

# GIS-gestützte Modellierung der Temperaturverteilung eines Trinkwasserversorgungssystems

—

## Herausforderungen bei der Umsetzung am Beispiel einer Großstadt

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades an der  
Fakultät für Angewandte Informatik  
der Universität Augsburg

vorgelegt von

Iris Rieger

Augsburg

19.06.2023

Erstgutachter:  
Zweitgutachter:

Apl. Prof. Dr. Karl-Friedrich Wetzel  
Apl. Prof. Dr. Christoph Beck

Tag der mündlichen Prüfung:

06.Mai 2024

## Abstract

According to regulations (DIN 1988-200:2012-05 and VDI 6023 sheet 1:2022-09), the temperature of 25°C in cold water after opening the drinking water tap for 30 seconds should not be crossed. Due to the predicted climate change, a constant increase in the drinking water temperature can be feared, thus in the future the compliance with the regulations could be jeopardized.

In the following work the temperature distribution of a metropolitan drinking water supply system is examined with the help of a GIS-supported model. As far as possible, all driving factors that could affect the temperature development were identified and classified in order to include them in the model. The goal was using the model to represent the spatial temperature development in the drinking water supply system, whereby the challenges of a metropolitan supply system must be taken into account.

The supply system can be divided into the area of drinking water withdrawal and the area of drinking water storage and distribution. In both areas, individual driving factors are affecting the temperature of the drinking water. In the field of drinking water distribution, the GIS model can be used to calculate a forecast of the drinking water temperature depending on the various climate scenarios.

The GIS model was created on the basis of the available data and taking the examined driving factors into account. The drinking water supplier has good data on the temperature, especially in area of the drinking water withdrawal. In addition to the data from the drinking water supplier, freely accessible data such as satellite data and for the study specifically installed ground temperature measurements were included in the model. The soil temperature in particular is an important influencing factor which is difficult to quantify due to the size of the study area. The data situation on other piping systems in the proximity of drinking water pipes as well as inaccuracies in terms of flow speed and direction also pose a challenge when modeling the drinking water temperature in a complex supply system.

All the necessary data had to be prepared for the GIS model. Starting from the input temperature (storage), the drinking water temperature for each point in the network was modeled in GIS, taking into account the current and forecast climatic conditions. The results could be validated with the help of temperature measurements in the pipe network. The calculated drinking water temperatures and in particular the spatial distribution of the temperature corresponds largely with the temperatures in reality. However, it is also evident that some inaccuracies in the model exist and improvements in the results can be expected with the help of more extensive data.

The GIS model can be used to identify risk areas in the drinking water network. Especially under consideration of the predicted climatic change, it's necessary to look at the drinking water temperature in order to take specific measures so that the compliance with the regulations can be guaranteed in the future.

Nach Regelwerksvorgaben (DIN 1988-200:2012-05 und VDI 6023 Blatt 1:2022-09) soll im Kaltwasser die Temperatur von 25°C maximal 30 Sekunden nach Öffnen der Entnahmestelle nicht überschritten werden. Aufgrund der prognostizierten Klimaentwicklung ist eine stetige Zunahme der Trinkwassertemperatur zu befürchten, sodass die Einhaltung der Regelwerksvorgaben in der Zukunft gefährdet sein könnte.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird, mithilfe einer GIS-gestützten Modellierung die Temperaturverteilung eines großstädtischen Trinkwasserversorgungssystems untersucht. Dabei werden möglichst alle Einflussfaktoren, die sich hierbei auf die Temperaturentwicklung auswirken können, identifiziert und eingeordnet, um sie in das Modell einzubeziehen. Ziel ist es die räumliche Temperaturentwicklung in dem Trinkwasserversorgungssystem in dem Modell darzustellen, wobei die Herausforderungen eines großstädtischen Versorgungssystems berücksichtigt werden müssen.

Grundsätzlich kann das Versorgungssystem in den Bereich der Gewinnung und in den Bereich der Speicherung und Verteilung unterteilt werden. In beiden Bereichen wirken sich individuelle Einflussfaktoren auf die Temperatur aus. Im Bereich der Verteilung wird mithilfe des GIS-Modells eine Prognose hinsichtlich der Trinkwassertemperatur in Abhängigkeit von den verschiedenen Klimaszenarien berechnet.

Das GIS-Modell wird auf Basis der vorhandenen Datenlage und unter Berücksichtigung der untersuchten Einflussfaktoren erstellt. Insbesondere in der Gewinnung besteht seitens des Versorgungsunternehmens eine gute Datenlage zur Temperatur. Neben Daten des Versorgungsunternehmens werden frei zugängliche Daten wie beispielsweise Satellitendaten sowie eigens installierte Bodentemperaturmessungen in das Modell einbezogen. Insbesondere die Bodentemperatur stellt einen wichtigen Einflussfaktor dar, der aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes schwer zu quantifizieren ist. Auch die Datenlage zu Fremdleitungen im Nahbereich von Trinkwasserleitungen sowie Ungenauigkeiten hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit und -richtung stellen eine Herausforderung bei der Modellierung der Trinkwassertemperatur in einem komplexen Versorgungssystem dar.

Alle notwendigen Daten müssen für das GIS-Modell aufbereitet werden. Ausgehend von der Einspeisetemperatur wird die Trinkwassertemperatur im GIS unter Berücksichtigung aktueller und prognostizierter klimatischer Bedingungen für jeden Punkt im Netz modelliert. Mithilfe von Temperaturmessungen im Netz werden die Ergebnisse validiert. Die errechneten Trinkwassertemperaturen und insbesondere die räumliche Verteilung der Temperatur entsprechen weitestgehend den Temperaturen in der Realität. Jedoch wird auch ersichtlich, dass einige Ungenauigkeiten bestehen und dass, durch eine umfangreichere Datenlage, Verbesserungen der Modellergebnisse zu erwarten sind.

Mithilfe des GIS-Modells können vor allem Risikobereiche im Netz identifiziert werden. Besonders im Hinblick auf die prognostizierte klimatische Entwicklung ist eine Betrachtung der Trinkwassertemperatur notwendig, um gezielt Maßnahmen zu ergreifen damit auch in der Zukunft die Einhaltung der Regelwerksvorgaben gewährleistet werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	II
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	X
Formelverzeichnis .....	XII
Skriptverzeichnis .....	XIII
1 Trinkwasserversorgung in einer Großstadt .....	1
2 Untersuchungsgebiet .....	5
3 Klimatische Entwicklung .....	9
4 Bodentemperatur .....	14
4.1 Bodentemperaturmessung .....	19
4.2 Oberflächentemperatur .....	26
4.2.1 Satellitendaten .....	27
4.2.2 Oberflächentemperatur aus Klimamodellen .....	30
4.2.3 Beschattung .....	31
4.3 Stadtklimatologie und LCZs .....	32
5 Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur .....	35
5.1 Einflussfaktoren in der Gewinnung .....	35
5.1.1 Lech und Stadtbäche .....	36
5.1.2 Gewinnungstemperatur .....	42
5.2 Einflussfaktoren in der Verteilung .....	49
5.2.1 Speicherung und Verteilung .....	50
5.2.2 Rohrnetz und Betriebszustände .....	51
5.2.3 Fremdleitungen .....	52
5.2.4 Kundenanlagen .....	62
6 Berechnung der Temperaturentwicklung in Leitungsnetzen .....	67
7 Datenlage und Vorbereitung von Modellparametern .....	69
7.1 Klimafaktor .....	69
7.2 Eingangstemperatur .....	69
7.3 Umgebungstemperatur der Leitung .....	70
7.3.1 Umgebungstemperaturdaten .....	70

7.3.2	Fremdleitungen .....	74
7.3.3	Stagnationsbereiche.....	75
7.3.4	Verlegetiefe.....	75
7.4	Rohrnetzparameter .....	75
7.4.1	Länge der Leitung .....	75
7.4.2	Wärmedurchgang .....	76
7.4.3	Massenfluss im Rohr .....	77
8	Modellierung der Trinkwassertemperatur im Netz .....	79
8.1	Aufbau eines Trinkwassertemperaturmodells.....	79
8.2	Vorbereitung der Datensätze.....	79
8.2.1	Rohrnetztable .....	80
8.2.2	Routentabelle .....	81
8.3	Temperaturberechnung in arcpy.....	86
9	Herausforderung bei der Modellierung.....	88
9.1	Statisches Modell .....	88
9.2	Datenlage und Ungenauigkeiten .....	88
9.3	Einbezug weiterer Modelle .....	91
10	Validierung des Trinkwassertemperaturmodells .....	93
11	Ergebnisse der Temperaturmodellierung .....	98
12	Fazit und Ausblick.....	104
13	Literaturverzeichnis .....	107

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hydrogeologische Teilräume Bayerns (Wagner, et al., 2009) .....	6
Abbildung 2: Schematische Skizze hydrogeologischer Stockwerksbau (HydroConsult GmbH, 2014) .....	7
Abbildung 3: Übersichtsplan der Wasserversorgung der Stadt Augsburg (swa, [2], 2023).....	8
Abbildung 4: Entwicklung von Klimaszenarien (Verändert nach Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2012).....	10
Abbildung 5: Beispiel der Häufigkeitsverteilung der Temperatur bei einer Temperaturzunahme in der Zukunft (Eigene Darstellung nach Schär & Fischer, 2008).....	10
Abbildung 6: Temperaturprofil im Untergrund zu verschiedenen Jahreszeiten (Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001).....	16
Abbildung 7: Ausschnitt Bodentemperatur in fünf verschiedenen Tiefen (Juli 2022), Messstelle: Asphalt Schatten.....	17
Abbildung 8: Bodentemperatur aller fünf Standorte in 10 cm Tiefe .....	22
Abbildung 9: Bodentemperatur aller fünf Standorte in 100 cm Tiefe .....	22
Abbildung 10: Bodentemperatur der Messung Asphalt Sonne in fünf Tiefen .....	24
Abbildung 11: Bodentemperatur der Messung Asphalt Schatten in fünf Tiefen.....	24
Abbildung 12: Boxplots der Messergebnisse aller Standorte in 100 cm im Vergleich .....	25
Abbildung 13: Boxplots der Messergebnisse aller Standorte in 120 cm im Vergleich .....	26
Abbildung 14: Beispiel Temperatur aus Satellitendaten (08.09.2021) (Eigene Darstellung nach Daten aus U.S. Geological Survey, 2021 & OpenStreetMap contributors, 2022).....	29
Abbildung 15: Skizze der Beschattung durch Gebäude in Abhängigkeit von Lage der Leitung im Straßengraben.....	31
Abbildung 16: Potenzielle anthropogene und natürliche Wärmequellen in städtischen Gebieten (Verändert nach Menberg et al., 2013, S. 127).....	33
Abbildung 17: Jahresmitteltemperaturen der Messstelle Hochablass am Lech 1891-2022 (Eigene Darstellung nach Daten aus Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2023) .....	36
Abbildung 18: Ausgewählte Grundwassermessstellen mit Temperatursensoren und Temperatur der Sommermonate im Untersuchungszeitraum 2019 – 2022 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & OpenStreetMap contributors, 2022).....	38
Abbildung 19: Lechtemperatur und Temperatur einiger Lechnaher Pegel im Vergleich (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	39
Abbildung 20: Temperaturverteilung einiger Pegelmessungen mit zunehmender Entfernung zum Lech im Vergleich zur Lechtemperatur (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	40

Abbildung 21: IDW-Analyse der Pegel (Sommertemperatur) und Darstellung der Brunnentemperatur in einem ausgewählten Abschnitt (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & OpenStreetMap contributors, 2022) .....	41
Abbildung 22: Brunnentemperatur der Horizontalfilterbrunnen 120 und 221 im Untersuchungszeitraum (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	44
Abbildung 23: Brunnentemperatur ausgewählter Filterbrunnen als Beispiel im Vergleich (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	45
Abbildung 24: Oberflächentemperaturen nach Satellitendaten in einem ausgewählten Abschnitt im Schutzgebiet im Vergleich zu der Brunnentemperaturverteilung (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & OpenStreetMap contributors).....	46
Abbildung 25: Übersicht über Einflussfaktoren in der Verteilung .....	49
Abbildung 26: Auszug von Fließgeschwindigkeit A-E aus STANET® (swa [1], 2023) .....	52
Abbildung 27: Temperaturprofil des Bodens um eine Starkstromleitung im Sommer (Trinks, 2010) .....	55
Abbildung 28: Versuchsaufbau Nah- und Fernwärme .....	56
Abbildung 29: Leitungssystem Versuchsbereich mit w = Trinkwasserleitung, VL = Fernwärme Vorlauf, RL = Fernwärme Rücklauf, SRV-G = Leitungsverbund Breitband. (swa [1], 2023) .....	56
Abbildung 30: Zusammenstellung der Messergebnisse Nah- und Fernwärme im Versuchsgebiet (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	57
Abbildung 31: Trinkwassertemperatur an Messstelle BP2 und BP17 im Vergleich zu Bodentemperaturen (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	58
Abbildung 32: Regressionsgerade zum Verhalten der Temperatur bei Schieberschließung (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1]).....	60
Abbildung 33: Trinkwassertemperatur inkl. markierter Schieberschließungen (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	61
Abbildung 34: Skizze der Hydrantenmessung zu Fernwärmeeinfluss.....	62
Abbildung 35: Wasser- und Lufttemperatur an Zähler in Kundenanlage 1 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023).....	64
Abbildung 36: Wasser- und Lufttemperatur an Zähler Kundenanlage 5 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023).....	64
Abbildung 37: Vergleich der Maximaltemperatur an Kundenanlage 2 und 3 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	65
Abbildung 38: Layer zur Ermittlung der Bodentemperatur mit 1: Satellitendaten; 2: LCZ; 3: Rohrnetz.....	71
Abbildung 39: Entwickelte TmpID´s entlang einer Beispielroute auf Basis Tabelle 20 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	72

Abbildung 40: Darstellung von Fremdleitungen in einer Umgebung von Trinkwasserleitungen als Vorbereitung für das GIS Modell (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	74
Abbildung 41: Darstellung der Linien (Rohrnetz) und Kreuzungen des Netzwerk Datasets (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	82
Abbildung 42: Schematische Darstellung der Datenproblematik .....	89
Abbildung 43: Konzeptionelle Darstellung der Kombination verschiedener Modelle zur Verbesserung der Datenlage .....	91
Abbildung 44: Modellierte Temperatur 100 cm und Messung im Vergleich für August 2022 .....	94
Abbildung 45: Ausschnitt aus einer Modellrechnung ohne Fremdleitungseinfluss (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	99
Abbildung 46: Ausschnitt aus einer Modellrechnung mit Fremdleitungseinfluss (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	99

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Sommertage in Augsburg (Daten: Deutscher Wetterdienst, 2023).....	11
Tabelle 2: Übersicht der heißen Tage in Augsburg (Daten: Deutscher Wetterdienst, 2023) .....	12
Tabelle 3: Anzahl Eis- und Frosttage im Untersuchungsgebiet im Vergleich zum langjährigen Mittel (Daten: Deutscher Wetterdienst, 2023) .....	12
Tabelle 4: Technische Daten (ONSET Computer Corporation, 2018) .....	19
Tabelle 5: Kennzahlen der Standorte in 10 cm Tiefe im Untersuchungszeitraum (Jun 2020 – Okt 2022).....	21
Tabelle 6: Kennzahlen der Standorte in 100 cm Tiefe im Untersuchungszeitraum (Jun 2020 – Okt 2022).....	23
Tabelle 7: Kenndaten der Landsat 8 Daten (U.S. Geological Survey, 2021) .....	27
Tabelle 8: Gegenüberstellung Gemessener Bodentemperatur in 10 cm Tiefe und Satellitenaufnahmen .....	29
Tabelle 9: Für die Stadt Augsburg relevante LCZs nach Stewart & Oke (2012, S.1887) .....	34
Tabelle 10: Korrelationsanalyse der Lechttemperatur und Temperatur einiger Lechnaher Pegel mit Pearson-Korrelationskoeffizient (cor) und P-value (Eigene Darstellung nach Daten der nach Daten der swa [1]) .....	37
Tabelle 11: Auflistung der Brunnentemperaturen im Mittel (2021 und 2022) in °C, nach Temperatur farbig markiert (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	43
Tabelle 12: Ergebnisse der Temperaturmessung in den Tiefbrunnen (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023).....	45
Tabelle 13: Grundwassertemperatur dreier ausgewählter Messstellen (GWM) und Monatsmitteltemperatur, nach Temperatur farbig markiert (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & Deutscher Wetterdienst, 2023).....	48
Tabelle 14: Durchschnittliche Abwassertemperaturen Sommer 2021/22 (Eigene Darstellung nach Daten aus Stadt Augsburg Mobilitäts- und Tiefbauamt, 2022) .....	53
Tabelle 15: Durchschnittliche Temperaturen im Gasnetz 2021/22 und Bodentemperaturmessung (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	54
Tabelle 16: Schieberschließung und deren Untersuchungsziel (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023).....	59
Tabelle 17: Hydrantenmessung zu Fernwärmeeinfluss September 2020 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023).....	62
Tabelle 18: Kennwerte der Temperaturmessung an den installierten Zählerstandorten (2021 - 2022) (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023) .....	63
Tabelle 19: Einspeisetemperatur TmpE von wärmster (rot) zu kühler (grün) für das Modell nach Klimaszenario .....	69

Tabelle 20: Zuordnung der TmpID nach LCZ und Satellitendaten (Eigene Darstellung nach Beck, et al. 2018 & U.S. Geological Survey, 2021) .....	72
Tabelle 21: Ermittlung der Daten für die TmpID und BodenID .....	73
Tabelle 22: Abschließende Temperatur TmpU für die Modellberechnung .....	74
Tabelle 23: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte Modelltag 1, nach Temperaturhöhe farbig unterteilt (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1]) .....	95
Tabelle 24: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte Modelltag 2 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1]) .....	96
Tabelle 25: Beispiel von Rohrleitungsabschnitten mit (A_V1_T2_KD_FW) und ohne (A_V1_T2_KD) Fremdleitungseinfluss im Vergleich .....	100
Tabelle 26: Beispiel von Rohrleitungsabschnitten in 100 cm (A_V1_T2_KD) und 120 cm (A_V1_T3_KD) Verlegetiefe im Vergleich .....	101
Tabelle 27: Mittelwert der Temperatur im gesamten Netz bei verschiedenen Verlegetiefen und Klimaszenarien .....	103

# Formelverzeichnis

Formel 1: Wärmehaushaltsgleichung (Tetzlaff, 1977).....	14
Formel 2: Wärmekapazität des Bodens (Gisi et al., 1997, S. 23, 82) .....	15
Formel 3: Wärmetransportgleichung (nach Gisi et al., 1997, S. 84 & nach Hartge et al., 2014, S. 222).....	16
Formel 4: Analytische Lösung der allgemeinen Transportdifferentialgleichung für den Wärmetransport (Hartge, Horn, Bachmann, & Peth, 2014, S. 255 f.) .....	18
Formel 5: Stefan-Boltzmann-Gesetz (Löffler, 2012, S. 44) .....	27
Formel 6: Umwandlung in Werte zur Temperatur an der Sensoröffnung (nach Chander et al. 2009 & U.S. Geological Survey, 2021) .....	28
Formel 7: Temperaturänderung entlang von Rohrleitungen.....	67
Formel 8: Wärmedurchgangswiderstand .....	76
Formel 9: Massenstrom allgemein .....	77
Formel 10: Volumenstrom [kg <sup>3</sup> /s] im Rohr .....	77
Formel 11: Querschnittsfläche .....	77
Formel 12: Massenfluss im Rohr .....	77

# Skriptverzeichnis

Skript 1: Skalierung der Landsat 8 Daten und Umwandlung in °C in R.....	28
Skript 2: Errechnung der BodenID in ArcGIS.....	83
Skript 3: Einbindung der Daten TempU und TempE in den Routen Datensatz, Beispiel für August 2020 in 100 cm Tiefe.....	84
Skript 4: Einbindung der Daten TempU und TempE in den Routen Datensatz, Beispiel für August 2020 in 100 cm Tiefe.....	85
Skript 5: Hauptskript zur Errechnung der Trinkwassertemperatur.....	87

# 1 Trinkwasserversorgung in einer Großstadt

Trinkwasser ist unser wichtigstes Lebensmittel und seine Bedeutung ist für viele Bereiche des alltäglichen Lebens immens. Vor allem als Lebensmittel und zur Körperhygiene ist hygienisch einwandfreies Wasser essenziell. Aus diesem Grund wurde das Recht auf Wasser im Jahr 2010 in der Resolution 64/292 durch die Generalversammlung der Vereinten Nationen zu einem Menschenrecht erklärt (United Nations, 2010).

Von dem vorhandenen Wasserdargebot nutzt Deutschland weniger als 3% des Wassers für die öffentliche Trinkwasserversorgung (Bundeskartellamt, 2016). Wesentlich größer ist der Anteil der Wassernutzung in der Industrie und Energieversorgung. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurde in Deutschland im Jahr 2016 mit 61% der Großteil des Trinkwassers aus Grundwasser gefördert, wobei der Anteil des Grundwassers seit einigen Jahren sehr stabil geblieben ist. Des Weiteren wird Trinkwasser aus Oberflächengewässern (39%) inklusive See- und Talsperren (12%) gewonnen, sowie aus angereichertem Grundwasser (9%), Quellwasser (8%), Uferfiltrat (8%) und Flusswasser (1%) (Statistisches Bundesamt, 2018). In Bayern liegt der Anteil an Grundwasser mit 72% noch einmal deutlich höher als im bundesdeutschen Mittel (ebd.).

Gemäß der DIN 2000 ist Trinkwasser für den menschlichen Verzehr und hygienische Zwecke bestimmt. Zudem sind in der DIN 2000 die Anforderungen an das Trinkwasser geregelt. Demnach muss Trinkwasser mikrobiologisch so beschaffen sein, dass durch den Genuss keine gesundheitliche Beeinträchtigung zu befürchten ist und keine Werkstoff-Korrosion der Anlagen verursacht wird. Außerdem soll Trinkwasser klar, farblos, kühl, geruchslos und geschmacklich einwandfrei sein (Deutsches Institut für Normung e.V., 02/2017).

Weiter ist gemäß des Infektionsschutzgesetzes (IfSG) § 37 Absatz 1 festgehalten: „Wasser für den Menschlichen Gebrauch muss so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit, insbesondere durch Krankheitserreger, nicht zu besorgen ist“. Zu diesem Zweck sind in der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) Grenzwerte für mikrobiologische, chemische und radiologische Parameter festgesetzt.

Die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser liegt im Kompetenzbereich der Städte und Gemeinden (Umweltbundesamt, 2016, S. 14). Dabei ist gemäß § 50 Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) „die der Allgemeinheit dienende Wasserversorgung eine Aufgabe der Daseinsvorsorge“. Daraus ergibt sich, dass der Trinkwasserversorger nicht nur qualitativ einwandfreies Trinkwasser nach TrinkwV zu Verfügung stellen, sondern auch eine Versorgungssicherheit der Bevölkerung gewährleisten muss.

