



Peter Schlagbauer, BSc

Thermische Energiegewinnung aus Abwasser

Entwicklung eines Temperaturmodells für SWMM

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

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

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Johannes Leimgruber, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, Juni 2018

Kontakt:
Peter Schlagbauer
peter.schlagbauer@gmail.com

EIDESSTÄTTLICHE 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.

04.06.2018

Datum / Date



Unterschrift / Signature

Danksagung

Im Zuge meines Studiums gilt es vielen Personen zu danken. Menschen, die mich durch die Zeit meines Studiums begleitet und unterstützt haben.

Der größte Dank gilt dir liebe Victoria. Es ist in Worten nicht fassbar, welche große Unterstützung du für mich warst und bist.

Im Besonderen möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Den erfolgreichen Abschluss meines Studiums konnte ich dank eurer großartigen und liebevollen Unterstützung erreichen. Meinen beiden Brüdern gilt ein besonderer Dank. Sei es ein offenes Ohr, eine finanzielle Unterstützung oder die Einsicht, dass ich zeitlich begrenzt für Freizeit- und Arbeitsaktivitäten zur Verfügung stand.

Bei allen Freunden und Personen, welche mich im Laufe meines Studiums begleitet haben, möchte ich mich bedanken.

Natürlich gilt ein großer Dank dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau. Im Besonderen möchte ich mich bei Prof. Dirk Muschalla und Dipl.-Ing. Johannes Leimgruber für die lehrreichen und interessanten Gespräche sowie die Möglichkeit zur Erstellung dieser spannenden Arbeit bedanken. Aber auch Prof. Günter Gruber gilt ein großer Dank. Im Zuge deiner Lehrveranstaltungen bzw. der Gespräche mit dir, fiel die Entscheidung, dass ich meine Abschlussarbeit bei euch am Institut verfasse. Letztlich möchte ich mich bei der Holding Graz Wasserwirtschaft bedanken, durch welche ich im Zuge des Projekts KaThEA diese Arbeit erstellen durfte.

DANKE.

Kurzfassung

Thermische Energie aus Abwasser weist ein großes Potential auf. Bei der Energieentnahme ist zu berücksichtigen, dass Position und Menge der Entnahme nicht willkürlich gewählt werden können. Zum einen ist die Entfernung zur/zum VerbraucherIn möglichst gering zu halten, zum anderen ist die Temperatur am Zulauf zur Kläranlage ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Abwasserreinigung.

Sobald Abwasser in die Kanalisation gelangt, steht dieses im Wärmeaustausch mit der Umwelt. Dabei wird beispielsweise Wärme zwischen Abwasser und Erdreich sowie zwischen Abwasser und Kanalluft ausgetauscht. Daraus resultiert eine Abkühlung oder Erwärmung des Abwassers. Auf Basis physikalischer Gesetze der Thermodynamik wird der Wärmeaustausch formuliert. Die Integration des Temperaturmodells erfolgt in ein dynamisches Niederschlags-Abfluss-Simulationsmodell und erlaubt es, zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Abwassertemperatur in einem Schacht, einer Haltung oder einem Speicherbauwerk zu ermitteln. Im Zuge dieser Arbeit wird ein Temperaturmodell in die Abwassermodellierungssoftware „EPA's Storm Water Management Model“ (SWMM) integriert. Abschließend werden anhand fiktiver Abwassernetze unterschiedliche Szenarien analysiert und die Ergebnisse auf Plausibilität überprüft.

Abstract

Thermal energy from wastewater has great potential. The position and quantity of the withdrawal cannot be selected arbitrarily. On the one hand, the distance to the consumer has to be kept as short as possible, and on the other hand, the temperature at the inlet to the wastewater treatment plant is an essential factor for a successful purification process.

As soon as wastewater enters the sewer system, it is in heat exchange with the environment. For example, heat is exchanged between wastewater and soil as well as between wastewater and in-sewer air. This results in cooling or heating of the wastewater. Based on physical laws of thermodynamics, the heat exchange is formulated. The integration of the temperature model into a dynamic rainfall-runoff simulation model allows to determine the current wastewater temperature in a manhole, a pipe or a storage unit at any time. In this thesis, a temperature model is integrated into the modelling software "EPA's Storm Water Management Model" (SWMM). Finally, various scenarios are analysed using fictitious wastewater networks and the results are checked for plausibility.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Rechtliche Grundlagen.....	3
2.2	Technische Grundlagen	3
2.2.1	Begriffsdefinitionen	3
2.2.2	Wärmeübertragung.....	6
2.2.3	Prinzip der Wärmepumpe in Verbindung mit einem Wärmetauscher	7
2.2.4	Möglichkeiten zur thermischen Energienutzung aus Abwasser.....	8
2.2.5	Temperatur am Zufluss der Abwasserreinigungsanlage ..	11
2.3	Modellgrundlagen.....	12
2.3.1	Temperaturmodell von Bischofsberger & Seyfried (1984)	12
2.3.2	Temperaturmodell von Dürrenmatt & Wanner (2006).....	13
2.3.3	Temperaturmodell von Abdel-Aal (2014).....	15
3	Methodik	18
3.1	Modellentwicklung.....	18
3.1.1	Mischungsrechnung am Knoten	19
3.1.2	Wärmeaustausch innerhalb einer Haltung.....	20
3.1.3	Wärmeaustausch im Speicherknoten	26
3.2	Implementierung des Temperaturmodells.....	29
3.3	Aufbau fiktiver Abwassernetze und deren Szenarien.....	32
3.3.1	Abwassernetz I	33
3.3.2	Abwassernetz II	36
3.3.3	Abwassernetz III	40
4	Ergebnisse und Diskussion	42
4.1	Abwassernetz I	42
4.1.1	Szenario I – keine Temperaturveränderung	42
4.1.2	Szenario II – Wärmeaustausch Abwasser – Kanalluft	44

4.1.3	Szenario III – Wärmeaustausch Abwasser – Erdreich	45
4.1.4	Szenario IV – Kombination der Wärmeaustauschprozesse	47
4.1.5	Szenario V – Variierung der Haltungslänge	48
4.1.6	Szenario VI – Variierung der Einleitungstemperatur	50
4.1.7	Szenario VII – Jahresganglinie Kanalluft und Erdreich	52
4.2	Abwassernetz II	53
4.2.1	Szenario I – Mischungsrechnung	53
4.2.2	Szenario II – Zufluss am Knoten mit Ganglinie	55
4.2.3	Szenario III – Wärmetauscher	58
4.3	Abwassernetz III	62
5	Schlussfolgerung, Zusammenfassung und Ausblick	64
	Literaturverzeichnis	66
A	Anhang	i
A.1	Beschreibung der eingesetzten Software	i
A.2	Implementierung des Temperaturmodells	i
A.2.1	Hinzufügen von Grad Celsius als Einheit der Qualitätsparameter	i
A.2.2	Einlesen zusätzlicher Einstellungen	ii
A.2.3	Eigenschaften der Haltungen erweitern	iii
A.2.4	Eigenschaften des Speicherknotens erweitern	x
A.2.5	Integration des Temperaturmodells in die Klasse qualrout.c	xiii
A.3	Interface – Bedienung	xxvi
A.4	Inputfiles	xxix
A.4.1	Abwassernetz I	xxx
A.4.1.1	Szenario I	xxx
A.4.1.2	Szenario III	xxxv
A.4.1.3	Szenario IV	xxxviii
A.4.1.4	Szenario V	xli
A.4.1.5	Verkürzung der Haltungslänge	xli
A.4.1.6	Verlängerung der Haltungslänge	xlili
A.4.1.7	Szenario VI	xlvi

A.4.1.8 Szenario VII.....	xlix
A.4.2 Abwassernetz II.....	li
A.4.2.1 Szenario I.....	li
A.4.2.2 Szenario II.....	liv
A.4.2.3 Szenario III.....	lvii
A.4.2.3.1 Konstante Temperaturabsenkung.....	lvii
A.4.2.3.2 Konstante Leistungsentnahme.....	lx
A.4.3 Abwassernetz III.....	lxiii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Links: Abwassernetz der Stadt Graz, Rechts: Ausschnitt aus dem Grazer Süden betrachtet, mit beispielhafter Temperaturentnahme	2
Abbildung 2-1:	Darstellung des Gesamtwärmeübergangswiderstandes bei der Wärmeübertragung zwischen zwei voneinander getrennten Fluiden	6
Abbildung 2-2:	Veranschaulichung der unterschiedlichen Wärmeaustauschprozesse. Links: Wärmeleitung durch einen Festkörper oder Fluid; Mitte: Konvektion zwischen einer Oberfläche und einem Fluid; Rechts: Wärmestrahlung zweier Oberflächen (Incropera et al., 2007)	7
Abbildung 2-3:	Kombination der beiden Mechanismen Wärmeleitung und Konvektion am Beispiel zweier voneinander getrennten Fluiden (Jany & Sapper, 2001)	7
Abbildung 2-4:	Schematische Darstellung eines Wärmetauschers (kermi.de, 2017)	8
Abbildung 2-5:	Arten der thermischen Energienutzung aus Abwasser. Links: Nutzung vor Einbringung in die öffentliche Kanalisation; Mitte: Wärmeentnahme in der Kanalisation; Rechts: Thermische Energienutzung am Ablauf der ARA (Schmid et al., o.J.).....	9
Abbildung 2-6:	Schematische Darstellung der thermischen Energienutzung in der Kanalisation (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2010).....	11
Abbildung 2-7:	Wachstumsrate der <i>Nitrosomonas</i> in Abhängigkeit der Temperatur [°C].....	12
Abbildung 2-8:	Schematische Darstellung der Energie- und Massenströme (Bischofsberger & Seyfried, 1984)	13
Abbildung 2-9:	Darstellung der berücksichtigten Wärme- und Stofftransportprozesse innerhalb eines Rohrquerschnittes (Dürrenmatt & Wanner, 2008).....	15
Abbildung 2-10:	Schematische Darstellung der Wärmeaustauschprozesse Abwasser – Kanalluft (q_{wa}) sowie Abwasser – Erdreich (q_{ws}) (Abdel-Aal, 2015)	15
Abbildung 2-11:	Berechnungsreihenfolge der Haltungen (Abdel-Aal, 2015).....	16
Abbildung 2-12:	Ablaufdiagramm des Temperaturmodells von Abdel-Aal in Verbindung mit einem Abwassernetz bestehend aus 3048 Haltungen (Abdel-Aal, 2015)	17

Abbildung 3-1:	Darstellung des Ablaufs, beginnend mit Grundlagenanalyse, anschließender Modellentwicklung sowie abschließender Implementierung des entwickelten Temperaturmodells in SWMM	18
Abbildung 3-2:	Zufluss mehrerer Haltungen an einem Knoten, nach Mischung der Zuflüsse fließt der resultierende Abfluss mit der aus der Mischungsrechnung ermittelten Temperatur in die stromabwärtsliegende Haltung	19
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung eines stationären, offenen Systems mit Energieaustausch in Form von Wärme, Arbeit sowie Masse (Incropera et al., 2007)	20
Abbildung 3-4:	Darstellung eines Rohrquerschnitts und der zur Berechnung der Temperaturänderungen erforderlichen Parameter und Variablen.....	25
Abbildung 3-5:	Zum Zeitpunkt t_0 befindet sich eine bestimmte Menge an Energie im System. Zum Zeitpunkt t_1 ist eine Änderung der Energiemenge aufgrund von Wärmeaustauschprozessen sowie dem Zu- und Abfluss erkennbar.....	27
Abbildung 3-6:	Auszug aus dem Visual Code Explorer des Projekts OpenSWMM und Markierung der Klasse qualrout.c.....	31
Abbildung 3-7:	Aufbau von Abwassernetz I in SWMM mit Knoten (1 bis 5), dem Auslass (6) sowie den Haltungen 1 bis 5.....	33
Abbildung 3-8:	Aufbau von Abwassernetz II in SWMM mit Knoten (1 bis 5 und 7 bis 11), dem Auslass (6) sowie den Haltungen 1 bis 10.....	36
Abbildung 3-9:	Aufbau von Abwassernetz II – Szenario II, inklusive des Zuflusses an Knoten 7	38
Abbildung 3-10:	Aufbau von Abwassernetz II – Szenario III, inklusive der Temperaturentnahme innerhalb von Haltung 3	39
Abbildung 3-11:	Aufbau von Abwassernetz II – Szenario III, inklusive der Wärmeentnahme innerhalb von Haltung 3	40
Abbildung 3-12:	Aufbau von Abwassernetz III in SWMM mit Knoten (1 bis 3 und 5), dem Auslass (6), dem Speicherknoten (4) sowie den Haltungen 1 bis 5.....	41
Abbildung 4-1:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario I mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6).....	43
Abbildung 4-2:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario II mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6).....	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-3:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario III mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	46
Abbildung 4-4:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario IV mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	47
Abbildung 4-5:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario V – Reduktion der Haltungslänge – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	49
Abbildung 4-6:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario V – Erweiterung der Haltungslänge – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	50
Abbildung 4-7:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario VI – Variierung der Haltungslänge – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	51
Abbildung 4-8:	Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario VII – jahreszeitliche Veränderung der Abwassertemperatur – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6).....	52
Abbildung 4-9:	Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario I – Mischungsrechnung – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	54
Abbildung 4-10:	Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario II – Ganglinien für Knotenzuflüsse – mit dem Temperaturverlauf von Knoten 1, 3, 7 und vom Auslass.....	55
Abbildung 4-11:	Rot markiert: kurzzeitiger Temperaturanstieg nach der Deaktivierung von Zuflüssen.....	56
Abbildung 4-12:	Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario III – konstante Temperaturabsenkung zwischen Knoten 3 und 4 – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6).....	59
Abbildung 4-13:	Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario III – konstante Wärmeentnahme zwischen Knoten 3 und 4 – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	61
Abbildung 4-14:	Ergebnis von Abwassernetz III – Ausbildung von Knoten 4 als Speicherknoten – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)	62
Abbildung 5-1:	Erweiterung der Headerdatei enums.h, ungefähr ab Zeile 152 mit der Einheit °C	i

Abbildung 5-2:	Erweiterung der Klasse keywords.c, ungefähr ab Zeile 99.....	ii
Abbildung 5-3:	Abschließende Definition des Textes in der Headerdatei text.h, ab Zeile 263.....	ii
Abbildung 5-4:	Definition der Schlüsselwörter aus dem Inputfile in der Datei text.h, ab Zeile 105.....	ii
Abbildung 5-5:	Definition der zusätzlichen Einstellungen in der Datei enums.h, ab Zeile 465.....	ii
Abbildung 5-6:	Erweiterung der Klasse keywords.c, ab Zeile 92.....	ii
Abbildung 5-7:	Definition der Struktur in der Headerdatei globals.h, am Ende der Datei.....	ii
Abbildung 5-8:	Einlesen der Einstellungen aus dem Inputfile in der Datei project.c, ab Zeile 710.....	iii
Abbildung 5-9:	Conduit Object inklusive der Erweiterung durch die genannten Parameter und Variablen in der Headerdatei objects.h.....	iv
Abbildung 5-10:	Vergrößerung des Arrays in Abhängigkeit der einzulesenden Spalten in der Klasse link.c, ungefähr ab Zeile 920.....	v
Abbildung 5-11:	Einlesen der Werte aus dem Inputfile in der Klasse links.c, ungefähr ab Zeile 950.....	vi
Abbildung 5-12:	Zuweisung der Eingabewerte an die Parameter der Haltung in der Klasse link.c, ab Zeile 312.....	vi
Abbildung 5-13:	Zuweisung des benetzten Umfangs und der Fließgeschwindigkeit an die Haltung in der Klasse dwflow.c, ungefähr ab Zeile 275.....	vii
Abbildung 5-14:	Darstellung unterschiedlicher Fließzustände für dynamischen Wellenansatz (Rossman, 2017).....	viii
Abbildung 5-15:	Zuweisung der Wasserspiegelbreite in Abhängigkeit der baulichen Ausführung in der Klasse dwflow.c, ungefähr ab Zeile 445.....	ix
Abbildung 5-16:	Storage Unit Object inklusive der Erweiterung durch die genannten Parameter in der Headerdatei objects.h.....	x
Abbildung 5-17:	Vergrößerung des Arrays in Abhängigkeit der einzulesenden Spalten in der Klasse node.c, ungefähr ab Zeile 920.....	x
Abbildung 5-18:	Einlesen der Werte aus dem Inputfile in der Klasse node.c, ungefähr ab Zeile 740.....	xii
Abbildung 5-19:	Zuweisung der Eingabewerte an die Parameter der Haltung in der Klasse node.c, ab Zeile 170.....	xii
Abbildung 5-20:	Zuweisung der Wasseroberfläche an den Speicherknoten in der Klasse node.c, ungefähr ab Zeile 960.....	xii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-21: Gesamte Klasse qualrout.c	xxvi
Abbildung 5-22: Erweiterung der <code>OPTIONS</code> um die benötigten Konstanten und ein Flag zur Aktivierung/Deaktivierung des Temperaturmodells	xxvii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Wärmeentnahmestellen (Bischofsberger & Seyfried, 1984) 9	
Tabelle 2-2: Auflistung und Beschreibung der Erhaltungsgleichungen für die berücksichtigten Wärme- und Stofftransportprozesse (Dürrenmatt, 2006).....	14
Tabelle 3-1: Verwendete allgemeine und haltungsspezifische Parameter für das Temperaturmodell in Verbindung mit den Szenarien.....	32
Tabelle 3-2: Auf Basis von Kapitel 2.3 gewählte, fiktive Jahresganglinie für die Temperatur der Kanalluft und des Erdreichs	33
Tabelle 3-3: Szenarien I bis VI des Abwassernetzes I mit den zu erwartenden Reaktionen.....	34
Tabelle 3-4: Zuflüsse im Abwassernetz II je Knoten	36
Tabelle 3-5: Szenarien I bis III des Abwassernetzes II mit den zu erwartenden Reaktionen.....	37
Tabelle 3-6: Knotenzuflüsse entsprechend der Tageszeit.....	39
Tabelle 3-7: Verwendete Parameter in Bezug auf den Speicherknoten	41
Tabelle 4-1: Szenarien I bis VII des Abwassernetzes I mit den zu erwartenden Reaktionen und dem Simulationsergebnis.....	42
Tabelle 4-2: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario I, infolge eines deaktivierten Temperaturmodells.....	43
Tabelle 4-3: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario II, infolge des Wärmeaustauschprozesses Abwasser - Kanalluft.....	45
Tabelle 4-4: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario III, infolge des Wärmeaustauschprozesses Abwasser - Erdreich	46
Tabelle 4-5: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario IV, infolge der Kombination der Wärmeaustauschprozesse	48
Tabelle 4-6: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario V, infolge einer Verkürzung der Haltungslänge auf je 100 m.....	49
Tabelle 4-7: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario V, infolge der Verlängerung der Haltungslänge auf je 800 m.....	50

Tabelle 4-8:	Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario VI, infolge einer Einleitungstemperatur von 8 °C.....	51
Tabelle 4-9:	Temperatur am Auslass (6) aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario VII, in Abhängigkeit des Monats	52
Tabelle 4-10:	Szenarien I bis III des Abwassernetzes II mit den zu erwartenden Reaktionen	53
Tabelle 4-11:	Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz II – Szenario I, infolge der Mischung mehrerer Abflüsse	54
Tabelle 4-12:	Ergebnis aus Abwassernetz II – Szenario II aller Knoten über einen Tag	58
Tabelle 4-13:	Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz II – Szenario III, infolge der Temperaturabsenkung innerhalb von Haltung 3.....	60
Tabelle 4-14:	Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz II – Szenario III, infolge der Wärmeentnahme innerhalb von Haltung 3.....	61
Tabelle 4-15:	Mitte: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz III, unter Berücksichtigung eines Speicherknotens; Rechts: zum Vergleich die Temperatur je Knoten aus Abwassernetz I – Szenario IV	63
Tabelle 5-1:	Auflistung der zu modifizierenden Bereiche des Inputfiles	xxvii
Tabelle 5-2:	Weitere Bereich des Inputfiles – INFLOWS, DWF und PATTERNS.....	xxviii
Tabelle 5-3:	Auflistung der zusätzlichen Spalten im Bereich der CONDUITS im Inputfile.....	xxviii
Tabelle 5-4:	Auflistung der zusätzlichen Spalten im Bereich der Storage im Inputfile.....	xxix

Abkürzungsverzeichnis

1. AEV	Erste Abwasseremissionsverordnung
AAEV	Allgemeine Abwasseremissionsverordnung
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
EW ₆₀	Einwohnerwert organisch (60g BSB ₅ /EW.d)
SWMM	Storm Water Management Model

1 Einleitung

Im Jahr 2012 wurde in Österreich eine Strategie zur Anpassung an den Klimawandel erarbeitet. Darin enthalten sind ein strategisches Konzept zur Anpassung an den Klimawandel und ein Aktionsplan zur Umsetzung konkreter Handlungen. Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen (2015) wurde weltweit ein bindendes Abkommen mit Verpflichtungen für Industrie- und Entwicklungsländer beschlossen. Darin ist festgelegt, dass die Erderwärmung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit auf unter 2 °C begrenzt wird. Aus diesem Grund muss neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen, eine Steigerung des Anteils an erneuerbaren Energieträgern sowie eine Verbesserung der Energieeffizienz erreicht werden. (BML-FUW, 2017)

Neben der Abkehr von fossilen Energieträgern zur Stromerzeugung, wird auch im Zuge der thermischen Energiegewinnung auf erneuerbare Energieträger gesetzt. Eine Möglichkeit bietet hierbei die thermische Energiegewinnung aus Abwasser.

Pro EinwohnerIn und Tag wird eine Abwassermenge in der Höhe von zirka 120 bis 140 Liter in die Kanalisation eingeleitet. In Abhängigkeit der Stadtgröße und der damit einhergehenden Anzahl an Betrieben und öffentlichen Gebäuden, können zwischen 200 und 300 Liter Schmutzwasser pro EinwohnerIn und Tag anfallen (Kainz et al., 2012). Die große Menge und die aus früheren Untersuchungen ermittelte durchschnittliche Temperatur des Abwassers sind Anzeichen für das enorme Potential zur thermischen Energiegewinnung aus Abwasser.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Zuge des Projekts „KathEA - Map of thermal energy in the sewer system Graz“ ist eine Risiko- und Potentialkarte in Bezug auf die thermische Energienutzung aus dem Abwassernetz der Stadt Graz zu erstellen. Wie in Abbildung 1-1 ersichtlich, gilt es zu klären, welche Folgen eine Temperaturänderung an einer beliebigen Position im Abwassernetz hat. Dabei muss stets der ungestörte Betrieb der Abwasserreinigungsanlage (ARA) gewährleistet sein.

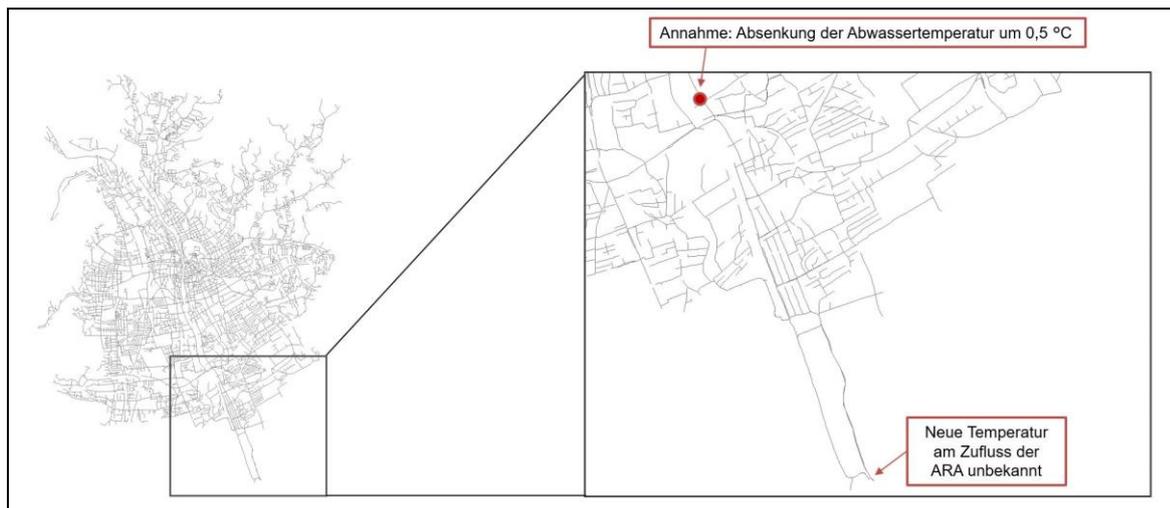


Abbildung 1-1: Links: Abwassernetz der Stadt Graz, Rechts: Ausschnitt aus dem Grazer Süden betrachtet, mit beispielhafter Temperaturentnahme

Der Fokus dieser Masterarbeit liegt in der Entwicklung eines Temperaturmodells und an der Koppelung dieses Temperaturmodells mit der Abwassermodellierungssoftware „EPA's Storm Water Management Model“ (SWMM) (US EPA, 2014). Durch das Erstellen von Testszenarien sowie anschließender Plausibilitätskontrolle soll generell die erfolgreiche Integration eines Temperaturmodells in SWMM bestätigt werden. Die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse basiert auf logischen Schlussfolgerungen sowie physikalischen Gesetzen.

Im weiteren Projektverlauf werden geeignete Messstrecken ermittelt, sodass zukünftig eine Kalibrierung und Validierung des Temperaturmodells erfolgen kann. Zu den erforderlichen Messdaten zählt die Temperatur des Abwassers, die Lufttemperatur im Kanal sowie die Erdbodentemperatur.

Letztlich soll infolge einer zufälligen Anordnung von Temperaturentnahmestellen, das Risiko und Potential zur thermischen Energienutzung aus dem Abwasser der Stadt Graz abgeschätzt werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden rechtliche Randbedingungen im Zusammenhang mit Abwasser erläutert. Im Anschluss daran folgen technische Grundlagen in Bezug auf physikalische Vorgänge. Dadurch werden der Begriff Wärme und die damit verbundenen Eigenschaften und Prozesse erklärt.

2.1 Rechtliche Grundlagen

Wasser, welches infolge des häuslichen, gewerblichen oder sonstigen Gebrauchs in seiner natürlichen Beschaffenheit verändert wurde, wird als Abwasser bezeichnet. Die Kanalisation ist eine bewilligungspflichtige Anlage zur Sammlung sowie kontrollierten Ableitung von Abwasser, Mischwasser oder Niederschlagswasser. Gemäß der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (AAEV) sind Hausanschlüsse nicht Teil der Kanalisation. Die Abwassertemperatur bei der Einleitung in eine öffentliche Kanalisation ist mit maximal 35 °C begrenzt. (AAEV, 1996)

Gemäß erster Allgemeiner Abwasseremissionsverordnung (1. AEV) für kommunales Abwasser ist im Zuge der Nitrifikation die Bemessungstemperatur von 10 °C bei Anlagen kleiner 5 000 EW_{60} und 8 °C bei Anlagen größer 5 000 EW_{60} zu berücksichtigen. Im Zuge der Denitrifikation beträgt die Bemessungstemperatur 12 °C bei Anlagen größer 5 000 EW_{60} . Maßgebend ist hierbei die Temperatur im Ablauf der biologischen Stufe der ARA. Weiters ist festgelegt, dass der gesamte gebundene Stickstoff des Zuflusses, bei einer Ablauftemperatur größer 12 °C um mindestens 70 % reduziert werden muss. Die maximale Ablaufkonzentration von Ammoniumstickstoff liegt für Anlagen größer 5 000 EW_{60} bei 5 mg/L, unter Berücksichtigung einer Ablauftemperatur größer 8 °C. (1. AEV, 2018)

2.2 Technische Grundlagen

Der physikalische Hintergrund und Begriffsdefinitionen in Verbindung mit dem Thema Wärme sind unerlässlich für das weitere Verständnis und die Nachvollziehbarkeit dieser Arbeit. Des Weiteren wird das Prinzip eines Wärmetauschers erklärt. Abschließend wird auf die Temperatur und die damit verbundenen Prozesse innerhalb der ARA eingegangen.

2.2.1 Begriffsdefinitionen

2.2.1.1 Wärme

Die Wärme Q ist eine Form von Energie, welche im Zuge eines Fließprozesses transportiert wird. Das heißt, Wärme ist eine Prozessgröße, die infolge eines Temperaturunterschiedes von einem Körper auf einen anderen übergeht. Ist der Fließprozess beendet, so findet sich die Wärme in Form der inneren Energie des Körpers wieder. (Stierstadt, 2018)

2.2.1.2 Temperatur

Die Temperatur T ist im Gegensatz zur Wärme eine Zustandsgröße. Bei der Berührung zweier Körper mit unterschiedlichen Temperaturen, fließt Wärme vom wärmeren zum kälteren Körper (Stierstadt, 2018). Ist die Temperatur bei beiden Körpern gleich, so spricht man vom thermodynamischen Gleichgewicht. (Roth & Stahl, 2016)

2.2.1.3 Wärmestrom

Wie in Gleichung 2-1 ersichtlich, beschreibt der Wärmestrom \dot{Q} die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung. Anders ausgedrückt entspricht der Wärmestrom \dot{Q} der übertragenen Wärme pro Zeiteinheit:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

mit:

\dot{Q} ... Wärmestrom (W/s), Q ... Wärme (J), Δt ... Zeiteinheit (s)

Der Wärmestrom wird mit der Einheit Watt dargestellt. (Tipler & Mosca, 2015)

2.2.1.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit k (siehe Gleichung 2-2) ist ein Maß für die transportierte Wärme pro Fläche oder Längeneinheit eines Materials, bei einem Temperaturunterschied von 1 K.

$$\dot{Q} = k * A * \frac{\Delta T}{l} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit:

\dot{Q} ... Wärme (W), k ... Wärmeleitfähigkeit (W/m.K bzw. W/m².K), A ... Querschnittsfläche (m²), ΔT ... Temperaturdifferenz (K), l ... Länge/Dicke (m)

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit der Einheit $\frac{W}{m.K}$ beschrieben und ist eine Materialkonstante. (Tipler & Mosca, 2015)

Aus der Einheit ist erkennbar, dass die Wärmeleitfähigkeit die Energiemenge pro Sekunde und Meter, bei einem Temperaturunterschied von 1 K angibt ($\frac{J}{m.K}$).

2.2.1.5 Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient h (siehe Gleichung 2-3) ist ein Maß für transportierte Wärme pro Fläche und Kelvin Temperaturunterschied an einer Grenzfläche. Als Grenzfläche wird die Fläche zwischen zwei Phasen bezeichnet.

$$\dot{Q} = h * A * \Delta T \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit:

\dot{Q} ... Wärme (W), h ... Wärmeübergangskoeffizient (W/m².K), A ... Querschnittsfläche (m²), ΔT ... Temperaturdifferenz (K)

Der Wärmeübergangskoeffizient wird mit der Einheit $\frac{W}{m^2 K}$ ausgedrückt. Im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit ist der Wärmeübergangskoeffizient keine Materialkonstante, sondern von der Strömungsgeschwindigkeit, der Geometrie und weiteren Parametern abhängig. (Jany & Sapper, 2001)

2.2.1.6 Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit berechnet sich aus der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität (Gleichung 2-4).

$$a = \frac{k}{\rho * c} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit:

a ... Temperaturleitfähigkeit (Wärmediffusivität) (m²/s), k ... Wärmeleitfähigkeit (W/m.K), ρ ... Dichte (kg/m³), c ... spezifische Wärmekapazität (J/kg.K)

Diese Materialeigenschaft, auch bekannt als Wärmediffusivität, zeigt das Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit und der Fähigkeit Wärmeenergie zu speichern. Materialien mit niedriger Temperaturleitfähigkeit reagieren, im Gegensatz zu Materialien mit hoher Temperaturleitfähigkeit, träge auf Temperaturänderungen. (Incropera et al., 2007)

2.2.1.7 Wärmewiderstand

Der Einzelwärmewiderstand R (Gleichung 2-5) ist der Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit k bzw. des Wärmeübergangskoeffizienten h .

$$R = \frac{1}{h} \text{ bzw. } \frac{1}{k} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit:

R ... Wärmewiderstand (m².K/W), k ... Wärmeleitfähigkeit (W/m.K bzw. W/m².K), h ... Wärmeübergangskoeffizient (W/m².K)

Der gesamte Wärmewiderstand R_{ges} entspricht der Summe der Einzelwärmewiderstände und ist in Gleichung 2-6 ersichtlich. (Tipler & Mosca, 2015)

$$\sum R_{ges} = \frac{1}{h_1} + \dots + \frac{1}{h_n} \text{ bzw. } \frac{1}{k_1} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

mit:

R ... Wärmewiderstand (m².K/W), k ... Wärmeleitfähigkeit (W/m.K bzw. W/m².K), h ... Wärmeübergangskoeffizient (W/m².K)

In Abbildung 2-1 ist die Wärmeübertragung in Verbindung mit Konvektion und Wärmeleitung dargestellt. Hierbei sind drei Wärmewiderstände (Wärmeübergang

Fluid 1 – Wand, Wärmeleitung Wand, Wärmeübergang Wand – Fluid 2) vorhanden. Die Begriffe Wärmeleitung und Konvektion werden in Kapitel 2.2.2 erläutert.

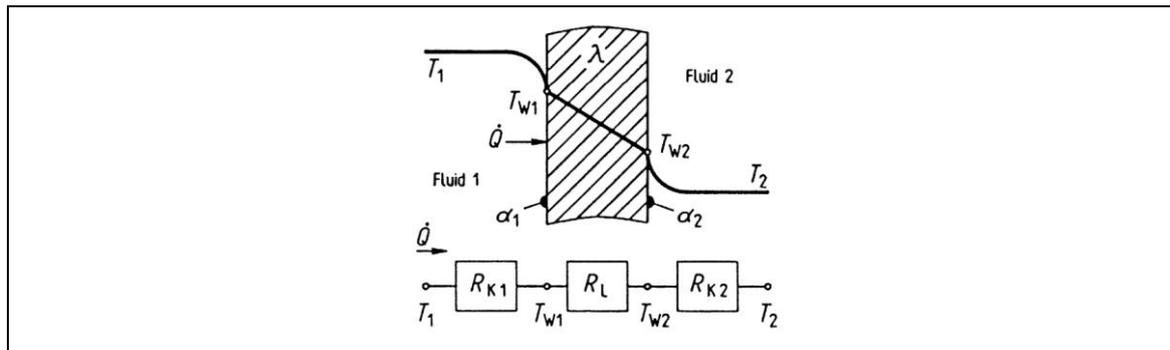


Abbildung 2-1: Darstellung des Gesamtwärmeübergangswiderstandes bei der Wärmeübertragung zwischen zwei voneinander getrennten Fluiden

2.2.2 Wärmeübertragung

Der Begriff Wärmeübertragung beschreibt die Übertragung von Wärme zwischen zwei Körpern. Dieser Prozess umfasst drei Mechanismen (siehe Abbildung 2-2):

- **Wärmeleitung**

Wärmeleitung, auch bekannt als Konduktion, beschreibt den Wärmefluss innerhalb eines Körpers mit ungleichmäßiger Temperaturverteilung, da dieser nach dem Ausgleich von Temperaturunterschieden strebt (Böckh & Wetzels, 2017). Bei der Wärmeübertragung infolge von Wärmeleitung wird die in Gleichung 2-2 erwähnte Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt.

- **Konvektion**

Die Konvektion ist eine Form der Wärmeübertragung, welche in Flüssigkeiten und Gasen stattfindet. Grundsätzlich handelt es sich bei der Konvektion um einen Stofftransport, bei dem thermische Energie mitgeführt und übertragen wird (Roth & Stahl, 2016). Wie in Gleichung 2-3 ersichtlich, wird hierbei der Wärmeübergangskoeffizient verwendet.

- **Wärmestrahlung**

Unter Wärmestrahlung versteht man den Wärmetransport mittels elektromagnetischer Strahlung. Jeder Körper absorbiert und emittiert, in Abhängigkeit dessen Temperatur und der Umgebungstemperatur, elektromagnetische Strahlung. (Roth & Stahl, 2016)

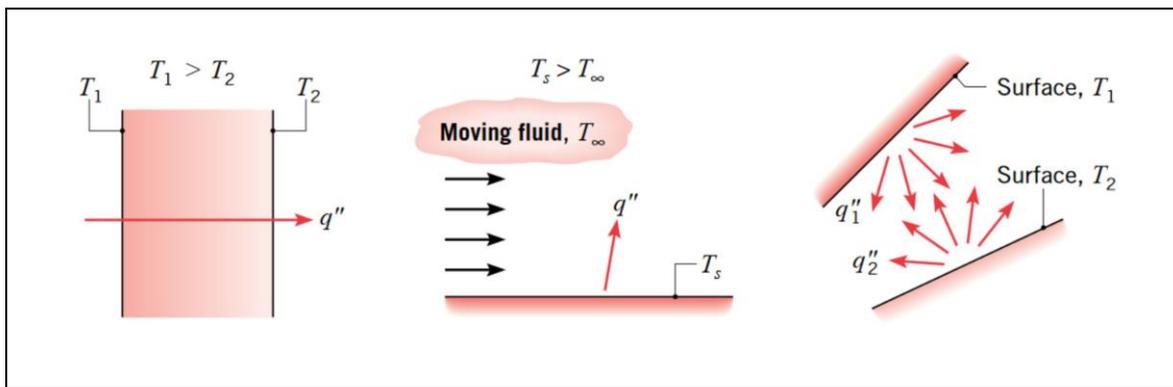


Abbildung 2-2: Veranschaulichung der unterschiedlichen Wärmeaustauschprozesse. Links: Wärmeleitung durch einen Festkörper oder Fluid; Mitte: Konvektion zwischen einer Oberfläche und einem Fluid; Rechts: Wärmestrahlung zweier Oberflächen (Incropera et al., 2007)

Die beiden Mechanismen Wärmeleitung und Konvektion treten oftmals gemeinsam auf. Beispielsweise beim Austausch von Wärme zwischen zwei voneinander abgetrennten Fluiden durch eine Wand (Abbildung 2-3) (Jany & Sapper, 2001).

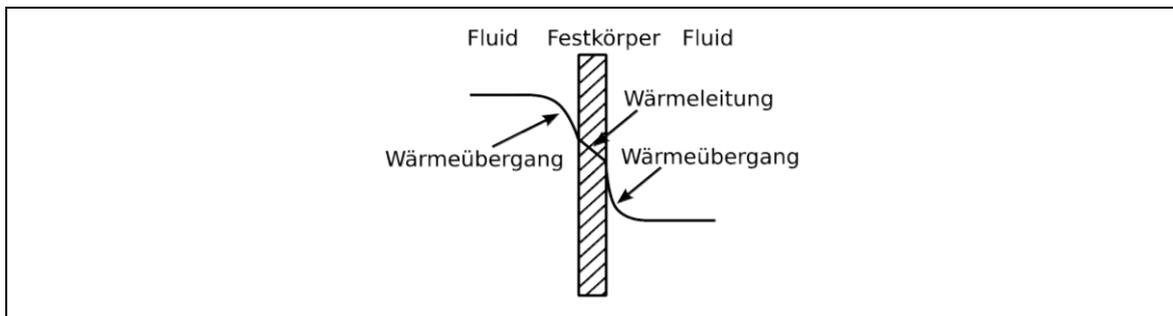


Abbildung 2-3: Kombination der beiden Mechanismen Wärmeleitung und Konvektion am Beispiel zweier voneinander getrennten Fluiden (Jany & Sapper, 2001)

Hierbei wird die Wärmeübertragung zwischen dem Fluid und der Oberfläche der Wand als Wärmeübergang bezeichnet.

