



UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN

# Masterarbeit

## Numerische Simulation des Temperatureinflusses auf Trinkwasserleitungen

verfasst von

Johann Philip Constantin SANDER, B.Sc.

im Rahmen des Masterstudiums

Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, September 2022

Betreut von:

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Reinhard Perfler  
Institut für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und  
Gewässerschutz Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt



## **Vorwort**

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen des Masterstudiums „Kulturtechnik und Wasserwirtschaft“ am Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz an der Universität für Bodenkultur Wien. Die Idee zu dieser Arbeit entwickelte sich im Laufe meiner Tätigkeit als studentischer Mitarbeiter an dem Projekt „Auswirkungen von erhöhten Wassertemperaturen bei der Trinkwassergewinnung,-speicherung und -verteilung“ in Zusammenarbeit mit meinem Betreuer Christoph Schönher.

An dieser Stelle möchte ich meinen beiden Betreuern Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Reinhard Perfler und Dipl.-Ing. Christoph Schönher für die Betreuung dieser Arbeit danken.

Wien, September 2022

Philip Sander



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	2
3 Allgemeine Grundlagen.....	4
3.1 Trinkwasserqualität.....	4
3.1.1 Mikrobiologische Aspekte der Trinkwasserqualität.....	4
3.1.2 Chemische und physikalische Aspekte der Trinkwasserqualität.....	6
3.2 Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung.....	6
3.2.1 Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung.....	6
3.2.2 Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität.....	7
3.3 Numerische Modellierung – CFD.....	8
3.3.1 Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl.....	9
3.4 Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur.....	9
3.4.1 Rohrmaterial.....	10
3.4.2 Betriebseigenschaften.....	10
3.4.3 Bodenmaterial.....	11
3.4.4 Überdeckung, Tagesgang und Jahresverlauf.....	11
3.4.5 Bodenbelag.....	13
3.4.6 Urban Heat Island.....	13
4 Material und Methoden.....	15
4.1 Schriftliche Anfragen an Wasser- und Energieversorger.....	15
4.2 Szenarien.....	16
4.3 Geometrie.....	17
4.4 Bodentemperatur.....	20
4.5 Rohrmaterial.....	21
4.6 Vereinfachung.....	21

4.7	OpenFOAM .....	22
4.8	Systemeinstellungen .....	25
4.9	Geometriequalität .....	27
4.10	Plausibilitätsprüfung nach Blokker und Pieterse-Quirijns .....	27
4.10.1	Stationaritätsprüfung .....	31
5	Ergebnisse und Diskussion .....	33
5.1	Übersicht der Analysen .....	33
5.2	Einfluss der Fernwärmeleitung .....	34
5.2.1	Block 1 – stationäre Berechnung .....	34
5.2.2	Block 2 – instationäre Berechnung .....	39
5.3	Einfluss des Materials der Trinkwasserleitung .....	47
5.3.1	Block 1 – stationäre Berechnung .....	47
5.3.2	Block 2 – instationäre Berechnung .....	52
6	Interpretation .....	60
7	Schlussfolgerung und Ausblick .....	63
8	Literaturverzeichnis .....	64
9	Anhang I .....	68
10	Lebenslauf .....	125
11	Eidesstattliche Erklärung .....	126

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tagestemperaturgang eines Bodens in Abhängigkeit der Tiefe .....	12
Abbildung 2: Jahrestemperaturgang eines mitteleuropäischen Bodens.....	12
Abbildung 3: Querschnitt normal zur z-Achse.....	18
Abbildung 4: Zellanordnung der TWL .....	19
Abbildung 5: Verzeichnisstruktur OpenFOAM .....	23
Abbildung 6: Beispielhafte Berechnung der Schiefe nach CFD SUPPORT (2022) .....	24
Abbildung 7: Plausibilitätsprüfung .....	30
Abbildung 8: Stationaritätsprüfung für Szenario 1.....	31
Abbildung 9: Stationaritätsprüfung für Szenario 1.....	32
Abbildung 10: Wassertemperaturverlauf entlang der PE-Rohrachse .....	35
Abbildung 11: Wassertemperaturverlauf entlang der PVC-Rohrachse.....	36
Abbildung 12: Wassertemperaturverlauf entlang der Achse des gusseisernen Rohrs .....	37
Abbildung 13: Bodentemperaturverlauf um die Achse der PE-TWL.....	38
Abbildung 14: Wassertemperaturverlauf der PE-TWL .....	39
Abbildung 15: Wassertemperaturverlauf der PVC-TWL.....	40
Abbildung 16: Wassertemperaturverlauf der gusseisernen TWL .....	42
Abbildung 17: Änderung der Bodentemperatur.....	43
Abbildung 18: Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung .....	44
Abbildung 19: Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung II .....	45
Abbildung 20: Wassertemperaturverlauf ohne FWL .....	48
Abbildung 21: Wassertemperaturverlauf mit FWL-Abstand von 1,0 m.....	49
Abbildung 22: Wassertemperaturverlauf mit FWL-Abstand von 0,5 m.....	50
Abbildung 23: Bodentemperaturverlauf um die Achse der TWL ohne FWL .....	51
Abbildung 24: Wassertemperaturverlauf ohne FWL .....	52
Abbildung 25: Wassertemperaturverlauf mit FWL-Abstand von 1,0 m.....	54
Abbildung 26: Wassertemperaturverlauf mit FWL-Abstand von 0,5 m.....	55
Abbildung 27: Änderung der Bodentemperatur.....	56
Abbildung 28: Anteil der TWL-Materialien an der Trinkwassererwärmung .....	57
Abbildung 29: Anteil der TWL-Materialien an der Trinkwassererwärmung .....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mikrobiologische Parameter.....	5
Tabelle 2: Mikrobiologische Indikatorparameter.....	5
Tabelle 3: Spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit.....	10
Tabelle 4: Thermische Eigenschaften von Sand, Luft und Wasser.....	11
Tabelle 5: Szenariobeschreibung.....	17
Tabelle 6: Gesamtbreite in Abhängigkeit des Horizontalabstandes.....	17
Tabelle 7: Zellaufteilung eines beliebigen Querschnitts.....	19
Tabelle 8: Rohrmaterialien und Parameter.....	21
Tabelle 9: Maximale Schiefe und $y +$ der Geometrievariationen.....	27
Tabelle 10: Parameter der Plausibilitätsprüfung.....	29
Tabelle 11: mittlere Wassertemperatur.....	31
Tabelle 12: Abbildungslegende.....	33
Tabelle 13: Temperaturanstieg entlang der Fließstrecke der PE-TWL.....	35
Tabelle 14: Temperaturanstieg entlang der Fließstrecke der PVC-TWL.....	36
Tabelle 15: Temperaturanstieg entlang der Fließstrecke der gusseisernen TWL.....	37
Tabelle 16: Wassertemperaturänderung der PE-TWL nach 900 m Fließstrecke.....	40
Tabelle 17: Wassertemperaturänderung der PVC-TWL nach 900 m Fließstrecke.....	41
Tabelle 18: Wassertemperaturänderung der gusseisernen TWL.....	42
Tabelle 19: Wassertemperaturänderung ohne FWL.....	48
Tabelle 20: Wassertemperaturänderung mit FWL-Abstand von 1,0 m.....	49
Tabelle 21: Wassertemperaturänderung mit FWL-Abstand von 0,5 m.....	50
Tabelle 22: Wassertemperaturänderung ohne FWL.....	53
Tabelle 23: Wassertemperaturänderung mit FWL-Abstand von 1,0 m.....	54
Tabelle 24: Wassertemperaturänderung mit FWL-Abstand von 0,5 m.....	55

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CFL-Zahl	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl
$C_v$	Spezifische Wärmekapazität
$\epsilon$	Dissipationsrate
FWL	Fernwärmeleitung
OpenFOAM	Open Source Field Operation and Manipulation
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PVC	Polyvinylchlorid
TWL	Trinkwasserleitung
UHI	Urban heat island
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit

## Kurzfassung

Die Qualität des Trinkwassers, insbesondere in Hinblick auf mikrobielles Wachstum, wird unter anderem durch die Wassertemperatur in Trinkwasserleitungen beeinflusst. Diese hängt maßgeblich von der umgebenden Bodentemperatur ab und unterliegt somit natürlichen Einflüssen wie der Sonneneinstrahlung sowie anthropogenen Einflüssen wie im Untergrund verbauten Wärmequellen, beispielsweise Fernwärmeleitungen, U-Bahn-Schächten und Tiefgaragen. In dieser Arbeit soll der Einfluss von Fernwärmeleitungen sowie unterschiedlicher Trinkwasserleitungsmaterialien auf die Temperaturentwicklung in Trinkwasserleitungen untersucht werden. Dazu wurde ein dreidimensionales numerisches Modell auf Basis der Software OpenFOAM erstellt und stationäre wie instationäre Berechnungen durchgeführt. Die Berechnungsszenarien umfassen den Einfluss des Horizontalabstandes zwischen Trinkwasser- und Fernwärmeleitung sowie den Einfluss unterschiedlicher Trinkwasserleitungsmaterialien (PE, PVC, Gusseisen) auf die Temperaturentwicklung. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verdopplung des Horizontalabstandes von 0,5 m auf 1,0 m zu einer deutlich reduzierten Temperaturzunahme führte. Hinsichtlich des Trinkwasserleitungsmaterials ergaben Materialien mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit eine erhöhte Wassertemperaturzunahme. Insgesamt übte die Sonneneinstrahlung über den Bodenkörper den größten Einfluss auf die Temperaturentwicklung in Trinkwasserleitungen aus, gefolgt von der Fernwärmeleitung. Der Einfluss des Trinkwasserleitungsmaterial ist im Vergleich zur Fernwärmeleitung geringer einzuschätzen.

**Schlagwörter:** Computational Fluid Dynamics (CFD), Fernwärmeleitungen, Modellierung (stationär, instationär), OpenFOAM, Rohrwerkstoffe, Trinkwasserqualität, Trinkwassertemperatur, urban heat island (UHI)

## Abstract

The quality of drinking water, especially regarding to microbial growth, is influenced, among other things, by the water temperature in drinking water pipelines. This is related to the surrounding ground temperature and is therefore subject to natural influences such as solar radiation and anthropogenic influences such as heat sources installed underground. In this work, the influence of district heating pipes and different drinking water pipe materials on the temperature development in drinking water pipes is to be examined. For this purpose, a three-dimensional numerical model based on the OpenFOAM software was created and steady-state and transient calculations were carried out. The results were analyzed regarding to the influence of the horizontal distance between drinking water and district heating pipes as well as different drinking water pipe materials (PE, PVC, cast iron) on the temperature development. Doubling the distance led to a significantly reduced temperature increase. Regarding the drinking water pipe material, high thermal conductivity resulted in greater water temperature increase. Overall, the solar radiation exerted the greatest influence on the temperature development in drinking water pipes via the bulk soil, followed by the district heating pipe. The influence of the drinking water pipe material is estimated to be less compared to the district heating pipe.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics (CFD), district heating pipe, drinking water quality, drinking water temperature, modelling (stationary, transient), OpenFOAM, pipe material, urban heat island (UHI)

# 1 Einleitung

Die Wassertemperatur nimmt einen großen Einfluss auf die Trinkwasserqualität, insbesondere in Hinblick auf mikrobielles Wachstum. Bereits in den vergangenen Jahren lässt sich eine Trinkwassernetztemperaturzunahme in Österreich zwischen  $0,063 - 0,091^{\circ}\text{C}$  pro Jahr feststellen (SCHÖNHER et al., 2020). Im Zuge des Klimawandels wird erwartet, dass in Österreich Hitzeperioden von mindestens 20 Tagen mit Temperaturen um  $30^{\circ}\text{C}$  in Zukunft statt alle 20 Jahre alle 2 Jahren auftreten werden (RANKE, 2019). Besonders im urbanen Raum ist aufgrund von Bodenversiegelung und sogenannten Urban Heat Islands (UHI) insbesondere im Sommer mit steigenden Bodentemperaturen zu rechnen (AGUDELO-VERA et al., 2015). Zu den UHI zählen unter anderem anthropogene Wärmequellen wie Fernwärmeleitungen (FWL), Stromkabel und U-Bahnnetze. Insbesondere Fernwärmeleitungen befinden sich im urbanen Raum weiter im Ausbau und teilen sich unter anderem mit Trinkwasserleitungen (TWL) den Untergrund. Somit ist von einer weiteren Erwärmung des Untergrundes, einhergehend mit einer Erhöhung der Trinkwassertemperatur, auszugehen. Darüber hinaus wird der Temperatúraustausch zwischen Boden und Trinkwasser durch das Material der Trinkwasserleitung beeinflusst. Unterschiedliche Materialien verlängern oder verkürzen die Zeit, die das Trinkwasser benötigt um die umgebende Bodentemperatur anzunehmen (BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS, 2013).

Verschiedene Studien befassen sich mit den Auswirkungen erhöhter Temperaturen auf die Trinkwasserqualität, jedoch nur wenige mit den einzelnen Ursachen der Temperaturzunahme. In dieser Arbeit soll der Einfluss des Abstandes einer FWL sowie verschiedener TWL-Materialien auf die Trinkwassertemperatur untersucht werden. Dazu wird ein dreidimensionales numerisches Modell mit der Software OpenFOAM erstellt und verschiedene Szenarien berechnet. Der Bearbeitungszeitraum der Arbeit war von Januar 2020 bis September 2022.

## 2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

In dieser Arbeit wird die folgende Zielsetzung verfolgt:

1. Untersuchung von ausgewählten Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung in Trinkwasserleitungen mittels einer dreidimensionalen numerischen Simulation:
  - a. Abstand zwischen Trinkwasser- und Fernwärmeleitung
  - b. Verschiedene Trinkwasserleitungsmaterialien

Zur Umsetzung der Zielsetzung wurden folgende Arbeitsschritte festgelegt:

1. Ermittlung und Festlegung von Werten ausgewählter Materialparameter, baulichen Eigenschaften sowie Betriebseigenschaften.
2. Erstellung eines numerischen Modells auf Basis der ausgewählten Parameter in OpenFOAM und Festlegung verschiedener Szenarien.
3. Plausibilitätsprüfung des erstellten Modells.
4. Analyse der Ergebnisse des numerischen Modells hinsichtlich der Temperaturentwicklung in Trinkwasserleitungen.

Zur Bearbeitung der Fragestellung werden in Kapitel 3 die Grundlagen, auf denen diese Arbeit basiert, vorgestellt und eine Literaturstudie durchgeführt. Zu Beginn werden ausgewählte Anforderungen an die Trinkwasserqualität beschrieben. Es wird insbesondere auf die mikrobiologischen Folgen erhöhter Trinkwassertemperaturen eingegangen. Anschließend widmet sich Kapitel 3.2 den physikalischen Prozessen der Wärmeübertragung, die beim Temperatureaustausch zwischen fließendem und stagnerendem Trinkwasser, Trinkwasserleitung und umgebendem Bodenkörper relevant sind. Kapitel 3.3 behandelt die Grundlagen der numerischen Modellierung. In Kapitel 3.4 werden die Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur vorgestellt.

Kapitel 4 widmet sich der Beschreibung des erstellten Modells, beginnend mit den Ergebnissen einer an Trinkwasser- und Fernwärmeversorger gestellten schriftlichen Befragung und die daraus resultierenden Modelleigenschaften. Es werden die verschiedenen Berechnungsarten sowie Unterschiede der Szenarien in Kapitel 4.2 vorgestellt. Anschließend werden die Randbedingungen wie Geometrie und Temperaturen beschrieben sowie die modellierten Rohrmaterialien. In Kapitel 4.6 werden notwendige Vereinfachungen des Modells erklärt und im folgenden Unterkapitel wird die Modellerstellung mit der Software OpenFOAM beschrieben. Da eine Validierung des Modells den Rahmen dieser Arbeit übersteigt, wurde eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt, die in drei Bereiche unterteilt ist. In Kapitel 4.9 werden softwareeigene Methoden gezeigt, anhand derer die Geometrie des Modells geprüft werden. Anschließend erfolgt der Vergleich der Ergebnisse eines Testszenarios mit denen einer

## Zielsetzung und Aufgabenstellung

analytischen Berechnung nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013). Im letzten Teil der Plausibilitätsprüfung werden die Ergebnisse der stationären Berechnungen einer Stationaritätsprüfung unterzogen.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Modellierung vorgestellt und analysiert. Insgesamt 18 Berechnungen, die in zwei Blöcke unterteilt sind, werden hinsichtlich des Einflusses einer Fernwärmeleitung auf die Trinkwassertemperatur sowie des Einflusses verschiedener Trinkwasserleitungsmaterialien auf die Trinkwassertemperatur vorgestellt.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen und mit vergleichbaren Studien aus der Literatur verglichen. Kapitel 7 gibt noch einmal eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einen Ausblick.

## 3 Allgemeine Grundlagen

### 3.1 Trinkwasserqualität

Damit Wasser für den Konsum durch Menschen bekömmlich ist, und somit als Trinkwasser klassifiziert werden kann, müssen bestimmte Qualitätskriterien erfüllt werden. In Österreich werden diese bezüglich des Trinkwassers in der Trinkwasserverordnung (BMSGPK, 2022) und im Lebensmittelbuch (BMSGPK, 2019) festgelegt. Es wird zwischen mikrobiologischen und chemisch-physikalischen Parametern unterschieden.

#### 3.1.1 Mikrobiologische Aspekte der Trinkwasserqualität

Mikrobiologische Organismen, die in Trinkwasserversorgungsleitungen zu einer Beeinträchtigung der Qualität führen können, werden eingeteilt in Bakterien, Viren und Protozoen. Diese sind verantwortlich für die Mehrzahl an trinkwasserbasierten gesundheitlichen Problemen (WHO, 2017, 124) wie Durchfallerkrankungen bei Menschen. Darüber hinaus können auch Probleme wie Biokorrosion (SUN et al., 2014) und Fouling auftreten (ALLION et al., 2011).

Grundsätzlich ist Trinkwasser nicht steril, jedoch stellen die meisten Mikroorganismen keine Gefährdung für die menschliche Gesundheit dar. Ausnahmen bilden zum Beispiel Bakterien wie *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, Mykobakterien, *Aeromonas hydrophila*, Protozoen wie *Acanthamoeba*, *Cryptosporidium* und *Giardia lamblia* sowie Viren der Gattung der Noroviren (PREST, 2016). Protozoen haben teils pathogene Eigenschaften oder können als Wirt für pathogene Bakterien dienen. Das Vorkommen der Mikroorganismen in Trinkwasserleitungen unterteilt sich dabei auf Biofilme an den Rohrwänden mit einem Anteil von etwa 95% und Vorkommen im freien Wasser mit etwa 5% Anteil (FLEMMING et al., 2002).

Als Parameter zur Ermittlung der mikrobiologischen Belastung wird meist die Anzahl an koloniebildenden Einheiten, kurz KBE, genutzt. Dabei wird eine Wasserprobe bei 22°C bzw. 37°C für 7 bzw. 14 Tage im Brutschrank gelagert und anschließend analysiert. Auch wird die Wasserprobe auf coliforme Bakterien hin untersucht, die als Indikatororganismen auf eine fäkale Verunreinigung hinweisen (GROBE et al., 2014).

Für Wasserproben aus dem Verteilungsnetz gelten laut Lebensmittelbuch (BMSGPK, 2019) für mikrobiologische Parameter folgende Grenzwerte:

Tabelle 1: Mikrobiologische Parameter

Parameter	Wert	Einheit
Escherichia coli	0	Anzahl/100 ml
Enterokokken	0	Anzahl/100 ml
Pseudomonas aeruginosa	0	Anzahl/100 ml

Darüber hinaus werden Indikatorparameter beprobt, für die folgende Grenzwerte zu unterschreiten sind:

Tabelle 2: Mikrobiologische Indikatorparameter

Indikatorparameter	Wert	Einheit
KBE 22 (koloniebildende Einheiten bei 22°C Bebrütungstemperatur)	100	Anzahl/ml
KBE 37 (koloniebildende Einheiten bei 37°C Bebrütungstemperatur)	20	Anzahl/ml
Coliforme Bakterien	0	Anzahl/250 ml
Clostridium perfringens (einschließlich Sporen)*	0	Anzahl/250 ml

\*Clostridium perfringens müssen dabei nur bestimmt werden, sofern die Ressource ein Oberflächengewässer ist oder davon beeinflusst wird.

Biologische Prozesse wie die Vermehrung der Mikroorganismen werden in TWL durch die Nährstoffverfügbarkeit, die Wassertemperatur, die Verweilzeit, betriebliche Bedingungen wie Fließgeschwindigkeit und Druck sowie das Rohrmaterial beeinflusst. Die organische und anorganische Nährstoffverfügbarkeit stellt darüber hinaus einen begrenzenden Faktor dar (PREST, 2016).

Bei niedrigen Wassertemperaturen werden die mikrobiologisch-hygienischen Anforderungen meist eingehalten (GROBE und WINGENDER, 2011), allerdings beobachteten VAN DER KOOJI und VAN DER WIELEN (2013) bereits ab 5°C den Beginn der Vermehrung.

Insbesondere Bakterien sind, was das Wachstum betrifft, sehr temperaturabhängig. Bereits 1984 stellten BURKE et al. einen Zusammenhang zwischen steigenden Wassertemperaturen und steigenden Zahlen an coliformen Bakterien fest. GROBE et al. (2014) fanden einen Zusammenhang zwischen zunehmender Wassertemperatur und zunehmender Belegung der Oberfläche mit Biofilmen. Ebenso stellten sie in den Biofilmen eine Zunahme an coliformen Bakterien fest. Auch Änderungen der bakteriellen Zusammensetzung sowie gesteigerte Wachstumsraten von E. coli. lassen sich laut VITAL (2012) mit zunehmenden Wassertemperaturen feststellen. SCHÖNHER et al. (2020) ermittelten auf Basis von Befunddaten für das Land Niederösterreich von 1991 bis 2019 für KBE 37 bei einer Temperaturzunahme von 15°C auf 20°C eine zunehmende Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Grenzwertes von 20 Einheiten pro ml.

### **3.1.2 Chemische und physikalische Aspekte der Trinkwasserqualität**

Im Lebensmittelbuch (BMSGPK, 2019) wird eine Vielzahl an chemischen Parametern und deren Grenzwerte aufgelistet. Hervorzuheben sind der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, der SAK 254 als Indikator für organisches Material sowie die Wassertemperatur. Diese muss weniger als 25°C betragen, wobei die Beurteilungstoleranz bei  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  liegt. Sowohl Geruch, Geschmack und Trübung müssen „für den Verbraucher annehmbar und ohne anormale Veränderung“ (BMSGPK, 2019) sein, wobei Geschmack und Geruch der subjektiven Wahrnehmung des Konsumenten unterliegen.

Im Gegensatz zu biologischen Verunreinigungen werden gesundheitliche Probleme durch chemische Verunreinigungen meist erst nach Einnahme über einen längeren Zeitraum hervorgerufen. Meist treten eine Gefährdung oder gesundheitliche Beeinträchtigungen bei einmaliger Einnahme nur bei massiver Kontamination auf, was dem Konsumenten in der Regel durch Geschmack, Geruch oder Färbung auffällt (WHO, 2017, 6).

## **3.2 Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung**

Wärme ist laut Definition „Energie, die ursächlich und ausschließlich aufgrund einer Temperaturdifferenz übertragen wird, die zwischen einem System und seiner Umgebung herrscht“ (STEPHAN et al., 2013, 19). Der Prozess der Wärmeübertragung passiert stets in Richtung der abnehmenden Temperatur, zum Beispiel fließt Energie in Form von Wärme von einem wärmeren Erdkörper in Richtung einer kühleren Trinkwasserleitung. Unterschieden werden drei Arten des Wärmetransports: Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung.

### **3.2.1 Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung**

Konduktion, auch Wärmeleitung genannt, basiert auf dem Energietransport zwischen Molekülen. Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die kinetische Energie, mit der sich Moleküle bewegen. Besteht ein Temperaturgradient, wird kinetische Energie an Moleküle geringerer Temperatur abgegeben. Dieser Prozess findet unabhängig vom Aggregatzustand des Mediums statt und eine makroskopische Bewegung bildet hier keine Voraussetzung für den Wärmetransport (STEPHAN et al., 2013, 19), wobei im festen Aggregatzustand nur Konduktion und, meist in viel geringerem Umfang, Wärmestrahlung stattfindet. Bei der Betrachtung des Wärmetransports zwischen Gasen und Fluiden findet auch Konduktion statt, jedoch überwiegen die Prozesse der Konvektion und Wärmestrahlung (BAEHR und STEPHAN, 2016, 2). Zur Berechnung des Wärmestroms aufgrund von Konduktion dient die Wärmeleitfähigkeit, siehe Kapitel 3.2.2.

Konvektion bezeichnet den Energietransport in einem strömenden Medium. Durch die Bewegung findet ein Transport von kinetischer Energie statt, die maßgebenden Parameter sind unter anderem die Fließgeschwindigkeit und Turbulenz (STEPHAN et al., 2013, 20). Von erzwungener Konvektion spricht man, wenn eine Flüssigkeit von äußeren Druckkräften in Bewegung versetzt wird. Im Fall von Stagnation, die Strömung einer Flüssigkeit erfolgt nur durch Auftriebskräfte, wird der Wärmetransport freie Konvektion genannt (HERING et al., 2016, 225). Kommt es zu einer Überlagerung von Konduktion und Konvektion, was in einem strömenden Fluid mit Temperaturgradienten der Fall ist, spricht man von konvektivem Wärmeübergang (BAEHR und STEPHAN, 2016, 11).

Wärmestrahlung bezeichnet die Abgabe von Energie in Form elektromagnetischer Wellen an seine Umgebung. Dies geschieht bei allen Körpern, die eine höhere Temperatur als den absoluten Nullpunkt von 0 K haben, und ist umso größer, je größer die Temperatur des Körpers ist (STEPHAN et al., 2013, 22).

Bei einem Wärmeübergang zwischen einem strömenden Fluid und einem Festkörper, z. B. einer Rohrwand, bildet sich aufgrund von Adhäsionskräften eine Grenzschicht zwischen beiden aus (HERING et al., 2016, 226). Direkt am Festkörper beträgt die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids 0 m/s, dort ist die Wärmeübertragung von Konduktion und Wärmestrahlung geprägt. Die Fluidtemperatur in dieser Grenzschicht unterscheidet sich direkt an der Wand stark von der mittleren Fluidtemperatur (BAEHR und STEPHAN, 2016, 11).

Die Wärmeübertragung beruht bei Feststoffen auf Konduktion und bei Flüssigkeiten hauptsächlich auf Konvektion. Bei der in dieser Arbeit erfolgten Berechnungen findet unter anderem ein Wärmeaustausch zwischen einer festen Rohrwand und flüssigem Wasser statt. Die beiden Temperaturfelder beeinflussen sich gegenseitig und werden simultan berechnet. Dieser Prozess wird „konjugierter Wärmeübergang“ genannt (HERWIG und MOSCHALLSKI, 2019, 17).

### **3.2.2 Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität**

Die maßgebenden physikalischen Parameter zur Wärmeübertragung sind die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) sowie die spezifische Wärmekapazität ( $C_v$ ).

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine temperatur- und druckabhängige Materialeigenschaft. Der Einfluss des Druckes und der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit kann bei den in dieser Arbeit vorkommenden Schwankungsbreiten vernachlässigt werden. Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt die Wärmeleitung durch ein Material, angegeben in  $W/(m \times K)$ . Je höher der Wert,

desto besser leitet das Material Wärme. Metalle weisen besonders hohe Wärmeleitfähigkeiten auf, während feste elektrische Nichtleiter wie Kunststoffe und vor allem Flüssigkeiten und Gase kleinere Werte aufweisen (BAEHR und STEPHAN, 2016, 5). In den für diese Arbeit erstellten Berechnungen kommt es für das flüssige Wasser zu nur sehr geringen Druckänderungen, die Temperaturänderungen betragen weniger als 5°C. Daraus ergibt sich eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit von weniger als 2%. Auch für Feststoffe wie Gusseisen, PVE und PE liegt die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in einem ähnlich kleinen Wertebereich und kann daher hier vernachlässigt werden.

Die spezifische Wärmekapazität, in  $J/(kg \times K)$ , gibt an, wie viel Wärmenergie pro kg eines Materials aufgenommen werden muss, um dessen Temperatur um 1 K zu erhöhen. Je höher der Wert ist, desto langsamer erwärmt sich das Material. Die spezifische Wärmekapazität ist keine Konstante, sondern temperatur- und druckabhängig. Allerdings liegt die Änderungsrate bei den hier berechneten kleinen Temperaturintervallen bei unter 1%, so dass sie als konstant angenommen werden kann (HERING et al., 2016, 171).

### 3.3 Numerische Modellierung – CFD

Mit der numerischen Strömungsmechanik, auf Englisch „Computational Fluid Dynamics“ (CFD), können Modelle erstellt und simuliert werden, deren Komplexität zu groß für eine analytische Lösung oder eine Nachbildung in einem physischen Modell ist (FERZIGER und PERIĆ, 2008, 27). Je nach Fragestellung werden geeignete Differentialgleichungen gewählt, die die Strömungssituation ausreichend beschreiben können. Navier-Stokes-Gleichungen werden zum Beispiel bei Einbeziehung von Turbulenz im Bereich der Rohrachse und laminarer Grenzschicht im Bereich der Rohrwand genutzt. Können diese vernachlässigt werden, werden oftmals die Eulergleichungen verwendet (BAEHR und STEPHAN, 2016, 356). In der numerischen Strömungsmechanik werden die Differentialgleichungen nicht exakt gelöst, sondern approximiert. Über eine Diskretisierungsmethode wird das Untersuchungsgebiet in kleine Volumen- und Zeiteinheiten eingeteilt, die Differentialgleichungen werden zu Differenzgleichungen. Die geläufigsten dieser Methoden sind die Finite-Differenzen-Methode, die Finite-Elemente-Methode und die Finite-Volumen-Methode (GHAIB, 2019, 65). Nach FERZIGER und PERIĆ (2008, 27) beeinflusst die Wahl der Diskretisierungsmethode die Genauigkeit der Approximation und hat zusätzlich Einfluss auf den Aufwand der Berechnungen. Das Untersuchungsgebiet wird in eine Gitterstruktur eingeteilt. Eine hohe Gitterfeinheit liefert exaktere Ergebnisse, benötigt aber einen höheren Speicherbedarf sowie Rechenleistung. Anschließend werden Randbedingungen definiert und geeignete physikalische Modelle, wie zum Beispiel zur Berücksichtigung von Turbulenz, ausgewählt.

Die Gleichungen der einzelnen Volumen- und Zeiteinheiten werden anschließend iterativ gelöst, wobei Konvergenzkriterien festgelegt werden müssen. Dazu wird zunächst eine Anzahl an maximal durchzuführenden Iterationen festgelegt. Als Konvergenzkriterium wird ein zu unterschreitender Wert in zwei aufeinanderfolgenden Iterationen festgelegt. Bei Unterschreitung gilt das Konvergenzkriterium als erfüllt und es erfolgen keine weiteren Iterationen. Bei Überschreitung wird der iterative Prozess bis zum Erreichen des Konvergenzkriteriums oder der maximalen Anzahl an Iterationen fortgesetzt. Nach FERZIGER und PERIĆ (2008, 29) liegen mögliche Fehlerquellen in den Diskretisierungsmethoden, den gewählten Differentialgleichungen, Vereinfachungen und der Anzahl der Iterationen. Um im Vorhinein Fehlerquellen zu reduzieren, sollten nach SCHWARZE (2013, 11) unter anderem folgende Eigenschaften erfüllt werden:

- Beschränktheit: Berechnete Größen müssen in jeder Volumen- und Zeiteinheit innerhalb physikalisch plausibler Wertebereiche liegen.
- Konservativität: Physikalische Erhaltungsgrößen befinden sich im Gleichgewicht, es findet keine Zu- oder Abnahme im Gesamtsystem statt.
- Konsistenz: bei unendlichen kleinen Gitterabständen werden die durch die Diskretisierung entstandenen Differenzgleichungen wieder Differentialgleichungen.
- Konvergenz: bei unendlichen kleinen Gitterabständen strebt die Abweichung von der exakten Lösung gegen null.
- Stabilität: Fehler in der Berechnung vergrößern sich im weiteren Verlauf nicht.

### 3.3.1 Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl

Die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl), auch bekannt als Courant-Zahl, wird in der numerischen Strömungssimulation als Stabilitätskriterium verwendet. Sie gibt an, um wie viele Zellen sich ein Fluidteilchen pro Zeitschritt maximal fortbewegen kann. Stabilität wird erreicht, wenn diese Ausbreitung  $< 1$  ist (FERZIGER und PERIĆ, 2008, 170). Definiert ist sie als

$$c = \frac{u \times \Delta t}{\Delta x} \quad \text{Formel 1}$$

Wobei  $u$  = Geschwindigkeit,  $\Delta t$  = diskrete Zeitschritt und  $\Delta x$  = diskreter Ortsschritt ist.

## 3.4 Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur

Änderungen der Wassertemperatur in Trinkwasserleitungen basieren auf diversen Einflussfaktoren, von denen die wichtigsten im folgenden Teil beschrieben werden. Dabei wird unterschieden zwischen solchen, die selbst eine Wärme- oder Kältequelle darstellen und solchen, die den Wärmeaustausch begünstigen oder erschweren.