Insbesondere für Großstädte ist eine gute Organisation der Infrastruktur für die Versorgungssicherheit maßgebend. Die Versorgung der Einwohner mit Trinkwasser stellt Großstädte vor andere Herausforderungen als kleinere Städte oder Gemeinden. Während die ländliche Wasserversorgung von langen Rohrleitungsnetzen mit kleinen Leitungsdurchmessern geprägt ist, erfordert die großstädtische Versorgung großvolumige Anlagen und Netze (Bundeskartellamt, 2016). Außerdem wird die

Wasserversorgung für den Abwassertransport in ausreichender Menge benötigt, was insbesondere in Großstädten einen wichtigen Beitrag zur Seuchenprävention leistet.

Um mikrobiologisch einwandfreies Trinkwasser zu gewährleisten, wird in vielen Ländern Trinkwasser zusätzlich über beispielsweise die Zugabe von Chlor desinfiziert (Agudelo-Vera et.al, 2020). Einige Länder in Europa, unter anderem Deutschland, setzen hauptsächlich auf den Schutz des Grundwassers oder nutzen die Desinfektion über UV-Anlagen (ebd.).

Da Trinkwasser nicht steril ist und immer Bakterien beinhaltet, kann durch eine Temperaturerhöhung des Wassers auch eine mikrobiologische Veränderung in Form einer Aufkeimung befürchtet werden (Grobe & Jost, 2011). Daher bietet sich die Wassertemperatur als ein wichtiger Parameter zur Qualitätssicherung an. Nach DIN 1988-200:2012-05 und VDI 6023 Blatt 1:2022-09 soll im Kaltwasser die Temperatur von 25°C maximal 30 Sekunden nach Öffnen der Entnahmestelle nicht überschritten werden. Bereits jetzt weisen jedoch einige Versorgungsunternehmen in Deutschland darauf hin, dass an manchen Stellen im Netz Temperaturen von 25°C auftreten (TZW/DVGW, 2019).

Aufgrund der prognostizierten Klimaentwicklung ist eine weitere Zunahme der Wassertemperatur zu befürchten, sodass die Einhaltung der Regelwerksvorgaben in der Zukunft gefährdet sein könnte. In Zusammenhang mit der geringen Informationslage zur Auswirkung von Temperaturänderungen in Trinkwasserversorgungssystemen ist eine detaillierte Betrachtung dieser Thematik notwendig.

Bisher konnte kein Einfluss erhöhter Temperaturen auf die mikrobiologischen Parameter beobachtet werden, jedoch liegen keine ausreichenden Informationen zu dem Effekt von Temperaturen  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  im Trinkwasser vor, um einen negativen Einfluss vollständig ausschließen zu können (TZW/DVGW, 2021). Im Rahmen von Forschungsprojekten wird diese Fragestellung aktuell bearbeitet, so zum Beispiel im Projekt W 202016 „MibiTemp“ des TZW/DVGW: Untersuchung zu den Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen auf mikrobiologische Situationen bei der Trinkwasserverteilung.

Ein Monitoring der Trinkwassertemperatur wird nur in wenigen Ländern praktiziert (Agudelo-Vera et.al, 2020). Vergleichbar dürftig ist die Forschungslage zu der Temperaturverteilung in Trinkwasserversorgungssystemen (Blokker & Pieterse-Quirijns, 2013) oder zur Auswirkung von erhöhten Trinkwassertemperaturen (TZW/DVGW, 2019). Während bereits einige Modelle zur Darstellung der Wassertemperatur in Oberflächengewässern existieren (Dugdale, Hannah, & Malcom, 2017), sind für Trinkwasserversorgungssysteme keine vergleichbaren und praktisch nutzbaren Modelle vorhanden. Forschungsprojekte zu diesen Fragestellungen wurden erst seit der jüngsten Vergangenheit begonnen, wie im Rahmen des DVGW Projektes W 201940 „Erhöhte Wassertemperaturen“.

Zur genaueren Betrachtung der Temperatur im gesamten Trinkwasserversorgungssystem sind Modelle notwendig, welche alle Einflussfaktoren, die sich auf die Wassertemperatur auswirken, untersuchen und einordnen. Ein solches Modell kann eine Hilfestellung zur Planung und Durchführung notwendiger Maßnahmen zur Temperaturminderung in einem Trinkwasserversorgungssystem bieten. Außerdem ist es so möglich die prognostizierte klimatische Entwicklung in die Betrachtung einzubeziehen, um rechtzeitig handeln zu können.

Ein Trinkwasserversorgungsunternehmen muss sowohl die Versorgungssicherheit als auch eine gute Trinkwasserqualität für das gesamte Versorgungsgebiet gewährleisten. Hierbei ist unter anderem die Wassertemperatur ein wichtiger Parameter zur Qualitätssicherung.

Insbesondere in Zusammenhang mit der prognostizierten Zunahme der Lufttemperatur in Bayern von +0,8°C bis +1,9°C zwischen 2021 und 2050 (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012) muss in der Zukunft von einer Zunahme der Bodentemperatur ausgegangen werden. Daraus ergibt sich eine Temperaturzunahme im Bereich der Trinkwasserleitung im Boden und somit ein direkter Einfluss auf die Trinkwassertemperatur im Versorgungsnetz. Gleichzeitig kann eine Temperaturerhöhung im Boden zu einer Änderung der Grundwassertemperatur führen, welche die Fördertemperatur des Trinkwassers ebenfalls direkt beeinflusst.

Es handelt sich bei den prognostizierten Lufttemperaturwerten um Mittelwerte für das gesamte Bundesland. In urbanen Räumen ist aufgrund der Versiegelung bereits jetzt eine um etwa 0,2°C höhere Temperatur pro 10% Versiegelungsanteil in Baugebieten im Vergleich zu unbebauten Gebieten zu beobachten (Proxleitner, 2009, S. 12). Eine stärkere Zunahme der Lufttemperatur ist daher für einen urbanen Raum wie im Fall des hier untersuchten Versorgungsgebietes der Stadt Augsburg zu erwarten.

Da das Trinkwasserversorgungsunternehmen der Stadt Augsburg, die Stadtwerke Augsburg Wasser GmbH (swa), verschiedene Messstellen zur Ermittlung der Wassertemperatur betreibt, konnte bereits eine Zunahme der Wassertemperatur zwischen 2013 und 2018 beobachtet werden. Diese Zunahme beträgt im Fall einiger Messstellen bereits 2°C über den Zeitraum von 6 Jahren. In Zusammenhang mit der prognostizierten Temperaturzunahme in Bayern sowie der verstärkten Zunahme in urbanen Räumen muss davon ausgegangen werden, dass Trinkwassertemperaturen von  $\geq 20^\circ\text{C}$  an einigen Stellen im Netz häufiger zu beobachten sein werden. Die Temperaturentwicklung ist jedoch nicht im gesamten Versorgungssystem einheitlich, sondern unterscheidet sich hinsichtlich der Schwankungshöhe und in Abhängigkeit von der Lage der Messstelle im Netz oder nach Lage und Art der Förderbrunnen.

Um rechtzeitig Risiken durch erhöhte Trinkwassertemperaturen zu erkennen, müssen möglichst alle Einflussfaktoren auf die Temperaturänderung des Trinkwassers im Detail untersucht werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, an dem Beispiel des Trinkwasserversorgungssystems einer Großstadt wie der Stadt Augsburg alle wesentlichen Einflussfaktoren, die sich auf die Temperatur des Trinkwasser auswirken, zu analysieren. Für das Untersuchungsgebiet sind dabei neben den allgemeinen Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Bodenbedeckung, der Bebauung, sowie der Verlegetiefe und der Verweildauer des Wassers im Rohrnetz, auch lokale Besonderheiten zu untersuchen.

Das gesamte Trinkwasserversorgungssystem soll daher im Detail betrachtet werden. Grundsätzlich kann das Versorgungssystem in den Bereich der Gewinnung und in den Bereich der Speicherung und Verteilung unterteilt werden. Beide Bereiche besitzen unterschiedliche Einflussfaktoren, die sich auf die Temperaturentwicklung auswirken können. So müssen im Hinblick auf die Gewinnung der Einfluss des Lechs sowie die unterschiedlichen Grundwasserstockwerke und das Schutzgebiet berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Speicherung und Verteilung steht vor allem der Einfluss der

Bodentemperatur im Fokus der Untersuchung. Zudem muss das Rohrnetz im Detail betrachtet und der Einfluss der Verlegetiefe sowie von nahegelegenen Abwasser- und Fernwärmeleitungen berücksichtigt werden.

Mithilfe eines GIS-Modells wird des Weiteren eine Prognose hinsichtlich der Trinkwassertemperatur in Abhängigkeit von den verschiedenen Klimaszenarien berechnet. Ziel ist es Risiken anhand der Ergebnisse durch die erhöhten Trinkwassertemperaturen rechtzeitig zu erkennen. Im speziellen sollen Risikobereiche im Versorgungsnetz identifiziert werden, auf deren Basis durch das Versorgungsunternehmen entsprechende Maßnahmen geplant und umgesetzt werden können, um negative Auswirkungen durch die Temperaturentwicklung zu vermeiden.

Insgesamt ergeben sich für die vorliegende Untersuchung folgende Fragestellungen:

- Identifizierung aller Einflussfaktoren, die sich in einem Versorgungssystem auf die Trinkwassertemperatur auswirken
- Besondere Berücksichtigung der Klimaentwicklung und der Stadtklimatologie
- GIS-gestützte Modellierung der Trinkwassertemperatur in einem Versorgungssystem
- Herausarbeitung der Herausforderungen und Limitierungen in dem Modell
- Validierung und Auswertung der Modellergebnisse

## 2 Untersuchungsgebiet

Um die Temperaturentwicklung und -verteilung in einem Trinkwasserversorgungssystem zu untersuchen, wurde das Versorgungssystem der Stadt Augsburg betrachtet. Mit 295.830 Einwohnern im Jahr 2020 (Stadt Augsburg, 2022) gehört die Stadt Augsburg zu den deutschen Großstädten. Dies entspricht auch den gebräuchlichsten Städtetypisierungen nach Bevölkerungszahl, wonach Städte mit über 100.000 Einwohnern als Großstädte zu definieren sind (Heineberg, 2017, S. 28).

Wasser spielt in der Stadt Augsburg bereits seit geraumer Zeit eine zentrale Rolle. Schon in der Römerzeit wurde der Wasserbedarf der Stadt aus Zisternen, Brunnen und einem künstlichen Kanal gedeckt (swa, [5], 2023). Auch heute ist Wasser ein wichtiger Bestandteil der Stadt Augsburg. So wurde das Wasser Management System der Stadt im Jahr 2019 zum UNESCO-Welterbe ernannt (United Nations, 2022).

Das erste Wasserwerk wurde bereits 1412 am Schwibbogentor errichtet und leitete das direkt neben dem Stadtgraben geförderte Wasser in öffentliche Brunnen der Stadt (swa, [2], 2023). Eine moderne Wasserversorgung begann in Augsburg mit der Inbetriebnahme des Wasserwerks am Hochablass im Jahre 1879, welches bis heute Bestandteil des Trinkwasserversorgungssystems ist (ebd.).

Der Trinkwasserversorger der Stadt Augsburg ist die swa (Stadtwerke Augsburg Wasser GmbH). Sie versorgt mehr als 320.000 Einwohner mit Trinkwasser durch ein über 1.000 km langes Leitungsnetz (swa, [3], 2023). Das Versorgungsgebiet umfasst die Stadt Augsburg, die Stadt Stadtbergen, die Stadt Neusäß (ohne Hammel, Ottmarshausen und Täferlingen) und den Ortsteil Friedberg-West. (ebd.)

Zur Einordnung des Untersuchungsgebietes werden zunächst die hydrogeologischen Eigenschaften näher betrachtet, um das Verhalten der Temperatur im Grundwasser und in der Gewinnung zu beschreiben. Augsburg liegt im hydrogeologischen Großraum Alpenvorland, der geprägt ist durch ergiebige Porengrundwasserleiter, welchen häufig Grundwassergeringleiter zwischengelagert sind (Schubert, Thomas, 2016, S. 181). Der hydrogeologische Großraum Alpenvorland beinhaltet den hydrogeologischen Raum Süddeutsches Molassebecken.

Die relevanten Grundwasserleiter des Untersuchungsgebietes befinden sich im hydrogeologischen Teilraum der Iller-Lech Schotterplatte bzw. direkt in Lechnähe im Bereich fluvioglazialer Schotter. Die hydrogeologischen Teilräume sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die Iller-Lech Schotterplatte ist geprägt durch Molassesedimente des Tertiärs, welche einen gering bis mäßig durchlässigen Porengrundwasserleiter bilden (Schubert, Thomas, 2016, S. 185). Überlagert ist das Gebiet durch quartären Schotter mit einer hohen bis sehr hohen Durchlässigkeit. Die fluvioglazialen Schotter, direkt angrenzend an den Lech, bilden einen Grundwasserleiter aus quartären fluvioglazialen Lockergesteinen mit einer hohen Durchlässigkeit (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007).

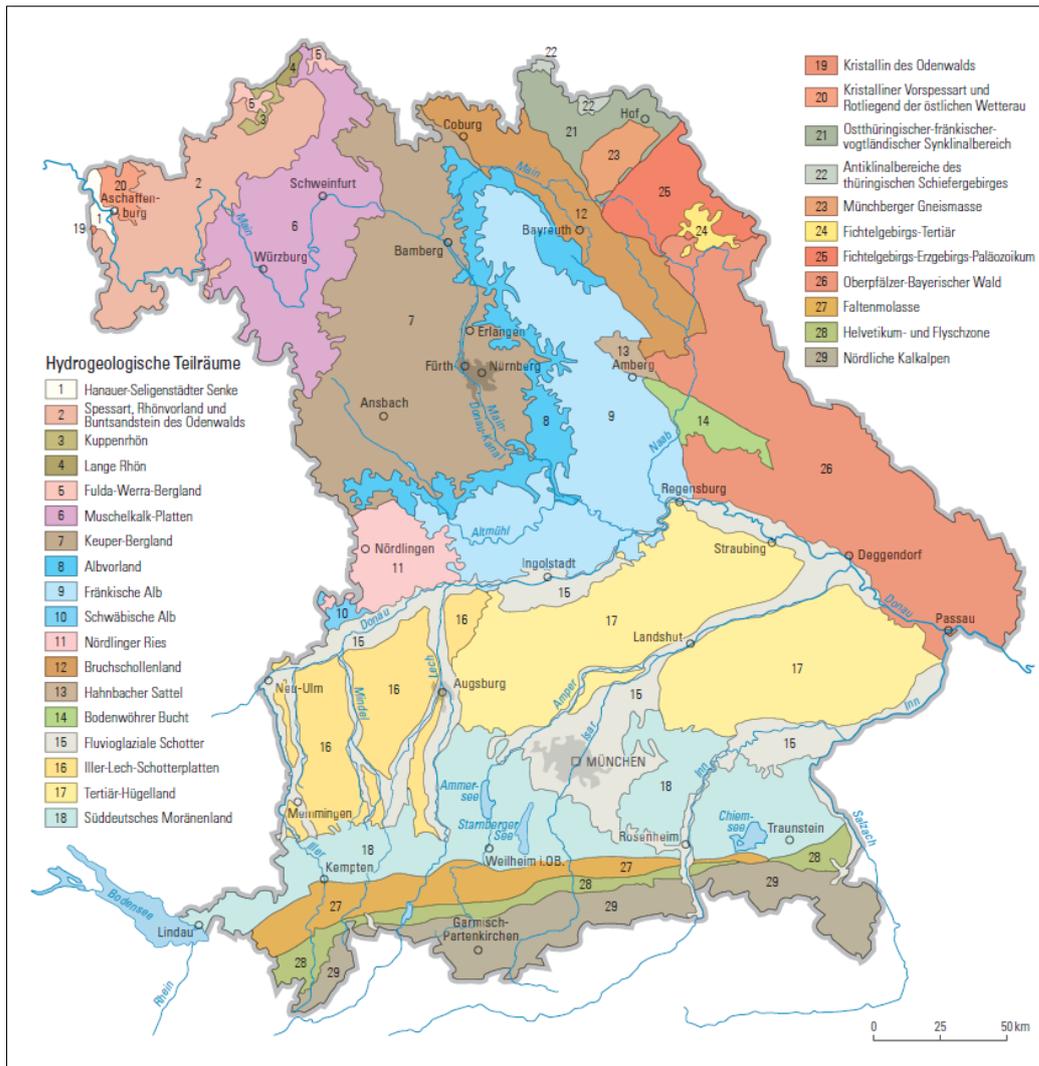


Abbildung 1: Hydrogeologische Teilräume Bayerns (Wagner, et al., 2009)

In Abbildung 2 ist der hydrogeologische Stockwerksbau gemäß dem hydrogeologischen Modell vereinfacht dargestellt (HydroConsult GmbH, 2014, S. 101). Den oberen Grundwasserleiter bildet das quartäre Grundwasserstockwerk gefolgt von den beiden tertiären Grundwasserstockwerken der oberen Süßwassermolasse. Diese sind das 1. Hauptgrundwasserstockwerk HGW1 und das 2. Hauptgrundwasserstockwerk HGW2.

Die Fließrichtung des oberen quartären Grundwassers verläuft von Süd nach Nord, wobei im Bereich des Lechs der Grundwasserscheitel abschnittsweise nach Westen oder Osten von der zentral gelegenen Augsburger Hochterrasse abweicht (HydroConsult GmbH, 2014, S. 33f).

Für die Gewinnung ist die Einteilung in einen oberen Grundwasserleiter, welcher durch Flachbrunnen und ein tieferes Grundwasserstockwerk, welches von Tiefbrunnen und Horizontalfilterbrunnen erschlossen wird, relevant. Anzumerken ist, dass im durchlässigen HGW1 lokal Grundwassergingleiter (Tone) auftreten.

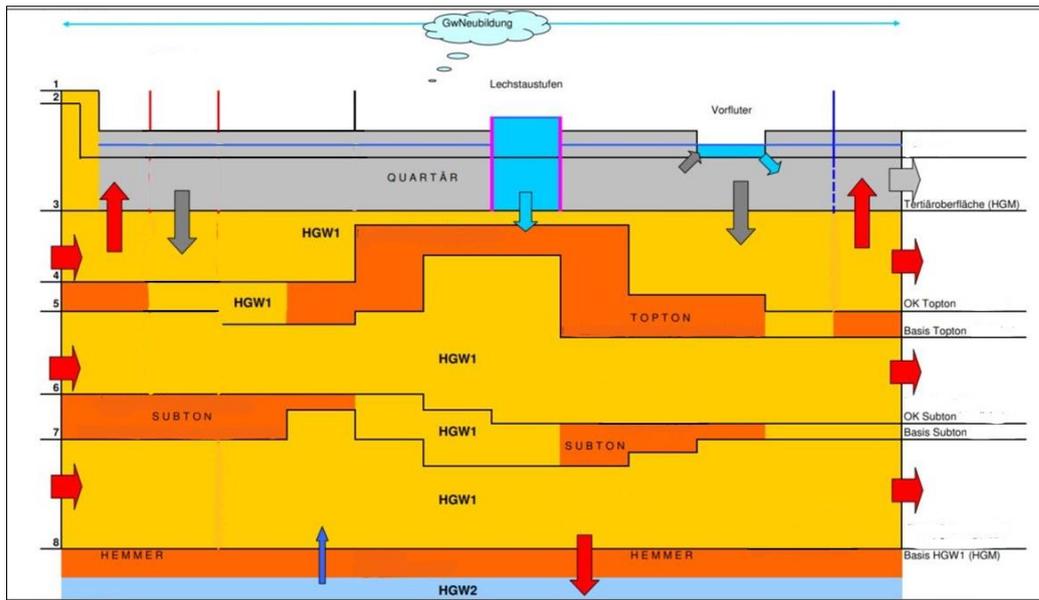


Abbildung 2: Schematische Skizze hydrogeologischer Stockwerksbau (HydroConsult GmbH, 2014)

In Abbildung 3 ist der Übersichtsplan der Wasserversorgung in Augsburg dargestellt. Die Stadtwerke Augsburg Wasser GmbH betreibt über 60 Trinkwasserbrunnen in verschiedenen Trinkwasserschutzgebieten. Nach der Gewinnung wird das Trinkwasser in das Netz eingespeist. Hierbei ist zunächst die Begriffserklärung wichtiger technischer Anlagen im Trinkwasserversorgungssystem notwendig.

**Wasserwerk (WW):** Eine technische Anlage der Wasserversorgung, die in der Regel mindestens zwei oder mehrere Funktionen der Anlagenteile (z.B. Druckerhöhungsanlage, Übergabestation, ggf. Behälter, ggf. Umgehungen, ggf. Brunnen) zusammenfasst (swa, [4], 2015).

**Übergabestation (ÜS):** Die technische Anlage der Wasserversorgung dient zu kontrollierter Einspeisung (hinsichtlich Menge, Druck und Qualität) des Rohwassers aus dem Gewinnungsgebiet als Reinwasser ins Trinkwassernetz (swa, [4], 2015).

**Hochbehälter (HB) und Tiefbehälter (TB):** Eine Trinkwasserspeicheranlage. Ein Hochbehälter ist dabei ein Wasserspeicher, der so hoch gelegen ist, dass im angeschlossenen Versorgungsgebiet durch Zufluss im freien Gefälle ein genügender Druck zur Verfügung steht, (Grombach, Haberer, & Trueb, 1985, S. 734). Ein Tiefbehälter ist im Gegensatz dazu ein Wasserspeicher dessen Wasserspiegel so tief liegt, dass zusätzliche Pumpen angeschlossen werden müssen, um einen ausreichenden Druck im Versorgungsnetz zu gewährleisten (Grombach, Haberer, & Trueb, 1985, S. 733).

Anzumerken ist, dass die Hochbehälter im Westen des Stadtgebietes größtenteils nachts befüllt werden und tagsüber ein Einspeisen von Wasser, je nach Betriebszustand, aus den Hochbehältern in das Netz stattfindet (Buxmann, 2008, S. 4f.). Dies wird als Tag- und Nacht-Zyklus bezeichnet und wirkt sich auch auf die Fließgeschwindigkeiten und -richtungen aus.

Für die Temperaturstudie im Trinkwasserversorgungssystem sind die Druckverhältnisse im Netz nicht relevant. Vollständigkeitshalber ist dennoch zu erwähnen, dass vor allem in großen

Trinkwasserversorgungssystemen der Wasserdruck durch Druckerhöhungsanlagen (DEAs) und Druckminderungsanlagen (DMAs) gesteuert werden kann.