Der Wärmeaustausch mit einem thermischen System und die Generierung thermischer Energie innerhalb dieses Systems beruht auf der in Gleichung 2-7 dargestellten Energiebilanz (Incropera et al., 2007).

$$E_{\text{stored}} = E_{\text{in}} - E_{\text{out}} + E_{\text{generated}} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

mit:

E_{stored} ... gespeicherte Energie innerhalb der Systemgrenzen, E_{in} und E_{out} ... thermischer und/oder mechanischer Energietransport, $E_{\text{generated}}$... Generierung von thermischer Energie

2.2.3 Prinzip der Wärmepumpe in Verbindung mit einem Wärmetauscher

Mithilfe einer Wärmepumpe kann thermische Energie aus der Umwelt (z.B. aus Abwasser) entnommen und derart verdichtet und erwärmt werden, dass diese

als nutzbare Wärme zum Heizen zur Verfügung steht. Infolge der geringen Verdampfungstemperatur des Kältemittels, erfolgt eine Verdampfung durch das Zuführen von Wärme aus der Umwelt. Im Kompressor wird der Druck und die Temperatur des nun vorliegenden Gases durch Einbringung von elektrischer Energie erhöht. Die anschließende Kondensation verflüssigt das gasförmige Kältemittel. Die Wärme wird während dieses Prozesses entnommen und steht, wie in Abbildung 2-4 ersichtlich, beispielsweise der Wärmeverteilung innerhalb von Gebäuden zur Verfügung. Im Anschluss beginnt der Prozess erneut. (Herwig, 2014)

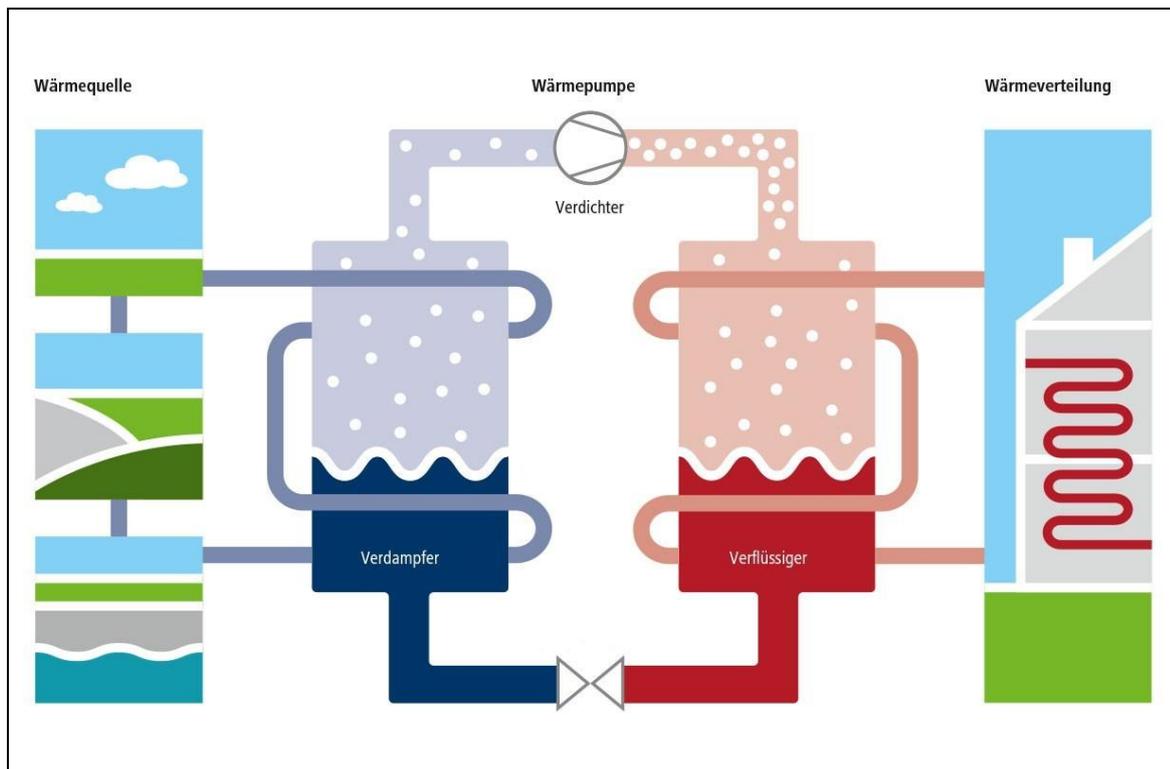


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Wärmepumpenzyklus (kermi.de, 2017)

2.2.4 Möglichkeiten zur thermischen Energienutzung aus Abwasser

Bereits 1984 erkannten Bischofsberger und Seyfried aufgrund der damals steigenden Energiekosten, dass alternative Energiequellen zu finden sind. Das Abwasser galt als solch eine Alternative und war aus wirtschaftlicher Sicht und aufgrund der direkten Anbindung zur/zum VerbraucherIn besonders attraktiv. Abwasser kann als Energiequelle zum Heizen sowie auch zum Kühlen verwendet werden. Aufgrund der besonderen Beschaffenheit von Abwasser sind sowohl konstruktive als auch betriebliche Faktoren bei der Planung und Errichtung eines Wärmepumpenzyklus zu berücksichtigen. Insbesondere muss auf die Reinigungsmöglichkeit des Wärmepumpenzyklus geachtet werden. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

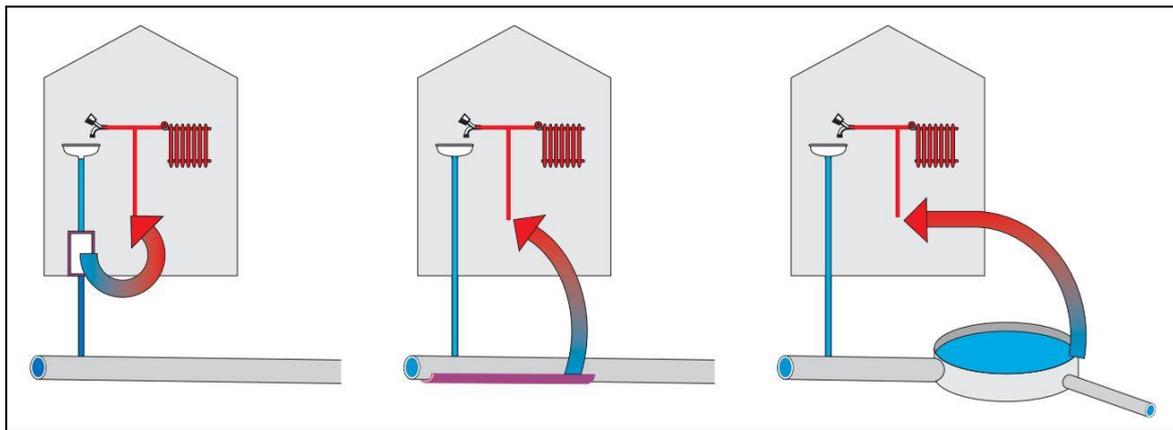


Abbildung 2-5: Arten der thermischen Energienutzung aus Abwasser. Links: Nutzung vor Einbringung in die öffentliche Kanalisation; Mitte: Wärmeentnahme in der Kanalisation; Rechts: Thermische Energienutzung am Ablauf der ARA (Schmid et al., o.J.)

Ein Ziel dieser Forschungsaktivität von Bischofsberger und Seyfried war es, die verfügbare Wärme unter Berücksichtigung eines ungestörten Betriebs der ARA zu ermitteln. Des Weiteren wurden im Allgemeinen die Möglichkeiten der Wärmeentnahme aus Abwasser (Abbildung 2-5) untersucht und deren Vor- und Nachteile (Tabelle 2-1) analysiert.

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Wärmeentnahmestellen (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

Ort der Wärmeentnahme	Vorteile	Nachteile
Grundstücksentwässerung	relativ hohe Abwassertemperaturen, sehr kurzer Wärmetransportweg, Betreiber = Wärmeverbraucher	geringer Abfluß mit tageszeitlich großen Schwankungen, störende Abwasserinhaltsstoffe, dezentrale Anlagen mit hohem Betriebsaufwand, möglicher Einfluß auf Abwasserreinigung
Hauptsammler	Wärmekapazitätsstrom wirtschaftlich interessant, Abwasserinhaltsstoffe teilweise homogenisiert, kurzer Wärmetransportweg, Überwachung und Betriebssicherheit angemessen	Einfluß auf Abwasserreinigung, Wärmeverbraucher und Betreiber nicht identisch, Einbauten bedingen Überwachung
Ablauf Klärwerk	kein Einfluß auf Abwasserreinigung, keine störenden Abwasserinhaltsstoffe, Keine zusätzliche Betriebsstelle	sehr langer Wärmetransportweg, relativ geringe Abwassertemperatur, langsamere Selbstreinigung im Vorfluter

Wie im Folgendem beschrieben, gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten (Abbildung 2-5) thermische Energie aus Abwasser zu nutzen.

2.2.4.1 Energierückgewinnung vor dem Einbringen in die öffentliche Kanalisation

Ein Wärmetauscher nutzt die thermische Energie des Abwassers für Warmwasseraufbereitung innerhalb eines Gebäudes. Dies ist besonders für öffentliche Einrichtungen, Krankenhäuser und Industriebetriebe eine attraktive Methode Energiekosten zu sparen. Auch in Einfamilienhaushalten ist eine thermische Energienutzung des hauseigenen Abwassers möglich, jedoch ist die Sinnhaftigkeit aufgrund der geringen Abwassermenge infrage zu stellen (Schmid et al., o.J.). Es gibt allerdings Systeme, welche beispielsweise nur im Badezimmer genutzt werden. Hierbei wird im Ablauf der Dusche ein Wärmetauscher installiert, wodurch Kaltwasser vorgewärmt werden kann und dadurch weniger Warmwasser aus dem Speicher benötigt wird. (Heinz et al., 2013)

2.2.4.2 Energierückgewinnung in der Kanalisation

Bei der thermischen Energienutzung aus dem Abwasser innerhalb der Kanalisation (Abbildung 2-6) ist besonders darauf zu achten, dass der Betrieb der ARA in keinster Weise beeinträchtigt wird. Weitere Informationen dazu werden in Kapitel 2.2.5 dargelegt. Grundsätzlich gibt es zwei Arten der thermischen Energierückgewinnung in der Kanalisation:

- Wärmetauscher innerhalb der Kanalisation an der Kanalsohle
- Wärmetauscher innerhalb eines Bypasses, welcher die Möglichkeit der Aktivierung (Durchfluss von Abwasser) bzw. Deaktivierung (kein Durchfluss von Abwasser) bietet. Dadurch wird vor allem die Reinigung und Wartung deutlich vereinfacht.

Beide Systeme bieten Vor- und Nachteile und sind je nach betrieblichen und wirtschaftlichen Anforderungen im Detail zu untersuchen. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

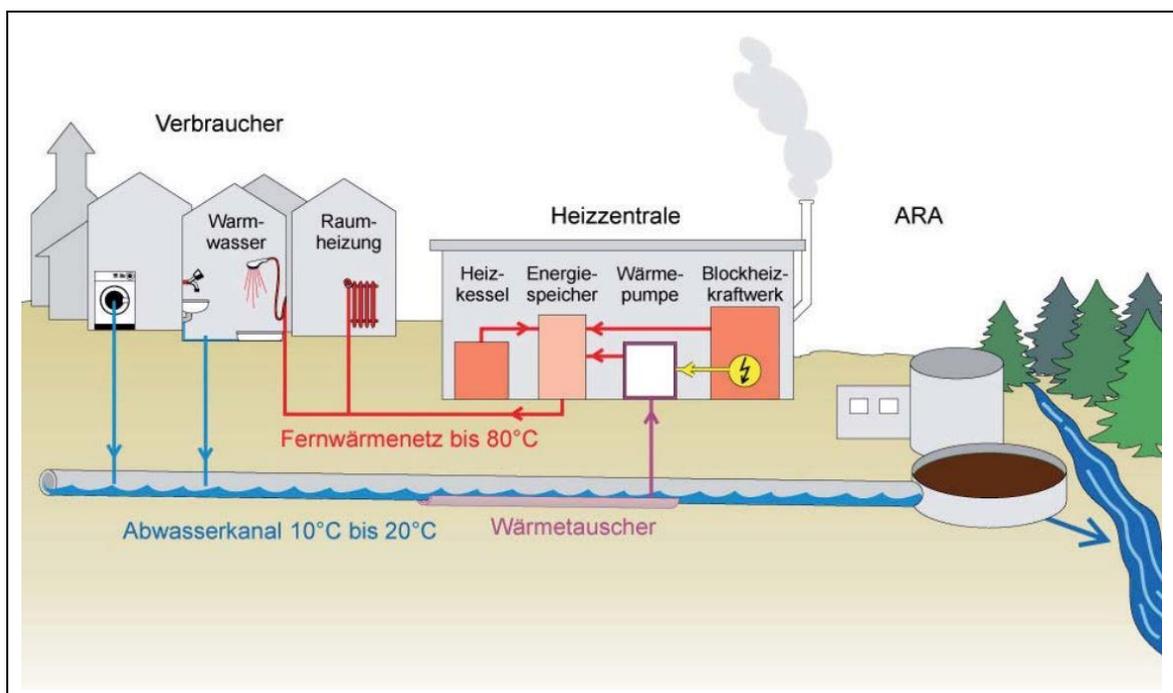


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der thermischen Energienutzung in der Kanalisation (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2010)

2.2.4.3 Energierückgewinnung am Ablauf der ARA

Das größte Potential in Bezug auf die thermische Energienutzung bietet der Ablauf der ARA. Hier kann die Temperatur des Abwassers gegenüber der thermischen Energienutzung in Gebäuden oder der Kanalisation deutlich stärker abgekühlt werden. Jedoch kann dieses Potential oftmals nicht genutzt werden, da Abwasserreinigungsanlagen meist außerhalb von dicht bewohnten Gebieten angesiedelt sind. (Schmid et al., o.J.)

2.2.5 Temperatur am Zufluss der Abwasserreinigungsanlage

Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen (Kapitel 2.1), erhält die Temperatur auch aus technischer Sicht besondere Aufmerksamkeit. Für einen ungestörten Betrieb der ARA ist die Abwassertemperatur im Zulauf der biologischen Abwasserreinigung eine maßgebende Größe und daher ein Hauptkriterium in Bezug auf die thermische Entnahme aus dem Abwasser.

Eine Abwasserreinigungsanlage unterteilt sich grob in die mechanische und biologische Abwasserreinigung sowie in die Schlammbehandlung. Speziell in der biologischen Abwasserreinigung (Belebungsanlage) ist die Temperatur ein entscheidender Einflussfaktor. Die Stickstoffelimination ist ein wesentlicher Bestandteil einer Belebungsanlage und wird von speziellen Mikroorganismen durchgeführt. Diese Mikroorganismen oxidieren den überwiegend als Ammonium (NH_4) vorhanden Stickstoff zuerst zu Nitrit (NO_2) und anschließend zu Nitrat (NO_3). Dieser Prozess wird Nitrifikation genannt. (Kainz et al., 2012)

Die stickstoffoxidierenden Bakterien (Nitrifikanten) führen diesen Prozess durch. Hierbei ist die Anzahl der Bakterien in der Belebungsanlage ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Nitrifikation. Ein Problem stellt die lange Generationszeit ($= \frac{1}{\text{Wachstumsrate}}$) der Nitrifikanten, im speziellen der Nitrosomonas, dar. In Abbildung 2-7 ist erkennbar, dass die Generationszeit der Bakterien sehr stark von der Temperatur abhängt. So bewirkt beispielsweise eine Temperaturabsenkung von 12 °C auf 9 °C, eine um einen Tag verlängerte Generationszeit. (Bever, 2002)

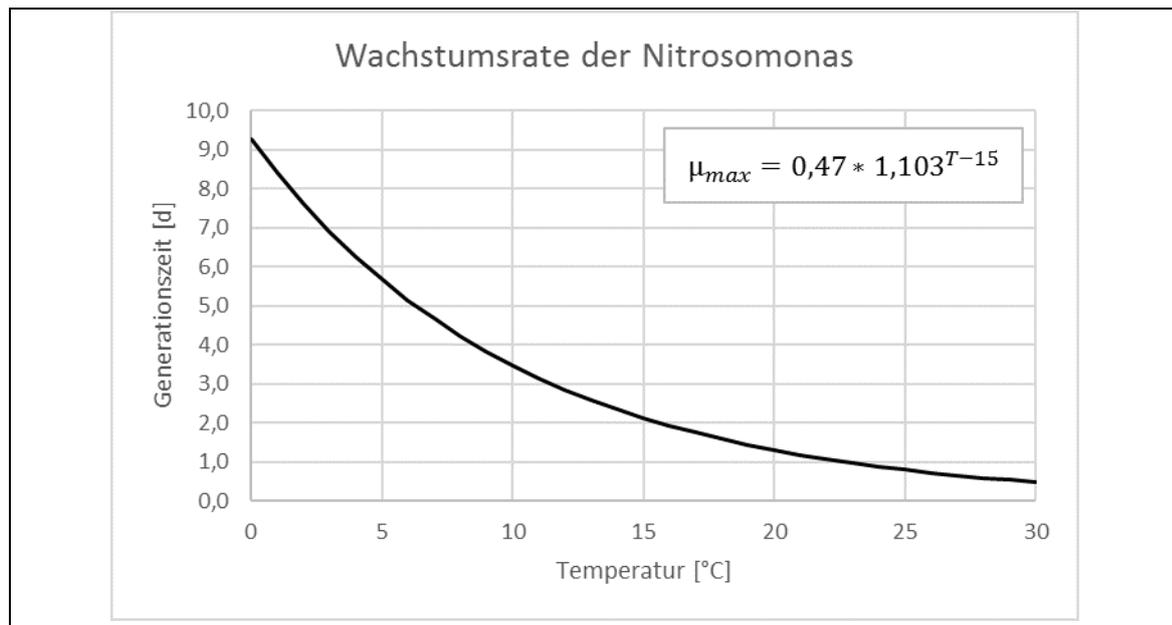


Abbildung 2-7: Wachstumsrate der Nitrosomonas in Abhängigkeit der Temperatur [°C]

2.3 Modellgrundlagen

Im Folgenden wird ein Überblick über drei Temperaturmodelle in Bezug auf Abwasserwärme gegeben. Neben Bischofsberger und Seyfried (1984), werden die Temperaturmodelle von Dürrenmatt und Wanner (2006; 2008; 2013) sowie Abdel-Aal (2015) betrachtet.

Ergänzend wird auf die Arbeit von Simperler (2015) verwiesen, in der eine umfangreiche Literaturrecherche zur thermischen Energiegewinnung aus Abwasser durchgeführt wurde. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird auf die Implementierung eines Temperaturmodells in SWMM eingegangen. Aus diesem Grund wird auf eine tiefere Literaturrecherche verzichtet.

2.3.1 Temperaturmodell von Bischofsberger & Seyfried (1984)

Bischofsberger und Seyfried erkannten, dass ein Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Umgebung erfolgt und entwickelten ein mathematisches Modell um diesen Prozess zu beschreiben. Anhand dessen stellten sie fest, dass sich Abwasser in Einleitungsstellen und Haltungen mit kleinen Durchmessern besonders schnell abkühlt. Im Gegensatz dazu, ist eine Temperaturänderung bei Haltungen

mit einem Abfluss größer 100 L/s praktisch kaum noch vorhanden. Generell ist eine Wärmeentnahme aus dem Abwasser bei Abflüssen kleiner 10 L/s nicht empfehlenswert. Mithilfe einer Messkampagne und dem mathematischen Modell, wurde die Möglichkeit einer Abwasserwärmerückgewinnung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht geprüft. (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

Im entwickelten mathematischen Modell werden die Wärmeaustauschprozesse zwischen Abwasser und Erdreich, Abwasser und Kanalluft sowie Verdunstung des Abwassers berücksichtigt. Es wurden weitere Einflüsse wie die Erwärmung aufgrund von Reibung sowie die Wärmelängsleitung im Abwasser betrachtet, jedoch erwiesen sich diese als vernachlässigbar.

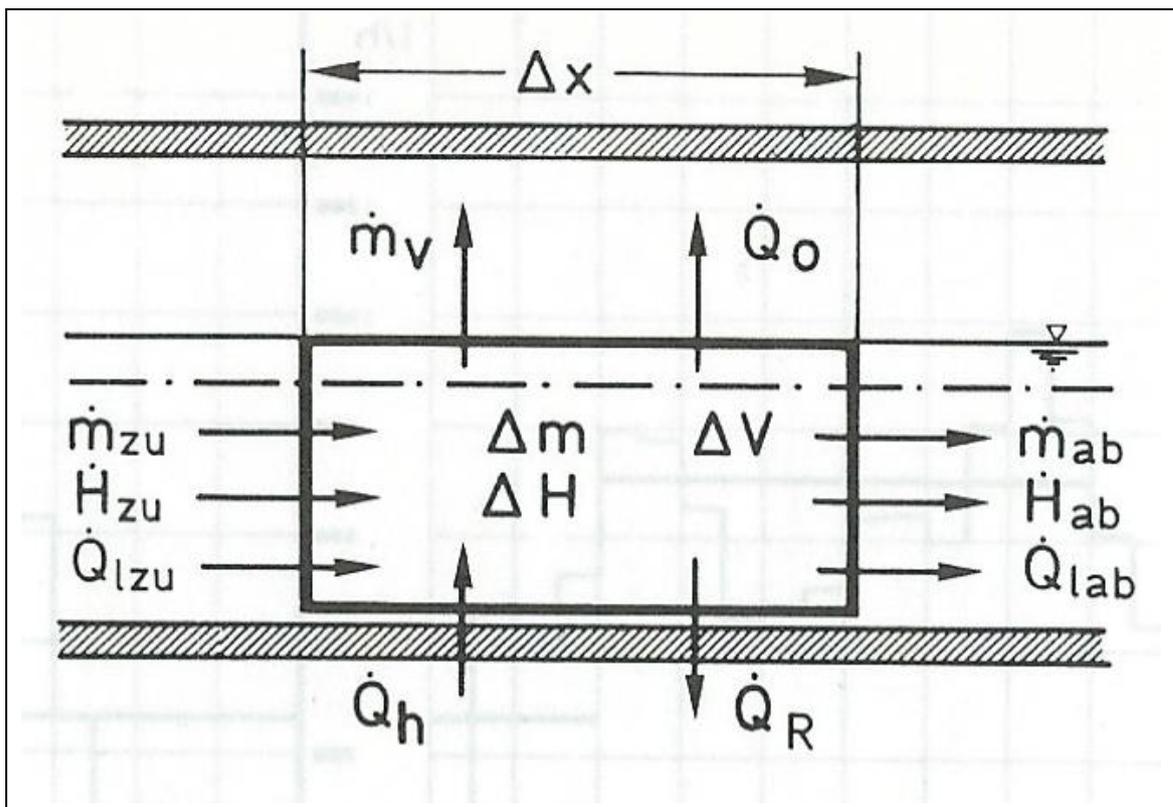


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Energie- und Massenströme (Bischofsberger & Seyfried, 1984)

2.3.2 Temperaturmodell von Dürrenmatt & Wanner (2006)

Im Jahr 2006 entwickelte Dürrenmatt ein mathematisches Modell, welches die Veränderung der Temperatur im Längsverlauf der Kanalisation beschreibt. Es werden die Bilanzgleichungen für Masse, Wärme und Impuls berücksichtigt. Das Tool mit dem Namen TEMPEST wurde zu Beginn mit VBA (Visual Basic for Applications) entwickelt (Dürrenmatt, 2006), bevor eine Adaption auf C++ erfolgte (Dürrenmatt & Wanner, 2008).

Das Modell benötigt für die Modellierung der Temperatur in der Kanalisation die Abflüsse mit den dazugehörigen Temperaturen, den Luftstrom im Kanal, die Luft-

Grundlagen

feuchtigkeit sowie die Lufttemperatur im Kanal und die Temperatur des umliegenden Erdreichs. Des Weiteren werden geometrische, hydraulische Variablen und materialspezifische Parameter der Kanalisation benötigt. (Dürrenmatt & Wanner, 2008)

In Tabelle 2-2 sowie Abbildung 2-9 sind die berücksichtigten Wärme- und Stofftransportprozesse ersichtlich.

Tabelle 2-2: Auflistung und Beschreibung der Erhaltungsgleichungen für die berücksichtigten Wärme- und Stofftransportprozesse (Dürrenmatt, 2006)

Prozess ^a	Beschreibung	Ann. ^b / Gl. ^c
$\dot{q}_{WL} = \alpha_{WL} (T_W - T_L)$	Konvektiver Wärmeübergang vom Kompartiment «Abwasser» an das Kompartiment «Kanalluft».	1 / 3.5 [⊖] , 3.7 [⊕]
$\dot{q}_{RW} = k_{RW} (T_{B,inf} - T_W)$	Wärmefluss aus dem Erdreich mit Temperatur $T_{B,inf}$ über die Rohrwand ins Abwasser. ^d	1, 2, 8-11, 18 / 3.5 [⊕]
$\dot{q}_{\delta L} = \alpha_{\delta L} (T_{\delta} - T_L)$	Konvektiver Wärmeübergang von der Kondensationsschicht an die Kanalluft.	1 / 3.7 [⊕] , 3.6 [⊖]
$\dot{q}_{R\delta} = k_{R\delta} (T_{B,inf} - T_{\delta})$	Konduktiver Wärmefluss aus dem Erdreich in die Kondensationsschicht. ^d	1 / 3.6 [⊕]
$\dot{q}_{\omega}' = e_{CSB} r_{CSB}$	Aus biochemischen Aktivitäten produzierte Wärme im Kompartiment «Abwasser». ^e	- / 3.5 [⊕]
$\dot{q}_{vP} = \alpha_{vP} (p_{sat}(T_W) - p_L)$	Wärmetransport infolge Verdunstung bzw. Kondensation am Wasserspiegel.	- / 3.5 [⊖] , 3.8 [⊕]
$j_{vP} = h_{fg}^{-1} \dot{q}_{vP}$	Stofftransport der Verdunstung / Kondensation zwischen den Kompartimenten «Abwasser» und «Kanalluft».	1, 4, 21 / 3.1 [⊖] , 3.3 [⊕]
$\dot{q}_{k\delta} = \alpha_{k\delta} (p_L - p_{sat}(T_{\delta}))$	Wärmetransport infolge Kondensation an der Kondensationsschicht.	- / 3.8 [⊖] , 3.6 [⊕]
$j_{k\delta} = h_{fg}^{-1} \dot{q}_{k\delta}$	Wasserdampfverlust infolge Kondensation an der Kondensationsschicht.	1, 4, 21 / 3.3 [⊖]
$\dot{q}_{kL}' = h_{fg} \rho_L (X - X_{sat})$	Kondensation infolge Wasserdampfübersättigung im Kompartiment «Kanalluft» (Minderung der latenten Wärme).	1, 4, 21 / 3.7 [⊕] , 3.8 [⊖]
$j_{kL}' = \rho_L (X - X_{sat})$	Kondensation infolge Wasserdampfübersättigung im Kompartiment «Kanalluft» (Minderung des Wasserdampfgehaltes).	1 / 3.3 [⊖]

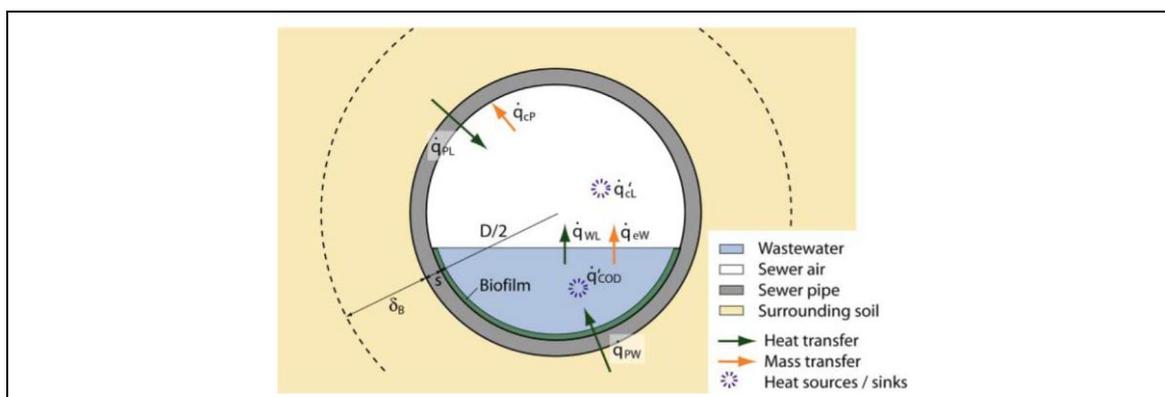


Abbildung 2-9: Darstellung der berücksichtigten Wärme- und Stofftransportprozesse innerhalb eines Rohrquerschnitts (Dürrenmatt & Wanner, 2008)

Weiters wurden die Auswirkungen einer thermischen Energiegewinnung aus Abwasser von Dürrenmatt und Wanner (2013) untersucht. Dabei wurden Daten aus Rümlang (Schweiz) zur Kalibrierung und Validierung des Modells herangezogen. Dadurch war es möglich, eine entsprechende Abschätzung der Temperaturentwicklung innerhalb der Kanalisation infolge einer Wärmeentnahme vorzunehmen. Die Feststellung, dass thermische Energiegewinnung aus Abwasser, speziell bei hohen Durchflussraten sowie bei kurzen Transportwegen, zur erneuten Nutzung der gewonnenen Energie enormes Potential hat, war eine weitere Erkenntnis dieser Untersuchung.

2.3.3 Temperaturmodell von Abdel-Aal (2014)

Mit dem Ziel ein einfaches und praktikables Modell zu erstellen, welches durch eine geringe Anzahl an Eingangsparametern und moderate Rechenzeiten gekennzeichnet ist, entwickelte Abdel-Aal (Abdel-Aal et al., 2014; Abdel-Aal, 2015) ein mathematisches Modell zur Ermittlung der Temperaturentwicklung in der Kanalisation. Dabei wurden wie in Abbildung 2-10 ersichtlich, lediglich zwei Wärmeaustauschprozesse berücksichtigt. Der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Kanalluft und der Wärmeaustauschprozess zwischen Abwasser und Erdreich.

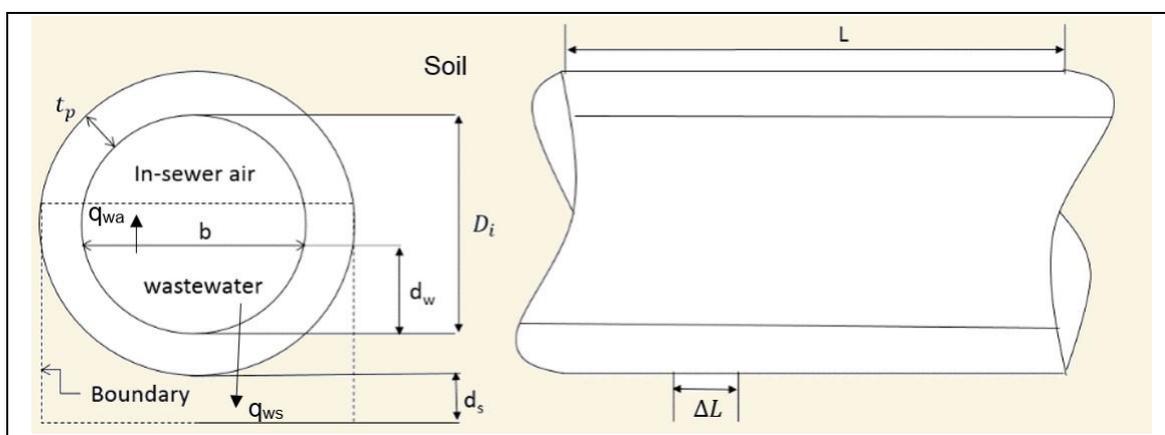


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Wärmeaustauschprozesse Abwasser – Kanalluft (q_{wa}) sowie Abwasser – Erdreich (q_{ws}) (Abdel-Aal, 2015)

Neben den hydraulischen Daten sind die wichtigsten Eingangsparameter die Temperatur des Abwassers, die Temperatur des umliegenden Erdreichs und die Lufttemperatur im Kanal. Als Entwicklungsumgebung nutzt Abdel-Aal Matlab, wobei vor der Anwendung des Temperaturmodells die hydraulischen Berechnungen mithilfe von InfoWorks CS erfolgen. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurden Messdaten aus Antwerpen (Belgien) verwendet. Das Modell wurde abschließend am 3048 Haltungen umfassenden Abwassernetz von Antwerpen angewendet, wobei unterschiedliche Szenarien in Bezug auf die Menge der Wärmeentnahme berücksichtigt wurden.

Abbildung 2-12 zeigt ein Ablaufdiagramm des Temperaturmodells von Abdel-Aal in Verbindung mit einem Abwassernetz in Antwerpen. Zu Beginn werden die bereits berechnete Hydraulik sowie Daten, welche die Haltungen und deren Umgebung charakterisieren, in das Modell geladen. Anschließend erfolgt eine Sortierung der Haltungen beginnend mit den äußeren Strängen des Abwassernetzes (Abbildung 2-11). Diese Haltungen werden Haltungen erster Generation genannt. Nach diesem Prinzip wird eine Liste aller Haltungen des Netzwerks von außen nach innen aufgebaut.

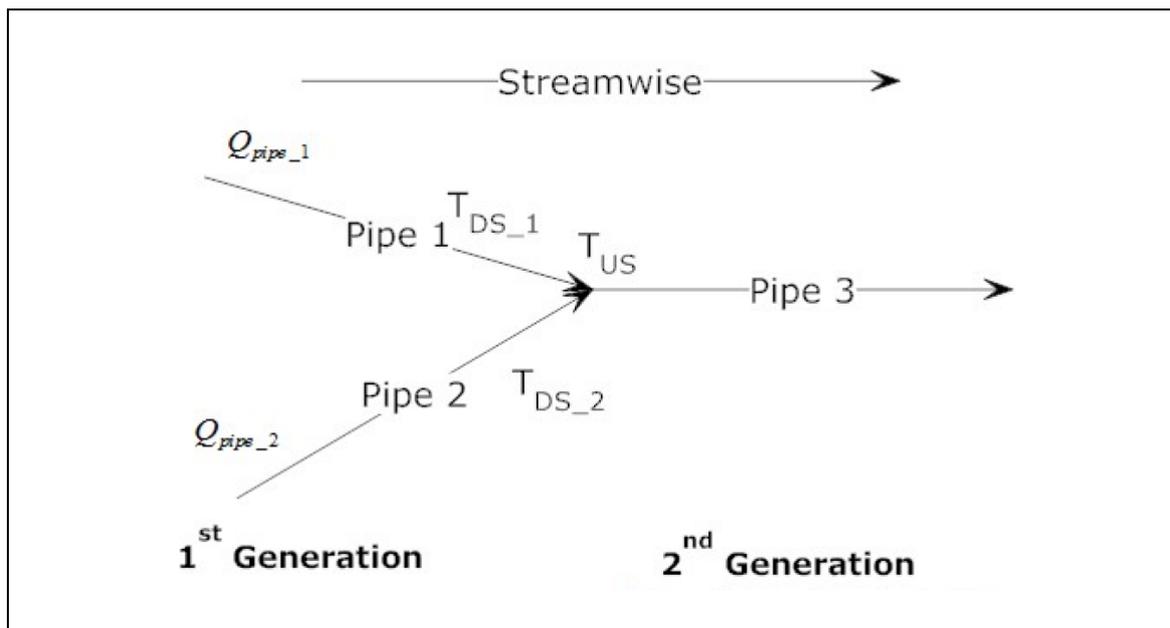


Abbildung 2-11: Berechnungsreihenfolge der Haltungen (Abdel-Aal, 2015)

Nach anschließender Filterung der Daten werden in Abhängigkeit der Durchflussrate die Parameter für den Wärmeübergangskoeffizienten h_{wa} , die Luftgeschwindigkeit u_a , die Eindringtiefe d_s und die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs k_s festgelegt. Geometrische Daten wie der benetzte Umfang und die Wasserspiegelbreite werden für die weitere Berechnung der Wärmewiderstände benötigt. Diese werden letztlich benötigt, um die Temperatur des Abwassers entlang einer Hal tung zu berechnen.

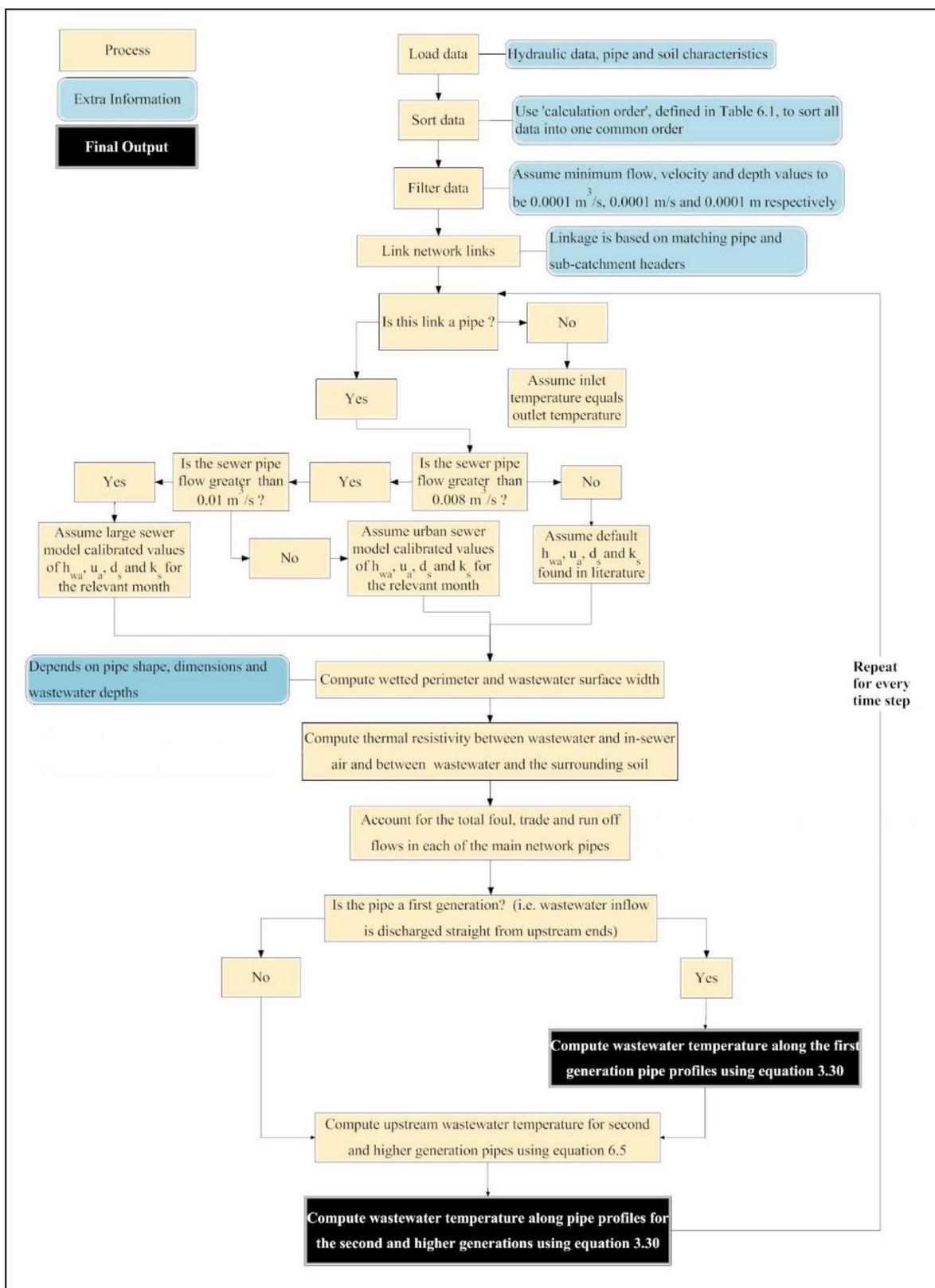


Abbildung 2-12: Ablaufdiagramm des Temperaturmodells von Abdel-Aal in Verbindung mit einem Abwassernetz bestehend aus 3048 Haltungen (Abdel-Aal, 2015)

3 Methodik

In diesem Kapitel wird zu Beginn ein Überblick über die Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Arbeit gegeben.

Wie in Abbildung 3-1 ersichtlich, wird auf Basis der Grundlagenanalyse (Kapitel 2.3) mit der Formulierung eines zeitdiskreten Temperaturmodells begonnen. Dabei wird versucht, die Anzahl der Eingangsparameter und die daraus resultierende Rechenzeit möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund werden analog zu Abdel-Aal lediglich die beiden Wärmeaustauschprozesse zwischen Abwasser und Kanalluft sowie Abwasser und Erdreich berücksichtigt.

Im Anschluss daran werden Testszenarien erstellt, welche der Plausibilitätskontrolle dienen. Damit sollen unter verschiedenen Bedingungen, erwartete Temperaturveränderungen bestätigt werden.

Abschließend erfolgt die Implementierung (siehe Anhang) des Temperaturmodells in SWMM. Dabei wird vor allem darauf geachtet, dass die Integration mit möglichst geringen Adaptionen des Codes ermöglicht wird.

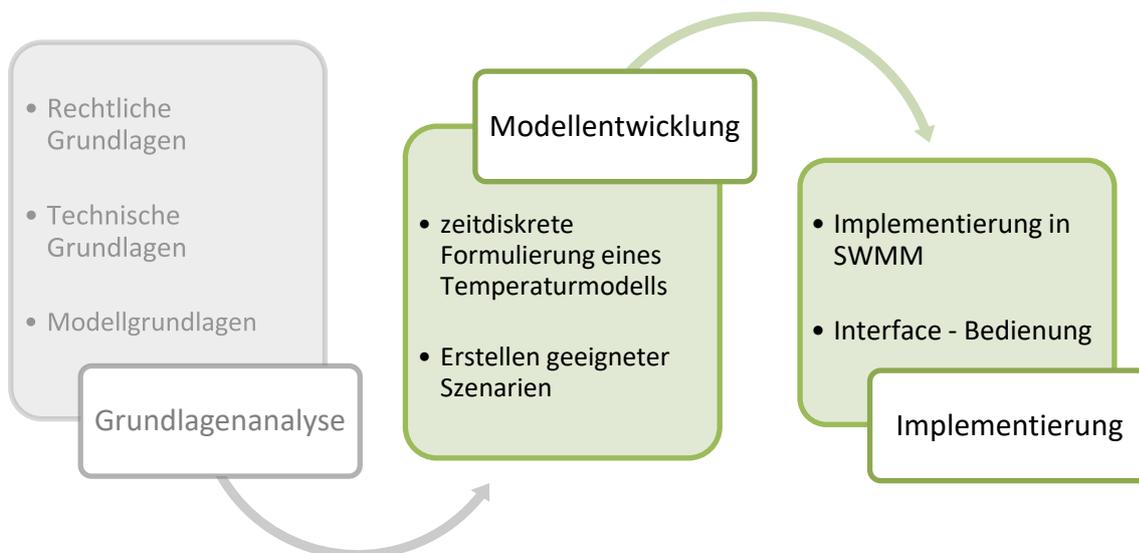


Abbildung 3-1: Darstellung des Ablaufs, beginnend mit Grundlagenanalyse, anschließender Modellentwicklung sowie abschließender Implementierung des entwickelten Temperaturmodells in SWMM

3.1 Modellentwicklung

In diesem Kapitel werden die beiden beteiligten Objekte, Knoten (Schacht) und Haltungen, betrachtet. Ein Knoten ist ein Objekt, welches zur Berücksichtigung von seitlichen Zuflüssen sowie direkten Einleitungen verwendet wird. Eine Haltung verbindet zwei Knoten über eine Distanz.

In einem Knoten ist die Mischung aller Zuflüsse zu berechnen (Kapitel 3.1.1). Innerhalb der Haltungen wird der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Kanalluft sowie Abwasser und Erdreich berücksichtigt (Kapitel 3.1.2).

3.1.1 Mischungsrechnung am Knoten

Beim Aufeinandertreffen mehrerer Haltungen an einem Knoten (siehe Abbildung 3-2), vermischen sich die darin enthaltenen Abwässer. Dazu wird eine einfache Mischungsrechnung, wie in Gleichung 3-1 ersichtlich, herangezogen.

$$T^* = \frac{T_1 * Q_1 + T_2 * Q_2 + \dots + T_n * Q_n}{\sum Q_n} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

T^* ... Temperatur nach Mischung ($^{\circ}\text{C}$), T_n ... Temperatur von Strang n ($^{\circ}\text{C}$), Q_n ... Durchflussrate von Strang n (m^3/s)

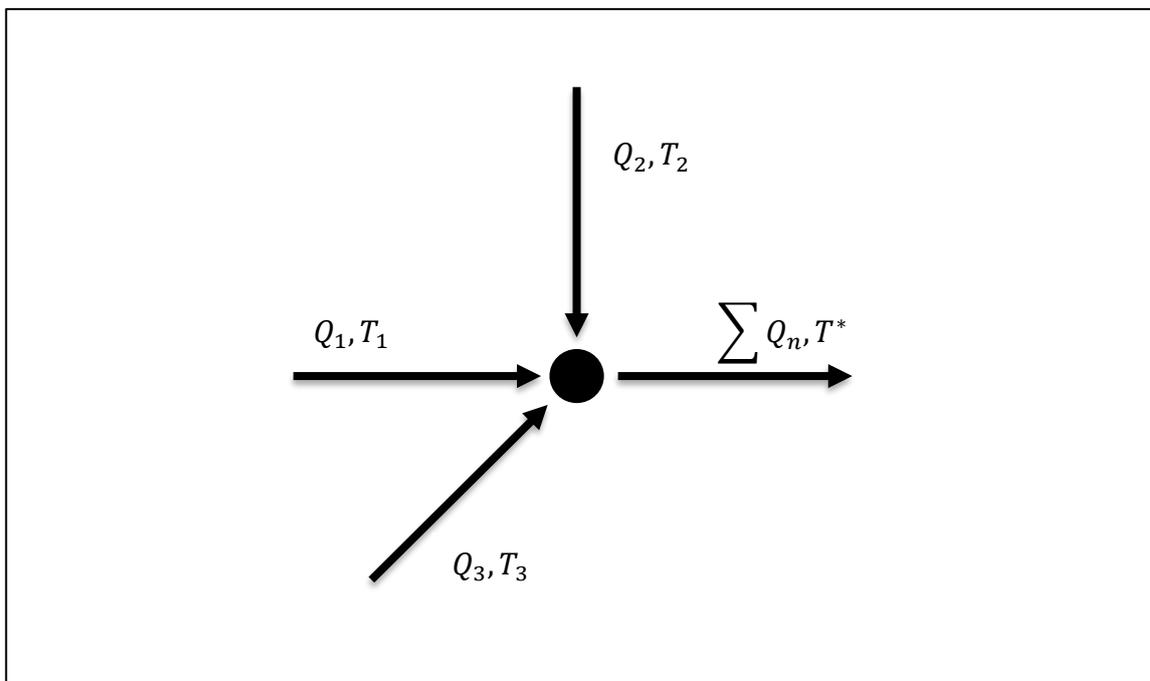


Abbildung 3-2: Zufluss mehrerer Haltungen an einem Knoten, nach Mischung der Zuflüsse fließt der resultierende Abfluss mit der aus der Mischungsrechnung ermittelten Temperatur in die stromabwärtsliegende Haltung

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die spezifische Wärmekapazität c je Zufluss zu definieren. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Beschaffenheit der einzelnen Zuflüsse ähnlich ist, sodass Abweichungen bezüglich der spezifischen Wärmekapazität vernachlässigt werden können. Infolgedessen wird wie in Gleichung 3-1 erkennbar, nur die Temperatur und die Durchflussrate berücksichtigt.