### 3.4.1 Rohrmaterial

Rohrleitungen stehen in direkten Kontakt mit dem Trinkwasser und beeinflussen die Wassertemperatur, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, durch Wärmeleitung und Konvektion. Dabei unterscheidet sich sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die spezifische Wärmekapazität verschiedener Rohrmaterialien stark. Während Metalle hohe Wärmeleitfähigkeiten haben, ist diese bei festen elektrischen Nichtleitern erheblich kleiner. Zusätzlich zu direkt mit dem Trinkwasser in Kontakt stehenden Rohrmaterialien werden teils Isoliermaterialien wie Polyurethan-Hartschaum (PUR) eingesetzt. Dessen sehr geringe Wärmeleitfähigkeit beruht auf einer Kombination gasgefüllter Hohlräume sowie umgebender Feststoffe mit geringen Wärmeleitfähigkeiten (BAEHR und STEPHAN, 2016, 5). In der folgenden Tabelle 3 sind Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von in Österreich gebräuchlichen Rohrmaterialien aufgelistet.

Tabelle 3: Spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit verschiedener Rohr- und Dämmmaterialien nach STEPHAN et al. (2013)

Material	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
Asbestzement (AZ)	1.000	1,6
Gusseisen (GJS)	450	50
Polyethylen (PE)	1.800	0,5
Polyvinylchlorid (PVC)	900	0,17
Polyurethanschaum (PUR)	1.400	0,025-0,04
Stahl (ST)	450	50

Asbestzement wird aufgrund gesundheitsgefährdender Eigenschaften beim Einatmen von Partikeln bei der Herstellung und Rückbau seit 1990 in Österreich nicht mehr neu in Verkehr gebracht, stellt allerdings im aktuellen Bestand der Trinkwasserleitungen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil dar.

### 3.4.2 Betriebseigenschaften

In Abhängigkeit des Wasserbedarfs wird bei Planung der Trinkwasserleitungen der Durchmesser festgelegt. Da ein Wärmeeintrag über die Rohrwand geschieht, ist das Verhältnis von Rohrumfang zu Rohrquerschnittsfläche von großer Bedeutung. Durch die Formeln zur Berechnung des Kreisumfangs  $U = 2 * \pi * r$  und der Kreisfläche  $A = \pi * r^2$  ergibt sich, dass das Verhältnis zwischen Rohrumfang und Rohrfläche mit größer werdendem Radius kleiner wird, und somit weniger Wärme zu- oder abgeführt werden kann.

Bei gleichbleibendem Durchmesser bestimmt die Fließgeschwindigkeit den Volumenstrom, der pro Zeitschritt einen Rohrabschnitt passiert. Die konvektive Wärmeübertragung reduziert sich mit sinkender Fließgeschwindigkeit, allerdings erhöht sich gleichzeitig die Verweilzeit im

Trinkwassernetz und somit die verfügbare Zeit zur Erwärmung des Wassers. Nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013) ist die Verweilzeit meist länger als die Zeit, die nötig ist, um das Trinkwasser auf die umgebende Bodentemperatur zu erwärmen.

Sowohl Rohrdimensionierung als auch Fließgeschwindigkeit werden vom Wasserbedarf bestimmt und können somit im Gegensatz zu anderen Einflussfaktoren hinsichtlich der Wärmeübertragung nicht berücksichtigt werden.

### 3.4.3 Bodenmaterial

An Leitungsenden entspricht die Trinkwassertemperatur meist der umgebenden Bodentemperatur (AGUDELO-VERA et al., 2015), diese wiederum ist unter anderem abhängig von Faktoren wie der Bodenart, Bodendichte und Bodenfeuchte. Der Hohlraumgehalt im Boden wird entweder von Wasser oder Luft gefüllt, wobei es große Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität gibt, vergleiche dazu Tabelle 4. Je geringer der Wasseranteil ist und somit je höher der Luftanteil ist, desto geringer ist die Wärmeleitfähigkeit eines sandigen Bodens, ebenso verhält es sich mit der spezifischen Wärmekapazität.

Tabelle 4: Thermische Eigenschaften von Sand, Luft und Wasser nach STEPHAN et al. (2013) und BLUME et al. (2010)

Bodenart bzw. -komponente	Wärmekapazität [J/(kg*K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
Wasser	4.200	0,57
Luft	1.000	0,025
Sand	910 – 1.180	1,1 – 2,7

Oberhalb von Trinkwasserleitungen befinden sich meist Verkehrsstraßen, somit ist davon auszugehen, dass „das natürliche Bodenprofil durch einen künstlichen Schichtaufbau bestehend aus Deck- und Tragschichten ersetzt“ ist (MUVBW, 2004). Dies resultiert in einer Reduzierung der organischen Substanz im Boden sowie einer erhöhten Bodendichte. Die spezifische Wärmekapazität (ABU-HAMDEH, 2003) sowie die Wärmeleitfähigkeit (NIKIFOROVA et al., 2013) des Bodens steigen mit zunehmender Bodendichte. Darüber hinaus werden aufgrund der Oberflächenversiegelung Infiltration und Evaporation reduziert, der Bodenwassergehalt ist dann vom Grundwasser abhängig (AGUDELO-VERA, 2015).

### 3.4.4 Überdeckung, Tagesgang und Jahresverlauf

Die erforderliche Überdeckung von Trinkwasserleitungen wird durch ÖNORM B 2538 (2018) vorgeschrieben und richtet sich nach den Anforderungen zur Einhaltung der Temperaturgrenzen. Es ist eine Überdeckungshöhe von mindestens 1,50 m zu gewährleisten, eine Unterschreitung ist nur im Falle der Frostsicherheit zulässig. Temperaturen von 15°C sollen nicht überschritten werden, was eine strengere Auslegung als die maximal zulässige Wassertemperatur von 25°C des Lebensmittelbuches (BMSGPK, 2019) darstellt.

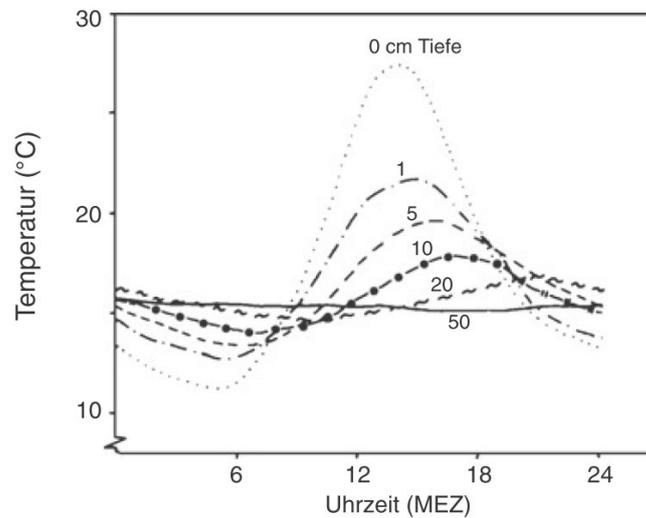


Abbildung 1: Tagestemperaturgang eines Bodens in Abhängigkeit der Tiefe im August (nach MIESS, 1968)

Temperaturschwankungen des Bodens sind größtenteils abhängig von der Energieein- und -ausstrahlung an der Bodenoberfläche, somit herrscht dort auch die größte Temperaturamplitude, sowohl für Tages- als auch Jahresgänge (BLUME et al., 2010). Bereits ab einer Tiefe von 0,50 m ist der tägliche Temperaturgang nur noch sehr schwach ausgeprägt, siehe Abbildung 1. Somit ist davon auszugehen, dass die Bodentemperatur um eine Trinkwasserleitung in etwa 1,50 m Tiefe keinen Tagesschwankungen ausgesetzt ist.

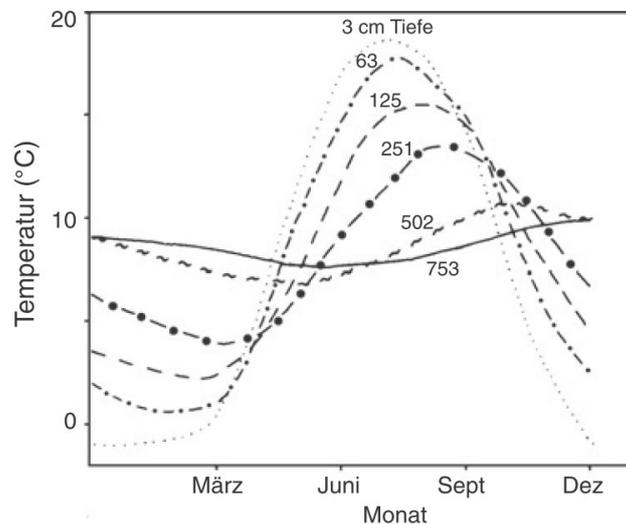


Abbildung 2: Jahrestemperaturgang eines mitteleuropäischen Bodens in Abhängigkeit der Tiefe (nach GEIGER, 1961)

Anders verhält es sich beim jährlichen Temperaturgang, dargestellt in Abbildung 2. Bei einer Verlegetiefe von etwa 1,50 m ist eine deutliche Temperaturdynamik vorhanden.

### **3.4.5 Bodenbelag**

Verschiedene Bodenoberflächen weisen unterschiedliche Reflexionsvermögen auf, die sogenannte Albedo. Diese beeinflusst über die Wärmeleitung und -speicherung die Oberflächentemperatur und damit auch die Bodentemperatur. TAKEBAYASHI und MORIYAMA (2012) kommen bei Oberflächentemperaturmessungen verschiedener Materialien zu dem Ergebnis, dass der Wärmestrom durch Evaporation, wie bei Grasbedeckung oder blankem Boden, stark reduziert wird. Darüber hinaus weisen Bodenkörper höherer Albedo, z. B. mit Betonüberdeckung, geringere Oberflächentemperaturen auf als solche mit niedrigerer Albedo, z. B. Asphalt. Urban Greening bietet mit der Beschattung von Leitungstrassen die Möglichkeit die direkte Sonneneinstrahlung zu vermindern, steht allerdings in Konflikt mit geforderten Abständen zwischen Bepflanzung und Einbauten wie Trinkwasserleitungen (ÖNORM B 2533, 2021). Auch ist durch zukünftige höhere Gebäude im urbanen Raum mit einer zusätzlichen Beschattung der Leitungstrassen zu rechnen. Im erstellten Modell findet keine Unterteilung zwischen Bodenkörper und Bodenbelag statt, um die benötigte Rechenleistung gering zu halten.

### **3.4.6 Urban Heat Island**

Verschiedene Studien befassen sich mit den Hintergründen des Temperaturanstiegs im urbanen Raum. Urban Heat Islands (UHI) sind städtische Gebiete mit im Vergleich zu ländlichen Gebieten erhöhten Temperaturen, die teils bis in Tiefen von 40 Metern reichen (FERGUSON und WOODBURY, 2007). In einer Studie von MÜLLER et al. (2014) wird in Oberhausen, Deutschland, in einer Tiefe von 0,70 m ein Temperaturunterschied von 9°C zwischen urbanem und rurealem Untersuchungsgebiet gemessen. Ursachen für die Erwärmung sind vielfältig und schwer zu quantifizieren. Nach AEADA et al. (1993) spielt das Material des Bodenbelags und der Boden selbst eine Rolle. Durch größere Absorption der Solarstrahlung aufgrund erhöhter Reflexion an Gebäuden wird der Boden stärker als in ruralen Gebieten erwärmt (STEWART und OKE, 2012). Des Weiteren strömt von umliegenden Gebäuden und Infrastruktur wie Untergrundbahnen, Fernwärmeleitungen und Stromkabel Wärme in den Boden (MENBERG et al., 2013). VAN DER ZWAN et al. (2020) berechnen in einer Modellierung einen größeren Einfluss auf die Trinkwassertemperatur durch Fernwärmeleitungen als durch Stromleitungen. In einer anderen Studie wurde festgestellt, dass Fernwärmeleitungen den größten anthropologischen Einflussfaktor zur Erwärmung des Untergrundes darstellen. Pro Quadratmeter werde durch Fernwärmeleitungen ein Wärmefluss von 60 W/m<sup>2</sup> emittiert (BENZ et al., 2015). Vorgeschriebene Abstände zwischen Trinkwasserleitungen und weiterer Infrastruktur sowie Baumbepflanzungen finden sich in ÖNORM B 2533 (2021).

## Allgemeine Grundlagen

Im Jahr 2012 waren in Österreich 22% der Hauptwohnsitze an Fernwärmeleitungen angeschlossen, was einem gesamten Leitungsnetz der Länge von etwa 4.600 km entspricht (BÜCHELE et al., 2015). 1.200 km davon entfallen auf die Stadt Wien, zum Vergleich dazu beträgt das Wiener Trinkwasserleitungsnetz etwa 3.000 km. Die Strömungsgeschwindigkeit in Fernwärmeleitungen liegt meistens im Bereich von 1 – 2 m/s, um Druckverluste gering zu halten oft im Bereich von 1,0 – 1,1 m/s. Trotz Isolierungen kommt es zu Energieverlusten, die sich auf etwa 7 – 40 W/m belaufen. Die Wassertemperaturen variieren sehr stark. Es wird zwischen der Vorlauftemperatur, das Wasser strömt vom Erzeuger in Richtung der Verbraucher, und der Rücklauftemperatur, das Wasser fließt von den Verbrauchern zurück zum Erzeuger, unterschieden. Darüber hinaus sind die Temperaturen aufgrund unterschiedlichen Bedarfs stark saisonal beeinflusst. Insgesamt ergeben sich meist Temperaturen zwischen 80 – und 130°C. Insbesondere die Rücklauftemperatur kann geringer sein, was in Bezug auf die optimale Nutzung der Wärmeenergie von Erzeugern als wünschenswert betrachtet wird. Die nicht zu unterschreitenden Abstände zwischen FWL und TWL liegen horizontal bei 0,4m und vertikal bei 0,2m (ÖNORM B 2533, 2021).

## 4 Material und Methoden

Um die in Kapitel 2 festgelegte Zielsetzung erfüllen zu können, wurde mit der Software OpenFOAM 8 ein Modell erstellt, das in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben wird. Zur Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse wurden die Programme RStudio und ParaView verwendet. Insgesamt wurden 18 verschiedene Szenarien berechnet, die in Kapitel 4.2 vorgestellt werden. Anschließend werden die genutzten Parameter und Einstellungen, sowie nötige Vereinfachungen und Plausibilitätsprüfungen beschrieben.

### 4.1 Schriftliche Anfragen an Wasser- und Energieversorger

Um praxisnahe Szenarien erstellen zu können, wurde bei verschiedenen österreichischen Wasser- und Energieversorgern schriftlich Informationen zu genutzten Materialien sowie Betriebs- und Verbaueigenschaften erbeten. Aus Gründen des Datenschutzes werden die Ergebnisse der Anfragen nicht einzeln aufgeführt, sondern zusammengefasst. Folgende Fragen wurden bezüglich Trinkwasserleitungen gestellt:

- 1) Welche Rohrmaterialien sind bei bestehenden Trinkwasserleitungen verbaut?  
Antwort: überwiegend Asbestzement, Gusseisen, PVC und PE
- 2) Welche Rohrmaterialien werden für Trinkwasserleitungen neu verbaut?  
Antwort: überwiegend Gusseisen, PE und PVC
- 3) In welcher Tiefe werden die Trinkwasserleitungen verbaut?  
Antwort: überwiegend zwischen 1,2 m und 1,6 m
- 4) Wie hoch ist die Wassertemperatur durchschnittlich bei Einspeisung in die Versorgungsleitungen?  
Antwort: zwischen 10°C und 13°C (In Einzelfällen auch ca. 8°C)

Bezüglich Fernwärmeleitungen wurden folgende Fragen gestellt:

- 1) Welche Rohrmaterialien sind bei bestehenden Fernwärmeleitungen verbaut?  
Antwort: Stahlrohr mit Steinwolle oder PUR-Schaum, teils mit Betonummantelung
- 2) Welche Rohrmaterialien werden für Fernwärmeleitungen neu verbaut?  
Antwort: Kunststoffmantelrohr außen, innen Stahlrohr mit PUR-Schaum
- 3) In welcher Tiefe werden die Fernwärmeleitungen verbaut?  
Antwort: mindestens in 0,8 m Tiefe
- 4) In welchen horizontalen und vertikalen Abständen befinden sich Fernwärmeleitungen zu Trinkwasserleitungen?  
Antwort: der Vertikalabstand beträgt mindestens 0,2 m, der Horizontalabstand ist meist größer als 0,4 m
- 5) Welche Wassertemperaturen werden in Fernwärmeleitungen genutzt?

Antwort: zwischen 55 und 130°C

6) Welche Leitungsdurchmesser werden genutzt?

Antwort: Zwischen DN 25 und DN 600

Nach Auswertung der Anfragen wurden folgende Parameter festgelegt: Als Rohrmaterialien der TWL wurden Gusseisen, PE und PVC gewählt; Asbestzement wurde nicht weiterverfolgt, da dieses Material bei der Verlegung neuer TWL nicht mehr genutzt wird. Das Rohrmaterial der Fernwärmeleitung wurde auf ein Mediumrohr aus unlegiertem Stahl mit PUR-Schaum-Isolierung festgelegt. Die vertikale lichte Überdeckungstiefe der TWL beträgt einheitlich 1,4 m, die der FWL 1,6 m, womit der Vertikalabstand von 0,2 m eingehalten wird. Der Horizontalabstand wurde auf 0,5 m bzw. 1,0 m gesetzt, darüber hinaus wurden Berechnungen ohne Fernwärmeleitung durchgeführt. Als Trinkwassertemperatur wurde am Einlass in das System einheitlich 10°C und für die Fernwärmeleitung 80°C festgelegt.

### 4.2 Szenarien

Insgesamt wurden 18 Szenarien berechnet, die sich in zwei Blöcke unterteilen. In allen Blöcken sind die TWL-Materialien PE, PVC und Gusseisen sowie die Horizontalabstände zwischen TWL und FWL von 0,5 m, 1,0 m und ohne FWL enthalten. In Tabelle 5 werden die Unterschiede der Szenarien sowie der Böcke aufgeführt. Die Blöcke unterscheiden sich in den Berechnungsarten (stationär und instationär) sowie der Fließgeschwindigkeit des Trinkwassers (0 und 1 m/s).

Block 1, Szenario 1 – 9, wurde stationär mit einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/s berechnet. Dies repräsentiert einen Zeitraum über mehrere Wochen, innerhalb dessen der Wasserverbrauch wochenweise betrachtet konstant ist, z. B. zu Zeitabschnitten im Jahr ohne Feiertage und Ferienbeginn oder -ende.

In Block 2, Szenario 10 – 18, erfolgte zunächst eine stationäre Berechnung mit der Fließgeschwindigkeit von 0 m/s, es wurde Stagnation simuliert. Anschließend wurde nach Erreichen der Stationarität die Berechnung instationär mit der Fließgeschwindigkeit von 1 m/s weitergeführt. Langanhaltende stationäre Stagnationsphasen können z. B. bei Reparationsarbeiten auftreten, gefolgt von einer Wiederaufnahme der Wasserversorgung.

Tabelle 5: Szenariobeschreibung

Block	Szenario-nummer	Rohrmaterial TWL	Abstand zu FWL	Berechnungsart	Fließgeschwindigkeit TWL [m/s]
1	01	PE	keine FWL	stationär	1
	02	PE	0,5 m	stationär	1
	03	PE	1,0 m	stationär	1
	04	PVC	keine FWL	stationär	1
	05	PVC	0,5 m	stationär	1
	06	PVC	1,0 m	stationär	1
	07	Gusseisen	keine FWL	stationär	1
	08	Gusseisen	0,5 m	stationär	1
	09	Gusseisen	1,0 m	stationär	1
2	10	PE	keine FWL	stationär/instationär	0/1
	11	PE	0,5 m	stationär/instationär	0/1
	12	PE	1,0 m	stationär/instationär	0/1
	13	PVC	keine FWL	stationär/instationär	0/1
	14	PVC	0,5 m	stationär/instationär	0/1
	15	PVC	1,0 m	stationär/instationär	0/1
	16	Gusseisen	keine FWL	stationär/instationär	0/1
	17	Gusseisen	0,5 m	stationär/instationär	0/1
	18	Gusseisen	1,0 m	stationär/instationär	0/1

Im weiteren Teil der Arbeit wird zur besseren Unterscheidbarkeit Block 1 als stationär berechneter Block, und Block 2 als instationär berechneter Block bezeichnet. Die Fließgeschwindigkeit wurde mit 1 m/s gewählt, um eine turbulente Strömung zu gewährleisten (Kapitel 4.10).

### 4.3 Geometrie

Die händisch erstellte Geometrie besteht aus einem quaderförmigen Bodenkörper, durch den zwei parallele Rohre verlaufen, die die Trinkwasser- und Fernwärmeleitung darstellen, siehe Abbildung 3. Die Tiefe (z-Richtung) entlang der Rohrachsen erreicht eine Länge von 1.000 m mit je einer Zelle pro 10 m, die Höhe (y-Richtung) beträgt 3 m.

Tabelle 6: Gesamtbreite in Abhängigkeit des Horizontalabstandes zwischen TWL und FWL

Horizontalabstand TWL – FWL	d [m]	B [m]
0,50 m	0,50	4,92
1,00 m	1,00	5,42
Keine FWL	1,00	5,42

Je nach Horizontalabstand der TWL zur FWL variiert die Breite des Bodenkörpers (x-Richtung), wie in Tabelle 6 dargestellt. Bei einem Abstand von 0,50 m beträgt sie 4,92 m und bei einem Abstand von 1,00 m liegt sie bei 5,42 m. Bei Berechnungen ohne FWL beträgt die

## Material und Methoden

Breite ebenso 5,42 m. Die Breite und Höhe wurde mit diesen Maßen gewählt, um eine mögliche Beeinflussung durch die Randbedingungen zu minimieren. Die Überdeckung der TWL ergibt sich aus der schriftlichen Befragung der Wasserversorger, siehe Kapitel 4.1. Um die Berechnungsdauer zu begrenzen, wurde von größeren Abständen zum Modellrand abgesehen.

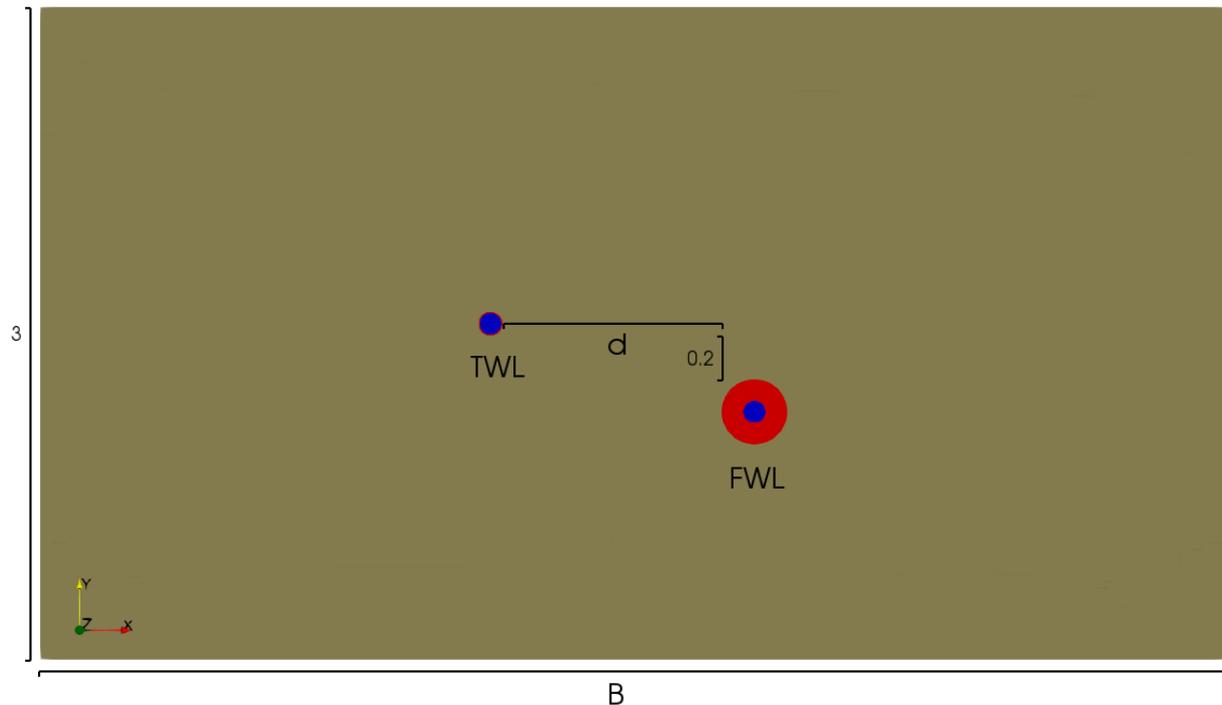


Abbildung 3: Querschnitt normal zur z-Achse, Zahlenangaben in Meter

Die Ausbreitung von 1.000 m in z-Richtung wurde gewählt, um anhand einer ausreichend langen Fließstrecke die Berechnungsergebnisse auswerten zu können. Insgesamt ergeben sich 308.000 hexaedrische Zellen. Die verschiedenen Komponenten des Modells sind in sogenannte Regionen aufgeteilt. Diese sind:

- Bodenkörper
- Trinkwasserleitung
- Trinkwasserfluid
- Fernwärmeleitung
- Fernwärmefluid

In Tabelle 7 ist die Zellaufteilung in einem Querschnitt normal zur z-Achse aufgeführt, der in Summe aus 3.080 Zellen besteht.

Tabelle 7: Zellaufteilung eines beliebigen Querschnitts normal zur z-Achse bei vorhandener FWL

Region	Anzahl Zellen
Bodenkörper	2.400
FW-Rohr	300
FW-Fluid	300
TW-Rohr	40
TW-Fluid	40
Gesamt	3.080

In Berechnungsszenarien ohne FWL ist nur die TWL und der umgebende Bodenkörper als Region vorhanden. Die Zellstruktur des Fernwärmerohres und -fluides bleibt erhalten, jedoch sind diese in die Region des Bodenkörpers integriert. Somit ergeben sich für diese Szenarien für den Bodenkörper im Querschnitt normal zur z-Achse 2.780 statt 2.400 Zellen. Die Gesamtzellzahl bleibt gleich.

In Abbildung 4 ist die Zellanordnung der TWL dargestellt. In roter Farbe die Zellen des Rohres und in blauer Farbe die des Fluids.

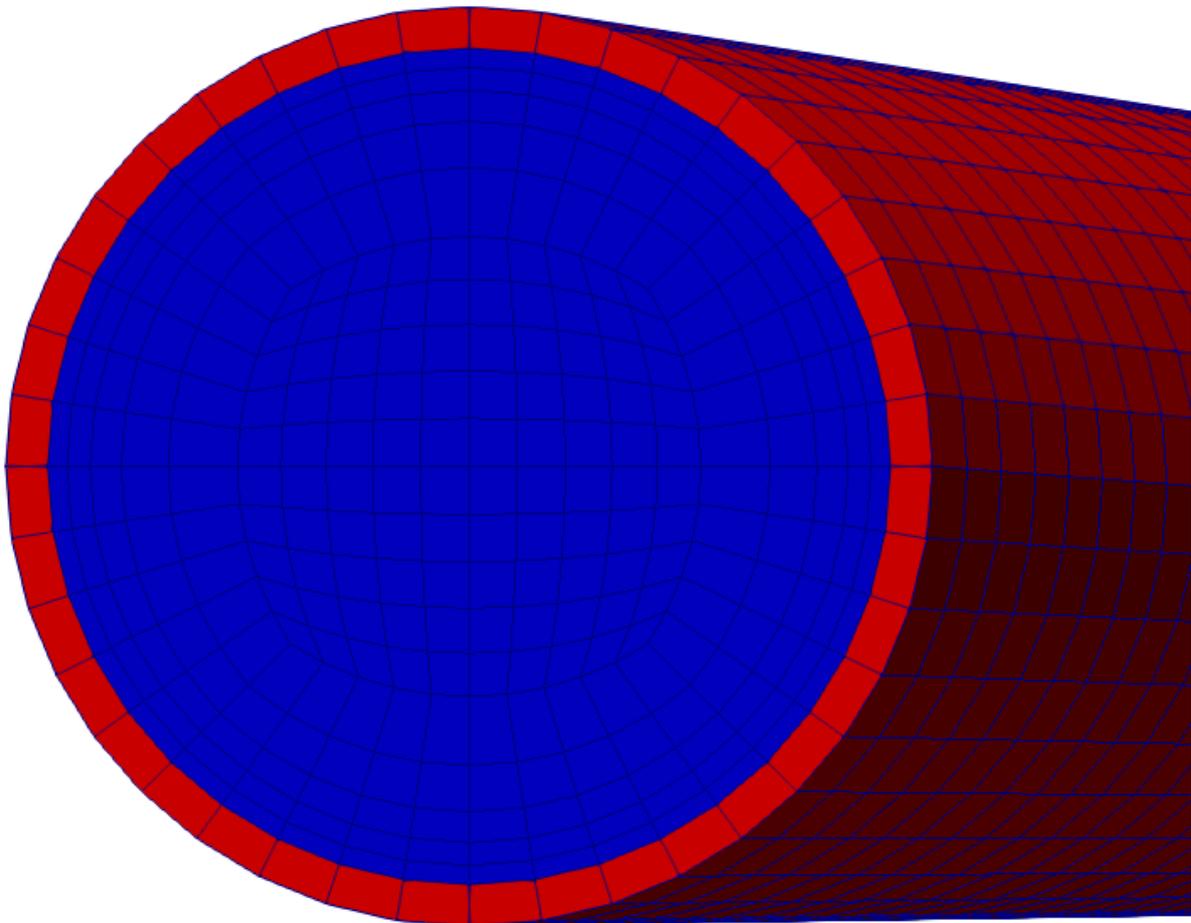


Abbildung 4: Zellanordnung der TWL

Um die verschiedenen Szenarien umsetzen zu können, ist der Horizontalabstand zwischen TWL und FWL auf die entsprechenden Distanzen einstellbar. Ebenso verhält es sich mit der Rohrwandstärke, die sich in Abhängigkeit des Leitungsmaterials ändert. Prinzipiell können mit diesem Modell auch andere Abstände sowie Rohrwandstärken eingestellt werden, sofern sie sich in etwa in der gleichen Größenordnung bewegen.

### 4.4 Bodentemperatur

Neben der Start- sowie den einströmenden Temperaturen der TW- bzw. FWL, hat die Bodentemperatur einen maßgeblichen Einfluss auf das Endergebnis. Im Modell findet ein Temperaturzustrom über die Ober- und Unterseite des Bodenkörpers statt. Aus dem langjährigen Monatsmittel der Klimanormalperiode von 1981 – 2010 der Stadt Wien (STADT WIEN, 2020) wurde als Jahresmittel eine Lufttemperatur von 10,45°C berechnet. Zur Umrechnung von Luft- auf Bodentemperatur wurde nach CERMAK et al. (2016) ein Offset von 4°C hinzugefügt, womit die mittlere jährliche Bodentemperatur mit 14,45°C angenommen und als Randbedingung an der Oberseite des Bodenkörpers festgelegt wurde. Energie strömt dort in Form von Wärme in das System ein. Mit der Formel nach HILLEL (1982, Formel 2) zur Berechnung der mittleren Bodentemperatur in Abhängigkeit der Tiefe und Zeit wurde eine mittlere jährliche Bodentemperatur von 14,40°C in einer Tiefe von 3,0 m berechnet, die in der Modellierung als untere Randbedingung genutzt wurde.

$$T(z, t) = T_a + A_0 \times e^{-z/d} \times \sin\left(\frac{2\pi \times (t - t_0)}{365}\right) - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2} \quad \text{Formel 2}$$

$$d = \left(\frac{2 \times D_h}{\omega}\right)^{0,5}$$

$T(z, t)$  = Bodentemperatur in °C über Zeit (t) in Tagen und Tiefe (z) in Meter,

$T_a$  = mittlere Bodentemperatur in °C,

$A_0$  = Jahresamplitude der Oberflächentemperatur,

$d$  = Dämpfungstiefe in Meter,

$t_0$  = Zeitunterschied zum Startzeitpunkt in Tagen,

$D_h$  = Temperaturleitfähigkeit des Bodens in  $m^2/s$ ,

$\omega$  = Häufigkeit der Temperaturschwankung.

Da in allen Szenarien zunächst eine stationäre Berechnung stattfindet, ist die Starttemperatur des Bodenkörpers von untergeordneter Rolle und hat keinen Einfluss auf das Endergebnis. Sie wurde aufgrund des geringen Temperaturunterschiedes von 0,05°C zwischen der oberen und unteren Berandung zum Startzeitpunkt auf 14,45°C festgelegt. Über Seitenränder des Bodenkörpers sowie dem Auslass der TWL und FWL kann Energie aus dem System entweichen.

## 4.5 Rohrmaterial

Im Modell können verschiedene Rohrmaterialien berücksichtigt werden, physikalisch werden diese mit den Parametern Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität sowie Dichte unterschieden. Die genutzten Materialien und ihre physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 8 aufgeführt. PE, PVC und Gusseisen wurden für die TWL und PUR für die FWL genutzt.

Tabelle 8: Rohrmaterialien und Parameter

Parameter	PE	PVC	Gusseisen	PUR
Wandstärke DN100 [mm]	5 <sup>2</sup>	5 <sup>2</sup>	4 <sup>1</sup>	100 <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	0,5 <sup>4</sup>	0,17 <sup>4</sup>	50 <sup>4</sup>	0,027 <sup>3</sup>
Spez. Wärmekapazität [J/(kg*K)]	1.800 <sup>4</sup>	900 <sup>4</sup>	450 <sup>4</sup>	1.400 <sup>4</sup>
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	980 <sup>4</sup>	1.390 <sup>4</sup>	7500 <sup>4</sup>	60 <sup>3</sup>

1: EADIPS (2017) 2: PIPELIFE (2021) 3: ISOPLUS (2011) 4: STEPHAN et al. (2013)

## 4.6 Vereinfachung

Die größte Einschränkung bei der Modellierung stellte die zur Verfügung stehende Rechenkapazität dar, weshalb Vereinfachungen des Modells nötig waren. Trotz einer zur Verfügung stehenden Hardware von zwei Intel Xeon X5670 Prozessoren mit je 6 Kernen (12 Threads) und 144 Gigabyte Arbeitsspeicher, lag die durchschnittliche Berechnungsdauer je Szenario bei etwa 18 Stunden.