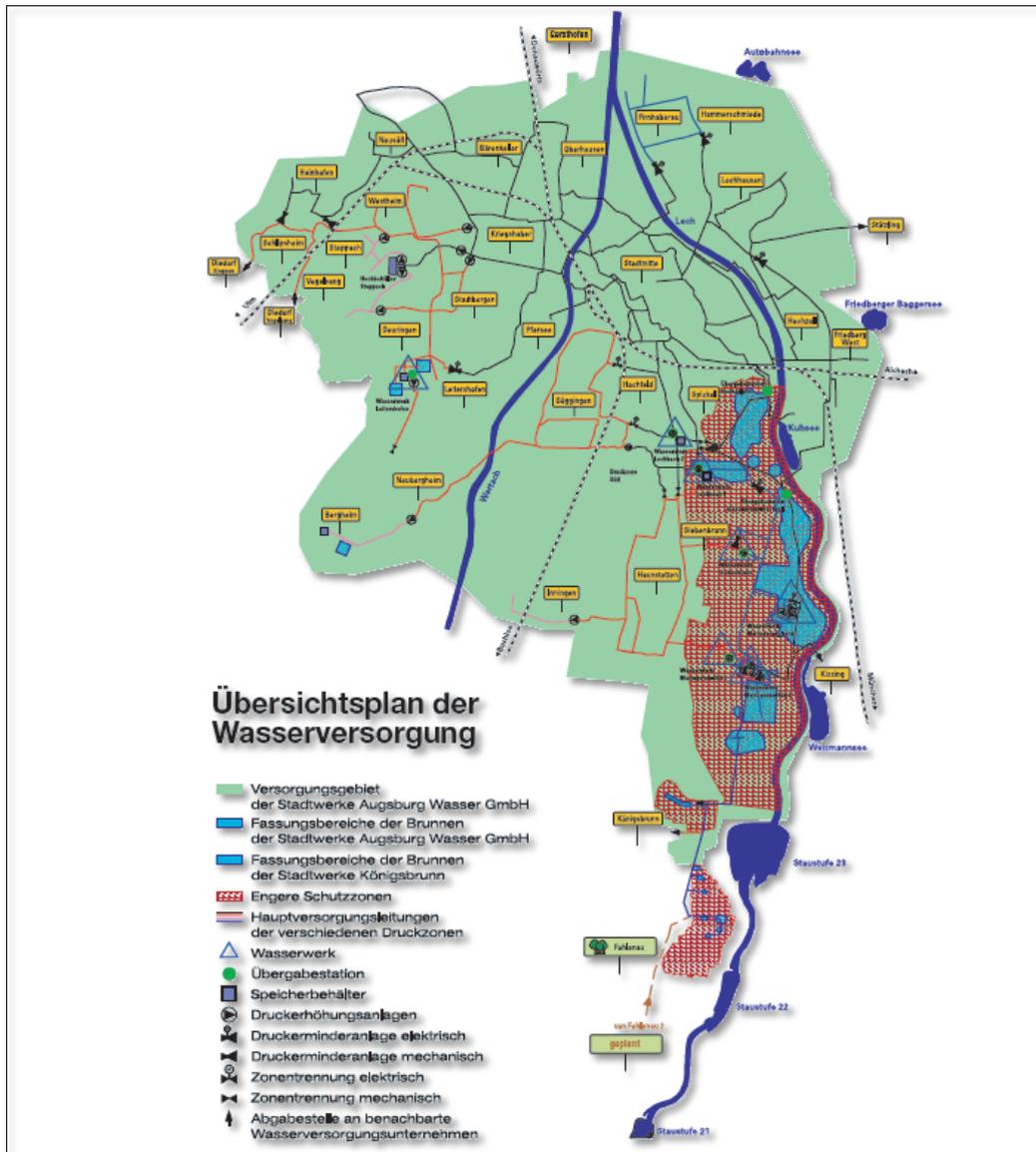


Abbildung 3: Übersichtsplan der Wasserversorgung der Stadt Augsburg (swa, [2], 2023)

### 3 Klimatische Entwicklung

Bereits jetzt ist bei dem untersuchten Versorgungsunternehmen eine Temperaturzunahme sowohl der Gewinnungstemperatur als auch der Temperatur im Netz festgestellt worden. Auch konnten Temperaturen von  $> 20^{\circ}\text{C}$  im Netz gemessen werden. Im Hinblick auf die gesetzliche Grundlange ist zu befürchten, dass eine Temperaturerhöhung im Zuge der prognostizierten Klimaänderung die Situation im Netz verschärfen könnte.

Für den Trinkwasserversorger ist bei der Betrachtung der Trinkwassertemperatur der Einbezug verschiedener Klimaszenarien besonders relevant, da Mithilfe des Temperaturmodells die künftige Entwicklung der Trinkwassertemperatur im Versorgungsgebiet abgeschätzt werden soll. Auf Basis der Ergebnisse kann das Versorgungsunternehmen Maßnahmen entwickeln, um Temperaturen von  $> 25^{\circ}\text{C}$  im Netz zu Vermeiden und um den gesetzlichen Vorgaben gerecht zu werden.

Bei der Berücksichtigung der klimatischen Entwicklung müssen zwei Bereiche unterschieden werden. Zum einen werden die globalen und regionalen Klimateinflüsse, wie die offiziellen globalen Szenarien des IPCC oder für Deutschland Berichte des KLIWA, näher berücksichtigt. Zum anderen müssen auch stadtklimatologische Faktoren in das Modell mit einbezogen werden, da es in stark versiegelten Bereichen wie im Fall einer Großstadt zu einem Wärmeinseleffekt kommt. Zunächst soll auf die klimatische Entwicklung im Allgemeinen näher eingegangen werden, stadtklimatologische Faktoren werden in Kapitel 4.3 besprochen.

Die Auswirkung der klimatischen Entwicklung mit ihren Problemen und Herausforderungen ist nicht nur im globalen, sondern auch im regionalen Kontext zu betrachten. Von dem Weltklimarat (IPCC) wurden Emissionszenarien beschrieben, auf deren Basis globale Klimamodelle (General Circulation Models – GCM) Klimaprojektionen berechnen, die wiederum die Grundlage für regionale Klimamodelle (Regional Climate Models – RCM) sind (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012).

Dabei wurden die bisherigen SERS-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios) für den 5. Sachstandsbericht des IPCC durch die neuen RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) ersetzt, bei dem neue Daten zur wirtschaftlichen Entwicklung, neuen Technologien und neue Erkenntnisse zur Landnutzung mit einbezogen werden (Moss et al., 2010).

In jedem der Schritte (Abbildung 4) von Emissionszenarien über globale zu regionalen Klimamodellen bestehen Unsicherheiten in Abhängigkeit von den einbezogenen Parametern der Klimamodelle. Daher werden die Prognosen auf Basis der Klimamodelle regelmäßig aktualisiert.

Grundsätzlich müssen nach Linke (2023) folgende Modellierungsgrenzen hinsichtlich der Klimamodelle berücksichtigt werden:

- Szenarien basieren auf Annahmen über die zukünftige Entwicklung
- Beschränkungen der Modellgenauigkeit (Auflösung, Parametrisierung, Rechenschema, ggf. mangelndes Prozessverständnis)
- Klimavariabilität vieler Klimaparameter
- Unterschiede in der Regionalisierungsverfahren und in den Wirkmodellen

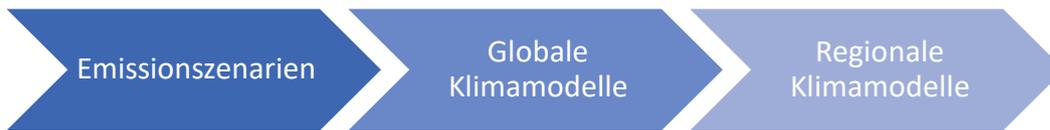


Abbildung 4: Entwicklung von Klimaszenarien (Verändert nach Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012)

Für Bayern konnte bereits eine Veränderung des Klimas mit einer mittleren jährlichen Zunahme der Temperatur von  $+1,1^{\circ}\text{C}$  im Zeitraum von 1931 – 2010 festgestellt werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012). Für die Zukunft ist auf Basis der Klimaszenarien für Bayern eine Temperaturzunahme von  $+0,7^{\circ}\text{C}$  bis  $+1,8^{\circ}\text{C}$  zwischen 2021 und 2050 prognostiziert worden (ebd.).

Im Hinblick auf die Temperaturstudie ist dabei nicht nur der Trend der Temperaturentwicklung zu berücksichtigen, sondern auch die damit einhergehende Zunahme an Sommertagen und heißen Tagen. Lange Zeiträume hoher Temperaturen werden insbesondere im Zusammenhang mit der Bodentemperatur und deren Auswirkung auf die Trinkwassertemperatur relevant (Kapitel 4).

- Sommertage: Tag mit einer Maximaltemperatur von mindestens  $25^{\circ}\text{C}$  (Roth & Lux, 2015, S. 307).
- Heißer Tag (Tropentag): Tag mit einer Maximaltemperatur von  $30^{\circ}\text{C}$  und mehr (Roth & Lux, 2015, S. 308).

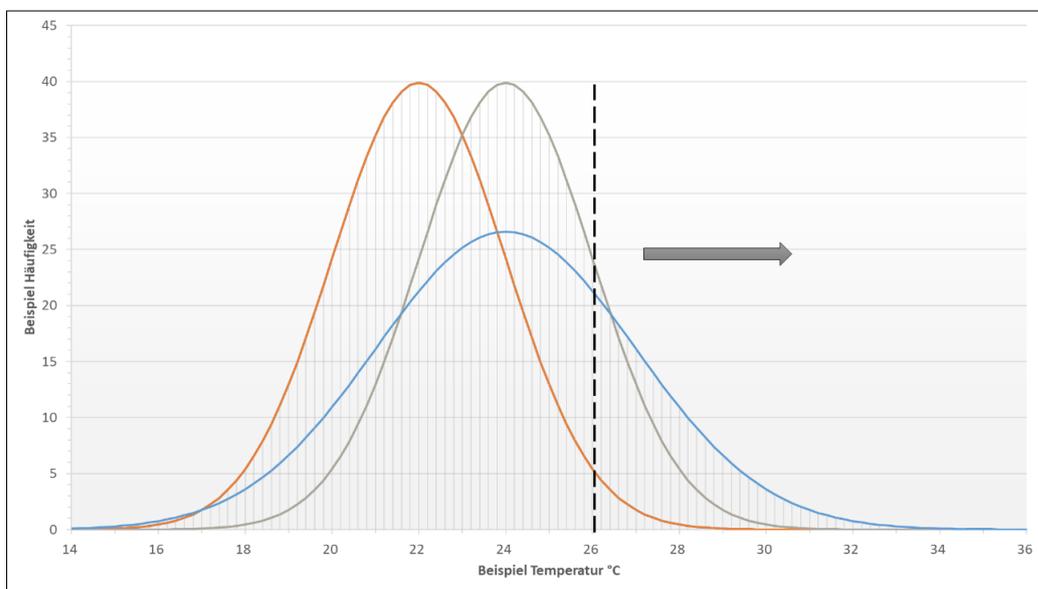


Abbildung 5: Beispiel der Häufigkeitsverteilung der Temperatur bei einer Temperaturzunahme in der Zukunft (Eigene Darstellung nach Schär & Fischer, 2008)

In Abbildung 5 ist die Verschiebung der Häufigkeitsverteilung der Temperatur bei einer Temperaturzunahme in der Zukunft dargestellt. Sommertage bzw. heiße Tage stellen Extremwetterereignisse hinsichtlich der Temperatur am oberen Ende einer Normalverteilung (Abbildung 5, rot) dar, während besonders kühle Sommertage am unteren Ende der Normalverteilung zu finden sind. Sofern man sich – beispielsweise aufgrund einer Klimaerwärmung – auf eine Verschiebung der Verteilung beschränkt, kann das Verhalten des Klimaparameters durch die Erwärmung  $\Delta T$  und die Breite der Verteilung, gegeben durch die Standardabweichung  $\sigma$ , vollständig bestimmt werden (Latif, 2009, S. 113).

So kann die Temperaturverteilung bei einer Klimaerwärmung mit einer reinen Verschiebung der Temperaturwerte (Abbildung 5, grau) oder mit einer geänderten Standardabweichung (Abbildung 5, blau) ablaufen. Letzteres zeigt dabei beispielhaft eine Zunahme der Extremereignisse mit gleichzeitiger Abnahme der Amplitude.

Im Fall der reinen Verschiebung der Häufigkeitsverteilung entspricht die Distanz der Verschiebung der Erwärmung und bedeutet bei einer Temperaturzunahme von +1°C eine Häufigkeitszunahme warmer Extreme von 2% auf 16% für eine Beispielregion in Europa (Schär & Fischer, 2008).

Die sommerlichen Kenntage „Sommertag“ und „Heißer Tag“ treten hauptsächlich in den Monaten Juni bis September auf. Die Monate Juni bis September werden daher in der gesamten Untersuchung als Sommerzeitraum herangezogen. Diese Kenntage stellen dabei eine gute Möglichkeit dar, um die Klimaszenarien zu bestimmen. In Tabelle 1 ist die durchschnittliche Anzahl der Sommertage den Sommertagen im Untersuchungszeitraum gegenübergestellt. Entsprechend der WMO (World Meteorological Organization) – der meteorologischen Fachorganisation der UNO – ist ein mindestens 30-jähriger Zeitraum notwendig, um eine statistische Auswertung des Klimas durchzuführen (Häckel, 2012, S. 317). Für Auswertungen im Zusammenhang mit dem längerfristigen Klimawandel nutzt der Deutsche Wetterdienst den Zeitraum 1961-1990 als Normalperiode, während im Kontext des zeitnahen Klimamonitorings die aktuelle Referenzperiode 1991-2020 verwendet wird (Kaspar, Imbery, & Friedrich, 2021). Der Vollständigkeit halber wurden daher alle drei Referenzperioden in den Tabellen 1 bis 3 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Sommertage in Augsburg (Daten: Deutscher Wetterdienst, 2023)

Monat	2020	2021	2022	Ø	Mittel 1961 -1990	Mittel 1971 - 2000	Mittel 1981 - 2010	Ø
<b>Mai</b>	0.00	1.00	4.00	2.00	2.40	2.60	3.20	2.73
<b>Juni</b>	3.00	14.00	15.00	10.67	7.00	6.70	8.30	7.33
<b>Juli</b>	16.00	7.00	22.00	15.00	11.30	11.30	12.70	11.77
<b>Aug</b>	15.00	7.00	21.00	14.33	9.70	11.50	11.90	11.03
<b>Sept</b>	8.00	2.00	12.00	4.50	3.40	2.80	2.90	3.03
<b>Anzahl</b>	42.00	31.00	74.00	46.50	33.80	34.90	39.00	35.90

Die Anzahl der Sommertage im Jahr 2021 entspricht nahezu dem langjährigen Mittel und liegt sogar in den späten Sommermonaten Juli bis September unter dem Durchschnitt. Im Gegensatz dazu liegt das Jahr 2020 eher über dem Mittel, während 2022 mit 74 Sommertagen ein extremes Sommerjahr darstellt. Insbesondere im Hinblick auf die prognostizierte Klimaänderung ist das Jahr 2022 hilfreich, da es im Mittel dem prognostizierten Klima in 30 Jahren hinsichtlich der Anzahl der Sommerjahre entspricht.

Betrachtet man die Anzahl der heißen Tage (Tabelle 2) ist die extreme Situation im Jahr 2022 besonders auffällig und entspricht der angesprochenen Häufigkeitszunahme warmer Extreme (Abbildung 5). Für die Auswahl der Klimaparameter war der Umstand sehr hilfreich ein Durchschnittsjahr sowie ein besonders warmes Jahr, welches der prognostizierten Häufigkeitszunahme warmer Extreme entspricht, im Untersuchungszeitraum betrachten zu können.

Die Lufttemperaturwerte aus 2021 liegen in etwa im Bereich des langjährigen Mittels (1971-2000) bzw. unterschreiten die Temperatur um 0,3°C. Daher wurden die Messergebnisse des Jahres 2021 im Modell repräsentativ für ein Durchschnittsjahr (KD) herangezogen. Im Gegensatz dazu liegen die Temperaturwerte 2022 im Mittel 1,3°C über dem langjährigen Durchschnitt und wurden entsprechend gewählt, um die Situation bei fortschreitender Temperaturzunahme in der Zukunft darzustellen und das Klima eines Hitzejahres (KH) zu modellieren. Außerdem wurden die Sommertemperaturen für das Klimaszenario KK im Mittel um 1°C (über 2022 hinaus) erhöht, um eine extreme Situation unter Annahme einer fortschreitenden Klimaerwärmung zu simulieren.

Tabelle 2: Übersicht der heißen Tage in Augsburg (Daten: Deutscher Wetterdienst, 2023)

Monat	2020	2021	2022	Ø	Mittel 1961 -1990	Mittel 1971 - 2000	Mittel 1981 - 2010	Ø
<b>Mai</b>	0.00	0.00	1.00	0.50	0.10	0.10	0.10	0.10
<b>Juni</b>	0.00	3.00	3.00	3.00	0.70	0.60	0.90	0.73
<b>Juli</b>	3.00	0.00	7.00	5.00	2.30	2.50	3.00	2.60
<b>Aug</b>	4.00	0.00	4.00	4.00	1.70	2.00	2.00	1.90
<b>Sept</b>	0.00	0.00	4.00	0.00	0.20	0.20	0.10	0.17
<b>Anzahl</b>	7.00	3.00	15.00	12.50	5.00	5.40	6.10	5.50

Auf die gewählten Daten zur Errechnung der Trinkwassertemperatur wird in den Kapiteln 7.2 und 7.3 näher eingegangen. Zunächst soll die Temperaturentwicklung in den verschiedenen Bereichen des Versorgungsgebiets im Allgemeinen betrachtet werden.

Neben der für die Trinkwassertemperatur besonders relevanten Temperaturentwicklung im Sommer muss auch die Wintertemperatur angesprochen werden. Auch hier können die Kenntage näher untersucht werden. So ist bereits nach den Klimaprojektionen (2021 – 2050) eine Abnahme der Eis- und Frosttage (Tageshöchst- bzw. Tagestiefsttemperatur < 0°C) prognostiziert worden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012).

Diese Entwicklung wird im Untersuchungszeitraum (2020 bis 2022) hauptsächlich anhand der Anzahl der Eistage ersichtlich (Tabelle 3). Im Untersuchungszeitraum ist eine deutlich geringere Anzahl an Eistagen im Vergleich zu den aufgeführten langjährigen Mitteln aufgetreten. Auch anhand der Entwicklung der langjährigen Mitteln zueinander ist ein Rückgang der Eistage festzustellen.

Tabelle 3: Anzahl Eis- und Frosttage im Untersuchungsgebiet im Vergleich zum langjährigen Mittel (Daten: Deutscher Wetterdienst, 2023)

Monat	2020	2021	2022	Mittel 1961 -1990	Mittel 1971 - 2000	Mittel 1981 - 2010
<b>Eistage</b>	9	12	12	31.7	28.5	28.5
<b>Frosttage</b>	101	118	99	101.3	98.6	102.4

Weniger deutlich ist das Verhalten der Frosttage. Diese entsprechen im Untersuchungszeitraum dem langjährigen Mittel oder sind im Fall des Jahres 2021 sogar leicht erhöht. Grundsätzlich spiegelt sich die prognostizierte Abnahme der Eis- und Forsttage zumindest anhand der Eistage in dem kurzen Untersuchungszeitraum wider.

Im Trinkwassernetz sind höhere Wintertemperaturen für die Temperatur weniger relevant als die Sommertemperatur, da der kritische Temperaturbereich im Boden von  $> 20^{\circ}\text{C}$  bei weitem nicht erreicht wird. Jedoch führen höhere Temperaturen im Winter dazu, dass eine geringere Abkühlung im Boden stattfindet. Insbesondere für die Temperatur in der Gewinnung bedeutet dies, dass es mit einer höheren Ausgangstemperatur im Sommer bei steigenden Temperaturen zu einem schnelleren Erreichen der Maximaltemperatur im Trinkwasser kommt. In Kapitel 5.1.2 wird auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur näher eingegangen.

## 4 Bodentemperatur

Die Bodentemperatur stellt sowohl bei der Gewinnung als auch in der Verteilung einen zentralen Faktor dar, um die Trinkwassertemperatur im Modell zu errechnen. Vor allem in der Verteilung ist die Bodentemperatur für die Trinkwassertemperatur ausschlaggebend, da das Trinkwasser bei langer Verweilzeit in der Leitung die umgebende Bodentemperatur annimmt. Grund hierfür ist der 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Demnach fließt Wärme stets in Richtung fallender thermodynamischer Temperatur über die Systemgrenze (Baehr & Stephan, 2006, S. 1). Es besteht immer eine Energieübertragung zwischen zwei unterschiedlich temperierten Körpern. Die Trinkwassertemperatur wird somit direkt durch die Bodentemperatur in der Umgebung der Trinkwasserleitung beeinflusst. Dies macht deutlich, dass die Bodentemperatur für die Trinkwassertemperatur eine zentrale Rolle spielt.

Über die Oberflächentemperatur und den Wärmehaushalt eines Standortes ergibt sich die Bodentemperatur. Die Bodentemperatur ist demnach durch die Klimaparameter eines Standortes bedingt, somit kann das Klima über die Bodentemperatur in das Modell mit einbezogen werden.

Der Wärmehaushalt eines Standortes kann grundsätzlich über die Wärmehaushaltsgleichung dargestellt werden:

*Formel 1: Wärmehaushaltsgleichung (Tetzlaff, 1977)*

$$Q + B + V + H = 0$$

Mit:

Q = Nettostrahlungsstrom [W/m<sup>2</sup>]

B = Bodenwärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

V = Strom latenter Wärme [W/m<sup>2</sup>]

H = Strom fühlbarer Wärme [W/m<sup>2</sup>]

Über die Parameter Nettostrahlungsstrom sowie die Ströme fühlbarer und latenter Wärme werden die klimatischen Auswirkungen auf die Bodentemperatur beschrieben. Die stärkste Energiezufuhr und -abfuhr tritt an der Bodenoberfläche auf (Scheffer & Schachtschabel, 2002, S. 258). Um den Nettostrahlungsstrom zu erfassen, muss der reflektierte Anteil der Strahlung von der Globalstrahlung abgezogen werden. Dieser Anteil wird mithilfe des Albedowerts angegeben. Der Albedowert ist definiert als Verhältnis des reflektierten zum eingestrahnten Energiebetrag und kann auch als Absorptionsvermögen bezeichnet werden (Scheffer & Schachtschabel, 2002, S. 229). Je höher der Albedowert eines Körpers ist, desto höher ist der Anteil der reflektierten Strahlung. Dieser Wert unterscheidet sich nach Material bzw. Farbe der Oberfläche.

Da Trinkwasserleitungsnetze meist unterhalb von asphaltierten Straßenflächen verlaufen, sind Asphaltflächen als Oberflächenart besonders zu berücksichtigen. Der Aufbau einer Straße wird unterteilt in einen Oberbau (bestehend aus mehreren Schichten), gegebenenfalls einem Unterbau und dem Untergrund (Kaczmarczyk et al., 2008, S. 668). Der Unterbau ist dabei ein künstlich hergestellter Erdkörper, wenn der vorhandene Boden ausgetauscht werden muss, da dieser aufgrund seiner Eigenschaften hinsichtlich der Tragfähigkeit und Frostsicherheit nicht geeignet ist (ebd.). Nach Angaben des Versorgungsunternehmens wird im Untersuchungsgebiet ein einheitlicher Verfüllsand

verwendet, sodass von einer ähnlichen Bodenart im Bereich der Trinkwasserleitungen in Straßengräben auszugehen ist.