3.1.2 Wärmeaustausch innerhalb einer Haltung

Im Abwasser befindet sich Energie in Form von Wärme. Innerhalb einer Haltung kann über Austauschprozesse mit der Kanalluft und mit dem umliegenden Erdreich Wärme, sprich Energie, dem System zu- und/oder abgeführt werden.

Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme gilt:

$$\frac{dE_{st}}{dt} = E_{zu} - E_{ab} + E_g \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

E_{st} ... zeitliche Änderung der inneren Energie (J), E_{zu} ... zugeführte thermische und mechanische Energie (J), E_{ab} ... abgeführte thermische und mechanische Energie (J), E_g ... innerhalb der Systemgrenze generierte Energie (J)

Durch Berücksichtigung eines stationären Prozesses, d.h. die Zustandsgrößen wie beispielsweise die Änderung der Inneren Energie des Mediums ist zeitunabhängig ($\frac{dE_{st}}{dt} = 0$), und infolge der Vernachlässigung der generierten Energie ($E_g = 0$), vereinfacht sich Gleichung 3-2 zu (Incropera et al., 2007):

$$E_{zu} - E_{ab} = 0 \quad \text{Gleichung 3-3}$$

Neben der zu- und abgeführten Energie infolge von Wärmeaustauschprozessen, kann in einem offenen System Energie durch Massenaustausch zu- und abfließen (Abbildung 3-3).

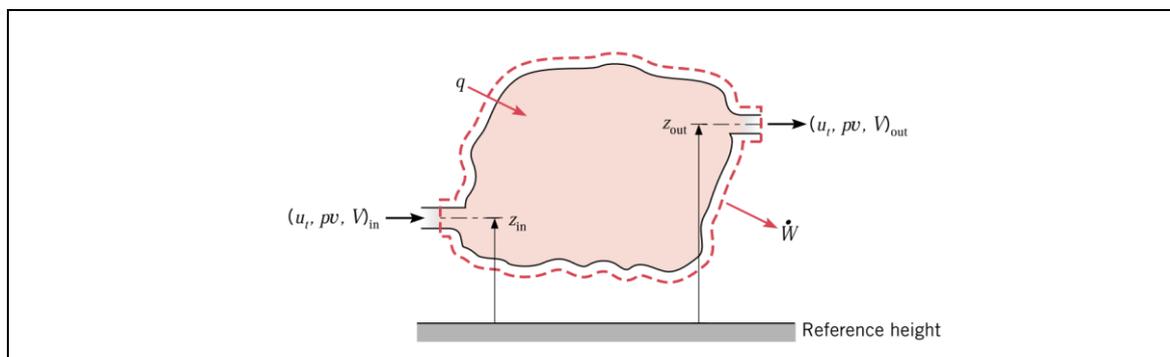


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines stationären, offenen Systems mit Energieaustausch in Form von Wärme, Arbeit sowie Masse (Incropera et al., 2007)

Hierbei wird angenommen, dass die Zuflussrate ident der Abflussrate ist, sprich stationäre Bedingungen ($m = m_1 = m_2$) vorliegen, sodass keine Volumenänderung innerhalb der betrachteten Systemgrenze erfolgt. Unter Vernachlässigung der am System geleisteten mechanischen Arbeit (kinetische und potentielle Energie), lautet die Energiebilanz für das offene durchströmte System wie folgt:

$$Q = m * c_p * T_1 - m * c_p * T_2 \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

Q ... Wärme, die dem System zu- bzw. abgeführt wird (J), m ... Masse, die dem System zu bzw. abgeführt wird (kg), c_p ... spezifische Wärmekapazität des Mediums (J/kg.K), $T_{1,2}$... Temperatur, die dem System zu- bzw. abgeführt wird (K)

Werden nun die einzelnen Terme als Raten dargestellt, so ergibt sich aus Gleichung 3-4:

$$q = \dot{m} * c_p * (T_1 - T_2) \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

q ... Wärmestrom, der dem System zu- bzw. abgeführt wird (J/s), \dot{m} ... Massenstrom, der dem System zu bzw. abgeführt wird (kg/s), c_p ... spezifische Wärmekapazität des Mediums (J/kg.K), $T_{1,2}$... Temperatur, die dem System zu- bzw. abgeführt wird (K)

Beim Wärmeaustausch innerhalb einer Haltung werden Prozesse der Wärmeleitung und Konvektion berücksichtigt. Aufgrund der Annahme eines voll durchmischten Reaktors (Kapitel 3.1.2), erfolgt der Wärmeaustausch über die gesamte Länge L der Haltung. Auf Basis einer Einheitenanalyse kann festgestellt werden, dass die beiden Wärmewiderstände zeitabhängig sind. Sowohl in der Wärmeleitfähigkeit als auch im Wärmeübergangskoeffizienten ist die Einheit der Leistung (Watt, sprich Joule pro Sekunde) enthalten. Da die hydraulischen Variablen in SWMM, wie beispielsweise der Wasserstand oder die Abflussrate innerhalb einer Haltung, unter Berücksichtigung des Zeitschritts berechnet werden, fließt dieser mittels der geometrischen Parameter sowie der Abflussrate in das Temperaturmodell ein.

Die zu- und abgeführte Energie der Wärmeaustauschprozesse unterteilen sich in einen konduktiven und konvektiven Anteil.

Der Anteil der konduktiven Wärmeübertragung ist in Gleichung 3-6 dargestellt. Für die Berechnung der übertragenen Wärme ist hierbei die materialabhängige Wärmeleitfähigkeit ein wichtiger Faktor.

$$q_{\text{konduktiv}} = k * A * \frac{\Delta T}{l} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit:

$q_{\text{konduktiv}}$... konduktiver Energieanteil (J/s), k ... Wärmeleitfähigkeit (W/m.K), A ... Querschnittsfläche (m^2), ΔT ... Temperaturdifferenz Medium – Umwelt (K oder °C), l ... Länge/Dicke (m)

Der konvektive Anteil der Wärmeübertragung wird durch Gleichung 3-7 ausgedrückt. Da hierbei ein Stofftransport betrachtet wird, wird im Gegensatz zur Wärmeleitung der Wärmeübergangskoeffizient herangezogen.

$$q_{konvektiv} = h * A * \Delta T \quad \text{Gleichung 3-7}$$

mit:

$q_{konvektiv}$... konvektiver Energieanteil (J/s), h ... Wärmeübergangskoeffizient ($W/m^2.K$), A ... Querschnittsfläche (m^2), ΔT ... Temperaturdifferenz (K)

Letztlich ist das Aufsummieren der einzelnen Wärmeaustauschraten erforderlich, um den gesamten Wärmestrom der dem System zu- bzw. abgeführten Energie zu erhalten.

$$\sum q_{konduktiv} + \sum q_{konvektiv} = \dot{m} * c_p * (T_1 - T_2) \quad \text{Gleichung 3-8}$$

mit:

q ... Wärmestrom, der dem System zu- bzw. abgeführt wird (J/s), \dot{m} ... Massenstrom, der dem System zu bzw. abgeführt wird (kg/s), c_p ... spezifische Wärmekapazität des Mediums (J/kg.K), $T_{1,2}$... Temperatur, die dem System zu- bzw. abgeführt wird (K)

3.1.2.1 Wärmeaustausch Abwasser – Kanalluft

Beim Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Kanalluft wird lediglich ein konvektiver Prozess berücksichtigt.

Der Wärmewiderstand zwischen Abwasser und Kanalluft ist wie in Gleichung 3-9 ersichtlich vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, der Wasserspiegelbreite und der Haltungslänge abhängig.

$$R_{wa} = \frac{1}{h_{wa} * b * L} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

mit:

R_{wa} ... Wärmewiderstand zwischen Abwasser – Kanalluft ($m.K/W$), h_{wa} ... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abwasser und Kanalluft ($W/m^2.K$), b ... Wasserspiegelbreite (m), L ... Länge der Haltung (m)

Die Wasserspiegelbreite b ist abhängig von der Durchflussrate Q sowie dem Rohrquerschnitt.

Der Wärmeübergangskoeffizient h_{wa} wird, wie in Gleichung 3-10 dargestellt, nach Flinspach (1973) berechnet.

$$h_{wa} = 0,5 * \sqrt{v} \quad \text{Gleichung 3-10}$$

mit:

h_{wa} ... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abwasser und Kanalluft ($cal/cm^2.h.K$), $0,5$... Wert nach Flinspach (1973), v ... Luftgeschwindigkeit

Anstelle der Luftgeschwindigkeit wird, wie in Gleichung 3-11 ersichtlich, die Relativgeschwindigkeit zwischen Abwasser und der darüber befindlichen Luft eingesetzt (Bischofsberger & Seyfried, 1984). Eine Umrechnung von Kalorien pro Quadratzentimeter und Stunde auf Watt pro Quadratmeter ist überdies zu berücksichtigen.

$$h_{wa} = 5,85 * \sqrt{|u_w - u_a|} \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit:

h_{wa} ... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Abwasser und Kanalluft ($W/m^2.K$),

5,85 ... Wert nach Flinspach (1973) – Umrechnung von $0,5 \frac{cal*s^2}{cm^2*h*K*m^2}$ auf

$5,85 \frac{W*s^2}{m^2*K*m^2}$, u_w ... Fließgeschwindigkeit des Abwassers, u_a ... Luftgeschwindigkeit im Kanal

Damit ist die Berechnung des Wärmewiderstandes zwischen Abwasser und Kanalluft abgeschlossen.

3.1.2.2 Wärmeaustausch Abwasser – Erdreich

Der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Erdreich ist durch konduktive und konvektive Prozesse charakterisiert. Der Wärmewiderstand zwischen Abwasser und Erdreich ist von Wärmeübergangsparametern zwischen Abwasser und Rohrwand sowie den Wärmeleitfähigkeiten abhängig. Der gesamte Wärmewiderstand ergibt sich aus der Summe der jeweiligen Einzelwiderstände.

$$R_{ws} = \left(\frac{1}{h_{wp}} + \frac{t_p}{k_p} + \frac{d_s}{k_s} \right) * \frac{1}{L * wet_p} \quad \text{Gleichung 3-12}$$

mit:

R_{ws} ... Wärmewiderstand zwischen Abwasser – Erdreich ($m.K/W$), h_{wp} ... Wärmeübergangskoeffizient ($W/m^2.K$), t_p ... Wandstärke der Haltung (m), d_s ... Eindringtiefe (m), k_p ... Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand ($W/m.K$), k_s ... Wärmeleitfähigkeit des Erdreich ($W/m.K$), wet_p ... benetzter Umfang (m), L ... Länge der Haltung (m)

Es wird davon ausgegangen, dass die Haftbedingung (no-slip condition) gültig ist, wodurch der konvektive Wärmeübergang zwischen Abwasser und Kanalrohr unberücksichtigt bleibt. Der erste Term in Gleichung 3-12 kann somit vernachlässigt werden. Der zweite Term entspricht dem Wärmewiderstand der Rohrwand und der dritte Term entspricht dem Wärmewiderstand innerhalb des Erdreichs.

Der Faktor t_p stellt die Dicke der Rohrwand, wet_p den benetzten Umfang, in Abhängigkeit des Durchflusses sowie der Rohrgeometrie und der Haltungslänge dar. Die beiden Wärmeleitfähigkeiten k_p sowie k_s sind material- als auch bodenabhängig und sind Tabellenwerken zu entnehmen.

Die Eindringtiefe d_s entspricht dem durch den Wärmeaustauschprozess beeinflussten Bereich im Erdreich, ausgehend vom Kanalrohr. Eine Abschätzung der Eindringtiefe d_s kann nach Krarti und Kreider (1996) aus der Temperaturleitfähigkeit a und der Winkelgeschwindigkeit ω (Gleichung 3-13) erfolgen.

$$d_s = \sqrt{\frac{a}{\omega}} \quad \text{Gleichung 3-13}$$

mit:

d_s ... Eindringtiefe (m), a ... Temperaturleitfähigkeit (Wärmediffusivität) (m^2/s), ω ... Winkelgeschwindigkeit mit $\frac{2\pi}{\text{Tag}} = 7,27220 * 10^{-5} \frac{rad}{s}$

Für gängige Böden kann nach Krarti und Kreider eine Eindringtiefe von 0,10 m verwendet werden, sofern die Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs nicht genauer bekannt ist.

Die Temperaturleitfähigkeit berechnet sich aus der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität des Bodens (Gleichung 3-14). Die benötigten Parameter sind Tabellenwerken zu entnehmen, sofern keine bodenkundlichen Untersuchungen zur Bestimmung der Parameter erfolgen.

$$a = \frac{k_s}{\rho * c_s} \quad \text{Gleichung 3-14}$$

mit:

a ... Temperaturleitfähigkeit (Wärmediffusivität) (m^2/s), k_s ... Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ($W/m.K$), ρ ... Dichte des Erdreichs (kg/m^3), c_s ... spezifische Wärmekapazität des Erdreichs ($J/kg.K$)

Schließlich reduziert sich der gesamte Wärmewiderstand zwischen Abwasser und Erdreich wie in Gleichung 3-15 ersichtlich.

$$R_{ws} = \left(\frac{t_p}{k_p} + \frac{d_s}{k_s} \right) * \frac{1}{wet.p * L} \quad \text{Gleichung 3-15}$$

Abbildung 3-4 zeigt einen im Erdreich verlegten Rohrquerschnitt mit den erforderlichen Parametern zur Berechnung der Temperaturänderung.

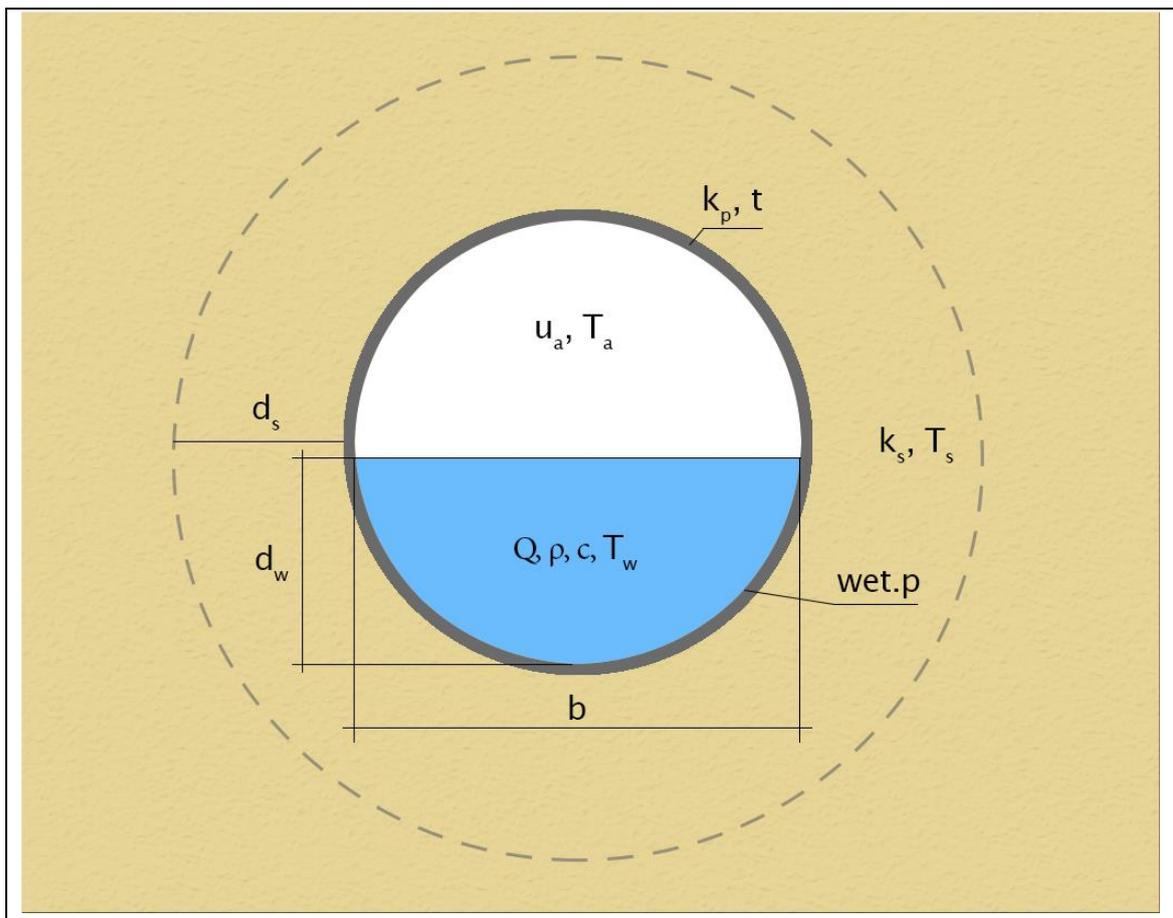


Abbildung 3-4: Darstellung eines Rohrquerschnitts und der zur Berechnung der Temperaturänderungen erforderlichen Parameter und Variablen

3.1.2.3 Koppelung der Einzelprozesse

Wie eingangs erwähnt, werden die beiden Wärmeaustauschprozesse zwischen Abwasser und Kanalluft sowie zwischen Abwasser und Erdreich berücksichtigt. Eine Erweiterung des Temperaturmodells um zusätzliche Wärmeaustauschprozesse ist möglich. Die Änderung der Temperatur je Zeitschritt in Verbindung mit den beiden Wärmeaustauschprozessen und einer etwaigen Wärmeentnahme oder -zufuhr wird, wie in Gleichung 3-16 ersichtlich, ausgedrückt.

$$T_1 = \frac{\left(\frac{T_s - T_0}{R_{ws}} + \frac{T_a - T_s}{R_{wa}}\right) * L}{\rho * c_p * Q} + T_0 \quad \text{Gleichung 3-16}$$

mit:

T_1 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_1 innerhalb der Haltung (K), T_0 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_0 innerhalb der Haltung (K), T_s ... Temperatur des Erdreichs (K oder °C), T_a ... Lufttemperatur im Kanal (K oder °C), ρ ... Dichte des Mediums (kg/m^3), c_p ... spezifische Wärmekapazität ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), Q ... Zu- und Abflussrate (m^3/s), R_{ws} ... Wärmewiderstand Abwasser - Erdreich ($\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$), R_{wa} ... Wärmewiderstand Abwasser - Kanalluft ($\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$), L ... Länge der Haltung (m)

Die spezifische Wärmekapazität c_p beträgt analog zu anderen Untersuchungen (Dürrenmatt, 2006; Abdel-Aal, 2015) $4190 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ und ist somit ident der des

Wassers. Ebenso wird die Dichte ρ des Abwassers äquivalent zur Wasserdichte (1000 kg/m^3) angenommen (Funamizu et al., 2001).

3.1.2.4 Wärmeentnahme und Wärmezufuhr

Die Entnahme bzw. Zufuhr von Wärme, sprich Energie, wird mithilfe der Wärmeleistung P ausgedrückt. In Gleichung 3-17 ist der Zusammenhang zwischen Wärmeleistung und Temperaturänderung dargestellt.

$$P = \rho * Q * c_p * \Delta T \text{ bzw. } \Delta T = \frac{P}{\rho * Q * c_p} \quad \text{Gleichung 3-17}$$

mit:

P ... Wärmeleistung (W), ρ ... Dichte des Abwassers (kg/m^3), Q ... Abflussrate/Volumenstrom (m^3/s), c_p ... spezifische Wärmekapazität des Abwassers (J/kg.K), ΔT ... Temperaturänderung (K oder $^{\circ}\text{C}$)

Daraus ist zu erkennen, dass bei konstanter Leistung eine hohe Durchflussrate zu einer geringeren Abkühlung oder Erwärmung führt. Umgekehrt führt eine niedrige Durchflussrate zu einer erhöhten Temperaturänderung. Es werden sowohl eine konstante Temperaturentnahme als auch eine konstante Leistungsentnahme berücksichtigt. Dabei ist infolge einer Entnahme ein negatives Vorzeichen zu verwenden.

$$T_1 = \frac{\left(\frac{T_s - T_0}{R_{ws}} + \frac{T_a - T_0}{R_{wa}}\right) * L}{\rho * c_p * Q} + T_0 + \frac{P}{\rho * Q * c_p} \quad \text{Gleichung 3-18}$$

mit:

T_1 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_1 innerhalb der Haltung (K), T_0 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_0 innerhalb der Haltung (K), T_s ... Temperatur des Erdreichs (K oder $^{\circ}\text{C}$), T_a ... Lufttemperatur im Kanal (K oder $^{\circ}\text{C}$), ρ ... Dichte des Mediums (kg/m^3), c_p ... spezifische Wärmekapazität (J/kg.K), Q ... Zu- und Abflussrate (m^3/s), R_{ws} ... Wärmewiderstand Abwasser - Erdreich (m.K/W), R_{wa} ... Wärmewiderstand Abwasser - Kanalluft (m.K/W), L ... Länge der Haltung (m), P ... entnommene oder zugeführte Wärmeleistung (W)

Die entnommene oder zugeführte Wärmeleistung wird in Watt (W) angegeben. Wird anstelle der Leistung eine konstante Temperaturänderung verwendet, so ist der letzte Term durch diese zu ersetzen.

3.1.3 Wärmeaustausch im Speicherknoten

Neben den Knoten und Haltungen gilt es, die Temperaturänderung in einem Speicherknoten (Speicherbecken) zu ermitteln. Wiederrum sind Austauschprozesse mit der Luft und dem umliegenden Erdreich vorhanden. Die Ermittlung der Temperatur zum Zeitpunkt t_1 erfolgt durch Formulierung einer thermischen Energiebilanz. In Abbildung 3-5 ist oben der Zustand zum Zeitpunkt t_0 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt ist eine bestimmte Menge an thermischer Energie im Medium enthalten. Darunter ist der Zustand zum Zeitpunkt t_1 dargestellt. Wiederum beinhaltet das Medium eine bestimmte Menge an Energie, welche vom Zustand t_0 abweicht, sofern kein Gleichgewichtszustand vorliegt. Die Abweichung tritt infolge

der Wärmeaustauschprozesse zwischen dem Medium und der Umwelt sowie dem Zu- und Abfluss auf.

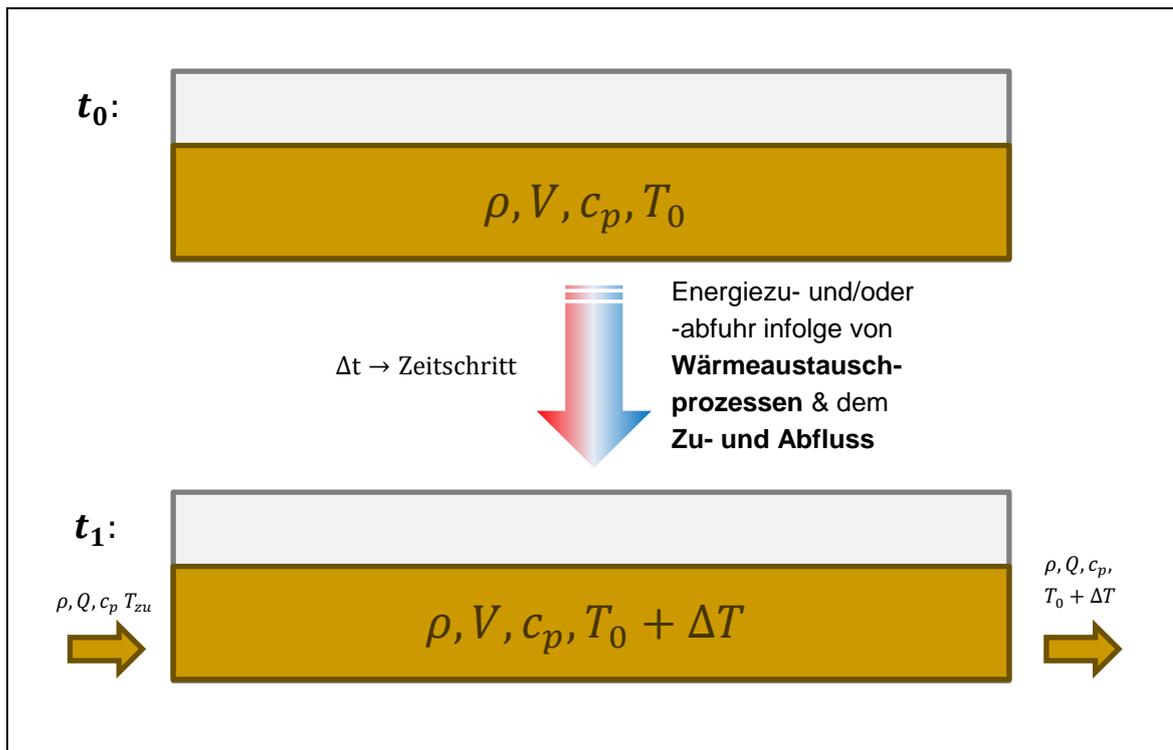


Abbildung 3-5: Zum Zeitpunkt t_0 befindet sich eine bestimmte Menge an Energie im System. Zum Zeitpunkt t_1 ist eine Änderung der Energiemenge aufgrund von Wärmeaustauschprozessen sowie dem Zu- und Abfluss erkennbar.

Beim Wärmeaustausch innerhalb des Speicherknottens werden Prozesse der Wärmeleitung und Konvektion berücksichtigt. Aufgrund der Annahme eines voll durchmischten Reaktors (Kapitel 3.1.2), erfolgt der Wärmeaustausch über die gesamte benetzte Fläche des Speicherknottens sowie die Wasseroberfläche. Die Wärmeleitfähigkeit als auch der Wärmeübergangskoeffizienten beinhalten die Einheit der Leistung (Watt, sprich Joule pro Sekunde). Infolgedessen ist die Multiplikation mit dem gewählten Zeitschritt in Sekunden erforderlich, um die Änderung der Temperatur via Wärmeaustauschprozesse zu ermitteln.

Der Zu- bzw. Abfluss beinhaltet Energie in Form von Wärme, welche ebenfalls in die Bilanzierung aufgenommen werden muss. Zu beachten ist, dass die Zuflussrate nicht zwingend der Abflussrate entsprechen muss. So ist beispielsweise keine Abflussrate bei Befüllung eines Speicherknottens, unter Berücksichtigung einer geschlossenen Drosselklappe vorhanden.

Die thermische Energie zum Zeitpunkt t_1 in einem stationären System kann mithilfe der Energiebilanz (Gleichung 3-19) ausgedrückt werden. Die im Medium enthaltene thermische Energie zum Zeitpunkt t_1 entspricht der thermischen Energie zum Zeitpunkt t_0 inklusive der zu- und abgeführten Energie infolge der Wärmeaustauschprozesse und dem Zu- sowie Abfluss.

$$E_{t_0} + E_{Austausch} + E_{zu} - E_{ab} = E_{t_1} \quad \text{Gleichung 3-19}$$

mit:

E_{t_0} ... Energie zum Zeitpunkt t_0 im System (J), $E_{Austausch}$... dem System zu- und abgeführte Energie infolge von Wärmeaustauschprozessen über die Zeit t (J), E_{zu} ... Energiezufuhr (J), E_{ab} ... Energieabfuhr (J), E_{t_1} ... Energie zum Zeitpunkt t_1 im System (J)

Auf Basis dieser Energiebilanz kann der thermische Energiegehalt im System zum Zeitpunkt t_1 ermittelt werden. Die thermische Energie im System, im weiteren Sinne die Temperatur, kann mithilfe der Grundgleichung der Wärmelehre ausgedrückt werden (Gleichung 3-20).

$$Q = m * c_p * \Delta T \quad \text{Gleichung 3-20}$$

mit:

Q ... im Medium enthaltene Energie (J), m ... Masse (kg), c_p ... spezifische Wärmekapazität (J/kg.K), ΔT ... Temperaturdifferenz (K oder °C)

Anstelle des Temperaturunterschiedes wird hier die tatsächliche Temperatur des Mediums in Kelvin eingesetzt. Im Weiteren wird E anstelle Q eingesetzt, da im Folgenden Q als Abkürzung für die Abflussrate verwendet wird.

Die zum Zeitpunkt t_0 im Medium enthaltene Energie ist in Gleichung 3-21 ersichtlich.

$$E_{t_0} = \rho * V * c_p * T_0 \quad \text{Gleichung 3-21}$$

mit:

E_{t_0} ... im Medium enthaltene Energie zum Zeitpunkt t_0 (J), ρ ... Dichte des Mediums (kg/m³), V ... Volumen (m³), c_p ... spezifische Wärmekapazität (J/kg.K), T_0 ... Temperatur des Mediums (K)

Analog dazu ist die thermische Energie zum Zeitpunkt t_1 wie folgt definiert:

$$E_{t_1} = \rho * V * c_p * T_1 \quad \text{Gleichung 3-22}$$

mit:

E_{t_1} ... im Medium enthaltene Energie (J), ρ ... Dichte des Mediums (kg/m³), V ... Volumen (m³), c_p ... spezifische Wärmekapazität (J/kg.K), T_1 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_1 des Mediums (K)

Die zu- und abfließende thermische Energiemenge kann mithilfe der Zu- und Abflussrate und des Zeitschrittes erklärt werden. Durch die Multiplikation der Zu- und Abflussrate mit dem Zeitschritt wird das zu- und abfließende Volumen des Mediums berechnet (Gleichung 3-23).

$$E_{zu/ab} = \rho * Q_{zu/ab} * \Delta t * c_p * T_{zu/ab} \quad \text{Gleichung 3-23}$$

mit:

$E_{zu/ab}$... zu- und abfließende Energiemenge (J), ρ ... Dichte des Mediums (kg/m^3), $Q_{zu/ab}$... Zu- und Abflussrate (m^3/s), Δt ... Zeitschritt (s), c_p ... spezifische Wärmekapazität ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), $T_{zu/ab}$... Temperatur des Zu- (T_{zu}) und Abflusses (T_{ab} bzw. T_1) (K oder °C)

Anzumerken ist, dass die Temperatur des Abflusses der Temperatur des Speicherknotts zum Zeitpunkt t_1 entspricht und somit die gesuchte Größe darstellt.

Der konduktive sowie der konvektive Anteil des Wärmeaustauschs werden analog zu Kapitel 3.1.2 berechnet. Lediglich bei der Berechnung der Wärmewiderstände R fließt die benetzte Fläche sowie die Wasserspiegeloberfläche ein, wodurch letztlich die Multiplikation mit der Länge entfällt. Des Weiteren wird die Fließgeschwindigkeit innerhalb des Speicherknotts nicht berücksichtigt. Somit ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_{wa} näherungsweise nur von der Luftgeschwindigkeit abhängig.

Durch Einsetzen und Umformen von Gleichung 3-19, unter Berücksichtigung des Zeitschrittes für die Wärmeaustauschprozesse, ergibt sich:

$$T_1 = \frac{V * T_0 + Q_{zu} * \Delta t * T_{zu}}{V + Q_{ab} * \Delta t} + \frac{\left(\frac{T_s - T_0}{R_{ws}} + \frac{T_a - T_0}{R_{wa}}\right) * \Delta t}{\rho * c_p * (V + Q_{ab} * \Delta t)} + T_0 \quad \text{Gleichung 3-24}$$

mit:

T_1 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_1 innerhalb des Speicherknotts (K), T_0 ... Temperatur zum Zeitpunkt t_0 innerhalb des Speicherknotts (K), T_s ... Temperatur des Erdreichs (K oder °C), T_a ... Lufttemperatur im Kanal (K oder °C), T_{zu} ... Temperatur des Zuflusses (K), ρ ... Dichte des Mediums (kg/m^3), c_p ... spezifische Wärmekapazität ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$), V ... befülltes Volumen des Speicherknotts (m^3), $Q_{zu/ab}$... Zu- und Abflussrate (m^3/s), R_{ws} ... Wärmewiderstand Abwasser - Erdreich (K/W), R_{wa} ... Wärmewiderstand Abwasser - Kanalluft (K/W), Δt ... Zeitschritt (s)

3.2 Implementierung des Temperaturmodells

Im Anschluss an die Formulierung des Temperaturmodells kann dieses in SWMM implementiert werden. Vor Beginn der Implementierung muss entschieden werden, wie eine Integration des Temperaturmodells ins SWMM erfolgen soll.

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten:

- Erstellen einer eigenen Klasse für die Implementierung des Temperaturmodells oder
- Integration in die bestehende Klasse `qualrout.c`, in welcher die Modellierung der Abwasserqualität erfolgt.

Bei näherer Betrachtung der Klasse `qualrout.c` ist erkennbar, dass benötigte Routinen wie beispielsweise die Mischungsrechnung bereits darin implementiert sind. Generell kann die Temperatur ähnlich wie ein Schmutzstoff, in Hinsicht auf den

Abbau bzw. der Reaktion innerhalb einer Haltung, behandelt werden. In Abbildung 3-6 ist ein Auszug aus dem Visual Code Explorer des OpenSWMM Projekts ersichtlich. (CHI, 2018)

Aus diesem Grund wird eine Erweiterung der genannten Klasse angestrebt, um so die Anzahl der Modifikationen innerhalb des Codes so gering als möglich zu halten. Des Weiteren darf die Funktionalität von SWMM durch Einbindung des Temperaturmodells nicht beeinträchtigt werden. Das heißt, dass ein Mechanismus zum Aktivieren/Deaktivieren der Temperaturmodellierung berücksichtigt werden muss, ohne dass der/die AnwenderIn weitere Modifikationen im Code durchführen muss.

Generell soll nach erfolgreicher Implementierung des Temperaturmodells die Bedienung anhand der Eingabedatei (im weiteren Inputfile genannt) möglichst einfach sein. Neben der Usability ist auch die Performance der Modellierungssoftware zu berücksichtigen. Im Zuge dessen wird darauf geachtet, dass möglichst wenig Variablen innerhalb des modifizierten Codes berechnet werden. Werden bereits berechnete Variablen im Zuge der Temperaturberechnung benötigt, erfolgt die Zuweisung zum jeweiligen Objekt (Haltung, Knoten, etc.) an der entsprechenden Stelle des Quellcodes.

Eine detaillierte Vorgehensweise zur Implementierung in SWMM ist im Anhang ersichtlich.

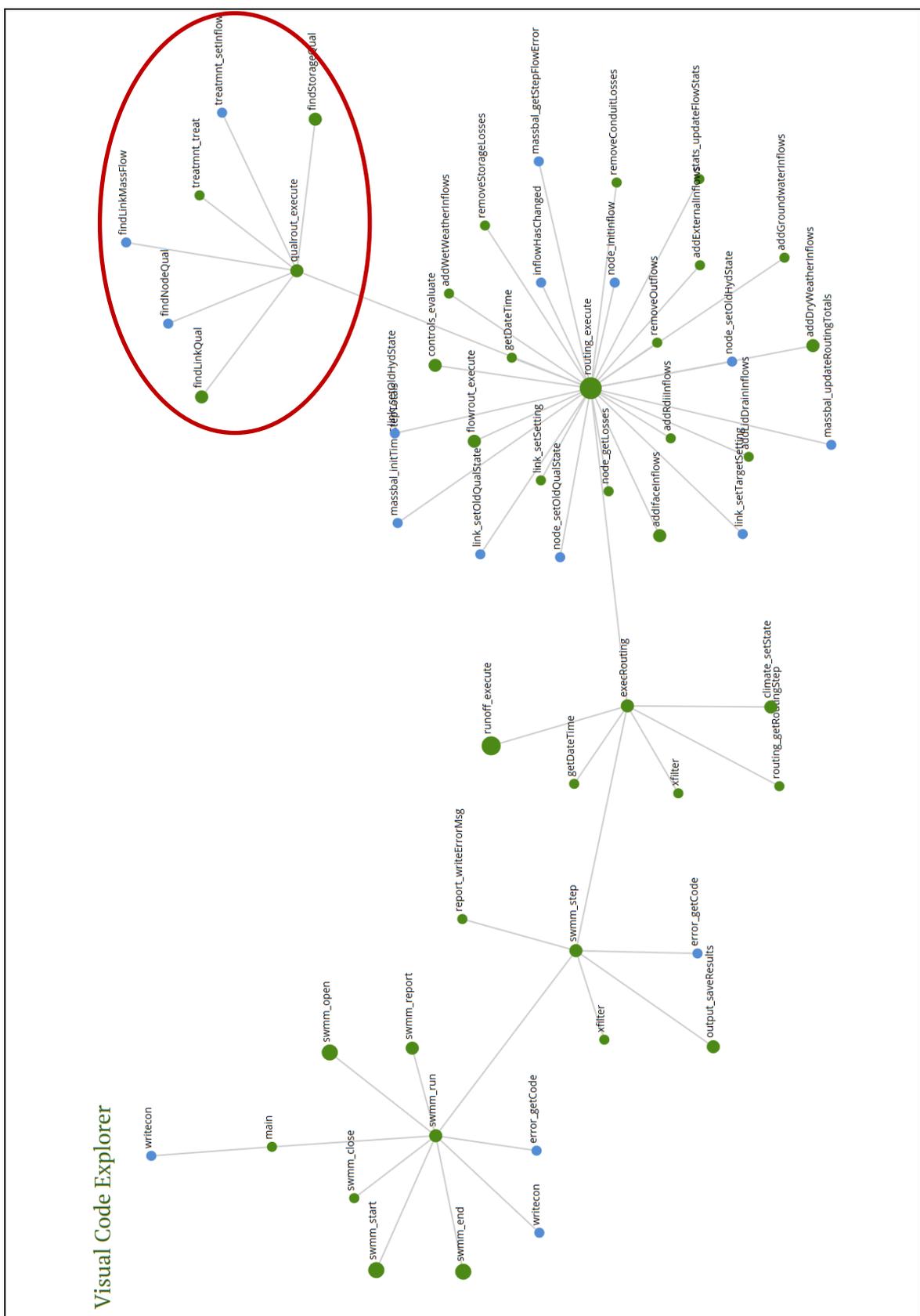


Abbildung 3-6: Auszug aus dem Visual Code Explorer des Projekts OpenSWMM und Markierung der Klasse qualroutr.c

3.3 Aufbau fiktiver Abwassernetze und deren Szenarien

Mittels fiktiver Abwassernetze wird die Temperaturentwicklung unter Betrachtung unterschiedlicher Systemeigenschaften wie beispielsweise mehrere Zuflüsse an einem Knoten, unterschiedliche Haltungslängen o.ä. auf deren Plausibilität überprüft. Hierbei werden Ergebnisse erwartet, welche durch logische Überlegungen sowie unter Berücksichtigung physikalischer Gesetze der Wärmeübertragung (siehe Kapitel 2.2) nachvollziehbar sind.

Alle Szenarien wurden mit dem dynamischen Wellenansatz simuliert. Als Zeitraum wird ein Tag im Monat im März gewählt, mit Ausnahme von Abwassernetz I – Szenario VII. Hierbei erfolgt die Simulation über ein Jahr, um so eine Jahressganglinie für die Temperatur des Abwassers zu erhalten. Zu erwähnen ist, dass die Berechnung mit einem Zeitschritt von 5 Sekunden erfolgt.

In Tabelle 3-1 sind weitere verwendete Parameter angegeben. Diese werden nach Möglichkeit aus Tabellenwerken und aus Fachliteratur entnommen. Die Dichte sowie die spezifische Wärmekapazität wurden in Kapitel 3.1.2.3 erläutert. Die Luftgeschwindigkeit in der Kanalisation wird auf Basis der Untersuchungen von Abdel-Aal (2015) mit 0,25 m/s angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität des Erdreichs entsprechen einem lehmigen Boden. Die Wärmeleitfähigkeit der Rohre wird auf Basis eines Betonrohrs aus der Literatur gewählt (VDI e. V., 2013). Anzumerken ist, dass die Bodenparameter in Abhängigkeit des Einsatzortes zwingend zu adaptieren sind. Die Wandstärke mit 0,18 m wird angenommen.

Tabelle 3-1: Verwendete allgemeine und haltungsspezifische Parameter für das Temperaturmodell in Verbindung mit den Szenarien

Wert	Einheit	Beschreibung
1000	[kg/m ³]	<i>Dichte des Abwassers</i>
4190	[J/kg.K]	<i>Spezifische Wärmekapazität des Abwassers</i>
0,25	[m/s]	<i>Luftgeschwindigkeit im Kanal</i>
1,5	[W/m.K]	<i>Wärmeleitfähigkeit des umliegenden Erdreichs</i>
2000	[kg/m ³]	<i>Dichte des umliegenden Erdreichs</i>
1800	[J/kg.K]	<i>Spezifische Wärmekapazität des Erdreichs</i>
1,15	[W/m.K]	<i>Wärmeleitfähigkeit des Rohres</i>
0,18	[m]	<i>Wandstärke des Rohres</i>

Die Temperatur des Erdreichs und die Temperatur der Kanalluft ist mithilfe einer Jahresganglinie definiert. In Tabelle 3-2 sind die entsprechenden Temperaturwerte ersichtlich.

Tabelle 3-2: Auf Basis von Kapitel 2.3 gewählte, fiktive Jahresganglinie für die Temperatur der Kanalluft und des Erdreichs

Ganglinie	Temperatur im jeweiligen Monat [°C]											
	<i>Jan.</i>	<i>Feb.</i>	<i>März</i>	<i>Apr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Aug.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Okt.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dez.</i>
Kanalluft	5	7	13	15	18	21	24	24	21	17	12	9
Erdreich	8	8	9	10	11	12	13	13	12	11	10	9

3.3.1 Abwassernetz I

Wie in Abbildung 3-7 dargestellt, handelt es sich hierbei um ein geradliniges Abwassernetz, welches aus insgesamt fünf Haltungen besteht. Dabei wird in den folgenden Szenarien jeweils 1,0 m³/s mit der Temperatur von 15 °C in Knoten 1 eingeleitet. Die Länge der Haltungen 1 bis 5 beträgt 400 m, sodass eine Gesamtlänge von 2000 m erreicht wird. Das Gefälle je Haltung ist mit 5 ‰ festgelegt. Der Rohrdurchmesser beträgt 2000 mm. Die Temperatur des Erdreichs beträgt 9 °C und die Temperatur der Kanalluft 13 °C, was auf Basis von Tabelle 3-2 einem Tag im Monat März entspricht. Aus diesem Grund wird innerhalb der Simulationseinstellungen, der Simulations- und Aufzeichnungszeitraum entsprechend einem Tag im Monat März gewählt.