Einerseits sollte durch die Vereinfachung die Berechnungsdauer reduziert werden, andererseits die Datenmenge, die ausgewertet und visualisiert werden musste. Je Szenario ergab sich eine durchschnittliche Datenmenge von 2,8 Gigabyte. Zur Umsetzung der Vereinfachungen wurden verschiedene Maßnahmen getroffen.

Der Bodenkörper zeichnet sich in der Realität durch seine Heterogenität aus. Es sind verschiedene Bodenschichten verschiedener Komponenten, Dichte, Feuchtegehalt etc. vorhanden, die im Modell auf einen homogenen Bodenkörper gleicher Eigenschaften reduziert wurden. Für den Bodenkörper und die Bodenoberfläche wurden die gleichen physikalischen Eigenschaften verwendet. Darüber hinaus wurde die Zellanzahl auf 308.000 beschränkt, in axialer Richtung beträgt die Auflösung eine Zelle je 10 m. Die Gesamtlänge des Modells musste auf 1.000 m begrenzt werden.

Auch wurden für die jeweiligen Rohre nur die für die Wärmeübertragung und -isolierung maßgeblichen Eigenschaften simuliert. So besteht die Rohrwand der Trink- und Fernwärmeleitung aus je einer Schicht. Zusätzliche Ummantelungen, wie die Stahlmantelung der FWL wurden nicht berücksichtigt, da zusätzliche Regionen die Berechnung weiter verlangsamen. Die Fernwärmeleitung besteht nicht wie in der Praxis aus

einem Vor- und Rücklaufrohr, sondern aus nur einer Leitung. In moderner Ausführung werden Vor- und Rücklauf durch ein gemeinsames Mantelrohr geführt und verfügen somit auch über eine gemeinsame Wärmeisolierung. Somit stellt die Reduzierung von Vor- und Rücklauf auf nur ein Rohr eine hinnehmbare Vereinfachung dar.

### 4.7 OpenFOAM

Zur Erstellung des Modells wurde die Software OpenFOAM in der Version 8 genutzt. OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) ist eine Open Source Software zur Simulation strömungsmechanischer Anwendungen. Je nach Fragestellung können bereitgestellte Strömungslöser genutzt werden, sowie eigene entwickelt werden. Unter anderem sind Modelle im Bereich laminarer und turbulenter Strömungen, kompressibler und inkompressibler Flüssigkeiten sowie stationärer und instationärer Strömungen erstellbar. Die Wahl des Strömungslösers hat Auswirkung auf z. B. die Wahl der Diskretisierungsmethode sowie den einstellbaren und berechenbaren Parametern. Als Solver wurde „chtMultiRegionFoam“ verwendet. Dieser eignet sich zur stationären und instationären Modellierung von Wärmeübertragung verschiedener Regionen im flüssigen und festen Aggregatzustand auf Grundlage der konjugierten Wärmeübertragung. Auftriebskräfte und Turbulenz können berücksichtigt werden, für die Turbulenz wurde das k-epsilon-Modell genutzt, welches als Standard- Zweigleichungsmodell gilt. Es beschreibt die Entwicklung der turbulenten kinetischen Energie  $\kappa$  sowie die turbulente Dissipationsrate  $\epsilon$  (GHAIB, 2019, 55).

Die Modellerstellung erfolgt über das Anlegen einer festgelegten Ordnerstruktur mit Textdateien, von denen die wichtigsten hier beschrieben werden. In Abbildung 5 ist die Verzeichnisstruktur für ein OpenFOAM-Modell mit zwei Regionen dargestellt, hier *fluid* und *solid* genannt. Unabhängig vom Modell sind immer drei Ordner mit der Benennung „0“, „constant“ und „system“ vorhanden, in denen sich für jede Region jeweils ein Unterordner befindet. Im Ordner „0“ befinden sich Werte und Randbedingungen genutzter Parameter zum Zeitpunkt 0, die als Startzeitpunkt genutzt werden. Alternativ kann das Modell auch von einem bereits berechneten Ergebnis weitergeführt werden. Dies geschieht zum Beispiel in den Szenarien der Blöcke 2 und 3 nach Umstellung der Berechnungsart von stationär auf instationär. Die im Ordner „0“ enthaltenen Informationen dienen somit als Ausgangswerte zu Beginn der Simulation und müssen vom Nutzer hinterlegt werden. Je nach Strömungslöser können verschiedene Parameter angesteuert werden. Im Ordner „constant“ befindet sich in den Unterordnern „polyMesh“ eine genaue Zuordnung der verschiedenen Gitterelemente der jeweiligen Region, die Zuordnung wird automatisch erstellt. In den weiteren Dateien werden physikalische Eigenschaften festgelegt, wie z. B. Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und bei Fluiden Einstellungen zur Turbulenzmodellierung.

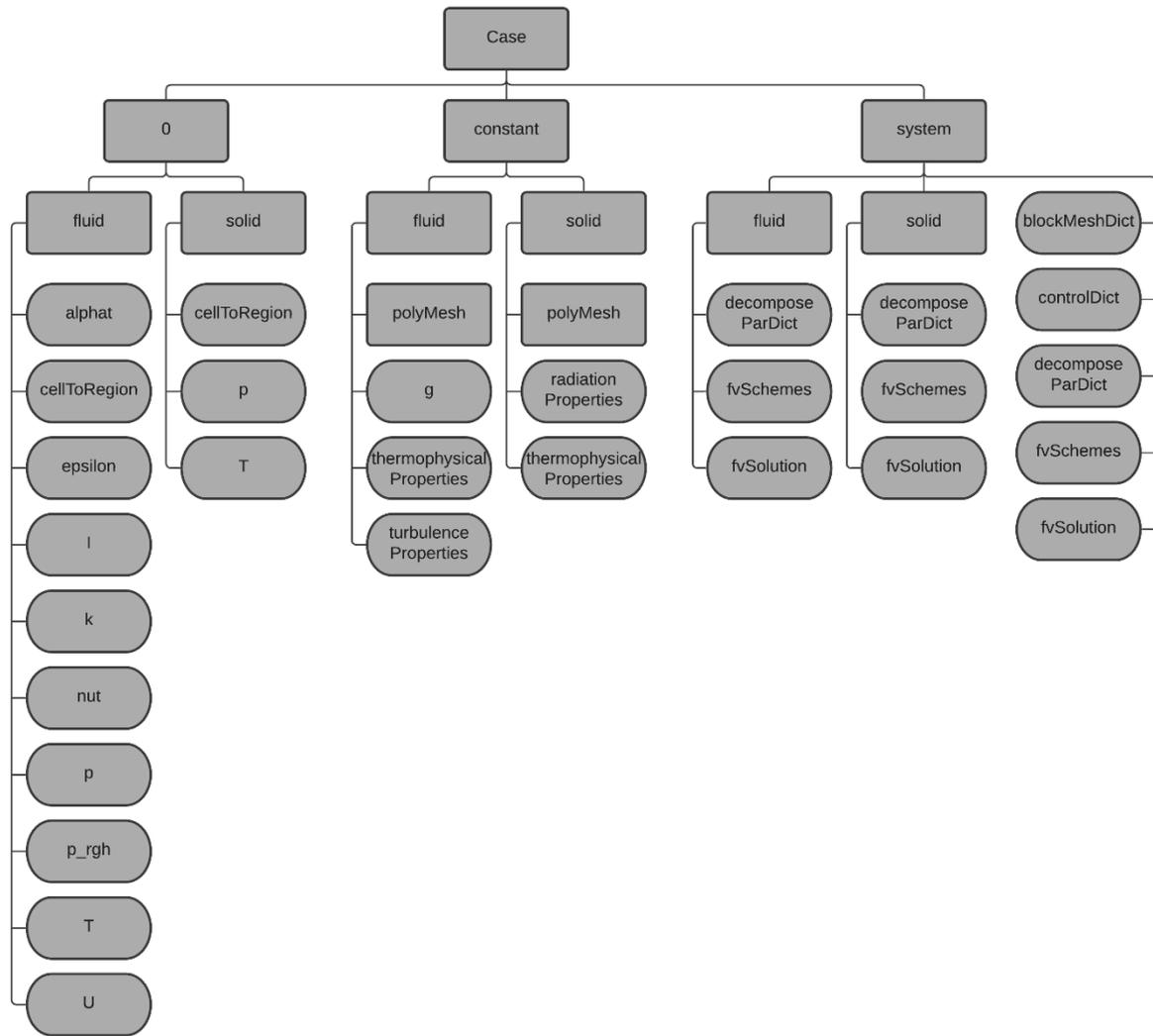


Abbildung 5: Verzeichnisstruktur OpenFOAM

Der Ordner „system“ beinhaltet Dateien, die direkt mit dem Lösungsverfahren verbunden sind, sowohl für das Gesamtmodell als auch für die einzelnen Regionen. In der Datei „blockMesh“ finden sich Anweisungen zur Erstellung der Geometrie, die in den Ordnern „polyMesh“ abgespeichert werden. Die Datei „controlDict“ enthält unter anderem Einstellungen zur Start- und Endzeit, zu Zeitschritten und der Ergebnisausgabe. „fvSchemes“ beinhaltet Informationen zu Diskretisierungsschemata und „fvSolution“ Informationen zu Gleichungslösern und Iterationseinstellungen. Die Dateien „decomposeParDict“ liefern Anweisungen zur parallelen Nutzung mehrerer Rechenkerne bei der Modellierung.

Zur Minimierung von Simulationsfehlern ist bei der Modellerstellung auf ausreichende Gitterqualität zu achten, diese kann durch folgende Gütekriterien geprüft werden:

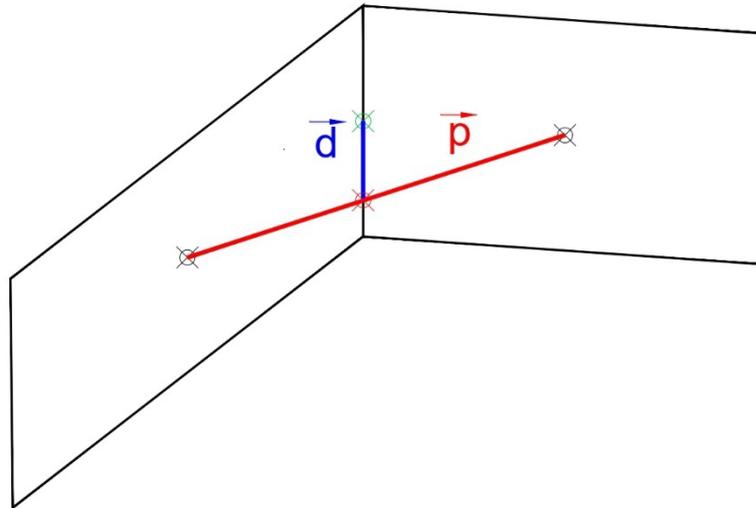


Abbildung 6: Beispielhafte Berechnung der Schiefe nach CFD SUPPORT (2022)

Die Schiefe dient als Maß der Verzerrung zweier benachbarter Zellen zueinander und ist definiert als das Verhältnis der Längen  $d/p$ , zu sehen in Abbildung 6 (CFD SUPPORT, 2022). Je kleiner der berechnete Wert ist, desto geringer ist die Schiefe und somit desto besser die Gitterstruktur. Der zu erreichende Wertebereich liegt zwischen 0 und 4.

Die Länge  $p$  (rote Linie) ist definiert als:

- Distanz der Geraden zwischen den Mittelpunkten der beiden Zelle.

Die Länge  $d$  (blaue Linie) ist definiert als:

- Distanz zwischen dem Mittelpunkt der gemeinsamen Seitenlänge (grüner Punkt) und dem Schnittpunkt der Geraden  $p$  mit der gemeinsamen Seitenlänge (roter Punkt)

Ein weiteres Gütekriterium ist die dimensionslose Zahl  $y^+$ . An den Seitenwänden durchströmter Rohre entsteht aufgrund von Reibungskräften eine Grenzschicht, in der die Fließgeschwindigkeit zur Seitenwand hin bis auf 0 m/s abnimmt. Damit Turbulenzmodelle dies berücksichtigen können, muss das Gitternetz zu den Seitenwänden hin ausreichend fein, aber nicht zu fein sein. Dies wird durch  $y^+$  überprüft, dessen Zielbereich für das genutzte  $k$ -epsilon-Turbulenzmodell zwischen 30 und 60 liegt. Nach MOORE et al. (2017) berechnet sich  $y^+$  über folgende Formeln:

$$Re = \frac{\varphi \times U \times d}{\mu} \quad \text{Formel 3}$$

$$C_f = [2 \times \log_{10} Re - 0.65]^{-2.3} \quad \text{Formel 4}$$

$$\pi_w = C_f \times 0.5 \times \varphi \times U^2 \quad \text{Formel 5}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\pi_w}{\varphi}} \quad \text{Formel 6}$$

$$y^+ = \frac{\varphi \times u_* \times y}{\mu} \quad \text{Formel 7}$$

Re = Reynoldszahl,

$\varphi$  = Fluidichte in kg/m<sup>3</sup>,

U = mittlere Fließgeschwindigkeit außerhalb der Grenzschicht in m/s,

d = Rohrrinnendurchmesser in Meter,

$\mu$  = kinematische Viskosität in m<sup>2</sup>/s,

C<sub>f</sub> = Schubspannungskoeffizient,

$\pi_w$  = Wandschubspannung in kN/m<sup>2</sup>,

u<sub>\*</sub> = Schubspannungsgeschwindigkeit m/s,

y<sup>+</sup> = dimensionslose Wanddistanz,

y = Wanddistanz in Meter.

## 4.8 Systemeinstellungen

Der Zeitschritt  $\Delta t$  variiert im Laufe der Berechnungen und wurde anhand zweier Kriterien festgelegt. Anhand der Auswertung von Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Zeitschritten wurde ein maximaler Zeitschritt von 1 s ausgewählt. Darüber hinaus wird der Zeitschritt über die maximal zulässige CFL-Zahl im Laufe der Berechnung nach Erreichen der Konvergenz neu berechnet, um das in Kapitel 3.3.1 beschriebene Stabilitätskriterium zu erfüllen.

Die Anzahl der Iterationen pro Zeitschritt und Region wurde anhand von Vergleichsberechnungen mit unterschiedlicher Iterationsanzahl festgelegt. Als Grundlage diente eine instationäre Berechnung mit einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/s eines von einem Rohr umgebenen Fluids. Dabei lag die Fluidtemperatur zu Beginn bei 10,0°C, die Rohrtemperatur wurde als konstant mit 25,0°C eingestellt. Somit fand eine Temperaturänderung nur im Fluid statt. Untersucht wurden 10, 25, 50, 100 und 200 Iterationen pro Zeitschritt. Ziel war es zu ermitteln, wie viele Iterationen nötig sind, um Konvergenz zu erreichen. Während 50, 100 und 200 Iterationen Temperaturänderungen des Fluids mit weniger als ein Tausendstel Grad Abweichung voneinander erzielten, wichen die

Temperaturänderungen bei 10 und 25 Iteration von den Ergebnissen der höheren Iterationszahlen stärker ab, es wurden geringere Wassertemperaturen ermittelt. Da das Endergebnis mit 50, 100 und 200 Iterationen annähernd gleich ausfiel wurden für alle weiteren Berechnungen 50 Iterationen gewählt, da eine größere Iterationszahl mit einer höheren Berechnungszeit einhergeht.

Um die Berechnungszeit weiter zu verkürzen, wurden zwei Konvergenzkriterien basierend auf Residuen genutzt, nach denen sich die Anzahl der nötigen Iterationen in jedem Zeitschritt neu ergibt. Dabei wurden für verschiedene physikalische Größen wie Temperatur, Druck und Geschwindigkeit sowie Regionen (Fluid, Bodenkörper, TWL und FWL) Toleranzwerte der Residuen angegeben, die in OpenFOAM unter „*tolerance*“ definiert sind und in der Größenordnung zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-8}$  gewählt wurden. Das Konvergenzkriterium gilt bei Unterschreitung des definierten Wertes als erfüllt. Zusätzlich wurde das Verhältnis zwischen dem Residuum im Zeitschritt  $x+1$  mit dem des Zeitschrittes  $x$  gebildet und mit einer vorher festgelegten Toleranz verglichen, die in OpenFOAM als „*relTol*“ definiert ist. Gewählt wurden Werte zwischen 0 und 0,1. Auch hier gilt bei Unterschreitung des festgelegten Wertes das Konvergenzkriterium als erfüllt. Sind beide Konvergenzkriterien erfüllt, werden in diesem Zeitschritt keine weiteren Iterationen benötigt. Zur Ermittlung der Werte wurden verschiedene Wertekombinationen mit der Berechnung ohne Konvergenzkriterium und einer Iterationszahl von 50 verglichen. Die für die weitere Berechnung festgelegten Werte finden sich im Anhang I.

Um die Stabilität der Berechnung zu erhöhen, wurden „*relaxationFactors*“ genutzt. Diese begrenzen die Änderung des Ergebnisses einer Iteration des Zeitschrittes  $x+1$  ( $T'_{x+1}$ ) anhand der Relation zum Ergebnis des vorherigen Zeitschrittes  $x$  ( $T_x$ ). Gewählt werden Werte zwischen 0 und 1 ( $\alpha$ ). Bei Wahl des Wertes 1 erfolgt keine Begrenzung, das Ergebnis im Zeitschritt  $x+1$  wird zu 100% übernommen, bei Wahl des Wertes 0 wird das Ergebnis des vorherigen Zeitschrittes beibehalten.

$$T'_{x+1} = \alpha * T_{x+1} + (1 - \alpha) * T_x \quad \text{Formel 8}$$

Beispielsweise wird das Ergebnis des Zeitschrittes  $x+1$  bei der Wahl des Wertes 0,6 nach folgender Aufschlüsselung neu berechnet:

1. Iteration im Zeitschritt  $x \rightarrow T_x = 10$
2. Iteration im Zeitschritt  $x+1 \rightarrow T_{x+1} = 11 \rightarrow T'_{x+1} = 0,6 * 11 + 0,4 * 10 = 10,6$

Je geringer der gewählte Wert ist, desto stabiler ist die Berechnung. Allerdings erhöht sich die Anzahl an Iterationen bis zum Erreichen des Konvergenzkriteriums und somit die benötigte

Berechnungsdauer. Zur Auswahl geeigneter „*relaxationFactors*“ wurden Berechnungen mit verschiedenen Werten miteinander verglichen. Werte  $\leq 0,5$  ergaben annähernd die gleichen Ergebnisse, Werte  $> 0,5$  resultierten in Abweichungen der Endergebnisse voneinander. Bei Werten  $> 0,9$  erfolgte ein Abbruch der Berechnungen. Somit wurde der Wert 0,5 für alle weiteren Berechnungen gewählt.

## 4.9 Geometriequalität

Die Güte der Geometrie kann anhand der Kriterien Schiefe und  $y^+$ , beschrieben in Kapitel 4.7, geprüft werden.

Tabelle 9: Maximale Schiefe und  $y^+$  der Geometrievariationen

Horizontalabstand TWL – FWL	0,50 m	1,00 m	Keine FWL
Max. Schiefe	3,00	2,65	2,65
$y^+$	33,33	33,33	33,33

Die maximale Schiefe sollte unter 4 liegen, in den vorhandenen Geometrien liegt sie bei 3,00 und 2,65 und erfüllt somit das Gütekriterium. Ebenso verhält es sich beim Gütekriterium des  $y^+$ . Hier soll der Wertebereich zwischen 30 und 60 liegen, was mit einem Wert von 33,33 erfüllt wird. Da es bei den verschiedenen Geometrien zu keiner Änderung der Zellen am Übergang zwischen Fluid und Rohrwand kommt, gibt es keine Änderungen des  $y^+$ -Wertes.

## 4.10 Plausibilitätsprüfung nach Blokker und Pieterse-Quirijns

Nach Çengel (1998) und adaptiert von BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013) wurde die Temperatur eines fließenden Wasserpaketes in einer TWL in Abhängigkeit der Fließzeit analytisch berechnet, um diese mit den Ergebnissen des Modells in OpenFOAM zu vergleichen. Anhand dieses Vergleiches sollte die Plausibilität der Ergebnisse des Modells geprüft werden.

Dabei wird sowohl in der Berechnung nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013) als auch im für die Plausibilitätsprüfung angepassten Modell davon ausgegangen, dass die Temperatur der äußeren Rohrwand der umgebenden Bodentemperatur entspricht und konstant ist. Die Änderung eines Wasserpaketes über die Fließzeit berechnet sich folgendermaßen:

$$\frac{dT_{Wasser}}{dt} = \frac{2 \times k}{\varphi_{Wasser} \times r \times C_{p,Wasser}} \times T_{Rohraußenwand} - T_{Wasser} \quad \text{Formel 9}$$

$$k = \frac{1}{\frac{2 \times d_{Rohrwand}}{\lambda_{Wasser}} + \frac{2 \times r}{\lambda_{Wasser} + Nu}} \quad \text{Formel 10}$$

$dT_{Wasser}$  = Änderung der Temperatur eines Wasserpaketes in Kelvin,

$dt$  = Änderung über die Zeit in Sekunden,

$k$  = gesamter Wärmedurchgangskoeffizient in  $\frac{W}{m^2 \times K}$ ,

$\varphi_{Wasser}$  = Wasserdichte in  $\frac{kg}{m^3}$ ,

$r$  = Rohrrinnenradius in Meter,

$C_{p,Wasser}$  = spezifische Wärmekapazität des Wassers in  $\frac{J}{kg \times K}$ ,

$T_{Rohraußenwand}$  = Rohraußenwandtemperatur in K,

$T_{Wasser}$  = Wassertemperatur in K,

$d_{Rohrwand}$  = Rohrwandstärke in Meter,

$\mu_{Wasser}$  = dynamische Viskosität des Wassers in  $\frac{kg}{m \times s}$ ,

$\lambda_{Wasser}$  = Wärmeleitfähigkeit des Wassers in  $\frac{W}{m \times K}$ .

Zur Berechnung des Gesamtwärmedurchgangskoeffizient  $k$  wird die Nusseltzahl benötigt, die sich nach der Dittus-Boelter-Gleichung für turbulente Strömungen folgendermaßen zusammensetzt:

$$\text{Nusseltzahl: } Nu = 0,023 \times Pr^{0,4} \times Re^{0,8} \quad \text{Formel 11}$$

$$\text{Prandtlzahl: } Pr = \frac{\frac{\mu_{Wasser}}{\lambda_{Wasser}}}{\varphi_{Wasser} \times C_{p,Wasser}} \quad \text{Formel 12}$$

Der Nachweis der Turbulenz erfolgt über die Reynoldszahl. Für die gewählte Fließgeschwindigkeit von 1 m/s, einem Rohrdurchmesser von 0,1 m und einer kinematischen Viskosität von  $1,306 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$  ergibt sich eine Reynoldszahl von  $76.570 > Re_{krit} (2.300)$ . Simuliert wird eine Trinkwasserleitung mit folgenden Parametern:

Tabelle 10: Parameter der Plausibilitätsprüfung

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Rohrinnendurchmesser	0,1	m
Rohrwandstärke	0,01	m
Fließgeschwindigkeit	1,0	m/s
Wassertemperatur zu Beginn	10,00	°C
Rohraußenwandtemperatur	25,00	°C
Rohrlänge	1000	m

Zum Vergleich wurden vier Varianten erstellt, die sich in der Wärmeleitfähigkeit der TWL unterscheiden, dargestellt in Abbildung 7. Die Rohraußenwandtemperatur wurde dabei entsprechend der Berechnung nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013) fixiert. Gewählt wurden  $\lambda$  von 0,5, 1, 10 und 50 W/(m\*K). Da in der Berechnung nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013) die spezifische Wärmespeicherkapazität des Rohrmaterials nicht berücksichtigt wird, wurde diese in OpenFOAM auf 1 J/(kg\*K) herabgesetzt. Vergleichsrechnungen mit plausiblen Werten für die Wärmespeicherkapazität ergaben geringfügig abweichende Ergebnisse.

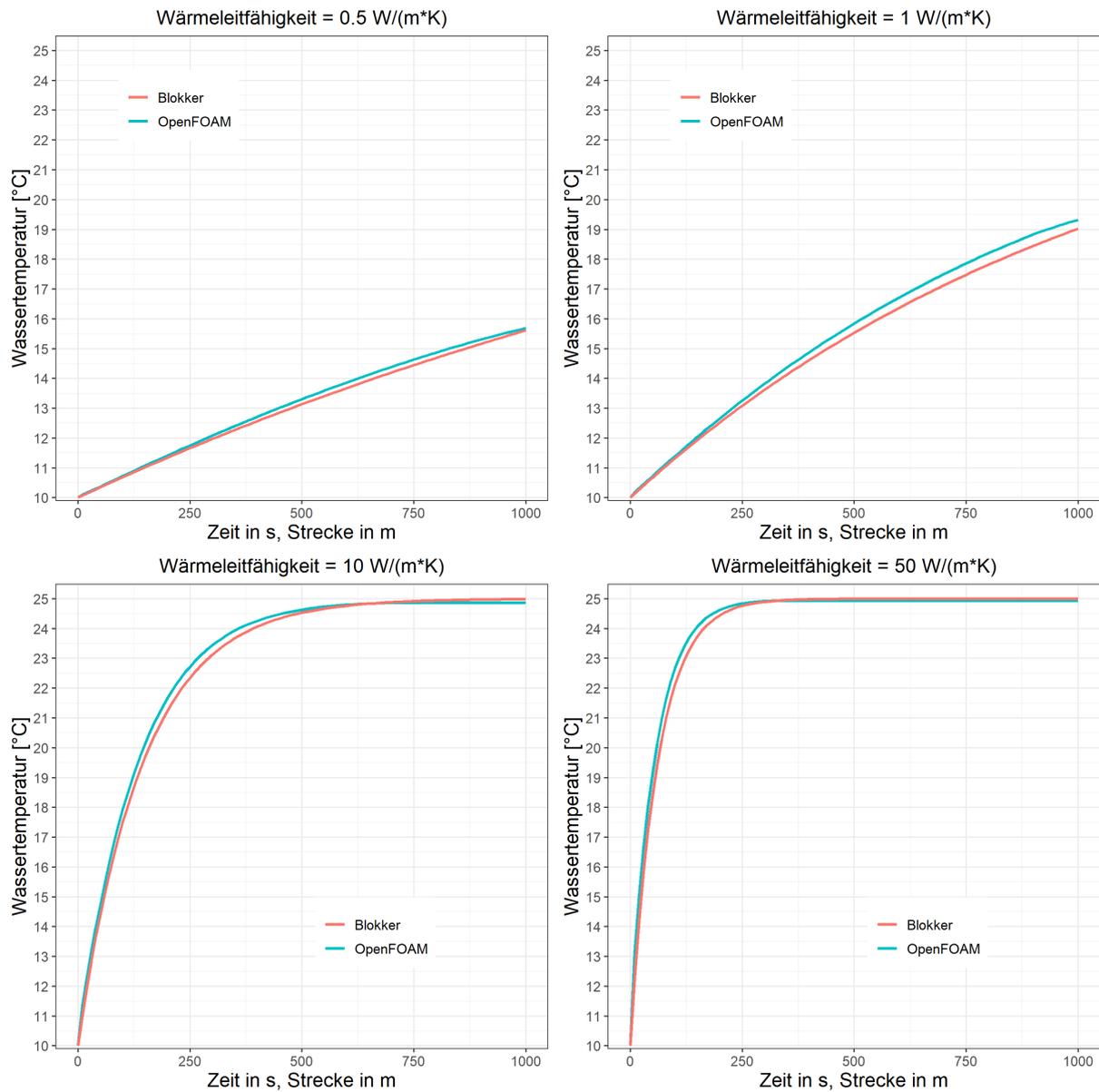


Abbildung 7: Vergleich OpenFOAM mit Berechnung nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013)

Über eine Strecke von 1.000m und 1000s Berechnungsdauer ergeben sich in Abhängigkeit der gewählten Wärmeleitfähigkeit sehr leichte Abweichungen in den berechneten Wassertemperaturen, verglichen wurde die Modellberechnung durch OpenFOAM mit der analytischen Berechnung nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013). Siehe dazu auch Tabelle 11.

Tabelle 11: mittlere Wassertemperatur nach 1.000 s Fließzeit und 1.000 m Fließstrecke

Wärmeleitfähigkeit [W/(m*k)]	0,5	1	10	50
Ergebnis nach Blokker und Pieterse-Quirijns [°C]	15,6096	19,0198	24,9852	25,0000
Ergebnis OpenFOAM [°C]	15,6770	19,3099	24,8702	24,9346
Unterschied absolut [°C]	0,0674	0,2901	0,1150	0,0654
Unterschied relativ [%]	0,43	1,53	0,46	0,26

Die in Tabelle 11 dargestellten Ergebnisse zeigen einen sehr geringen Unterschied von maximal 1,53% Abweichung der Ergebnisse. Sowohl bei geringen als auch hohen Wärmeleitfähigkeiten wird eine hohe Übereinstimmung erzielt, womit die in den weiteren Berechnungen untersuchten Materialien PVC, PE und Gusseisen gut modelliert werden können. Entlang der Fließstrecke erfolgen teils Abweichungen der Ergebnisse voneinander, dargestellt in Abbildung 7, die sich mit zunehmender Zeit und Fließstrecke verkleinern.

#### 4.10.1 Stationaritätsprüfung

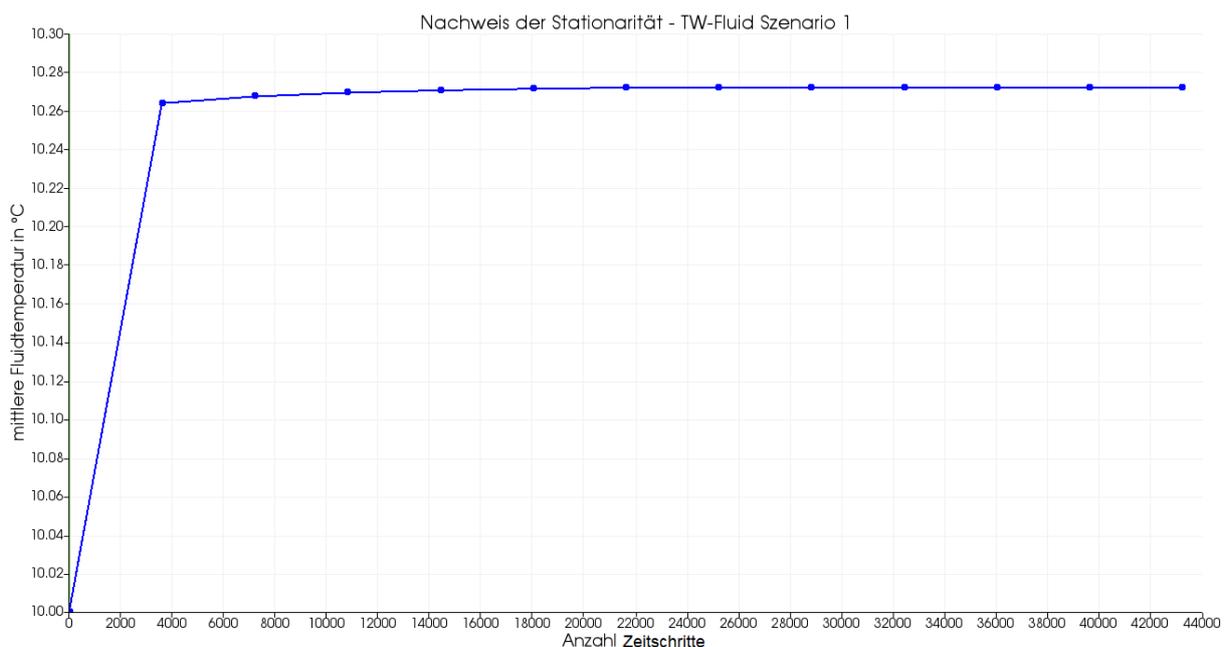


Abbildung 8: Stationaritätsprüfung für Szenario 1 anhand der Änderung der mittleren Trinkwassertemperatur

Die Berechnung aller Szenarien erfolgte zunächst stationär, dabei wurde das Erreichen der Stationarität anhand der Temperaturänderung in den einzelnen Regionen überprüft. Abbildung 8 und Abbildung 9 stellen diese Änderung für die Regionen Trinkwasserfluid und Bodenkörper des Szenarios 1 dar. Die blauen Punkte zeigen die Zeitpunkte der Ergebnisspeicherung an, die hier alle 3.600 Zeitschritte vorgenommen wurde. Die Angabe der x-Achse erfolgt hier bezogen auf die Anzahl der Zeitschritte, die aufgrund der Berechnungsart *stationär* nicht mit einer Zeitangabe in Sekunden gleichzusetzen ist.

## Material und Methoden

Da es in beiden Regionen ab 22.000 Zeitschritten bis zum Ende der Berechnung bei 43.200 Zeitschritten zu keiner Temperaturänderung größer einem tausendstel Grad Celsius kommt, wird das Erreichen der Stationarität angenommen. Ab 22.000 Zeitschritten ändert sich die Wassertemperatur bis zum Ende der Simulation (43.200 Zeitschritte) insgesamt nur noch um weniger als ein Tausendstel Grad Celsius, die Änderungen liegen weit unter der Genauigkeit der angegebenen Randbedingungen. Stationarität ist somit ab 22.000 Zeitschritten gegeben.