Asphaltflächen sind bezüglich der Albedowerte aufgrund von Alter und Sorte jedoch nicht einheitlich. Es kann dennoch nach Literaturangaben bei den am häufigsten verwendeten Asphaltarten davon ausgegangen werden, dass nur 10% der Globalstrahlung reflektiert wird (Fezer, 1995, S. 48f.). Die übrigen 90% werden im Fall des Asphaltes durch den Boden als Wärme absorbiert und als terrestrischer-thermischer Energiefluss (langwellig) wieder abgegeben (Roedel & Wagner, 2011, S. 55 f.).

Weiter wird der Wärmehaushalt eines Standortes über die Wärmebewegungen innerhalb eines Bodens bestimmt. Dabei können alle thermischen Prozesse im Boden über die folgenden drei physikalischen Größen beschrieben werden.

- **Spezifische volumetrische Wärmekapazität  $C_v$  [ $J \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]:** Wärmemenge um 1 kg Boden um 1°C zu erwärmen (Hartge, Horn, Bachmann, & Peth, 2014, S. 214)
- **Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]:** Temperaturveränderung in Abhängigkeit von Zeit (t) und Strecke (x) (Scheffer & Schachtschabel, 2002, S. 256).
- **Thermische Leitfähigkeit  $\lambda$  [ $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]:** Wärmeenergie die im stationären Zustand in einem homogenen Medium (Querschnitt 1 m<sup>2</sup>, Länge 1 m) bei einem Temperaturgradienten von 1°C/m pro Sekunde fließt (Hartge, Horn, Bachmann, & Peth, 2014, S. 215).

Wärmebewegungen innerhalb des Bodens werden durch Wärmeleitung und Konvektion hervorgerufen, wobei in einem nicht wassergesättigten Boden der Wasserdampftransport als Wärmetransportmechanismus eine erhebliche Rolle spielt (Scheffer & Schachtschabel, 2002, S. 257). Grund dafür ist, dass die Wärmekapazität eines Bodens (Formel 2) aus den Wärmekapazitäten der einzelnen Phasenanteilen zusammengesetzt ist. Nachdem bei Wärmetransportvorgängen die Zusammensetzung der festen Matrix im Allgemeinen als konstant angesehen werden kann, ist die Wärmekapazität eines Bodens meist eine lineare Funktion des Wassergehalts (Gisi et al., 1997, S. 82).

*Formel 2: Wärmekapazität des Bodens (Gisi et al., 1997, S. 23, 82)*

$$C_v = mC_{VM} + \theta C_{VW} + \varepsilon C_{VA}$$

Mit:

$C_v$  = volumetrische Wärmekapazität des Bodens [ $J/K/m^3$ ]

m = Matrixanteil des Bodens (Masse-% od. Vol.-%)

$\theta$  = Wassergehalt des Bodens (Masse-% od. Vol.-%)

$\varepsilon$  = Luftgehalt des Bodens (Masse-% od. Vol.-%)

$C_{VM}$  = volumetrische Wärmekapazität des Matrixanteils [ $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$C_{VW}$  = volumetrische Wärmekapazität des Wasseranteils [ $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$C_{VA}$  = volumetrische Wärmekapazität des Luftanteils [ $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

Die massenbezogene Wärmekapazität eines Bodens wird auch als spezifische Wärme (c) bezeichnet und verknüpft durch Multiplikation mit der Dichte ( $\rho$ ) die volumen- und massenbezogene Wärmekapazität (Hartge, Horn, Bachmann, & Peth, 2014, S. 216). Die Werte für die spezifische Wärme und Dichte eines Bodens unterscheiden sich für verschiedene Komponenten des Bodens und in Abhängigkeit vom Wassergehalt (Scheffer & Schachtschabel, 2002, S. 256).

Da in den Straßengräben ausschließlich verdichteter Verfüllsand verwendet wird, ist somit hinsichtlich der Bodenart von einer homogenen Bodenstruktur und somit von homogenen Eigenschaften hinsichtlich der Temperaturleitung auszugehen.

In einem homogenen Boden erfolgt der Wärmetransport unter der Annahme, dass es sich nur um Wärmeleitung handelt (Gisi et al., 1997, S. 84). So kann der Wärmetransport vereinfacht dargestellt werden durch:

Formel 3: Wärmetransportgleichung (nach Gisi et al., 1997, S. 84 & nach Hartge et al., 2014, S. 222)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Mit:

T = Temperatur [°C]

A = Temperaturleitfähigkeit [mm<sup>2</sup>/s]

x = Tiefe [m]

In Abbildung 6 ist ein Temperaturprofil im Untergrund zu verschiedenen Jahreszeiten skizziert. Während in den ersten Metern nahe der Oberfläche eine deutliche Schwankung der Temperatur im Jahresgang festzustellen ist, nimmt diese mit der Tiefe ab. Ab einer Tiefe von 20 m ist die

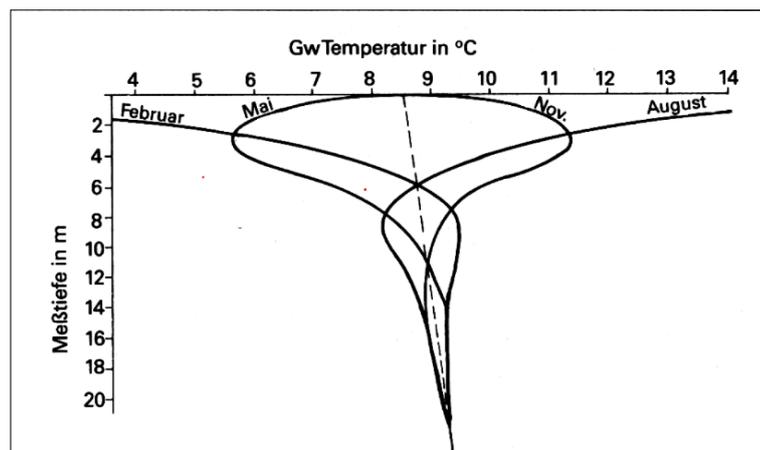


Abbildung 6: Temperaturprofil im Untergrund zu verschiedenen Jahreszeiten (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001)

Schwankung im Jahresgang kaum festzustellen (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001). In größerer Tiefe ergibt sich im Mittel eine Temperaturzunahme von 3°C pro 100 m.

Das Verhalten der Bodentemperatur in größerer Tiefe ist vornehmlich für die Temperatur in der Gewinnung zu berücksichtigen. So muss bei Flachbrunnen (Quartärbrunnen) von einer deutlicheren jahreszeitlichen Schwankung der Temperatur ausgegangen werden als bei Tiefbrunnen. Die Zunahme der Bodentemperatur in größeren Tiefen ist zudem für Tiefbrunnen relevant (Kapitel 5.1).

In der Trinkwasserverteilung sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Bodentemperatur wesentlich relevanter, da hier lediglich die ersten ein bis zwei Meter betrachtet werden müssen. Grund hierfür ist die Hauptverlegetiefe der Trinkwasserleitungen in diesem Bereich. Folglich ist, wie in Abbildung 6 ersichtlich, die Schwankungsbreite der Bodentemperatur bedeutend höher. In Abbildung 7 ist die Temperaturentwicklung mit der Tiefe anhand einer Messung abgebildet. In Kapitel 4.1 wird näher auf die hier besprochene Bodentemperaturmessung eingegangen. Es handelt sich hierbei um eine Asphaltfläche, die den ganzen Tag im Schatten liegt.

Anzumerken ist, dass die Ausreißer (Abbildung 7) mit dem Aufbau der Messstellen zu begründen sind. Zur Installation der Messstelle wurde ein Loch mit etwa 2,5 cm Durchmesser in die Asphaltoberfläche gebohrt, um die Messstelle im Boden zu versenken. Die Bohrung wurde mit dem herausgebohrten Asphaltstück erneut verschlossen. Durch die Störung der Oberfläche kommt es dennoch bei Starkregenniederschlägen zu einem schnelleren Versickern des Wassers über die Bohrkante. Der Niederschlag transportiert somit die Wärme in tiefere Bodenschichten, sodass es zu einer kurzzeitigen Temperaturspitze in der Tiefe kommen kann, wie in der Abbildung erkennbar.

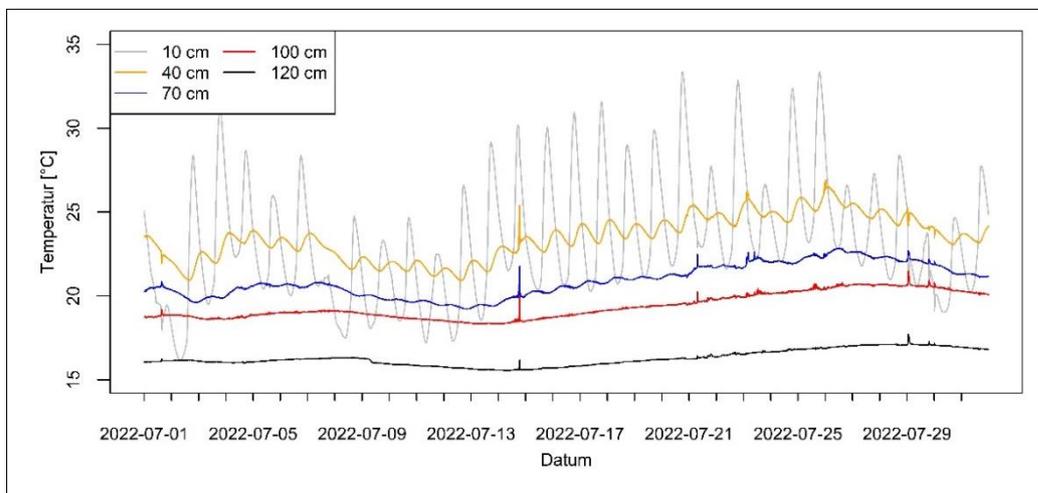


Abbildung 7: Ausschnitt Bodentemperatur in fünf verschiedenen Tiefen (Juli 2022), Messstelle: Asphalt Schatten

Gemessen wurde die Temperatur in fünf verschiedenen Tiefen. Aufgrund der periodischen Einstrahlungsintensität an der Bodenoberfläche durch den tages- und jahreszeitlichen Wechsel entsteht ein regelmäßiges Temperaturverhalten mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden (Hartge, Horn, Bachmann, & Peth, 2014, S. 255).

Die Tiefe von 10 cm wurde für die Messung gewählt, um eine annähernde Oberflächentemperatur zu erfassen, während die Sensoren in einer Tiefe von 40 cm und 70 cm die Temperaturentwicklung im Untergrund mit zunehmender Tiefe abbilden. Relevant für die Temperatur im Bereich der Trinkwasserleitung sind die Daten der Sensoren in einer Tiefe von 100 cm und 120 cm. Grund hierfür ist, dass in dem Untersuchungsgebiet nach Angaben des Versorgungsunternehmens bis vor einigen Jahren Leitungen hauptsächlich in einer Tiefe von 120 cm verlegt wurden. Die aktuell bevorzugte Verlegetiefe liegt bei 100 cm. Die Bodentemperaturdaten aus 100 und 120 cm Tiefe sind daher besonders hilfreich, um einen Vergleich der alten und neuen Verlegetiefe durchführen zu können.

Die tageszeitliche Schwankung ist in einer Tiefe von 10 cm deutlich sichtbar, während bereits in 40 cm Tiefe eine merklich geringere Temperaturamplitude festzustellen ist (Abbildung 7). Außerdem tritt mit zunehmender Tiefe eine Verschiebung der Temperaturmaxima auf. In einer Tiefe von 100 cm sind die tageszeitlichen Schwankungen hingegen kaum festzustellen. Bei der Betrachtung einer längeren Periode werden die jährlichen Schwankungen sichtbar (Abbildung 9). Hierauf wird später näher eingegangen.

Ausgehend von der Oberflächentemperatur und unter Berücksichtigung der Verschiebung der tages- und jahreszeitlichen Temperaturmaxima, lässt sich in einem homogenen Boden mit unbegrenzter Tiefe die Bodentemperatur zeit- und tiefenabhängig beschreiben. Bei bekannter Wärmezufuhr an der Oberfläche kann so die Temperatur in einzelnen Bodentiefen ermittelt werden.

Formel 4 zeigt wie auf Basis der allgemeinen Transportdifferenzialgleichung die Bodentemperatur in den einzelnen Tiefen errechnet werden kann.

*Formel 4: Analytische Lösung der allgemeinen Transportdifferenzialgleichung für den Wärmetransport (Hartge, Horn, Bachmann, & Peth, 2014, S. 255 f.)*

$$T(x, t) = T_A + A \times \sin\left(\omega \times t - \frac{x}{d}\right) \times e^{-\frac{x}{d}}$$

Mit:

$T_A$  = Durchschnittstemperatur

$t$  = Temperatur

$A$  = Temperaturamplitude

$\omega = 2 \frac{\pi}{P}$  oder Periode  $P = 2\pi/\omega$

$x$  = Tiefe

$d$  = Dämpfungstiefe mit  $d = \sqrt{\frac{\kappa}{\pi} \cdot P}$

Grundsätzlich ergibt sich der Wärmehaushalt im Untergrund aus den natürlichen Einflüssen, wie der Sonneneinstrahlung oder dem Wärmeeintrag durch versickernden Niederschlag und den anthropogenen Einflüssen, wie dem Wärmeeintrag durch Leitungen oder Gebäude (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001). In diesem Zusammenhang können über die Bodentemperatur weitere Einflussfaktoren wie Fremdleitungen in das Modell einbezogen werden, sofern die Prozesse, wie sich die weiteren Einflussfaktoren auf die Bodentemperatur auswirken, quantifiziert worden sind.

Zur Berechnung der Trinkwassertemperatur anhand verschiedener Klimaprojektionen im Modell ist eine direkte Ableitung der Bodentemperatur von meteorologischen Daten wünschenswert, in der Realität jedoch schwer zu realisieren. Der Grund hierfür ist, dass es zur Bestimmung qualitativ hochwertiger Bodenwärmestromdaten anhand von meteorologischen Daten ohne in-situ Daten keine Parametrisierungsmethode gibt (Liebethal, 2005).

Obwohl die Bodentemperatur mithilfe von Temperaturloggern eine einfach zu erfassende Größe ist, besteht im Untersuchungsgebiet aufgrund der geringen Anzahl von geeigneten Messungen eine große Unsicherheit hinsichtlich der Datenlage. Zu Projektbeginn lagen keine Daten zur Bodentemperatur im Bereich von 100 cm bis 120 cm vor, welche der Hauptverlegetiefe der Trinkwasserleitungen im Untersuchungsgebiet entspricht. Dabei sind insbesondere die Bodentemperaturen unter Asphaltflächen ausschlaggebend, da der Großteil der Trinkwasserleitungen im Straßengraben unter Asphalt verlegt wurde. In Kapitel 4.1 wird die Bodentemperaturmessung im Detail besprochen.

Aufgrund der Datenlage muss über verschiedene Methoden eine Abschätzung der Bodentemperatur für das Modell erstellt werden. Daher soll neben der Bodentemperaturmessung im Folgenden dargestellt werden, wie die Oberflächen- und Bodentemperatur aus der vorhandenen Datenlage ermittelt werden kann und welche weiteren Möglichkeiten bestehen, um auf die Bodentemperatur in Leitungstiefe zu schließen. Im Hinblick auf den Projektumfang wurde für die Modellierung der

Temperatur mit vereinfachten Daten aus den in-situ Messungen gearbeitet. Eine Kopplung des Trinkwassertemperaturmodells an weitere Modelle zur Bestimmung der Bodentemperatur kann jedoch weitere Informationen liefern, um die Problematik der Bodentemperatur minimieren.

#### 4.1 Bodentemperaturmessung

Zur Ermittlung der Temperatur im Netz sind grundsätzlich Bodentemperaturdaten der oberen 120 cm notwendig, da dies der Hauptverlegetiefe von 100 cm und 120 cm der Trinkwasserleitungen im Untersuchungsgebiet entspricht. Für das Untersuchungsgebiet sind derartige Daten, insbesondere von Asphaltflächen, nicht vorhanden. Daher wurden zu Projektbeginn fünf Bodentemperaturlogger installiert, welche in fünf Messtiefen Daten in einem 10 Minuten Intervall aufzeichnen. Der Untersuchungszeitraum liegt zwischen dem 16.06.2020 und dem 25.10.2022. Die Messtiefen sind unterteilt in 10 cm – 40 cm – 70 cm – 100 cm – 120 cm. Für das Modell ausschlaggebend sind die Daten in der dominierenden Verlegetiefe von 100 bis 120 cm. Bei den Bodentemperaturloggern handelt es sich um HOBO® Logger (Micro Station H21-USB) zur Datenaufzeichnung und jeweils fünf Sensoren (12-Bit Temperature Smart Sensor S-TMB-M0xx). Die technischen Angaben befinden sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Technische Daten (ONSET Computer Corporation, 2018)

<b>Messbereich</b>	-40°C bis +100°C
<b>Genauigkeit</b>	±0,2°C (zwischen 0°C und 50°C)
<b>Auflösung</b>	< 0.003 (zwischen 0°C und 50°C)
<b>Drift</b>	< 0,1°C pro Jahr
<b>Reaktionszeit</b>	< 2 Minuten in Luftstrom bei 2 m/s typisch < 1 Minute in aufgerührtem Wasserbad typisch
<b>Betriebstemperaturbereich (In-Kabel-Elektronik)</b>	-40°C bis +75°C
<b>Kabellänge</b>	2 m

Da sich der Großteil der Trinkwasserleitungen unter Asphaltflächen befinden, wurden zwei Asphaltflächen gewählt, um Standorte mit dieser Oberfläche zu erfassen: ein Standort mit vollständiger Sonnenexposition (Asphalt Sonne) sowie ein Standort mit vollständiger Beschattung (Asphalt Schatten). Zusätzlich ist eine Grünfläche direkt an den Standort Asphalt Schatten angrenzend untersucht worden. Ein Mischbereich hinsichtlich der Beschattung stellt der Standort Wohnsiedlung dar. Hier befindet sich der Logger in einem Erdbereich angrenzend an eine Straße. Zur Untersuchung der Bodentemperatur in der Gewinnung ist zusätzlich ein Waldstandort (Stadtwald Augsburg) gewählt worden. Hierbei handelt es sich um einen Waldstandort am Rande eines der zahlreichen Trinkwasserschutzgebiete der swa.

Die Temperatursensoren sind an einem Stab befestigt, welcher in ein zuvor präpariertes Erdloch versenkt wird. Bei den Standorten Stadtwald und Grünfläche war dies mithilfe eines Pürckhauers möglich, die Asphaltflächen wurden mithilfe eines Asphaltbohrers präpariert. Dadurch muss von einer Störung des Untergrundes ausgegangen werden. Insbesondere bei den Asphaltflächen ist durch die Zerstörung der Oberfläche ein Eintreten von Niederschlagswasser möglich, welches zu kurzzeitigen, aber signifikanten Temperaturänderungen bei Niederschlagsereignissen führt (Abbildung 7).

Um den Einfluss des Stabes auf die Temperaturverteilung im Boden zu minimieren, muss die Wärmeleitfähigkeit des Materials berücksichtigt werden, das für die Messstelle verwendet wird. Beispielsweise können die Materialien Holz, Eisen und GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) verglichen werden.

So wird für Holz (trocken) eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,1 - 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Kulching, 2004, S. 644) angegeben. Etwas höher ist der Wert für GFK mit  $0,2 - 0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Reichelt Chemietechnik, 2021, S. 32) oder deutlich höher für Eisen mit  $81 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Kulching, 2004, S. 644). Da es sich bei GFK um ein Polymer handelt, sind zu der genauen Wärmeleitfähigkeit Herstellerangaben notwendig.

Aufgrund der ungenauen Literaturangaben für Holz und GFK betreffend die Leitfähigkeiten wurde in einem Feldversuch zunächst untersucht welches Material sich als Befestigung besser eignet. Eisen wurde aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit ausgeschlossen.

In dem Feldversuch wurden jeweils zwei Sensoren in einer Tiefe von 10 cm und 70 cm an einem Bambusstab (vgl. Holz) und an einem GFK-Stab angebracht und in einem Abstand von wenigen cm nebeneinander in einer Grünfläche installiert. Über einen Zeitraum von 24 h wurde in einem Intervall von einer Minute die Temperatur aufgezeichnet.

Für das Tagesmittel konnte, zwischen dem Bambus- und dem GFK-Stab nur ein geringer Unterschied festgestellt werden. Für die Tiefe von 70 cm beträgt der Unterschied  $0,06^\circ\text{C}$  und für 100 cm ist der Unterschied mit  $0,17^\circ\text{C}$  etwas höher, wobei die GFK-Werte oberhalb der Bambuswerte liegen. Auf die Genauigkeit der Sensoren wird nachfolgend näher eingegangen.

Auffällig in dem Feldversuch waren jedoch besonders hohe Temperaturen in einer Tiefe von 10 cm. Hier wurden bei einer Außentemperatur von  $21^\circ\text{C}$  am Bambusstandort Temperaturen um  $18,5^\circ\text{C}$  gemessen, während für den GFK Standort etwas höhere Temperaturen von  $19,3^\circ\text{C}$  auftraten. Dies lässt die Vermutung zu, dass sich mit steigender Temperatur der Unterschied zwischen beiden Materialien vergrößert. Dies entspricht den in der Literatur angegebenen etwas höheren Wärmeleitfähigkeitswerten von GFK gegenüber Bambus (Holz). Höhere Wärmeleitfähigkeiten führen zu einer stärkeren Temperaturübertragung von der Bodenoberfläche in den Untergrund und somit zu einer möglichen Verfälschung der Ergebnisse.

Da sich, insbesondere bei versiegelten Flächen wie Asphalt, wesentlich höhere Temperaturen als  $21^\circ\text{C}$  an der Bodenoberfläche ergeben, war von einem merklich größeren Unterschied zwischen den GFK- und Bambuswerten mit zunehmender Temperatur auszugehen, sodass Bambus als Material gewählt wurde.

Um eine gute Vergleichbarkeit aller Sensoren zu erhalten, soll kurz auf die Genauigkeit der Sensoren eingegangen werden. Hierfür wurde die Temperaturabweichung vor Installation der Messstellen in einem Versuchsaufbau überprüft, indem alle Sensoren in demselben Wasserkörper installiert wurden. Als Referenzsensor wurde Stadtwald 10 cm gewählt. Die Temperaturänderung im Tagesgang über sechs Tage wurde dabei untersucht. Zusätzlich konnte an zwei der Tage über die Zugabe von kaltem oder heißem Wasser eine plötzliche Temperaturänderung provoziert werden.