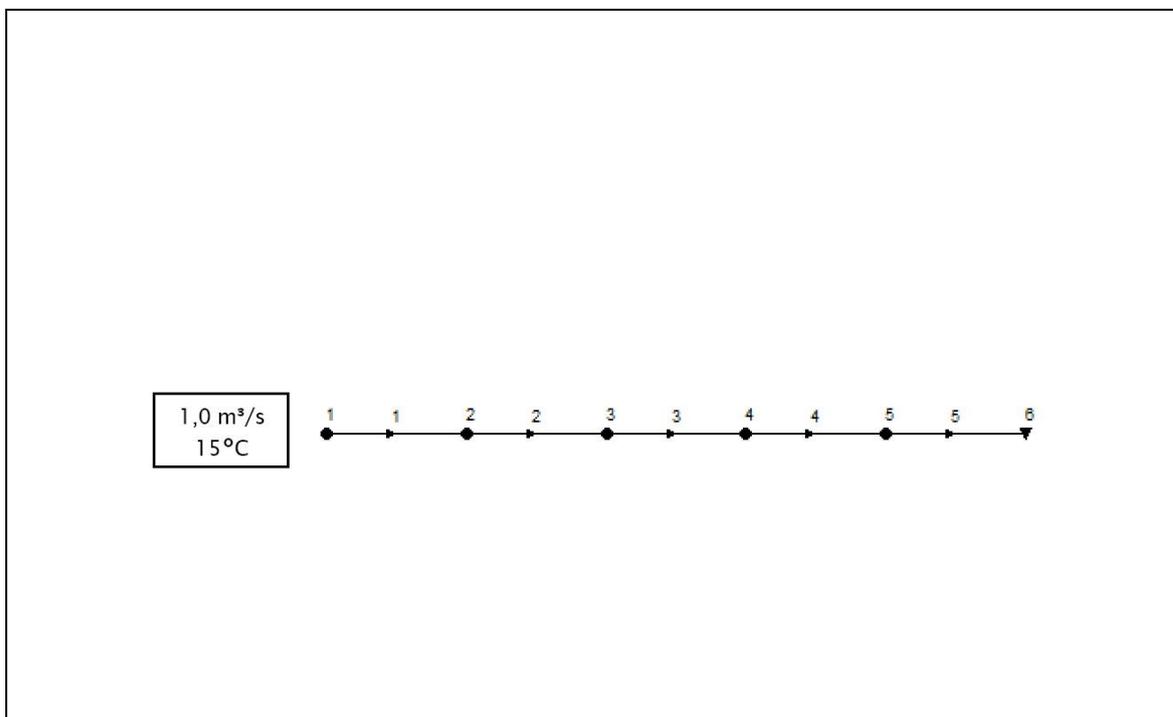


Abbildung 3-7: Aufbau von Abwassernetz I in SWMM mit Knoten (1 bis 5), dem Auslass (6) sowie den Haltungen 1 bis 5

In Tabelle 3-3 ist ein Überblick der einzelnen Szenarien zu Abwassernetz I gegeben. Neben der Beschreibung des jeweiligen Szenarios wird auch die zu erwartende Reaktion des Systems dargestellt.

Tabelle 3-3: Szenarien I bis VI des Abwassernetzes I mit den zu erwartenden Reaktionen

Szenario	Beschreibung	Erwartete Reaktion
I	Inaktives Temperaturmodell	<i>Keine Temperaturänderung</i>
II	Wärmeaustausch Abwasser - Kanalluft	<i>Absenkung der Abwassertemperatur</i>
III	Wärmeaustausch Abwasser - Erdreich	<i>Absenkung der Abwassertemperatur</i>
IV	Kombination der Wärmeaustauschprozesse	<i>Betragsmäßig höhere Absenkung der Abwassertemperatur gegenüber den beiden vorangegangenen Szenarien</i>
V	Variierung der Haltungslänge	<i>Verkürzung: geringere Abkühlung Verlängerung: erhöhte Abkühlung</i>
VI	Variierung der Einleitungstemperatur	<i>Erwärmung des Abwassers bei Einleitungstemperatur kleiner der Temperatur des Erdreichs und der Kanalluft</i>
VII	Jahresganglinie Kanalluft und Erdreich	<i>Abkühlung bzw. Erwärmung des Abwassers in Abhängigkeit der Materialparameter sowie der Erdboden- und Kanallufttemperatur</i>

3.3.1.1 Szenario I – keine Temperaturveränderung

In diesem Szenario werden jegliche Wärmeaustauschprozesse deaktiviert. Aus diesem Grund müssen am Auslass 15 °C, ident der Temperatur im Knoten 1, messbar sein. Dieses Szenario dient dazu, die Funktion eines deaktivierten Temperaturmodells zu überprüfen.

3.3.1.2 Szenario II – Wärmeaustausch Abwasser – Kanalluft

Durch den Austausch von thermischer Energie mit der Kanalluft, versucht das System den Gleichgewichtszustand aufgrund der Temperaturdifferenz zu erreichen. Je höher der Wärmeübergangskoeffizient, desto höher ist der Austausch an thermischer Energie. Da in diesen Szenarien eine Lufttemperatur im Kanal von 12 °C angenommen wurde, wird eine Abkühlung des Abwassers erwartet. Die Funktion für den Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Erdreich wurde innerhalb des Programmcodes temporär deaktiviert.

3.3.1.3 Szenario III – Wärmeaustausch Abwasser – Erdreich

Der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Erdreich ist von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und des Rohrmaterials abhängig. Je höher diese Koeffizienten sind, desto geringer ist der Wärmeaustausch. Generell wird aufgrund der Temperatur des Erdreichs eine Abkühlung erwartet. Die Funktion für den Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Kanalluft wurde innerhalb des Programm-codes temporär deaktiviert.

3.3.1.4 Szenario IV – Kombination der Wärmeaustauschprozesse

Infolge der Kombination beider Wärmeaustauschprozesse erfolgt der thermische Energieaustausch über beide Prozesse. Dadurch ist mit einer stärkeren Abkühlung gegenüber den beiden vorherigen Szenarien zu rechnen.

3.3.1.5 Szenario V – Variierung der Haltungslänge

Durch Verkürzung der Haltungslänge auf 100 m kann weniger thermische Energie mit der Umgebung ausgetauscht werden. Dadurch ist eine höhere Temperatur am Auslass gegenüber dem vorherigen Szenario zu erwarten. Das Gefälle sowie übrigen Parameter werden aus dem vorherigen Szenario übernommen.

Die gegenteilige Auswirkung muss bei einer Verlängerung der Haltung auf 800 m erkennbar sein.

3.3.1.6 Szenario VI – Variierung der Einleitungstemperatur

Aufgrund der höheren Einleitungstemperatur von 15 °C der vorangegangenen Szenarien gegenüber der Temperatur des Erdreichs und der Kanalluft wird nun eine Einleitungstemperatur von 8 °C angenommen. Dadurch wird dem Abwasser thermische Energie zugeführt, was zu einer Erhöhung der Abwassertemperatur führt.

3.3.1.7 Szenario VII – Jahresganglinie Kanalluft und Erdreich

Die Lufttemperatur im Kanal sowie die Temperatur des Erdreichs wird anhand der in Tabelle 3-2 ersichtlichen Jahresganglinien gewählt. Aus diesem Grund wird innerhalb der Simulationseinstellungen, der Simulations- und Aufzeichnungszeitraum entsprechend angepasst, sodass als Ergebnis eine Jahresganglinie für die Temperatur des Abwassers erstellt wird.

Da die Temperatur der Kanalluft in den Sommermonaten deutlich über der Einleitungstemperatur von 15 °C liegt, ist mit einer Erwärmung des Abwassers zu rechnen. Eventuell ist infolge der stets geringeren Temperatur des Erdreichs gegenüber der Einleitungstemperatur, die Erwärmung in den Sommermonaten nicht stark ausgeprägt. In den Wintermonaten muss eine Abkühlung des Abwassers erfolgen, da sowohl die Temperatur des Erdreichs als auch die Lufttemperatur im Kanal geringer als die Einleitungstemperatur sind.

3.3.2 Abwassernetz II

Wie in Abbildung 3-8 ersichtlich, ist das Abwassernetz für die folgenden Szenarien durch mehrere Zuflüsse an Knoten gekennzeichnet. In Tabelle 3-4 sind diese entsprechend der jeweiligen Knoten ersichtlich. Es wurden bewusst besonders hohe sowie niedrige Temperaturen gewählt, sodass die Reaktion an den Knoten und Haltungen deutlich erkennbar ist.

Tabelle 3-4: Zuflüsse im Abwassernetz II je Knoten

Knoten	Menge [m³/s]	Temperatur [°C]
1	1	15
8	0,25	10
9	0,25	55
10	0,25	40
11	0,5	5

Die Länge der Haltungen 1 bis 5 beträgt 400 m, sodass eine Gesamtlänge von 2000 m erreicht wird. Haltung 6 bis 10 weisen ebenfalls eine Länge von 400 m auf. Das Gefälle je Haltung ist mit 5 ‰ festgelegt.

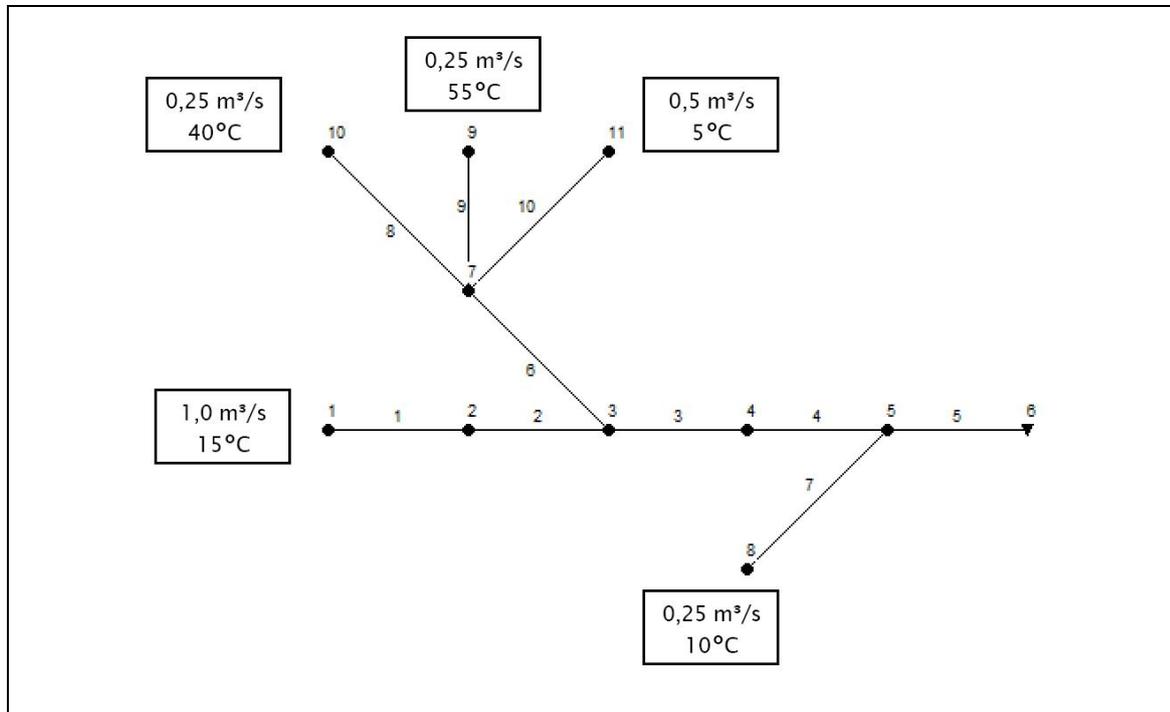


Abbildung 3-8: Aufbau von Abwassernetz II in SWMM mit Knoten (1 bis 5 und 7 bis 11), dem Auslass (6) sowie den Haltungen 1 bis 10

Die Temperatur des Erdreichs und die Temperatur der Kanalluft werden analog zu Abwassernetz I mit einer Jahresganglinie definiert. Die entsprechenden Temperaturwerte können aus Tabelle 3-2 entnommen werden. Die Simulation erfolgt an einem Tag im Monat März, wodurch die Lufttemperatur im Kanal 13 °C und die Temperatur des Erdreichs 9 °C aufweist.

In Tabelle 3-5 ist ein Überblick der einzelnen Szenarien zu Abwassernetz II gegeben. Neben der Beschreibung des jeweiligen Szenarios wird auch die zu erwartende Reaktion des Systems dargestellt.

Tabelle 3-5: Szenarien I bis III des Abwassernetzes II mit den zu erwartenden Reaktionen

Szenario	Beschreibung	Erwartete Reaktion
I	Mischungsrechnung	<i>Bei Knoten 3 soll eine Temperatur von ca. 20 °C und bei Knoten 5 knapp unter 20 °C erkennbar sein.</i>
II	Zufluss an Knoten 7	<i>Zufluss an Knoten 7 mit 0,5 m³/s und einer Temperatur von 10 °C bewirkt eine Reduktion der Temperatur an allen Folgeknoten sowie am Auslass</i>
III	Wärmetauscher an Haltung 3	<i>Temperatursprung zwischen Knoten 3 und Knoten 4 infolge der Temperaturentnahme an Haltung 3.</i>

3.3.2.1 Szenario I – Mischungsrechnung

Am Knoten 7 erfolgt eine Mischungsrechnung der Haltungen 8 bis 10. Die daraus resultierende Temperatur des Abwassers wird über Haltung 6 zu Knoten 3 zugeführt. Hier erfolgt wiederum eine Mischungsrechnung der Haltungen 2 und 6. Die letzte Mischungsrechnung erfolgt an Knoten 5, wo Haltung 4 und 7 aufeinandertreffen.

Die Mischungstemperatur in Knoten 7 sollte zwischen 20 °C und 30 °C liegen. Es fließen 1,0 m³/s über Haltung 6 in Richtung Knoten 3, wo eine resultierende Temperatur von ungefähr 20 °C erreicht wird. Durch die Zumischung von Haltung 7 wird am Auslass eine Temperatur von etwas unter 20 °C erwartet.

3.3.2.2 Szenario II – Zufluss am Knoten mit Jahresganglinie

Da bisher nur Zuflüsse an Randknoten betrachtet wurden, wird in diesem Szenario der Zufluss an einem Knoten, welcher bereits einen Zufluss aus einer Haltung aufweist, betrachtet (Abbildung 3-9). Hierfür erfolgt ein Zufluss an Knoten 7 mit 0,5 m³/s und einer Temperatur von 10 °C. Zusätzlich wird eine Ganglinie für den Zufluss zu Knoten 8 bis 11 erstellt, wodurch eine zwischenzeitliche Deaktivierung

der genannten Zuflüsse erfolgt. Zu Beginn ist kein Zufluss an den Knoten 7 bis 11 vorhanden. Anschließend erfolgt nacheinander die Aktivierung der Zuflüsse an Knoten 7 und 8. Im Anschluss werden die Zuflüsse an Knoten 9 bis 11 aktiviert. Die Deaktivierung beginnt mit Knoten 7 sowie 8 und wird letztlich nacheinander von Knoten 9 bis 11 durchgeführt.

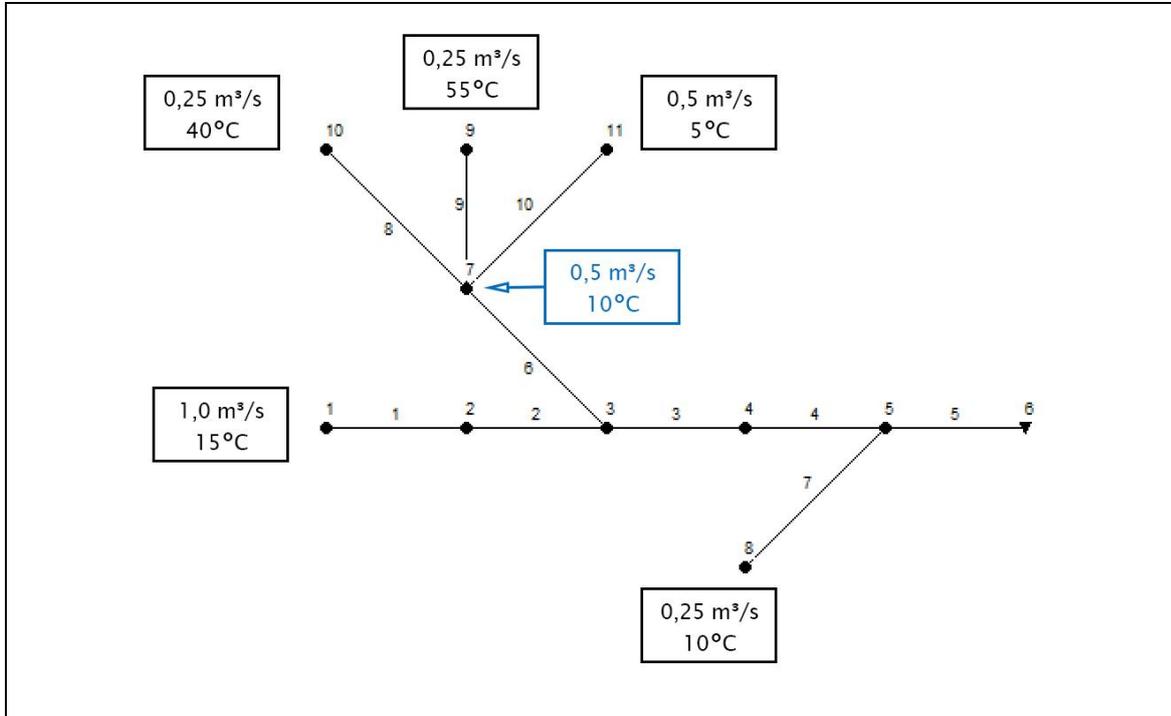


Abbildung 3-9: Aufbau von Abwassernetz II – Szenario II, inklusive des Zuflusses an Knoten 7

In Tabelle 3-6 sind die zur jeweiligen Tageszeit aktivierten Zuflüsse dargestellt.

Tabelle 3-6: Knotenzuflüsse entsprechend der Tageszeit

Stunde	Knoten	Stunde	Knoten	Stunde	Knoten	Stunde	Knoten
0	-	6	1, 7, 8	12	1, 9, 10, 11	18	1, 9
1	1	7	1, 7, 8	13	1, 9, 10, 11	19	1, 9
2	1	8	1, 7, 8	14	1, 9, 10, 11	20	1, 9
3	1	9	1, 7, 8, 9, 10, 11	15	1, 9, 10	21	1
4	1, 7	10	1, 7, 8, 9, 10, 11	16	1, 9, 10	22	-
5	1, 7	11	1, 7, 8, 9, 10, 11	17	1, 9, 10	23	-

3.3.2.3 Szenario III – Wärmetauscher

3.3.2.3.1 Temperatur [°C]

Die Temperatur innerhalb der Haltung 3 wird konstant um 0,5 °C abgesenkt. Dieser Temperaturabfall muss im weiteren Verlauf erkennbar sein.

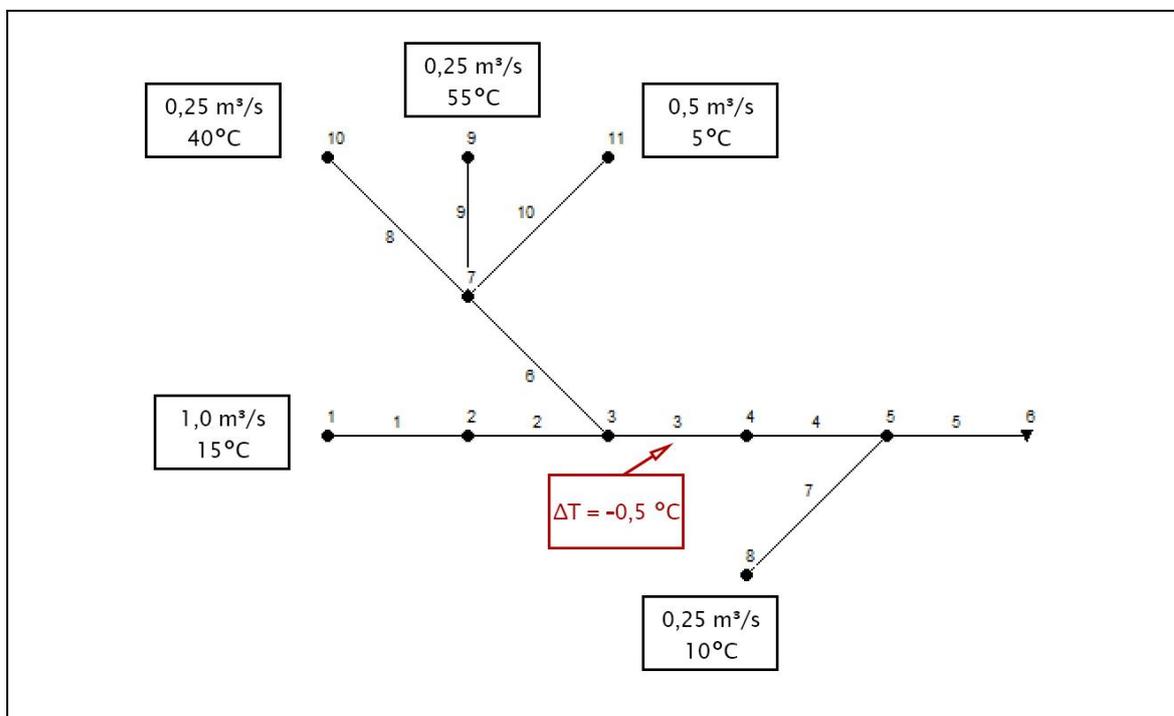


Abbildung 3-10: Aufbau von Abwassernetz II – Szenario III, inklusive der Temperaturentnahme innerhalb von Haltung 3

Aufgrund der weiteren Fließstrecke und den damit einhergehenden Wärmeaustauschprozessen zwischen Abwasser und Kanalluft sowie Abwasser und Erdreich, sollte die Temperaturabweichung am Auslass gegenüber Szenario I kleiner 0,5 °C betragen.

3.3.2.3.2 Leistung [W]

Parallel zur konstanten Temperaturänderung wird hierbei eine konstante Leistung innerhalb einer Haltung aufgrund eines Wärmetauschers zu- oder abgeführt. Infolge einer Wärmeentnahme in der Höhe von 250 kW, muss Temperatur in Abhängigkeit der Abflussrate sinken.

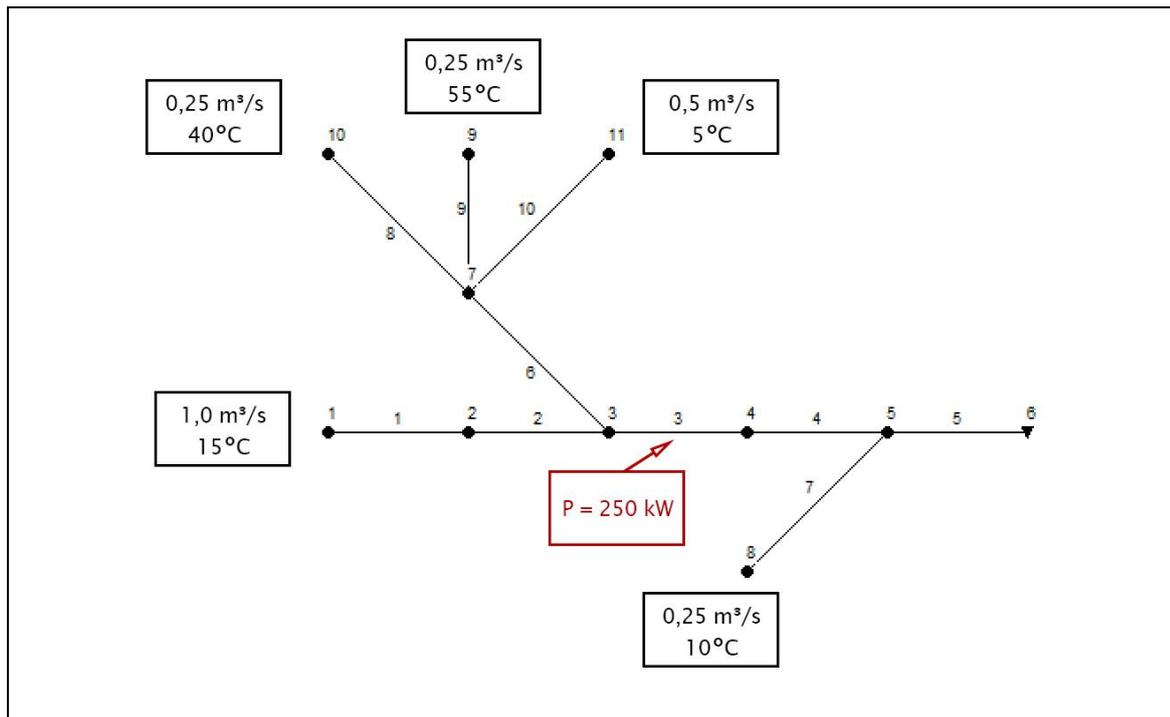


Abbildung 3-11: Aufbau von Abwassernetz II – Szenario III, inklusive der Wärmeentnahme innerhalb von Haltung 3

3.3.3 Abwassernetz III

Wie in Abbildung 3-12 dargestellt, handelt es sich analog zu Abwassernetz I um ein geradliniges Abwassernetz, welches aus insgesamt fünf Haltungen besteht. Dabei wird Knoten 4 als Speicherbauwerk ausgeführt.

Dabei wird 1,0 m³/s mit der Temperatur von 15 °C in Knoten Nr. 1 eingeleitet. Die Länge der Haltungen 1 bis 5 beträgt 400 m, sodass eine Gesamtlänge von 2000 m erreicht wird. Das Gefälle je Haltung ist mit 5 ‰ festgelegt. Die Temperatur des Erdreichs beträgt 9 °C und die Temperatur der Kanalluft 13 °C, was auf Basis von Tabelle 3-2 dem Monat März entspricht. Aus diesem Grund wird innerhalb der Simulationseinstellungen, der Simulations- und Aufzeichnungszeitraum entsprechend dem Monat März gewählt.

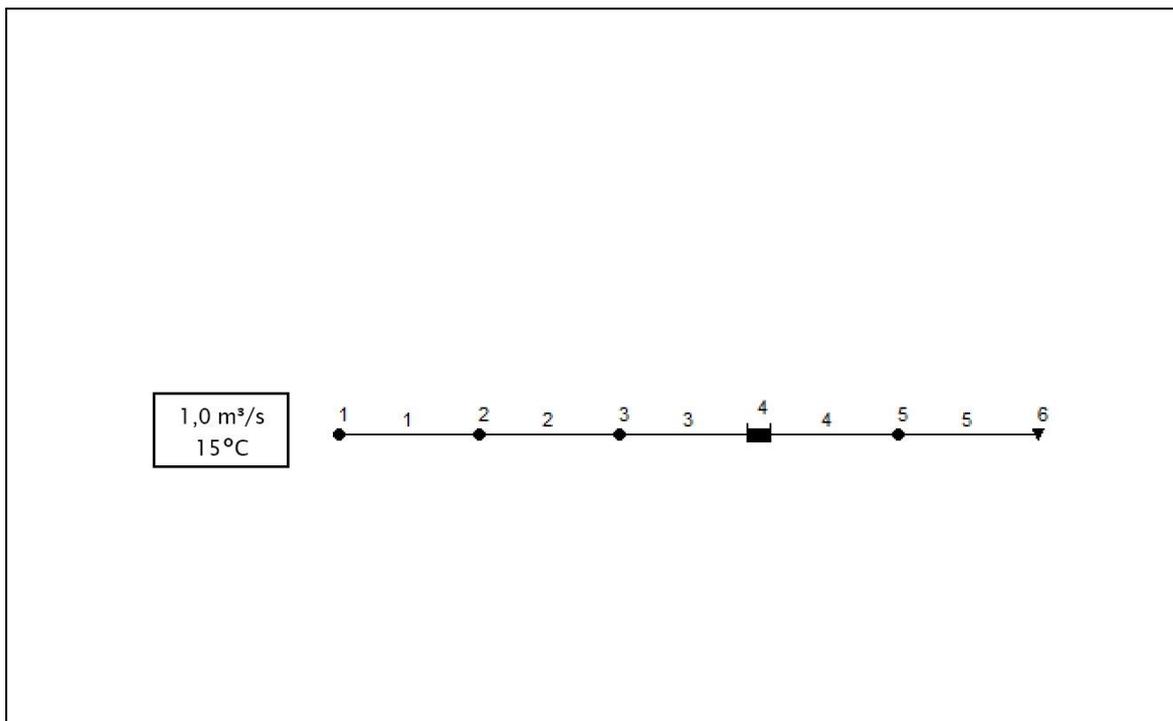


Abbildung 3-12: Aufbau von Abwassernetz III in SWMM mit Knoten (1 bis 3 und 5), dem Auslass (6), dem Speicherknoten (4) sowie den Haltungen 1 bis 5

Parallel zu den Parametern für die Haltungen sind in diesem Szenario wiederum benötigte Parameter für den Speicherknoten zu definieren. In Tabelle 3-7 sind die erforderlichen Parameter aufgelistet.

Tabelle 3-7: Verwendete Parameter in Bezug auf den Speicherknoten

Wert	Einheit	Beschreibung
1,5	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit des umliegenden Erdreichs
2000	[kg/m³]	Dichte des umliegenden Erdreichs
1800	[J/kg.K]	Spezifische Wärmekapazität des Erdreichs
1,15	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit der Behälterwand
0,18	[m]	Wandstärke des Behälters

Infolge des Speicherbauwerks wird eine zusätzliche Temperaturänderung des Abwassers erwartet. Gegenüber Abwassernetz I, Szenario IV muss in diesem Szenario die Temperatur am Auslass einen geringen Wert aufweisen. Um den Vergleich anstellen zu können, wird der nach dem Speicherbauwerk angebundene Haltung ein Versatz (inlet offset) am Zulauf von 1,0 m zugewiesen. Dadurch wird sichergestellt, dass sich Abwasser im Speicherknoten sammelt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn der Kapitel 4.1, 4.2 sowie 4.3 wird jeweils eine Tabelle mit der zu erwartenden Reaktion aus Kapitel 3.2 und den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt und bewertet. In den darauffolgenden Unterkapiteln werden die Resultate im Detail erläutert und diskutiert.

4.1 Abwassernetz I

Abwassernetz I dient dazu, die beiden grundlegenden Wärmeaustauschprozesse darzustellen und einzelne Parameter zu variieren. In Tabelle 4-1 sind zusammenfassend die zu erwartende Reaktion sowie das Simulationsergebnis der Temperatur am Auslass dargestellt.

Tabelle 4-1: Szenarien I bis VII des Abwassernetzes I mit den zu erwartenden Reaktionen und dem Simulationsergebnis

Szenario	Erwartete Reaktion	Simulationsergebnis
I	<i>Keine Temperaturänderung</i>	Keine Temperaturänderung
II	<i>Absenkung der Abwassertemperatur</i>	Absenkung der Abwassertemperatur auf 14,987 °C
III	<i>Absenkung der Abwassertemperatur</i>	Absenkung der Abwassertemperatur auf 14,977 °C
IV	<i>Betragsmäßig höhere Absenkung der Abwassertemperatur gegenüber den beiden vorangegangenen Szenarien</i>	Absenkung der Abwassertemperatur auf 14,964 °C
V	<i>Verkürzung: geringere Abkühlung Verlängerung: erhöhte Abkühlung</i>	Verkürzung: Absenkung auf 14,992 °C Verlängerung: Absenkung auf 14,928 °C
VI	<i>Erwärmung des Abwassers bei Einleitungstemperatur kleiner der Temperatur des Erdreichs und der Kanalluft</i>	Erhöhung der Temperatur auf 8,036 °C
VII	<i>Abkühlung bzw. Erwärmung des Abwassers in Abhängigkeit der Materialparameter sowie der Erdboden- und Kanallufttemperatur</i>	In den Wintermonaten ist eine stärkere Abkühlung des Abwassers gegenüber den Sommermonaten erkennbar

4.1.1 Szenario I – keine Temperaturveränderung

Wie in Abbildung 4-1 zu erkennen, ist sowohl am Knoten 1 und dem Auslass (6) dieselbe Temperatur erkennbar. Dadurch und infolge der Zahlenwerte (Tabelle 4-2) herrscht eine konstante Temperatur von 15 °C.

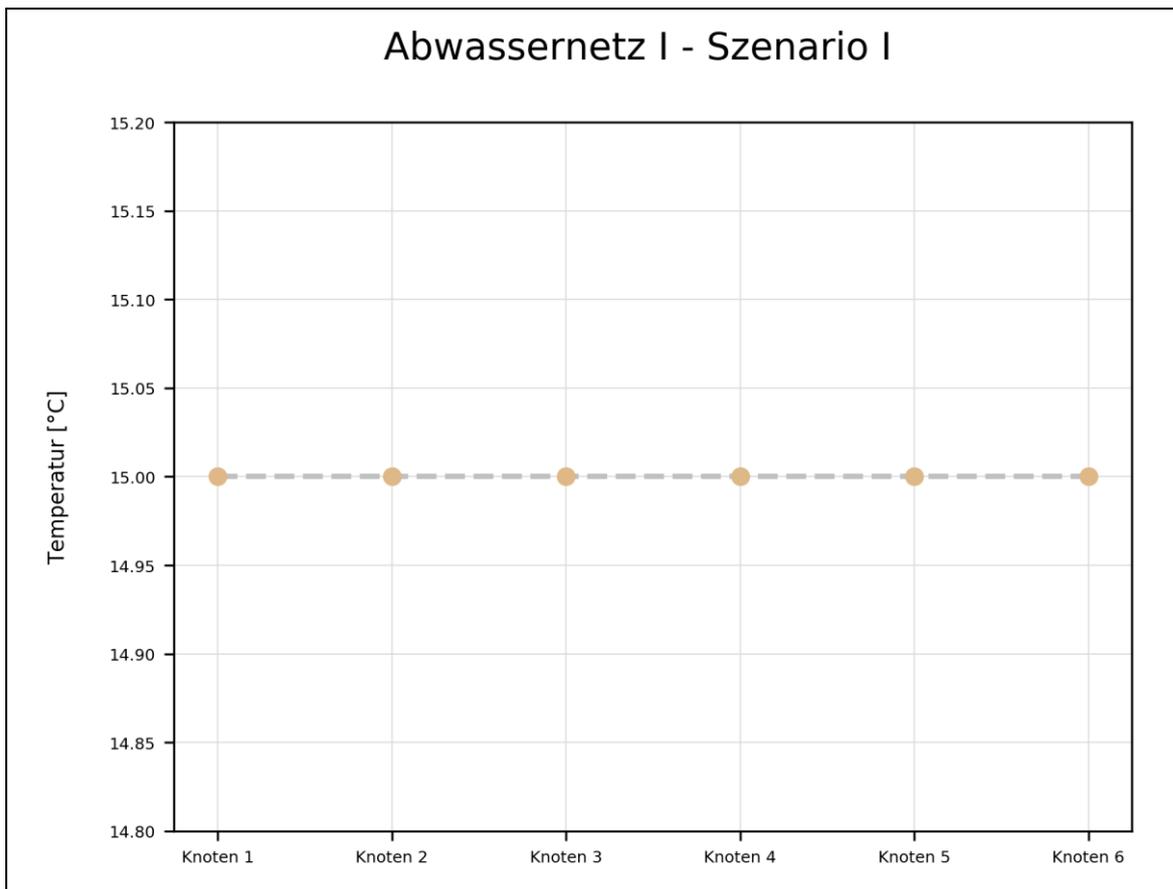


Abbildung 4-1: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario I mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Tabelle 4-2: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario I, infolge eines deaktivierten Temperaturmodells

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	15
3	15
4	15
5	15
6	15

Die Deaktivierung des Temperaturmodells wurde damit erfolgreich durchgeführt und bestätigt.

4.1.2 Szenario II – Wärmeaustausch Abwasser – Kanalluft

Infolge des Wärmeaustauschprozesses zwischen Abwasser und Kanalluft ist eine Veränderung der Temperatur zwischen dem Einleitungsknoten (1) und dem Auslass (6) zu erkennen. Unter Berücksichtigung der kühleren Kanalluft im Vergleich zum Abwasser, erfolgt wie in Abbildung 4-2 sowie Tabelle 4-3 ersichtlich, eine Abkühlung des Abwassers.

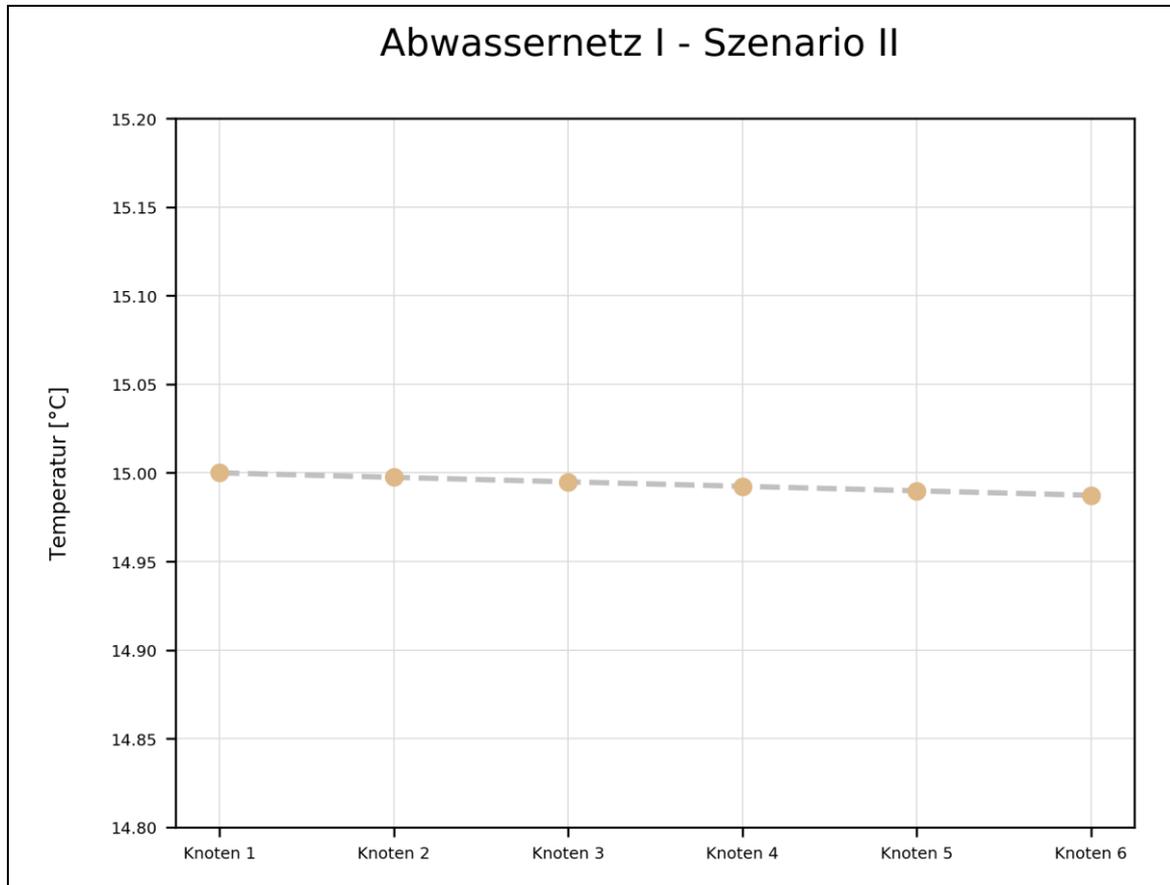


Abbildung 4-2: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario II mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Die Abkühlung ausgehend von der Einleitungstemperatur ist konstant, da zu jedem Zeitpunkt der Simulation 1 m³/s mit der Temperatur von 15 °C in Knoten 1 eingebracht wird.

Tabelle 4-3: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario II, infolge des Wärmeaustauschprozesses Abwasser - Kanalluft

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,997
3	14,995
4	14,992
5	14,990
6	14,987

4.1.3 Szenario III – Wärmeaustausch Abwasser – Erdreich

Der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Erdreich resultiert aufgrund der Temperaturdifferenz in einer Abkühlung des Abwassers. Wegen der geringeren Temperatur des Erdreichs im Vergleich zur Kanalluft aus Szenario II, ist wie in Abbildung 4-3 dargestellt, die Abkühlung stärker ausgeprägt. Dies ist jedoch nur gültig, da die übrigen einfließenden Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Rohrwanddicke, u.a.) eine Absenkung in dieser Größenordnung unterstützen.

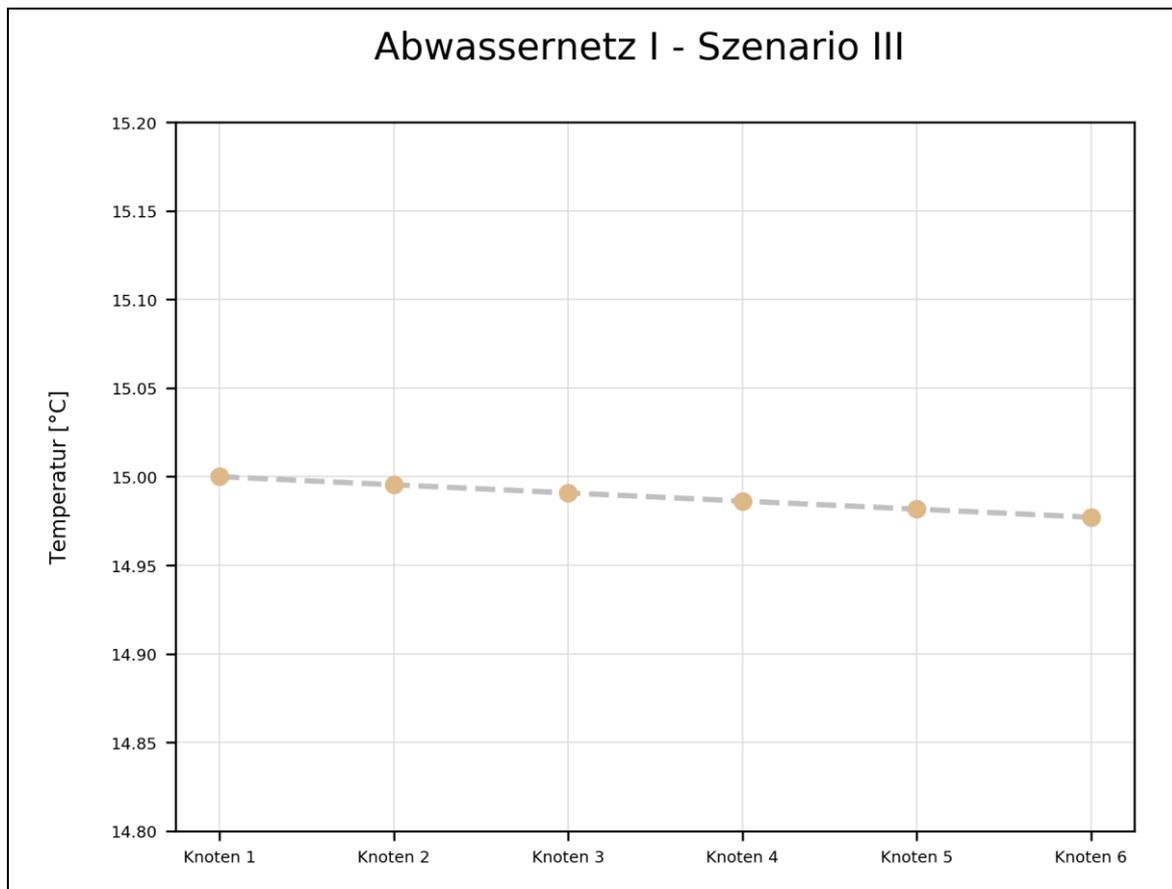


Abbildung 4-3: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario III mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Analog zu Szenario II ist die Abkühlung zeitlich konstant. In Tabelle 4-4 sind die entsprechenden Temperaturen am Auslass (6) ersichtlich.