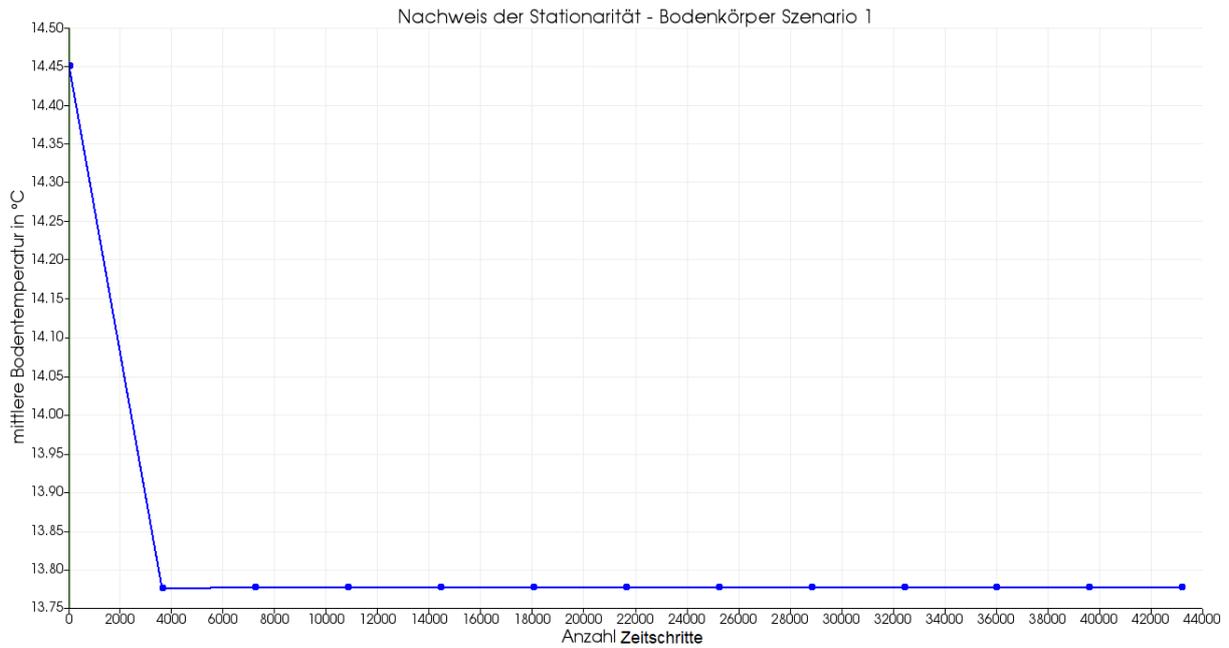


Abbildung 9: Stationaritätsprüfung für Szenario 1 anhand der Änderung der mittleren Bodentemperatur

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Übersicht der Analysen

In den folgenden Unterkapiteln 5.2 und 5.3 werden die Ergebnisse des in Kapitel 4 vorgestellten Modells präsentiert. Es findet eine Unterteilung hinsichtlich des Einflusses der Fernwärmeleitung sowie des Materials der Trinkwasserleitung statt. In jedem Unterkapitel finden sich die in Kapitel 4.2 beschriebenen Blöcke wieder, die sich in der Berechnungsart sowie der gewählten Fließgeschwindigkeit unterscheiden. Weitere, sich nicht ändernde Einstellungen finden sich in den Unterkapiteln 4.3 – 4.8. Tabelle 12 dient als Legende zu den folgenden Abbildungen Abbildung 10 bis Abbildung 29 der Szenarien 1 – 18.

Tabelle 12: Abbildungslegende

Rohrmaterial TWL	Abstand zu FWL	Legende
PE	0,5 m	—————
PE	1,0 m	—————
PE	keine FWL	—————
PVC	0,5 m	- - - - -
PVC	1,0 m	- - - - -
PVC	keine FWL	- - - - -
Gusseisen	0,5 m	.....
Gusseisen	1,0 m	.....
Gusseisen	keine FWL	.....

Die zur Erstellung der Abbildungen genutzten Temperaturdaten der Blöcke 1 beziehen sich jeweils genau auf die Rohrachse, während die im Text genannten sowie in Tabellen genannten Werte Durchschnittstemperaturen von Querschnitten normal zur Rohrachse darstellen. Ebenso beziehen sich die Werte in den Abbildungen sowie Tabellen des instationär berechneten Blockes 2 jeweils auf die oben genannten Querschnitte. Die Abweichung zwischen Werten bezogen auf die Rohrachse und Werten bezogen auf die Querschnitte normal zur Rohrachse liegt im Bereich von tausendstel °C, womit eine optische Unterscheidbarkeit in den Abbildungen nicht gegeben ist. Somit wird in weiterer Folge keine Unterscheidung mehr vorgenommen und vereinheitlicht von Trinkwassertemperatur bzw. Wassertemperatur gesprochen.

Die Bodentemperatur liegt zu Beginn der Berechnung bei 14,45°C, über die Oberseite des Bodenkörpers wird dem Modell Wärme in Höhe von 14,45°C zugeführt. An der Unterseite beträgt die zugeführte Wärme 14,40°C. Über die seitlichen Begrenzungen des Bodenkörpers kann Energie das Modell verlassen.

Im Folgenden bezieht sich die Nennung des Begriffes „Abstand“ auf den Horizontalabstand zwischen TWL und FWL und nicht auf den Vertikalabstand.

Die modellierte Trinkwasserleitung hat eine Länge von 1.000 m. Um Einflüsse der Randbedingungen am Auslass auf die Ergebnisse zu vermeiden, beziehen sich diese auf die Fließstrecke von 0 – 900 m.

## **5.2 Einfluss der Fernwärmeleitung**

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Blöcke 1 und 2 hinsichtlich des Fernwärmeinflusses in je drei Abbildungen mit unterschiedlichen TWL-Materialien gezeigt. Vergleiche hinsichtlich des Einflusses der Materialeigenschaften der TWL erfolgen in Kapitel 5.3.

### **5.2.1 Block 1 – stationäre Berechnung**

Die Berechnung in Block 1 erfolgte ausschließlich stationär mit einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/s sowie einer Trinkwasserstarttemperatur von 10,00°C.

#### **PE-Leitung**

Die Ergebnisse der Szenarien 1 – 3, denen eine TWL des Materials PE zugrunde liegt, sind in Abbildung 10 dargestellt. Nach Erreichen der Stationarität steigt die Trinkwassertemperatur bis an das Ende der Fließstrecke von 900 m, ohne FWL, um insgesamt 0,4768°C an. Die Temperaturänderung beträgt bei einem Abstand von 1,0 m 0,4904°C, bei einem Abstand von 0,5 m liegt sie bei 0,5666°C. Somit beträgt der Anteil der FWL an der Gesamterwärmung nach 900 m Fließstrecke bei einem Abstand von 1,0 m 2,9% und bei einem Abstand von 0,5 m 18,9%.

Die Trinkwassertemperaturänderung aller drei Szenarien weist keinen linearen Verlauf auf. In Tabelle 13 wird eine Verringerung der Temperaturzunahme entlang der Fließstrecke deutlich, die aufgrund der geringen Änderung in Abbildung 10 nicht sichtbar ist. Zusätzlich zeigt sich, dass sich bei einem Abstand von 0,5 m die Temperaturänderung zwischen 100 – 150 m sowie zwischen 850 – 900 m Fließstrecke mit -16,1% am stärksten verringert hat. In beiden Fließabschnitten ist der Anstieg der Trinkwassertemperatur dennoch größer als bei gleichen Fließabschnitten anderer FWL-Abstände.

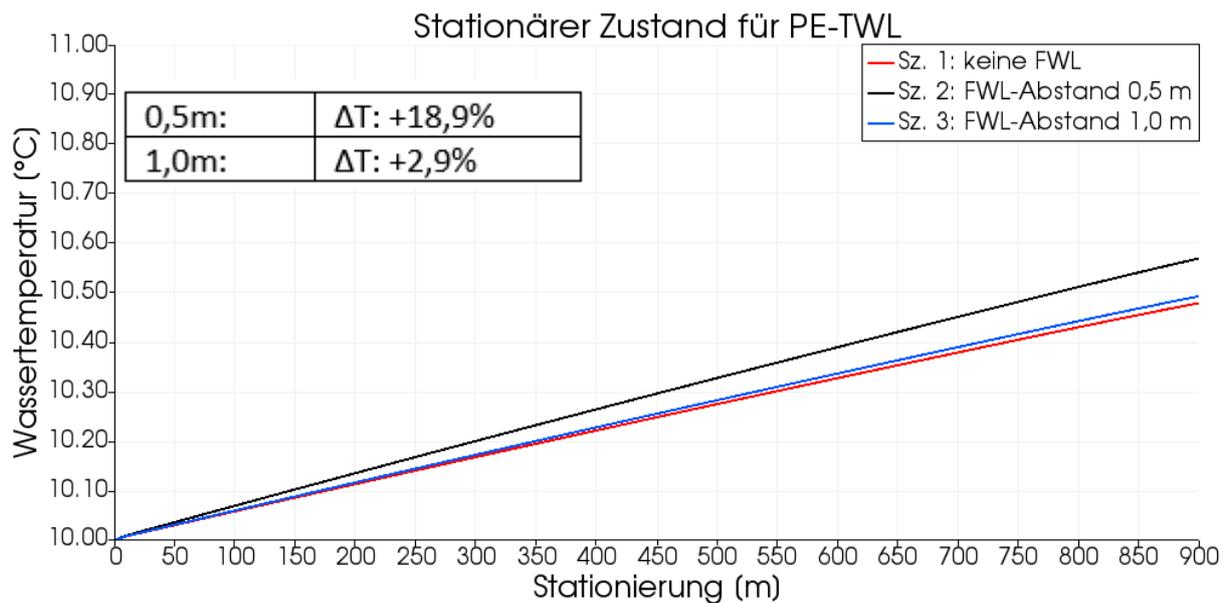


Abbildung 10: Trinkwassertemperaturverlauf entlang der PE-Rohrachse

Die geringsten Trinkwassertemperaturänderungen sowie die geringste Änderung in Relation zur Fließstrecke erfolgt mit -14,3% im Szenario ohne FWL. Eine FWL im Abstand von 1,0 m bewirkt eine geringfügig stärkere Änderung von -14,4%. Die Abschnitte 100 – 150 m sowie 850 – 900 m wurden gewählt, um eine Beeinflussung der gezeigten Ergebnisse aufgrund der Randbedingungen am Modellanfang und -ende in z-Richtung zu vermeiden.

Tabelle 13: Mittlerer Trinkwassertemperaturanstieg über den Wasserquerschnitt entlang der Fließstrecke der PE-TWL nach Erreichen der Stationarität

Szenario	FWL-Abstand	Temperaturänderung 100 – 150 m [°C]	Temperaturänderung 850 – 900 m [°C]	Temperaturzunahme nach 0 – 900 m [°C]
1	keine	0,0276	0,0242	0,4768
3	1,0 m	0,0284	0,0248	0,4904
2	0,5 m	0,0331	0,0285	0,5666

### PVC-Leitung

Der Trinkwassertemperaturanstieg ohne FWL für eine PVC-TWL, siehe Abbildung 11, liegt nach 900 m Fließstrecke bei 0,3893°C. Bei einem Abstand von 1,0 m beträgt die Temperaturerhöhung 0,4002°C, der Anteil der FWL beträgt 2,8%.

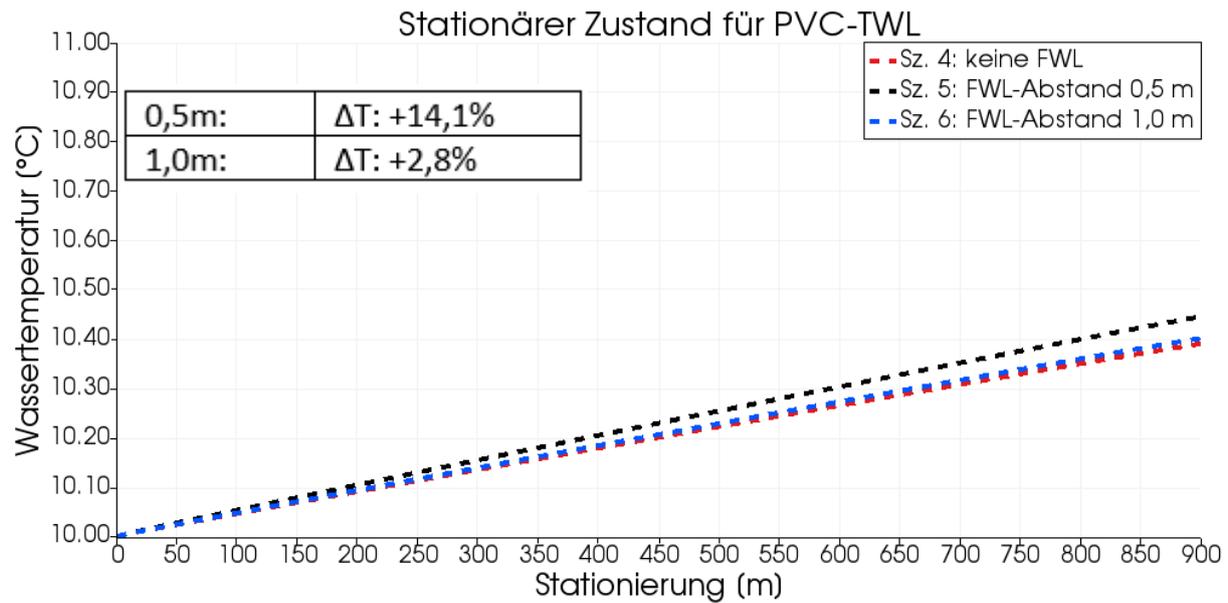


Abbildung 11: Trinkwassertemperaturverlauf entlang der PVC-Rohrachse

Den höchsten Temperaturanstieg verzeichnet wie in der vorherigen Abbildung der Abstand von 0,5 m mit 0,440°C. Der Anteil der FWL an der Erwärmung liegt bei 14,1%.

Auch bei diesen Szenarien liegt kein linearer Verlauf der Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt vor, wie in Tabelle 14 dargestellt ist. Die Temperaturänderung entlang der Fließstrecke liegt im Szenario ohne FWL bei -11,5%, bei einem Abstand von 1,0 m ist sie mit -11,8% geringfügig höher. Es zeigt sich, dass bei einem Abstand von 0,5 m die Temperaturänderung an beiden Abschnitten der Fließstrecke am größten ist, die Änderung in Relation zur Fließstrecke beträgt -11,7%.

Tabelle 14: Mittlerer Trinkwassertemperaturanstieg über den Wasserquerschnitt entlang der Fließstrecke der PVC-TWL nach Erreichen der Stationarität

Szenario	FWL-Abstand	Temperaturänderung 100 – 150 m [°C]	Temperaturänderung 850 – 900 m [°C]	Temperaturzunahme nach 0 – 900 m [°C]
4	keine	0,0224	0,0201	0,3893
6	1,0 m	0,0230	0,0206	0,4002
5	0,5 m	0,0256	0,0229	0,440

### Gusseiserne Leitung

In der folgenden Abbildung 12 sind die Trinkwassertemperaturänderungen für das Material Gusseisen dargestellt. Wie bereits in den zwei vorherigen Abbildungen weist das Szenario ohne FWL den geringsten Wassertemperaturanstieg auf, dieser liegt bei 0,5443°C nach einer Fließstrecke von 900 m. Bei einem Abstand von 1,0 m wird ein Temperaturanstieg von 0,5592°C erreicht, bei einem Abstand von 0,5 m wird der höchste Temperaturanstieg mit 0,6817°C erzielt. Die Anteile der FWL an der Gesamterwärmung liegen bei einem Abstand von 1,0 m bei 2,7% und bei einem Abstand von 0,5 m bei 25,3%.

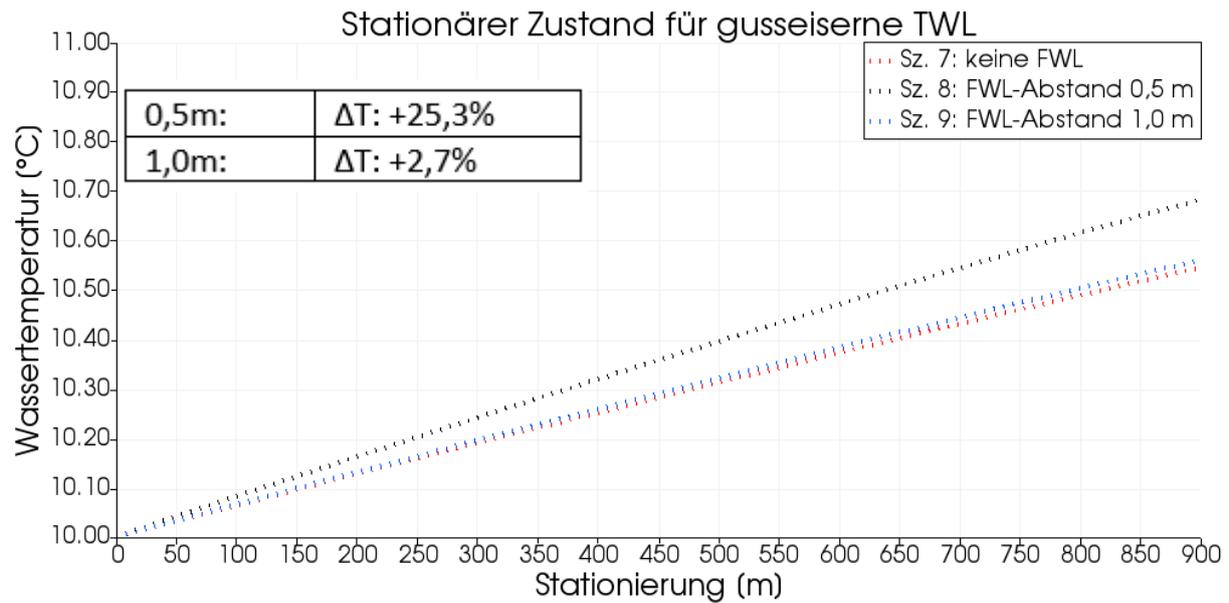


Abbildung 12: Trinkwassertemperaturverlauf entlang der Achse des gusseisernen Rohrs

Tabelle 15 zeigt die Trinkwassertemperaturänderung an zwei Abschnitten entlang der Fließstrecke. Es zeigt sich, dass unabhängig von der FWL-Einstellung kein linearer Anstieg vorliegt. Ohne FWL werden die geringsten Temperaturänderungen des Trinkwassers erreicht, in Relation zur Fließstrecke beträgt die Verminderung der Temperaturänderung -13,8%. Bei einem Abstand von 1,0 m beträgt die Temperaturänderung -15,8%, die größte Änderung erfolgt bei einem Abstand von 0,5 m mit -19,3%.

Tabelle 15: Mittlerer Trinkwassertemperaturanstieg über den Wasserquerschnitt entlang der Fließstrecke der gusseisernen TWL nach Erreichen der Stationarität

Szenario	FWL-Abstand	Temperaturänderung 100 – 150 m [°C]	Temperaturänderung 850 – 900 m [°C]	Temperaturzunahme nach 0 – 900 m [°C]
7	keine	0,0317	0,0279	0,5443
9	1,0 m	0,0327	0,0283	0,5592
8	0,5 m	0,0403	0,0338	0,6817

**Bodentemperatur am Rand der TWL**

Der gemittelte Bodentemperaturverlauf in einem Radius von 0,1 m um die Rohraußenwand entlang der Fließstrecke ist in Abbildung 13 beispielhaft für die PE-TWL dargestellt. Alle berechneten Bodentemperaturen im weiteren Teil der Arbeit beziehen sich auf den oben genannten Radius. Es zeigt sich, dass bei einem Abstand zur FWL von 1,0 m die Erhöhung etwa 0,15°C beträgt. Bei einem FWL-Abstand von 0,5 m ist die Bodentemperatur um etwa 0,5°C im Vergleich zum Szenario ohne FWL erhöht. Daraus resultiert bei Vorhandensein einer FWL ein höherer Temperaturgradient zwischen Trinkwasser und umgebendem Boden, ein größerer Wärmeaustausch findet statt. Dies zeigt sich anhand der stärkeren Wassertemperaturänderungen entlang der Fließstrecke sowie in den Endtemperaturen.

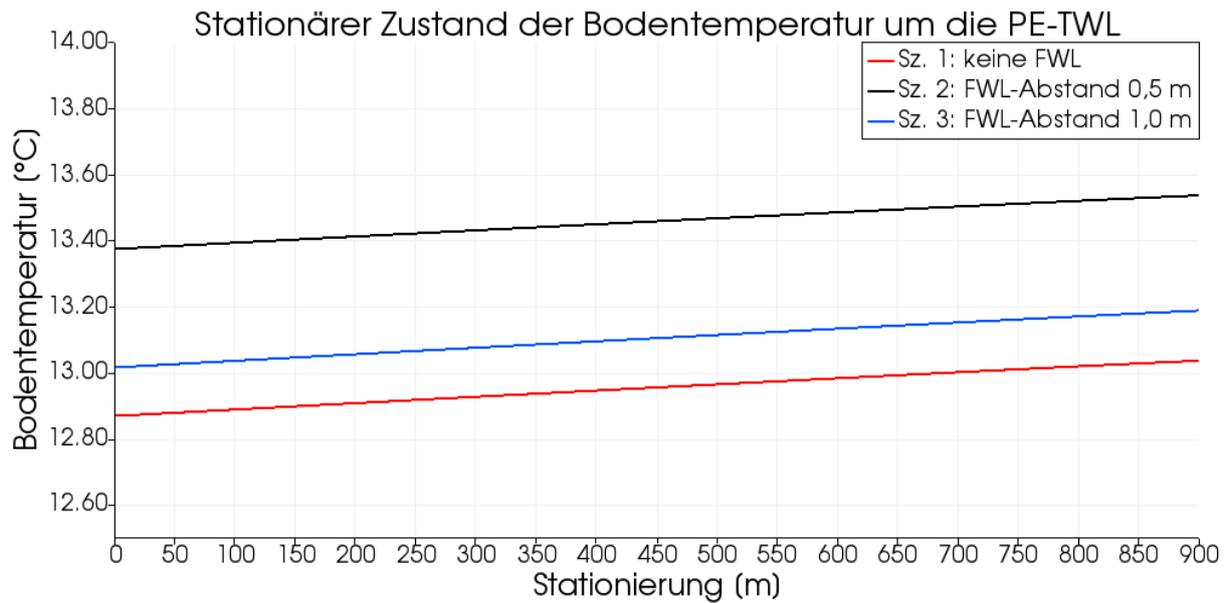


Abbildung 13: Gemittelter Bodentemperaturverlauf um die Achse der PE-TWL

Durch die stärkeren Temperaturänderungen unter Einfluss der FWL verkleinert sich gleichzeitig der Temperaturgradient zwischen Trinkwasser und umgebenden Boden bei einem Abstand von 0,5 m schneller als in Szenarien ohne FWL oder mit einem Abstand von 1,0 m. Daher verlangsamt sich die Temperaturänderung über die Fließstrecke relativ gesehen am stärksten. In den Szenarien mit dem TWL-Material PVC erfolgt bei einem Abstand von 1,0 m eine geringfügig stärkere Verminderung der Wassertemperaturzunahme von 0,1% als bei einem Abstand von 0,5 m.

Alle Szenarien haben eine Zunahme der Wassertemperatur entlang der Fließstrecke gemeinsam, die nichtlinear ist. Es zeigt sich eine Verringerung der Wassertemperaturänderungsrate. Diese ist bei Betrachtung der verschiedenen Rohrleitungsmaterialien durchschnittlich bei einem Abstand von 0,5 m am höchsten und ohne FWL am geringsten. Im Falle einer längeren Fließstrecke als 900 m ist von einer weiteren Verringerung der Temperaturzunahme auszugehen.

In allen Szenarien der stationären Untersuchung (Block 1) zeigt sich eine Abhängigkeit des Temperaturanstieges vom Abstand beziehungsweise dem Vorhandensein der Fernwärmeleitung. Die Trinkwassertemperaturen steigen mit abnehmendem Abstand zwischen FWL und TWL an. Entlang der gesamte Fließstrecke erfolgen die höchsten Trinkwassertemperaturen bei einem Abstand von 0,5 m, gefolgt von einem Abstand von 1,0 m. Der Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung liegt nach 900 m Fließstrecke, in Abhängigkeit vom TWL-Material, bei einem Abstand von 1,0 m zwischen 2,7% und 2,9%, während bei einem Abstand von 0,5 m zwischen 14,1% und 25,3%, erreicht werden.

## 5.2.2 Block 2 – instationäre Berechnung

Die Berechnung für Block 2 erfolgte zunächst stationär mit einer Fließgeschwindigkeit von 0 m/s, es wurde eine dauerhafte Stagnation simuliert. Ausgehend von den stationären Ergebnissen wurde über einen Zeitraum von jeweils 24 Stunden eine instationäre Berechnung mit der Fließgeschwindigkeit von 1 m/s durchgeführt.

### PE-Leitung

Innerhalb der ersten Stunde erfolgt eine starke Änderung der Wassertemperatur in der TWL, siehe Abbildung 14. Diese ist darauf zurückzuführen, dass durch die Änderung der Fließgeschwindigkeit von 0 auf 1 m/s Trinkwasser mit der Temperatur von 10°C durch die TWL strömt. Entlang der Fließstrecke erfolgt eine Erwärmung des Trinkwassers durch die FWL und den Boden.

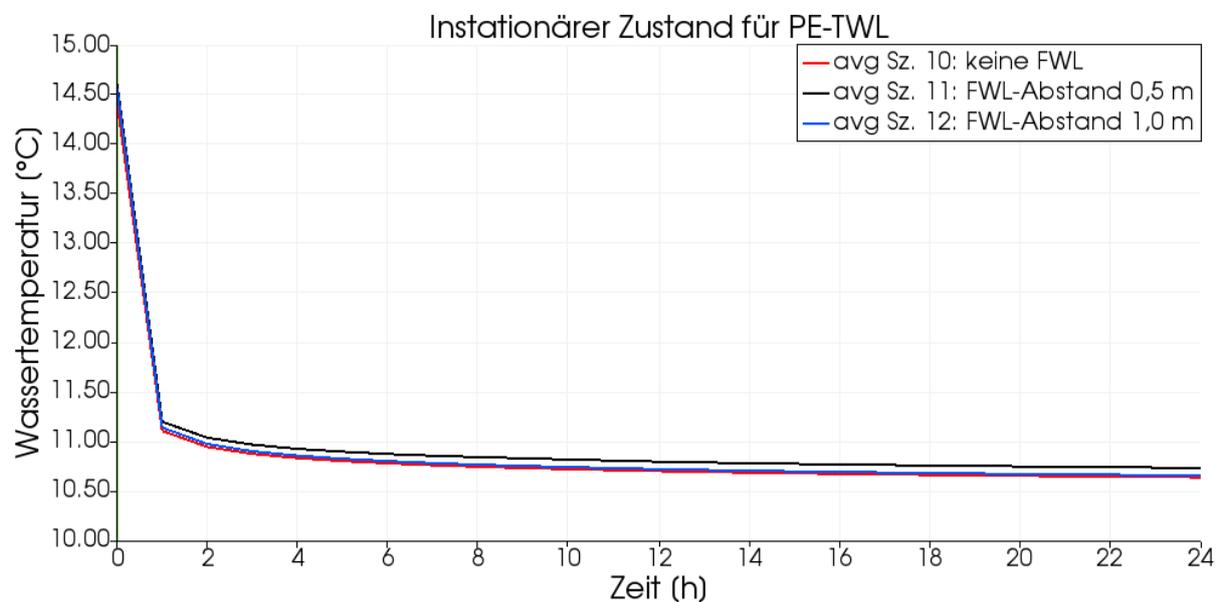


Abbildung 14: Trinkwassertemperaturverlauf der PE-TWL nach 900 m Fließstrecke

Die Wassertemperatur einer PE-TWL liegt nach Erreichen der Stationarität (Zeitpunkt 0 in Abbildung 14) ohne FWL bei 14,4255°C, siehe Tabelle 16. Die Wassertemperatur sinkt in Folge des Eintreffens des neu einströmenden Wassers innerhalb einer Stunde um -3,3231°C ab. In den folgenden 23 Stunden nimmt die Wassertemperatur weiter ab und erreicht einen Rückgang um -3,7871°C, wobei sich die Änderungsrate stetig verkleinert. In Bezug auf die Wassertemperatur am Modelleinlass von 10,0°C erfolgt innerhalb der 900 m Fließstrecke nach 1 Stunde eine Temperatursteigerung von 1,1025°C, nach 24 Stunden verringert sich diese auf 0,6384°C.

Bei vorhanden sein einer FWL im Abstand von 1,0 m liegt die Wassertemperatur zu Beginn bei 14,5596°C, damit beträgt der Anteil der FWL an der zusätzlichen Erwärmung im Vergleich zum Szenario ohne FWL 3,0 %. Über den Zeitraum von 1 Stunde sinkt die Wassertemperatur

## Ergebnisse und Diskussion

um  $-3,4235^{\circ}\text{C}$ , im Gesamtzeitraum von 24 Stunden um  $-3,9026^{\circ}\text{C}$ . Im Bezug zum Modelleinlass erfolgt nach 900 m Fließstrecke und einer Stunde ein Temperaturanstieg um  $1,1361^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden liegt die Temperaturerhöhung nur noch bei  $0,6570^{\circ}\text{C}$ .

Bei einem Abstand von 0,5 m liegt die Wassertemperatur zu Beginn der instationären Berechnung bei  $14,6103^{\circ}\text{C}$ , damit beträgt der Anteil der FWL an der zusätzlichen Erwärmung im Vergleich zum Szenario ohne FWL 4,2%. Innerhalb der ersten Stunde erfolgt ein Temperaturrückgang von  $-3,4160^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden liegt dieser bei  $-3,8782^{\circ}\text{C}$ . Die Wassertemperatur steigt entlang der Fließstrecke von 900 m nach 1 Stunde um  $1,1943^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden verringert sich die Temperaturerhöhung auf  $0,7321^{\circ}\text{C}$ .

Tabelle 16: Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt der PE-TWL nach 900 m Fließstrecke und 24 h Simulation

Szenario	FWL-Abstand	Temperatur zu Beginn [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur nach 1 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur nach 24 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperaturänderung 0 - 24 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]
10	keine	14,4255	11,1025	10,6384	-3,7871
12	1,0 m	14,5596	11,1361	10,6570	-3,9026
11	0,5 m	14,6103	11,1943	10,7321	-3,8782

### PVC-Leitung

Die Trinkwassertemperaturen der PVC-TWL zum Zeitpunkt 0 in Abbildung 15, Ergebnisse der stationären Berechnung, stimmen bei gleichem FWL-Abstand mit dem Szenario im PE-Rohr (Abbildung 14) überein.

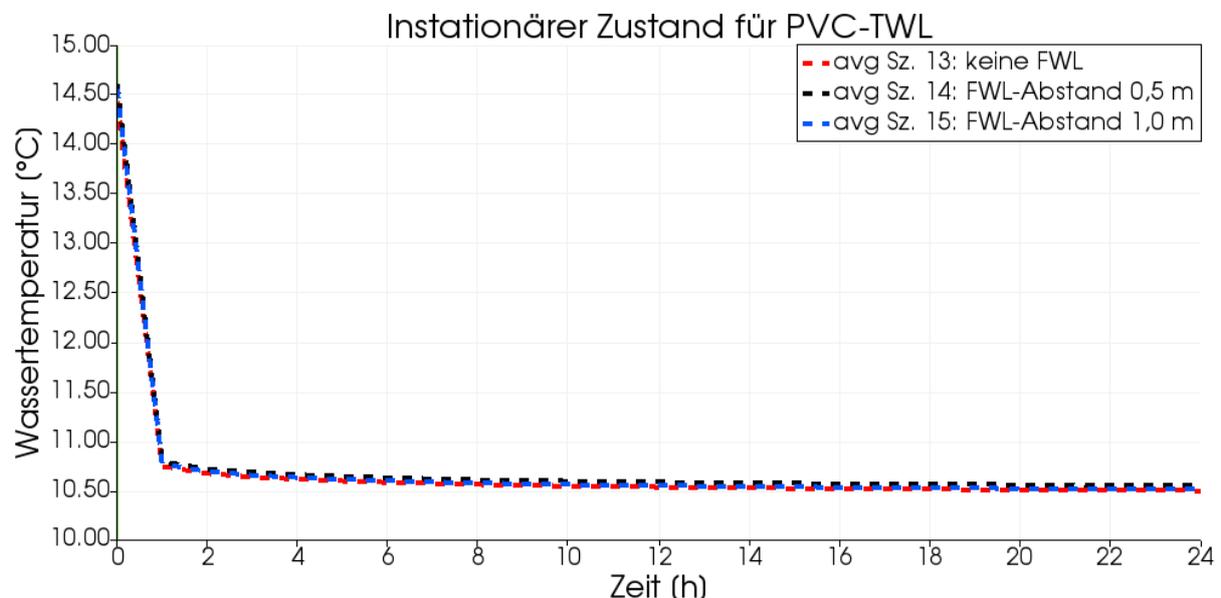


Abbildung 15: Trinkwassertemperaturverlauf der PVC-TWL nach 900 m Fließstrecke

Ohne FWL ergibt sich bei der Stationierung von 900 m eine Stunde nach Beendigung der Stagnation eine Wassertemperaturabnahme von  $-3,6863^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden steigt diese auf insgesamt  $-3,9310^{\circ}\text{C}$ . Im Vergleich zur Wassertemperatur am Modelleinlass erfolgt nach 1

## Ergebnisse und Diskussion

Stunde und 900 m Fließstrecke eine Zunahme um  $0,7392^{\circ}\text{C}$ , die sich nach 24 Stunden auf  $0,4945^{\circ}\text{C}$  reduziert hat.