Betrachtet wurde zum einen die Standardabweichung ( $\sigma$ ) an den unbeeinflussten Tagen bezogen auf den Mittelwert des Referenzsensors, sowie die prozentuale Abweichung der Werte. Allgemein

liegen alle Werte an den unbeeinflussten Tagen deutlich unter 1% Abweichung mit Ausnahme des Sensors Stadtwald (70 cm), welcher zu Beginn der Messung (erste 24 h) eine Abweichung von 1,10 % aufweist. An den darauffolgenden Daten zeigt der Sensor jedoch geringere prozentuale Abweichungen mit 0,56% bzw. 0,35%. Insgesamt wird eine etwas höhere Schwankungsbreite für diesen Sensor vermutet. Auch der Sensor Wohnsiedlung (40 cm) zeigt eine leicht erhöhte prozentuale Abweichung von maximal 0,54%. Die geringsten Abweichungen im Bezug zum Referenzsensor sind bei Asphalt Schatten 100 cm mit einer Abweichung zwischen -0,11% und 0,02% festzustellen. Die Standardabweichung aller Sensoren liegt unter 0,15.

Die Ergebnisse der Überprüfung zeigen, dass nur geringe Abweichungen zwischen den Sensoren bestehen und die Ergebnisse der Temperaturmessungen gut vergleichbar sind. Eine geringe Abweichung im Nachkommabereich kann, im Hinblick auf die ohnehin bestehenden Ungenauigkeiten hinsichtlich der Bodentemperatur, vernachlässigt werden.

Des Weiteren sind drei Fehlmessungen im Untersuchungszeitraum zu berücksichtigen. Zwischen dem 06.04.2021 und dem 03.06.2021 wurden bei der Messstelle Wohnsiedlung keine Werte aufgezeichnet. Dies betrifft alle Höhen der Messstelle. Ebenfalls sind alle fünf Sensoren zwischen dem 08.03.2022 und dem 05.04.2022 bei Standort Asphalt Schatten ausgefallen.

Im Fall der Messstelle Stadtwald wurde am 08.08.2021 der Sensor in der Tiefe von 100 cm beschädigt, sodass die gesamte Messstelle ausgetauscht werden musste. Grund hierfür ist die Bauweise der Messstelle, welche es nicht möglich macht, einzelne Sensoren in bestimmten Tiefen zu wechseln. Der Austausch der Messstelle fand am 18.10.2021 statt. Die ersten Daten zeigen jedoch, dass die Messstelle in 120 cm deutlich niedrigere Werte nach dem Austausch zeigte als vor dem Austausch. Möglicherweise kam es zu einem Verrutschen des Sensors bei der Installation der Messstelle. Dies ist für die Daten dieser Messstelle zu berücksichtigen.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Bodentemperaturmessung besprochen werden. Dabei liegt vor allem der Unterschied der Standorte aufgrund ihrer Oberfläche im Fokus der Betrachtung. Wie divers das Temperaturverhalten aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Standorte ist, wird bei einem direkten Vergleich der Messungen in 10 cm Tiefe deutlich (Abbildung 8). Insbesondere die tageszeitlichen Schwankungen unterscheiden sich bei den einzelnen Standorten. Während der Standort Asphalt Sonne mit den ausgeprägtesten Schwankungen besonders hervorsticht, sind im Gegensatz dazu die Tagesschwankungen bei dem Standort Stadtwald wesentlich geringer.

Tabelle 5: Kennzahlen der Standorte in 10 cm Tiefe im Untersuchungszeitraum (Jun 2020 – Okt 2022)

10 cm	Asphalt Sonne	Asphalt Schatten	Grünfläche	Wohnsiedlung	Stadtwald
Min [°C]	-3,12	-2,92	0,55	0,83	1,97
Max [°C]	49,14	33,83	28,39	30,67	21,44
Mean [°C]	17,26	13,21	12,59	12,54	10,65

Die Kennzahlen der Messungen in 10 cm Tiefe im Vergleich verdeutlichen die hohe Schwankungsbreite der asphaltierten Flächen, während natürliche Oberflächen geringere Schwankungen aufweisen (Tabelle 5). Der Einfluss der Oberfläche wird im direkten Vergleich der Asphaltfläche Schatten und Grünfläche ersichtlich, da letztere im Mittel deutlich geringere Temperaturen aufweisen, trotz

vergleichbarer Einstrahlung und direkt angrenzender Lage. Dies verdeutlicht den Einfluss der Oberfläche auf die Bodentemperatur.

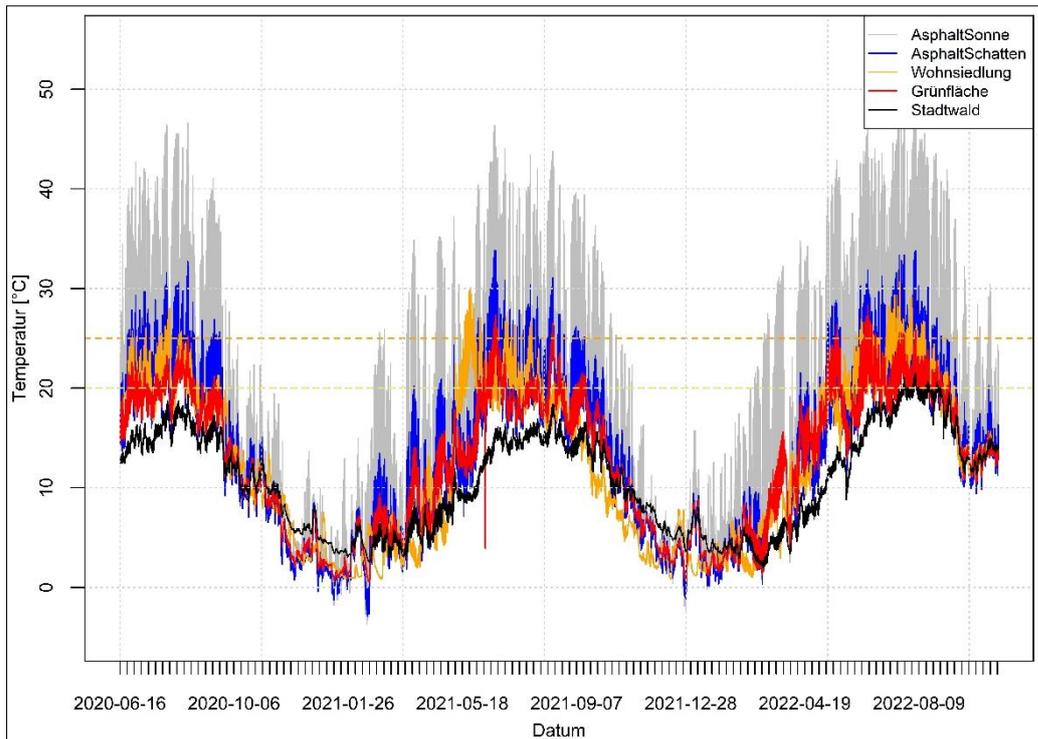


Abbildung 8: Bodentemperatur aller fünf Standorte in 10 cm Tiefe

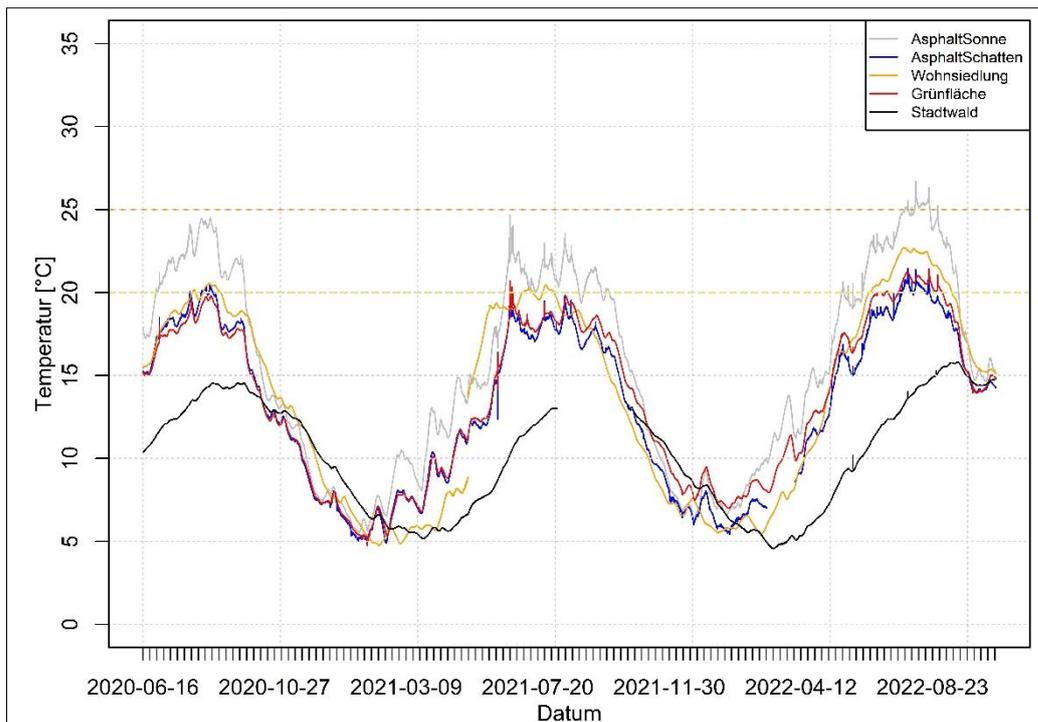


Abbildung 9: Bodentemperatur aller fünf Standorte in 100 cm Tiefe

Für die Trinkwassertemperatur sind die Messergebnisse in den Tiefen 100 cm und 120 cm relevant, da diese den beiden Hauptverlegetiefen der Trinkwasserleitungen entsprechen. Hier werden auch die jahreszeitlichen Schwankungen sichtbar (Abbildung 9), mit den höchsten Temperaturen im Sommer und den niedrigsten im Winter. Alle Standorte in bebauten Bereichen weisen einen ähnlichen Verlauf der Bodentemperatur auf. Einzig der Standort Stadtwald zeigt einen Versatz der Minimal- und Maximaltemperaturen sowie eine Verzögerung in der Temperatur Zu- und Abnahme im Jahresgang. Aber auch die Grünfläche, welche sich nahe der Asphaltfläche Schatten befindet, erwärmt sich aufgrund der sie umgebenden versiegelten Flächen früher im Jahr.

Große Temperaturunterschiede werden außerdem durch den Einfluss der Beschattung erzeugt, was der direkte Vergleich von Asphaltfläche Schatten und Sonne (Tabelle 5 und Tabelle 6) verdeutlicht. Dabei treten unter Asphaltfläche Sonne (100 cm Tiefe) zeitweise Temperaturen von über 20°C und kurzzeitig von über 25°C auf. Asphaltfläche Schatten hingegen weist nur während langanhaltender oder stark ausgeprägter Hitzeperioden kurze Zeiträume mit Temperaturen von 20°C in der gleichen Tiefe auf. Insbesondere Temperaturen von über 25°C im Boden nahe der Trinkwasserleitungen sind für die Einhaltung der Regelwerksvorgaben relevant.

Die Ergebnisse der Asphaltflächen sind für die unter Straßen verlegten Leitungen besonders berücksichtigt worden und stellen für das Modell die Extremstandorte dar. Asphalt Sonne repräsentiert einen Standort, welcher die maximale Einstrahlung über den Tag erfährt und bildet somit die Temperaturobergrenze. Standort Asphalt Schatten hingegen bildet die Temperaturuntergrenze für Asphaltstandorte, da hier ein Asphaltstandort mit der geringsten Energiezufuhr über direkte Einstrahlung repräsentiert wird. Da die meisten Straßen im Untersuchungsgebiet im Tagesgang eine sich ändernde Beschattung erfahren, liegen die Bodentemperaturen unter den meisten Asphaltflächen voraussichtlich zwischen der festgelegten Maximal- und Minimaltemperatur.

Tabelle 6: Kennzahlen der Standorte in 100 cm Tiefe im Untersuchungszeitraum (Jun 2020 – Okt 2022)

100 cm	Asphalt Sonne	Asphalt Schatten	Grünfläche	Wohnsiedlung	Stadtwald
Min [°C]	5,34	4,87	4,74	4,74	4,56
Max [°C]	26,69	21,46	21,44	22,71	15,82
Mean [°C]	15,31	12,96	13,33	13,56	10,08

In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Messergebnisse aller erfassten Bodentiefen der beiden Asphaltstandorte dargestellt. Hier soll noch einmal besonders auf die Auswirkung der hohen Temperaturen nahe der Oberfläche (10 cm Tiefe) bei Asphalt Sonne im Vergleich zu Asphalt Schatten und der sich daraus ergebenden Energieübertragung in größere Tiefen hingewiesen werden.

Im Hinblick auf die prognostizierte Temperaturzunahme in der Zukunft sowie die Zunahme der Sommer- und Hitzetage ist der Vergleich eines Durchschnittsjahres (2021) mit einem Hitzejahr (2022) interessant. So zeigt sich in 100 cm Tiefe bei der Messstelle Asphalt Schatten, dass im Durchschnittsjahr keine Überschreitung von 20°C und bei Asphalt Sonne keine Überschreitung von 25°C stattfindet. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Hitzejahr 2022, welches entsprechend den Klimaprognosen zukünftig häufiger zu erwarten ist (Kapitel 3), eine deutliche Entwicklung der Bodentemperatur in dem Bereich von über 20°C bzw. über 25°C. Bei einer stärkeren Erhöhung der

Lufttemperatur und mit Zunahme von länger andauernden Strahlungswetterlagen in der Zukunft ist entsprechend von höheren Bodentemperaturen auszugehen. Die Einbindung der Bodentemperatur und der zugehörigen Klimaszenarien in das Modell wird in Kapitel 7.3 näher ausgeführt.

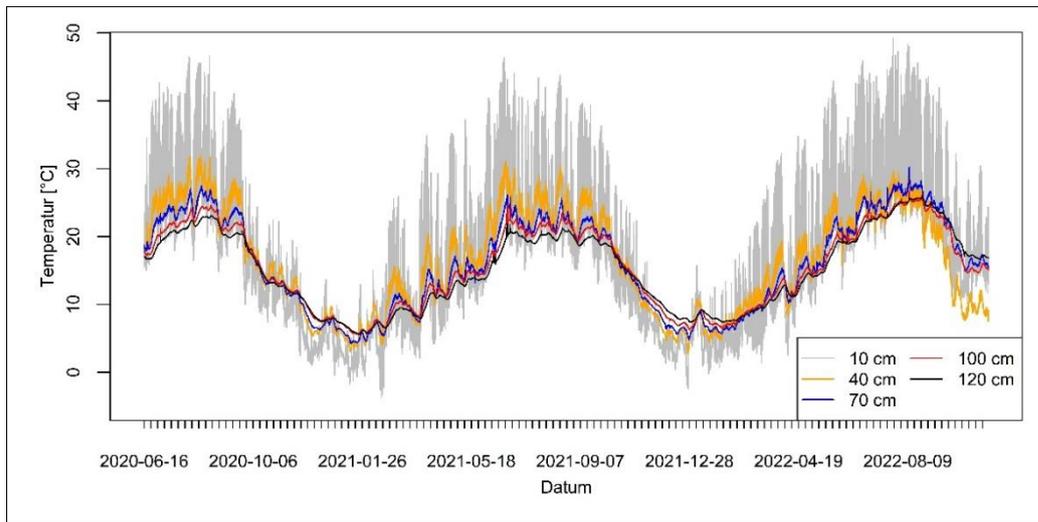


Abbildung 10: Bodentemperatur der Messung Asphalt Sonne in fünf Tiefen

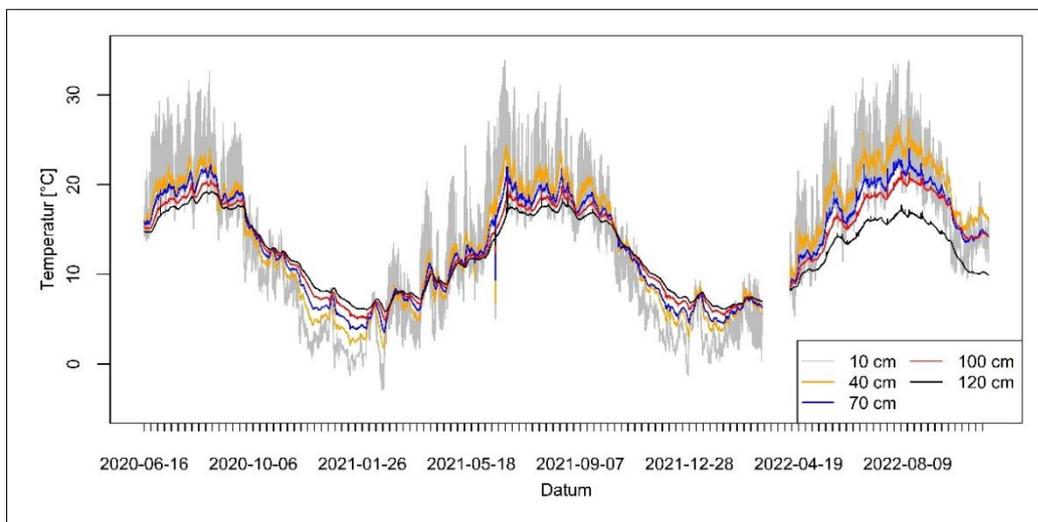


Abbildung 11: Bodentemperatur der Messung Asphalt Schatten in fünf Tiefen

Für das spätere Temperaturmodell sind derartige Temperaturbereiche von über 25°C besonders relevant. Eine lange Verweilzeit des Wassers in der Leitung führt dazu, dass das Wasser die Temperatur des umgebenden Bodens annimmt (2. Hauptsatz der Thermodynamik). Bei einer Bodentemperatur von über 25°C bedeutet dies, dass insbesondere in Randbereichen des Netzes mit höheren Verweilzeiten des Wassers in der Rohrleitung die gesetzlichen Vorgaben nicht eingehalten werden können. Dabei sind neben den klimatischen Faktoren keine weiteren Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur in der Leitung berücksichtigt worden.

In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind die Messergebnisse der einzelnen Standorte in 100 cm und 120 cm Tiefe als Boxplots abgebildet, um insbesondere die Maximaltemperaturen zu vergleichen. Auch hier stehen die beiden Asphalt Standorte im Fokus. So liegen für Asphalt Sonne bei 100 cm

Tiefe Temperaturen von  $> 20^{\circ}\text{C}$  noch innerhalb des dritten Quartils. Bei einer Tiefe von 120 cm hingegen liegen Temperaturen von  $> 20^{\circ}\text{C}$  bereits im Bereich der Ausreißer, was die Bedeutung der Verlegetiefe, insbesondere bei sonnenexponierten Standorten erkennen lässt.

Anzumerken ist, dass der Einfluss verschiedener Asphaltstärken nicht berücksichtigt werden konnte, da lediglich zwei Asphaltstandorte untersucht wurden. Beide untersuchten Asphaltflächen befinden sich in dem Gebiet einer Gewerbefläche. Die Betrachtung weiterer Asphaltflächen, beispielsweise verschiedener Straßentypen im Vergleich war in dem Projektumfang nicht realisierbar, auch, da die Installation von geeigneten Messstellen in Straßen schwer umzusetzen ist.

Im Allgemeinen unterscheiden sich Asphaltflächen großer Hauptstraßen in ihrem Aufbau von Asphaltflächen einer Industrie- oder Gewerbefläche, wie in diesem Fall. So ist für dickere Asphaltkörper aufgrund der großen Wärmeleitfähigkeit von einer größeren Speicherung der Wärme im Boden auszugehen (Asaeda & CA, 1993). Ein differenziertes Verhalten der Asphalttemperatur in der gesuchten Leitungstiefe in Abhängigkeit von der Asphaltstärke ist zu vermuten. So kann die Maximaltemperatur von Asphaltflächen in der Realität auch höher liegen als die hier als Maximaltemperatur angegebene Fläche Asphalt Sonne.