Tabelle 4-4: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario III, infolge des Wärmeaustauschprozesses Abwasser - Erdreich

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,995
3	14,991
4	14,986
5	14,981
6	14,977

4.1.4 Szenario IV – Kombination der Wärmeaustauschprozesse

Durch Koppelung der soeben genannten Wärmeaustauschprozesse ist ein höherer Temperaturabfall gegenüber den beiden vorherigen Szenarien zu erkennen. Der zeitlich konstante Temperaturabfall um etwa $0,04\text{ °C}$ auf 2000 m Halungslänge bei den vorliegenden hydraulischen und geometrischen Bedingungen, ist in Abbildung 4-4 sowie Tabelle 4-5 ersichtlich und als plausibel anzusehen.

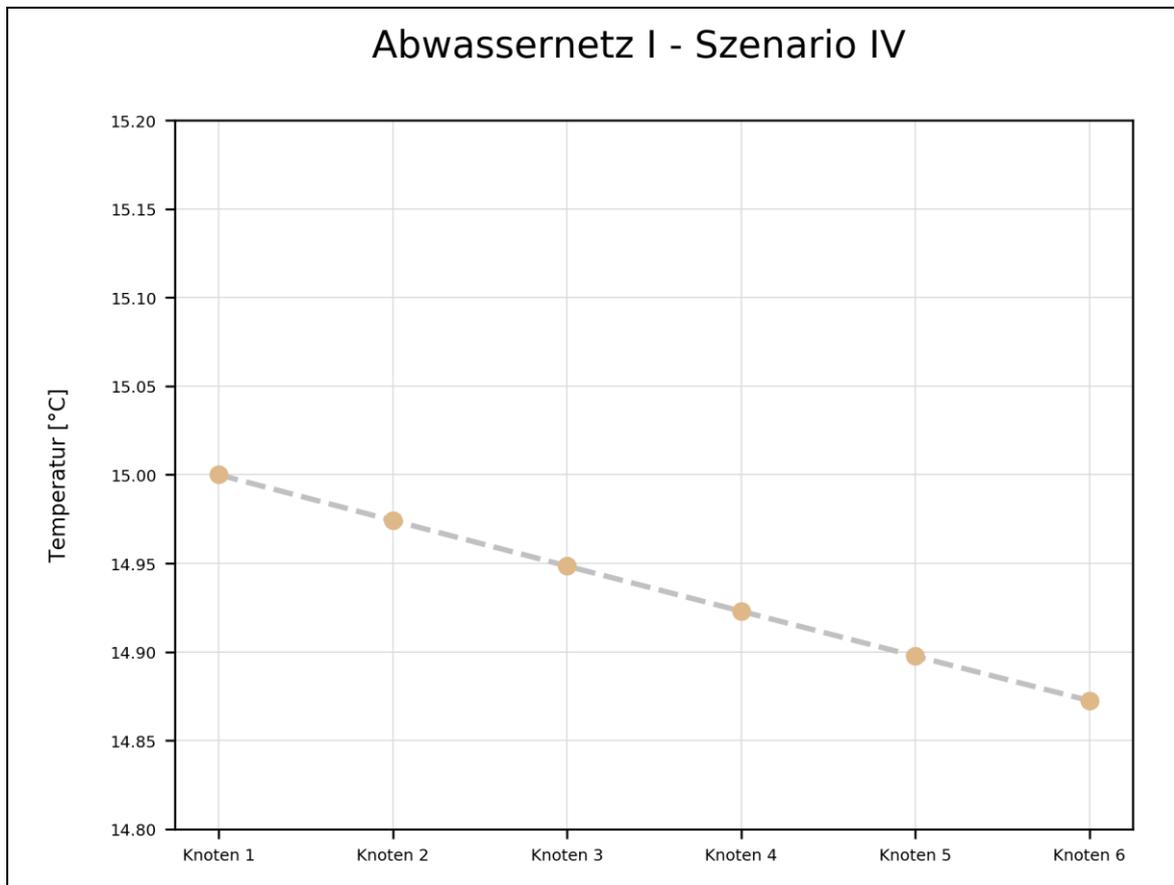


Abbildung 4-4: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario IV mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Tabelle 4-5: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario IV, infolge der Kombination der Wärmeaustauschprozesse

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,993
3	14,986
4	14,979
5	14,971
6	14,964

4.1.5 Szenario V – Variierung der Haltungslänge

Infolge der Haltungslängenverkürzung auf je 100 m resultiert eine Gesamtlänge von 500 m. Die Reduktion der Haltungslänge bewirkt einen geringeren Temperaturabfall. Dies ist auf die damit resultierende Verringerung der Austauschfläche zwischen Abwasser und Kanalluft sowie Abwasser und Erdreich zurückzuführen. In Abbildung 4-5 und Tabelle 4-6 ist der Temperaturabfall dargestellt.

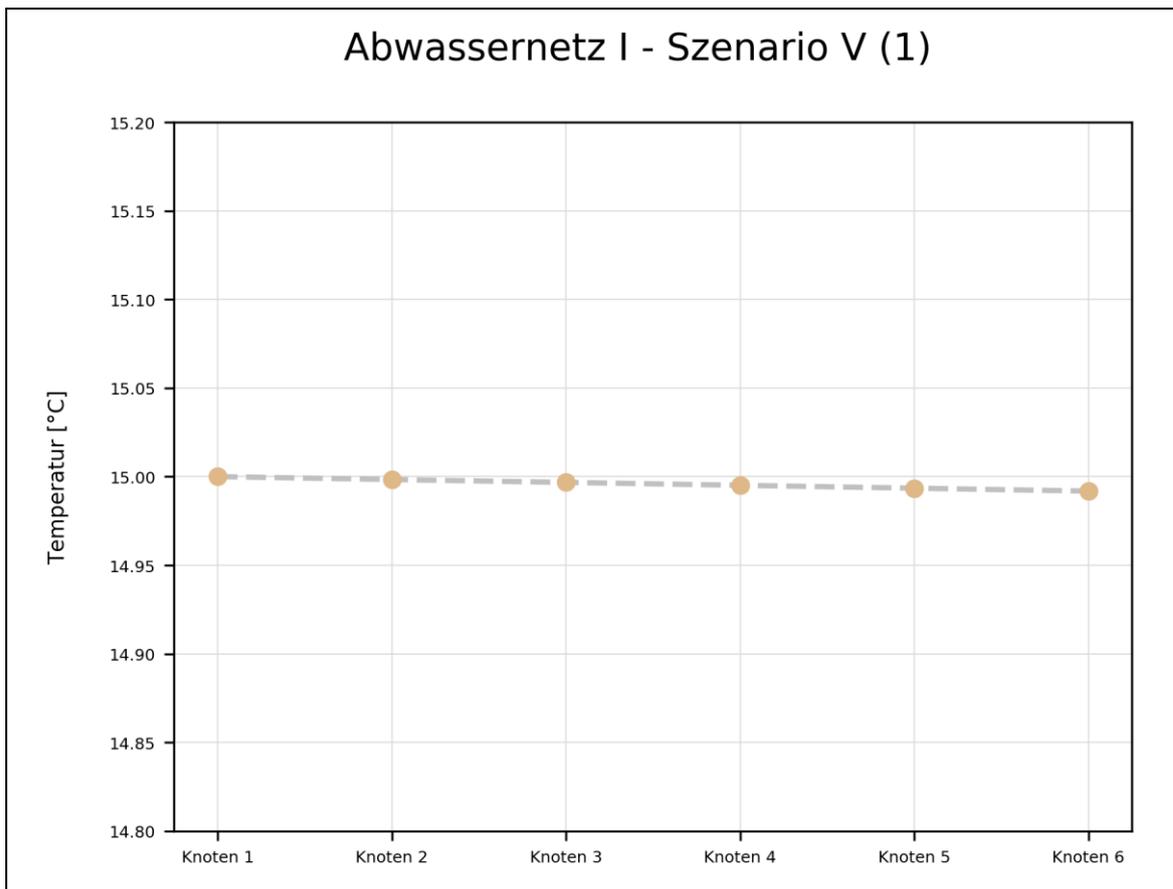


Abbildung 4-5: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario V – Reduktion der Haltungslänge – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Tabelle 4-6: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario V, infolge einer Verkürzung der Haltungslänge auf je 100 m

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,998
3	14,997
4	14,995
5	14,993
6	14,992

Die gegenteilige Auswirkung ist in Abbildung 4-6 bei Erweiterung der Haltungslänge erkennbar. Durch Verlängerung der Haltungen auf je 800 m ist die benetzte Fläche vergrößert, was zu einer höheren Abkühlung führt. Die entsprechenden Temperaturen am Auslass (6) sind in Tabelle 4-7 ersichtlich.

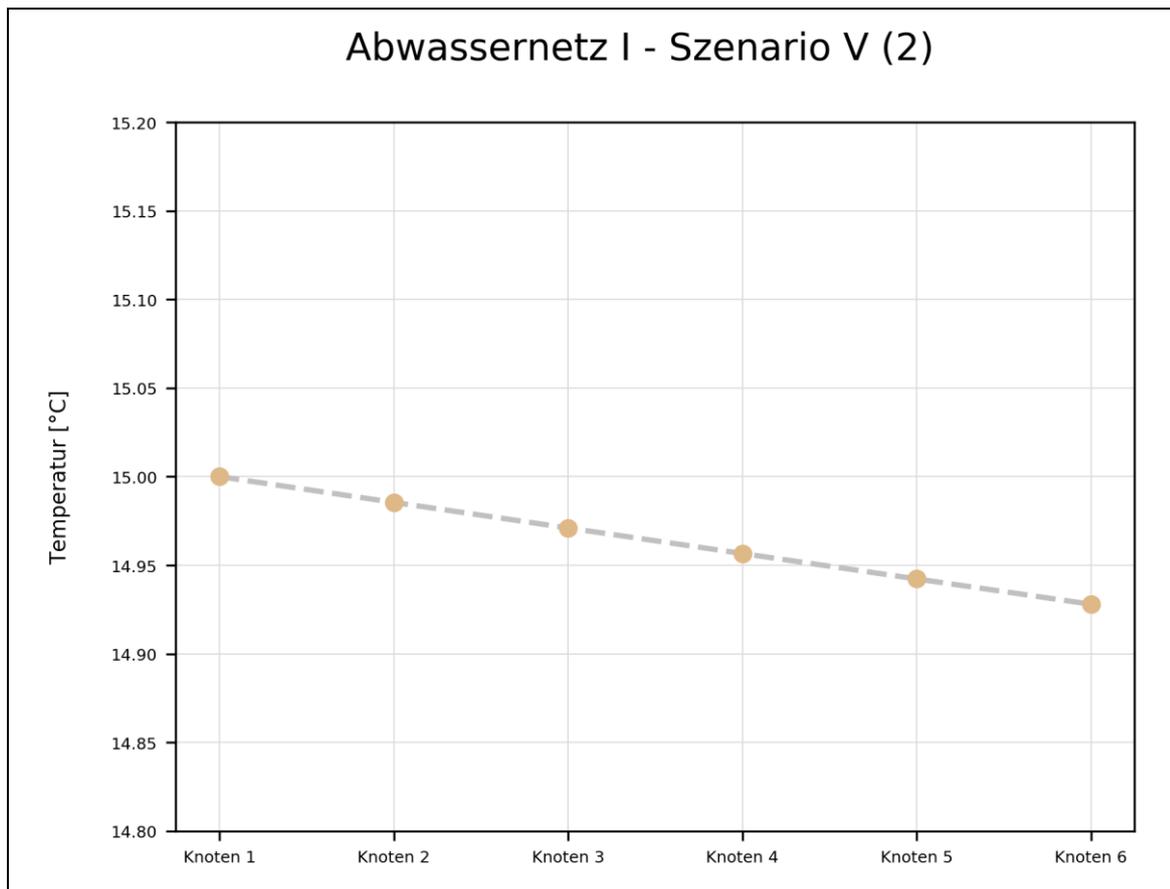


Abbildung 4-6: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario V – Erweiterung der Haltungslänge – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Tabelle 4-7: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario V, infolge der Verlängerung der Haltungslänge auf je 800 m

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,985
3	14,971
4	14,956
5	14,942
6	14,928

4.1.6 Szenario VI – Variierung der Einleitungstemperatur

Infolge der kühleren Abwassertemperatur gegenüber der Temperatur der Kanalluft und des Erdreichs ist, wie in Abbildung 4-7 ersichtlich, eine Erwärmung

des Abwassers zu erkennen. Die Erwärmung um ungefähr 0,04 °C ist, wie in Tabelle 4-8 dargestellt, infolge der Temperaturdifferenz zwischen Abwasser und der Umwelt als plausibel anzusehen.

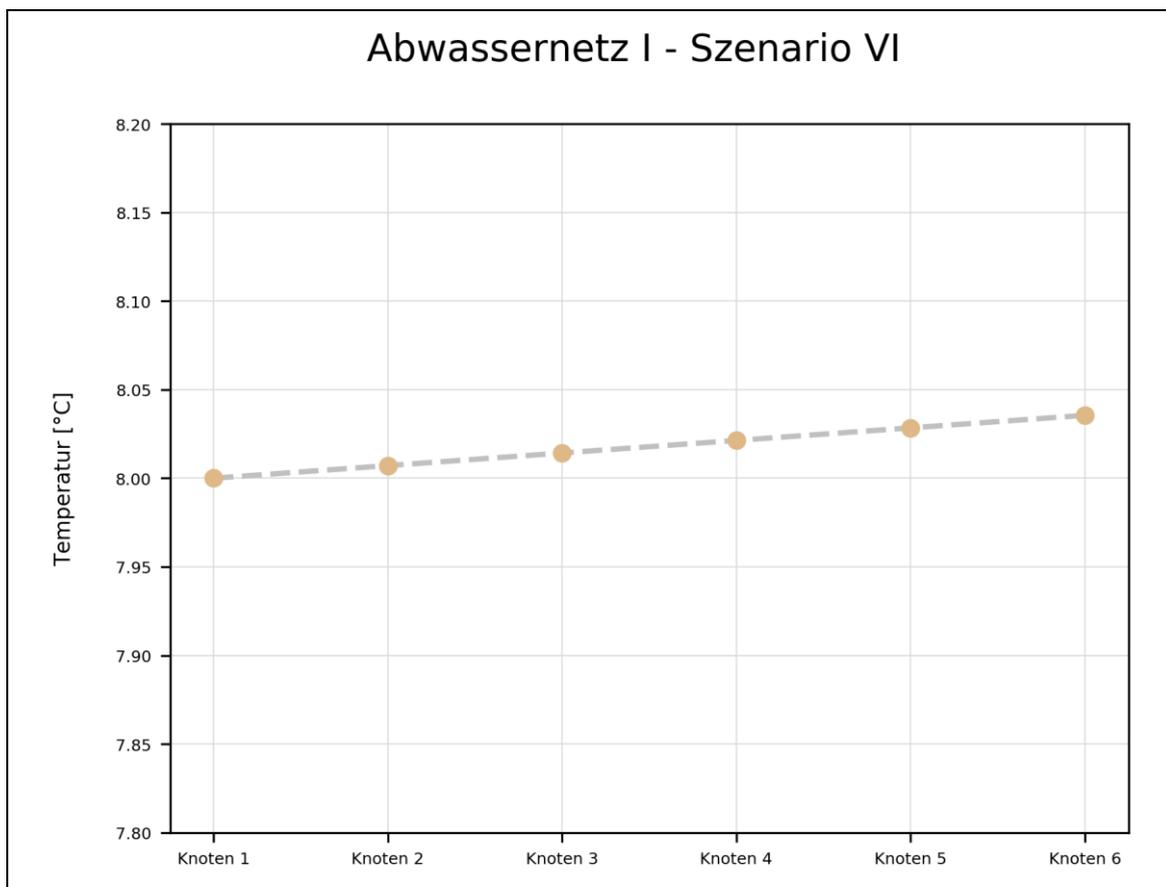


Abbildung 4-7: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario VI – Variierung der Haltungslänge – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Tabelle 4-8: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario VI, infolge einer Einleitungstemperatur von 8 °C

Knoten	Temperatur [°C]
1	8
2	8,007
3	8,014
4	8,022
5	8,029
6	8,036

4.1.7 Szenario VII – Jahresganglinie Kanalluft und Erdreich

In den Wintermonaten ist, wie in Abbildung 4-8 entnehmbar, eine Abkühlung des zufließenden Abwassers erkennbar. In den Sommermonaten kann das Gegenteil beobachtet werden.

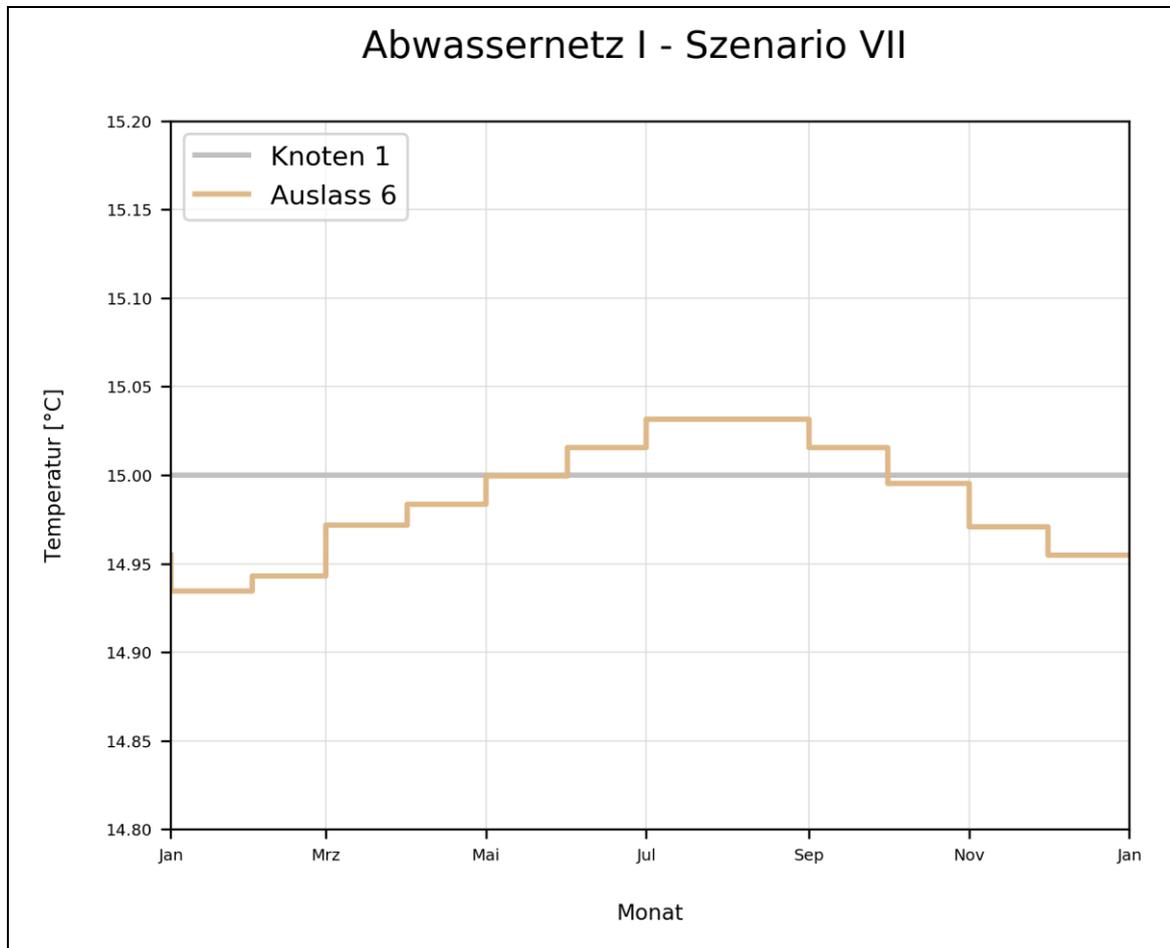


Abbildung 4-8: Ergebnis von Abwassernetz I, Szenario VII –jahreszeitliche Veränderung der Abwassertemperatur – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Da stets 15 °C an Knoten 1 eingeleitet werden, sind Temperaturdifferenzen zwischen +0,032 und -0,065 als plausibel anzusehen (Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9: Temperatur am Auslass (6) aus der Simulation von Abwassernetz I – Szenario VII, in Abhängigkeit des Monats

Monat Temperatur					
<i>Jänner</i>		14,935 °C	<i>Februar</i>		14,943 °C
<i>März</i>		14,972 °C	<i>April</i>		14,984 °C
<i>Mai</i>		15,000 °C	<i>Juni</i>		15,016 °C
<i>Juli</i>		15,032 °C	<i>August</i>		15,032 °C
<i>September</i>		15,016 °C	<i>Oktober</i>		14,995 °C
<i>November</i>		14,971 °C	<i>Dezember</i>		14,955 °C

4.2 Abwassernetz II

In Tabelle 4-10 ist ein Überblick der Ergebnisse aus Abwassernetz II dargestellt. In den Szenarien wurden die Mischungsrechnung, Zuflüsse an mehreren Knoten sowie die Entnahme von Wärme aus dem Abwasser untersucht.

Tabelle 4-10: Szenarien I bis III des Abwassernetzes II mit den zu erwartenden Reaktionen

Szenario	Erwartete Reaktion	Simulationsergebnis
I	<i>Bei Knoten 3 soll eine Temperatur von ca. 20 °C und bei Knoten 5 knapp unter 20 °C ersichtlich sein</i>	Absenkung der Abwassertemperatur (siehe Tabelle 4-11)
II	<i>Zufluss an Knoten 7 mit 0,5 m³/s und einer Temperatur von 10 °C bewirkt eine Reduktion der Temperatur an allen Folgeknoten sowie am Auslass</i>	Absenkung der Abwassertemperatur (siehe Tabelle 4-12)
III	<i>Temperatursprung zwischen Knoten 3 und Knoten 4 infolge der Temperaturentnahme an Haltung 3</i>	Temperaturänderung innerhalb von Haltung 3 klar erkennbar

4.2.1 Szenario I – Mischungsrechnung

Wie erwartet, ist am Knoten 3 ein sprunghafter Anstieg der Temperatur zu erkennen. Dies resultiert aus der hohen Temperatur bei Haltung 6. Wie in Abbildung 4-9 und Tabelle 4-11 ersichtlich, ist am Knoten 6 ein Temperaturabfall um etwa 1 °C zu erkennen, wodurch letztlich die Temperatur von ungefähr 19,4 °C am Auslass (6) resultiert.

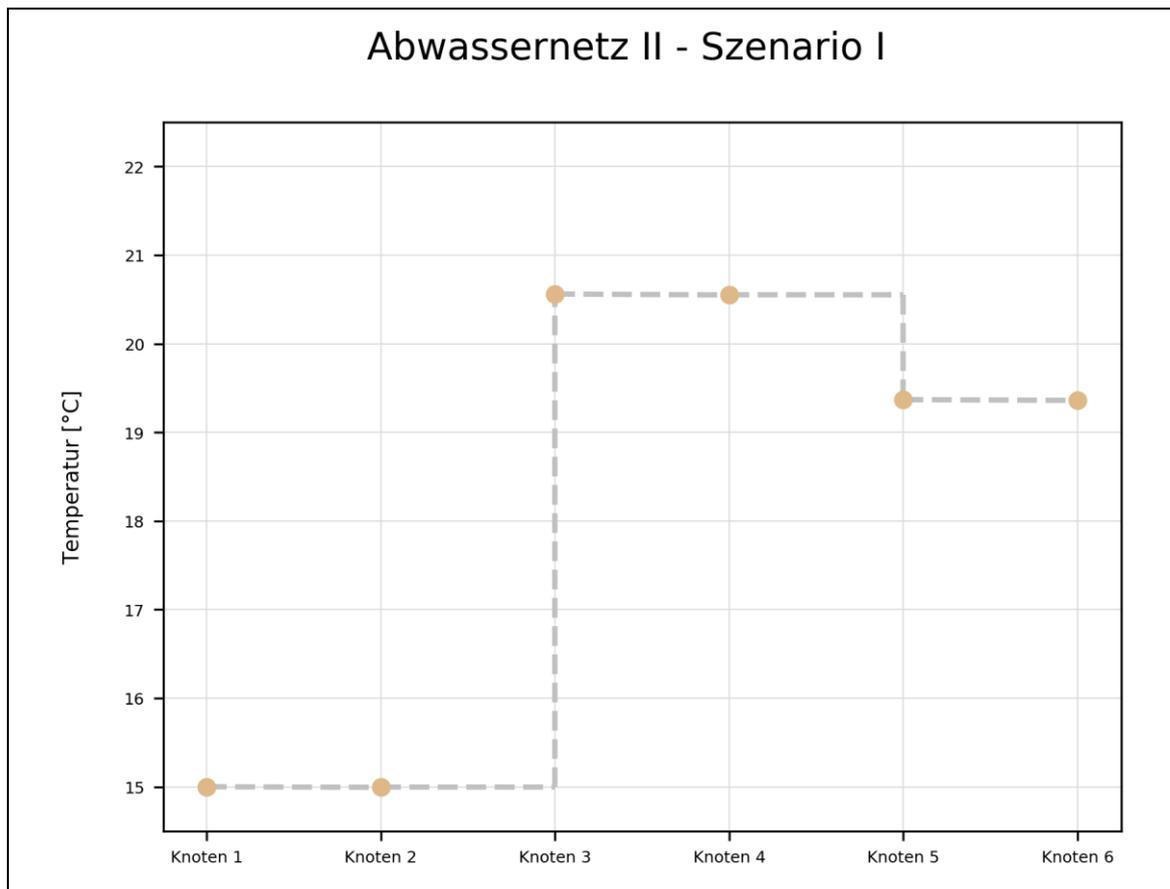


Abbildung 4-9: Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario I – Mischungsrechnung – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Die Temperaturreduktion infolge der Wärmeaustauschprozesse ist gegenüber den Temperaturveränderungen aufgrund der Mischungen an den Knoten kaum zu erkennen. Die vorliegenden Ergebnisse entsprechen der zu erwartenden Reaktion aus Kapitel 3.3.2.1.

Tabelle 4-11: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz II – Szenario I, infolge der Mischung mehrerer Abflüsse

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,994
3	20,561
4	20,550
5	19,369
6	19,360

4.2.2 Szenario II – Zufluss am Knoten mit Ganglinie

In Abbildung 4-9 ist der Temperaturverlauf von Knoten 1, 3 und 7 sowie vom Auslass erkennbar. Die einzelnen Abstufungen resultieren aus der in Tabelle 3-6 definierten Aktivierung/Deaktivierung der Zuflüsse.

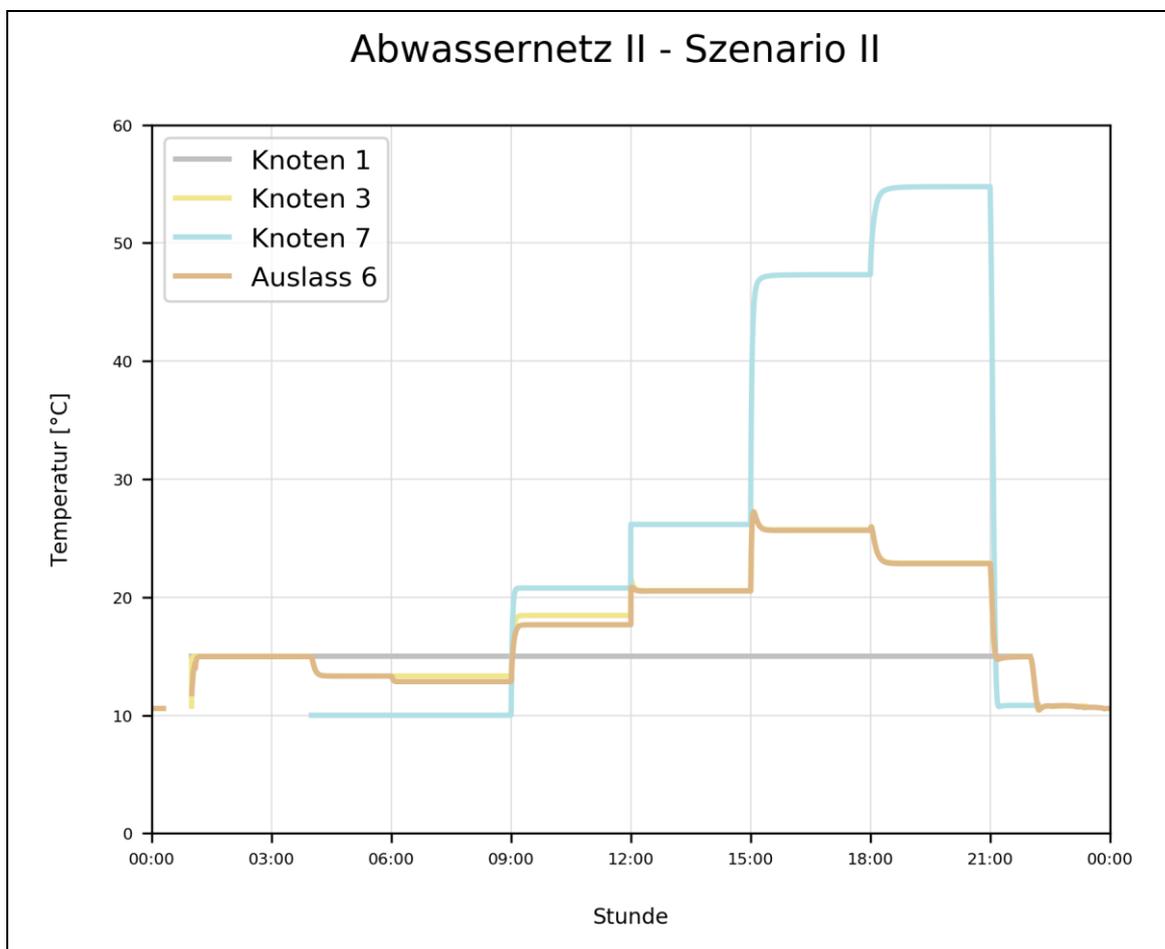


Abbildung 4-10: Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario II – Ganglinien für Knotenzuflüsse – mit dem Temperaturverlauf von Knoten 1, 3, 7 und vom Auslass

Zu Stunde 0 ist kurzzeitig ein Temperaturverlauf am Auslass erkennbar. Dieser tritt infolge der gewählten Simulationseinstellungen auf. Die Simulation beginnt einige Stunden vor der Aufzeichnung der Ergebnisse. Zum Zeitpunkt des Aufzeichnungsbeginns ist eine geringe Abflussmenge aus Stunde 23 des Vortages vorhanden, wodurch am Auslass eine Temperatur von 10,6 °C detektiert wurde.

Zu Beginn wird der Zufluss an Knoten 1 zur Stunde 1 aktiviert. Danach erfolgt die Aktivierung des Zuflusses an Knoten 7 mit einer Temperatur von 10 °C. Dies wirkt sich wie erwartet in Form einer Temperaturabsenkung am Auslass aus. Zu Stunde 6 wird ein weiterer Zufluss mit der Temperatur von 10 °C aktiviert, wodurch wiederum eine Absenkung am Auslass erkennbar ist. Die Temperatur an Knoten 3 ändert sich hierbei nicht, da der soeben aktivierte Zufluss stromabwärts in den Hauptstrang mündet. Die Zuflüsse an den Knoten 9, 10 und 11 werden zu Beginn von Stunde 9 aktiviert. Die Mischung der insgesamt vier Zuflüsse

an Knoten 7, ergibt wie erwartet eine Mischungstemperatur von 20,8 °C. Infolge der Deaktivierung des Zuflusses an Knoten 7 und 8 (Stunde 12) erhöht sich die Temperatur an Knoten 7 und am Auslass. Ein besonders hoher Anstieg der Temperatur ist innerhalb von Stunde 16 erkennbar, da hier der Zufluss mit 5 °C an Knoten 11 deaktiviert wird. Dies führt zu einer Mischung der beiden Abflüsse mit ungefähr 55 °C und 40 °C, wodurch eine Temperatur von 47,3 °C an Knoten 7 resultiert. Parallel dazu wird wie erwartet ein Temperaturanstieg am Auslass detektiert. Interessant ist hierbei der kurzzeitige Anstieg infolge der Deaktivierung eines Zuflusses (siehe Abbildung 4-11).

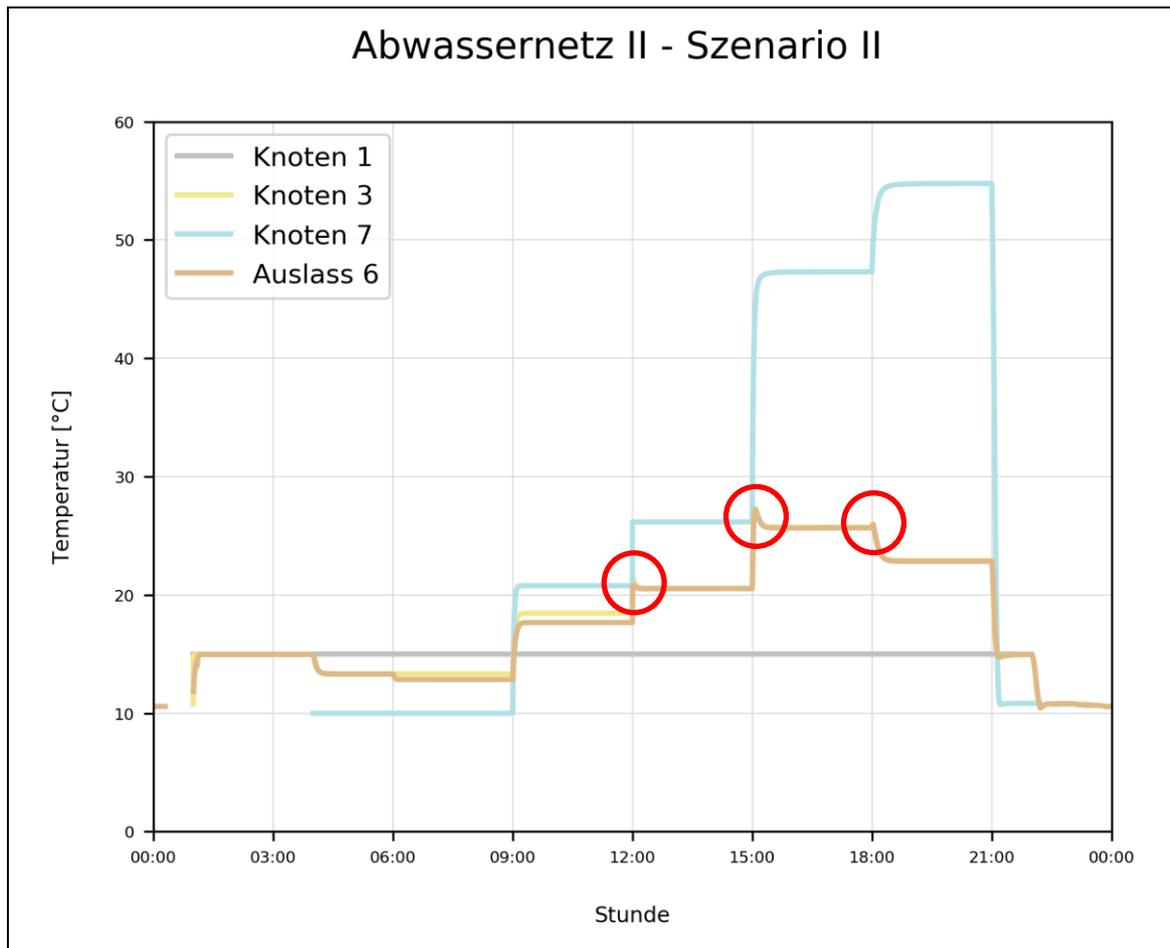


Abbildung 4-11: Rot markiert: kurzzeitiger Temperaturanstieg nach der Deaktivierung von Zuflüssen

Zu jedem Zeitschritt werden die hydraulischen Variablen der Haltungen neu berechnet, unter anderem der benetzte Umfang sowie die Wasserspiegelbreite, welche in die Berechnung der Temperaturänderung miteinfließen. Diese werden wie in A.2.3 beschrieben, anhand des Wasserstandes im stromaufwärts liegenden Knoten und im stromabwärts liegenden Knoten berechnet. Durch das Deaktivieren des Zuflusses an einem Knoten verändern sich die hydraulischen Variablen bei allen Folgeknoten. Speziell in diesem Szenario bedeutet dies, dass durch die Deaktivierung des Zuflusses an Knoten 7 der Wasserstand an allen Folgeknoten abnimmt. Der kurzzeitige Temperaturanstieg entsteht an Knoten 3

und ist bis zum Auslass zu beobachten. Der Grund dafür ist, dass von Haltung 2 eine konstante Temperatur zufließt, aber infolge der Wasserstandveränderung in Knoten 3 sich der benetzte Umfang und die Wasserspiegelbreite in Haltung 2 ändern. Der kurzzeitige Temperaturanstieg ist besonders stark ausgeprägt, da sehr hohe Temperaturunterschiede (z.B. Knoten 9 – 55 °C, Knoten 7 – 10 °C) gegeben sind. Da es sich hierbei jedoch nur um eine kurzzeitige Abweichung gegenüber der Realität handelt sowie unüblich hohe Temperaturunterschiede angenommen wurden und das Anwendungsgebiet des Temperaturmodells vorwiegend eine Langzeituntersuchung sein wird, kann diese Abweichung unberücksichtigt bleiben.

Letztlich erfolgt durch die Deaktivierung aller Zuflüsse ein Temperaturabfall auf ungefähr 10,7 °C am Auslass. Der Temperaturverlauf ist trotz der Deaktivierung zu Stunde 22 ersichtlich, da weiterhin eine stets abnehmende und geringe Abflussmenge die Haltungen durchströmt.

Nachfolgend ist eine Übersicht der Zahlenwerte aus diesem Szenario dargestellt. Es wird jeweils Minute 30 jeder Stunde dargestellt, sodass die Reaktion bzw. Durchmischung infolge Zuflussaktivierung bzw. -deaktivierung bereits erfolgte. Der Wert „NaN“ steht für „Not a Number“ und wird im Zuge der Implementierung des Temperaturmodells in SWMM verwendet. „NaN“ kennzeichnet, dass kein Abwasser innerhalb des betrachteten Zeitpunkts im Knoten vorhanden ist.

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-12: Ergebnis aus Abwassernetz II – Szenario II aller Knoten über einen Tag

Knoten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Stunde											
0	NaN	NaN									
1	15,00	14,99	14,99	14,98	14,97	14,97	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
2	15,00	14,99	14,99	14,98	14,97	14,97	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
3	15,00	14,99	14,99	14,98	14,97	14,97	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
4	15,00	14,99	13,33	13,33	13,32	13,32	10,00	NaN	NaN	NaN	NaN
5	15,00	14,99	13,33	13,32	13,32	13,32	10,00	NaN	NaN	NaN	NaN
6	15,00	14,99	13,33	13,32	12,85	12,85	10,00	10,00	NaN	NaN	NaN
7	15,00	14,99	13,33	13,32	12,85	12,85	10,00	10,00	NaN	NaN	NaN
8	15,00	14,99	13,33	13,32	12,85	12,85	10,00	10,00	NaN	NaN	NaN
9	15,00	14,99	18,45	18,44	17,67	17,67	20,78	10,00	55,00	40,00	5,00
10	15,00	14,99	18,45	18,44	17,67	17,67	20,78	10,00	55,00	40,00	5,00
11	15,00	14,99	18,45	18,44	17,67	17,67	20,78	10,00	55,00	40,00	5,00
12	15,00	14,99	20,56	20,55	20,53	20,52	26,16	NaN	55,00	40,00	5,00
13	15,00	14,99	20,56	20,55	20,54	20,53	26,16	NaN	55,00	40,00	5,00
14	15,00	14,99	20,56	20,55	20,54	20,53	26,16	NaN	55,00	40,00	5,00
15	15,00	14,99	25,73	25,71	25,69	25,67	47,23	NaN	55,00	40,00	NaN
16	15,00	14,99	25,72	25,70	25,68	25,66	47,31	NaN	55,00	40,00	NaN
17	15,00	14,99	25,72	25,70	25,68	25,66	47,31	NaN	55,00	40,00	NaN
18	15,00	14,99	22,93	22,91	22,89	22,88	54,61	NaN	55,00	NaN	NaN
19	15,00	14,99	22,90	22,88	22,86	22,84	54,76	NaN	55,00	NaN	NaN
20	15,00	14,99	22,90	22,88	22,86	22,84	54,77	NaN	55,00	NaN	NaN
21	15,00	14,99	14,94	14,93	14,93	14,92	10,83	NaN	NaN	NaN	NaN
22	NaN	10,77	10,76	10,78	10,79	10,80	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
23	NaN	NaN	NaN	10,70	10,66	10,68	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Alle erwarteten Reaktionen aus Kapitel 3.3.2.2 wurden bestätigt und die Ergebnisse sind somit als plausibel anzusehen.

4.2.3 Szenario III – Wärmetauscher

Auf Basis von Szenario I wird in den beiden folgenden Szenarien eine Temperatur- bzw. Wärmeentnahme dargestellt.

4.2.3.1 Temperatur [°C]

Die Temperatur innerhalb der Haltung 3 wird konstant um 0,5 °C abgesenkt. Dieser Temperaturabfall ist im weiteren Verlauf erkennbar.

