15.99

Anhang C: Stichprobenausschnitt aus den Simulationen des Kanalstrangs ARA

In der folgenden Tabelle ist als Beispiel ein Ausschnitt der Stichproben für die Simulation des Kanalstrangs ARA über ein Jahr mit dem Simulationsergebnis über die durchschnittliche Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA dargestellt.

Tabelle C-1: Beispielhafter Ausschnitt von einer Stichprobe aus Parameterwerten

X _i	Thickness	k_Pipe	k_Soil	specHcSoil	densitySoil	DWFPattern	Inflow	AirPattern	SoilPattern	Outputs
X ₁	0,35	1,7	1,18	1480	1740	17,4	900	3	-1	17,90395
X ₂	0,35	1,7	1,18	1480	2100	17,4	900	3	-1	17,90364
X ₃	0,35	0,8	1,18	1480	2100	17,4	900	3	-1	17,91020
X ₄	0,35	0,8	1,18	1480	2100	17,4	900	-0,6	-1	17,89262
X ₅	0,35	0,8	1,18	1480	2100	17,4	300	-0,6	-1	17,86950
X ₆	0,35	0,8	1,18	1480	2100	17,4	300	-0,6	0,2	17,87441
X ₇	0,35	0,8	2,5	1480	2100	17,4	300	-0,6	0,2	17,87391
X ₈	0,35	0,8	2,5	820	2100	17,4	300	-0,6	0,2	17,87429
X ₉	0,158	0,8	2,5	820	2100	17,4	300	-0,6	0,2	17,86240
X ₁₀	0,094	0,8	0,3	820	2100	15,8	300	3	1	16,28739
X ₁₁	0,094	0,8	0,3	820	1740	15,8	300	3	1	16,28764
X ₁₂	0,094	0,8	0,3	820	1740	15,8	900	3	1	16,27679
X ₁₃	0,094	0,8	0,3	820	1740	15,8	900	3	-0,2	16,27322
X ₁₄	0,094	1,7	0,3	820	1740	15,8	900	3	-0,2	16,27178
X ₁₅	0,094	1,7	0,3	820	1740	15,8	900	-0,6	-0,2	16,25421
X ₁₆	0,094	1,7	1,62	820	1740	15,8	900	-0,6	-0,2	16,24894
X ₁₇	0,094	1,7	1,62	820	1740	18,2	900	-0,6	-0,2	18,69118

...

Anhang D: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Seeds

In diesem Anhang werden die Ergebnisse der Simulationen unterschiedlicher Seeds mithilfe von Grafiken dargestellt.