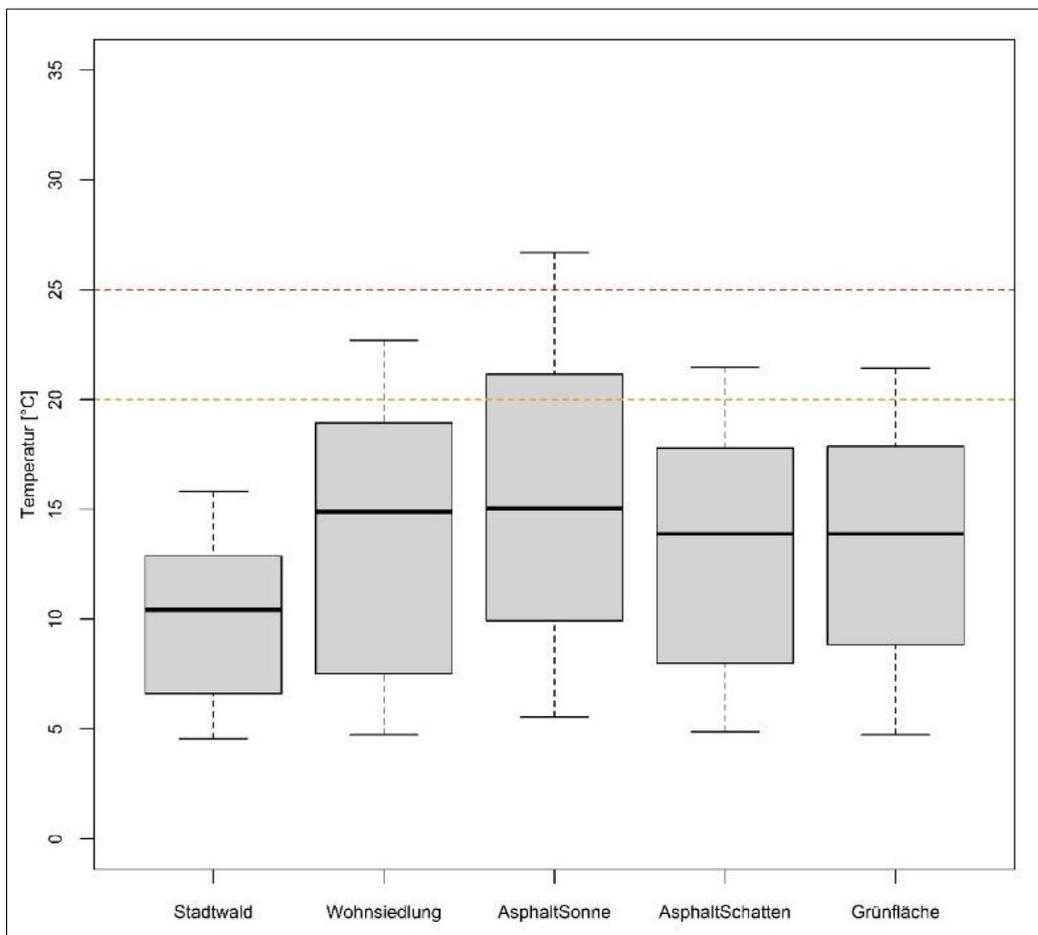


Abbildung 12: Boxplots der Messergebnisse aller Standorte in 100 cm im Vergleich

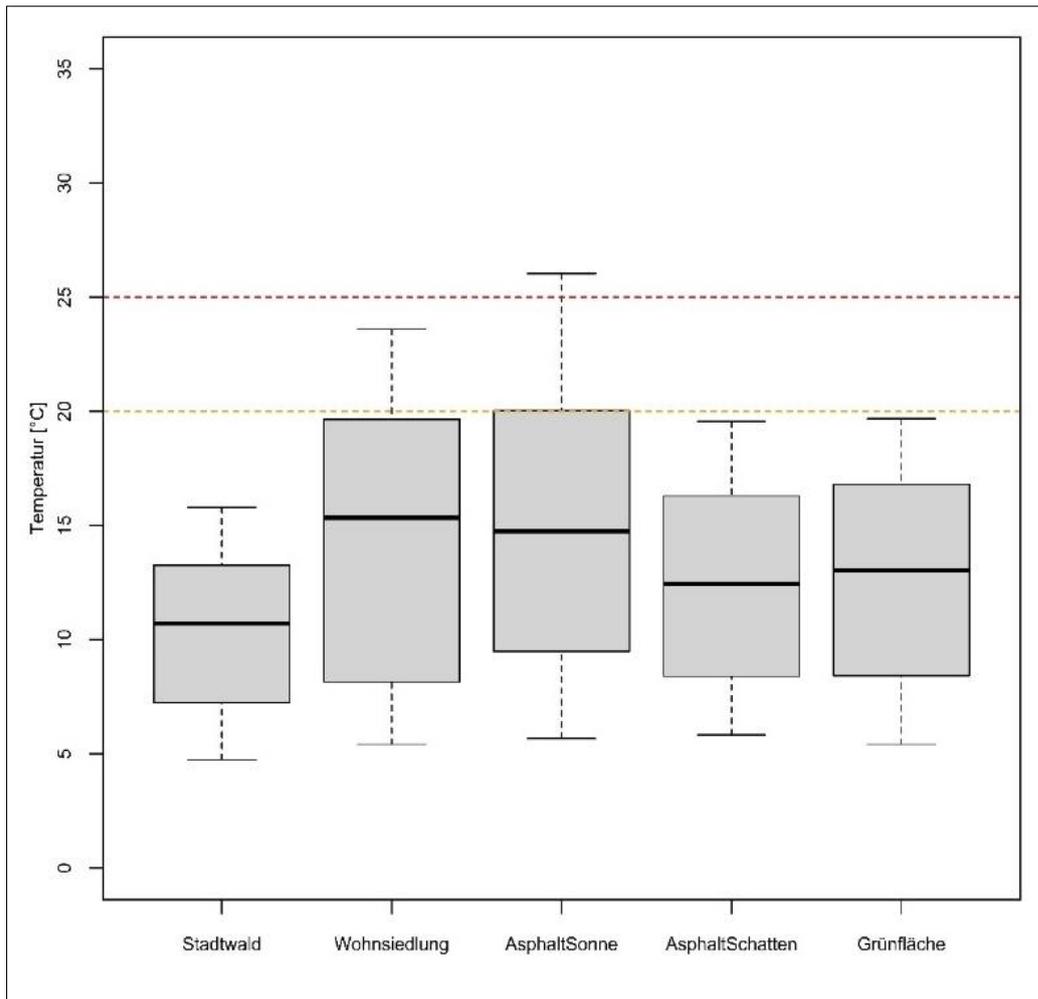


Abbildung 13: Boxplots der Messergebnisse aller Standorte in 120 cm im Vergleich

## 4.2 Oberflächentemperatur

Für die Bodentemperatur ausschlaggebend ist die Energiebilanz zwischen Boden und Atmosphäre. Nach Heyer (2006, S. 318) ist dieser Bereich der bodennahen Luftschicht geprägt durch die Art und Gestaltung der Bodenoberfläche. Insbesondere während autochthoner Wetterlagen mit windschwachen, wolkenarmen Sommertagen entwickelt sich tagsüber in unmittelbarer Oberflächennähe ein vertikaler Temperaturgradient mit stark überadiabatischer, labiler Schichtung (Heyer, 2006, S. 318). Es kommt während solcher Wetterphasen zu einer besonders ausgeprägten Aufheizung der Bodenoberfläche bei fehlender Abschattung.

Die Oberflächentemperatur muss daher im Zusammenhang mit dem Strahlungshaushalt eines Standortes betrachtet werden. Die Wellenlänge und Strahlungsdichte  $\varphi_e$  ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Formel 5) nur von der Temperatur und vom Emissionsgrad des Körpers abhängig, sodass sich die Temperatur einer Oberfläche nach Messung der Gesamtemission bestimmen lässt (Löffler, 2012, S. 44).

Ein nicht zu unterschätzender Faktor bei der Betrachtung der Oberflächentemperatur im Zusammenhang mit der Strahlungsbilanz ist die Bewölkung. Es ist zwar möglich den Bedeckungsgrad zu

messen, die Ergebnisse sind jedoch nur bedingt brauchbar, da auch heute noch messtechnisch große Herausforderungen bei dieser Größe bestehen (Löffler, 2012, S. 74).

Formel 5: Stefan-Boltzmann-Gesetz (Löffler, 2012, S. 44)

$$\varphi_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Mit:

$\varphi_e$  = Strahlungsdichte [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$\varepsilon$  = Emissionsgrad eines realen Körpers abhängig von seinen Materialeigenschaften

$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$  Stefan-Boltzmann-Konstante

T = Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

#### 4.2.1 Satellitendaten

Um die Oberflächentemperatur großflächig im gesamten Untersuchungsgebiet zu erfassen und die Temperatur verschiedener Standorte zu ermitteln, wurden Satellitendaten verwendet. Satellitendaten zur Bestimmung einer Oberflächentemperatur werden entweder im thermischen Infrarot (TIR) (typischerweise 10 – 12  $\mu\text{m}$ ) oder im Mikrowellenbereich (1 mm – 10 cm) erfasst (Köpke & Sachweh, 2012, S. 133).

Die für das Modell verwendeten Satellitendaten stammen von Landsat 8 aus Collection 2, Level 2 (top of atmosphere) mit einem Orbit Zyklus von 16 Tagen und einer räumlichen Auflösung von 15 m (Franz, Bailey, Kuring, & Werdell, 2015). Nicht verwendet werden Datensätze mit Bewölkung im Bereich des Untersuchungsgebiets, damit das gesamte Gebiet ohne Fehler erfasst wird. Um einen entsprechenden Sommertag zu finden, bleiben eine begrenzte Anzahl an geeigneten Tagen im Untersuchungszeitraum, sodass der 08.09.2021 gewählt wurde. Hier handelt es sich um einen warmen Sommertag ohne Bewölkung.

Tabelle 7: Kenndaten der Landsat 8 Daten (U.S. Geological Survey, 2021)

Daten	Skalierungsfaktor	Füllwert	Datentyp	Gültigen Bereich
<b>Collection 1</b>				
Oberflächen-reflexion	0.0001	-9999	Signed 16-bit integer	0-10000
Vorläufige Oberflächen-temperatur	0.1	-9999	Signed 16-bit integer	0-10000
<b>Collection 2</b>				
Oberflächen-reflexion	0.0000275 + -0.2	0	Unsigned 16-bit integer	1-65455
Oberflächen-temperatur	0.00341802 + 149.0	0	Unsigned 16-bit integer	1-65455

Verwendet wurde das Thermal-Band (Band 10) als TIFF Datensatz (U.S. Geological Survey, 2022). Sowohl auf die Daten aus Collection 1 als auch Collection 2 der Landsat Level-2 Daten muss ein Skalierungsfaktor angewendet werden, bevor die Daten verarbeitet werden können (U.S. Geological Survey, 2021).

Tabelle 7 zeigt die Skalierungsfaktoren, Füllwerte, Datentypen und den gültigen Bereich für die Landsat Collection 1 und Collection 2 Daten.

Die Umwandlung der Satellitendaten des TIFF Datensatzes geschieht mithilfe von Formel 6. Die Temperatur des Landsat Collection 2 Datensatzes erfordert einen bandspezifischen Verstärkungsfaktor  $G_{rescale}$  von 0,00341802 und einen zusätzlichen Offset (bandspezifischer Verzerrungsfaktor  $B_{rescale}$ ) von 149,0. Da die Ergebnisse in Kelvin angegeben sind, ist zudem eine Umwandlung in °C notwendig.

*Formel 6: Umwandlung in Werte zur Temperatur an der Sensoröffnung (nach Chander et al. 2009 & U.S. Geological Survey, 2021)*

$$T = G_{scale} \times Q_p + B_{off}$$

Mit:

T= Temperatur [K]

$G_{scale}$  = Skale Faktor

$Q_p$  = Pixelwert des Datensatzes

$B_{off}$  = Offset

Die Verarbeitung und Anwendung der Formel 6 kann über ein automatisiertes Skript, beispielsweise in R.statistic realisiert werden (Skript 1). Notwendig sind die Pakete *raster* und *rgdal*, um dieses Skript durchzuführen. Die weitere Verarbeitung der Daten zur Nutzung in ArcGIS wird in Kapitel 8.2.1 besprochen.

```
scale <- 0.00341802
offset <- 149.0
data_files <- list.files(pattern = "*.TIF")
for (data_f in data_files) {
  filename <- paste0("Datensatz", data_f)
  df <- raster(data_f)
  T <- scale * df[[1]] + offset
  TsC <- T-273.15
  writeRaster(TsC, file = paste0 ("Skaliert", filename), format="GTiff",
  overwrite = TRUE, progress='text') }
```

*Skript 1: Skalierung der Landsat 8 Daten und Umwandlung in °C in R*

In Abbildung 14 ist ein Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet am 08.09.2021 zu sehen. Grundsätzlich ähnelt sich bei den meisten Aufnahmen im Sommer die Temperaturverteilung im Stadtgebiet. So weisen bei mehreren Aufnahmen im Sommer dieselben Bereiche hohe bzw. niedrige Temperaturen auf und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der absoluten Temperatur der Standorte. Damit ergibt sich ein immer wiederkehrendes Muster der Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet. Große Unterschiede bestehen vornehmlich in landwirtschaftlich genutzten Bereichen. Hier sind abhängig vom Vegetationszyklus unterschiedliche Albedowerte und somit auch unterschiedliche Temperaturen erfasst worden. Für den Großteil der – unter Asphalt verlegten – Leitungen ist dieser Umstand für das Temperaturmodell nicht relevant, da hier hauptsächlich versiegelte Flächen betrachtet werden müssen.

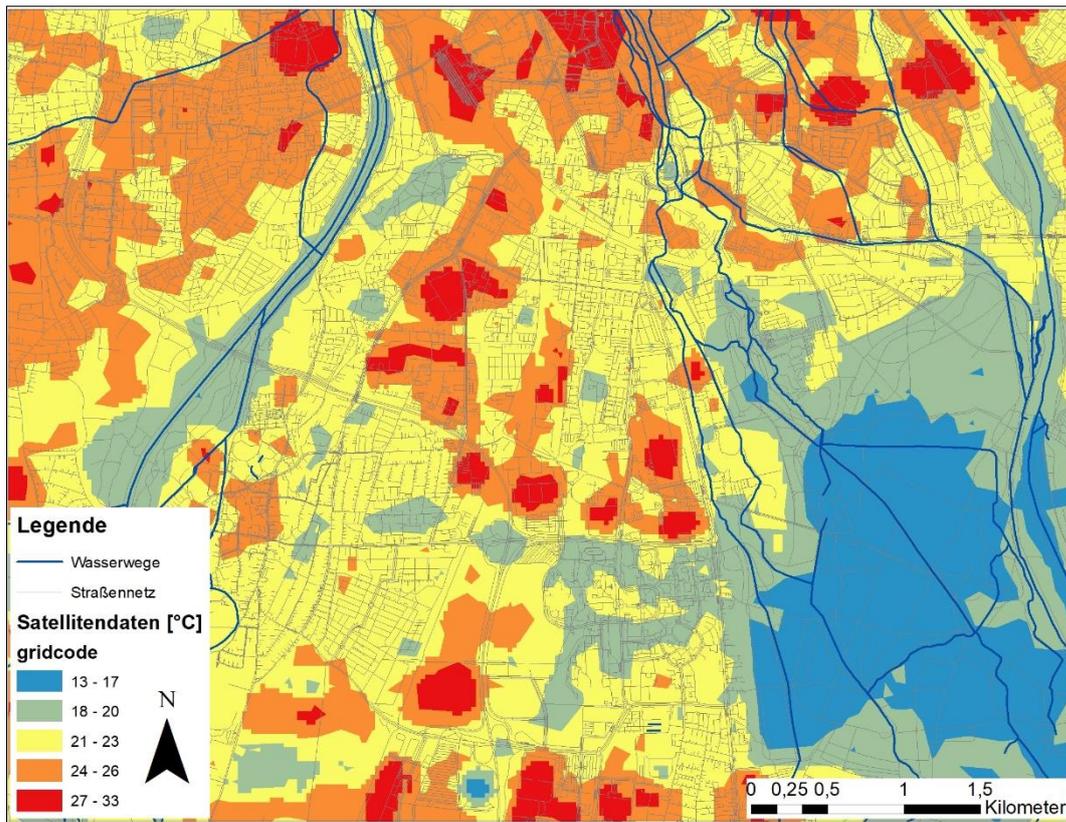


Abbildung 14: Beispiel Temperatur aus Satellitendaten (08.09.2021) (Eigene Darstellung nach Daten aus U.S. Geological Survey, 2021 & OpenStreetMap contributors, 2022)

Die Satellitenaufnahmen fanden für das Untersuchungsgebiet meist am späten Vormittag statt. Am 08.09.2021 war dies zwischen 9:55 und 10:10 Uhr GMT der Fall. Ein Vergleich der Satellitenaufnahmen mit den gemessenen Bodentemperaturen nahe der Oberfläche (10 cm Tiefe) zur gleichen Zeit soll den Unterschied zwischen beiden Messmethoden darlegen (Tabelle 8). Anzumerken ist, dass es sich bei den oberflächennahen Bodentemperaturen nicht um die Oberflächentemperatur selbst, sondern um die Temperatur in 10 cm Tiefe, handelt.

Tabelle 8: Gegenüberstellung Gemessener Bodentemperatur in 10 cm Tiefe und Satellitenaufnahmen

Bodenmessstation	Temperatur Boden in 10 cm Tiefe [°C] 08.09.2021 10 Uhr GMT	Temperatur Satellitenaufnahme am Standort [°C] (U.S. Geological Survey, 2021)
Stadtwald	13,5	21
Wohnsiedlung	16,6	28
Asphalt Sonne	22,5	28
Asphalt Schatten	16,0	27
Grünfläche	16,0	27

So liegt die Temperatur der Satellitendaten um knapp 10 °C über den Daten der oberflächennahen Messung. Einerseits ist dies durch den Unterschied zwischen der tatsächlichen Oberflächentemperatur und der gemessenen Temperatur in 10 cm Tiefe zu begründen, da hier ebenfalls von einem Temperaturunterschied auszugehen ist. Andererseits kommt hinzu, dass kleinräumige Unterschiede der einzelnen Standorte durch die Satellitendaten nicht erfasst werden können, da die Satellitendaten

eine räumliche Auflösung von 15 m besitzen. Die Temperatur von Asphaltflächen wie Straßen, bei denen die Beschattung eine große Rolle spielt, kann somit durch die Satellitendaten nicht im Detail abgebildet werden. Mithilfe der Satellitendaten sollen jedoch großflächige Temperaturbereiche in dem Untersuchungsgebiet betrachtet werden.

Der Unterschied zwischen dem Waldstandort (Stadtwald) und den Messstellen in besiedelten Gebieten wird durch die Temperaturdifferenz beider Messmethoden ersichtlich. Die Standorte in besiedelten Bereichen unterscheiden sich in den Satellitendaten nur geringfügig, da sie sich alle in wenig dicht bebauten Bereichen (Wohnviertel) befinden. So liegen alle drei Standorte Asphalt Sonne, Asphalt Schatten und Grünfläche in einer Entfernung von wenigen Metern. Diese Standorte unterscheiden sich hinsichtlich der Satellitendaten kaum, während die Bodentemperaturmessung deutliche Unterschiede erkennen lässt (Tabelle 8).

Dies zeigt erneut, dass kleinräumige Unterschiede über Satellitendaten nicht erfasst werden können. Ein Vergleich von Bereichen mit hoher Temperatur, wie in der Stadtmitte oder in Industriegebieten, kann hinsichtlich der Temperatur in Oberflächennähe nicht überprüft werden, da hier keine Daten vorliegen. Grundsätzlich können jedoch die Unterschiede zwischen verschiedenen temperierten Bereichen mithilfe der Satellitendaten herausgearbeitet werden (Abbildung 14). Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit der Stadtklimatologie hilfreich und wird zu einem späteren Zeitpunkt im Zusammenhang mit dem Modell (Kapitel 8.2.1) näher erläutert.

Grundsätzliche Probleme der Satellitendaten, wie die geringe Auflösung oder mögliche Fehlerquellen, müssen jedoch weiterhin berücksichtigt werden. So ist das aufgenommene Signal immer eine Kombination verschiedener Parameter von Boden und Atmosphäre, die am Strahlungsübergangsprozess beteiligt sind (Köpke & Sachweh, 2012, S. 24 f.).

#### **4.2.2 Oberflächentemperatur aus Klimamodellen**

Um die Oberflächentemperatur anhand der klimatischen Gegebenheiten zu bestimmen, bietet es sich an die Temperatur mithilfe eines mikroskaligen dreidimensionalen Klimamodells zu errechnen, welches im Speziellen verschiedene Oberflächen berücksichtigt. Hier ist beispielsweise ENVI-met zu nennen. Mithilfe dieses Klimamodells können unter Berücksichtigung von Klimaparametern, wie der Lufttemperatur oder der Windgeschwindigkeit und -richtung, mikroskalig Oberflächentemperaturen errechnet werden (Bruse & Bruse, 2017).

Obwohl es sich um ein mikroskaliges Modell handelt kann, sofern ausreichend Daten zu den Gebäudeblöcken vorhanden sind und ein leistungsfähiger Rechner inklusive Speichervolumen verwendet wird, ein mesoskaliges Modellgebiet wie eine ganze Stadt modelliert werden (ENVI\_Met GmbH, 2023). Die Ergebnisse des Modells sind anschließend über in-situ Messungen der Bodentemperatur charakteristischer Standorte zu überprüfen.

Mithilfe eines solchen mesoskaligen Modells können in einem Trinkwasserversorgungsgebiet die Oberflächentemperaturen einzelner Standorte modelliert werden. Mithilfe eines geeigneten Modells zur Temperaturverteilung im Boden, wie in Kapitel 4 besprochen, kann die Temperatur im Untergrund bis in die Leitungstiefe ausgehend von der Oberflächentemperatur anschließend errechnet

werden. So kann einerseits anhand der Lufttemperatur und des lokalen Klimas die Oberflächentemperatur und somit auch die Temperatur in Leitungstiefe errechnet werden. Andererseits können auch so die Auswirkungen von stadtplanerischen Maßnahmen auf die Bodentemperatur untersucht werden.

#### 4.2.3 Beschattung

Die Beschattung hat einen wichtigen Effekt auf die Energiebilanz (Bellasio, et al., 2005). Die Bodentemperaturmessung (Kapitel 4.1) macht den Unterschied zwischen zwei vergleichbaren Standorten mit unterschiedlicher Beschattung deutlich, wenn die Ergebnisse der Messung von Asphalt Sonne und Asphalt Schatten im direkten Vergleich gegenübergestellt werden (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6). Insbesondere der Unterschied zwischen der Maximaltemperatur der Standorte Asphalt Sonne und Schatten im leitungsrelevanten Bereich von 100 cm sind hierbei zu betrachten. Aufgrund der unterschiedlichen Energiezufuhr über die Einstrahlung ergibt sich im Mittel ein Temperaturunterschied von 2,33°C zwischen dem beschatteten und dem unbeschatteten Standort in 100 cm Tiefe. Besonders auffällig wird der Unterschied im Temperaturmaxima, welcher für die Sommermonate bei einer Strahlungswetterlage relevant ist. Hier ergibt sich zwischen dem vollständig sonnenexponierten und dem vollständig beschatteten Standort eine Temperaturdifferenz von 5,24°C. Dies verdeutlicht, dass die Beschattung der Straßenoberfläche im Kontext der Bodentemperatur betrachtet werden muss.

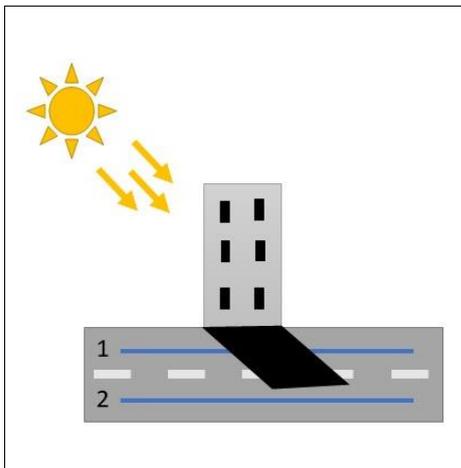


Abbildung 15: Skizze der Beschattung durch Gebäude in Abhängigkeit von Lage der Leitung im Straßengraben

Der Einbezug der Beschattung in einem bebauten Gebiet ist jedoch komplex und muss neben der Gebäudehöhe und -ausrichtung auch die Richtung der Einstrahlung im Tagesgang berücksichtigen (Abbildung 15). Grundsätzlich kann die Schattenfläche in einer vereinfachten GIS-Analyse aus Gebäudehöhe oder auf Basis der Gebäudetypen bestimmt werden (Deilmann et al., 2017, S. 128 f.). So ist es konzeptionell möglich über das gesamte Stadtgebiet eine Information zur Beschattung zu errechnen.

Für eine genauere Aussage zur Beschattung ist zudem die Information zur Straßenbreite und zur Lage der Leitung im Straßengraben notwendig, wie in Abbildung 15 skizziert. Hier wird Leitung 1 beschattet, während Leitung 2 nicht beschattet wird.

Um die Beschattung für die Bodentemperatur in einem Temperaturmodell nutzbar zu machen sind somit Daten zur Gebäudehöhe sowie zur Straßenbreite und zur genauen Lage der Leitung im Straßengraben notwendig. Der Einbezug dieser Information konnte aufgrund der Datenlage im Projektzeitraum nicht realisiert werden, ist jedoch grundsätzlich vorstellbar.

Für den Trinkwasserversorger ist vor allem die Information über die Beschattung und deren anzunehmende Auswirkung auf die Trinkwassertemperatur eine gute Planungsgrundlage für die

Leitungsverlegung bei Neubau. So kann beispielsweise auf eine gute Beschattung geachtet werden indem beschattete Straßenseiten für die Leitungsstrecken präferiert werden können.