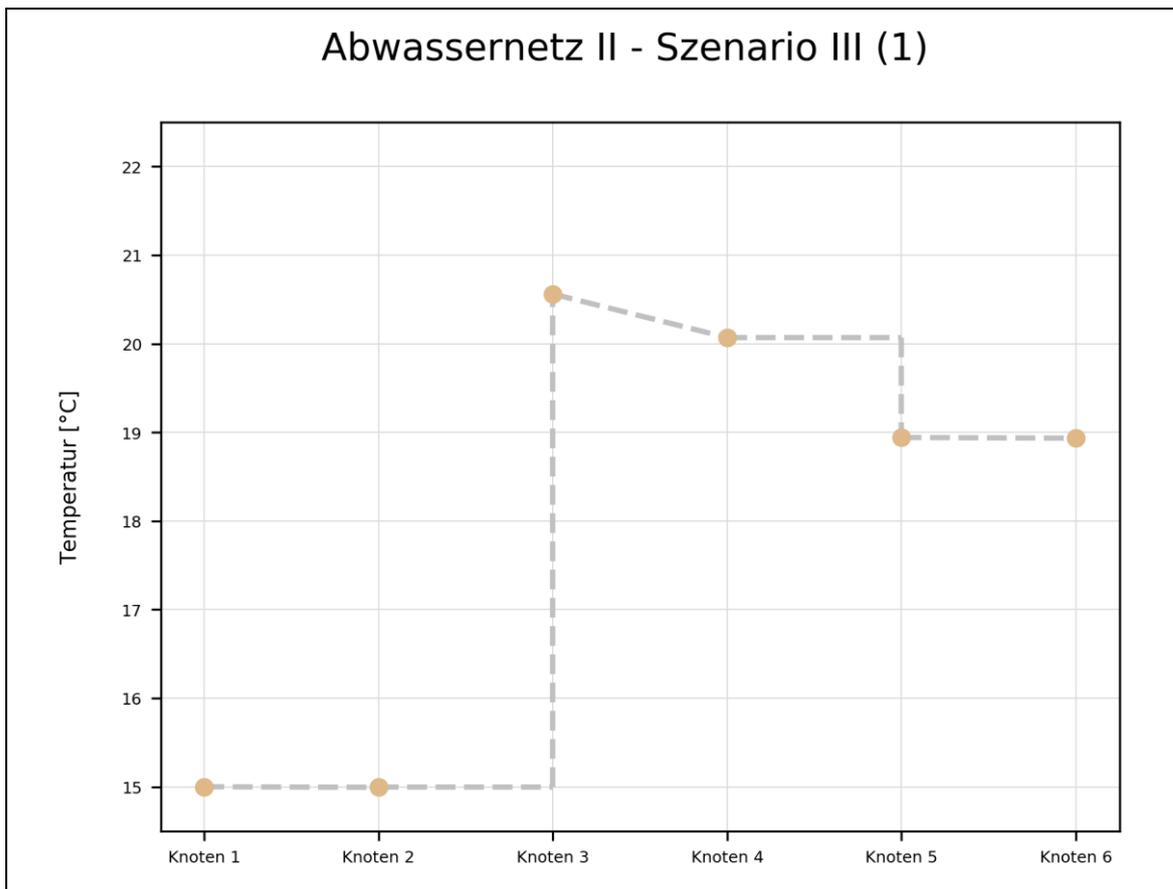


Abbildung 4-12: Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario III – konstante Temperaturabsenkung zwischen Knoten 3 und 4 – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Die Temperaturdifferenz zwischen Knoten 4 und dem Auslass (6) beträgt 1,135 °C und ist damit gegenüber Szenario I (1,190 °C) geringer. Aufgrund der Abkühlung des Abwassers resultiert ab Knoten 4 eine geringere Temperaturdifferenz zwischen Medium und Umwelt im Vergleich zu Szenario I. Wie in Kapitel 3.1.2 erläutert, fließt die Temperaturdifferenz zwischen Abwasser und Erdreich/Kanalluft in die Temperaturberechnungen ein. Je größer die vorliegende Differenz, desto mehr Wärme wird ausgetauscht.

Tabelle 4-13: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz II – Szenario III, infolge der Temperaturabsenkung innerhalb von Haltung 3

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,994
3	20,561
4	20,069
5	18,942
6	18,934

4.2.3.2 Leistung [W]

Parallel zur konstanten Temperaturänderung wird über einen mit konstanter Leistung betriebenen Wärmetauscher thermische Energie entnommen. Wie in Abbildung 4-13 und Tabelle 4-14 ersichtlich, ist unter vorliegenden hydraulischen und geometrischen Bedingungen, bei einer konstanten Wärmeentnahme von 250 kW, eine geringe Temperaturabsenkung erkennbar.

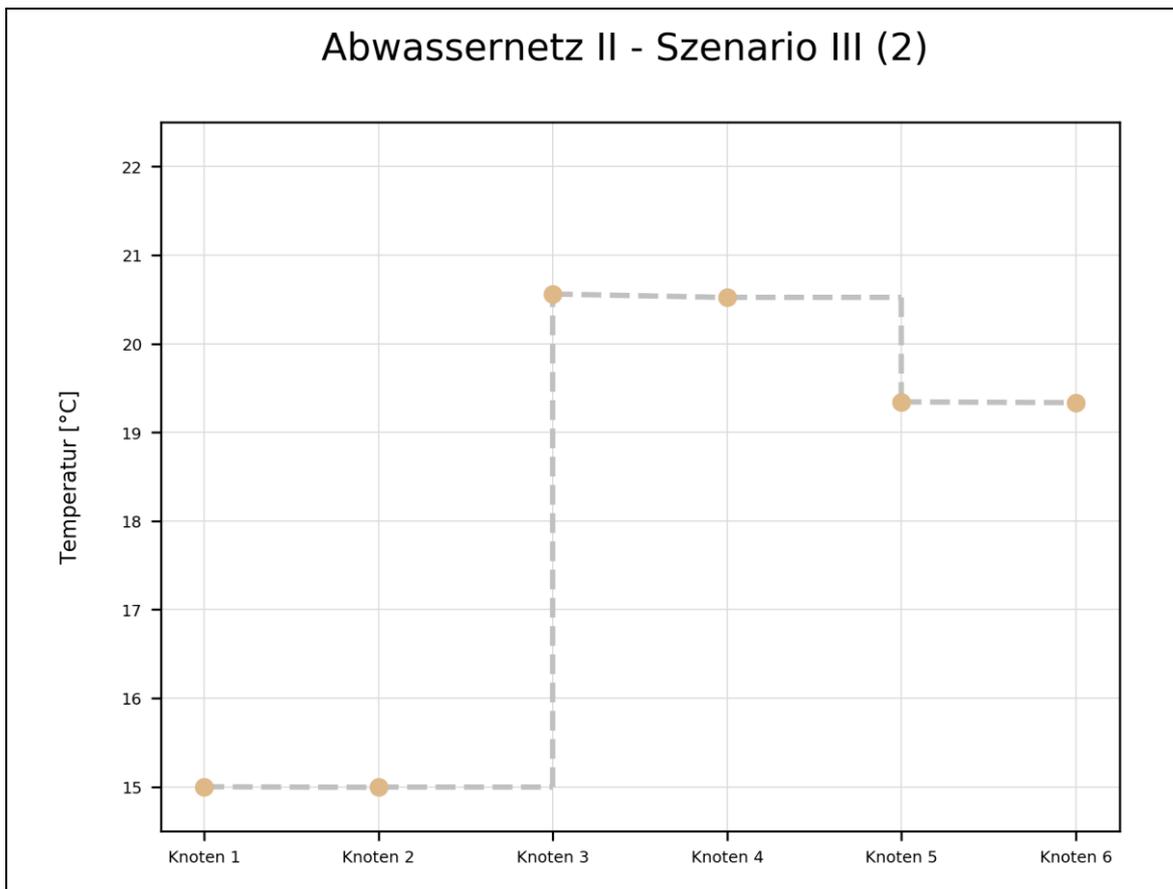


Abbildung 4-13: Ergebnis von Abwassernetz II, Szenario III – konstante Wärmeentnahme zwischen Knoten 3 und 4 – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Infolge einer Wärmeentnahme in der Höhe von 250 kW wird die Temperatur zwischen Knoten 3 und 4 um 0,039 °C abgesenkt.

Tabelle 4-14: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz II – Szenario III, infolge der Wärmeentnahme innerhalb von Haltung 3

Knoten	Temperatur [°C]
1	15
2	14,994
3	20,561
4	20,522
5	19,344
6	19,335

Beide Szenarien der Temperaturentnahme resultieren wie erwartet in einer Temperaturabsenkung des Abwassers und sind somit als plausibel anzusehen.

4.3 Abwassernetz III

Analog zu Abwassernetz I – Szenario IV wurde hier ein geradliniger Strang mit einer Abflussrate von $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Einleitungstemperatur von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ untersucht. Dabei ist Knoten 4 als Speicherknoten ausgebildet. Abbildung 4-14 zeigt den Temperaturverlauf vom Einleitungsknoten (1) bis zum Auslass (6).

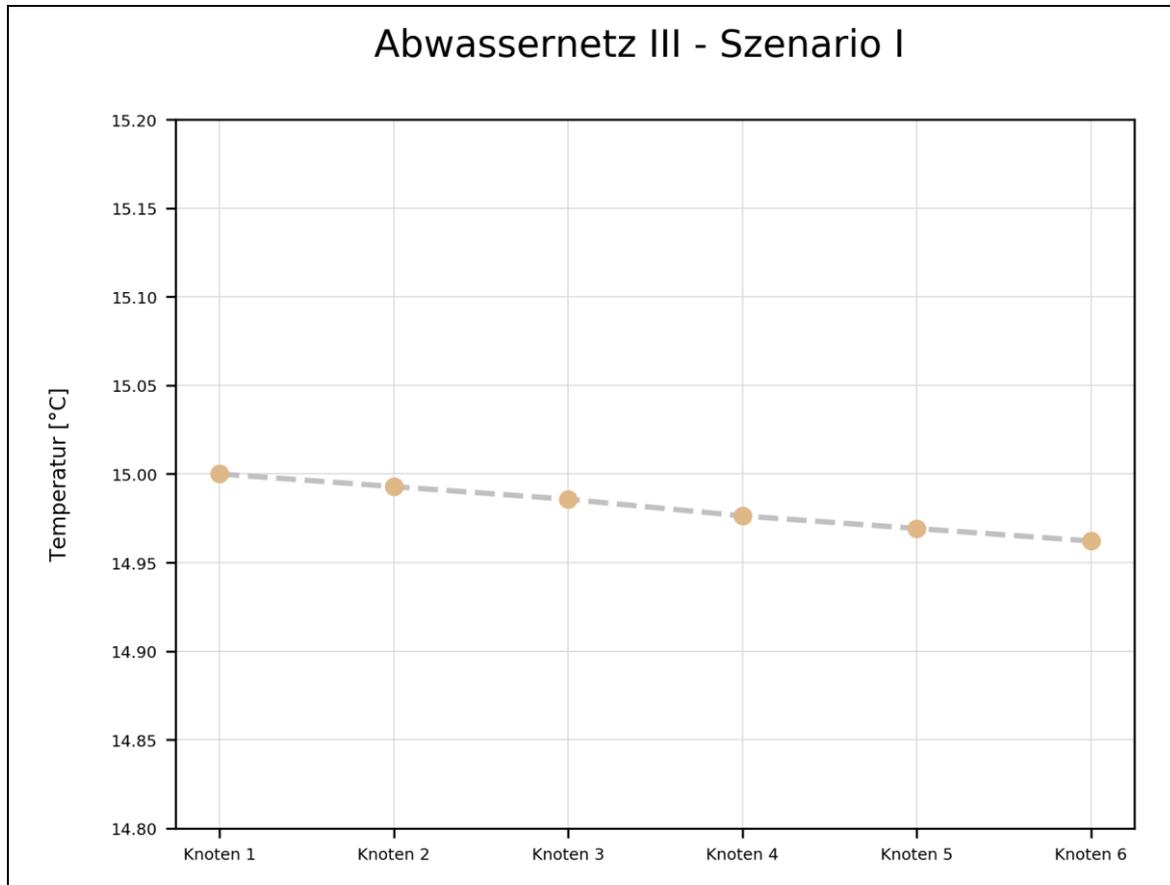


Abbildung 4-14: Ergebnis von Abwassernetz III – Ausbildung von Knoten 4 als Speicherknoten – mit dem Temperaturverlauf des Einleitungsknoten (1) und des Auslasses (6)

Nachfolgend sind die Zahlenwerte dargestellt. In der rechten Spalte wird zum Vergleich das Ergebnis aus Abwassernetz I, Szenario IV angegeben. Hierbei ist wie erwartet eine betragsmäßig höhere Abkühlung aufgrund des Speicherknotens zu erkennen.

Tabelle 4-15: Mitte: Temperatur je Knoten aus der Simulation von Abwassernetz III, unter Berücksichtigung eines Speicherknotens; Rechts: zum Vergleich die Temperatur je Knoten aus Abwassernetz I – Szenario IV

Knoten	Temperatur [°C]	Abwassernetz I – Szenario IV Temperatur [°C]
1	15	15
2	14,993	14,993
3	14,986	14,986
4	14,976	14,979
5	14,969	14,971
6	14,962	14,964

5 Schlussfolgerung, Zusammenfassung und Ausblick

Die thermische Energiegewinnung aus Abwasser ist in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht in vielen Situationen sinnvoll und attraktiv. Es gibt unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten, unter anderem die thermische Energiegewinnung im Bereich der Kanalisation. Hierbei ist die Durchflussrate sowie die unmittelbare Nähe zur/zum VerbraucherIn vorteilhaft. Innerhalb der Kanalisation ist eine willkürliche Temperaturentnahme in Bezug auf Position und Größe nicht möglich, da die Auswirkungen auf die Abwasserreinigung in der ARA zu berücksichtigen sind. Infolge einer geringeren Temperatur sinkt die Wachstumsrate der Bakterien, welche für die Stickstoffelimination zuständig sind. Mithilfe eines Temperaturmodells für das Abwasser in der Kanalisation können unter Berücksichtigung des zuvor genannten Kriteriums geeignete Positionen für die thermische Energiegewinnung aus dem Abwasser lokalisiert werden.

Auf Basis physikalischer Vorgänge wurden von Dürrenmatt und Wanner (2006; 2008) sowie Abdel-Aal (2015) funktionsfähige Temperaturmodelle entwickelt. Ersteres ist besonders umfangreich und berücksichtigt eine Vielzahl von Wärmeaustauschprozessen. Abdel-Aal reduzierte diese auf die beiden Austauschprozesse zwischen Abwasser und Erdreich sowie Abwasser und Kanalluft, wodurch die Anzahl der Eingangsparameter stark abnimmt. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde in der vorliegenden Arbeit ein Temperaturmodell entwickelt und in SWMM integriert. Damit ist es möglich, im Zuge der hydrodynamischen Modellierung eines Abwassernetzes, die Temperaturentwicklung im System zu betrachten. Knoten, Speicherknoten und Haltungen sind ständig den Prozessen des thermischen Energieaustauschs ausgesetzt und können anhand der Integration des Temperaturmodells in SWMM zu jedem Zeitschritt analysiert werden.

Anhand der gewählten Szenarien wurden die grundlegenden Funktionen des Modells bestätigt. Alle Ergebnisse sind anhand physikalischer Gesetze erklärbar und als plausibel anzusehen. Speziell Szenario III aus Abwassernetz II – konstante Wärmeentnahme mittels Wärmetauscher – zeigt, dass bei der Entnahme von Energie aus dem Abwasser in Abhängigkeit des Durchflusses nur eine geringe Abkühlung erforderlich ist. Besonders im Abwassernetz der Stadt Graz, speziell im südlichen Abschnitt, ist ein hoher Durchfluss vorhanden, wodurch eine geeignete Position zur thermischen Energieentnahme auffindbar ist.

Weitere Untersuchungen in Bezug auf jahreszeitliche Schwankungen sind anhand von Messungen durchzuführen. Auf Basis dieser Messungen hat anschließend die Kalibrierung des Modells zu erfolgen. Die gewählten Messstrecken sollten dabei möglichst unterschiedliche Charakteristiken, in Bezug auf Durchfluss, Temperatur, Geometrie, etc. aufweisen. Bei den implementierten Austauschprozessen werden verschiedene Parameter der Literatur entnommen. Im Zuge der

Kalibrierung gilt es die Parameter, beispielweise die Luftgeschwindigkeit im Kanal, entsprechend den örtlichen, hydraulischen und geometrischen Bedingungen anzupassen, um so realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten.

Das in dieser Arbeit betrachtete Temperaturmodell erlaubt es, weitere Wärmeaustauschprozesse hinzuzufügen. Beispielsweise kann das Hinzufügen biochemischer Prozesse, welche Wärme produzieren, oder Prozesse in Verbindung mit der Kondensation zu einem besseren, sprich realitätsnäheren Ergebnis führen. Eine Abschätzung in Bezug auf Auswirkungen infolge der Integration zusätzlicher Prozesse sowie der zu erwartenden Veränderung der Ergebnisse wird vorab empfohlen.

Die Integration in SWMM ist dahingehend gestaltet, dass möglichst geringfügige Modifikationen am Quellcode erfolgten. Die schrittweise Adaption des Quellcodes zur erfolgreichen Integration des Temperaturmodells in SWMM ist im Anhang beschrieben.

Letztlich soll diese Arbeit als Grundlage für die Weiterentwicklung des Temperaturmodells in Verbindung mit SWMM dienen, sodass das gesamte Abwassernetz der Stadt Graz in Verbindung mit dem Temperaturmodell modelliert werden kann. Damit steht ein Entscheidungswerkzeug zur Verfügung, welches das Risiko und Potential einer thermischen Energiegewinnung aus dem Abwassernetz aufzeigt.

Literaturverzeichnis

- AAEV (1996) *Abwasseremissionsverordnung*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- Abdel-Aal M. (2015) Modelling the Viability of Heat Recovery from Underground Pipes. Deterministic modelling of wastewater temperatures in a 3000 sewer pipe network.
- Abdel-Aal M., Smits R., Mohamed M., De Gussem K., Schellart A., & Tait S. (2014) Modelling the viability of heat recovery from combined sewers. *Water Science & Technology*, **70**(2), 297.
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (2010) Heizen und Kühlen mit Abwasser. [online] https://awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/energie_radi-oaktive_abfaelle/waermenutzung_ausuntergrundwasser/abwasser/_jcr_content/contentPar/downloadlist/downloaditems/1596_1433140855118.spooler.download.1433141005406.pdf/Heizen_Kuehlen_Abwasser.pdf (Zugegriffen 24. März 2018).
- Bever J. (2002) *Weitergehende Abwasserreinigung*, Oldenbourg Industrieverlag.
- Bischofsberger & Seyfried (1984) *Wärmeentnahme aus Abwasser*,
- Böckh P. & Wetzel T. (2017) *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*, Springer Berlin, Berlin.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2017) Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. [online] https://www.bmnt.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie/strategie-kontext.html (Zugegriffen 4. April 2018).
- CHI (2018) EPA SWMM 5.1.012 Visual Code Explorer. [online] <https://www.openswmm.org/SWMM51012/VisualCodeExplorer> (Zugegriffen 29. März 2018).
- Dürrenmatt D. J. (2006) *Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr*, ETH Zurich. [online] <http://hdl.handle.net/20.500.11850/150668> (Zugegriffen 6. April 2018).
- Dürrenmatt D. J. & Wanner O. (2013) A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, **48**, 548–558.
- Dürrenmatt D. J. & Wanner O. (2008) Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science & Technology*, **57**(11), 1809.
- Erste Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser (2018) [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010980> (Zugegriffen 4. April 2018).

- Flinspach, D. (1973) *Wärmelastplan Neckar Plochingen bis Mannheim*, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Funamizu N., Iida M., Sakakura Y., & Takakuwa T. (2001) Reuse of heat energy in wastewater: implementation examples in Japan. , 10.
- Heinz A., Lerch W., Breidler J., Fink C., & Wagner W. (2013) Wärmerückgewinnung aus Abwasser im Niedrigenergie- und Passivhaus: Potenzial und Konzepte in Kombination mit Solarthermie und Wärmepumpe WRGpot.
- Herwig H. (2014) „Heizen mit der Energie der Umgebung: die Wärmepumpe“ in Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 205–209.
- Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., & Lavine A. S. (Hrsg.) (2007) *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley, Hoboken, NJ.
- James W., Rossman L. A., & James W. R. C. (2010) *Users's Guide to SWMM5 - 13th Edition*, CHI - Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario, Canada. [online] <http://www.chiwater.com/Files/UsersGuide-ToSWMM5Edn13.pdf>.
- Jany P. & Sapper E. (2001) *Thermodynamik für Ingenieure* (K. Langeheinecke, Hrsg.), Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Kainz H., Kauch E.-P., Fuchs-Hanusch D., & Gruber G. (2012) *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft*, MANZ Verlag Schulbuch GmbH, Vienna, Austria.
- kermi.de (2017) Heiztechnik im Fokus. [online] <https://blog.kermi.de/heiztechnik-im-fokus-wie-funktioniert-eine-waermepumpe/> (Zugegriffen 24. März 2018).
- Krarti M. & Kreider J. F. (1996) ANALYTICAL MODEL FOR HEAT TRANSFER IN AN UNDERGROUND AIR TUNNEL. , 14.
- Rossman L. A. (2017) Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics. , 190.
- Rossman L. A. (2015) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. , 353.
- Rossman L. A. & Huber W. C. (2016) Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality.
- Roth S. & Stahl A. (2016) *Mechanik und Wärmelehre*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Schmid F., FH E., & Agency S. (o.J.) SEWAGE WATER: INTERESTING HEAT SOURCE FOR HEAT PUMPS AND CHILLERS. [online] http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=en&name=en_508290240.pdf&endung=Sewage%20Water:%20In-

teres-
ting%20Heat%20Source%20for%20Heat%20Pumps%20and%20Chillers
(Zugegriffen 24. März 2018).

Simperler L. (2015) Impact of thermal use of wastewater in a sewer on the inlet temperature of a wastewater treatment plant.

Stierstadt K. (2018) *Thermodynamik für das Bachelorstudium*, SPRINGER, S.I.

Tipler P. A. & Mosca G. (2015) „Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik“ in Physik. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 567–598.

US EPA O. (2014) Storm Water Management Model (SWMM). US EPA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (Zugegriffen 2. April 2018).

VDI e. V. (Hrsg.) (2013) *VDI-Wärmeatlas*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [online] <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-19981-3> (Zugegriffen 29. Juli 2016).

A Anhang

A.1 Beschreibung der eingesetzten Software

Das Programm US-EPA Storm Water Management Model (SWMM) ist eine Software zur Modellierung dynamischer Regenwasserabflüsse, sowohl für Einzelergebnisse als auch Langzeitserien (James et al., 2010). Mittels des hydrodynamischen Ansatzes von SWMM kann der mengenmäßige Abfluss (Quantität) als auch die Verschmutzung des Abwassers (Qualität) in städtischen und ländlichen Gebieten bestimmt werden. Die Programmiersprache C wird für die Umsetzung der Programmlogik und Delphi für die Darstellung der grafischen Benutzeroberfläche von SWMM eingesetzt.

A.2 Implementierung des Temperaturmodells

Folgend wird die Integration des Temperaturmodells in SWMM behandelt. Ziel ist es, die Implementierung in SWMM nachvollziehbar zu erklären. Im Zuge eines Updates des Sourcecodes von SWMM soll damit eine Schritt für Schritt Anleitung zur erneuten Integration des Temperaturmodells zu Verfügung stehen.

A.2.1 Hinzufügen von Grad Celsius als Einheit der Qualitätsparameter

In SWMM Version 5.1.012 sind standardmäßig die Einheiten mg/L, µ/L und #/L für die Qualitätsparameter festgelegt. Als Einheit für die Temperatur als Eingangsparemeter wird in dieser Arbeit Grad Celsius (°C) verwendet.

Die Temperatur unterscheidet sich gegenüber den implementierten Einheiten dahingehend, dass diese in °C negative Werte annehmen kann. Im Gegensatz dazu, sind Konzentrationen stets im positiven Bereich angesiedelt und werden bei Nichtvorhandensein mit dem Wert 0 (Null) belegt.

Zu Beginn muss die Headerdatei `enums.h` ab Zeile 152 erweitert werden. Wie in Abbildung 5-1 ersichtlich, sind hier die Einheiten für die Qualitätsparameter definiert.

```
enum ConcUnitsType {
    MG,                // Milligrams / L
    UG,                // Micrograms / L
    COUNT,            // Counts / L
    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    CELSIUS};         // °C
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
```

Abbildung 5-1: Erweiterung der Headerdatei `enums.h`, ungefähr ab Zeile 152 mit der Einheit °C

Im Anschluss daran, ist die Klasse `keywords.c`, Zeile 99 (Abbildung 5-2) anzupassen. Hier wird das Array `QualUnitsWords[]` mit dem Wert `w_CELSIUS` erweitert.

```

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
char* QualUnitsWords[] = { w_MGperL, w_UGperL, w_COUNTperL, w_CELSIUS, NULL};
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-2: Erweiterung der Klasse keywords.c, ungefähr ab Zeile 99

Neben der Definition in keywords.c ist auch die Headerdatei text.h entsprechend zu ergänzen. In Abbildung 5-3 ist der entsprechende Codeblock abgebildet.

```

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
#define w_CELSIUSperl "CELSIUS"
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-3: Abschließende Definition des Textes in der Headerdatei text.h, ab Zeile 263

A.2.2 Einlesen zusätzlicher Einstellungen

Im Zuge der Erweiterung des Bereichs `OPTIONS` im Inputfile, müssen die Dateien text.h, enums.h, keyword.c, globals.h und project.c angepasst werden. In Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-8 sind die Modifikationen aufgelistet.

```

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
#define w_TEMP_MODEL "TEMP_MODEL"
#define w_DENSITY "DENSITY"
#define w_SPEC_HEAT_CAPACITY "SPEC_HEAT_CAPACITY"
#define w_UA "UA"
#define w_EXT_UNIT "EXT_UNIT"
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-4: Definition der Schlüsselwörter aus dem Inputfile in der Datei text.h, ab Zeile 105

```

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
TEMP_MODEL, DENSITY, SPEC_HEAT_CAPACITY,
UA, EXT_UNIT
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-5: Definition der zusätzlichen Einstellungen in der Datei enums.h, ab Zeile 465

```

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
w_TEMP_MODEL,
w_DENSITY,
w_SPEC_HEAT_CAPACITY,
w_UA,
w_EXT_UNIT,
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-6: Erweiterung der Klasse keywords.c, ab Zeile 92

```

EXTERN TTempModel TempModel; // Temperature data

```

Abbildung 5-7: Definition der Struktur in der Headerdatei globals.h, am Ende der Datei

```
/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
// --- temperature model
case TEMP_MODEL:
    TempModel.active = atoi(s2);
    break;

case DENSITY:
    TempModel.density = atof(s2);
    break;

case SPEC_HEAT_CAPACITY:
    TempModel.specHC = atof(s2);
    break;

case UA:
    TempModel.ua = atof(s2);
    break;

case EXT_UNIT:
    if (strcmp(s2, "T")) TempModel.extUnit = 'T';
    else TempModel.extUnit = 'P';
    break;
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
```

Abbildung 5-8: Einlesen der Einstellungen aus dem Inputfile in der Datei project.c, ab Zeile 710

A.2.3 Eigenschaften der Haltungen erweitern

Nach dem Hinzufügen der Einheit für die Temperatur, kann mit der Erweiterung der Haltungen (`Conduits`) begonnen werden. Dabei werden Eigenschaften wie die Wandstärke, die Wärmeleitfähigkeit des Rohres sowie des umliegenden Erdreichs, Ganglinien (im Folgenden auch `Pattern` genannt) zur Zuweisung der jahreszeitabhängigen Kanallufttemperatur und Temperatur des Erdreichs der Haltung hinzugefügt. Ferner sind Variablen der vorangegangenen hydraulischen Berechnungen, wie der benetzte Umfang, der Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit, den entsprechenden Haltungen zuzuweisen. Dies hat den Vorteil keine Neuberechnung der genannten Variablen durchgeführt wird und dadurch keine zusätzliche Rechenzeit/-leistung in Anspruch genommen wird. Zusätzlich ist eine Variable für die thermische Energieentnahme notwendig. Zu beachten ist, dass hierzu das `Conduit Object` verwendet wird. Gegenüber dem `Link Object`, übernimmt das `Conduit Object` den Transport des Abwassers zwischen zwei Knoten. Im Gegenteil dazu dient ein `Link Object` beispielsweise der Anbindung eines Knotens an eine Pumpe. Hierbei werden Informationen wie die Länge, die Rauigkeit, o.ä. nicht benötigt.

```

//-----
// CONDUIT OBJECT
//-----
typedef struct
{
    double      length;          // conduit length (ft)
    double      roughness;       // Manning's n
    char        barrels;         // number of barrels
    //-----
    double      modLength;       // modified conduit length (ft)
    double      roughFactor;     // roughness factor for DW routing
    double      slope;           // slope
    double      beta;            // discharge factor
    double      qMax;            // max. flow (cfs)
    double      a1, a2;          // upstream & downstream areas (ft2)
    double      q1, q2;          // upstream & downstream flows per barrel (cfs)
    double      q1Old, q2Old;    // previous values of q1 & q2 (cfs)
// (5.1.010)
    double      evapLossRate;     // evaporation rate (cfs)
    double      seepLossRate;     // seepage rate (cfs)
    char        capacityLimited; // capacity limited flag
    char        superCritical;    // super-critical flow flag
    char        hasLosses;        // local losses flag
    char        fullState;        // determines if either or both ends full
// (5.1.008)
    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    double      thickness;        // wall thickness (ft)
    double      kPipe;            // thermal conductivity pipe (W/m.K)
    double      kSoil;           // thermal conductivity soil (W/m.K)
    double      specHcSoil;       // specific heat capacity of surrounding soil (J/kg.K)
    double      densitySoil;      // density of surrounding soil (kg/m³)
    double      penDepth;         // penetrationDepth (calculated) (m)
    double      airPat;           // in-sewer-air pattern
    double      soilPat;          // soil pattern
    double      wetp;             // wetted perimeter at each time step (ft)
    double      width;            // top width of flow surface at each time step (ft)
    double      velocity;         // velocity (ft/s)
    double      thermalEnergy;     // use of thermal energy (kW or °C)
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
} TConduit;

```

Abbildung 5-9: Conduit Object inklusive der Erweiterung durch die genannten Parameter und Variablen in der Headerdatei objects.h

Wie in Abbildung 5-9 ersichtlich, werden am Ende von `Conduit Object` die benötigten Parameter hinzugefügt. Die gegebenen Einheiten je Parameter sind im Kommentar angeführt.

Um die nun definierten Parameter in SWMM einzulesen sind Modifikation in der Klasse `link.c` erforderlich. Dazu muss zu Beginn das Einlesen der neu hinzugefügten Parameter aus dem Inputfile ermöglicht werden. Die Funktion `int conduit_readParams(int j, int k, char* tok[], int ntoks)` übernimmt die Aufgabe, den Bereich der `CONDUITS` Zeile für Zeile aus dem Inputfile zu lesen. Da infolge der Erweiterung durch das Temperaturmodell zusätzliche Spalten für die Inputparameter verwendet werden, muss die Größe des Arrays, welche die Werte der Eingabedatei speichert, verändert werden. In Abbildung 5-10 ist dahingehend die Vergrößerung des Arrays aufgrund der zusätzlichen Anzahl an Spalten im Inputfile dargestellt.

Anhang

```
/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
double x[14]; // old: double x[6];
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
```

Abbildung 5-10: Vergrößerung des Arrays in Abhängigkeit der einzulesenden Spalten in der Klasse link.c, ungefähr ab Zeile 920

Darauffolgend muss das Einlesen der Werte aus dem Inputfile erfolgen. Dazu werden wie in Abbildung 5-11 ersichtlich, die Werte der einzelnen Spalten mithilfe von Zugriffsfunktionen (getter-Funktionen) dem Array zugewiesen.

```
// --- parse optional parameters
x[4] = 0.0; // init. flow
if ( ntoks >= 8 )
{
    if ( !getDouble(tok[7], &x[4]) )
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[7]);
}
x[5] = 0.0;
if ( ntoks >= 9 )
{
    if ( !getDouble(tok[8], &x[5]) )
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[8]);
}

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
// --- parse Thickness code if present
x[6] = 0.0;
if (ntoks >= 10)
{
    if (!getDouble(tok[9], &x[6]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[9]);
}

// --- parse k_Pipe code if present
x[7] = 0.0;
if (ntoks >= 11)
{
    if (!getDouble(tok[10], &x[7]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[10]);
}

// --- parse k_Soil code if present
x[8] = 0.0;
if (ntoks >= 12)
{
    if (!getDouble(tok[11], &x[8]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[11]);
}

// --- parse specHcSoil code if present
x[9] = 0.0;
if (ntoks >= 13)
{
    if (!getDouble(tok[12], &x[9]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[12]);
}

// --- parse densitySoil code if present
x[10] = 0.0;
if (ntoks >= 14)
{
    if (!getDouble(tok[13], &x[10]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[13]);
}

// --- parse AirPattern code if present
x[11] = 0.0;
```

```

    if (ntoks >= 15)
    {
        x[11] = project_findObject(TIMEPATTERN, tok[14]);
        if (x[11] < 0) return error_setInpError(ERR_NAME, tok[14]);
    }

    // --- parse SoilPattern code if present
    x[12] = 0.0;
    if (ntoks >= 16)
    {
        x[12] = project_findObject(TIMEPATTERN, tok[15]);
        if (x[12] < 0) return error_setInpError(ERR_NAME, tok[15]);
    }
    // --- parse thermalEnergy code if present
    x[13] = 0.0;
    if (ntoks >= 17)
    {
        if (!getDouble(tok[16], &x[13]))
            return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[16]);
    }
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    // --- add parameters to data base
    Link[j].ID = id;
    link_setParams(j, CONDUIT, n1, n2, k, x);
    return 0;

```

Abbildung 5-11: Einlesen der Werte aus dem Inputfile in der Klasse links.c, ungefähr ab Zeile 950

Im Anschluss müssen die Einträge des Arrays dem jeweiligen Parameter der Haltung zugewiesen werden. Innerhalb der Funktion `void link_setParams(int j, int type, int n1, int n2, int k, double x[])` erfolgt die Zuweisung der Parameter aus dem Array. Abbildung 5-12 zeigt die Zuweisung der Eingabewerte zu den Haltungen.

```

case CONDUIT:
    Conduit[k].length = x[0] / UCF(LENGTH);
    Conduit[k].modLength = Conduit[k].length;
    Conduit[k].roughness = x[1];
    Link[j].offset1 = x[2] / UCF(LENGTH);
    Link[j].offset2 = x[3] / UCF(LENGTH);
    Link[j].q0 = x[4] / UCF(FLOW);
    Link[j].qLimit = x[5] / UCF(FLOW);
    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[k].thickness = x[6] / UCF(LENGTH);
    Conduit[k].kPipe = x[7];
    Conduit[k].kSoil = x[8];
    Conduit[k].specHcSoil = x[9];
    Conduit[k].densitySoil = x[10];
    Conduit[k].airPat = x[11];
    Conduit[k].soilPat = x[12];
    Conduit[k].thermalEnergy = x[13];
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    break;

```

Abbildung 5-12: Zuweisung der Eingabewerte an die Parameter der Haltung in der Klasse link.c, ab Zeile 312

Wie erwähnt, müssen die Variablen benetzter Umfang, Wasserspiegelbreite und Fließgeschwindigkeit der jeweiligen Haltung zugewiesen werden. Da es sich hierbei um Variablen aus der hydraulischen Berechnung handelt, wird im Sinne der Performance des Codes keine erneute Berechnung durchgeführt oder etwaige getter-Funktionen verwendet. In der Klasse dwflow.c erfolgt die Zuweisung der

genannten Variablen. Dazu werden wie in Abbildung 5-13 ersichtlich, am Ende der Funktion `void dwflow_findConduitFlow(int j, int steps, double omega, double dt)` der benetzte Umfang und die Fließgeschwindigkeit als Eigenschaften der Haltung zugewiesen.

```
/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */  
Conduit[k].wetp = aMid / rMid;  
Conduit[k].velocity = v;  
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
```

Abbildung 5-13: Zuweisung des benetzten Umfangs und der Fließgeschwindigkeit an die Haltung in der Klasse `dwflow.c`, ungefähr ab Zeile 275

Letztlich muss die Wasserspiegelbreite je Zeitschritt der Haltung zugewiesen werden. Dabei ist zu beachten, dass hier ein Mittelwert innerhalb einer Haltung gebildet wird. Da bei Kanalsystemen oftmals eine bauliche Abstufung bzw. ein baulicher Versatz zwischen Schacht und Haltung vorzufinden ist, erfolgt die Berechnung der Wasserspiegelbreite in Abhängigkeit der Bauform bzw. des sich damit einstellenden Fließzustandes (Rossman & Huber, 2016). In Abbildung 5-14 sind die unterschiedlichen Arten abgebildet.

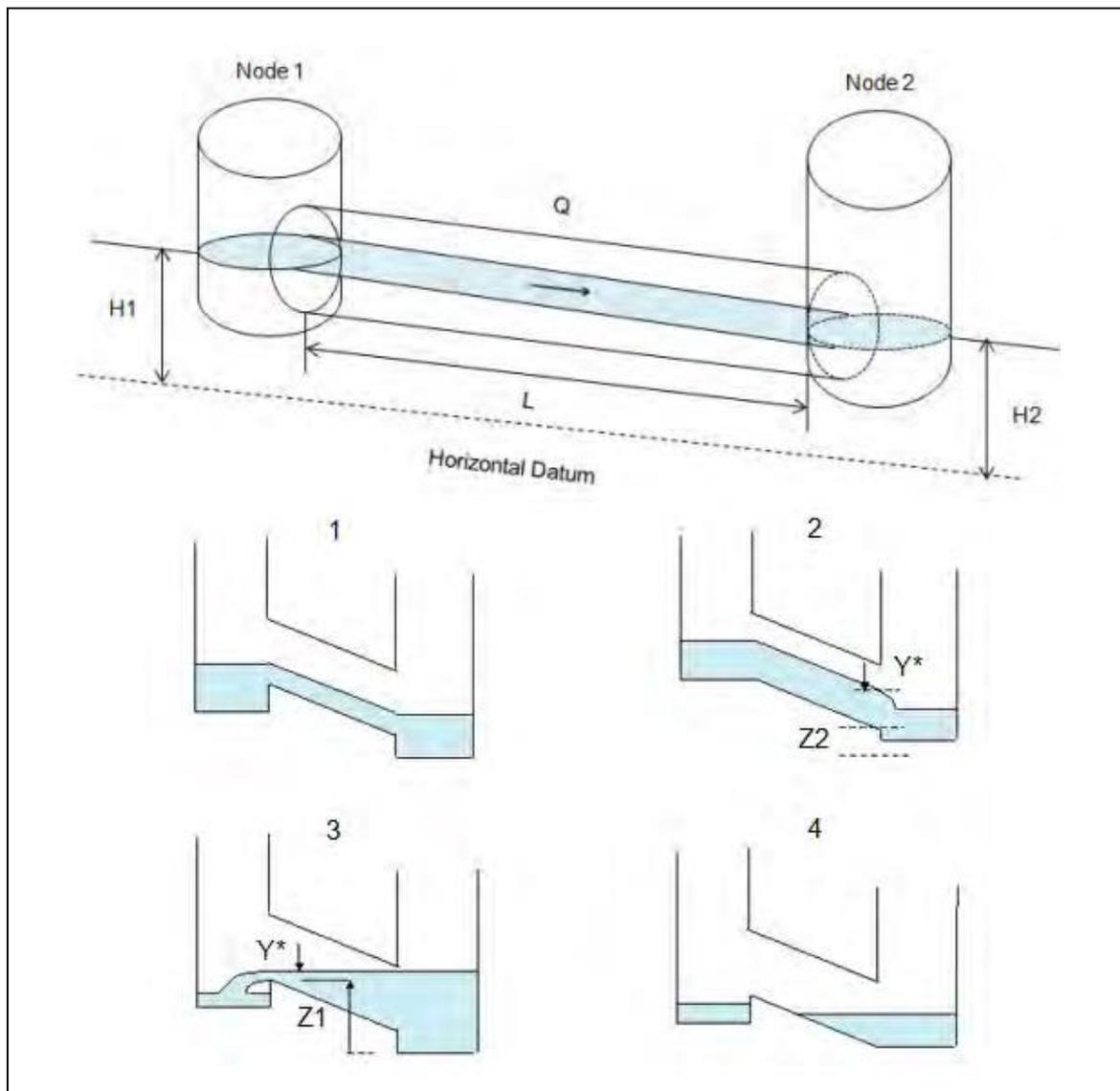


Abbildung 5-14: Darstellung unterschiedlicher Fließzustände für dynamischen Wellenansatz (Rossman, 2017)

Die Wasserspiegelbreite und der benetzte Umfang werden anhand der Wasserstände im stromaufwärts und stromabwärts liegenden Knoten berechnet. Wie in Kapitel 3.3.2.2 beschrieben, kann aufgrund der Deaktivierung eines Knotenzuflusses ein kurzzeitiger Temperatursprung auftreten, welcher jedoch aufgrund einer Langzeituntersuchung nicht relevant ist.

In Abbildung 5-15 ist ein Auszug der Funktion `void findSurfArea(int j, double q, double length, double* h1, double* h2, double* y1, double* y2)` inklusive der Modifikationen ersichtlich.

Anhang

```
// --- add conduit's surface area to its end nodes depending on flow class
switch ( Link[j].flowClass )
{
  case SUBCRITICAL:
    ...

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[Link[j].subIndex].width = ((widthMid + width1) / 2 + (widthMid +
width2) / 2) / 2;
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    break;

  case UP_CRITICAL:
    ...

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[Link[j].subIndex].width = (width2 + widthMid) / 2;
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    break;

  case DN_CRITICAL:
    ...
    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[Link[j].subIndex].width = (width1 + widthMid) / 2;
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    break;

  case UP_DRY:
    ...

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[Link[j].subIndex].width = ((widthMid + width1) / 2 + (widthMid +
width2) / 2) / 2;
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    break;

  case DN_DRY:
    ...

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[Link[j].subIndex].width = ((widthMid + width1) / 2 + (widthMid +
width2) / 2) / 2;
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    break;

  case DRY:
    ...

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Conduit[Link[j].subIndex].width = FUDGE;
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    break;
}
```

Abbildung 5-15: Zuweisung der Wasserspiegelbreite in Abhängigkeit der baulichen Ausführung in der Klasse `dwflow.c`, ungefähr ab Zeile 445

Das Einlesen der erforderlichen Parameter sowie der Zuweisung hydraulischer Variablen an das `Conduit` Object ist damit abgeschlossen.

A.2.4 Eigenschaften des Speicherknotens erweitern

Im Zuge der Verwendung eines Speicherknotens muss die Klasse `node.c` erweitert werden. Wiederum werden Eigenschaften wie die Wandstärke, die Wärmeleitfähigkeit der Behälterwand sowie Charakteristiken des Erdreichs und Ganglinien hinzugefügt (Abbildung 5-16).