Bei vorhanden sein einer FWL im Abstand von 1,0 m verringert sich die Wassertemperatur innerhalb einer Stunde um  $-3,7965^{\circ}\text{C}$  im Vergleich zur Wassertemperatur während der Stagnation. Nach 24 Stunden nimmt der Rückgang auf  $-4,0509^{\circ}\text{C}$  zu. Im Vergleich zur Ausgangstemperatur von  $10,0^{\circ}\text{C}$  am Modelleinlass erhöht sich die Wassertemperatur nach 1 Stunde und 900 m um  $0,7631^{\circ}\text{C}$ . Nach 24 Stunden beträgt die Temperaturerhöhung nur noch  $0,5087^{\circ}\text{C}$ .

Bei einem Abstand der FWL von 0,5 m ergibt sich nach einer Stunde instationärer Berechnung nach 900 m Fließstrecke ein Temperaturverringern um  $-3,8256^{\circ}\text{C}$ , der sich nach 24 Stunden auf  $-4,0646^{\circ}\text{C}$  erhöht. Im Vergleich zur Wassertemperatur am Modelleinlass erfolgt nach 1 Stunde und 900 m eine Temperaturzunahme um  $0,7846^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden sinkt die Zunahme auf  $0,5457^{\circ}\text{C}$ .

Tabelle 17: Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt der PVC-TWL nach 900 m Fließstrecke und 24 h Simulation

Szenario	FWL-Abstand	Temperatur zu Beginn [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur nach 1 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur nach 24 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperaturänderung 0 - 24 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]
13	keine	14,4255	10,7392	10,4945	-3,9310
15	1,0 m	14,5596	10,7631	10,5087	-4,0509
14	0,5 m	14,6103	10,7846	10,5457	-4,0646

### Gusseiserne TWL

Auch für die gusseiserne TWL, dargestellt in Abbildung 16, decken sich die Wassertemperaturen zu Beginn der instationären Berechnung mit denen der vorherigen Szenarien gleicher FWL-Einstellungen des instationär berechneten Blockes 2. Ohne FWL liegt die Änderung der Wassertemperatur nach 1 Stunde im Vergleich zur Temperatur der Stagnationsphase bei  $-2,9605^{\circ}\text{C}$ , und sinkt nach 24 Stunden um insgesamt  $-3,6705^{\circ}\text{C}$ . Nach einer Stunde nimmt die Wassertemperatur entlang der Fließstrecke von 900 m um  $1,4650^{\circ}\text{C}$  zu, Ausgangstemperatur sind  $10,0^{\circ}\text{C}$  am Modelleinlass. Nach 24 Stunden sinkt die Temperaturdifferenz auf  $0,7550^{\circ}\text{C}$ .

Bei einem Abstand von 1,0 m erfolgt zunächst ein Temperaturrückgang um  $-3,0505^{\circ}\text{C}$  innerhalb einer Stunde. Nach 24 Stunden beträgt dieser  $-3,7820^{\circ}\text{C}$ . Entlang der Fließstrecke nimmt die Wassertemperatur zu. Nach einer Stunde erhöht sie sich von  $10,0^{\circ}\text{C}$  ausgehend um  $1,5091^{\circ}\text{C}$ . Zum Ende der Berechnung nach 24 Stunden sinkt die Temperaturzunahme auf  $0,7776^{\circ}\text{C}$ .

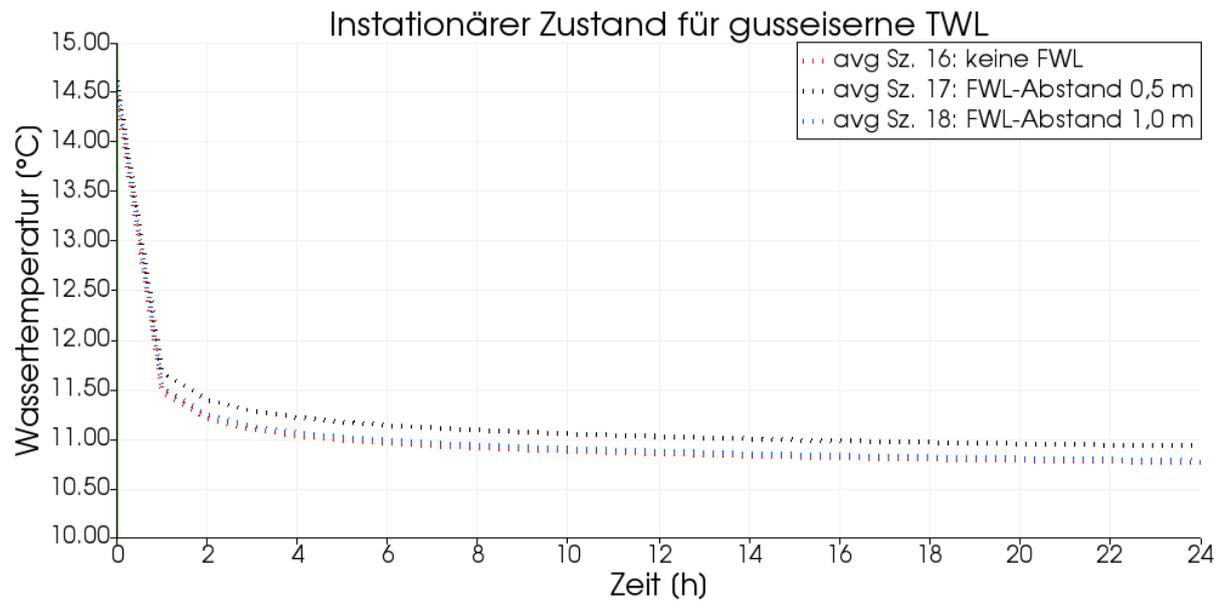


Abbildung 16: Trinkwassertemperaturverlauf der gusseisernen TWL nach 900 m Fließstrecke  
 Ein Abstand zur FWL von 0,5 m führt nach einer Stunde zu einem Temperaturrückgang von -2,9492°C, der sich nach 24 Stunden auf -3,6906°C vergrößert. Im Vergleich zur Temperatur am Modelleinlass steigt die Wassertemperatur nach einer Stunde und 900 m um 1,6610°C, nach 24 Stunden sinkt die Temperaturzunahme auf 0,9196°C.

Tabelle 18: Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt der gusseisernen TWL nach 900 m Fließstrecke und 24 h Simulation

Szenario	FWL-Abstand	Temperatur zu Beginn [°C]	Temperatur nach 1 h [°C]	Temperatur nach 24 h [°C]	Temperaturänderung 0 - 24 h [°C]
16	keine	14,4255	11,4650	10,7550	-3,6705
17	0,5 m	14,6103	11,6610	10,9196	-3,6906
18	1,0 m	14,5596	11,5091	10,7776	-3,7820

Bei der Stationierung von 900 m erfolgt die stärkste Trinkwassertemperaturabnahme für alle Szenarien innerhalb der ersten Stunde. Das in der stationären Berechnung stehende Wasser wird ausgespült, kühleres Wasser strömt in das System. Gleichzeitig besteht ein großer Temperaturgradient zwischen Boden und Wasser, aufgrund dessen es zu einer Erwärmung des Trinkwassers und einer Abkühlung des Bodens entlang der Fließstrecke kommt. Der Temperaturgradient reduziert sich mit der Zeit, weshalb sich die Änderungsrate der Temperatur verringert. Bei einer längeren Laufzeit als 24 Stunden würden sich die Wassertemperaturen immer weiter den Ergebnissen der stationären Berechnungen des Blockes 1 annähern.

### Bodentemperatur am Rand der TWL

Abbildung 17 stellt beispielhaft den Bodentemperaturverlauf in einem Radius von 0,1m um die PE-Rohrachse für verschiedene FWL-Abstände dar. Über einen Zeitraum von 24 Stunden erfolgt eine Abnahme der Bodentemperatur, die mit zunehmender Berechnungsdauer immer langsamer abnimmt. Ursächlich für die unterschiedlichen Temperaturverläufe ist der Wärmestrom von der FWL zur TWL. Liegt der Abstand der FWL bei 1,0 m ist zwar die Bodentemperatur im Vergleich zum Szenario ohne FWL leicht erhöht, im Verlauf über 24 Stunden erfolgt allerdings nur eine geringfügige Änderung der Bodentemperatur im Vergleich zum Szenario ohne FWL. Bei einem Abstand von 0,5 m zeigt sich, dass sich die Temperaturdifferenz des Bodens zu den anderen Szenarien mit zunehmender Zeit vergrößert. Es erfolgt ein deutlicher Wärmestrom von der FWL hin zur TWL, aufgrund dessen der Anteil der FWL an der Erwärmung des Trinkwassers mit der Zeit zunimmt, wie die folgende Analyse zeigt.

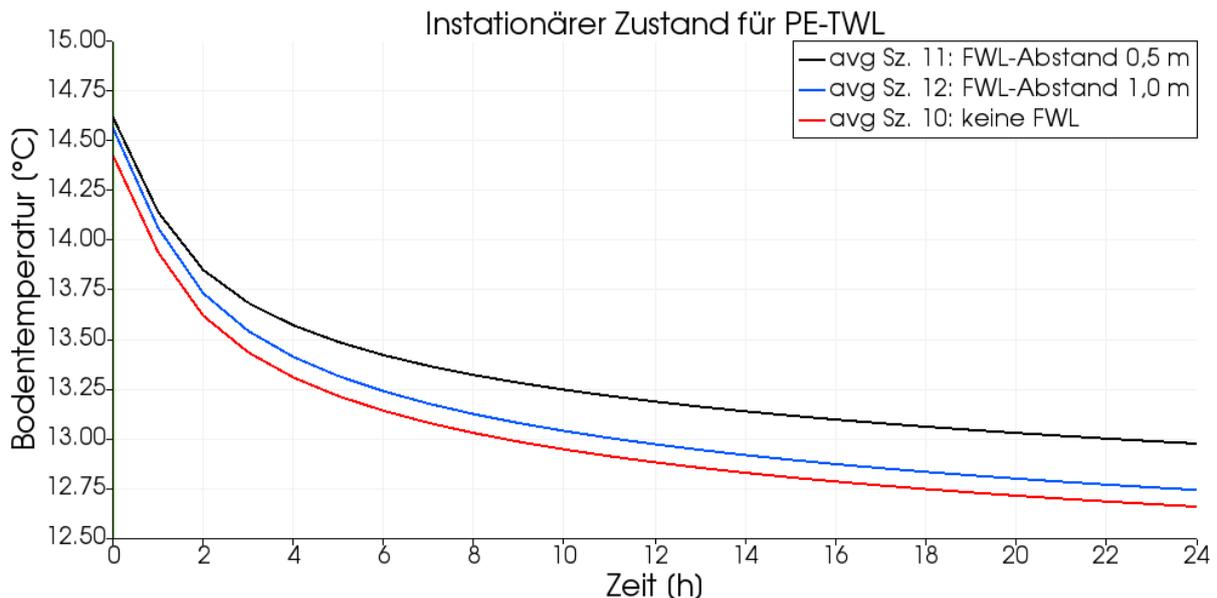


Abbildung 17: Änderung der mittleren Bodentemperatur über die Zeit im Radius von 0,1 m um die TWL-Außenwand nach 900 m Fließstrecke verschiedener FWL-Distanzen im Szenario mit PE-TWL

### Anteil der FWL an der Erwärmung des Trinkwassers

In Abbildung 18 ist der Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung nach 900 m Fließstrecke für verschiedene TWL-Materialien und FWL-Abstände dargestellt. Als Referenz dient jeweils die Trinkwassererwärmung in Szenarien ohne FWL.

## Ergebnisse und Diskussion

Im Fall der Szenarien mit FWL im Abstand von 1,0 m liegt die zusätzliche Erwärmung infolge der FWL über den gesamten Zeitraum für alle Rohrmaterialien im Bereich von 3,0 %. Bei der PE- und PVC-TWL sinkt der Anteil nach 24 Stunden auf 2,9%, die Schwankungsbreite liegt zwischen 2,8 und 3,1%. In der gusseisernen TWL bleibt der Anteil bei 3,0%, wobei es nach 10 Stunden zu einem kurzweiligen Anstieg auf 3,4% kommt. Der geringste Wert liegt bei 2,9%.

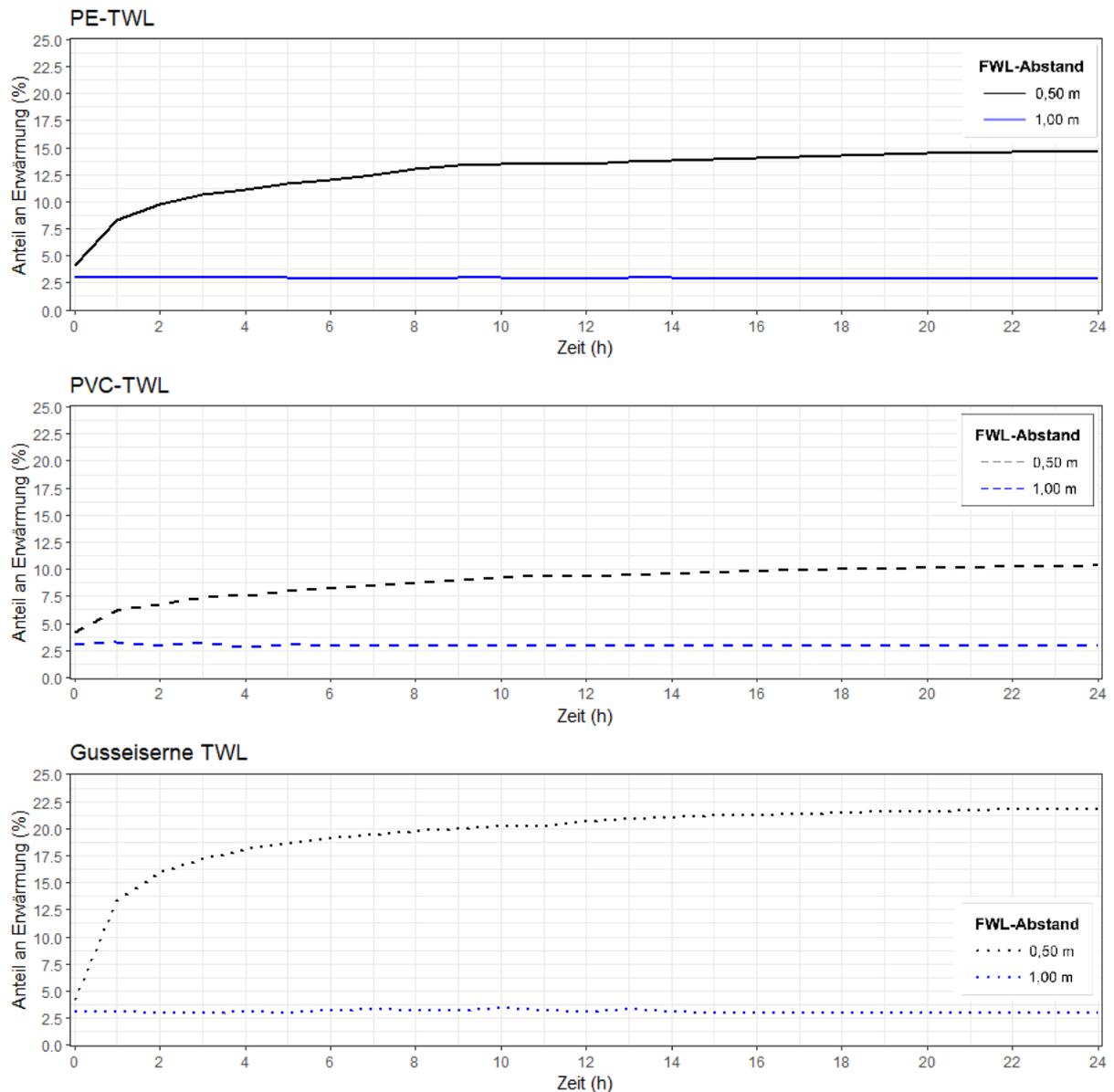


Abbildung 18: Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung nach 900 m Fließstrecke  
Innerhalb der ersten Stunde besteht beim Szenario mit FWL im Abstand von 0,5 m jeweils eine starke Zunahme des Anteils. In der PE-TWL steigt dieser auf 8,3%, in der PVC-TWL auf 6,2% und in der gusseisernen TWL auf 13,4%. In den folgenden Stunden steigt der Anteil mit immer geringer werdenden Zuwächsen weiter an. An einigen Zeitpunkten erfolgen geringfügige Reduzierungen des Anteils, welche in den Zuwächsen der darauffolgenden

## Ergebnisse und Diskussion

Stunden jeweils kompensiert werden. Nach 24 Stunden erreicht der Anteil bei der PE-TWL 14,7%, bei der PVC-TWL 10,3% und bei der gusseisernen TWL 21,8%.

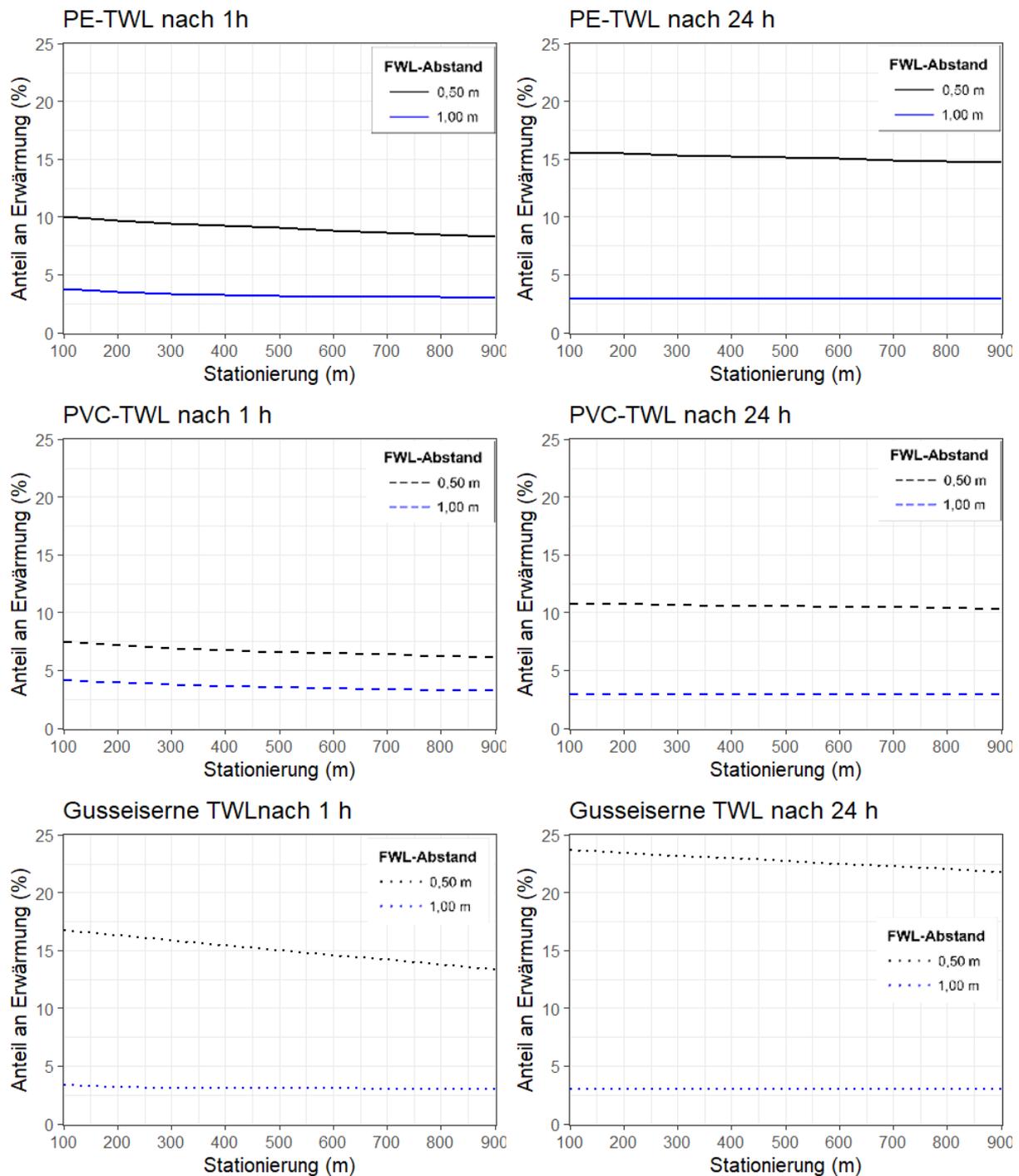


Abbildung 19: Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung über die Fließstrecke

Der Anteil der FWL an der Erwärmung des Trinkwassers entlang der Fließstrecke zwischen 100 und 900 m ist in Abbildung 19 für zwei Zeitpunkte (1h bzw. 24h nach Ende der Stagnationsphase) dargestellt. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Szenarien ohne FWL. Beträgt der FWL-Abstand 1,0 m verringern sich die Abnahmen des Anteils der FWL an

der Trinkwassererwärmung entlang der Fließstrecke von 3,75% auf 3,04% für die PE-TWL, von 4,17% auf 3,24% für die PVC-TWL sowie von 3,32% auf 3,01% für die gusseiserne TWL. Bei einem Abstand der FWL von 0,5 m kommt es nach einer Stunde bei der PE-TWL entlang der Fließstrecke zu einer Abnahme von 10,04% auf 8,32%, bei der PVC-TWL von 7,41% auf 6,15% und bei der gusseisernen TWL von 16,76% auf 13,38%. Insgesamt sind die Entwicklungen entlang der Trinkwasserleitung linear.

Ausgehend von einem wesentlich höheren Anteil der FWL an der Wassertemperaturerhöhung nach 24 Stunden verringert sich der Einfluss entlang der Fließstrecke geringfügiger im Vergleich zum Zeitpunkt eine Stunde nach Ende der Stagnation. Liegt der Abstand bei 1,0 m beträgt die Änderung des Anteils unabhängig vom Material nur wenige hundertstel Prozent. Für die PE-TWL liegt dieser um 2,94%, für die PVC-TWL um 2,91% und für die gusseisernen TWL um 2,99%. Bei einem Abstand von 0,5 m erfolgt eine Verringerung von 15,62% auf 14,70% für die PE-TWL, von 10,76% auf 10,34% für die PVC-TWL sowie von 23,67% auf 21,81% für die gusseiserne TWL.

Als Ausgangslage der Berechnungen des instationär berechneten Blockes erfolgte eine stationäre Berechnung. Anhand der gleichen berechneten Wassertemperaturen unterschiedlicher TWL lässt sich das Erreichen der Stationarität feststellen, da nur das obere und untere Ende des Bodenkörpers sowie je nach Szenario die FWL als Wärmequelle dienen. Die Wassertemperaturen ohne FWL liegen nach Erreichen der Stationarität bei 14,4255°C, die Temperatur ergibt sich aus dem Wärmestrom der oberen und unteren Modellbegrenzung von 14,45°C bzw. 14,40°C. Der Anteil der FWL an der Trinkwassertemperatur liegt bei Stagnation bei einem FWL-Abstand von 1,0 m, im Vergleich zum Szenario ohne FWL, bei 3,0%. Beträgt der Abstand 0,5 m, erhöht sich der Anteil auf 4,2%.

Alle Szenarien des instationär berechneten Blockes 2 haben gemeinsam, dass die Wassertemperaturen unabhängig vom Material und Fließgeschwindigkeit sowohl während der stationären Berechnung als auch über die gesamte Dauer von 24 Stunden der instationären Berechnung bei einem Abstand von 0,5 m am höchsten sind, gefolgt von jenen mit einem Abstand von 1,0 m. Die geringsten Wassertemperaturen werden in Szenarien ohne FWL erreicht.

Für die instationäre Berechnung mit der Fließgeschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich, dass der Anteil der FWL an der Trinkwassererwärmung sehr stark vom FWL-Abstand beeinflusst wird. Beträgt der Abstand zur FWL 1,0 m, schwankt der Anteil innerhalb von 24 Stunden leicht um den Wert von 3,0%. Liegt der Abstand bei 0,5 m, erfolgt eine Zunahme des Anteils, in Abhängigkeit des TWL-Materials, innerhalb von 24 Stunden von 4,2% auf 10,3 – 21,8%. Der

Anteil der FWL an der Erwärmung nähert sich kontinuierlich den Ergebnissen des stationär berechneten Blockes 1 an.

Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, erfolgt die Abnahme des Anteils der FWL an der Trinkwassererwärmung entlang der Fließstrecke aufgrund des kleiner werdenden Temperaturgradienten zwischen Trinkwasser und umgebenden Bodenkörper.

### **5.3 Einfluss des Materials der Trinkwasserleitung**

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Blöcke 1 und 2 hinsichtlich des Einflusses des Materials der TWL in je drei Abbildungen mit unterschiedlichen FWL-Einstellungen gezeigt. Die Unterschiede zwischen den TWL sind in Tabelle 8 aufgeführt. Bei Betrachtung der physikalischen Unterschiede der einzelnen TWL-Materialien fallen große Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Dichte auf. Nach AGUDELO-VERA et al. (2020) beruht der Wärmetransfer durch die TWL maßgeblich auf der Wärmeleitfähigkeit der TWL. Aufgrund dessen wird im Folgenden die PVC-TWL mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit als Ausgangspunkt für Vergleiche der Materialien genutzt.

#### **5.3.1 Block 1 – stationäre Berechnung**

Die Berechnung in Block 1 erfolgte ausschließlich stationär mit einer Fließgeschwindigkeit von 1 m/s sowie einer Trinkwasserstarttemperatur von 10,00°C.

##### **Ohne FWL**

Abbildung 20 stellt die Ergebnisse der Szenarien 1, 4 und 7, die sich im Material der TWL (PE, PVC und Gusseisen) unterscheiden, nach Erreichen der Stationarität dar. Alle drei Szenarien wurden ohne FWL erstellt. Die Trinkwassertemperatur steigt bis an das Ende der Fließstrecke von 900 m in der PE-TWL um insgesamt 0,4768°C an. Die Temperaturänderung beträgt bei der PVC-TWL 0,3893°C und bei der gusseisernen TWL 0,5443°C. Im Vergleich zur PVC-TWL erreicht die PE-TWL nach 900 m Fließstrecke eine um 22,5% erhöhte Wassertemperatur, für die gusseiserne TWL liegt die zusätzliche Temperaturerhöhung bei 39,8%.

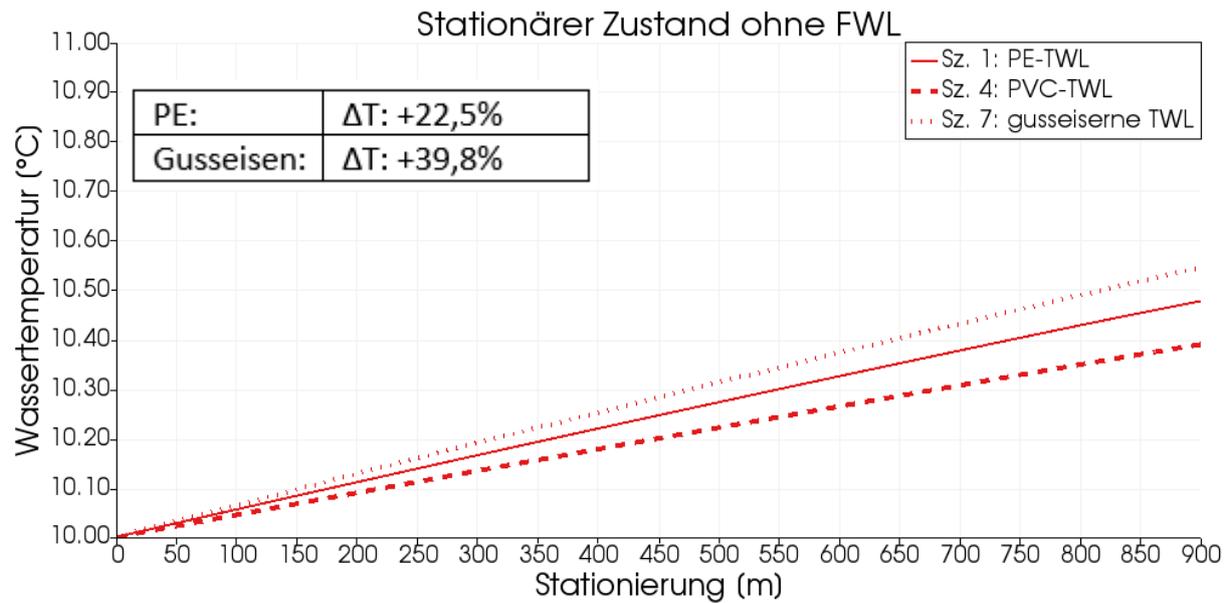


Abbildung 20: Trinkwassertemperaturverlauf entlang der Rohrachse von TWL verschiedener Materialien und ohne FWL

Tabelle 19 zeigt die Trinkwassertemperaturänderung der Fließabschnitte 100 – 150 m und 850 – 900 m sowie die Temperaturzunahme nach Erreichen der Stationarität. Die gusseiserne TWL hat an beiden Fließabschnitten die höchsten Temperaturänderungen, in Relation zueinander vermindert sich die Temperaturzunahme um -13,8%. Die geringste Verminderung erfolgt bei der PVC-TWL mit -11,5% und die höchste bei der PE-TWL mit -14,3%.

Tabelle 19: Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt entlang der Fließstrecke nach Erreichen der Stationarität ohne FWL

Szenario	TWL-Material	Temperaturänderung 100 – 150 m [°C]	Temperaturänderung 850 – 900 m [°C]	Temperaturzunahme nach 0 – 900 m [°C]
4	PVC	0,0224	0,0201	0,3893
1	PE	0,0276	0,0242	0,4768
7	Gusseisen	0,0317	0,0279	0,5443

**FWL-Abstand 1,0m**

Abbildung 21 zeigt die Änderung der Wassertemperatur bei einem Abstand von 1,0 m. Die Erwärmung bei der PE-TWL beträgt 0,4904°C, während die PVC-TWL die geringste Temperaturänderung von 0,4002°C aufweist. Die höchste Änderung tritt bei der gusseisernen TWL mit 0,5592°C auf. Der Anteil an der Erwärmung im Vergleich zur PVC-TWL liegt bei der PE-TWL bei 22,6% und bei der gusseisernen TWL bei 39,7%.

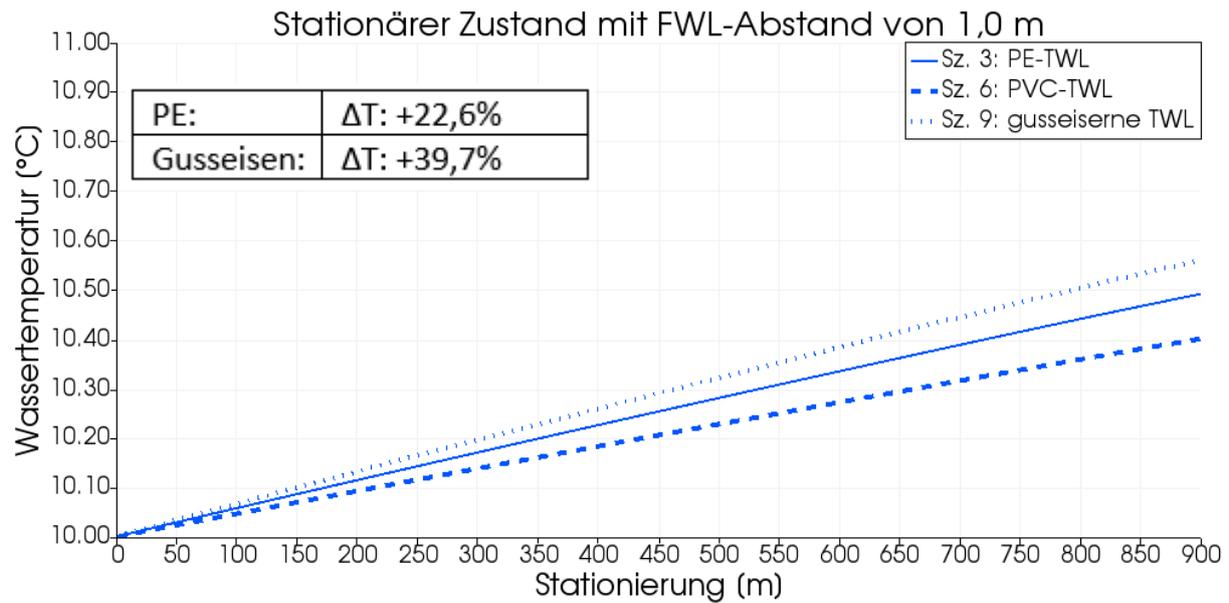


Abbildung 21: Trinkwassertemperaturverlauf entlang der Rohrachse von TWL verschiedener Materialien und mit FWL-Abstand von 1,0 m

Auch bei diesem FWL-Abstand erfolgt die höchste Temperaturänderung der Fließabschnitte zwischen 100 – 150 m sowie 850 – 900 m bei der gusseisernen TWL. Ebenso ist die prozentuale Verminderung des Temperaturanstieges mit -15,8% am größten. Die PE-TWL erreicht eine Verminderung von 14,4%, den geringsten Wert nimmt die PVC-TWL mit -11,8% ein.