### 4.3 Stadtklimatologie und LCZs

Neben den klimatischen Einflüssen auf die Lufttemperatur muss in einer Großstadt wie Augsburg der stadtklimatologische Aspekt berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist das städtische Klima im Vergleich zu den ländlichen Regionen als wärmer einzustufen (Sailor, 1994). Grund hierfür ist unter anderem die Anzahl an versiegelten Flächen wie Parkplätze, Straßen und Gebäude, welche aufgrund niedriger Albedowerte und reduziertem Fluss latenter Wärme ein Aufheizen der Stadt verursachen (ebd.). Durch eine weitere Versiegelung von Freiflächen wird einer Stadt eine zusätzliche Wärmespeichermasse zugefügt (Mehra, 2021, S. 12). Dies führt zu einem Wärmeinseleffekt, bei dem eine Temperaturdifferenz zwischen der wärmeren Stadt und dem kühleren Umland besteht, welche sich bei sonnenscheinreichen und windschwachen Wetterlagen besonders ausprägt (Deilmann et al., 2017, S. 101). Im Gegensatz zu den versiegelten Flächen können Grün- und Wasserflächen die Lufttemperatur senken. Bei Gewässern entsteht durch Verdunstungsvorgänge ein sogenannter „Oaseneffekt“ (Deilmann et al., 2017, S. 101). Das Mikroklima einer Stadt wird somit durch verschiedene Oberflächen maßgeblich beeinflusst.

In Bezug auf die Stadtentwicklung muss davon ausgegangen werden, dass eine Bodennutzungsänderung in einer Stadt typischerweise in Richtung zunehmender Bebauung und Flächenversiegelung gehen (Von Storch, 2011). Eine Änderung der Klimaparameter innerhalb einer Großstadt aufgrund zunehmender Versiegelung muss somit berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang ist das Trinkwassernetz zu erwähnen, da ein Wachsen der Stadt in die Fläche auch ein Wachsen des Trinkwassernetzes bedingt. Damit geht eine größere Verweildauer des Wassers im Netz einher, welche potenziell zu einer Trinkwassertemperaturzunahme in den Randbereichen der Stadt führt. Der Einfluss der Verweilzeit auf die Trinkwassertemperatur wird im Laufe der vorliegenden Arbeit näher herausgearbeitet.

Neben der Sonneneinstrahlung (und Wärmeausstrahlung) sind im städtischen Bereich die anthropogene Energiezufuhr und horizontale Energietransporte vorhanden, sodass Energiebilanzen nicht nur lokal oberhalb von Flächen ermittelt werden dürfen, sondern auch der horizontale Austausch von Luftströmungen einbezogen werden muss (Pietsch & Kamieth, 1991, S. 135).

Ebenfalls für die Bodentemperatur relevant, jedoch schwer zu quantifizieren, ist die Auswirkung unterirdischer Stockwerke, tiefer Fundamente und Tiefgaragen insbesondere im Innenstadtbereich, die eine Untergrundversiegelung darstellen. Durch die Untergrundversiegelung kommt es zu einem Wärmeinseleffekt im Untergrund, bei dem eine Beeinflussung der Bodentemperatur aufgrund der geänderten Wärmeleitung durch die versiegelte Oberfläche und durch die Untergrundversiegelung stattfindet. Dies wird beispielsweise in von Menberg et al. (2013) im Detail dargelegt. In Abbildung 16 sind die Wärmequellen in städtischen Gebieten dargestellt. Anzumerken ist, dass die Richtung des Wärmeaustauschs nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik in Richtung fallender thermodynamischer Temperatur fließt, sodass in der Abbildung beispielsweise U-Bahn Netzwerke thermisch auch den oberhalb befindlichen Boden beeinflussen können.

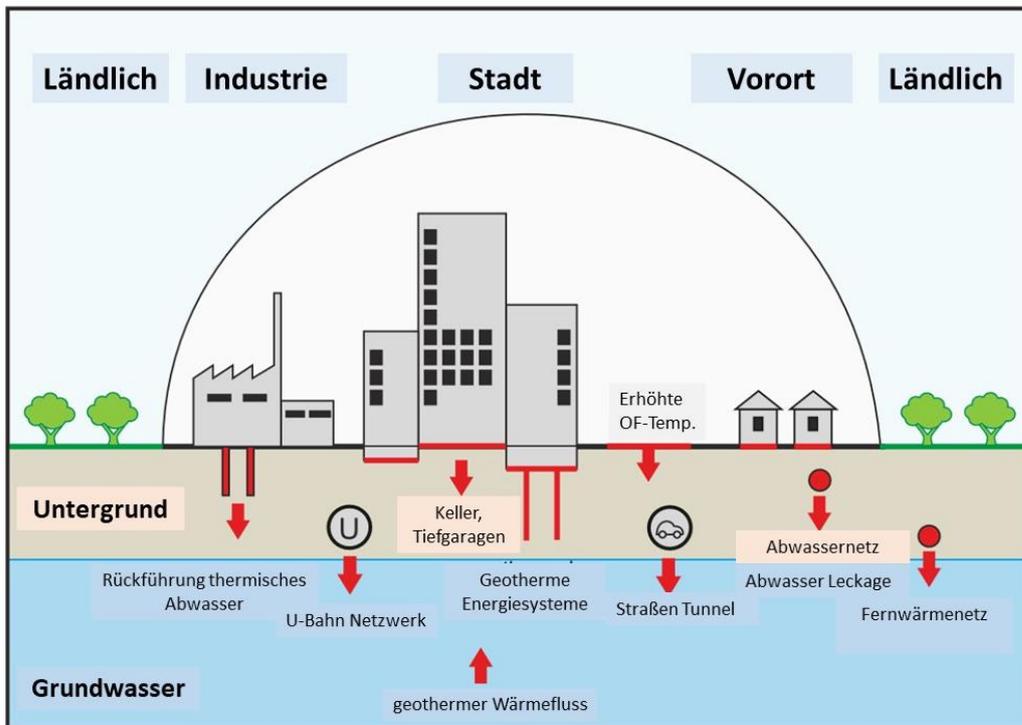


Abbildung 16: Potenzielle anthropogene und natürliche Wärmequellen in städtischen Gebieten (Verändert nach Menberg et al., 2013, S. 127)

Für das Grundwasser gibt es bereits eine Auswertung zum anthropogenen Einfluss einer Großstadt auf die Grundwassertemperatur. Hierbei wurde festgestellt, dass die Grundwassertemperaturen ausgehend vom Stadtrand in Richtung Zentrum der Stadt München um teilweise  $> 9^{\circ}\text{C}$  angestiegen sind (Dohr, 2011). Dies ist neben punktuellen Kühlwassereinleitungen vornehmlich auf die Untergrundversiegelung zurückzuführen (ebd.). Im Fall der Großstadt Augsburg ist jedoch anzumerken, dass hier eine weniger starke Untergrundversiegelung im Vergleich zu der Stadt München besteht, da keine U-Bahnschächte vorhanden sind und lediglich im Innenstadtbereich von einer größeren Anzahl an Tiefbauwerken wie Tiefgaragen auszugehen ist.

Zur Einordnung der Temperaturverteilung in einer Stadt bietet sich die Einteilung des Stadtgebietes in Local Climate Zones (LCZ) an. LCZs sind ein Klassifikationsschema, welches von Stewart und Oke (2012) entwickelt wurde, um Untersuchungen zu Wärmeinseln und städtischen Temperaturbeobachtungen zu standardisieren (Stewart & Oke, 2012, S. 1876). Unterteilt werden 17 Zonen anhand von ihren strukturellen Eigenschaften und ihrer Oberflächenbeschaffenheit (Stewart & Oke, 2012, S. 1887). Dabei wird neben Bebauung auch der Bewuchs bzw. die Landbedeckung betrachtet. Für das Stadtgebiet Augsburg existiert eine Auswertung der Universität Augsburg über die LCZs (Beck, et al., 2018). Demnach wurden neun verschiedenen Klassen identifiziert, welche in Tabelle 9 aufgelistet sind. Zusätzlich sind entsprechende Kennzahlen der einzelnen LCZs aufgeführt.

Die Einteilung von Stadtbereichen auf Basis der LCZs stellt eine gute Generalisierung der Bauungsart dar, um Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit zu erhalten. So unterscheidet sich beispielsweise die Albedo der einzelnen LCZs wie in Tabelle 9 aufgelistet, was die Oberflächentemperatur, wie bereits dargelegt, beeinflusst.

Tabelle 9: Für die Stadt Augsburg relevante LCZs nach Stewart & Oke (2012, S.1887)

LCZ Bezeichnung nach Stewart & Oke, 2012	Definition	Horizont-überhöhung „Sky View Faktor“	Albedo
<b>Compact midrise</b>	Dichte Mischung aus mittelhohen Gebäuden (3-9 Stockwerke), Wenig bis keine Bäume. Oberfläche meist asphaltiert. Baumaterialien: Steine, Fliesen und Beton.	0,3 – 0,6	0,10 – 0,20
<b>Open midrise</b>	Offene Anordnung aus halbhohen Gebäuden (3-9 Stockwerke). Zahlreiche durchlässige Oberflächenbedeckung (Niedrige Pflanzen, vereinzelt Bäume). Baumaterialien: Beton, Stahl, Steine, Glas.	0,5 – 0,8	0,12 – 0,25
<b>Open lowrise</b>	Offene Anordnung an niedrigen Gebäuden (1-3 Stockwerke). Zahlreiche durchlässige Oberflächenbedeckung (Niedrige Pflanzen, vereinzelt Bäume). Baumaterialien: Beton, Stahl, Steine, Glas.	0,6 – 0,9	0,12 – 0,25
<b>Large lowrise</b>	Offene Anordnung von großen, niedrigen Gebäuden (1-3 Stockwerke). Wenig oder keine Bäume, Oberfläche meist asphaltiert. Baumaterialien: Stahl, Beton, Metall und Stein.	0,2 – 0,5	0,15 – 0,35
<b>Dense trees</b>	Dicht bewaldete Landschaft (Nadel- und Laubbäume). Meist durchlässige Oberfläche (Niedrige Pflanzen). Natürlicher Wald, Nutzwald, städtischer Park.	< 0,4	0,10 – 0,20
<b>Scattered trees</b>	Leicht bewaldete Landschaft (Nadel- und Laubbäume). Meist durchlässige Oberfläche (Niedrige Pflanzen). Natürlicher Wald, Nutzwald, Städtischer Park.	0,5 – 0,8	0,15 – 0,25
<b>Low plants</b>	Offene Anordnung von Büschen, Sträuchern und niedrigen Gehölzen. Meist durchlässige Oberfläche (unbewachsener Boden oder Sand). Natürliches Buschland oder Landwirtschaft.	> 0,9	0,15 – 0,25
<b>Bare soil or sand</b>	Unbewachsener Boden oder Sand. Wenig oder keine Bäume oder Pflanzen. Natürliche Wüste oder Landwirtschaft	> 0,9	0,20 – 0,35
<b>Water</b>	Große, offene Wasserkörper wie Seen oder kleine Wasserkörper wie Flüsse oder Stauseen.	> 0,9	0,02 – 0,10

Ebenfalls ergeben sich Unterschiede in der Horizontüberhöhung („Sky view Faktor“) der einzelnen LCZs. Die Horizontüberhöhung beschreibt die Einschränkung des Horizonts durch beispielsweise Gebäude (1 = freier Horizont, 0 = bedeckter Horizont) (Häckel, 2012, S. 334). Diese kann in Bezug auf die Beschattung eines Standortes hilfreiche Hinweise liefern.

Über eine Kombination aus LCZs und der Oberflächentemperatur aus Satellitendaten soll das Untersuchungsgebiet in Temperaturbereiche unterteilt werden. Auf Basis dieser Temperaturbereiche werden für das Trinkwassertemperaturmodell die Bodentemperaturen in der Leitungstiefe ermittelt. Hierauf wird in Kapitel 7.3 und 8.2.1 im Zusammenhang mit dem Temperaturmodell näher eingegangen.

## 5 Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur

Um die Temperaturentwicklung in einem Trinkwasserversorgungssystem zu modellieren, müssen zunächst möglichst alle Einflussfaktoren, welche sich auf die Temperatur auswirken, quantifiziert und hinsichtlich ihrer Einflussstärke eingeordnet werden. Dabei wird unterschieden, ob sich Einflussfaktoren auf die Temperatur in der Gewinnung oder in der Verteilung auswirken.

Insbesondere in der Verteilung können verschiedene Einflussfaktoren die Bodentemperatur in Leitungsnähe und somit auch die Temperatur in der Leitung beeinflussen. Anzumerken ist, dass in dem hier besprochenen Untersuchungsgebiet einige Einflussfaktoren auftreten, welche in anderen Versorgungsgebieten nicht zu finden sind. Dies sind beispielsweise Fließgewässer im Gewinnungsgebiet. Im Gegensatz dazu sind in anderen Versorgungsgebieten weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen, welche im Fall der Stadt Augsburg nicht relevant sind, wie etwa U-Bahnschächte im Untergrund oder größere Stadttunnel Systeme. Daher sollen im Folgenden diejenigen Einflussfaktoren näher besprochen werden, welche im hier untersuchten Versorgungssystem der Stadt Augsburg relevant sind.

### 5.1 Einflussfaktoren in der Gewinnung

Insgesamt werden in dem Versorgungsgebiet über 60 Brunnen zur Trinkwassergewinnung betrieben. Darunter befinden sich verschiedene Brunnentypen von Flachbrunnen über Tiefbrunnen bis hin zu Horizontalfilterbrunnen. Dementsprechend wird das Wasser aus verschiedenen hydrogeologischen Schichten und somit mit unterschiedlichen Temperaturen gefördert.

Zur Überwachung der Grundwasserstände sind in den Schutzgebieten mehrere Trinkwasserpegel mit Messeinrichtungen installiert. Neben dem Grundwasserstand werden hier bereits seit mehreren Jahren die Temperaturen des Grundwassers aufgezeichnet. Diese Daten liefern Hinweise über die Temperatur im oberen Grundwasserstockwerk. Zusätzlich wurde in mehreren Brunnen verschiedener Bauart und Tiefe eine Temperaturmessung installiert. Dabei ist nicht nur der Temperaturunterschied der Grundwasserstockwerke untersucht worden, sondern auch der Einfluss des Brunnenstandortes.

Im Allgemeinen kann nach Angaben des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft für die Grundwassertemperatur festgestellt werden, dass:

- ... Temperaturschwankungen im Grundwasser in der Nähe der Erdoberfläche infolge des jahreszeitlich wechselnden Wärmeaustausches relativ hoch sind.
- ... in einer Tiefe von 20 m ein Jahresgang der Temperatur kaum feststellbar ist.
- ... die Grundwassertemperatur im Untergrund mit der Tiefe pro 100 m um etwa 3°C ansteigt.

(Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001)

Des Weiteren ist zu erwarten, dass Fließgewässer wie der Lech, welcher mit dem oberen Grundwasser in Verbindung steht, die Temperatur ebenfalls beeinflussen. Entsprechend soll im Folgenden zunächst der Einfluss von Fließgewässern auf die Grundwassertemperatur betrachtet und anschließend auch der Einfluss der Brunnentiefen näher besprochen werden.

### 5.1.1 Lech und Stadtbäche

Aufgrund der lokalen Gegebenheiten ist der Einfluss von Fließgewässern in den Gewinnungsgebieten zu berücksichtigen. Die Schutzgebiete der swa befinden sich westlich des Lechs und sind zudem mit zahlreichen Bächen und Kanälen durchzogen.

Im Vorarlberg entspringend war der Lech einer der am schnellsten fließenden Gebirgsflüsse, bevor in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts 24 Stauseen entlang des Flusses errichtet wurden (Krauss & Lindl, 2014, S. 7).

Zudem sind die Trinkwasserschutzgebiete durch zahlreiche Bäche und Kanäle durchzogen. Hierbei ist zwischen von Menschen geschaffenen Lechkanälen („Leche“) – mit Wasser aus der Staustufe 22 und dem Hochablass – und Quellbächen („Gießer“) – mit Grundwasser aus Quellfluren – zu unterscheiden (Liebing, 2013, S. 6). Diese Fließgewässer sind neben dem Lech ebenfalls zur Auswertung der Temperatur in der Gewinnung zu berücksichtigen.

Nach Wetzel & Merkel (2010) werden die thermischen Verhältnisse von Fließgewässern neben natürlichen Wechselwirkungen mit dem Grundwasserkörper und den klimatischen Bedingungen auch vom Gewässerzustand sowie den anthropogenen Einleitungen aus kommunalen Klärwerken und thermisch belasteten industriellen Abwässern bestimmt. Zudem kann die Abnahme der Fließgeschwindigkeit zu einer Zunahme der Wassertemperatur führen. Als natürlicher Einflussfaktor auf die Fließgewässertemperatur ist die klimatische Entwicklung ausschlaggebend, jedoch ist die Auswirkung anthropogener Eingriffe auf die Fließwassertemperatur – insbesondere bei mehreren sich überlagernden Einflussfaktoren – nicht zu vernachlässigen (Wetzel & Merkel, 2010).

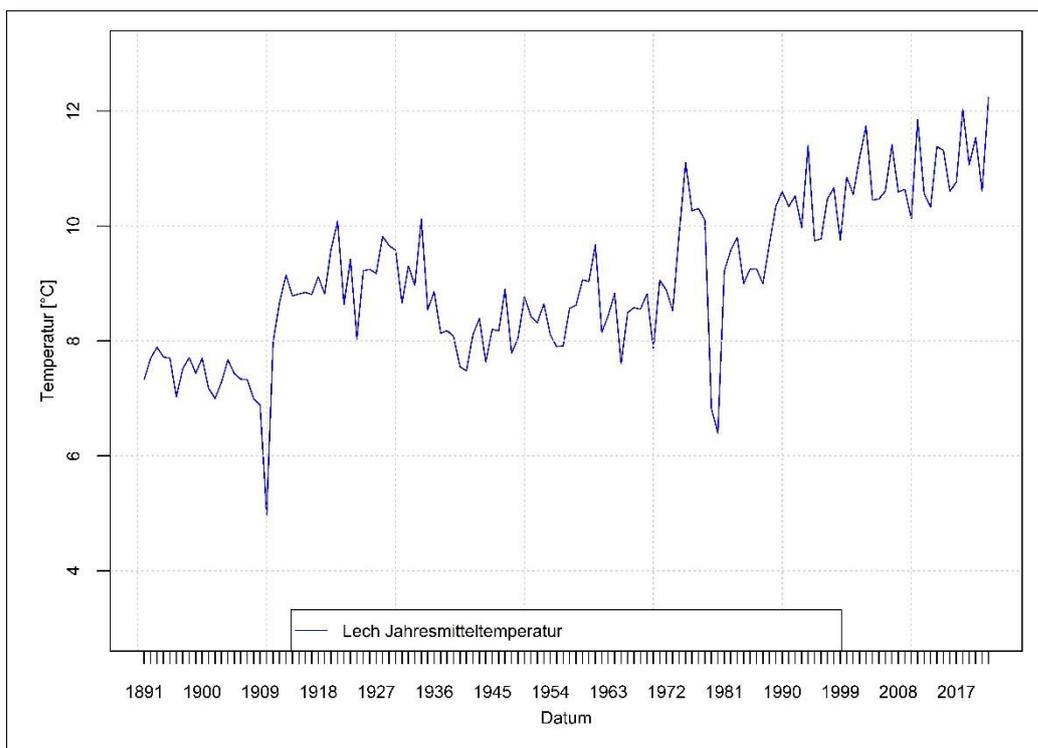


Abbildung 17: Jahresmitteltemperaturen der Messstelle Hochablass am Lech 1891-2022 (Eigene Darstellung nach Daten aus Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2023)

Da bereits zu Projektbeginn eine Auswirkung des Lechs auf lechnahe Grundwassermessstellen bekannt war, soll die Temperaturentwicklung des Lechs genauer betrachtet werden. Anzumerken ist, dass die Auswirkung des Lechs auf lechnahe Grundwassermessstellen im Folgenden lediglich hinsichtlich der Temperatur betrachtet wird. Qualitative Aspekte werden in diesem Zusammenhang nicht näher beleuchtet.

Ein allgemeiner Trend der Erwärmung des Lechs, insbesondere im Hinblick auf die Sommertemperatur und das Temperaturmaximum, konnte bereits nachgewiesen werden (Wetzel & Merkel, 2010). So zeigt die Abbildung 17 in einer langjährigen Zeitreihe von 1891 bis 2022 den zunehmenden Trend der Lechtemperatur an der Messstelle Hochablass. Dementsprechend ist im Hinblick auf lechnahe Brunnen eine Auswirkung der Temperaturentwicklung des Lechs zu berücksichtigen. Eine weitere Temperaturzunahme in der Zukunft bedeutet somit eine Auswirkung auf Brunnen, welche im Einflussbereich des Lechs stehen.

Zunächst sollen die Grundwassertemperaturdaten der Messpegel im Zusammenhang mit dem Lech analysiert werden. Dabei ist insbesondere bei lechnahen Pegeln davon auszugehen, dass der jährliche Temperaturgang der Pegel, dem des Lechs ähnelt. Alle Daten der Pegelmessungen stammen aus den kontinuierlichen Pegelmessungen der swa.

Während der Sommermonate (Juni – September) der Jahre 2019 – 2022, werden die höchsten Temperaturen an lechnahen Pegeln erfasst (Abbildung 18). Lechferne Pegel weisen geringere Sommertemperaturen auf. Gleichzeitig sind besonders niedrige Temperaturen an lechnahen Pegeln in den Wintermonaten aufgezeichnet worden, was die vergleichsweise hohe Schwankungsbreite im Jahresgang an diesen Pegeln zeigt. Die hohe Temperaturschwankung lechnaher Pegel ähneln dem Temperaturverhalten des Lechs, welcher als Oberflächengewässer eine größere Schwankungsbreite als die Grundwassertemperatur aufweist.

Eine Korrelationsanalyse einiger lechnaher Pegel (Tabelle 10) weist den hohen statistischen Zusammenhang zwischen diesen Grundwassermessstellen und dem Lech nach (bspw. Pegel Nr. 0, 6, 9 und 24). Jedoch ist dieses Verhalten nicht bei allen lechnahen Pegeln festzustellen. So besteht bei den hier aufgelisteten Pegeln Nr. 1, 23 und 55 nur eine geringe Korrelation zwischen der Grundwasser- und der Lechtemperatur. Bei diesen Messstellen ist sowohl eine geringere Jahresschwankung der Temperatur als auch ein Versatz der Minimal- und Maximaltemperaturen im Vergleich zum Lech festzustellen.