```
//-----
// STORAGE UNIT OBJECT
//-----
typedef struct
{
    double    fEvap;           // fraction of evaporation realized
    double    aConst;         // surface area at zero height (ft2)
    double    aCoeff;         // coeff. of area v. height curve
    double    aExpon;         // exponent of area v. height curve
    int       aCurve;         // index of tabulated area v. height curve
    TExfil*   exfil;          // ptr. to exfiltration object
// (5.1.007)
//-----
    double    hrt;            // hydraulic residence time (sec)
    double    evapLoss;       // evaporation loss (ft3)
    double    exfilLoss;      // exfiltration loss (ft3)
// (5.1.007)
    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    double    thickness       // wall thickness (ft)
    double    kWall;          // thermal conductivity pipe (W/m.K)
    double    kSoil;          // thermal conductivity soil (W/m.K)
    double    specHcSoil;     // specific heat capacity of surrounding soil (J/kg.K)
    double    densitySoil;    // density of surrounding soil (kg/m³)
    double    penDepth;       // penetrationDepth (calculated) (m)
    double    airPat;         // in sewer-air pattern
    double    soilPat;        // soil pattern
    double    area;           // top area of flow surface at each time step (ft)
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
} TStorage;
```

Abbildung 5-16: Storage Unit Object inklusive der Erweiterung durch die genannten Parameter in der Headerdatei `objects.h`

Das Einlesen der Parameter aus dem Inputfile erfolgt in der Klasse `node.c`. Die Funktion `int storage_readParams(int j, int k, char* tok[], int ntoks)` übernimmt die Aufgabe den Bereich der `STORAGE` Zeile für Zeile aus dem Inputfile zu lesen. In Abbildung 5-17 ist die Vergrößerung des Arrays aufgrund der zusätzlichen Anzahl an Spalten im Inputfile dargestellt.

```
/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    double x[16]; //old: x[9];
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
```

Abbildung 5-17: Vergrößerung des Arrays in Abhängigkeit der einzulesenden Spalten in der Klasse `node.c`, ungefähr ab Zeile 920

Wie in Abbildung 5-18 ersichtlich, werden die Werte der einzelnen Spalten mithilfe von Zugriffsfunktionen (getter-Funktionen) dem Array zugewiesen.

```
// --- get evaporation fraction if present
if ( ntoks > n )
{
    if ( ! getDouble(tok[n], &x[8]) )
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[n]);
    n++;
}

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
int startTok;
m = findmatch(tok[4], RelationWords);
if (m == FUNCTIONAL)
    startTok = 10;
else
    startTok = 8;

// --- parse Thickness code if present
x[9] = 0.0;
if (ntoks >= startTok)
{
    if (!getDouble(tok[startTok], &x[9]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[startTok]);
    n++;
}
startTok++;
// --- parse k_Wall code if present
x[10] = 0.0;
if (ntoks >= startTok)
{
    if (!getDouble(tok[startTok], &x[10]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[startTok]);
    n++;
}
startTok++;
// --- parse k_Soil code if present
x[11] = 0.0;
if (ntoks >= startTok)
{
    if (!getDouble(tok[startTok], &x[11]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[startTok]);
    n++;
}
startTok++;
// --- parse specHcSoil code if present
x[12] = 0.0;
if (ntoks >= startTok)
{
    if (!getDouble(tok[startTok], &x[12]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[startTok]);
    n++;
}
startTok++;
// --- parse densitySoil code if present
x[13] = 0.0;
if (ntoks >= startTok)
{
    if (!getDouble(tok[startTok], &x[13]))
        return error_setInpError(ERR_NUMBER, tok[startTok]);
    n++;
}
startTok++;
// --- parse AirPattern code if present
x[14] = 0.0;
if (ntoks >= startTok)
{
    x[14] = project_findObject(TIMEPATTERN, tok[startTok]);
    if (x[14] < 0) return error_setInpError(ERR_NAME, tok[startTok]);
    n++;
}
}
```

```

startTok++;
// --- parse SoilPattern code if present
x[15] = 0.0;

if (ntoks >= startTok)
{
    x[15] = project_findObject(TIMEPATTERN, tok[startTok]);
    if (x[15] < 0) return error_setInpError(ERR_NAME, tok[startTok]);
    n++;
}
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

// --- add parameters to storage unit object
Node[j].ID = id;
node_setParams(j, STORAGE, k, x);

// --- read exfiltration parameters if present
if (ntoks > n) return exfil_readStorageParams(k, tok, ntoks, n);
//(5.1.007)
return 0;

```

Abbildung 5-18: Einlesen der Werte aus dem Inputfile in der Klasse node.c, ungefähr ab Zeile 740

Anschließend müssen die Einträge des Arrays dem jeweiligen Parameter der Speicherknoten zugewiesen werden. Innerhalb der Funktion `void node_setParams(int j, int type, int k, double x[])` erfolgt die Zuweisung der Parameter aus dem Array (Abbildung 5-19).

```

case STORAGE:
    Node[j].fullDepth = x[1] / UCF(LENGTH);
    Node[j].initDepth = x[2] / UCF(LENGTH);
    Storage[k].aCoeff = x[3];
    Storage[k].aExpon = x[4];
    Storage[k].aConst = x[5];
    Storage[k].aCurve = (int)x[6];
    // x[7] (ponded depth) is deprecated.
//(5.1.007)
    Storage[k].fEvap = x[8];
    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    Storage[k].thickness = x[9];
    Storage[k].kWall = x[10];
    Storage[k].kSoil = x[11];
    Storage[k].specHcSoil = x[12];
    Storage[k].densitySoil = x[13];
    Storage[k].airPat = x[14];
    Storage[k].soilPat = x[15];
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    break;

```

Abbildung 5-19: Zuweisung der Eingabewerte an die Parameter der Haltung in der Klasse node.c, ab Zeile 170

Wasseroberfläche wird wie in Abbildung 5-20 ersichtlich, am Ende der Funktion `double storage_getSurfArea(int j, double d)` als Eigenschaft des Speicherknotens zugewiesen.

```

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
Storage[k].area = area / UCF(LENGTH) / UCF(LENGTH);
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-20: Zuweisung der Wasseroberfläche an den Speicherknoten in der Klasse node.c, ungefähr ab Zeile 960

Das Einlesen der erforderlichen Parameter sowie die Zuweisung hydraulischer Variablen an das `Storage Unit Object` sind damit abgeschlossen.

A.2.5 Integration des Temperaturmodells in die Klasse `qualrout.c`

Zu Beginn erfolgt die Initialisierung des Systems. Hierbei wird allen temperaturabhängigen Qualitätsparametern der Wert NaN zugewiesen sowie die Eindringtiefe je Haltung und Speicherknoten berechnet. Nach dem erfolgreichen Initialisieren (`void qualrout_init()`) wird im Anschluss an die hydraulische Modellierung die Funktion `void qualrout_execute(double tStep)` aufgerufen. Dieser Aufruf erfolgt innerhalb eines jeden Zeitschrittes.

In der Funktion `qualrout_execute` wird zu Beginn der Massenstrom in jeder Haltung ermittelt. Dies erfolgt innerhalb der Funktion `void findLinkMassFlow(int i, double tStep)`.

Im Anschluss daran wird die Mischungsrechnung an jedem Knoten ausgeführt, wobei hier zwischen einem Knoten (`void findNodeQual(int j)`) und einem Knoten mit Speicherfunktion (`void findStorageQual(int j, double tStep)`) unterschieden wird. In beiden Fällen wird die Mischungsrechnung infolge von mehreren Zuflüssen zu dem Knoten durchgeführt. Bei Knoten mit Speicherfunktion erfolgt eine zusätzliche Veränderung der Qualitätsparameter aufgrund von Abbauvorgängen. Dazu wird innerhalb von `findStorageQual` die Funktion `double getReactedTempStNode(double oldTemp, int j, int p, double tStep)` aufgerufen. Innerhalb dieser wird der Wärmeaustausch anhand der Energiebilanz aus Kapitel 3.1.3 berechnet. Hierbei wird angenommen, dass es sich um einen kreisförmigen Speicherknoten handelt. Die Funktion `double getWettedArea(TTable *table, double x)` wurde dahingehend entwickelt, um in Abhängigkeit des Wasserstandes die benetzte Fläche zu berechnen.

Daraufhin erfolgt die Berechnung der Qualitätsparameter in den Haltungen. Hierzu wird die Funktion `void findLinkQual(int i, double tStep)` aufgerufen. Innerhalb der Funktion wird zwischen dynamischem Wellenansatz (dynamic wave routing) und stationärer Strömung (steady flow routing) unterschieden. Da Letzteres keine realitätsnahe Abbildung darstellt, werden im weiteren Verlauf der Arbeit alle Modifikationen nur auf den dynamischen Wellenansatz angewendet. Für die Temperatur wird die Funktion `double getReactedTemp(double oldTemp, double length, int i, double tStep)` aufgerufen, in welcher der Wärmeaustausch zwischen Abwasser und Umwelt stattfinden. Anhand der Testszenarien konnte bei einem Abfluss von kleiner 0,3 L/s eine Instabilität der Berechnungen beobachtet werden. Dies ist natürlich abhängig von den geometrischen Bedingungen, sprich benetzter Umfang und Wasserspiegelbreite. Aus diesem Grund wurde die Begrenzung von 0,5 L/s eingefügt. Bei einem geringen Abfluss wird die Temperatur des vorherigen Zeitschrittes angenommen und kein Wärmeaustausch berechnet.

Abschließend wird der Inhalt des Reaktors (Haltung) mit dem vom Zeitschritt abhängigen Zufluss der Haltung gemischt.

Im Folgenden ist die gesamte Klasse qualrout.c dargestellt. Die einzelnen modifizierten und hinzugefügten Zeilen sind mit Kommentaren versehen.

Anhang

```
//-----  
//   qualrout.c  
//  
//   Project:  EPA SWMM5  
//   Version:  5.1  
//   Date:    03/20/14   (Build 5.1.001)  
//           04/02/15   (Build 5.1.008)  
//           04/30/15   (Build 5.1.009)  
//           08/05/15   (Build 5.1.010)  
//   Author:   L. Rossman  
//  
//   Water quality routing functions.  
//  
//   Build 5.1.008:  
//   - Pollutant mass lost to seepage flow added to mass balance totals.  
//   - Pollutant concen. increased when evaporation occurs.  
//  
//   Build 5.1.009:  
//   - Criterion for dry link/storage node changed to avoid concen. blowup.  
//  
//   Build 5.1.010:  
//   - Entire module re-written to be more compact and easier to follow.  
//   - Neglible depth limit replaced with a negligible volume limit.  
//  
//-----  
#define _CRT_SECURE_NO_DEPRECATED  
  
#include <stdio.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <math.h>  
#include <string.h>  
#include "headers.h"  
  
//-----  
//   Constants  
//-----  
static const double ZeroVolume = 0.0353147; // 1 liter in ft3  
  
//-----  
//   External functions (declared in funcs.h)  
//-----  
//   qualrout_init           (called by swmm_start)  
//   qualrout_execute       (called by routing_execute)  
  
//-----  
//   Function declarations  
//-----  
static void findLinkMassFlow(int i, double tStep);  
static void findNodeQual(int j);  
static void findLinkQual(int i, double tStep);  
static void findSFLinkQual(int i, double qSeep, double fEvap, double tStep);  
static void findStorageQual(int j, double tStep);  
static void updateHRT(int j, double v, double q, double tStep);  
static double getReactedQual(int p, double c, double v1, double tStep);  
static double getMixedQual(double c, double v1, double wIn, double qIn,  
                           double tStep);  
/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */  
static double getReactedTemp(double oldTemp, int i, double tStep);  
static double getReactedTempStNode(double oldTemp, int j, int p, double tStep);  
static double getWettedArea(TTable* table, double d);  
/* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */  
//=====
```

```
void qualrout_init()  
//  
//   Input:   none  
//   Output:  none  
//   Purpose: initializes water quality concentrations in all nodes and links.  
//
```

```

{
    int    i, p, isWet;
    double c;

    for (i = 0; i < Nobjects[NODE]; i++)
    {
        isWet = (Node[i].newDepth > FUDGE);
        for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
        {
            /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
            if (strcmp(QualUnitsWords[Pollut[p].units], "CELSIUS") == 0 &&
TempModel.active == 1)
                c = NAN; // set temperature to NaN, because 0 is a valid
temperatur value
            else
                c = 0.0;
            /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

            if (isWet) c = Pollut[p].initConcen;
            Node[i].oldQual[p] = c;
            Node[i].newQual[p] = c;
        }
        if (Node[i].type == STORAGE)
        {
            int k = Node[i].subIndex;
            /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
            // calculate the penetration depth for each storage node
            Storage[k].penDepth = sqrt((Storage[k].kSoil /
(Storage[k].densitySoil * Storage[k].specHcSoil)) / (7.27220 * pow(10, -5)));
            /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
        }
    }

    for (i = 0; i < Nobjects[LINK]; i++)
    {
        isWet = (Link[i].newDepth > FUDGE);
        for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
        {
            /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
            if (strcmp(QualUnitsWords[Pollut[p].units], "CELSIUS") == 0 &&
TempModel.active == 1)
                c = NAN; // set temperature to NaN, because 0 is a valid
temperatur value
            else
                c = 0.0;
            /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

            if (isWet) c = Pollut[p].initConcen;
            Link[i].oldQual[p] = c;
            Link[i].newQual[p] = c;
        }

        int k = Link[i].subIndex;
        /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
        // calculate the penetration depth for each conduit
        Conduit[k].penDepth = sqrt((Conduit[k].kSoil / (Conduit[k].densitySoil *
Conduit[k].specHcSoil)) / (7.27220 * pow(10, -5)));
        /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    }
}

//=====

void qualrout_execute(double tStep)
//
// Input:  tStep = routing time step (sec)
// Output: none
// Purpose: routes water quality constituents through the drainage
//          network over the current time step.

```

Anhang

```
//
{
    int    i, j;
    double qIn, vAvg;

    // --- find mass flow each link contributes to its downstream node
    for (i = 0; i < Nobjects[LINK]; i++) findLinkMassFlow(i, tStep);

    // --- find new water quality concentration at each node
    for (j = 0; j < Nobjects[NODE]; j++)
    {
        // --- get node inflow and average volume
        qIn = Node[j].inflow;
        vAvg = (Node[j].oldVolume + Node[j].newVolume) / 2.0;

        // --- save inflow concentrations if treatment applied
        if (Node[j].treatment)
        {
            if (qIn < ZERO) qIn = 0.0;
            treatmnt_setInflow(qIn, Node[j].newQual);
        }

        // --- find new quality at the node
        if (Node[j].type == STORAGE || Node[j].oldVolume > FUDGE)
        {
            findStorageQual(j, tStep);
        }
        else findNodeQual(j);

        if (Node[j].treatment) treatmnt_treat(j, qIn, vAvg, tStep);
    }

    // --- find new water quality in each link
    for (i = 0; i < Nobjects[LINK]; i++) findLinkQual(i, tStep);
}

//=====
double getMixedQual(double c, double v1, double wIn, double qIn, double tStep)
//
// Input:  c = concentration in reactor at start of time step (mass/ft3)
//         v1 = volume in reactor at start of time step (ft3)
//         wIn = mass inflow rate (mass/sec)
//         qIn = flow inflow rate (cfs)
//         tStep = time step (sec)
// Output: returns pollutant concentration at end of time step (mass/ft3)
// Purpose: finds pollutant concentration within a completely mixed reactor.
//
//
{
    double vIn, cIn, cMax;

    // --- if no inflow then reactor concentration is unchanged
    if (qIn <= ZERO) return c;

    // --- compute concentration of any inflow
    vIn = qIn * tStep;
    cIn = wIn * tStep / vIn;

    // --- mixture concen. can't exceed either original or inflow concen.
    cMax = MAX(c, cIn);

    // --- mix inflow with current reactor contents
    c = (c*v1 + wIn * tStep) / (v1 + vIn);
    c = MIN(c, cMax);
    c = MAX(c, 0.0);
    return c;
}

//=====
```

```

void findLinkMassFlow(int i, double tStep)
//
// Input:  i = link index
//         tStep = time step (sec)
// Output: none
// Purpose: adds constituent mass flow out of link to the total
//           accumulation at the link's downstream node.
//
// Note:   Node[].newQual[], the accumulator variable, already contains
//         contributions from runoff and other external inflows from
//         calculations made in routing_execute().
{
    int    j, p;
    double qLink, w;

    // --- find inflow to downstream node
    qLink = Link[i].newFlow;

    // --- identify index of downstream node
    j = Link[i].node2;
    if (qLink < 0.0) j = Link[i].node1;
    qLink = fabs(qLink);

    // --- examine each pollutant
    for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
    {
        /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
        // --- temporarily accumulate inflow load in Node[j].newQual
        if (!isnan(Link[i].oldQual[p])) // do not consider NaN values
        {
            w = qLink * Link[i].oldQual[p];
            Node[j].newQual[p] += w;
        }
        else
            w = 0;
        /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

        // --- update total load transported by link
        Link[i].totalLoad[p] += w * tStep;
    }
}

//=====

void findNodeQual(int j)
//
// Input:  j = node index
// Output: none
// Purpose: finds new quality in a node with no storage volume.
//
{
    int    p;
    double qNode;

    // --- if there is flow into node then concen. = mass inflow/node flow
    qNode = Node[j].inflow;
    if (qNode > ZERO)
    {
        for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
            Node[j].newQual[p] /= qNode;
    }

    // --- otherwise concen. is 0
    else for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++) {
        Node[j].newQual[p] = 0.0;

        /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
        // set temperature/newQual to NaN, because 0 is a valid temperatur value

```

Anhang

```
        if (strcmp(QualUnitsWords[Pollut[p].units], "CELSIUS") == 0 &&
TempModel.active == 1)
            Node[j].newQual[p] = NAN;
        /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    }
}

//=====

void findLinkQual(int i, double tStep)
//
// Input:  i = link index
//         tStep = routing time step (sec)
// Output: none
// Purpose: finds new quality in a link at end of the current time step.
//
{
    int    j,                // upstream node index
           k,                // conduit index
           p;                // pollutant index
    double wIn,              // pollutant mass inflow rate (mass/sec)
           qIn,              // inflow rate (cfs)
           qSeep,            // rate of seepage loss (cfs)
           v1,               // link volume at start of time step (ft3)
           v2,               // link volume at end of time step (ft3)
           c1,               // current concentration within link (mass/ft3)
           c2,               // new concentration within link (mass/ft3)
           vEvap,            // volume lost to evaporation (ft3)
           vLosses,          // evap. + seepage volume loss (ft3)
           fEvap,            // evaporation concentration factor
           barrels;          // number of barrels in conduit

    // --- identify index of upstream node
    j = Link[i].node1;
    if (Link[i].newFlow < 0.0) j = Link[i].node2;

    // --- link quality is that of upstream node when
    // link is not a conduit or is a dummy link
    if (Link[i].type != CONDUIT || Link[i].xsect.type == DUMMY)
    {
        for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
        {
            Link[i].newQual[p] = Node[j].newQual[p];
        }
        return;
    }

    // --- get flow rates and evaporation loss
    k = Link[i].subIndex;
    barrels = Conduit[k].barrels;
    qIn = fabs(Conduit[k].q1) * barrels;
    qSeep = Conduit[k].seepLossRate * barrels;
    vEvap = Conduit[k].evapLossRate * barrels * tStep;

    // --- get starting and ending volumes
    v1 = Link[i].oldVolume;
    v2 = Link[i].newVolume;
    vLosses = qSeep * tStep + vEvap;

    // --- compute factor by which concentrations are increased due to
    // evaporation loss
    fEvap = 1.0;
    if (vEvap > 0.0 && v1 > ZeroVolume) fEvap += vEvap / v1;

    // --- Steady Flow routing requires special treatment
    if (RouteModel == SF)
    {
        findSFLinkQual(i, qSeep, fEvap, tStep);
        return;
    }
}
```

```

}

// --- adjust inflow to compensate for volume change under Dynamic
// Wave routing (which produces just a single (out)flow rate
// for a conduit)
if (RouteModel == DW)
{
    qIn = qIn + (v2 + vLosses - v1) / tStep;
    qIn = MAX(qIn, 0.0);
}

// --- examine each pollutant
for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
{
    // --- start with concen. at start of time step
    c1 = Link[i].oldQual[p];

    // --- update mass balance accounting for seepage loss
    massbal_addSeepageLoss(p, qSeep*c1);

    // --- increase concen. by evaporation factor
    c1 *= fEvap;

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    // it has been observed that at low flow rates the model may become
    // unstable, therefore 0.5 L/s is a boundary
    if (Link[i].newFlow * UCF(FLOW) / 1000 > 0.0005)
    {
        if (strcmp(QualUnitsWords[Pollut[p].units], "CELSIUS") == 0 &&
TempModel.active == 1)
        {
            // --- adjust temperature by heat exchange processes
            if (Node[j].newQual[p] > 0.0)
            // one ore more inflows into the node
                c2 = getReactedTemp(Node[j].newQual[p], i, tStep);
            else // no inflow into the node, but still water inside
the conduit
                c2 = getReactedTemp(c1, i, tStep);
        }
        else
        {
            // --- reduce concen. by 1st-order reaction
            c2 = getReactedQual(p, c1, v1, tStep);
        }
    }
    else
        c2 = c1;

    // --- mix resulting contents with inflow from upstream node
    if (!isnan(Node[j].newQual[p])) { // do not consider NaN values
        wIn = Node[j].newQual[p] * qIn;
        c2 = getMixedQual(c2, v1, wIn, qIn, tStep);
    }

    // --- set concen. to zero if remaining volume is negligible
    if (v2 < ZeroVolume)
    {
        massbal_addToFinalStorage(p, c2 * v2);

        // set temperature to NaN, because 0 is a valid temperatur value
        if (strcmp(QualUnitsWords[Pollut[p].units], "CELSIUS") == 0 &&
TempModel.active == 1)
            c2 = NAN;
        else
            c2 = 0.0;
    }
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    // --- assign new concen. to link

```

```

        Link[i].newQual[p] = c2;
    }
}

//=====

void findSFLinkQual(int i, double qSeep, double fEvap, double tStep)
//
// Input:  i = link index
//         tStep = routing time step (sec)
// Output: none
// Purpose: finds new quality in a link at end of the current time step for
//          Steady Flow routing.
//
{
    int j = Link[i].nodel;

    int p;
    double c1, c2;
    double lossRate;

    // --- examine each pollutant
    for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
    {
        // --- conduit's quality equals upstream node quality
        c1 = Node[j].newQual[p];

        // --- update mass balance accounting for seepage loss
        massbal_addSeepageLoss(p, qSeep*c1);

        // --- increase concen. by evaporation factor
        c1 *= fEvap;

        // --- apply first-order decay over travel time
        c2 = c1;
        if (Pollut[p].kDecay > 0.0)
        {
            c2 = c1 * exp(-Pollut[p].kDecay * tStep);
            c2 = MAX(0.0, c2);
            lossRate = (c1 - c2) * Link[i].newFlow;
            massbal_addReactedMass(p, lossRate);
        }
    }
}

//=====

void findStorageQual(int j, double tStep)
//
// Input:  j = node index
//         tStep = routing time step (sec)
// Output: none
// Purpose: finds new quality in a node with storage volume.
//
{
    int p, // pollutant index
        k; // storage unit index
    double qIn, // inflow rate (cfs)
        wIn, // pollutant mass inflow rate (mass)
        v1, // volume at start of time step (ft3)
        c1, // initial pollutant concentration (mass/ft3)
        c2, // final pollutant concentration (mass/ft3)
        qExfil = 0.0, // exfiltration rate from storage unit (cfs)
        vEvap = 0.0, // evaporation loss from storage unit (ft3)
        fEvap = 1.0; // evaporation concentration factor

    // --- get inflow rate & initial volume
    qIn = Node[j].inflow;
    v1 = Node[j].oldVolume;

```

```

// -- for storage nodes
if (Node[j].type == STORAGE)
{
    // --- update hydraulic residence time
    //      (HRT can be used in treatment functions)
    updateHRT(j, Node[j].oldVolume, qIn, tStep);

    // --- get exfiltration rate and evaporation loss
    k = Node[j].subIndex;
    qExfil = Storage[k].exfilLoss / tStep;
    vEvap = Storage[k].evapLoss;

    // --- compute factor by which concentrations are increased due to
    //      evaporation loss (avoiding huge factors as storage unit
    //      dries out completely)
    if (vEvap > 0.0 && v1 > ZeroVolume) fEvap += vEvap / v1;
}

// --- for each pollutant
for (p = 0; p < Nobjects[POLLUT]; p++)
{
    // --- start with concen. at start of time step
    c1 = Node[j].oldQual[p];

    // --- update mass balance accounting for exfiltration loss
    massbal_addSeepageLoss(p, qExfil*c1);

    // --- increase concen. by evaporation factor
    c1 *= fEvap;

    /* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
    if (strcmp(QualUnitsWords[Pollut[p].units], "CELSIUS") == 0 &&
TempModel.active == 1 && c1 != 0.0 && !isnan(c1))
        c1 = getReactedTempStNode(c1, j, p, tStep);
    else
    {
        // --- apply first order reaction only if no separate treatment
function
        if (Node[j].treatment == NULL ||
            Node[j].treatment[p].equation == NULL)
        {
            c1 = getReactedQual(p, c1, v1, tStep);
        }
    }
    /* END modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

    // --- mix resulting contents with inflow from all sources
    //      (temporarily accumulated in Node[j].newQual)
    wIn = Node[j].newQual[p];
    c2 = getMixedQual(c1, v1, wIn, qIn, tStep);

    // --- set concen. to zero if remaining volume is negligible
    if (Node[j].newVolume <= ZeroVolume)
    {
        massbal_addToFinalStorage(p, c2 * Node[j].newVolume);
        c2 = 0.0;
    }

    // --- assign new concen. to node
    Node[j].newQual[p] = c2;
}
}

//=====

void updateHRT(int j, double v, double q, double tStep)
//
// Input:  j = node index
//         v = storage volume (ft3)

```

Anhang

```
//      q = inflow rate (cfs)
//      tStep = time step (sec)
// Output: none
// Purpose: updates hydraulic residence time (i.e., water age) at a
//          storage node.
//
//
{
    int    k = Node[j].subIndex;
    double hrt = Storage[k].hrt;
    if (v < ZERO) hrt = 0.0;
    else hrt = (hrt + tStep) * v / (v + q * tStep);
    Storage[k].hrt = MAX(hrt, 0.0);
}

//=====

double getReactedQual(int p, double c, double v1, double tStep)
//
// Input:  p = pollutant index
//         c = initial concentration (mass/ft3)
//         v1 = initial volume (ft3)
//         tStep = time step (sec)
// Output: none
// Purpose: applies a first order reaction to a pollutant over a given
//          time step.
//
//
{
    double c2, lossRate;
    double kDecay = Pollut[p].kDecay;

    if (kDecay == 0.0) return c;
    c2 = c * (1.0 - kDecay * tStep);
    c2 = MAX(0.0, c2);
    lossRate = (c - c2) * v1 / tStep;
    massbal_addReactedMass(p, lossRate);
    return c2;
}

/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */
//=====

double getReactedTemp(double oldTemp, int i, double tStep)
//
// Input:  oldTemp = temperature of the previous timestep (°C)
//         i = index of the current conduit
//         tStep = time step (sec)
// Output: none
// Purpose: calculate the heat exchange by soil and air of the conduit
//
//
{
    // local variables
    int k = Link[i].subIndex;
    double thickness, width, velocity, wetp, length, flow, volume, kp, ks, hwa,
Rwa, Rws, Ewa, Ews;

    // transform from FT to M
    thickness = Conduit[k].thickness * UCF(LENGTH);
    width      = Conduit[k].width * UCF(LENGTH);
    velocity   = Conduit[k].velocity * UCF(LENGTH);
    wetp       = Conduit[k].wetp * UCF(LENGTH);
    length     = Conduit[Link[i].subIndex].length * UCF(LENGTH);
    flow       = Link[i].newFlow * UCF(FLOW) / 1000; // m3/s
    volume     = Link[i].newVolume * UCF(VOLUME);
    kp         = Conduit[k].kPipe; // nothing to transform
    ks         = Conduit[k].kSoil; // nothing to transform

    // get the current month of simulation
    DateTime currentDate = getDateDateTime(NewRoutingTime);
    int month = datetime_monthOfYear(currentDate);
}
```

```

// get in-sewer-air and soil temperature of the current month
double soilTemp = inflow_getPatternFactor((int)Conduit[k].soilPat, month -
1, 0, 0);
double airTemp = inflow_getPatternFactor((int)Conduit[k].airPat, month - 1,
0, 0);

// calculate temperature difference
double deltaTa = airTemp - oldTemp;
double deltaTs = soilTemp - oldTemp;

// calculate thermal resistivity for wastewater - air
double deltaV = ABS(velocity - TempModel.ua);

if (deltaV > 0.001) // if the relative velocity is lower than 1 mm/s the
thermal resistivity is 0 (prevent division by 0)
{
    hwa = 5.85 * sqrt(deltaV);
    Rwa = 1.0 / (hwa * width * length);
    Ewa = deltaTa / Rwa;
}
else
{
    Rwa = 0.0;
    Ewa = 0.0;
}

// calculate thermal resistivity for wastewater - soil
Rws = thickness / (kp * wetp * length) + Conduit[k].penDepth / (ks * wetp *
length);
Ews = deltaTs / Rws;

// calculate the change in temperature over the given time step
double deltaT = (Ewa + Ews) / (TempModel.density * TempModel.specHC *
flow);

// finally calculate the new temperature - Conduit[k].thermalEnergy leads
to the change in temperature by heat exchanger depending on TempModel.extUnit
double thermalExt = 0;
if (TempModel.extUnit == 'P')
    thermalExt = (Conduit[k].thermalEnergy * 1000 / (TempModel.density *
flow * TempModel.specHC));
else if (TempModel.extUnit == 'T')
    thermalExt = Conduit[k].thermalEnergy;

oldTemp += deltaT + thermalExt;
return oldTemp;
}

//=====
double getReactedTempStNode(double oldTemp, int j, int p, double tStep)
//
// Input:  oldTemp = temperature of the previous timestep (°C)
//         i = index of the current conduit
//         tStep = time step (sec)
// Output: none
// Purpose: calculate the heat exchange by soil and air of the storage unit
//
{
    // local variables
    double thickness, kw, ks, volume, Qin, Qout, wetA, hwa, Rwa, Rws, Ewa, Ews;

    // get storage node
    int k = Node[j].subIndex;
    thickness = Storage[k].thickness * UCF(LENGTH);
    kw = Storage[k].kWall; // nothing to transform
    ks = Storage[k].kSoil; // nothing to transform
    volume = Node[j].oldVolume *UCF(VOLUME);

```

Anhang

```
Qin = Node[j].inflow * UCF(FLOW) / 1000; // m3/s
Qout = Node[j].outflow * UCF(FLOW) / 1000; // m3/s

// get the current month of simulation
DateTime currentDate = getDateTime(NewRoutingTime);
int month = datetime_monthOfYear(currentDate);

// get in-sewer-air and soil temperature of the current month
double soilTemp = inflow_getPatternFactor((int)Storage[k].soilPat, month -
1, 0, 0);
double airTemp = inflow_getPatternFactor((int)Storage[k].airPat, month - 1,
0, 0);

// transform from FT to M
double surfaceArea = Storage[k].area * UCF(LENGTH) * UCF(LENGTH); //m²

// get the wetted area of the storage unit by given wastewater depth
int i = Storage[k].aCurve; // < 0 if funcional - >= 0 if tabular
if (i >= 0)
    wetA = getWettedArea(&Curve[Storage[k].aCurve],
Node[j].newDepth*UCF(LENGTH));
else
    wetA = 2 * PI * sqrt(surfaceArea / PI) * Node[j].newDepth*UCF(LENGTH) +
surfaceArea;

// calculate temperature difference
double deltaTa = airTemp - oldTemp;
double deltaTs = soilTemp - oldTemp;

// calculate thermal resistivity for wastewater - air
double deltaV = ABS(TempModel.ua);
if (deltaV > 0.001) // if the in-sewer air velocity is lower than 1 mm/s
the thermal resistivity is 0 (prevent division by 0)
{
    hwa = 5.85 * sqrt(deltaV);
    Rwa = 1.0 / (hwa * surfaceArea);
    Ewa = deltaTa / Rwa;
}
else
{
    Rwa = 0.0;
    Ewa = 0.0;
}

// calculate thermal resistivity for wastewater - soil
Rws = thickness / (kw * wetA) + Storage[k].penDepth / (ks * wetA);
Ews = deltaTs / Rws;

// get the the temperatur of the inflows
double Tin = Node[j].newQual[p] / Node[j].inflow + 273.15;

// calculate the change in temperature over a given time step
double deltaT = (volume * (oldTemp + 273.15) + Qin * Tin * tStep) / (volume
+ Qin * tStep);
deltaT += (Ewa + Ews) * tStep / (TempModel.density* TempModel.specHC *
(volume + Qout * tStep));
oldTemp = deltaT - 273.15;

return oldTemp;
}

//=====

double getWettedArea(TTable *table, double x)
//
// Input:  table = geometry of the storage unit
//         x = current wastewater depth
// Output: none
// Purpose: calculate the wetted area of the storage unit by given wastewater depth
```

```

//
{
    double x1, y1, x2, y2;
    double s = 0.0;
    double area = 0.0;
    TTableEntry* entry;

    entry = table->firstEntry;
    if (entry == NULL) return 0.0;
    x1 = entry->x;
    y1 = entry->y;

    // get base area
    area = y1;

    if (x <= x1)
        return area;

    // calculate the lateral surface
    while (entry->next)
    {
        entry = entry->next;
        x2 = entry->x;
        y2 = entry->y;
        if (x <= x2) {
            y2 = y1 + (y2 - y1) / (x2 - x1) * (x - x1);
            x2 = x;
            area = area + (sqrt(((y2 + y1) / (2 * PI)))) * 2 * PI * (x2 -
x1));
            return area;
        }
        else
            area = area + (sqrt(((y2 + y1) / (2 * PI)))) * 2 * PI * (x2 -
x1));
        x1 = x2;
        y1 = y2;
    }

    return area;
}
/* START modification by Peter Schlagbauer | TUGraz */

```

Abbildung 5-21: Gesamte Klasse qualrout.c

A.3 Interface – Bedienung

Das Inputfile in SWMM beinhaltet alle Informationen des Abwassernetzes, Simulationseinstellungen und optional Zeitserien. Tabelle 5-1 zeigt jene Bereiche des Inputfiles, für welche eine Anpassung infolge des Temperaturmodells erforderlich ist. Eine detaillierte Auflistung aller Standardeingabeparameter des Inputfiles ist im Benutzerhandbuch von SWMM dargestellt (Rossman, 2015 S. 270).

Anhang

Tabelle 5-1: Auflistung der zu modifizierenden Bereiche des Inputfiles

Name	Beschreibung	Modifikationen
OPTIONS	Simulationseinstellungen	<i>Hinzufügen eines Flags zur Aktivierung/Deaktivierung des Temperaturmodells; Definition von Konstanten</i>
STORAGE	Definition der Speicherknoten	<i>Hinzufügen der Eigenschaften Wandstärke, Wärmeleitfähigkeit Behälterwand sowie Erdreich, Dichte und spezifische Wärmekapazität des umliegenden Erdreichs und Ganglinien für die Lufttemperatur im Kanal und die Temperatur des Erdreichs</i>
CONDUITS	Definition der Haltungen	<i>Hinzufügen der Eigenschaften Wandstärke, Wärmeleitfähigkeit Rohrwand sowie Erdreich, Dichte und spezifische Wärmekapazität des umliegenden Erdreichs, Zeitserien für die Lufttemperatur im Kanal und die Temperatur des Erdreichs und Option für die thermische Energiegewinnung innerhalb einer Haltung</i>
POLLUTANTS	Definition der Verschmutzungen	<i>Definition der Einheit Celsius und der Standardtemperatur als Eingangsparameter für das gesamte Abwassernetz</i>

Am Ende der Simulationseinstellungen ist, wie in Abbildung 5-22 ersichtlich, ein Flag für die Aktivierung/Deaktivierung des Temperaturmodells zu setzen. Des Weiteren sind die Konstanten für Dichte und spezifische Wärmekapazität des Abwassers und die Luftgeschwindigkeit im Kanal festzulegen. Erfolgt eine Entnahme oder Zufuhr thermischer Energie, so muss die gewünschte Art (Leistung – P oder Temperatur – T) angegeben werden.

TEMP_MODEL	1
DENSITY	1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY	4190.0
UA	0.2
EXT_UNIT	P

Abbildung 5-22: Erweiterung der OPTIONS um die benötigten Konstanten und ein Flag zur Aktivierung/Deaktivierung des Temperaturmodells

Tabelle 5-2 beschreibt weitere Abschnitte des Inputfiles, welche in Verbindung mit dem Temperaturmodell genutzt werden.

Tabelle 5-2: Weitere Bereich des Inputfiles – INFLOWS, DWF und PATTERNS

Name	Beschreibung
INFLOWS	<i>Definition von Hydro- bzw. Pollutographen als Zufluss an einem Knoten</i>
DWF	<i>Trockenwetterzufluss an einem Knoten</i>
PATTERNS	<i>Multiplikatoren für die Lufttemperatur im Kanal, die Temperatur des Erdreichs und etwaiger Temperatureinflüsse an Knoten</i>

Die Haltungen beinhalten grundsätzlich die Information der angeschlossenen Knoten, der Länge und der Rauigkeit. Es ist nun erforderlich die Eigenschaften Wandstärke, Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand sowie des Erdreichs, Dichte und spezifische Wärmekapazität des Erdreichs, Ganglinien für die Lufttemperatur im Kanal und die Temperatur des Erdreichs und eine Option für die thermische Energiegewinnung aus einer Haltung hinzuzufügen. Im Abschnitt `CONDUITS` ist darauf zu achten, dass innerhalb der Spalte `thermalEnergy` sowohl Werte in Form einer Temperatur als auch einer Leistung angegeben werden können. Diese sind vorzeichenbehaftet. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass dem Abwasser Energie in Form von Wärme zugeführt wird. Ein negatives Vorzeichen entspricht einer Entnahme von thermischer Energie aus dem Abwasser. Dazu muss der Bereich `CONDUITS` im Inputfile um folgende Spalten (Tabelle 5-3) erweitert werden:

Tabelle 5-3: Auflistung der zusätzlichen Spalten im Bereich der `CONDUITS` im Inputfile

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

Analog dazu ist der Bereich `Storage` mit folgenden Spalten zu erweitern:

Anhang

Tabelle 5-4: Auflistung der zusätzlichen Spalten im Bereich der `Storage` im Inputfile

Spaltenname	Einheit	Beschreibung
Thickness	[m]	Wandstärke des Rohres
k_Wall	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit der Behälterwand
k_Soil	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit des umliegenden Erdreichs
specHcSoil	[J/kg.K]	Spezifische Wärmekapazität des umliegenden Erdreichs
densitySoil	[kg/m³]	Dichte des umliegenden Erdreichs
AirPattern	Pattern	Ganglinie für die Lufttemperatur im Kanal
SoilPattern	Pattern	Ganglinie für die Temperatur des umliegenden Erdreichs

Im Bereich `POLLUTANTS` wird innerhalb der Spalte `Cdwf` der Standardwert für die Temperatur im Abwasser angegeben. Dieser Wert wird damit an allen Knoten des Netzes angewendet und entspricht damit der durchschnittlichen Temperatur des Abwassers an der Einleitung. Zusätzlich muss der Wert `CELSIUS` in der Spalte `Unit` angegeben werden.

Ist explizit eine andere Temperatur an einem bestimmten Knoten gewünscht, so kann dies im Bereich `DWF` oder `INFLOWS` angegeben werden. `DWF` steht für Trockenwetterabfluss (Dry Weather Flow) und beinhaltet die Trockenwetterzuflüsse am Knoten. Hierbei können Werte in Bezug auf Menge und Qualität angegeben werden. Für die Verwendung von Hydro- oder Pollutographen können `INFLOWS` definiert werden.

A.4 Inputfiles

Im Folgenden sind alle Inputfiles der aus Kapitel 3.2 betrachteten Abwassernetze dargestellt.