Tabelle 20: Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt entlang der Fließstrecke nach Erreichen der Stationarität mit FWL-Abstand von 1,0 m

Szenario	TWL-Material	Temperaturänderung 100 – 150 m [°C]	Temperaturänderung 850 – 900 m [°C]	Temperaturzunahme nach 0 – 900 m [°C]
6	PVC	0,0230	0,0206	0,4002
3	PE	0,0284	0,0248	0,4904
9	Gusseisen	0,0327	0,0283	0,5592

### FWL-Abstand 0,5m

Bei einem Abstand von 0,5 m, dargestellt in Abbildung 22, werden folgende Änderungen der Wassertemperaturen erreicht: Nach 900 m Fließstrecke erwärmt sich das Wasser der PE-TWL um 0,5666°C, im Szenario der PVC-TWL um 0,4440°C und die gusseiserne TWL erwärmt sich um 0,6817°C. Somit liegt der Anteil der zusätzlichen Erwärmung bei der PE-TWL bei 27,6% und bei der gusseisernen TWL bei 53,5%.

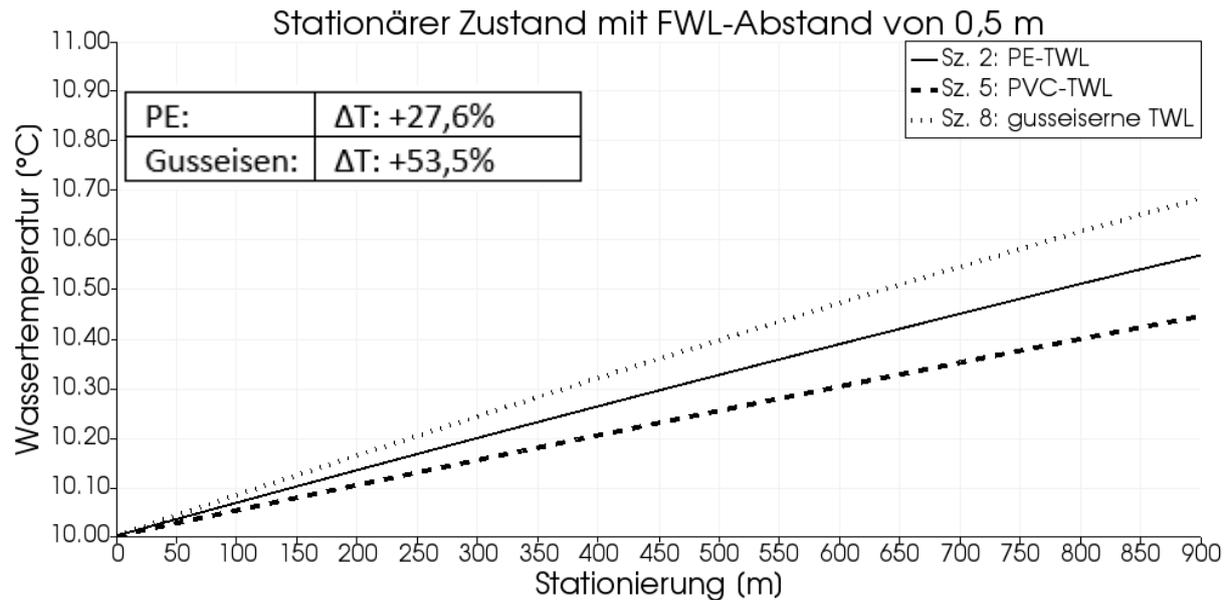


Abbildung 22: Trinkwassertemperaturverlauf über den Wasserquerschnitt entlang der Rohrachse von TWL verschiedener Materialien und mit FWL-Abstand von 0,5 m

Wie in den Szenarien ohne FWL zeigt sich, dass die gusseiserne TWL die höchsten Temperaturänderungen auf den Fließabschnitten zwischen 100 – 150 m und 850 – 900 m aufweist, gefolgt von der PE-TWL. Die prozentual größte Verminderung der Temperaturzunahme erfolgt mit -19,3% bei der gusseisernen TWL, gefolgt von der PE-TWL mit -16,1%. Die geringste Abnahme erzielt die PVC-TWL mit -11,7%.

Tabelle 21: Trinkwassertemperaturänderung über den Wasserquerschnitt entlang der Fließstrecke nach Erreichen der Stationarität mit FWL-Abstand von 0,5 m

Szenario	TWL-Material	Temperaturänderung 100 – 150 m [°C]	Temperaturänderung 850 – 900 m [°C]	Temperaturzunahme nach 0 – 900 m [°C]
5	PVC	0,0256	0,0229	0,4440
2	PE	0,0331	0,0285	0,5666
8	Gusseisen	0,0403	0,0338	0,6817

### Bodentemperatur am Rand der TWL

Die gemittelte Bodentemperatur in einem Radius von 0,1 m um die Rohraußenwand der TWL, dargestellt in Abbildung 23 für Szenarien ohne FWL, verdeutlicht den Einfluss des TWL-Materials auf die Boden- bzw. Trinkwassertemperatur. Im Vergleich zu PE und vor allem PVC erfolgt bei gusseisernen TWL ein höherer Wärmestrom vom Boden zum Trinkwasser. Infolgedessen steigt die Wassertemperatur und gleichzeitig sinkt die Bodentemperatur stärker als bei den anderen Materialien mit geringerer Wärmeleitfähigkeit.

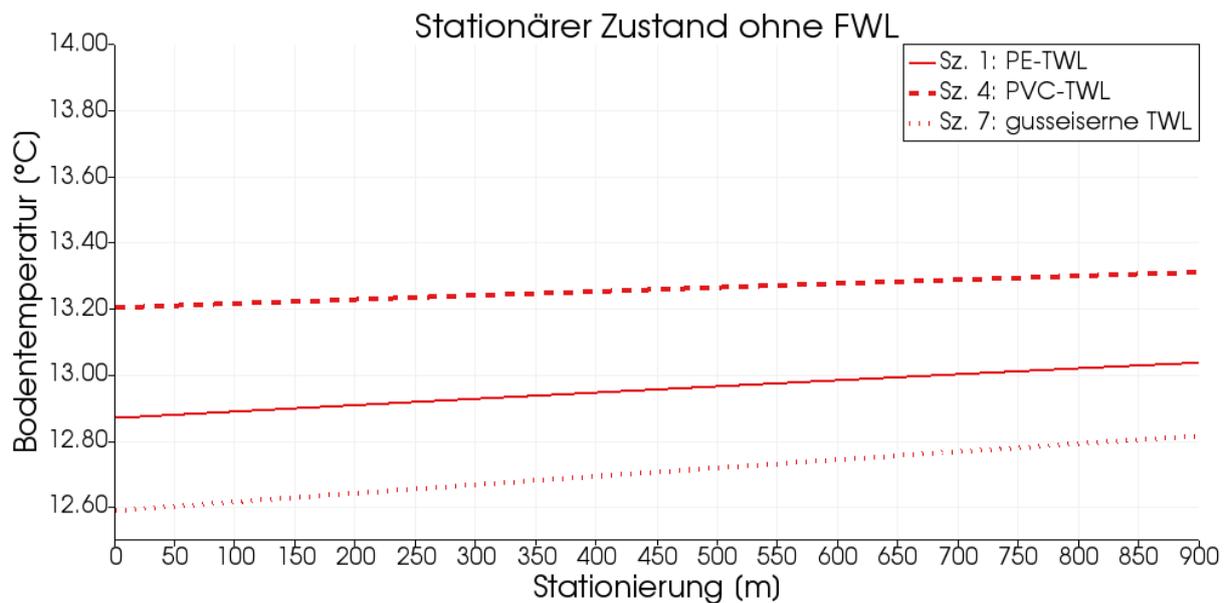


Abbildung 23: Bodentemperaturverlauf um die Achse der TWL ohne FWL

Dies liegt daran, dass sich der Temperaturgradient zwischen Boden und Trinkwasser entlang der Fließstrecke für Szenarien mit gusseiserner TWL mit etwa  $-0,35^{\circ}\text{C}$  stärker verkleinert als bei z.B. PVC-TWL mit  $-0,30^{\circ}\text{C}$ . Analog dazu erwärmt sich der Boden entlang der 900 m Fließstrecke im Fall der gusseisernen TWL um  $0,22^{\circ}\text{C}$ , während die Erwärmung für PE  $0,13^{\circ}\text{C}$  und für PVC  $0,11^{\circ}\text{C}$  beträgt.

Ursächlich für die verschiedenen Ergebnisse sind die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Materialien. Insbesondere aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von  $50 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$  der gusseisernen TWL erfolgt ein starker Wärmeaustausch zwischen Trinkwasser und Bodenkörper. Wärme fließt vom Boden zum Trinkwasser, dessen Temperatur steigt. Gleichzeitig verliert der Boden an Wärme, weshalb der Temperaturgradient zwischen Boden und Trinkwasser verkleinert wird. PVC-TWL mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$  zeigen die geringsten Temperaturzunahmen wie auch die geringsten Änderungen der Temperaturzunahme. PE-TWL haben eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$  und ordnen sich in der Mitte ein.

Unabhängig von der FWL erfolgt die höchste Wassertemperaturzunahme jeweils bei den Szenarien der gusseisernen TWL. Während die PE-TWL eine Temperaturerhöhung zwischen 22,5% und 27,6% im Vergleich zur PVC-TWL bewirkt, liegt diese bei der gusseisernen TWL zwischen 39,7 und 53,5%.

Zwischen den verschiedenen TWL-Materialien zeigen sich auch deutliche Unterschiede in den Temperaturänderungen auf den Fließabschnitten zwischen 100 – 150 sowie 850 – 900 m. Bei beiden Fließabschnitten erfolgt die höchste Temperaturzunahme bei gusseisernen TWL, die geringste jeweils bei PVC-TWL. Ebenso tritt bei gusseisernen TWL, mit Ausnahme der

Berechnung ohne FWL, die relativ gesehen höchste Verminderung der Wassererwärmung entlang der Fließstrecke auf. Die geringsten Werte erreicht jeweils die PVC-TWL.

### 5.3.2 Block 2 – instationäre Berechnung

Die Berechnung für Block 2 erfolgte zunächst stationär mit einer Fließgeschwindigkeit von 0 m/s, es wurde eine dauerhafte Stagnation simuliert. Ausgehend von den stationären Ergebnissen wurde über einen Zeitraum von jeweils 24 Stunden eine instationäre Berechnung mit der Fließgeschwindigkeit von 1 m/s durchgeführt.

#### Ohne FWL

Zu Beginn liegt die Wassertemperatur unabhängig von den TWL-Materialien bei 14,4255°C, wodurch sich das Erreichen der Stationarität bestätigt. Die Wassertemperatur nähert sich immer weiter den Endergebnissen der stationären Berechnung des Blockes 1 an und würde diese bei einem längeren Berechnungszeitraum erreichen. In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der instationären Berechnung ohne Einfluss einer FWL dargestellt.

Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben kommt es in der ersten Stunde zu einem starken Abfall der Trinkwassertemperatur, da die Stagnation beendet ist und Trinkwasser mit der Temperatur von 10,0°C in die TWL einströmt. Bei der PE-TWL erfolgt innerhalb von einer Stunde ein Temperaturrückgang von -3,3231°C. In den folgenden Stunden sinkt die Temperaturänderungsrate, nach 24 Stunden wird ein Rückgang um -3,7871°C erreicht. In Bezug zur Wassertemperatur am Modelleinlass erfolgt innerhalb der 900 m langen Fließstrecke nach 1 Stunde eine Erhöhung der Wassertemperatur um 1,1025°C, nach 24 Stunden verringert sich diese auf 0,6384°C.

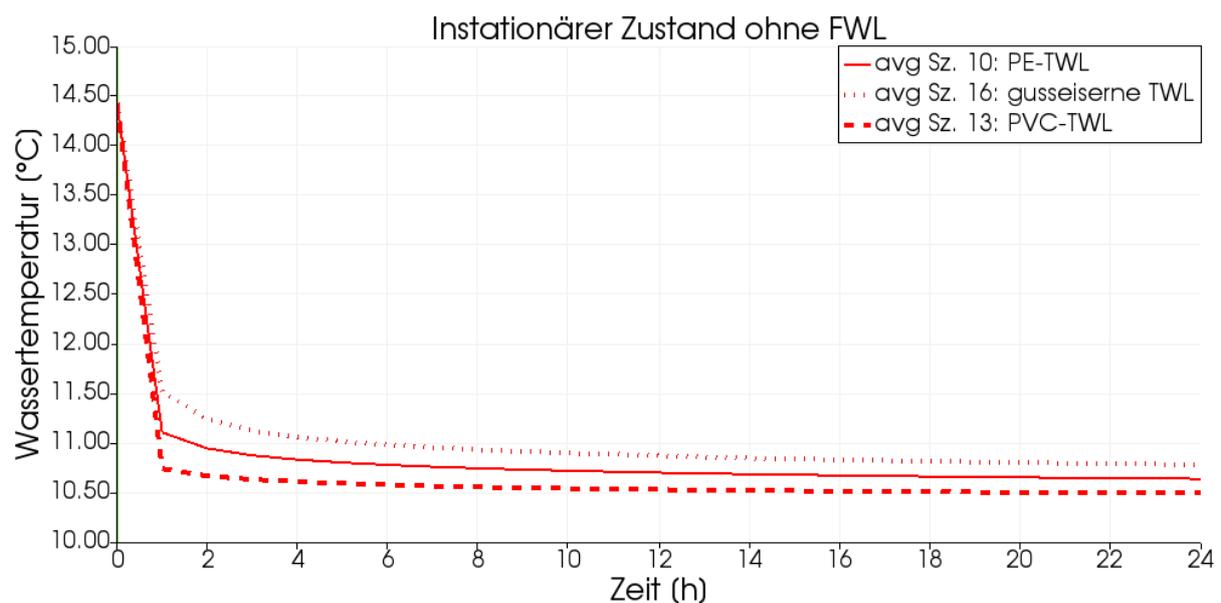


Abbildung 24: Trinkwassertemperaturverlauf in der Achse der TWL verschiedener Materialien nach 900 m Fließstrecke und ohne FWL

Im Szenario der PVC-TWL werden nach Beginn der instationären Berechnung durchgehend niedrigere Temperaturen erreicht. Nach 1 Stunde sinkt die Wassertemperatur um  $-3,8663^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden wird ein Rückgang von insgesamt  $-3,9310^{\circ}\text{C}$  erreicht. Ausgehend von der Einlasstemperatur von  $10,0^{\circ}\text{C}$  erfolgt nach 900 m Fließstrecke und einer Stunde ein Temperaturanstieg von zunächst  $0,7392^{\circ}\text{C}$ . Nach 24 Stunden sinkt der Wert auf  $0,4945^{\circ}\text{C}$ .

Die gusseiserne TWL zeigt die höchsten Temperaturwerte auf. Innerhalb einer Stunde erfolgt ein Rückgang um  $-2,9605^{\circ}\text{C}$ , der sich nach 24 Stunden auf  $3,6705^{\circ}\text{C}$  erhöht. Im Vergleich zur Einlasstemperatur liegt die Temperaturzunahme nach einer Stunde und 900 m Fließstrecke bei  $1,4650^{\circ}\text{C}$ , und sinkt nach 24 Stunden auf  $0,7550^{\circ}\text{C}$ . Die berechneten Wassertemperaturen sind in Tabelle 22 aufgelistet.

Tabelle 22: Trinkwassertemperaturänderung nach 900 m Fließstrecke ohne FWL

Szenario	TWL-Material	Starttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur nach 1h [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur nach 24h [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperaturänderung 0-24 h [ $^{\circ}\text{C}$ ]
13	PVC	14,4255	10,4945	10,4945	-3,9310
10	PE	14,4255	11,1025	10,6384	-3,7871
16	Gusseisen	14,4255	11,4650	10,7550	-3,6705

### **FWL-Abstand 1,0m**

Nach Erreichen der Stationarität im Stagnationsfall liegt die Wassertemperatur bei einem FWL-Abstand von 1,0 m bei  $14,5596^{\circ}\text{C}$ , siehe Tabelle 23. Nach einer Stunde instationärer Berechnung mit der Fließgeschwindigkeit von 1 m/s wird für die PE-TWL eine Temperaturreduzierung von  $-3,4235^{\circ}\text{C}$  erreicht, wie in Abbildung 25 dargestellt ist. Nach 24 Stunden erhöht sich die Reduzierung auf  $-3,9026^{\circ}\text{C}$ . In Bezug zum Modelleinlass erhöht sich die Wassertemperatur innerhalb von einer Stunde um  $1,1361^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden noch um  $0,6570^{\circ}\text{C}$ .

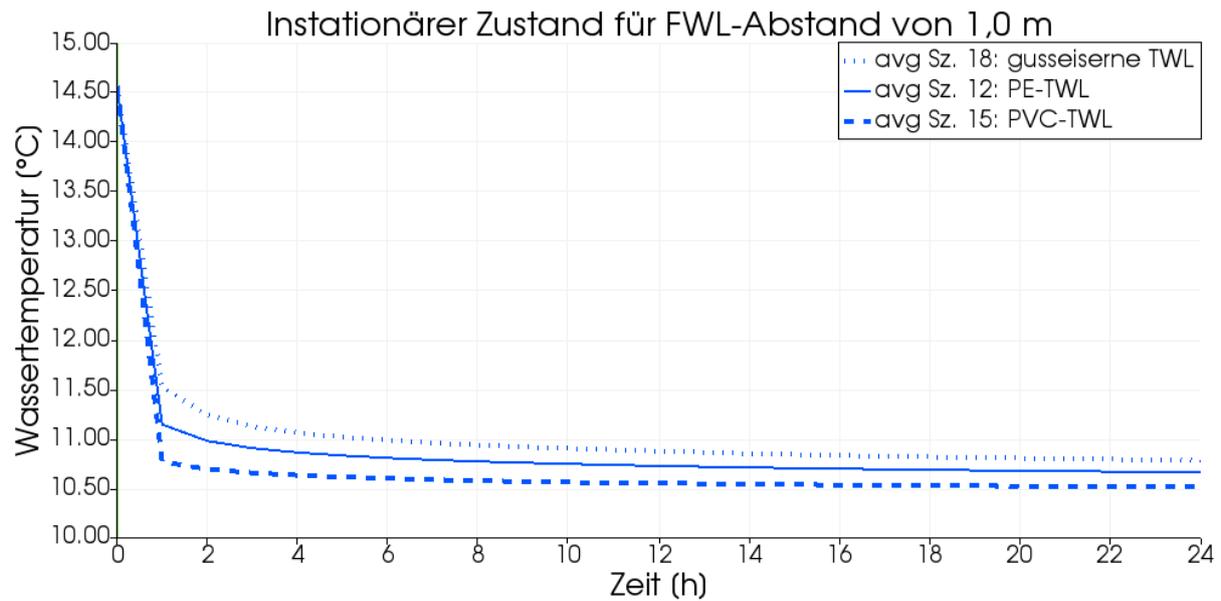


Abbildung 25: Trinkwassertemperaturverlauf in der Achse der TWL verschiedener Materialien nach 900 m Fließstrecke und mit FWL-Abstand von 1,0 m

Die PVC-TWL erreicht wie in der vorherigen Abbildung die niedrigsten Wassertemperaturen. Nach einer Stunde erfolgt eine Reduzierung um  $-3,7965^{\circ}\text{C}$ , die sich nach 24 Stunden auf  $-4,0509^{\circ}\text{C}$  erhöht. Entlang der Fließstrecke kommt es in der ersten Stunde zu einem Anstieg um  $0,7631^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden noch um  $0,5087^{\circ}\text{C}$ .

Die höchsten Wassertemperaturen werden bei der gusseisernen TWL erzielt. Die Temperaturabnahme innerhalb der ersten Stunde beträgt  $-3,0505^{\circ}\text{C}$  und nach 24 Stunden  $-3,7820^{\circ}\text{C}$ . Im Vergleich zur Einlasstemperatur erfolgt nach 900 m Fließstrecke und einer Stunde eine Temperaturzunahme von  $1,5091^{\circ}\text{C}$ , die sich nach 24 Stunden auf  $0,7776^{\circ}\text{C}$  verringert.

Tabelle 23: Trinkwassertemperaturänderung nach 900 m Fließstrecke und 24 h Simulation für FWL-Abstand von 1,0 m

Szenario	TWL-Material	Starttemperatur [°C]	Temperatur nach 1h [°C]	Temperatur nach 24h [°C]	Temperaturänderung 0-24 h [°C]
15	PVC	14,5596	10,7631	10,5087	-4,0509
12	PE	14,5596	11,1361	10,6570	-3,9026
18	Gusseisen	14,5596	11,5091	10,7776	-3,7820

### FWL-Abstand 0,5m

Die Wassertemperatur liegt zu Beginn der drei Szenarien in Abbildung 26 mit einem FWL-Abstand von 0,5 m bei  $14,6103^{\circ}\text{C}$ . Nach einer Stunde erfolgt für die PE-TWL eine Reduzierung von  $-3,4160^{\circ}\text{C}$ , nach 24 Stunden erhöht sie sich auf  $-3,8782^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturzunahme in Bezug zur Einlasstemperatur beträgt nach einer Stunde und 900 m Fließstrecke  $1,1943^{\circ}\text{C}$  und sinkt im Berechnungszeitraum von 24 Stunden auf  $0,7321^{\circ}\text{C}$ .

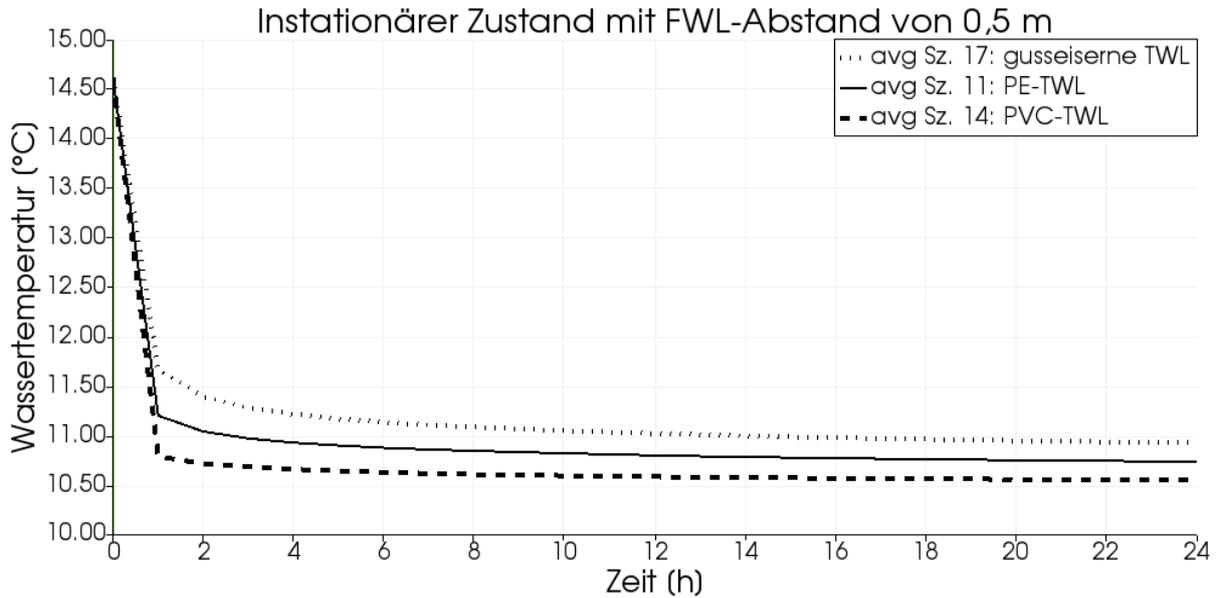


Abbildung 26: Trinkwassertemperaturverlauf in der Achse der TWL verschiedener Materialien nach 900 m Fließstrecke und mit FWL-Abstand von 0,5 m

Wie in Abbildung 25 wird die höchste Wassertemperaturänderung in der PVC-TWL erreicht. Nach einer Stunde liegt die Wassertemperaturänderung bei  $-3,8256^{\circ}\text{C}$  und steigt nach 24 Stunden auf  $-4,0646^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturerhöhung entlang der Fließstrecke beträgt nach einer Stunde  $0,7846^{\circ}\text{C}$  und reduziert sich nach 24 Stunden auf  $0,5457^{\circ}\text{C}$ .

Bei der gusseisernen TWL kommt es innerhalb der ersten Stunde zu einem Wassertemperaturabfall von  $-2,9492^{\circ}\text{C}$ , der sich nach 24 Stunden auf  $-3,6906^{\circ}\text{C}$  erhöht. Entlang der Fließstrecke steigt die Wassertemperatur nach einer Stunde um  $1,6610^{\circ}\text{C}$  und nach 24 Stunden um  $0,9196^{\circ}\text{C}$ .

Tabelle 24: Trinkwassertemperaturänderung nach 900 m Fließstrecke für FWL-Abstand von 0,5 m

Szenario	TWL-Material	Starttemperatur [°C]	Temperatur nach 1h [°C]	Temperatur nach 24h [°C]	Temperaturänderung 0-24 h [°C]
14	PVC	14,6103	10,7846	10,5457	-4,0646
11	PE	14,6103	11,1943	10,7321	-3,8782
17	Gusseisen	14,6103	11,6610	10,9196	-3,6906

**Gemittelte Bodentemperatur (0,1 m um die TWL)**

Zu Beginn jedes Szenarios erfolgt eine Wassertemperaturabnahme um mehrere  $^{\circ}\text{C}$ . Diese wird durch die Umstellung von Stagnation auf eine Fließgeschwindigkeit von 1 m/s hervorgerufen, da Wasser mit einer Temperatur von  $10,0^{\circ}\text{C}$  in die TWL einströmt. Entlang der Fließstrecke kommt es über die TWL zu einem Temperatureaustausch zwischen Trinkwasser und Boden, dessen Unterschiede maßgeblich über die Wärmeleitfähigkeit der TWL gesteuert werden. Zu

Beginn der instationären Berechnung liegt die Bodentemperatur um die TWL entlang der Fließstrecke konstant bei etwa 14,43°C, siehe Abbildung 27.

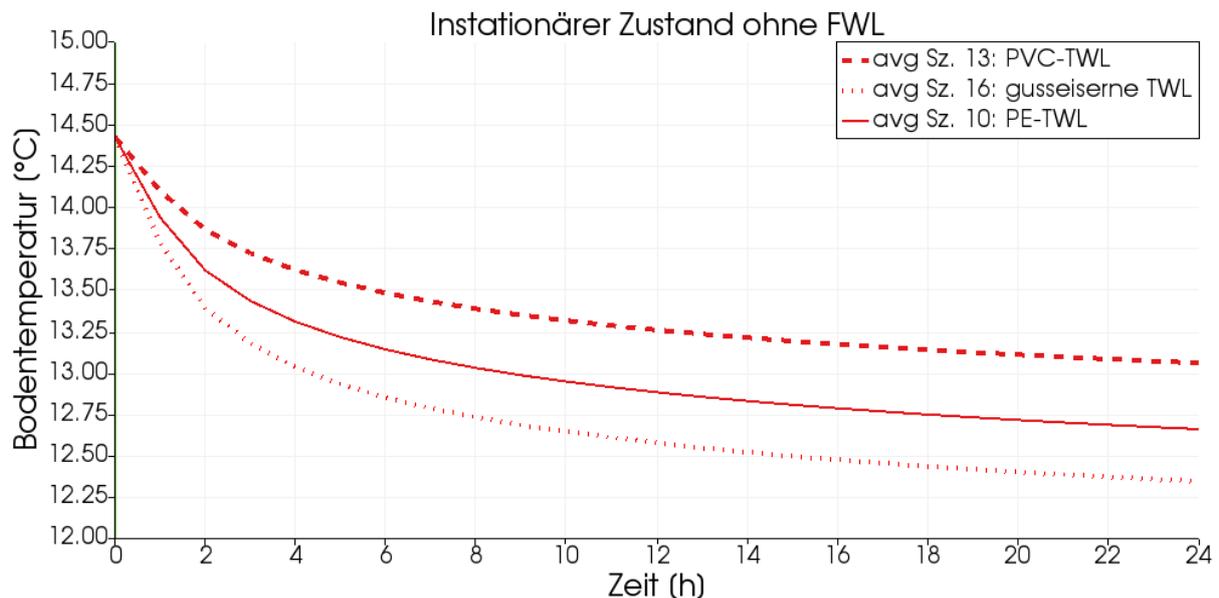


Abbildung 27: Änderung der gemittelten Bodentemperatur im Radius von 0,1 m um die TWL-Außenwand nach 900 m Fließstrecke verschiedener TWL-Materialien

Im zeitlichen Verlauf zeigen sich deutliche Unterschiede in der Temperaturänderung im Boden um die TWL. Die geringsten Änderungen zeigen sich für die PVC-TWL. Nach 24 Stunden erfolgt eine Temperaturdifferenz im Vergleich zum Beginn der instationären Berechnung von -1,3655°C. Die PE-TWL erzielt im gleichen Zeitraum eine Temperaturänderung von -1,7652°C. Die höchste Abnahme der Bodentemperatur verzeichnet die gusseiserne TWL mit -2,0808°C. Die Ergebnisse verhalten sich konträr zu denen der Wassertemperaturänderung, vergleiche dazu Abbildung 24. Die PVC-TWL hat mit 0,17 W/(m\*K) die geringste Wärmeleitfähigkeit, aufgrund dessen es zu einem vergleichsweise geringen Temperatúraustausch zwischen Boden und Trinkwasser kommt. Beide ändern ihre Temperatur nur geringfügig. Bei den PE-TWL mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,50 W/(m\*K) erfolgt ein mittlerer Temperatúraustausch. Bei der höchsten Wärmeleitfähigkeit von 50 W/(m\*K) der gusseisernen TWL kommt es sowohl bei der Boden- als auch Trinkwassertemperatur zu einer hohen Änderung.

### Anteil des TWL-Materials an der Erwärmung des Trinkwassers

Der Anteil des TWL-Materials an der Trinkwassererwärmung, dargestellt in Abbildung 28, wird ausgehend von der PVC-TWL angegeben, da dieses Material die niedrigste Wärmeleitfähigkeit hat. Ohne FWL liegt der Anteil nach einer Stunde für die PE-TWL bei 49,1%. In den folgenden Stunden kommt es zu einer Abnahme, die sich mit zunehmender Zeit verlangsamt. Nach 4 Stunden wird ein Anteil von 36,2% erreicht, der sich bis zum Ende der Berechnung nach 24 Stunden auf 29,1% verringert. Die gusseiserne TWL erreicht nach einer

## Ergebnisse und Diskussion

Stunde einem Anteil von 98,2%. Bei diesem Material kommt es zu einem stärkeren Rückgang des Anteils. Nach 4 Stunden beträgt er 67,7% und sinkt weiter bis auf 52,7% nach 24 Stunden.

Bei einem FWL-Abstand von 0,5 m zeigt sich ein ähnlicher Verlauf, jedoch mit insgesamt höheren Anteilen an der Erwärmung. Für PE beträgt der Anteil nach einer Stunde 52,2% und sinkt in den folgenden drei Stunden auf 40,7%. Nach 24 Stunden wird ein Anteil von 34,2% erreicht. Die gusseiserne TWL erreicht nach einer Stunde einen Anteil von 111,7%. Nach 4 Stunden sinkt der Wert auf 84,0% um nach 24 Stunden 68,6% anzunehmen.

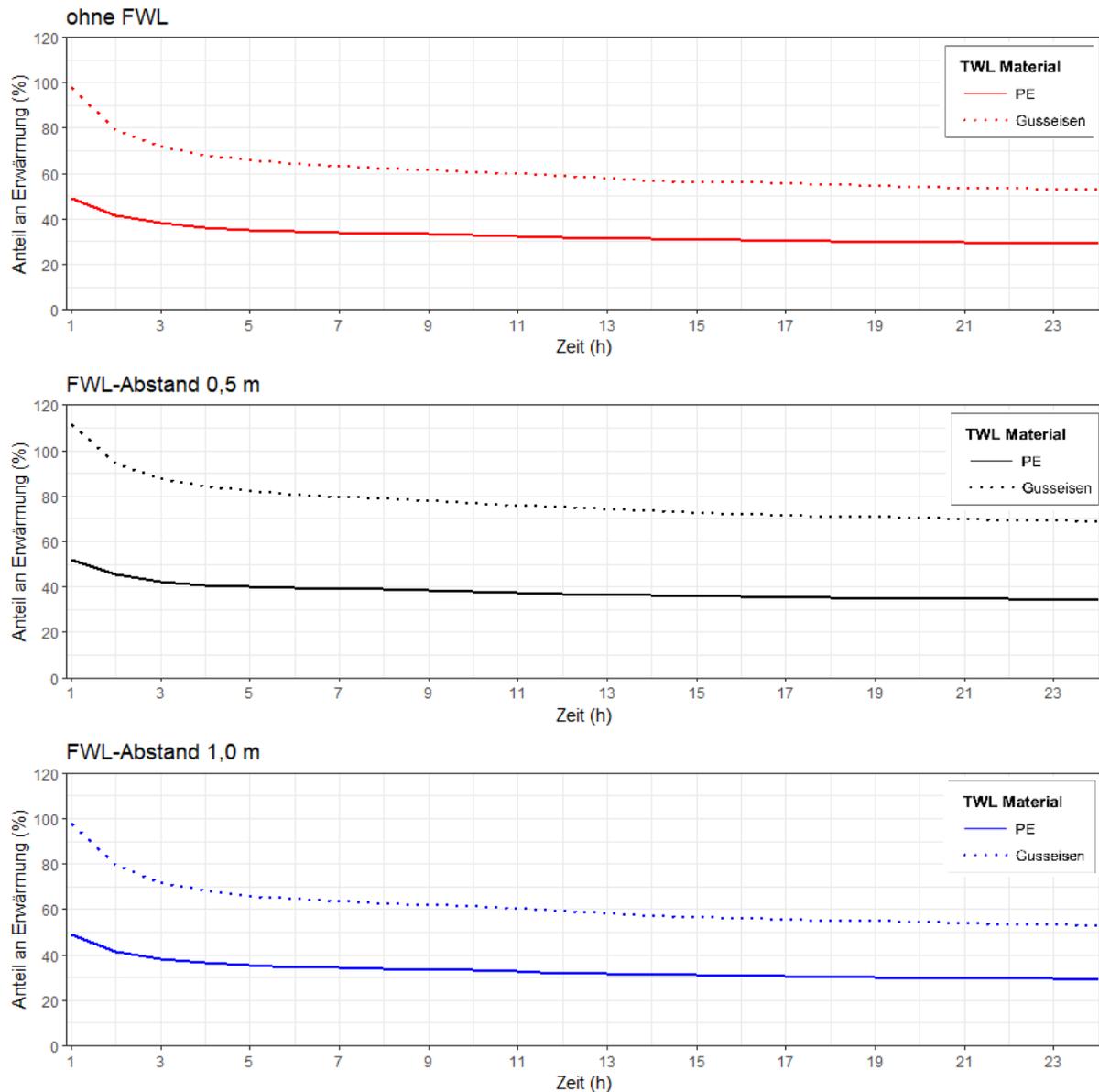


Abbildung 28: Anteil der TWL-Materialien an der Trinkwassererwärmung nach 900 m Fließstrecke

Der FWL-Abstand von 1,0 m erreicht leicht niedrigere Anteile als keine FWL. Nach einer Stunde beträgt der Anteil des Materials an der Erwärmung für PE 48,9% und sinkt nach 4 Stunden auf 36,4%. Zum Ende der Berechnung werden 29,1% erreicht. Der Anteil der

## Ergebnisse und Diskussion

gusseisernen TWL beginnt mit 97,8% nach einer Stunde und verringert sich nach 4 Stunden auf 37,8%. Nach 24 Stunden werden 52,8% erreicht.