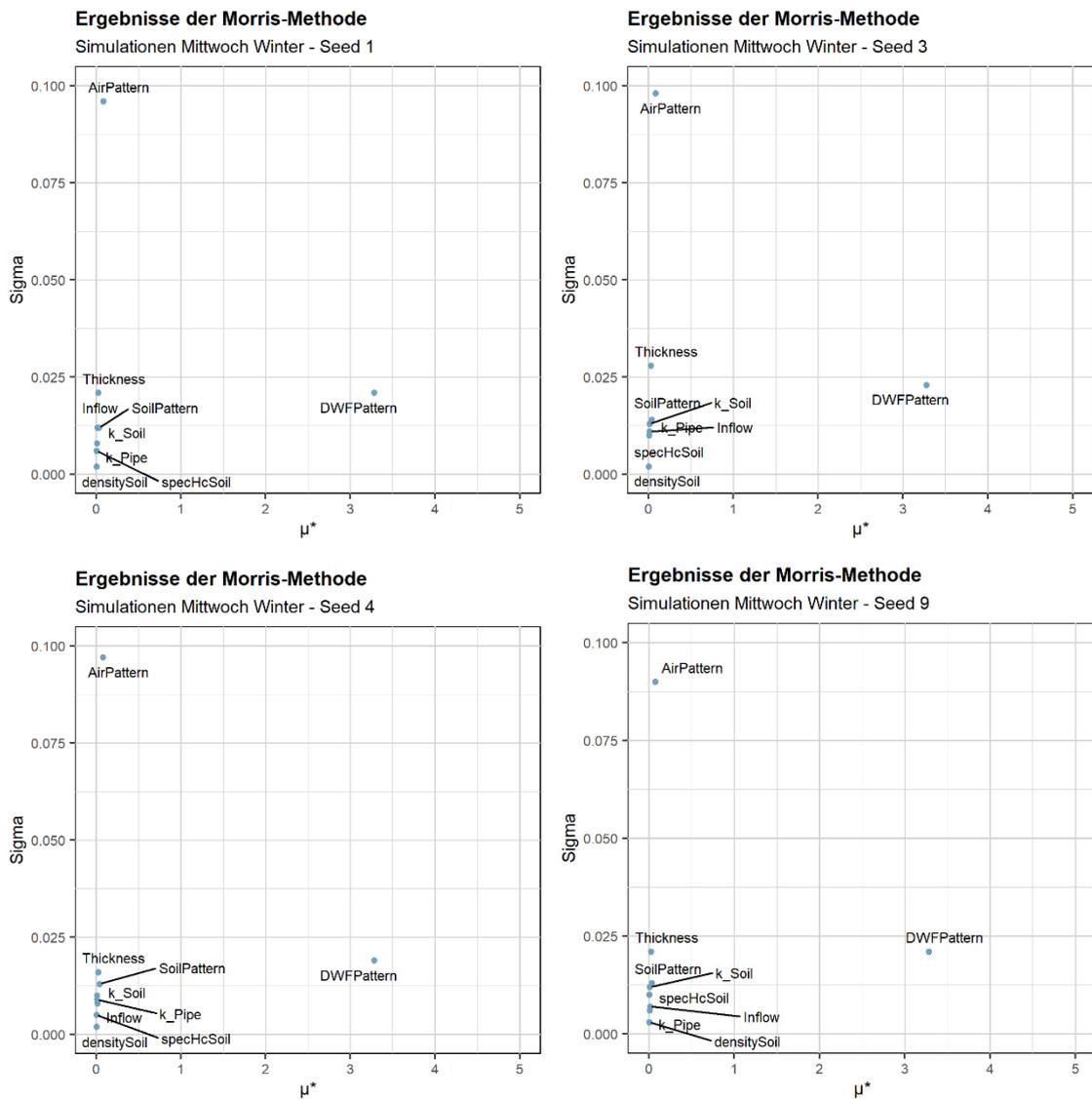


Abbildung B-1: Gegenüberstellung der Sensitivitätsparameter μ^* und δ der Simulationen über einen Tag mit unterschiedlichen Seeds

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Seeds

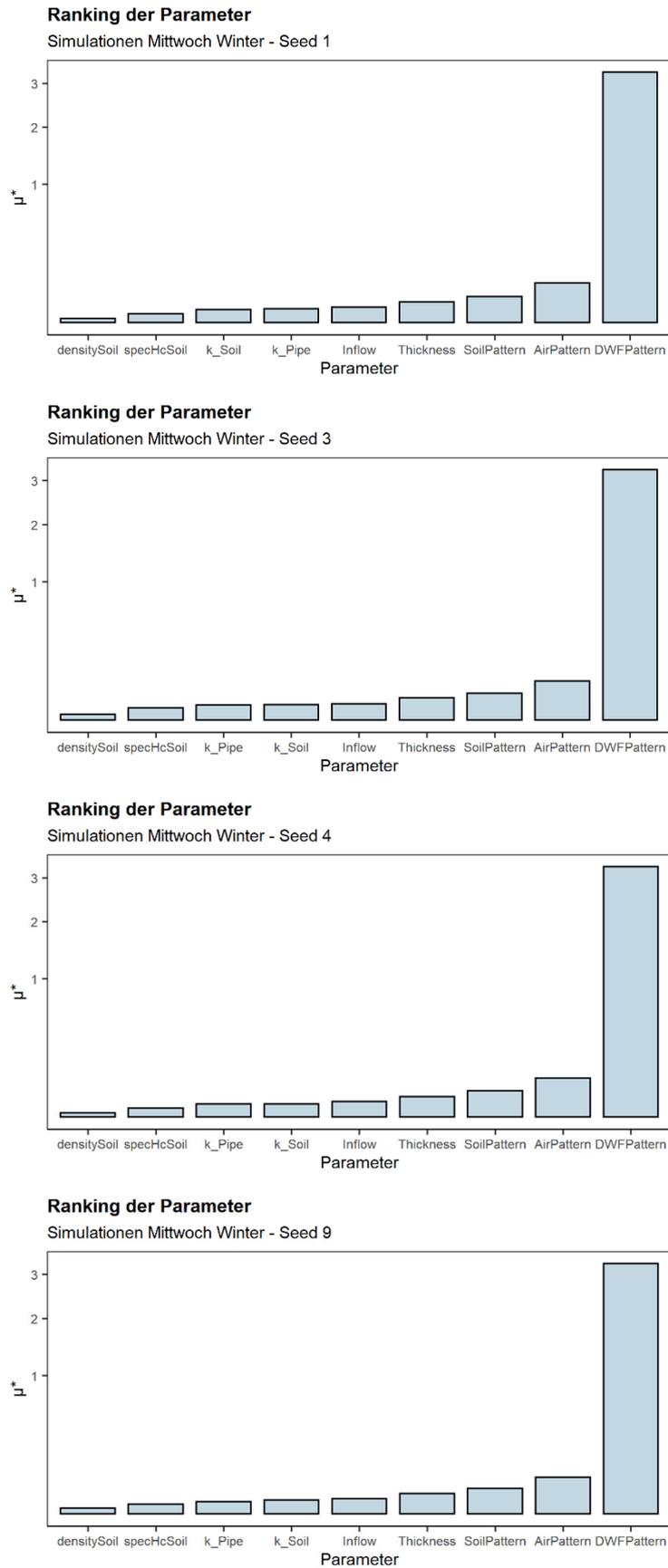


Abbildung B-2: Reihung der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA über einen Tag