A.4.1 Abwassernetz I

A.4.1.1 Szenario I

```
[TITLE]
;;Network 1 - scenario 1

[OPTIONS]
;;Option          Value
FLOW_UNITS        LPS
INFILTRATION      HORTON
FLOW_ROUTING      DYNWAVE
LINK_OFFSETS      DEPTH
MIN_SLOPE         0
ALLOW_PONDING     NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE        03/02/2018
START_TIME        00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE          03/04/2018
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START       01/01
SWEEP_END         12/31
DRY_DAYS          0
REPORT_STEP       00:00:10
WET_STEP          00:05:00
DRY_STEP          00:30:00
ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP    0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS       8
HEAD_TOLERANCE   0.0015
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     1
THREADS          1

TEMP_MODEL        0
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source    Parameters
;;-----
CONSTANT         0.0
DRY_ONLY         NO

[JUNCTIONS]
;;Name           Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1                330.00    3          0          0          0
2                328.00    3          0          0          0
3                326.00    3          0          0          0
4                324.00    3          0          0          0
5                322.00    3          0          0          0

[OUTFALLS]
;;Name           Elevation  Type      Stage Data  Gated  Route To
;;-----
```

Anhang

6	320	NORMAL		YES												
[CONDUITS]																
;;Name	From Node	To Node	Length	Roughness	InOffset	OutOffset	InitFlow	MaxFlow	Thickness	k_Pipe	k_Soil	specHcSoil	densitySoil	AirPattern	SoilPattern	thermalEnergy
;;-----																
1	1	2	400	0.01	0	0	0	0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0		"A_GN"		
0	0															
"S_GN_3.0"																
2	2	3	400	0.01	0	0	0	0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0		"A_GN"		
0	0															
"S_GN_3.0"																
3	3	4	400	0.01	0	0	0	0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0		"A_GN"		
0	0															
"S_GN_3.0"																
4	4	5	400	0.01	0	0	0	0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0		"A_GN"		
0	0															
"S_GN_3.0"																
5	5	6	400	0.01	0	0	0	0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0		"A_GN"		
0	0															
"S_GN_3.0"																
[XSECTIONS]																
;;Link	Shape	Geom1	Geom2	Geom3	Geom4	Barrels	Culvert									
;;-----																
1	CIRCULAR	2	0	0	0	1										
2	CIRCULAR	2	0	0	0	1										
3	CIRCULAR	2	0	0	0	1										
4	CIRCULAR	2	0	0	0	1										
5	CIRCULAR	2	0	0	0	1										
[POLLUTANTS]																
;;Name	Units	Crain	Cgw	Crdii	Kdecay	SnowOnly	Co-	Pollutant	Co-Frac	Cdwf	Cinit					
;;-----																
temperature	CELSIUS	0.0	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	15	0						
[DWF]																
;;Node	Constituent	Baseline	Patterns													
;;-----																
1	FLOW	1000														
[PATTERNS]																
;;Name	Type	Multipliers														
;;-----																
S_GN_3.0	MONTHLY	8	8	9	10	11	12									
S_GN_3.0		13	13	12	11	10	9									
;																
A_GN	MONTHLY	5	7	13	15	18	21									
A_GN		24	24	21	17	12	9									
;																
[REPORT]																
;;Reporting Options																
INPUT NO																
CONTROLS NO																
SUBCATCHMENTS ALL																
NODES ALL																
LINKS ALL																
[TAGS]																

```
[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters
```

```
[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000        0.000
2           2000.000    0.000
3           4000.000    0.000
4           6000.000    0.000
5           8000.000    0.000
6           10000.000   0.000
```

```
[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----
```

```
[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6        " 1 2 3 4 5
```

```
Szenario II
[TITLE]
;;Network 1 - scenario 2
```

```
[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    LPS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  DYNWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE    03/02/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      03/04/2018
END_TIME      00:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      0
REPORT_STEP   00:00:10
WET_STEP      00:05:00
DRY_STEP      00:30:00
ROUTING_STEP  0:00:05

INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP    0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS       8
HEAD_TOLERANCE   0.0015
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     1
THREADS          1

TEMP_MODEL       1
DENSITY          1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA              0.25
```

Anhang

```

EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source    Parameters
;;-----
CONSTANT         0.0
DRY_ONLY         NO

[JUNCTIONS]
;;Name          Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1               330.00    3         0         0         0
2               328.00    3         0         0         0
3               326.00    3         0         0         0
4               324.00    3         0         0         0
5               322.00    3         0         0         0

[OUTFALLS]
;;Name          Elevation  Type      Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6               320        NORMAL    Stage Data  YES

[CONDUITS]
;;Name          From Node  To Node    Length  Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow  MaxFlow    Thickness k_Pipe  k_Soil  specHcSoil  densitySoil
AirPattern  SoilPattern  thermalEnergy
;;-----
1               1         2         400     0.01     0         0
0             0         0.18     1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
2               2         3         400     0.01     0         0
0             0         0.18     1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
3               3         4         400     0.01     0         0
0             0         0.18     1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
4               4         5         400     0.01     0         0
0             0         0.18     1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
5               5         6         400     0.01     0         0
0             0         0.18     1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link          Shape      Geom1      Geom2      Geom3      Geom4
Barrels  Culvert
;;-----
1          CIRCULAR  2          0          0          0          1
2          CIRCULAR  2          0          0          0          1
3          CIRCULAR  2          0          0          0          1
4          CIRCULAR  2          0          0          0          1
5          CIRCULAR  2          0          0          0          1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units  Crain  Cgw  Crdii  Kdecay  SnowOnly  Co-
Pollutant      Co-Frac  Cdwf  Cinit
;;-----
temperature    CELSIUS  0.0    0.0  0.0    0.0    NO        *
0.0            15      0

[DWF]
;;Node          Constituent  Baseline  Patterns
;;-----
1              FLOW        1000

```

```

[PATTERNS]
;;Name      Type      Multipliers
;;-----
S_GN_3.0    MONTHLY  15  15  15  15  15
S_GN_3.0    MONTHLY  15  15  15  15  15
;
A_GN        MONTHLY  5   7   13  15  18  21
A_GN        MONTHLY  24  24  21  17  12  9
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT      NO
CONTROLS   NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES ALL
LINKS ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000      0.000
2           2000.000  0.000
3           4000.000  0.000
4           6000.000  0.000
5           8000.000  0.000
6           10000.000 0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6        " 1 2 3 4 5

```

A.4.1.2 Szenario III

```
[TITLE]
;;Network 1 - scenario 3

[OPTIONS]
;;Option          Value
FLOW_UNITS        LPS
INFILTRATION      HORTON
FLOW_ROUTING      DYNWAVE
LINK_OFFSETS      DEPTH
MIN_SLOPE         0
ALLOW_PONDING     NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE        03/02/2018
START_TIME        00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE          03/04/2018
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START       01/01
SWEEP_END         12/31
DRY_DAYS          0
REPORT_STEP       00:00:10
WET_STEP          00:05:00
DRY_STEP          00:30:00
ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP     0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE   0.0015
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     1
THREADS          1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source    Parameters
;;-----
CONSTANT         0.0
DRY_ONLY         NO

[JUNCTIONS]
;;Name          Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1               330.00    3          0          0          0
2               328.00    3          0          0          0
3               326.00    3          0          0          0
4               324.00    3          0          0          0
5               322.00    3          0          0          0

[OUTFALLS]
;;Name          Elevation  Type       Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6               320        NORMAL    YES        YES

[CONDUITS]
```

```

;;Name      From Node      To Node      Length      Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow   MaxFlow     Thickness  k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
-----
1          1          2            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
2          2          3            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
3          3          4            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
4          4          5            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
5          5          6            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link      Shape          Geom1        Geom2        Geom3        Geom4
Barrels    Culvert
;;-----
-----
1          CIRCULAR      2            0            0            0            1
2          CIRCULAR      2            0            0            0            1
3          CIRCULAR      2            0            0            0            1
4          CIRCULAR      2            0            0            0            1
5          CIRCULAR      2            0            0            0            1

[POLLUTANTS]
;;Name      Units    Crain    Cgw    Crdii    Kdecay    SnowOnly    Co-
Pollutant   Co-Frac  Cdwf    Cinit
;;-----
-----
temperature CELSIUS 0.0      0.0      0.0      0.0      NO          *
0.0         15      0

[DWF]
;;Node      Constituent    Baseline    Patterns
;;-----
-----
1          FLOW          1000

[PATTERNS]
;;Name      Type          Multipliers
;;-----
-----
S_GN_3.0    MONTHLY      8    8    9    10    11    12
S_GN_3.0    MONTHLY      13   13   12   11   10    9
;
A_GN        MONTHLY      15   15   15   15   15   15
A_GN        MONTHLY      15   15   15   15   15   15
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT      NO
CONTROLS   NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES ALL
LINKS ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

```

Anhang

```
[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000        0.000
2           2000.000     0.000
3           4000.000     0.000
4           6000.000     0.000
5           8000.000     0.000
6           10000.000    0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6       " 1 2 3 4 5
```

A.4.1.3 Szenario IV

```

[TITLE]
;;Network 1 - scenario 4

[OPTIONS]
;;Option          Value
FLOW_UNITS        LPS
INFILTRATION      HORTON
FLOW_ROUTING      DYNWAVE
LINK_OFFSETS      DEPTH
MIN_SLOPE         0
ALLOW_PONDING     NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE        03/02/2018
START_TIME        00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE          03/04/2018
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START       01/01
SWEEP_END         12/31
DRY_DAYS          0
REPORT_STEP       00:00:10
WET_STEP          00:05:00
DRY_STEP          00:30:00
ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP     0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE   0.0015
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     1
THREADS          1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source    Parameters
;;-----
CONSTANT         0.0
DRY_ONLY         NO

[JUNCTIONS]
;;Name          Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1               330.00    3         0          0         0
2               328.00    3         0          0         0
3               326.00    3         0          0         0
4               324.00    3         0          0         0
5               322.00    3         0          0         0

[OUTFALLS]
;;Name          Elevation  Type      Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6               320        NORMAL                YES

[CONDUITS]

```

Anhang

```

;;Name          From Node      To Node          Length      Roughness  InOffset
OutOffset      InitFlow    MaxFlow          Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern     SoilPattern  thermalEnergy
;;-----
-----
1              1              2                400         0.01      0          0
0              0              0.18            1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
2              2              3                400         0.01      0          0
0              0              0.18            1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
3              3              4                400         0.01      0          0
0              0              0.18            1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
4              4              5                400         0.01      0          0
0              0              0.18            1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
5              5              6                400         0.01      0          0
0              0              0.18            1.15  1.5   1500.0    2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link          Shape          Geom1           Geom2          Geom3          Geom4
Barrels        Culvert
;;-----
-----
1              CIRCULAR      2              0              0              0              1
2              CIRCULAR      2              0              0              0              1
3              CIRCULAR      2              0              0              0              1
4              CIRCULAR      2              0              0              0              1
5              CIRCULAR      2              0              0              0              1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units          Crain          Cgw          Crdii          Kdecay          SnowOnly      Co-
Pollutant      Co-Frac        Cdwf          Cinit
;;-----
-----
temperature    CELSIUS        0.0           0.0           0.0           0.0           NO            *
0.0           15            0

[DWF]
;;Node          Constituent      Baseline      Patterns
;;-----
-----
1              FLOW            1000

[PATTERNS]
;;Name          Type            Multipliers
;;-----
-----
S_GN_3.0        MONTHLY         8  8  9  10  11  12
S_GN_3.0        MONTHLY         13 13 12 11 10  9
;
A_GN            MONTHLY         5  7  13 15 18 21
A_GN            MONTHLY         24 24 21 17 12  9
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT          NO
CONTROLS       NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES          ALL
LINKS          ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS     0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units          Meters

```

```
[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000      0.000
2           2000.000   0.000
3           4000.000   0.000
4           6000.000   0.000
5           8000.000   0.000
6           10000.000  0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6       " 1 2 3 4 5
```

A.4.1.4 Szenario V

A.4.1.5 Verkürzung der Haltungslänge

```
[TITLE]
;;Network 1 - scenario 5 - 1

[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    LPS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  DYNWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE    03/02/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      03/04/2018
END_TIME      00:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      0
REPORT_STEP   00:00:10
WET_STEP      00:05:00
DRY_STEP      00:30:00
ROUTING_STEP  0:00:05

INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP    0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS       8
HEAD_TOLERANCE   0.0015
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     1
THREADS          1

TEMP_MODEL       1
DENSITY          1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA               0.25
EXT_UNIT         P

[EVAPORATION]
;;Data Source Parameters
;;-----
CONSTANT        0.0
DRY_ONLY        NO

[JUNCTIONS]
;;Name          Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1               330.00    3         0         0         0
2               329.50    3         0         0         0
3               329.00    3         0         0         0
4               328.50    3         0         0         0
5               328.00    3         0         0         0

[OUTFALLS]
;;Name          Elevation  Type      Stage Data  Gated  Route To
;;-----
```

```

6          327.5      NORMAL          YES

[CONDUITS]
;;Name          From Node      To Node          Length      Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow  MaxFlow  Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
-----
1          1          2          100          0.01      0          0
0          0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
2          2          3          100          0.01      0          0
0          0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
3          3          4          100          0.01      0          0
0          0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
4          4          5          100          0.01      0          0
0          0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
5          5          6          100          0.01      0          0
0          0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link          Shape          Geom1          Geom2          Geom3          Geom4
Barrels  Culvert
;;-----
-----
1          CIRCULAR      2          0          0          0          1
2          CIRCULAR      2          0          0          0          1
3          CIRCULAR      2          0          0          0          1
4          CIRCULAR      2          0          0          0          1
5          CIRCULAR      2          0          0          0          1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units  Crain  Cgw  Crdii  Kdecay  SnowOnly  Co-
Pollutant      Co-Frac  Cdwf  Cinit
;;-----
-----
temperature  CELSIUS  0.0  0.0  0.0  0.0  NO  *
0.0  15  0

[DWF]
;;Node          Constituent      Baseline  Patterns
;;-----
-----
1          FLOW          1000

[PATTERNS]
;;Name          Type          Multipliers
;;-----
-----
S_GN_3.0      MONTHLY      8  8  9  10  11  12
S_GN_3.0      13  13  12  11  10  9
;
A_GN          MONTHLY      5  7  13  15  18  21
A_GN          24  24  21  17  12  9
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT      NO
CONTROLS  NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES ALL
LINKS ALL

[TAGS]

```

Anhang

```
[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000        0.000
2           2000.000     0.000
3           4000.000     0.000
4           6000.000     0.000
5           8000.000     0.000
6           10000.000    0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6       " 1 2 3 4 5
```

A.4.1.6 Verlängerung der Haltungslänge

```
[TITLE]
;;Network 1 - scenario 5 - 2

[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    LPS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  DYNWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE    03/02/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      03/04/2018
END_TIME      00:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      0
REPORT_STEP   00:00:10
WET_STEP      00:05:00
DRY_STEP      00:30:00
ROUTING_STEP  0:00:05

INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP 0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA 1.14
MAX_TRIALS 8
HEAD_TOLERANCE 0.0015
SYS_FLOW_TOL 5
LAT_FLOW_TOL 5
MINIMUM_STEP 1
THREADS 1

TEMP_MODEL 1
```

```

DENSITY 1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA 0.25
EXT_UNIT P

[EVAPORATION]
;;Data Source Parameters
;;-----
CONSTANT 0.0
DRY_ONLY NO

[JUNCTIONS]
;;Name Elevation MaxDepth InitDepth SurDepth Aponded
;;-----
1 330.00 3 0 0 0
2 326.00 3 0 0 0
3 322.00 3 0 0 0
4 318.00 3 0 0 0
5 314.00 3 0 0 0

[OUTFALLS]
;;Name Elevation Type Stage Data Gated Route To
;;-----
6 310 NORMAL YES

[CONDUITS]
;;Name From Node To Node Length Roughness InOffset
OutOffset InitFlow MaxFlow Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
1 1 2 800 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
2 2 3 800 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
3 3 4 800 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
4 4 5 800 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
5 5 6 800 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link Shape Geom1 Geom2 Geom3 Geom4
Barrels Culvert
;;-----
1 CIRCULAR 2 0 0 0 1
2 CIRCULAR 2 0 0 0 1
3 CIRCULAR 2 0 0 0 1
4 CIRCULAR 2 0 0 0 1
5 CIRCULAR 2 0 0 0 1

[POLLUTANTS]
;;Name Units Crain Cgw Crdii Kdecay SnowOnly Co-
Pollutant Co-Frac Cdwf Cinit
;;-----
temperature CELSIUS 0.0 0.0 0.0 0.0 NO *
0.0 15 0

[DWF]
;;Node Constituent Baseline Patterns

```

Anhang

```
;;-----  
1          FLOW          1000  
  
[PATTERNS]  
;;Name          Type          Multipliers  
;;-----  
S_GN_3.0        MONTHLY      8      8      9      10     11     12  
S_GN_3.0        MONTHLY      13     13     12     11     10     9  
;  
A_GN            MONTHLY      5      7      13     15     18     21  
A_GN            MONTHLY      24     24     21     17     12     9  
;  
  
[REPORT]  
;;Reporting Options  
INPUT          NO  
CONTROLS       NO  
SUBCATCHMENTS ALL  
NODES          ALL  
LINKS          ALL  
  
[TAGS]  
  
[MAP]  
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000  
Units        Meters  
  
[COORDINATES]  
;;Node          X-Coord          Y-Coord  
;;-----  
1              0.000          0.000  
2              2000.000        0.000  
3              4000.000        0.000  
4              6000.000        0.000  
5              8000.000        0.000  
6              10000.000       0.000  
  
[VERTICES]  
;;Link          X-Coord          Y-Coord  
;;-----  
  
[PROFILES]  
;;Name          Links  
;;-----  
"1-6           " 1 2 3 4 5
```

A.4.1.7 Szenario VI

```
[TITLE]  
;;Network 1 - scenario 6  
  
[OPTIONS]  
;;Option          Value  
FLOW_UNITS        LPS  
INFILTRATION      HORTON  
FLOW_ROUTING      DYNWAVE  
LINK_OFFSETS      DEPTH  
MIN_SLOPE         0  
ALLOW_PONDING     NO  
SKIP_STEADY_STATE NO  
  
START_DATE        03/02/2018  
START_TIME        00:00:00  
REPORT_START_DATE 03/03/2018  
REPORT_START_TIME 00:00:00
```

```

END_DATE          03/04/2018
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START      01/01
SWEEP_END        12/31
DRY_DAYS         0
REPORT_STEP      00:00:10
WET_STEP         00:05:00
DRY_STEP         00:30:00
ROUTING_STEP     0:00:05

INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP    0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS       8
HEAD_TOLERANCE   0.0015
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     1
THREADS          1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source Parameters
;;-----
CONSTANT          0.0
DRY_ONLY          NO

[JUNCTIONS]
;;Name           Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1                330.00    3          0          0          0
2                328.00    3          0          0          0
3                326.00    3          0          0          0
4                324.00    3          0          0          0
5                322.00    3          0          0          0

[OUTFALLS]
;;Name           Elevation  Type       Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6                320        NORMAL     YES         YES

[CONDUITS]
;;Name           From Node  To Node    Length  Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow  MaxFlow    Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
1                1          2          400     0.01      0          0
0                0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
2                2          3          400     0.01      0          0
0                0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
3                3          4          400     0.01      0          0
0                0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
4                4          5          400     0.01      0          0
0                0          0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"

```

Anhang

```

5          5          6          400          0.01          0          0
0          0          0.18          1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link          Shape          Geom1          Geom2          Geom3          Geom4
Barrels  Culvert
;;-----
1          CIRCULAR          2          0          0          0          1
2          CIRCULAR          2          0          0          0          1
3          CIRCULAR          2          0          0          0          1
4          CIRCULAR          2          0          0          0          1
5          CIRCULAR          2          0          0          0          1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units  Crain  Cgw  Crdii  Kdecay  SnowOnly  Co-
Pollutant  Co-Frac  Cdwf  Cinit
;;-----
temperature  CELSIUS  0.0  0.0  0.0  0.0  NO  *
0.0          8          0

[DWF]
;;Node          Constituent          Baseline  Patterns
;;-----
1          FLOW          1000

[PATTERNS]
;;Name          Type          Multipliers
;;-----
S_GN_3.0  MONTHLY  8  8  9  10  11  12
S_GN_3.0          13  13  12  11  10  9
;
A_GN          MONTHLY  5  7  13  15  18  21
A_GN          24  24  21  17  12  9
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT  NO
CONTROLS  NO
SUBCATCHMENTS  ALL
NODES  ALL
LINKS  ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS  0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units  Meters

[COORDINATES]
;;Node          X-Coord          Y-Coord
;;-----
1          0.000          0.000
2          2000.000          0.000
3          4000.000          0.000
4          6000.000          0.000
5          8000.000          0.000
6          10000.000          0.000

[VERTICES]
;;Link          X-Coord          Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name          Links

```

```
;;-----  
"1-6      " 1 2 3 4 5
```

A.4.1.8 Szenario VII

```
[TITLE]
;;Network 1 - scenario 7

[OPTIONS]
;;Option          Value
FLOW_UNITS        LPS
INFILTRATION      HORTON
FLOW_ROUTING      DYNWAVE
LINK_OFFSETS      DEPTH
MIN_SLOPE         0
ALLOW_PONDING     NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE        12/31/2017
START_TIME        00:00:00
REPORT_START_DATE 01/01/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE          01/01/2019
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START       01/01
SWEEP_END         12/31
DRY_DAYS          0
REPORT_STEP       00:00:10
WET_STEP          00:05:00
DRY_STEP          00:30:00
ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP     0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA      1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0.0015
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      1
THREADS           1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source    Parameters
;;-----
CONSTANT         0.0
DRY_ONLY         NO

[JUNCTIONS]
;;Name           Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1                330.00    3          0          0          0
2                328.00    3          0          0          0
3                326.00    3          0          0          0
4                324.00    3          0          0          0
5                322.00    3          0          0          0

[OUTFALLS]
;;Name           Elevation  Type       Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6                320        NORMAL    YES        YES

[CONDUITS]
```

```

;;Name      From Node      To Node      Length      Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow   MaxFlow     Thickness  k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
-----
1          1          2            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0   2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
2          2          3            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0   2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
3          3          4            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0   2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
4          4          5            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0   2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"
5          5          6            400         0.01      0          0
0          0          0.18        1.15  1.5   1500.0   2000.0     "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link      Shape      Geom1      Geom2      Geom3      Geom4
Barrels    Culvert
;;-----
-----
1          CIRCULAR  1          0          0          0          1
2          CIRCULAR  1          0          0          0          1
3          CIRCULAR  1          0          0          0          1
4          CIRCULAR  1          0          0          0          1
5          CIRCULAR  1          0          0          0          1

[POLLUTANTS]
;;Name      Units  Crain  Cgw  Crdii  Kdecay  SnowOnly  Co-
Pollutant   Co-Frac  Cdwf  Cinit
;;-----
-----
temperature  CELSIUS 0.0    0.0    0.0    0.0    NO        *
0.0          15      0

[DWF]
;;Node      Constituent  Baseline  Patterns
;;-----
-----
1          FLOW        1000

[PATTERNS]
;;Name      Type      Multipliers
;;-----
-----
S_GN_3.0    MONTHLY  8  8  9  10  11  12
S_GN_3.0    MONTHLY  13 13 12 11  10  9
;
A_GN        MONTHLY  5  7  13 15  18  21
A_GN        MONTHLY  24 24 21 17  12  9

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT      NO
CONTROLS   NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES ALL
LINKS ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

```

Anhang

```
[COORDINATES]
;;Node          X-Coord          Y-Coord
;;-----
1                0.000            0.000
2                2000.000           0.000
3                4000.000           0.000
4                6000.000           0.000
5                8000.000           0.000
6                10000.000          0.000

[VERTICES]
;;Link          X-Coord          Y-Coord
;;-----
```

A.4.2 Abwassernetz II

A.4.2.1 Szenario I

```
[TITLE]
;;Network 2 - scenario 1

[OPTIONS]
;;Option          Value
FLOW_UNITS        LPS
INFILTRATION      HORTON
FLOW_ROUTING      DYNWAVE
LINK_OFFSETS      DEPTH
MIN_SLOPE          0
ALLOW_PONDING     NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE        03/02/2018
START_TIME        00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE          03/04/2018
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START       01/01
SWEEP_END         12/31
DRY_DAYS          0
REPORT_STEP       00:00:10
WET_STEP          00:05:00
DRY_STEP          00:30:00
ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP     0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA      1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0.0015
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      1
THREADS           1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source     Parameters
;;-----
```

```

CONSTANT          0.0
DRY_ONLY          NO

[JUNCTIONS]
;;Name            Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1                 320        3         0         0         0
2                 318        3         0         0         0
3                 316        3         0         0         0
4                 314        3         0         0         0
5                 312        3         0         0         0
7                 318        3         0         0         0
8                 314        3         0         0         0
9                 320        3         0         0         0
10                320        3         0         0         0
11                320        3         0         0         0

[OUTFALLS]
;;Name            Elevation  Type       Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6                 310        NORMAL    YES         YES

[CONDUITS]
;;Name            From Node  To Node    Length     Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow  MaxFlow    Thickness  k_Pipe    k_Soil    specHcSoil  densitySoil
AirPattern  SoilPattern  thermalEnergy
;;-----
1
0                1          2          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
2
0                2          3          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
3
0                3          4          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
4
0                4          5          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
5
0                5          6          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
6
0                7          3          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
7
0                8          5          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
8
0                10         7          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
9
0                9          7          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"
10
0                11         7          400        0.01      0         0
"S_GN_3.0"      0          0.18      1.15  1.5  1500.0    2000.0    "A_GN"

[XSECTIONS]
;;Link            Shape      Geom1      Geom2      Geom3      Geom4
Barrels  Culvert
;;-----
1          CIRCULAR  2          0          0          0          1
2          CIRCULAR  2          0          0          0          1
3          CIRCULAR  2          0          0          0          1
4          CIRCULAR  2          0          0          0          1

```

Anhang

```

5          CIRCULAR      2          0          0          0          1
6          CIRCULAR      2          0          0          0          1
7          CIRCULAR      2          0          0          0          1
8          CIRCULAR      2          0          0          0          1
9          CIRCULAR      2          0          0          0          1
10         CIRCULAR      2          0          0          0          1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units      Crain      Cgw      Crdii      Kdecay      SnowOnly      Co-
Pollutant      Co-Frac      Cdwf      Cinit
;;-----
temperature    CELSIUS  0.0      0.0      0.0      0.0      NO          *
0.0           15          0

[DWF]
;;Node          Constituent      Baseline      Patterns
;;-----
1              FLOW            1000
8              FLOW            250
8              temperature  10
9              FLOW            250
9              temperature  55
10             FLOW            250
10             temperature  40
11             FLOW            500
11             temperature  5

[PATTERNS]
;;Name          Type          Multipliers
;;-----
S_GN_1.5        MONTHLY      10   8   9   10   11   12
S_GN_1.5        MONTHLY      13   13  12  11   10   10
;
S_GN_3.0        MONTHLY      10   10  10  11   11   11.5
S_GN_3.0        MONTHLY      11.5 11  11  11   10   10
;
A_GN            MONTHLY      10   10  13  15   18   21
A_GN            MONTHLY      24   24  21  17   13   10
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT          NO
CONTROLS       NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES          ALL
LINKS          ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

[COORDINATES]
;;Node          X-Coord          Y-Coord
;;-----
1              0.000            0.000
2              2000.000          0.000
3              4000.000          0.000
4              6000.000          0.000
5              8000.000          0.000
7              2000.000          2000.000
8              6000.000          -2000.000
9              2000.000          4000.000
10             0.000            4000.000
11             4000.000          4000.000
6              10000.000         0.000

```

```

[VERTICES]
;;Link          X-Coord          Y-Coord
;;-----

```

```

[PROFILES]
;;Name          Links
;;-----
"1-6           " 1 2 3 4 5

```

A.4.2.2 Szenario II

```

[TITLE]
;;Network 2 - scenario 2

[OPTIONS]
;;Option          Value
FLOW_UNITS        LPS
INFILTRATION      HORTON
FLOW_ROUTING      DYNWAVE
LINK_OFFSETS      DEPTH
MIN_SLOPE         0
ALLOW_PONDING     NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE        03/02/2018
START_TIME        00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE          03/04/2018
END_TIME          00:00:00
SWEEP_START       01/01
SWEEP_END         12/31
DRY_DAYS          0
REPORT_STEP       00:00:10
WET_STEP          00:05:00
DRY_STEP          00:30:00
ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP     0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0.0015
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      1
THREADS           1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source     Parameters
;;-----
CONSTANT          0.0
DRY_ONLY          NO

[JUNCTIONS]
;;Name           Elevation MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded

```

Anhang

```

;;-----
1          320      3      0      0      0
2          318      3      0      0      0
3          316      3      0      0      0
4          314      3      0      0      0
5          312      3      0      0      0
7          318      3      0      0      0
8          314      3      0      0      0
9          320      3      0      0      0
10         320      3      0      0      0
11         320      3      0      0      0

[OUTFALLS]
;;Name          Elevation  Type      Stage Data      Gated      Route To
;;-----
6             310          NORMAL                    YES

[CONDUITS]
;;Name          From Node      To Node          Length      Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow  MaxFlow  Thickness  k_Pipe  k_Soil  specHcSoil  densitySoil
AirPattern  SoilPattern  thermalEnergy
;;-----
-----
1             1             2             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
2             2             3             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
3             3             4             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
4             4             5             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
5             5             6             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
6             7             3             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
7             8             5             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
8             10            7             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
9             9             7             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"
10            11            7             400          0.01      0          0
0           0           0.18      1.15  1.5  1500.0  2000.0  "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link          Shape          Geom1          Geom2          Geom3          Geom4
Barrels      Culvert
;;-----
-----
1             CIRCULAR      2             0             0             0             1
2             CIRCULAR      2             0             0             0             1
3             CIRCULAR      2             0             0             0             1
4             CIRCULAR      2             0             0             0             1
5             CIRCULAR      2             0             0             0             1
6             CIRCULAR      2             0             0             0             1
7             CIRCULAR      2             0             0             0             1
8             CIRCULAR      2             0             0             0             1
9             CIRCULAR      2             0             0             0             1

```

```

10          CIRCULAR      2          0          0          0          1

[POLLUTANTS]
;;Name      Units      Crain      Cgw      Crdii      Kdecay      SnowOnly      Co-
Pollutant   Co-Frac    Cdwf      Cinit
;;-----
temperature CELSIUS 0.0      0.0      0.0      0.0      NO          *
0.0        15          0

[DWF]
;;Node      Constituent  Baseline  Patterns
;;-----
1           FLOW        1000     "inflow_1"
7           FLOW        500      "inflow_7"
7           temperature 10
8           FLOW        250     "inflow_8"
8           temperature 10
9           FLOW        250     "inflow_9"
9           temperature 55
10          FLOW        250     "inflow_10"
10          temperature 40
11          FLOW        500     "inflow_11"
11          temperature 5

[PATTERNS]
;;Name      Type      Multipliers
;;-----
S_GN_1.5    MONTHLY  10  8  9  10  11  12
S_GN_1.5    MONTHLY  13  13  12  11  10  10
;
S_GN_3.0    MONTHLY  10  10  10  11  11  11.5
S_GN_3.0    MONTHLY  11.5  11  11  11  10  10
;
A_GN        MONTHLY  10  10  13  15  18  21
A_GN        MONTHLY  24  24  21  17  13  10
;
inflow_1    HOURLY   0.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_1    HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_1    HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_1    HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  0.0  0.0
;
inflow_7    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  1.0
inflow_7    HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_7    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
inflow_7    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
;
inflow_8    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
inflow_8    HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_8    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
inflow_8    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
;
inflow_9    HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
inflow_9    HOURLY   0.0  0.0  0.0  1.0  1.0  1.0
inflow_9    HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_9    HOURLY   1.0  1.0  1.0  0.0  0.0  0.0
;
inflow_10   HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
inflow_10   HOURLY   0.0  0.0  0.0  1.0  1.0  1.0
inflow_10   HOURLY   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
inflow_10   HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
;
inflow_11   HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
inflow_11   HOURLY   0.0  0.0  0.0  1.0  1.0  1.0
inflow_11   HOURLY   1.0  1.0  1.0  0.0  0.0  0.0
inflow_11   HOURLY   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
;

[REPORT]

```

Anhang

```
;;Reporting Options
INPUT      NO
CONTROLS   NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES ALL
LINKS ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000        0.000
2           2000.000     0.000
3           4000.000     0.000
4           6000.000     0.000
5           8000.000     0.000
7           2000.000     2000.000
8           6000.000     -2000.000
9           2000.000     4000.000
10          0.000        4000.000
11          4000.000     4000.000
6           10000.000    0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6       " 1 2 3 4 5
```

A.4.2.3 Szenario III

A.4.2.3.1 Konstante Temperaturabsenkung

```
[TITLE]
;;Network 2 - scenario 3 - 1

[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    LPS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  DYNWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE    03/02/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      03/04/2018
END_TIME      00:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      0
REPORT_STEP   00:00:10
WET_STEP      00:05:00
DRY_STEP      00:30:00
```

```

ROUTING_STEP      0:00:05

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP     0.75
LENGTHENING_STEP  0
MIN_SURFAREA     1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0.0015
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      1
THREADS           1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          T

[EVAPORATION]
;;Data Source Parameters
;;-----
CONSTANT          0.0
DRY_ONLY          NO

[JUNCTIONS]
;;Name           Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1                320        3         0         0         0
2                318        3         0         0         0
3                316        3         0         0         0
4                314        3         0         0         0
5                312        3         0         0         0
7                318        3         0         0         0
8                314        3         0         0         0
9                320        3         0         0         0
10               320        3         0         0         0
11               320        3         0         0         0

[OUTFALLS]
;;Name           Elevation  Type       Stage Data  Gated  Route To
;;-----
6                310        NORMAL     YES         YES

[CONDUITS]
;;Name           From Node  To Node    Length  Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow  MaxFlow    Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
1
0                1          2          400     0.01      0         0
  0            0          0.18      1.15  1.5    1500.0   2000.0   "A_GN"
"S_GN_3.0"
2
0                2          3          400     0.01      0         0
  0            0          0.18      1.15  1.5    1500.0   2000.0   "A_GN"
"S_GN_3.0"
3
0                3          4          400     0.01      0         0
  0            0          0.18      1.15  1.5    1500.0   2000.0   "A_GN"
"S_GN_3.0" -0.5
4
0                4          5          400     0.01      0         0
  0            0          0.18      1.15  1.5    1500.0   2000.0   "A_GN"
"S_GN_3.0"
5
0                5          6          400     0.01      0         0
  0            0          0.18      1.15  1.5    1500.0   2000.0   "A_GN"
"S_GN_3.0"

```

Anhang

6		7		3		400	0.01	0	0
0	0		0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0	"A_GN"	
"S_GN_3.0"									
7		8		5		400	0.01	0	0
0	0		0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0	"A_GN"	
"S_GN_3.0"									
8		10		7		400	0.01	0	0
0	0		0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0	"A_GN"	
"S_GN_3.0"									
9		9		7		400	0.01	0	0
0	0		0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0	"A_GN"	
"S_GN_3.0"									
10		11		7		400	0.01	0	0
0	0		0.18	1.15	1.5	1500.0	2000.0	"A_GN"	
"S_GN_3.0"									
[XSECTIONS]									
;;Link									
Barrels									
Culvert									
Shape									
Geom1									
Geom2									
Geom3									
Geom4									
;;-----									
1				CIRCULAR	2		0	0	1
2				CIRCULAR	2		0	0	1
3				CIRCULAR	2		0	0	1
4				CIRCULAR	2		0	0	1
5				CIRCULAR	2		0	0	1
6				CIRCULAR	2		0	0	1
7				CIRCULAR	2		0	0	1
8				CIRCULAR	2		0	0	1
9				CIRCULAR	2		0	0	1
10				CIRCULAR	2		0	0	1
[POLLUTANTS]									
;;Name									
Pollutant									
Units									
Co-Frac									
Crain									
Cdwf									
Cgw									
Cinit									
Crdii									
Kdecay									
SnowOnly									
Co-									
;;-----									
temperature		CELSIUS	0.0		0.0		0.0		0.0
0.0	15		0					NO	*
[DWF]									
;;Node									
Constituent									
Baseline									
Patterns									
;;-----									
1		FLOW		1000					
8		FLOW		250					
8		temperature		10					
9		FLOW		250					
9		temperature		55					
10		FLOW		250					
10		temperature		40					
11		FLOW		500					
11		temperature		5					
[PATTERNS]									
;;Name									
Type									
Multipliers									
;;-----									
S_GN_1.5		MONTHLY	10	8	9	10	11	12	
S_GN_1.5			13	13	12	11	10	10	
;									
S_GN_3.0		MONTHLY	10	10	10	11	11	11.5	
S_GN_3.0			11.5	11	11	11	10	10	
;									
A_GN		MONTHLY	10	10	13	15	18	21	
A_GN			24	24	21	17	13	10	
;									
[REPORT]									
;;Reporting Options									
INPUT									NO

```

CONTROLS NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES ALL
LINKS ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units Meters

[COORDINATES]
;;Node X-Coord Y-Coord
;;-----
1 0.000 0.000
2 2000.000 0.000
3 4000.000 0.000
4 6000.000 0.000
5 8000.000 0.000
7 2000.000 2000.000
8 6000.000 -2000.000
9 2000.000 4000.000
10 0.000 4000.000
11 4000.000 4000.000
6 10000.000 0.000

[VERTICES]
;;Link X-Coord Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name Links
;;-----
"1-6 " 1 2 3 4 5

```

A.4.2.3.2 Konstante Leistungsentnahme

```

[TITLE]
;;Network 2 - scenario 3 - 2

[OPTIONS]
;;Option Value
FLOW_UNITS LPS
INFILTRATION HORTON
FLOW_ROUTING DYNWAVE
LINK_OFFSETS DEPTH
MIN_SLOPE 0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE 03/02/2018
START_TIME 00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE 03/04/2018
END_TIME 00:00:00
SWEEP_START 01/01
SWEEP_END 12/31
DRY_DAYS 0
REPORT_STEP 00:00:10
WET_STEP 00:05:00
DRY_STEP 00:30:00
ROUTING_STEP 0:00:05

INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH

```

Anhang

```

FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP 0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA 1.14
MAX_TRIALS 8
HEAD_TOLERANCE 0.0015
SYS_FLOW_TOL 5
LAT_FLOW_TOL 5
MINIMUM_STEP 1
THREADS 1

TEMP_MODEL 1
DENSITY 1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA 0.25
EXT_UNIT P

[EVAPORATION]
;;Data Source Parameters
;;-----
CONSTANT 0.0
DRY_ONLY NO

[JUNCTIONS]
;;Name Elevation MaxDepth InitDepth SurDepth Aponded
;;-----
1 320 3 0 0 0
2 318 3 0 0 0
3 316 3 0 0 0
4 314 3 0 0 0
5 312 3 0 0 0
7 318 3 0 0 0
8 314 3 0 0 0
9 320 3 0 0 0
10 320 3 0 0 0
11 320 3 0 0 0

[OUTFALLS]
;;Name Elevation Type Stage Data Gated Route To
;;-----
6 310 NORMAL YES

[CONDUITS]
;;Name From Node To Node Length Roughness InOffset
OutOffset InitFlow MaxFlow Thickness k_Pipe k_Soil specHcSoil densitySoil
AirPattern SoilPattern thermalEnergy
;;-----
1 1 2 400 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
2 2 3 400 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
3 3 4 400 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0" -250
4 4 5 400 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
5 5 6 400 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"
6 7 3 400 0.01 0 0
0 0 0.18 1.15 1.5 1500.0 2000.0 "A_GN"
"S_GN_3.0"

```

```

7          8          5          400          0.01          0          0
0          0          0.18          1.15  1.5          1500.0          2000.0          "A_GN"
"S_GN_3.0"
8          10          7          400          0.01          0          0
0          0          0.18          1.15  1.5          1500.0          2000.0          "A_GN"
"S_GN_3.0"
9          9          7          400          0.01          0          0
0          0          0.18          1.15  1.5          1500.0          2000.0          "A_GN"
"S_GN_3.0"
10         11          7          400          0.01          0          0
0          0          0.18          1.15  1.5          1500.0          2000.0          "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]
;;Link          Shape          Geom1          Geom2          Geom3          Geom4
Barrels        Culvert
;;-----
-----
1              CIRCULAR          2              0              0              0              1
2              CIRCULAR          2              0              0              0              1
3              CIRCULAR          2              0              0              0              1
4              CIRCULAR          2              0              0              0              1
5              CIRCULAR          2              0              0              0              1
6              CIRCULAR          2              0              0              0              1
7              CIRCULAR          2              0              0              0              1
8              CIRCULAR          2              0              0              0              1
9              CIRCULAR          2              0              0              0              1
10             CIRCULAR          2              0              0              0              1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units          Crain          Cgw          Crdii          Kdecay          SnowOnly          Co-
Pollutant        Co-Frac          Cdwf          Cinit
;;-----
-----
temperature      CELSIUS          0.0          0.0          0.0          0.0          NO          *
0.0          15          0

[DWF]
;;Node          Constituent          Baseline          Patterns
;;-----
-----
1              FLOW          1000
8              FLOW          250
8              temperature          10
9              FLOW          250
9              temperature          55
10             FLOW          250
10             temperature          40
11             FLOW          500
11             temperature          5

[PATTERNS]
;;Name          Type          Multipliers
;;-----
-----
S_GN_1.5        MONTHLY          10  8  9  10  11  12
S_GN_1.5        MONTHLY          13  13  12  11  10  10
;
S_GN_3.0        MONTHLY          10  10  10  11  11  11.5
S_GN_3.0        MONTHLY          11.5  11  11  11  10  10
;
A_GN           MONTHLY          10  10  13  15  18  21
A_GN           MONTHLY          24  24  21  17  13  10
;

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT          NO
CONTROLS       NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES          ALL

```

Anhang

```
LINKS ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS 0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units      Meters

[COORDINATES]
;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
1           0.000        0.000
2           2000.000     0.000
3           4000.000     0.000
4           6000.000     0.000
5           8000.000     0.000
7           2000.000     2000.000
8           6000.000     -2000.000
9           2000.000     4000.000
10          0.000        4000.000
11          4000.000     4000.000
6           10000.000    0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----
"1-6        " 1 2 3 4 5
```

A.4.3 Abwassernetz III

```
[TITLE]
;;Network 3 - scenario 1

[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    LPS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  DYNWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE    03/02/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 03/03/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      03/04/2018
END_TIME      00:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      0
REPORT_STEP   00:00:10
WET_STEP      00:05:00
DRY_STEP      00:30:00
ROUTING_STEP  0:00:05

INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION D-W
VARIABLE_STEP   0.75
LENGTHENING_STEP 0
```

```

MIN_SURFAREA      1.14
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0.0015
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      1
THREADS           1

TEMP_MODEL        1
DENSITY           1000.0
SPEC_HEAT_CAPACITY 4190.0
UA                0.25
EXT_UNIT          P

[EVAPORATION]
;;Data Source     Parameters
;;-----
CONSTANT          0.0
DRY_ONLY          NO

[JUNCTIONS]
;;Name           Elevation  MaxDepth  InitDepth  SurDepth  Aponded
;;-----
1                330.00    3         0          0         0
2                328.00    3         0          0         0
3                326.00    3         0          0         0
5                323.00    3         0          0         0

[OUTFALLS]
;;Name           Elevation  Type       Stage Data    Gated    Route To
;;-----
6                321        NORMAL                    YES

[STORAGE]
;;Name           Elev.      MaxDepth  InitDepth  Shape      Curve Name/Params
N/A      Fevap  Psi      Ksat      IMD      Thickness k_Wall k_Soil specHcSoil
densitySoil AirPattern SoilPattern
;;-----
4                324.00    3         0          TABULAR    StorageNode
0                0         0.18      1.15      1.5      1500.0      2000.0
"A_GN"          "S_GN_3.0"

[CONDUITS]
;;Name           From Node    To Node      Length      Roughness  InOffset
OutOffset  InitFlow    MaxFlow      Thickness  k_Pipe    k_Soil    specHcSoil  densitySoil
AirPattern  SoilPattern thermalEnergy
;;-----
1                1            2            400        0.01      0         0
0                0            0.18        1.15      1.5      1500.0    2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
2                2            3            400        0.01      0         0
0                0            0.18        1.15      1.5      1500.0    2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
3                3            4            400        0.01      0         0
0                0            0.18        1.15      1.5      1500.0    2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
4                4            5            400        0.01      1         0
0                0            0.18        1.15      1.5      1500.0    2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"
5                5            6            400        0.01      0         0
0                0            0.18        1.15      1.5      1500.0    2000.0      "A_GN"
"S_GN_3.0"

[XSECTIONS]

```

Anhang

```

;;Link          Shape          Geom1          Geom2          Geom3          Geom4
Barrels        Culvert
;;-----
1              CIRCULAR          2              0              0              0              1
2              CIRCULAR          2              0              0              0              1
3              CIRCULAR          2              0              0              0              1
4              CIRCULAR          2              0              0              0              1
5              CIRCULAR          2              0              0              0              1

[POLLUTANTS]
;;Name          Units          Crain          Cgw          Crdii          Kdecay          SnowOnly          Co-
Pollutant        Co-Frac        Cdwf          Cinit
;;-----
temperature      CELSIUS        0.0           0.0           0.0           0.0           NO              *
0.0              15             0

[DWF]
;;Node          Constituent          Baseline          Patterns
;;-----
1              FLOW                1000             "inflow"
1              temperature          15

[CURVES]
;;Name          Type          X-Value          Y-Value
;;-----
StorageNode     Storage        0.5              10
StorageNode     Storage        1                12
StorageNode     Storage        1.5              14
StorageNode     Storage        2                16
StorageNode     Storage        2.5              18
StorageNode     Storage        3                20

[PATTERNS]
;;Name          Type          Multipliers
;;-----
S_GN_3.0        MONTHLY        8      8      9      10      11      12
S_GN_3.0        MONTHLY        13     13     12     11     10     9
;
A_GN            MONTHLY        5      7      13     15     18     21
A_GN            MONTHLY        24     24     21     17     12     9
;
inflow          HOURLY         1.0     1.0     1.0     1.0     1.0     1.0

[REPORT]
;;Reporting Options
INPUT          NO
CONTROLS       NO
SUBCATCHMENTS ALL
NODES          ALL
LINKS          ALL

[TAGS]

[MAP]
DIMENSIONS     0.000 -8000.000 10000.000 10000.000
Units          Meters

[COORDINATES]
;;Node          X-Coord          Y-Coord
;;-----
1              0.000            0.000
2              2000.000         0.000
3              4000.000         0.000
5              8000.000         0.000

```

```
6          10000.000      0.000
4          6000.000       0.000

[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----  -----

```

```
[PROFILES]
;;Name      Links
;;-----  -----
"1-6       " 1 2 3 4 5
```