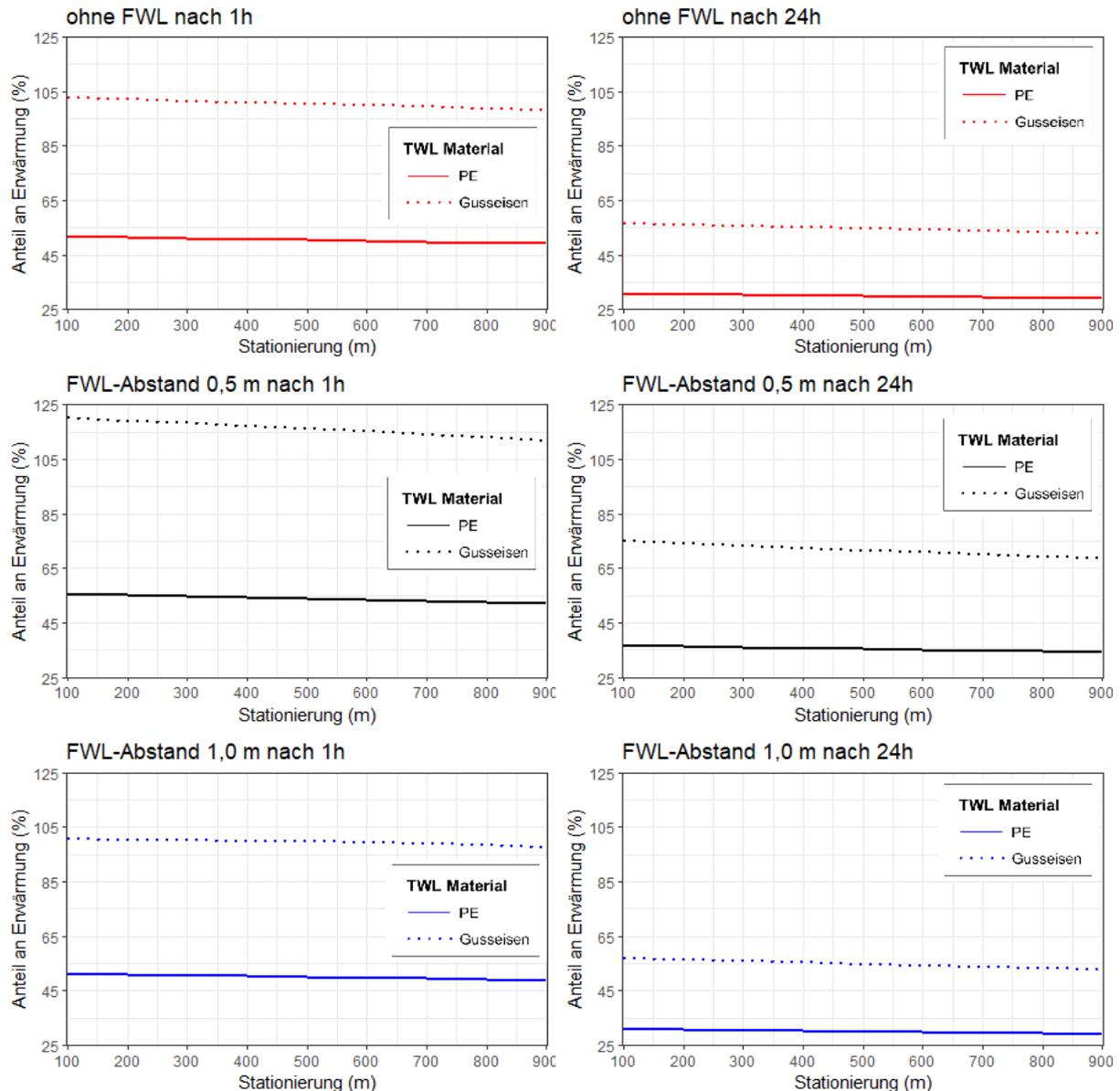


Abbildung 29: Anteil der TWL-Materialien an der Trinkwassererwärmung über die Fließstrecke

Die Unterschiede in den prozentuellen Anteilen an der Erwärmung des Trinkwassers lassen sich über die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der TWL erklären. Zu Beginn der Berechnungen besteht aufgrund des größeren Temperaturgradienten zwischen Trinkwasser und Boden ein hoher Wärmestrom in Richtung des Trinkwassers, der Anteil an der Erwärmung nimmt hohe Werte ein. Mit zunehmender Zeit verringert sich der Temperaturgradient und damit auch der Wärmestrom. Der Anteil nimmt ab. Bei gusseisernen TWL wird der Wärmestrom durch die hohe Wärmeleitfähigkeit verstärkt, was in einem höheren Anteil des Materials an der Erwärmung resultiert. Gleichzeitig beschleunigt die hohe Wärmeleitfähigkeit die Verringerung

des Temperaturgradienten, wie im Vergleich der Abbildung 24 und Abbildung 27 sichtbar wird. Infolgedessen sinkt der prozentuelle Anteil bei der gusseisernen TWL im Vergleich zur PE-TWL schneller.

In Abbildung 29 ist der Anteil der TWL-Materialien an der Trinkwassererwärmung entlang der Fließstrecke nach 1 und 24 Stunden abgebildet. Die prozentuellen Angaben beziehen sich auf den Temperaturunterschied zwischen der PE- bzw. gusseisernen TWL zur PVC-TWL mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit. Ohne FWL sinkt der Anteil für die PE-TWL nach einer Stunde von 51,83%, nach 100 m Fließstrecke, auf 49,15% nach 900 m Fließstrecke. Nach 24 Stunden erfolgt eine Abnahme von 30,93 auf 29,08%. Die gusseiserne TWL erreicht bei gleichem FWL-Abstand eine Reduzierung von 102,46 auf 98,19% in der ersten Stunde, nach 24 Stunden sinkt der Anteil von 56,55% auf 52,67%.

Beträgt der FWL-Abstand 0,5 m sinkt der Anteil an der Erwärmung für die PE-TWL nach einer Stunde von 55,55% auf 52,21%. Nach 24 Stunden sinkt der Anteil entlang der Fließstrecke von 36,67% auf 34,18%. Die gusseisernen TWL erreicht nach einer Stunde einen Anteil von 120,09% nach 100 m Fließstrecke, der sich nach 900 m auf 111,69% reduziert. Nach 24 Stunden liegt der Anteil bei 74,80% nach 100 m und verringert sich auf 68,55%.

Bei einem FWL-Abstand von 1,0 m erfolgt für die PE-TWL nach einer Stunde eine Reduzierung entlang der Fließstrecke von 51,22% auf 48,86. Nach 24 Stunden verringert sich der Anteil von 30,97 auf 29,15%. Für die gusseiserne TWL wird nach einer Stunde eine Verminderung des Anteils von 100,81% auf 97,75% erreicht, nach 24 Stunden liegt der Anteil nach 100 m Fließstrecke bei 56,67% und sinkt nach 900 m auf 52,84%.

Insgesamt zeigt sich, dass das TWL-Material einen großen Einfluss auf die Trinkwassererwärmung hat. Szenarien des Materials Gusseisen mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit erreichen die höchsten Wassertemperaturänderungen, die geringsten erfolgen jeweils in Szenarien mit dem TWL-Material der geringsten Wärmeleitfähigkeit, PVC.

Nach 900 m Fließstrecke und einer Stunde nach Beendigung der Stagnationsphase kommt es in Abhängigkeit vom FWL-Abstand für die gusseisernen TWL zu einer etwa doppelt so hohen Temperaturzunahme wie bei den TWL des Materials PVC. Nach 24 Stunden liegt die zusätzliche Erwärmung noch bei mehr als 50%. Die PE-TWL erreicht im gleichen Zeitraum gegenüber den PVC-TWL eine zusätzliche Erwärmung von etwa 50% nach einer Stunde und etwa 30% nach 24 Stunden. Somit lässt sich auch feststellen, dass der Einfluss des TWL-Materials an der Trinkwassererwärmung nach einer stationären Stagnationsphase mit der Zeit abnimmt. Entlang der Fließstrecke von 900 m erfolgt ebenso eine Reduzierung des Einflusses des TWL-Materials.

## 6 Interpretation

Die Qualität des Trinkwassers, insbesondere in Hinblick auf mikrobielles Wachstum, wird unter anderem durch die Wassertemperatur in Trinkwasserleitungen beeinflusst. Diese wiederum steht in Zusammenhang mit der umgebenden Bodentemperatur, die natürlichen Einflüssen wie der Sonneneinstrahlung sowie anthropogenen Einflüssen wie im Untergrund verbaute Wärmequellen unterliegt. Der erste Schritt zur Erreichung der festgelegten Ziele beinhaltet die Ermittlung und Festlegung von Werten ausgewählter Parameter. Anhand der schriftlichen Anfrage bei Wasser- und Energieversorgern konnte ein praxisnahes dreidimensionales Modell in OpenFOAM erstellt werden. Dabei mussten diverse Vereinfachungen getroffen werden, um die benötigte Rechenkapazität gering zu halten, deren Einfluss auf die Ergebnisse aufgrund der fehlenden Validierung schwer abzuschätzen sind. Besonders die Begrenzung des Modells auf 1.000 m Länge lässt nur begrenzt Rückschlüsse auf die Temperaturentwicklung bei längeren Verweilzeiten im System zu. Die Plausibilitätsprüfung lässt allerdings auf eine hohe Qualität der Ergebnisse schließen. Die softwareeigenen Verfahren zur Prüfung der Geometrie erzielten gute Resultate und beim Vergleich mit der Berechnungsart nach BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS (2013) wurden sehr geringe Abweichungen erzielt.

Nach Auswertung der berechneten Szenarien konnten folgende Schlüsse gezogen werden, die unterteilt werden in den Einfluss der Fernwärmleitung sowie jenen der Trinkwasserleitungsmaterialien:

### **Einfluss der Fernwärmeleitung**

1. Je näher eine Fernwärmleitung an einer Trinkwasserleitung liegt, desto stärker steigt die Trinkwassertemperatur an.
2. Die Erwärmung des Trinkwassers nimmt mit zunehmender Fließstrecke ab. Je näher die FWL an der TWL liegt, desto größer ist die Verlangsamung der Temperaturzunahme des Trinkwassers aufgrund des höheren Temperaturgradienten.
3. Tritt eine Stagnation des Trinkwassers auf, die in ihrer zeitlichen Länge einen stationären Zustand erzeugt, vermindert sich der Einfluss des Abstandes zwischen FWL und TWL im Vergleich zu einem nichtstagnierenden Betrieb.
4. Nach einer stationären Stagnationsphase führt ein FWL-Abstand von 1,0 m innerhalb von 24 Stunden zu keinem nennenswerten Anstieg der Trinkwassertemperatur, während ein Abstand von 0,5 m eine deutliche Erhöhung der Trinkwassertemperatur zur Folge hat.

VAN DEN BOS (2020) wertet Bodentemperaturmessungen um FWL aus. Mit zunehmender Distanz reduziert sich der Einfluss der FWL auf die Bodentemperatur exponentiell. Vor allem

aufgrund anderer Durchmesser der FWL sowie anderer bodenphysikalischer Eigenschaften der Messungen ist ein direkter Vergleich der Messergebnisse mit den in OpenFOAM berechneten Ergebnisse nicht möglich. Allerdings stimmt die relative Abnahme des Temperatureinfluss mit den berechneten Ergebnissen überein. Bei der Verdopplung des Abstandes von 0,5 m auf 1 m erfolgte, in Abhängigkeit des TWL-Materials, eine nicht-lineare Abnahme des Temperatureinflusses um das 5-9 fache.

### **Einfluss des Materials der Trinkwasserleitung**

1. Je höher die Wärmeleitfähigkeit der untersuchen TWL-Materialien ist, desto stärker erwärmt sich das Trinkwasser. Dabei erreicht in einem stationären Zustand nach 900m Fließstrecke eine PE-TWL eine im Vergleich zur PVC-TWL etwa 25% größere Temperaturerhöhung, während eine gusseiserne TWL eine etwa 40 – 50% größere Temperaturerhöhung bewirkt. Der Temperaturunterschied steigt mit zunehmender Fließstrecke weiter an, allerdings in kleiner werdenden Zuwachsraten.
2. In den Stunden nach einer stationären Stagnationsphase ist der Einfluss des Materials auf die Trinkwassertemperatur gegenüber einem stationären nichtstagnierenden Betrieb stark erhöht und nimmt mit der Zeit ab. Gusseisernen TWL erreichen nach 1 Stunden und 900 m Fließstrecke die etwa doppelte Temperaturzunahme als PVC-TWL, nach 24 Stunden noch etwa 50-70% mehr. PE-TWL erreichen nach 1 Stunde etwa eine 50% höhere Temperatursteigerung, die sich nach 24 Stunden auf etwa 30% reduziert.

AGUDELO-VERA et al. (2020) beschreiben als maßgebend für den Wärmetransfer zwischen Boden und TWL die Wärmeleitfähigkeit der Trinkwasserleitung. Des Weiteren benötigen TWL aus Kunststoff mehr Zeit um die umgebende Bodentemperatur zu erreichen, also solche aus Gusseisen (BLOKKER und PIETERSE-QUIRIJNS, 2013). Diese beiden Aussagen bestätigen sich in den Ergebnissen. Gusseisen mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit erreicht im selben Zeitraum die höchste Wassertemperatursteigerung, die niedrigste erfolgte bei PVC mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit. Somit ist davon auszugehen, dass bei längerer Verweilzeit in einer gusseisernen TWL, die Bodentemperatur schneller erreicht wird als in einer PVC-TWL.

### **Relevanz in der Praxis**

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der numerischen Simulation einen deutlichen Einfluss sowohl des Vorhandenseins und Abstandes einer FWL als auch des TWL-Materials auf die Trinkwassertemperatur. Dabei ist zu beachten, dass sich die Ergebnisse auf eine Fließstrecke von 900 m beziehen. In Anbetracht der Trinkwasserleitungslänge von mehreren Kilometern selbst für kleine Versorgungsgebiete ergeben sich in der Realität höhere Trinkwassertemperaturen als hier berechnet. Somit wirkt sich auch der Einfluss einer FWL auf

die Trinkwassertemperatur stärker aus, sofern diese über eine längere Strecke parallel zueinander verlaufen. Allerdings ist eine Hochrechnung der Ergebnisse auf eine längere Fließstrecke nicht zulässig. Mit zunehmender Fließstrecke und Verweilzeit reduziert sich der Temperaturgradient zwischen TWL und FWL, der Wärmeaustausch erfolgt in immer kleiner werdenden Raten. Auch werden in dem Modell gleichbleibende Eigenschaften wie Leitungsdurchmesser und Wasservolumina angenommen. In der Praxis ist mit einer Wasserentnahme durch Verbraucher sowie kleiner werdenden Leitungsdurchmessern zu rechnen. Diese wiederum resultieren in einem thermisch ungünstigeren Verhältnis zwischen dem Volumen des Wasserkörpers und der angrenzenden Fläche der Rohrwand.

Über die Anpassung des Abstandes zwischen FWL und TWL lässt sich eine Beeinflussung der Trinkwassertemperatur reduzieren. Auch die Wahl des TWL-Materials wirkt sich auf die Trinkwassertemperatur aus. Jedoch ist bei ausreichender Verweilzeit davon auszugehen, dass das Trinkwasser unabhängig vom TWL-Material die Bodentemperatur annimmt.

Die berechneten Szenarien geben einen Überblick, wie sich verschiedene TWL-Materialien sowie Fernwärmeabstände auf die Trinkwassertemperatur auswirken. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass Änderungen der Bodeneigenschaften und insbesondere Eigenschaften wie Durchmesser und Wassertemperatur der FWL einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Die Vergrößerung des Abstandes zwischen TWL und FWL erweist sich als einfache und kostengünstige Maßnahme, um den Anstieg von Trinkwassertemperaturen zu begrenzen. Voraussetzung ist eine gründliche städtebauliche Planung. Jedoch ist zu beachten, dass eine Fernwärmeleitung nur begrenzt Einfluss auf die Boden- und damit auf die Trinkwassertemperatur haben. Jahreszeitbedingte Schwankungen der Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung haben größere Auswirkungen auf die Bodentemperatur, darüber hinaus sind FWL nur eine von vielen anthropogenen Wärmequellen im Untergrund.

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

In den berechneten Szenarien zeigt sich der Einfluss einer FWL sowie verschiedener TWL-Materialien auf die Trinkwassertemperatur. Die Ergebnisse geben dabei insbesondere die Relation zwischen den verschiedenen Einflüssen auf die Trinkwassertemperatur wieder.

Im praktischen Betrieb ist in maßgeblichen Fällen einerseits mit höheren Leitungslängen wie auch mit längeren Verweilzeiten im Vergleich zu den vorliegenden Untersuchungen zu rechnen. Dadurch würde der Einfluss der TWL-Materialien sinken, da das Trinkwasser bei längerer Verweilzeit die Bodentemperatur annimmt. Auch nimmt der Einfluss der FWL bei längerer Verweilzeit des Trinkwassers ab.

Aufgrund des Klimawandels ist davon auszugehen, dass die Bodentemperaturen weiter steigen und insbesondere Hitzewellen stärker und länger anhalten werden. Somit steigt insbesondere in Sommermonaten in Zukunft die Trinkwassertemperaturen, mit negativen Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität. Entgegenwirkend dazu ist im urbanen Raum die zunehmende Gebäudehöhe, die je nach Exposition die Beschattung der angrenzenden Straßen verstärkt. Auch kann über Baumbepflanzung eine zusätzliche Beschattung der Straßen und damit des Bodenkörpers erfolgen, was allerdings in Konflikt mit geforderten Abständen zwischen Trinkwasserleitungen und Bepflanzung steht.

Dies wird durch die Zunahme von anthropogenen Wärmequellen besonders im urbanen Raum verstärkt, unter anderem findet ein Ausbau der Fernwärmeleitungen statt. Durch eine angepasste städtebauliche Planung ist es möglich den Einfluss von Fernwärmeleitungen auf die Trinkwassertemperatur zu verringern. Die Erhöhung des Abstandes stellt in den meisten Fällen eine kostengünstige Möglichkeit dar. Darüber hinaus könnte auch die Isolierung von Fernwärmeleitungen weiter verbessert werden. Neben einem positiven Einfluss auf die Trinkwassertemperatur würde dies gleichzeitig den ungewollten Energieverlust der Fernwärmeleitung reduzieren. Neben FWL können allerdings auch andere anthropogene Wärmequellen einen Einfluss auf die Trinkwassertemperatur haben. Bei Neuverlegung oder Austausch bestehender Trinkwasserleitungen kann auch über die Wahl des TWL-Materials ein Einfluss auf die Trinkwassertemperatur genommen werden.

Zur weiteren Bearbeitung der Thematik könnte das bestehende Modell erweitert werden. Interessant wäre eine Erweiterung um Wasserbedarfs- und Klimaszenarien sowie die räumliche Vergrößerung des untersuchten Leitungssystems. Die Validierung des Modells erfolgte analytisch, ein Vergleich mit einem Versuchsaufbau würde eine weitere Verbesserung ermöglichen. Über eine Erweiterung der anthropogenen Wärmequellen im Modell wie Stromleitungen oder U-Bahn-Tunnel können weitere Szenarien entwickelt werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- ABU-HAMDEH, N. H. (2003): Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosystems Engineering*, 86 (1), 97–102.
- AGUDELO-VERA, C., AVVEDIMENTO, S., BOXALL, J., CREACO, E., KATER, H., DI NARDO, A., DJUKIC, A., DOUTERELO, I., FISH, K., IGLESIAS REY, P., JACIMOVIC, N., JACOBS, H., KAPELAN, Z., MARTINEZ SOLANO, J., MONTOYA PACHONGO, C., PILLER, O., QUINTILIANI, C., RUČKA, J., TUHOVČÁK, L., BLOKKER, M. (2020): Drinking Water Temperature around the Globe: Understanding, Policies, Challenges and Opportunities. *Water*, 12(4), 1049–1068.
- AGUDELO-VERA, C., BLOKKER, M., VAN DER WIELEN, P. (2015): Drinking water temperature in future urban areas. KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- ALLION, A., LASSIAZ, S., PEGUET, L., BOILLOT, P., JACQUES, S., PEULTIER, J., BONNET, M.-C. (2011): A long term study on biofilm development in drinking water distribution system: comparison of stainless steel grades with commonly used materials. *Revue de Métallurgie*, 108(4), 259–268.
- BAEHR, H.D. AND STEPHAN, K. (2016): Wärme- und Stoffübertragung. 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- BENZ, S.A., BAYER, P., MENBERG, K., JUNG, S., BLUM, P. (2015): Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *The Science of the total environment*, 524–525, 427–439.
- BLOKKER, M., PIETERSE-QUIRIJNS, E.J. (2013): Modeling temperature in the drinking water distribution system. *American Water Works Association*, 105(1), 19–28.
- BLUME, H., BRÜMMER, G., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K., WILKE, B. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- BÜCHELE, R., HAAS, R., HARTNER, M., HIRNER, R., HUMMEL, M., KRANZL, L., MÜLLER, A., PONWEISER, K. (2015): Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung. Technische Universität Wien.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR SOZIALES, GESUNDHEIT, PFLEGE UND KONSUMENTENSCHUTZ (BMSGPK) (2019): Österreichisches Lebensmittelbuch, IV. Auflage, Codexkapitel / B 1 / Trinkwasser.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR SOZIALES, GESUNDHEIT, PFLEGE UND KONSUMENTENSCHUTZ (BMSGPK) (2022): Trinkwasserverordnung - TWV.
- BURKE, V., ROBINSON, J., GRACEY, M., PETERSON, D., PARTRIDGE, K. (1984): Isolation of *Aeromonas hydrophila* from a metropolitan water supply: seasonal correlation with clinical isolates. *Applied and environmental microbiology*, 48(2), 361–366.
- ÇENGEL, Y. A. (1998): Heat Transfer: A Practical Approach. McGraw-Hill, New York.
- CERMAK, V., BODRI, L., KRESL, M., DEDECEK, P., SAFANDA, J. (2017): Eleven years of ground-air temperature tracking over different land cover types. *International Journal of Climatology*, 37(2), 1084–1099.
- CFD SUPPORT, S. R. O. (CFD SUPPORT) (2022), meshQualityControls. Online im Internet: URL: <https://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node129.html> [Abruf 07.05.2022].

- EUROPEAN ASSOCIATION FOR DUCTILE IRON PIPE SYSTEMS/FACHGEMEINSCHAFT GUSS-ROHRSYSTEME E. V. (EADIPS) (2017): Guss-Rohrsysteme: Rohre, Formstücke und Armaturen aus duktilem Gusseisen. Schneider Media GmbH, Erfurt.
- FERGUSON, G., WOODBURY, A.D. (2007): Urban heat island in the subsurface. *Geophysical Research Letters*, 34(23).
- FERZIGER, J., PERIC, M. (2008): *Numerische Strömungsmechanik*. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- FLEMMING, H.-C., PERCIVAL, S.L., WALKER, J.T. (2002): Contamination potential of biofilms in water distribution systems. *Water Supply*, 2(1), 271–280.
- GEIGER, R. (1962): *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie, 1. Auflage, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- GHAIB, K. (2019): *Einführung in die numerische Strömungsmechanik*. 1. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden.
- GROBE, S., WAGNER, J., WINGENDER, J. (2014): Sicherung der Trinkwasserqualität bei der Wasserverteilung bei veränderten Bodentemperaturen, Mülheim an der Ruhr, *dynaklim-Publikation*, 52.
- GROBE, S., WINGENDER, J. (2011): Mikrobiologische Trinkwasserqualität in der Wasserverteilung bei veränderten Temperaturen aufgrund des Klimawandels, Mülheim an der Ruhr, *dynaklim-Kompaktpublikation*, 7.
- HERING, E., MARTIN, R., STOHRER, M. (2016): *Physik für Ingenieure*. 12. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- HERWIG, H., MOSCHALLSKI, A. (2014): *Wärmeübertragung*. 3. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden.
- HILLEL, D.I. (1982): *Introduction to soil physics*. 1. Auflage, Elsevier, Cambridge.
- ISOPLUS FERNWÄRMETECHNIK VERTRIEBSGESELLSCHAFT MBH (ISOPLUS) (2011): *Planungshandbuch Kapitel 2 - Starre Verbundsysteme*. Online im Internet: URL: <https://www.isoplus.de/download/planungshandbuch.html> [Abruf 07.05.2022].
- MENBERG, K., BAYER, P., ZOSSEDER, K., RUMOHR, S., BLUM, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. *The Science of the total environment*, 442, 123–133.
- MEISS, M. (1968): *Vergleichende Darstellung von meteorologischen Meßergebnissen und Wärmehaushaltsuntersuchungen an drei unterschiedlichen Standorten in Norddeutschland*. Institut für Meteorologie und Klimatologie, Technische Universität Hannover, Hannover.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (MUVBW) (2004): *Leitlinie zur Festlegung der Überdeckungen von Trinkwasserleitungen in Baden-Württemberg*. Stuttgart.
- MOORE, B., NABHANI, F., ASKARI, V. (2017): Sensitivity analysis of spray painting process to input parameters: Validation of CFD jet impingement model against an experimental dataset. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 47, 11–16.
- MÜLLER, N., KUTTLER, W., BARLAG, A.B. (2014): Analysis of the subsurface urban heat island in Oberhausen, Germany. *Climate Research*, 58(3), 247–256.
- NOFZIGER, D.L., WU, J. (2003): *Soil Temperature Variations with Time and Depth*. Online im Internet: URL: <http://soilphysics.okstate.edu/software/SoilTemperature/document.pdf> [Abruf 07.05.2022].

- NIKIFOROVA, T., SAVYTSKYI, M., LIMAM, K., BOSSCHAERTS, W., BELARBI, R. (2013): Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils. *Energy Procedia*, 42 (2013), 775-783.
- NOVAKOVA, J., RUCKA, J. (2019): Undesirable consequences of increased water temperature in drinking water distribution system. *MM Science Journal*, 2019(5), 3695–3701.
- ÖNORM B 2533 (2021): Koordinierung unterirdischer Einbauten – Planungsrichtlinien. Austrian Standards International.
- ÖNORM B 2538 (2018): Wasserversorgung – Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden – Ergänzende Bestimmungen zu ÖNORM EN 805. Austrian Standards International.
- PIPELIFE AUSTRIA GMBH & CO KG (PIPELIFE) (2021), 100PN10 Datenblatt. Online im Internet: <https://partner.pipelife.at/pipelifeAT/de/EUR/Infrastruktur/Trinkwasser/PVC-Druckrohrsystem/MA-PN-10/p/1595000412> [Abruf 07.05.2022]. URL:
- PREST, E.I., HAMMES, F., VAN LOOSDRECHT, M.C.M., VROUWENVELDER, J.S. (2016): Biological Stability of Drinking Water: Controlling Factors, Methods, and Challenges. *Frontiers in microbiology*, 7, 45.
- RANKE, U. (2019): *Klima und Umweltpolitik*. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- SCHÖNHER, C., KERSCHBAUMER, D., PROKSCH, P., PERFLER, R. (2020): Trinkwasserbefunde – Auswertung langjähriger Daten der Trinkwassertemperatur und mikrobiologischer Parameter mit Indikatorfunktion. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(11-12), 452–463.
- SCHWARZE, R. (2013): *CFD-Modellierung*. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- STADT WIEN (2022): Lufttemperatur März 2020 bis März 2022, Online im Internet: URL: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/lufttemperatur.html> [Abruf 07.05.2022].
- STEPHAN, P., KABELAC, S., KIND, M., MARTIN, H., MEWES, D., SCHABER, K., STEPHAN, P. (2013): *VDI-Wärmeatlas*. 11. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- SUN, H., SHI, B., LYTLE, D.A., BAI, Y., WANG, D. (2014): Formation and release behavior of iron corrosion products under the influence of bacterial communities in a simulated water distribution system. *Environmental science: Processes & Impacts*, 16(3), 576–585.
- TAKEBAYASHI, H., MORIYAMA, M. (2012): Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 1–11.
- VAN DEN BOS, L. (2020): Quantifying the effects of anthropogenic heat sources on the water temperature in the drinking water distribution system. Delft University of Technology.
- VAN DER KOOIJ, D. (2013): Microbial Growth in Drinking-Water Supplies: Problems, Causes, Control and Research Needs. *Water Intelligence Online*, 12.
- VAN DER ZWAN, S., BLOKKER, M., AGUDELO-VERA, C., NUGROHO, D. (2020): The influence of subsurface heat sources on the drinking water temperature. KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- VITAL, M., HAMMES, F., EGLI, T. (2012): Competition of *Escherichia coli* O157 with a drinking water bacterial community at low nutrient concentrations. *Water research*, 46(19), 6279–6290.

## Literaturverzeichnis

WHO (2017): Guidelines for drinking-water quality, 4. Auflage, World Health Organization, Genf.