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Seeds

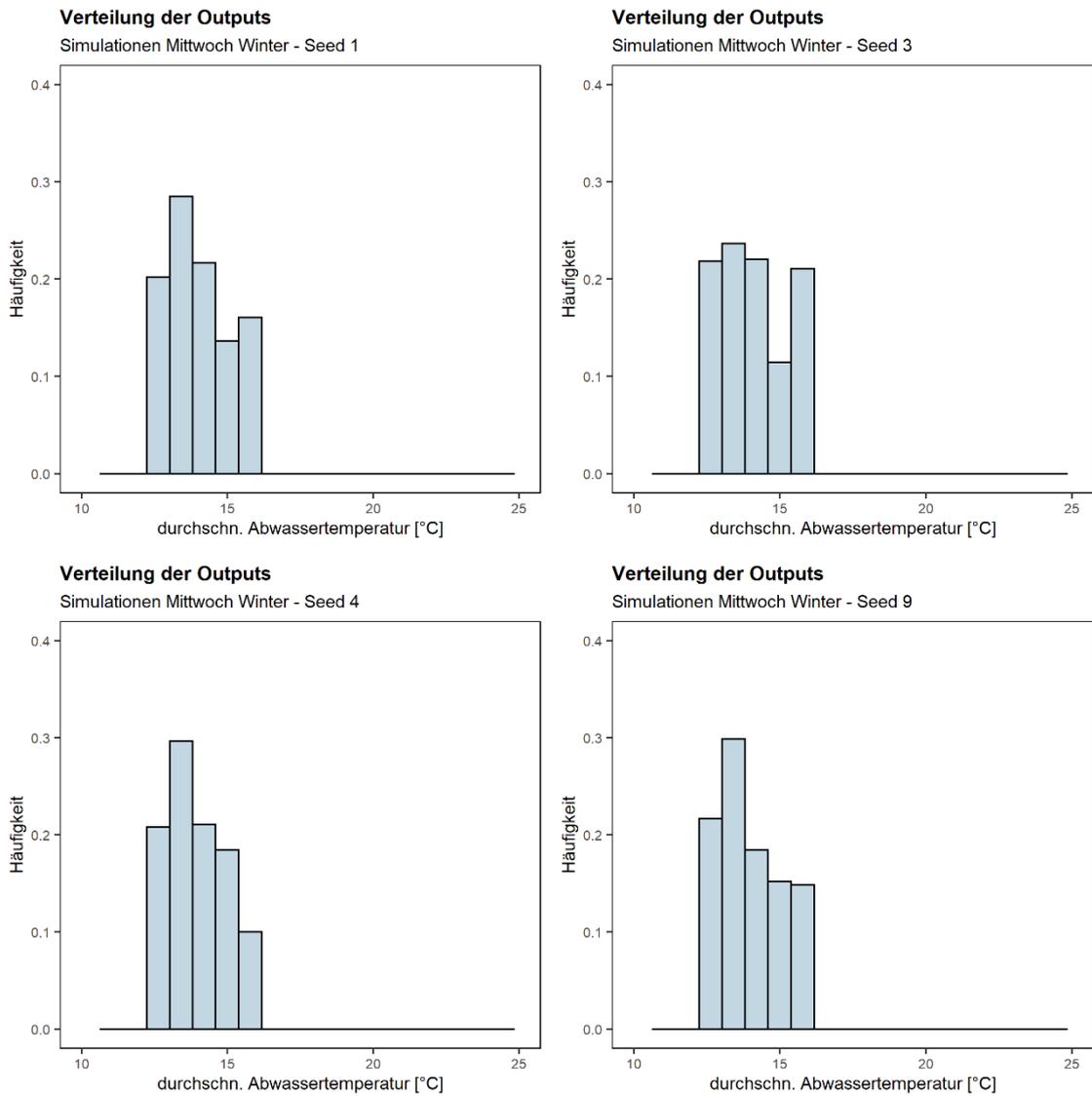


Abbildung B-3: Verteilung der Abwassertemperatur beim Zulauf der ARA von Simulationen mit unterschiedlichen Seeds über einen Tag