# Anhang I

## 9 Anhang

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ / F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n   | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / A n d               | Version:   8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       alphas;
}
// *****
//

dimensions      [1 -1 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    outlet
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    walls
    {
        type      compressible::alphatJayatillekeWallFunction;
        Prt       0.85;
        value     $internalField;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type      compressible::alphatJayatillekeWallFunction;
        Prt       0.85;
        value     $internalField;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
=====
  \ \ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / A n d           | Version:   8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/fluid";
    object       cellToRegion;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type          zeroGradient;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
  \ \ / A n d | Version: 8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       epsilon;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];

internalField   uniform 0.01;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 0.01;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
    walls
    {
        type      epsilonWallFunction;
        value     uniform 0.5;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type      epsilonWallFunction;
        value     uniform 0.5;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
=====
  \ \ / F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n   | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / A n d               | Version:   8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/fluid";
    object       I;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 0.057735026919;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0.057735026919;
    }
    outlet
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0.057735026919;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type          calculated;
        value         uniform 1;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
===== |
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
\\      / A nd        | Version:   8
  \\    / M anipulation |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       k;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0.005;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform 0.005;
    }
    outlet
    {
        type          zeroGradient;
    }
    walls
    {
        type          kqRWallFunction;
        value          uniform 0.01;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type          kqRWallFunction;
        value          uniform 0.01;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ / F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n   | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / A n d               | Version:   8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       nut;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    outlet
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    walls
    {
        type      nutkWallFunction;
        value     uniform 0;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type      nutkWallFunction;
        value     uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
=====
  \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
  \ \ / A n d | Version: 8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    ".*"
    {
        type      calculated;
        value      $internalField;
    }

    fluid_to_pipewall
    {
        type      fixedFluxPressure;
        value      uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
===== |
\\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
\\      / A n d           | Version:   8
  \\    / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p_rgh;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedFluxPressure;
        value         uniform 0;
    }

    outlet
    {
    }

    walls
    {
        type          fixedFluxPressure;
        value         uniform 0;
    }

    fluid_to_pipewall
    {
        type          fixedFluxPressure;
        value         uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
===== |
\\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
\\      / A n d           | Version: 8
  \\    / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       T;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];

internalField uniform 283.15;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedValue;
        value uniform 283.15;
    }

    outlet
    {
        type          zeroGradient;
        value          $internalField;
    }

    fluid_to_pipewall
    {
        type
compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        value          $internalField;
        Tnbr           T;
        kappaMethod    fluidThermo;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
===== |
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
\\      / A nd        | Version:   8
  \\    / M anipulation |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 1);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform (0 0 1);
    }

    outlet
    {
        type          zeroGradient;
    }

    walls
    {
        type          noSlip;
    }

    fluid_to_pipewall
    {
        type          noSlip;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / A n d           | Version:   8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/fluid";
    object       wallHeatFlux;
}
// *****
//

dimensions      [1 0 -3 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    outlet
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    fluid_to_pipewall
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
=====
  \ \ / F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n   | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / A n d               | Version:   8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/pipewall";
    object       cellToRegion;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 1;

boundaryField
{
    walls
    {
        type          zeroGradient;
    }
    pipewall_to_fluid
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
    pipewall_to_soil_1
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \ \      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \      / O p e r a t i o n      | Version:  3.0.0
| \ \      / A n d      | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ /      M a n i p u l a t i o n      |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/pipewall";
    object       p;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [ 1 -1 -2 0 0 0 0 ];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    pipewall_to_fluid
    {
        type          calculated;
        value          $internalField;
    }
    walls
    {
        type          calculated;
        value          $internalField;
    }
    pipewall_to_soil_1
    {
        type          calculated;
        value          $internalField;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \ \      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \      / O p e r a t i o n | Version: 3.0.0
| \ \      / A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ /      M a n i p u l a t i o n |
|
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/pipewall";
    object       T;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [ 0 0 0 1 0 0 0 ];

internalField uniform 287.6;

boundaryField
{
    pipewall_to_fluid
    {
        type
compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        value          $internalField;
        Tnbr           T;
        kappaMethod    solidThermo;
    }
    walls
    {
        type          zeroGradient;
        value          $internalField;
    }
    pipewall_to_soil_1
    {
        type
compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        value          $internalField;
        Tnbr           T;
        kappaMethod    solidThermo;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \\      /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \\      /  O p e r a t i o n  | Website:  https://openfoam.org
  \\      /  A n d              | Version:   8
  \\\     /  M a n i p u l a t i o n  |
\*-----*/
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/soil_1";
    object       cellToRegion;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 2;

boundaryField
{
    surface
    {
        type          zeroGradient;
    }
    bottom_sides
    {
        type          zeroGradient;
    }
    bottom
    {
        type          zeroGradient;
    }
    walls
    {
        type          zeroGradient;
    }
    soil_1_to_pipewall
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \ \      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \      / O p e r a t i o n      | Version: 3.0.0
| \ \      / A n d      | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ /      M a n i p u l a t i o n      |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/pipewall";
    object       p;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [ 1 -1 -2 0 0 0 0 ];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    soil_1_to_pipewall
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    walls
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    surface
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    bottom_sides
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    bottom
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
}
}
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \ \      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \      / O p e r a t i o n      | Version: 3.0.0
| \ \      / A n d      | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ /      M a n i p u l a t i o n      |
|-----*\
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/pipewall";
    object       T;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [ 0 0 0 1 0 0 0 ];

internalField uniform 287.6;

boundaryField
{
    soil_1_to_pipewall
    {
        type
compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        value      $internalField;
        Tnbr       T;
        kappaMethod solidThermo;
    }
    walls
    {
        type      zeroGradient;
        value     $internalField;
    }
    surface
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 287.6;
    }
    bottom_sides
    {
        type      zeroGradient;
        value     $internalField;
    }
    bottom
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 287.55;
    }
}
}
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
=====
  \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
  \ \ / A n d | Version: 8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        uniformDimensionedVectorField;
    location     "constant";
    object       g;
}
// * * * * *
* * //

dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 -9.81 0);

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
===== |
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
\\      / A nd        | Version:   8
  \\//  M anipulation |
\*-----
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       thermophysicalProperties;
}
// * * * * *
* * //

thermoType
{
    type          heRhoThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport     const;
    thermo        hConst;
    equationOfState Boussinesq;
    specie        specie;
    energy        sensibleInternalEnergy;
}

mixture
{
    specie
    {
        nMoles      1;
        molWeight   18;
    }
    equationOfState
    {
        rho0        999.7;
        T0          283.15;
        beta        0.000088;
    }
    thermodynamics
    {
        //Cv        4.1796;
        Cp          4192;
        Hf          0;
    }
    transport
    {
        mu          0.001306;
        Pr          7.048;
    }
}
}
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \\      / O p e r a t i o n      | Version:  2.1.x
| \\      / A n d      | Web:      www.OpenFOAM.org
|  \\/      M a n i p u l a t i o n      |
|
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format      ascii;
    class      dictionary;
    object      turbulenceProperties;
}
// * * * * *
* * //

simulationType RAS;

RAS
{
    RASModel      kEpsilon;

    turbulence      on;

    printCoeffs      on;
}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \ \      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \      / O p e r a t i o n | Version: 2.2.2
| \ \      / A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ /      M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       radiationProperties;
}
// * * * * *
* * //

radiationModel none;

absorptionEmissionModel constantAbsorptionEmission;

constantAbsorptionEmissionCoeffs
{
    absorptivity      absorptivity [ 0 -1 0 0 0 0 0 ] 0.0;
    emissivity        emissivity [ 0 -1 0 0 0 0 0 ] 0.1;
    E                  E [ 1 -1 -3 0 0 0 0 ] 0;
}

scatterModel none;

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \\      / O p e r a t i o n      | Version:  2.1.x
| \\      / A n d      | Web:      www.OpenFOAM.org
|  \\/      M a n i p u l a t i o n      |
|
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format      ascii;
    class      dictionary;
    object      solidThermophysicalProperties;
}
// * * * * *
* * //

thermoType
{
    type      heSolidThermo;
    mixture      pureMixture;
    transport      constIso;
    thermo      eConst;
    equationOfState      rhoConst;
    specie      specie;
    energy      sensibleInternalEnergy;
}

mixture
{
    specie
    {
        nMoles      1;
        molWeight      1;
    }

    transport
    {
        kappa 0.5;
    }

    thermodynamics
    {
        Hf      0;
        Cv      1800;
    }

    equationOfState
    {
        rho      980;
    }
}
}
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \\      / O p e r a t i o n      | Version: 2.2.2
| \\      / A n d      | Web:      www.OpenFOAM.org
|  \\/      M a n i p u l a t i o n      |
|
\*-----*
----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format      ascii;
    class      dictionary;
    location    "constant";
    object      radiationProperties;
}
// * * * * *
* * //

radiationModel none;

absorptionEmissionModel constantAbsorptionEmission;

constantAbsorptionEmissionCoeffs
{
    absorptivity      absorptivity [ 0 -1 0 0 0 0 0 ] 0.0;
    emissivity        emissivity [ 0 -1 0 0 0 0 0 ] 0.1;
    E                  E [ 1 -1 -3 0 0 0 0 ] 0;
}

scatterModel none;

//
*****
//
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
  \\    / A nd        | Version:   8
   \\  / M anipulation |
\*-----*-/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       decomposeParDict;
}
// ***** //
numberOfSubdomains 6;

method          scotch;

// ***** //
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      /   F i e l d           |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /   O peration          |   Website:  https://openfoam.org
  \\    /   A nd                 |   Version:   7
   \\    /   M anipulation       |
/*-----*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSchemes;
}
// * * * * *

ddtSchemes
{
    default      steadyState; // Euler steadyState
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;

    div(phi,U)   Gauss upwind;
    div(phi,e)   Gauss upwind;

    div(phi,k)   Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;

    div(phi,v,p) Gauss linear;
    div(phi,K)   Gauss linear;

    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      corrected;
}
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /  O peration  | Website:  https://openfoam.org
\\      /  A nd        | Version:   7
  \\    /  M anipulation|
/*-----*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSolution;
}
// * * * * *

solvers
{
    "rho.*"
    {
        solver      diagonal;
    }

    p_rgh
    {
        solver      PCG;
        preconditioner DIC;
        tolerance   1e-8;
        relTol      0.01;
    }

    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        relTol      0;
    }

    "(U|e|k|epsilon)"
    {
        solver      PBiCGStab;
        preconditioner DILU;
        tolerance   1e-6;
        relTol      0.1;
    }

    "(U|e|k|epsilon)Final"
    {
        $U;
        relTol      0;
    }
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor yes;
    nOuterCorrectors 1;
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}
```

## Anhang I

```
pRefCell      0;
pRefValue     0;

outerCorrectorResidualControl
{
    p_rgh
    {
        tolerance 1e-3;
        relTol 0;
    }
}

relaxationFactors
{
    equations
    {
        U          0.5; // could still be relaxed ???
        "(h|e)"    0.5; // could still be relaxed ???
        k          0.5; // could still be relaxed ???
        epsilon    0.5; // could still be relaxed ???
    }
}

// ***** //
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
  \\    / A nd        | Version:   6
   \\  / M anipulation|
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      steadyState; // Euler steadyState
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;
}

laplacianSchemes
{
    default      none;
    laplacian(alpha,e) Gauss linear uncorrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      uncorrected;
}

// *****
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      /   F i e l d           |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /   O peration          |   Website:  https://openfoam.org
\\      /   A nd                 |   Version:   6
  \\    /   M anipulation       |
/*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// *****

solvers
{
    e
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0.1;
    }

    eFinal
    {
        $e;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0;
    }
}

PIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    outerCorrectorResidualControl
    {
        e
        {
            tolerance 1e-5;
            relTol 0;
        }
    }
}

relaxationFactors
{
    equations
    {
        "e.*"          1;
    }
}

// *****
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
  \\    / A nd        | Version:   8
   \\   / M anipulation|
\*-----*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       decomposeParDict;
}
// ***** //
numberOfSubdomains 6;

method          scotch;

// ***** //
```



# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      /   F i e l d           |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /   O peration          |   Website:  https://openfoam.org
\\      /   A nd                 |   Version:   6
  \\    /   M anipulation       |
/*-----*- C++ -*-----*\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// *****

solvers
{
    e
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0.1;
    }

    eFinal
    {
        $e;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0;
    }
}

PIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    outerCorrectorResidualControl
    {
        e
        {
            tolerance 1e-5;
            relTol 0;
        }
    }
}

relaxationFactors
{
    equations
    {
        "e.*"          1;
    }
}

// *****
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
  \\    / A nd        | Version:   6
   \\  / M anipulation |
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      steadyState; // Euler steadyState
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;
}

laplacianSchemes
{
    default      none;
    laplacian(alpha,e) Gauss linear uncorrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      uncorrected;
}

// *****
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \\      / O peration  | Version: 2.1.1
|  \\    / A nd         | Web:      www.OpenFOAM.org
|   \\/   M anipulation |
|
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// * * * * *
* * //

convertToMeters 1; // m

//
// VARIABLES
//

// coo -> coordinate
// d -> dimension
// r -> radial
// a -> axial
// p -> pipe
// w -> wall
// s -> soil
// dfv -> dimension factor for vertices
// dfe -> dimension factor for edge points
// mr -> mesh resolution
// mg -> mesh grading

// x -> horizontal dimension (gravity)
// y -> vertical dimension (gravity)
// z -> axial dimension (pipe)

coo_p_x 0;
coo_p_y 0;
coo_p_z 0;
```

## Anhang I

```
d_p_pfw_real 1.055; // Abstand pipe - pipe fw horizontal +
d_sl_t 1.4; // lichte Überdeckung vertikal pipe
//d_s2_t 2.59; // lichte Überdeckung vertikal pipe fw
// center PIPE

d_p_r 0.05; // inner pipe radius
d_p_l 1000; // length

dfv_p_r_1 0.6; // inner core to middle core
dfe_p_r_1 0.55;
dfv_p_r_2 0.9; // middle core (core 2) to boundary layer
dfe_p_r_2 0.9;

mr_p_c 10; // mesh resolution circumference (also defines inner core)
mr_p_r_1 3; // mesh resolution radial direction (core 2)
mr_p_r_2 2; // mesh resolution radial direction (boundary layer)
mr_p_a 100; // mesh resolution axial direction

mg_p_r_1 0.45; // mesh grading radial direction (core 2)
mg_p_r_2 1.2; // mesh grading radial direction (boundary layer)
mg_p_a 1; // mesh grading axial direction

// inlet PIPE

d_pi_l 10; // length
mr_pi_a 2; // mesh resolution axial direction
mg_pi_a 1; // mesh grading axial direction

// outlet PIPE

d_po_l 10; // length
mr_po_a 2; // mesh resolution axial direction
mg_po_a 1; // mesh grading axial direction

// PIPE WALL

d_plw_t 0.005; // pipe wall thickness
mr_plw_r 1; // mesh resolution radial direction
mg_plw_r 1; // mesh grading radial direction

// Fernwärmerohr

// center PIPE FW

d_pfw_r 0.05; // inner pipe radius

// PIPE WALL FW

d_pfw_w_t 0.1; // pipe wall thickness

// Rest wie pipe
```

## Anhang I

```
// SOIL 1 (around pipe)

d_p_pfw #calc "$d_p_pfw_real + $d_pfw_r + $d_pfw_w_t";
d_s1_t_b 1.545; // vertikaler Abstand Rohr Unterseite - Bottom

d_s1_xplus #calc "$d_p_pfw_real*0.5"; // horizontaler Abstand
Rohraußenseite - Begrenzung soil x+
d_s1_xminus 2; // horizontaler Abstand Rohraußenseite - Begrenzung
soil x-
d_s2_xplus 2.1; // horizontaler Abstand Ende soil1 (Mitte) - Ende soil2
(x+) SOIL 2 (around pipe_fw)
mr_s1_r 30; // mesh resolution radial direction
mg_s1_r 0.8; // mesh grading radial direction
mr_s_c $mr_p_c; // mesh resolution circumference (also defines inner
core)

d_pl_licht #calc "$d_s1_t + $d_plw_t + $d_p_r"; // lichte
Überdeckung + Rohrradius
//d_pfw_licht #calc "$d_s2_t + $d_pfw_w_t + $d_pfw_r"; // lichte
Überdeckung + Rohrradius

//
// VERTICES LIST
//

vertices
(
    // central pipe

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
$coo_p_z) // 0
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
$coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
$coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
$coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
$coo_p_z) // 4
```

```

    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
$coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
$coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
$coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" $coo_p_z) // 8
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" $coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" $coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" $coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") // 12
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") // 16
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_1") //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_z +
$d_p_1") // 20
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_z +
$d_p_1") //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_z +
$d_p_1") //

```

```

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_z +
$d_p_l") //

    // inlet pipe

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" // 24
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" // 28
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_z + (-
1*$d_pi_l)" // 32
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_z + (-
1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_z + (-
1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_z + (-
1*$d_pi_l)" //

    // outlet pipe

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" // 36
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //

```

```

    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" // 40
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_z +
($d_p_l + $d_po_l)" // 44
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_z +
($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_z +
($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r * sin(degToRad(45.0))))" #calc
"$coo_p_y + ($d_p_r * sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_z +
($d_p_l + $d_po_l)" //

    // pipe wall

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" $coo_p_z)
// 48
    (#calc "$coo_p_x + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" $coo_p_z)
//
    (#calc "$coo_p_x + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" $coo_p_z)
//
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" $coo_p_z)
//

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l)" // 52
    (#calc "$coo_p_x + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l)" //

```

```

    (#calc "$coo_p_x + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (($d_p_r+$d_plw_t) * sin(degToRad(45.0)))" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l") //

// soil 1

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xminus))" #calc
"$coo_p_y - $d_s1_t_b" $coo_p_z) // 56
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xplus)" #calc "$coo_p_y
- $d_s1_t_b" $coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xplus)" #calc "$coo_p_y
+ $d_p1_licht" $coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xminus))" #calc
"$coo_p_y + $d_p1_licht" $coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xminus))" #calc
"$coo_p_y - $d_s1_t_b" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") // 60
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xplus)" #calc "$coo_p_y
- $d_s1_t_b" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xplus)" #calc "$coo_p_y
+ $d_p1_licht" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + (-1*($d_p_r+$d_plw_t+$d_s1_xminus))" #calc
"$coo_p_y + $d_p1_licht" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //

// soil 2 (x+ neben soil 1)

    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t) + $d_s2_xplus + $d_p_pfw"
#calc "$coo_p_y - $d_s1_t_b" $coo_p_z) // 64
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t) + $d_s2_xplus + $d_p_pfw"
#calc "$coo_p_y + $d_p1_licht" $coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t) + $d_s2_xplus + $d_p_pfw"
#calc "$coo_p_y - $d_s1_t_b" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + ($d_p_r+$d_plw_t) + $d_s2_xplus + $d_p_pfw"
#calc "$coo_p_y + $d_p1_licht" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //

// dummy points
    (#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z) // 68
    (#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)

    (#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z) //70
    (#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)
    (#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)

```

```

(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)
(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)
(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z) //80
(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)
(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z) //90
(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z)
(#calc "$coo_p_x+1000" #calc "$coo_p_y+1000" $coo_p_z) //99

// central pipe fw

(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" $coo_p_z) // 100
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" $coo_p_z) //
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //

(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" $coo_p_z) // 104
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" $coo_p_z) //
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //

(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405"
$coo_p_z) // 108

```

```

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*( $d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405"
$coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405"
$coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405"
$coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") // 112
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") // 116
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l") // 120
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l") //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc
"$coo_p_z + $d_p_l") //

// inlet pipe fw

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" // 124

```

```

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" // 128
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" // 132
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc
"$coo_p_z + (-1*$d_pi_l)" //

    // outlet pipe fw

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
136
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)"
//
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_1 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)"
//

```

```

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
140
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r
* sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)"
//
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0))))" #calc "$coo_p_y + ($dfv_p_r_2 * $d_pfw_r *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)"
//

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" // 144
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))-0.405" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0))))"
#calc "$coo_p_y + ($d_pfw_r * sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc
"$coo_p_z + ($d_p_l + $d_po_l)" //

// pipe wall fw

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) // 148
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" $coo_p_z) //

    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l)" // 152
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l)" //
    (#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l)" //

```

## Anhang I

```
(#calc "$coo_p_x + $d_p_pfw + (-1*($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))" #calc "$coo_p_y + (($d_pfw_r+$d_pfw_w_t) *
sin(degToRad(45.0)))-0.405" #calc "$coo_p_z + $d_p_l") //

);

//
// BLOCKS
//

blocks
(
    // central pipe core 1
    hex (0 1 2 3 12 13 14 15) fluid ($mr_p_c $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading (1 1 $mg_p_a)

    // central pipe core 2
    hex (0 4 5 1 12 16 17 13) fluid ($mr_p_r_1 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)
    hex (2 6 7 3 14 18 19 15) fluid ($mr_p_r_1 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)
    hex (1 5 6 2 13 17 18 14) fluid ($mr_p_r_1 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)
    hex (3 7 4 0 15 19 16 12) fluid ($mr_p_r_1 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a) //4

    // central pipe boundary Layer
    hex (9 5 4 8 21 17 16 20) fluid ($mr_p_r_2 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)
    hex (11 7 6 10 23 19 18 22) fluid ($mr_p_r_2 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)
    hex (10 6 5 9 22 18 17 21) fluid ($mr_p_r_2 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)
    hex (8 4 7 11 20 16 19 23) fluid ($mr_p_r_2 $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a) //8

    // pipe wall
    hex (49 9 8 48 53 21 20 52) pipewall ($mr_plw_r $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
    hex (51 11 10 50 55 23 22 54) pipewall ($mr_plw_r $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
    hex (50 10 9 49 54 22 21 53) pipewall ($mr_plw_r $mr_p_c $mr_p_a)
    simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
```

## Anhang I

```
hex (48 8 11 51 52 20 23 55) pipewall ($mr_plw_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a) //12

// soil 1
hex (57 49 48 56 61 53 52 60) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a)
hex (59 51 50 58 63 55 54 62) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a)
hex (58 50 49 57 62 54 53 61) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a)
hex (56 48 51 59 60 52 55 63) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a) //16

// soil 2
hex (64 149 148 57 66 153 152 61) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a)
hex (58 151 150 65 62 155 154 67) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a)
hex (65 150 149 64 67 154 153 66) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a)
hex (57 148 151 58 61 152 155 62) soil_1 ($mr_sl_r $mr_p_c $mr_p_a)
simpleGrading ($mg_sl_r 1 $mg_p_a) //16

// central pipe core 1
hex (100 101 102 103 112 113 114 115) soil_1 ($mr_p_c $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading (1 1 $mg_p_a)

// central pipe core 2
hex (100 104 105 101 112 116 117 113) soil_1 ($mr_p_r_1 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)
hex (102 106 107 103 114 118 119 115) soil_1 ($mr_p_r_1 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)
hex (101 105 106 102 113 117 118 114) soil_1 ($mr_p_r_1 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)
hex (103 107 104 100 115 119 116 112) soil_1 ($mr_p_r_1 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_1 1 $mg_p_a)

// central pipe boundary Layer
hex (109 105 104 108 121 117 116 120) soil_1 ($mr_p_r_2 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)
hex (111 107 106 110 123 119 118 122) soil_1 ($mr_p_r_2 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)
hex (110 106 105 109 122 118 117 121) soil_1 ($mr_p_r_2 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)
hex (108 104 107 111 120 116 119 123) soil_1 ($mr_p_r_2 $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_p_r_2 1 $mg_p_a)

// pipe wall
```

## Anhang I

```
hex (149 109 108 148 153 121 120 152) soil_1 ($mr_plw_r $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
hex (151 111 110 150 155 123 122 154) soil_1 ($mr_plw_r $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
hex (150 110 109 149 154 122 121 153) soil_1 ($mr_plw_r $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
hex (148 108 111 151 152 120 123 155) soil_1 ($mr_plw_r $mr_p_c
$mr_p_a) simpleGrading ($mg_plw_r 1 $mg_p_a)
);

//
// edges
//

edges
(
    // central pipe

    arc 0 1 ($coo_p_x #calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_p_r" $coo_p_z)
    arc 1 2 (#calc "$dfe_p_r_1 * $d_p_r" $coo_p_y $coo_p_z)
    arc 2 3 ($coo_p_x #calc "$dfe_p_r_1 * $d_p_r" $coo_p_z)
    arc 3 0 (#calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_p_r" $coo_p_y $coo_p_z)

    arc 4 5 ($coo_p_x #calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_p_r" $coo_p_z)
    arc 5 6 (#calc "$dfe_p_r_2 * $d_p_r" $coo_p_y $coo_p_z)
    arc 6 7 ($coo_p_x #calc "$dfe_p_r_2 * $d_p_r" $coo_p_z)
    arc 7 4 (#calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_p_r" $coo_p_y $coo_p_z)

    arc 8 9 ($coo_p_x #calc "-1*$d_p_r" $coo_p_z)
    arc 9 10 (#calc "$d_p_r" $coo_p_y $coo_p_z)
    arc 10 11 ($coo_p_x #calc "$d_p_r" $coo_p_z)
    arc 11 8 (#calc "-1*$d_p_r" $coo_p_y $coo_p_z)

    arc 12 13 ($coo_p_x #calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_p_r" #calc "$coo_p_z
+ $d_p_l")
    arc 13 14 (#calc "$dfe_p_r_1 * $d_p_r" $coo_p_y #calc
"$coo_p_z + $d_p_l")
    arc 14 15 ($coo_p_x #calc "$dfe_p_r_1 * $d_p_r" #calc "$coo_p_z
+ $d_p_l")
    arc 15 12 (#calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_p_r" $coo_p_y #calc
"$coo_p_z + $d_p_l")

    arc 16 17 ($coo_p_x #calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_p_r" #calc "$coo_p_z
+ $d_p_l")
    arc 17 18 (#calc "$dfe_p_r_2 * $d_p_r" $coo_p_y #calc
"$coo_p_z + $d_p_l")
    arc 18 19 ($coo_p_x #calc "$dfe_p_r_2 * $d_p_r" #calc "$coo_p_z
+ $d_p_l")
    arc 19 16 (#calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_p_r" $coo_p_y #calc
"$coo_p_z + $d_p_l")

```

## Anhang I

```
arc 20 21 ($coo_p_x #calc "-1*$d_p_r" #calc "$coo_p_z + $d_p_l")
arc 21 22 (#calc "$d_p_r" $coo_p_y #calc "$coo_p_z + $d_p_l")
arc 22 23 ($coo_p_x #calc "$d_p_r" #calc "$coo_p_z + $d_p_l")
arc 23 20 (#calc "-1*$d_p_r" $coo_p_y #calc "$coo_p_z + $d_p_l")

// pipe wall

arc 48 49 ($coo_p_x #calc "-1*($d_p_r + $d_plw_t)" $coo_p_z)
arc 49 50 (#calc "$d_p_r + $d_plw_t" #calc "$coo_p_y"
$coo_p_z)
arc 50 51 ($coo_p_x #calc "$d_p_r + $d_plw_t" $coo_p_z)
arc 51 48 (#calc "-1*($d_p_r + $d_plw_t)" #calc "$coo_p_y"
$coo_p_z)

arc 52 53 ($coo_p_x #calc "-1*($d_p_r + $d_plw_t)" #calc "$coo_p_z
+ $d_p_l")
arc 53 54 (#calc "$d_p_r + $d_plw_t" $coo_p_y #calc
"$coo_p_z + $d_p_l")
arc 54 55 ($coo_p_x #calc "$d_p_r + $d_plw_t" #calc "$coo_p_z
+ $d_p_l")
arc 55 52 (#calc "-1*($d_p_r + $d_plw_t)" $coo_p_y #calc
"$coo_p_z + $d_p_l")

// central pipe fw

arc 100 101 ($d_p_pfw #calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r -0.405"
$coo_p_z)
arc 101 102 (#calc "$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$coo_p_y -0.405" $coo_p_z)
arc 102 103 ($d_p_pfw #calc "$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r -0.405"
$coo_p_z)
arc 103 100 (#calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$coo_p_y -0.405" $coo_p_z)

arc 104 105 ($d_p_pfw #calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r -0.405"
$coo_p_z)
arc 105 106 (#calc "$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$coo_p_y -0.405" $coo_p_z)
arc 106 107 ($d_p_pfw #calc "$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r -0.405"
$coo_p_z)
arc 107 104 (#calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$coo_p_y -0.405" $coo_p_z)

arc 108 109 ($d_p_pfw #calc "-1*$d_pfw_r -0.405" $coo_p_z)
arc 109 110 (#calc "$d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc "$coo_p_y -0.405"
$coo_p_z)
arc 110 111 ($d_p_pfw #calc "$d_pfw_r -0.405" $coo_p_z)
arc 111 108 (#calc "-1*$d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc "$coo_p_y -0.405"
$coo_p_z)
```

## Anhang I

```
arc 112 113 ($d_p_pfw #calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r -0.405" #calc
"$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 113 114 (#calc "$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" #calc "$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 114 115 ($d_p_pfw #calc "$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r -0.405" #calc
"$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 115 112 (#calc "-1*$dfe_p_r_1 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" #calc "$scoo_p_z + $d_p_l")

arc 116 117 ($d_p_pfw #calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r -0.405" #calc
"$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 117 118 (#calc "$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" #calc "$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 118 119 ($d_p_pfw #calc "$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r -0.405" #calc
"$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 119 116 (#calc "-1*$dfe_p_r_2 * $d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" #calc "$scoo_p_z + $d_p_l")

arc 120 121 ($d_p_pfw #calc "-1*$d_pfw_r -0.405" #calc "$scoo_p_z +
$d_p_l")
arc 121 122 (#calc "$d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc "$scoo_p_y -0.405"
#calc "$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 122 123 ($d_p_pfw #calc "$d_pfw_r -0.405" #calc "$scoo_p_z +
$d_p_l")
arc 123 120 (#calc "-1*$d_pfw_r + $d_p_pfw" #calc "$scoo_p_y -0.405"
#calc "$scoo_p_z + $d_p_l")

// pipe wall fw

arc 148 149 ($d_p_pfw #calc "-1*($d_pfw_r + $d_pfw_w_t) -0.405"
$scoo_p_z)
arc 149 150 (#calc "$d_pfw_r + $d_pfw_w_t + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" $scoo_p_z)
arc 150 151 ($d_p_pfw #calc "$d_pfw_r + $d_pfw_w_t -0.405"
$scoo_p_z)
arc 151 148 (#calc "-1*($d_pfw_r + $d_pfw_w_t) + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" $scoo_p_z)

arc 152 153 ($d_p_pfw #calc "-1*($d_pfw_r + $d_pfw_w_t) -0.405"
#calc "$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 153 154 (#calc "$d_pfw_r + $d_pfw_w_t + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" #calc "$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 154 155 ($d_p_pfw #calc "$d_pfw_r + $d_pfw_w_t -0.405"
#calc "$scoo_p_z + $d_p_l")
arc 155 152 (#calc "-1*($d_pfw_r + $d_pfw_w_t) + $d_p_pfw" #calc
"$scoo_p_y -0.405" #calc "$scoo_p_z + $d_p_l")

);

//
// patches
```

## Anhang I

```
//  
  
defaultPatch  
{  
    name walls;  
    type wall;  
}  
  
boundary  
(  
  
    inlet  
    {  
        type patch;  
        faces  
        (  
            (0 1 2 3)  
            (5 4 0 1)  
            (0 4 7 3)  
            (5 1 2 6)  
            (2 3 7 6)  
            (11 7 6 10)  
            (8 4 7 11)  
            (9 5 4 8)  
            (10 6 5 9)  
        );  
    }  
  
    outlet  
    {  
        type patch;  
        faces  
        (  
            (13 12 15 14)  
            (17 16 12 13)  
            (12 16 19 15)  
            (17 13 14 18)  
            (14 15 19 18)  
            (23 19 18 22)  
            (20 16 19 23)  
            (21 17 16 20)  
            (22 18 17 21)  
        );  
    }  
  
    surface  
    {  
        type patch;  
        faces  
        (  
            (59 58 63 62)  
            (58 65 62 67)  
        )  
    }  
}
```

## Anhang I

```
        );  
    }  
  
    bottom_sides  
    {  
        type patch;  
        faces  
        (  
            (65 64 67 66)  
            (56 59 60 63)  
        );  
    }  
  
    bottom  
    {  
        type patch;  
        faces  
        (  
            (57 56 61 60)  
            (64 57 66 61)  
        );  
    }  
);
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----*
----*\
=====
  \ \ /   F i e l d       | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ /   O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
  \ \ /   A n d             | Version:   8
  \ \ /   M a n i p u l a t i o n |
\*-----*
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict;
}
// * * * * *
* * //

application     chtMultiRegionFoam;

startFrom       latestTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         43200;

deltaT          1;

writeControl    adjustableRunTime;

writeInterval   3600;

purgeWrite      0;

writeFormat     ascii;

writePrecision  12;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable true;

adjustTimeStep  true;

maxCo           1;
```

## Anhang I

```
functions
{
    #includeFunc "residuals_fluid"

    avT_fluid_outlet
    {
        type            surfaceFieldValue;
        libs            ("libfieldFunctionObjects.so");
        log             yes;
        writeControl    runTime;
        writeInterval   1;
        writeFields     false;
        surfaceFormat   none;
        regionType      patch;
        name            outlet;
        region          fluid;
        operation       areaAverage;
        fields
        (
            T
        );
    }

    yPlus_fluid
    {
        type            yPlus;
        libs            ("libfieldFunctionObjects.so");
        executeControl  writeTime;
        writeControl    writeTime;
        region fluid;
    }

    wallHeatFlux_fluid
    {
        type            wallHeatFlux;
        libs            ("libfieldFunctionObjects.so");
        executeControl  writeTime;
        writeControl    writeTime;
        region fluid;
    }

    wallShearStress_fluid
    {
        type            wallShearStress;
        libs            ("libfieldFunctionObjects.so");
        executeControl  writeTime;
        writeControl    writeTime;
        region fluid;
    }

    turbulenceIntensity_fluid
    {
        type            turbulenceIntensity;
    }
}
```

## Anhang I

```
    libs          ("libfieldFunctionObjects.so");
    executeControl writeTime;
    writeControl   writeTime;
    region fluid;
}

}

libs (
"libOpenFOAM.so"
"libsimpleSwakFunctionObjects.so"
"libswakFunctionObjects.so"
"libgroovyBC.so"
);

//
*****
//
```

# Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
  \ \ / A n d | Version: 8
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// * * * * *
* * //

numberOfSubdomains 6;

method             scotch;

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ /   F i e l d       | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ /   O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
  \ \ /   A n d             | Version:   6
  \ \ /   M a n i p u l a t i o n |
\*-----
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// * * * * *
* * //

ddtSchemes
{

}

gradSchemes
{

}

divSchemes
{

}

laplacianSchemes
{

}

interpolationSchemes
{

}

snGradSchemes
{

}

//
*****
//
```

## Anhang I

```
/*-----*- C++ -*-----
----*\
=====
  \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
  \ \ / A n d | Version: 6
  \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----
----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// * * * * *
* * //

PIMPLE
{
    // momentumPredictor yes;
    nOuterCorrectors 50;
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    consistent       true;
    pRefCell         0;
    pRefValue        0;
}

//
*****
//
```

# 10 Lebenslauf

## Persönliche Daten

---

**Name** Johann Philip Constantin Sander  
**Geburtsdatum** 11.07.1993  
**E-Mail** philip-sander@web.de

## Arbeitserfahrung

---

Ab 08/2018 Studentischer Mitarbeiter am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Universität für Bodenkultur Wien  
01 - 04/ 2017 Berufspraktikum bei „Codemet S.A.“, Guayaquil, Ecuador  
10 - 12/ 2016 Berufspraktikum bei „Geomediat“, Dinslaken, Deutschland  
01 - 03/ 2016 Berufspraktikum bei „Büro für Angewandte Hydrologie“, Berlin, Deutschland

## Studium

---

Ab 10/2017 Universität für Bodenkultur Wien  
Masterstudium: Kulturtechnik und Wasserwirtschaft  
10/ 2012 – 03/2016 Albert-Ludwigs Universität in Freiburg  
Bachelorstudium: Umweltnaturwissenschaften und -hydrologie

### EDV-Kenntnisse

ArcGIS, QGIS  
AutoCAD  
EPANET  
HECRAS  
MS Office  
OpenFOAM  
ParaView  
R

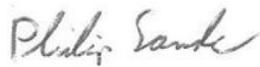
### Sprachkenntnisse

Deutsch  
Englisch  
Spanisch

## 11 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Weiters versichere ich, dass ich diese Masterarbeit weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.



*Wien, den 27.09.2022, Philip Sander*