*Tabelle 10: Korrelationsanalyse der Lechtemperatur und Temperatur einiger Lechnaher Pegel mit Pearson-Korrelationskoeffizient (cor) und P-value (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1])*

Pegel Nr.	Cor	p-value
0	0.96	2.20E-16
23	0.33	0.02679
1	0.14	0.00562
55	0.52	0.00044
24	0.89	2.20E-16
6	0.85	4.17E-14
9	0.87	3.01E-15
44	0.58	2.23E-05

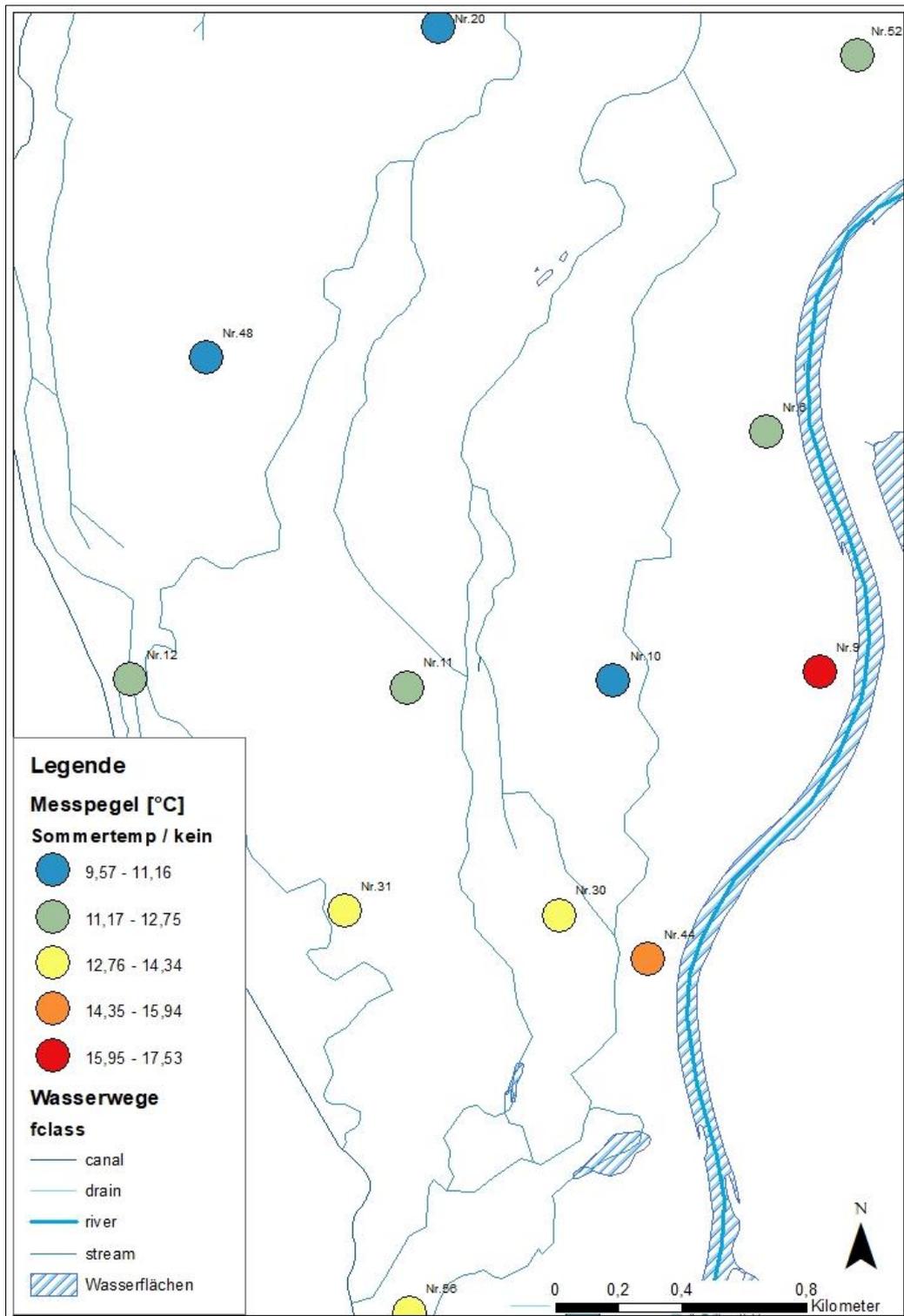


Abbildung 18: Ausgewählte Grundwassermessstellen mit Temperatursensoren und Temperatur der Sommermonate im Untersuchungszeitraum 2019 – 2022 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & OpenStreetMap contributors, 2022)

Anhand der Daten aus den Pegelmessstellen ergeben sich folgende Annahmen:

- Der Lech steht an einigen Stellen in Verbindung mit dem oberen Grundwasserleiter. Allerdings besteht eine starke Schwankung der Durchlässigkeit im Grundwasserleiter (Maloszewski & Trimborn, 1997).
- Es sind ausgeprägte Temperaturschwankungen der Grundwassertemperatur an lechnahen Pegeln im Jahresgang festzustellen. In diesen Bereichen ist von einem stärkeren Einfluss des Lechs auf das Grundwasser auszugehen. Der Trend der zunehmenden Lechtemperatur wirkt sich entsprechend in diesen Bereichen auf die Grundwassertemperatur aus.
- Einige lechnahe Pegel zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Grundwasser- und Lechtemperatur, sodass davon ausgegangen werden muss, dass an einigen Abschnitten des Lechs keine Verbindung mit dem oberen Grundwasserleiter besteht oder an diesen Stellen eine Exfiltration von Grundwasser in den Lech stattfindet. Eine Auswirkung steigender Lechtemperaturen auf die Grundwassertemperatur ist in diesen Bereichen nicht zu vermuten. Dies ist jedoch nur lokal begrenzt.

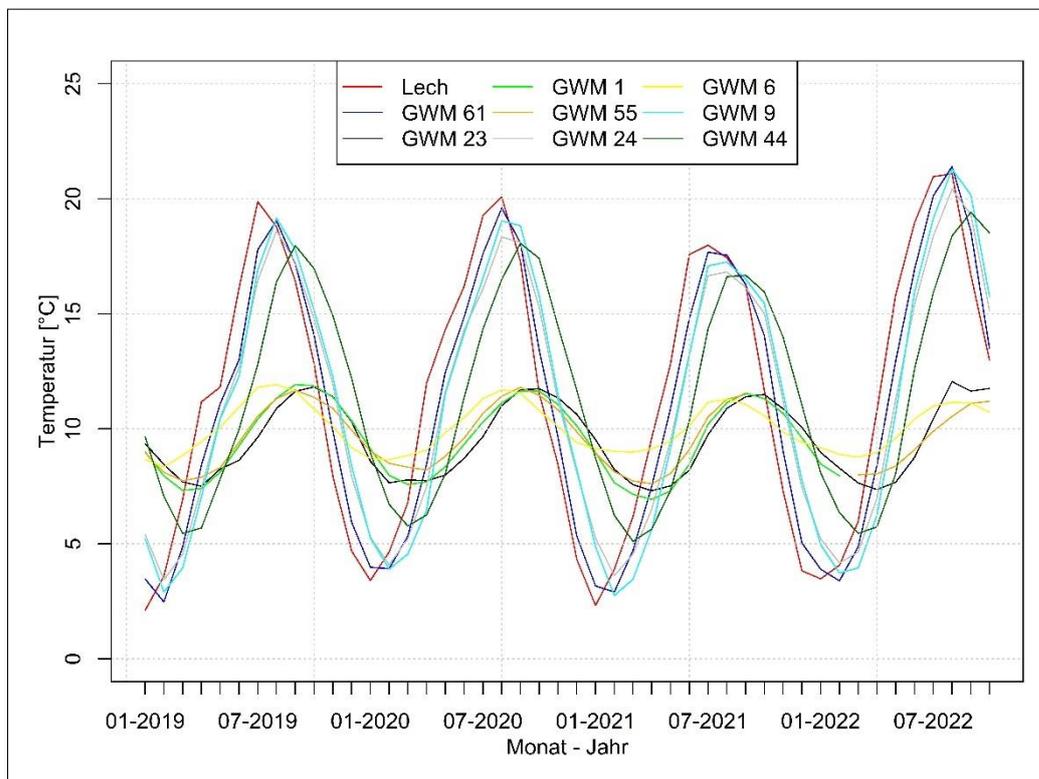


Abbildung 19: Lechtemperatur und Temperatur einiger Lechnaher Pegel im Vergleich (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

In Abbildung 19 sind einige Sommertemperaturen (Juni – September) lechnaher Pegelmessstellen im Vergleich zur Lechtemperatur abgebildet. Bei diesen Pegeln zeigt sich, dass die Grundwassertemperatur im Sommer mit der Entfernung zum Lech abnimmt. Die Grundwassermessstellen mit den höchsten Temperaturen liegen meist in Lechnähe, jedoch ist dies nicht für alle Pegel der Fall. So zeigen beispielsweise die GWM 1 oder GWM 6 nur geringe Schwankungen im Jahresgang. Dementsprechend ist hier davon auszugehen, dass kein oder nur ein geringer Einfluss durch den

Lech besteht. Im Allgemeinen nimmt die Schwankungshöhe im Jahresgang mit der Entfernung vom Lech ab. In Abbildung 20 sind mehrere Pegel mit zunehmender Entfernung zum Lech dargestellt. Pegel GWM 44 befindet sich dabei sehr nahe am Gewässer, während die Pegel GWM 75 und 30 am weitesten entfernt sind. Für die Gewinnungstemperatur bedeutet dies, dass in Flachbrunnen, welche im oberen Grundwasserleiter ausfiltern und sich nahe eines Fließgewässers befinden, von höheren Temperaturschwankungen auszugehen ist. Dies wird in Kapitel 5.1.2 näher dargelegt.

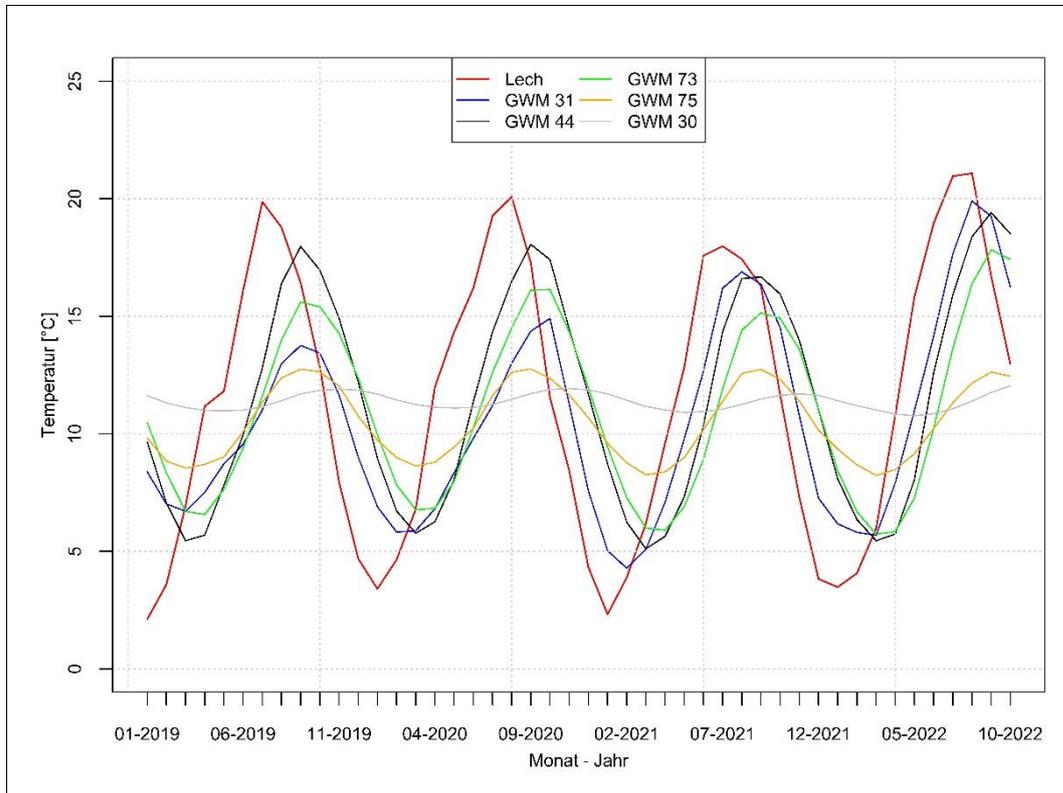


Abbildung 20: Temperaturverteilung einiger Pegelmessungen mit zunehmender Entfernung zum Lech im Vergleich zur Lechtemperatur (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Neben dem Lech sollen auch die zahlreichen Stadtbäche betrachtet werden. Der Einfluss der Stadtbäche, insbesondere des Lochbachs, auf einige Bereiche des Grundwasserleiters konnte bereits nachgewiesen werden (Maloszewski & Trimborn, 1997). Somit kann auch hier von einem Einfluss der Stadtbäche auf die Temperatur im Grundwasser ausgegangen werden.

Einen Hinweis aus den vorliegenden Daten bietet GWM 31. Die Mitteltemperatur der Sommermonate liegt hier bei 14,30°C. Dieser Pegel liegt im Abstrom des Grundwassers aus Richtung eines Stadtbachs, sodass hier das Oberflächengewässer möglicherweise der Grund der etwas höheren Grundwassertemperaturen ist. Im Vergleich dazu liegt GWM 30 mit 13,29°C im Zustrom eines Stadtbachs. Der Einfluss von Fließgewässern ist hier entsprechend geringer.

Vergleichbar zum Lech, weisen auch einige Pegel in der Nähe von Stadtbächen nur geringe Schwankungen bzw. niedrige Temperaturen im Sommer trotz ihrer Nähe zu einem Gewässer auf, wie im Fall von GWM 12 mit 11,38°C. Dies zeigt, dass aufgrund kleinräumiger hydrogeologischer Änderungen im Untersuchungsgebiet und unter Berücksichtigung des Projektumfangs keine generalisierte Aussage zum Einfluss von Fließgewässern auf die Grundwassertemperatur getroffen werden

kann. Es ergeben sich dennoch hilfreiche Hinweise auf den Zusammenhang zwischen Fließgewässern und der Grundwassertemperatur im oberen Grundwasserleiter.

Um anhand der vorliegenden Daten einen vereinfachten räumlichen Überblick über die Temperaturverteilung zu erhalten, wurde mithilfe einer IDW-Analyse (Inverse Distance Weighting) aus den Pegelmessungen eine flächenhafte Darstellung der Temperatur im oberen Grundwasserleiter modelliert. Bei der IDW-Methode wird angenommen, dass je näher sich ein Punkt an der gewichteten Zelle befindet, desto größer der Einfluss beziehungsweise die Gewichtung der Zelle auf diesen Punkt ist (McCoy, Johnston, & Kopp, 2001, S. 136). Gleichzeitig verliert die jeweilige Variable mit zunehmendem Abstand zu diesem Punkt an Einfluss (ebd.)

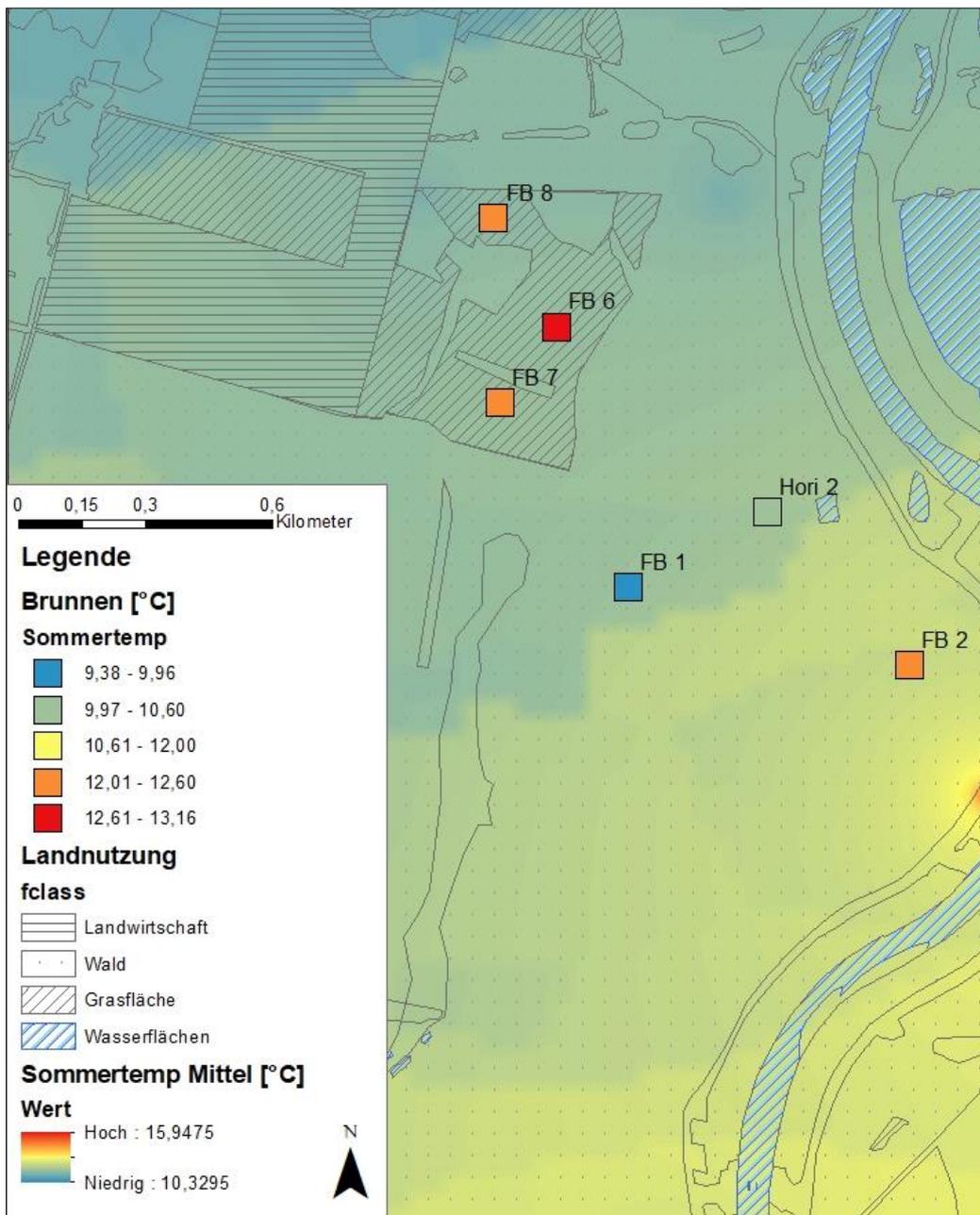


Abbildung 21: IDW-Analyse der Pegel (Sommertemperatur) und Darstellung der Brunnentemperatur in einem ausgewählten Abschnitt (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & OpenStreetMap contributors, 2022)

Ausgewertet wurden die IAA-Temperaturen einzelner Monate der Jahre 2019 bis 2022 im Mittel, sowie die Sommertemperatur. Abbildung 21 zeigt einen Ausschnitt der IDW-Analyse für die Sommermitteltemperatur. Hier lässt sich die Verteilung der Temperaturbereiche erkennen. Entsprechend der IDW-Analyse treten höhere Grundwassertemperaturen entlang des Lechs und vorwiegend zwischen Lechstaustufe 23 und dem Lech auf Höhe einer größeren Heidefläche (Schießplatzheide, Gekennzeichnete Fläche links von FB1) auf. Dies lässt vermuten, dass wenig beschattete Bereiche höhere Grundwassertemperaturen aufweisen. In Kapitel 5.1.2 wird dies anhand der Satellitendaten und Brunnentemperaturen näher besprochen.

Südlich und noch ausgeprägter nördlich der Schießplatzheide treten weniger hohe Temperaturen entlang des Lechs sowie in den Schutzgebieten auf. Im Winter ist das Verhalten der Temperatur gegensätzlich. Niedrige Temperaturen sind nun vorwiegend entlang des Lechs zu finden, wie auch die Pegeltemperaturen in Abbildung 19 und Abbildung 20 verdeutlichen.

Im Allgemeinen bietet die IDW Analyse der Sommermonate einen guten Hinweis darauf, wo im oberen Grundwasserleiter hohe Temperaturbereiche zu erwarten sind. Wie sehr sich diese Temperaturen in der Gewinnung widerspiegeln, wird im nachfolgenden Kapitel näher besprochen.

### **5.1.2 Gewinnungstemperatur**

Zur Ermittlung der Temperatur in der Gewinnung wurden durch swa an einigen ausgewählten Brunnen Temperaturlogger installiert, um die Entnahmetemperatur kontinuierlich zu erfassen. Hierfür sind Brunnen unterschiedlicher Lage und unterschiedlicher Fördertiefe ausgewählt worden. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Brunnentemperaturmessung sowie die Ausbautiefe der jeweiligen Brunnen aufgelistet. Die Messungen umfassen die Jahre 2021 und 2022 und sind für die Einordnung der Brunnen hinsichtlich ihrer Vulnerabilität in Hinblick auf die klimatische Entwicklung relevant.

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung in der Gewinnung sind folgende Punkte zu beachten:

- Der Einflussfaktor Grundwasserleiter bzw. Ausbautiefe des Brunnens.
- Die Lage des Brunnens, insbesondere in Bezug auf die Entfernung vom Lech.

Die Ausbautiefe der Brunnen ist in Tabelle 11 ebenfalls aufgelistet. Zunächst wird über die Differenz der Maximal- zur Minimaltemperatur ersichtlich, dass die im oberen tertiären Grundwasserleiter ausgefilterten Tiefbrunnen eine geringere Schwankungsbreite der Temperatur im Jahresgang aufweisen als die Flachbrunnen. Dies entspricht dem in Kapitel 4 besprochenen Temperaturverhalten im Boden. Das Grundwasser im oberen Tertiär ist demnach vor jahreszeitlichen Schwankungen deutlich besser geschützt als der oberflächennähere quartäre Grundwasserleiter, welcher sich durch stärkere jahreszeitliche Schwankungen auszeichnet.

Tabelle 11: Auflistung der Brunnentemperaturen im Mittel (2021 und 2022) in °C, nach Temperatur farbig markiert (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Zeitpunkt	Hori 120	TB 822	FB 214	FB 215	Hori 221	FB 152	FB 817	TB 826
Zeitpunkt	Hori 1	TB 1	FB 1	FB 2	Hori 2	FB 3	FB 4	TB 2
Jan	11.21	12.84	8.98	11.74	11.17	12.48	11.37	11.39
Feb	9.45	12.74	8.33	9.88	10.78	11.99	10.95	11.31
Mrz	8.17	12.65	7.51	8.07	10.35	11.36	10.29	11.28
Apr	7.55	12.53	7.56	7.76	9.98	10.95	9.83	11.30
Mai	7.57	12.56	7.63	8.07	9.75	10.94	9.29	11.31
Jun	8.61	12.70	8.21	9.39	9.78	11.32	9.16	11.33
Jul	10.74	12.79	9.10	11.32	10.10	11.85	9.52	11.34
Aug	12.99	12.86	9.81	13.12	10.62	12.18	10.16	11.35
Sep	14.74	12.87	10.39	15.04	11.15	12.67	11.00	11.35
Okt	15.27	12.87	10.64	15.92	11.56	12.78	11.72	11.35
Nov	14.69	12.86	10.56	15.71	11.73	12.96	12.46	11.68
Dez	12.60	12.84	9.68	13.56	11.51	12.80	11.78	11.34
Gesamt	11.13	12.76	9.04	11.63	10.71	12.02	10.63	11.36
Sommertemp.	11.77	12.81	9.38	12.22	10.41	12.00	9.96	11.34
Dif. Min/Max	7.73	0.34	3.13	8.16	1.99	2.02	3.30	0.39
Ausbautiefe [m]	15.00	59.10	7.95	10.75	24.00	10.03	11.10	48.00

Zeitpunkt	TB 712	FB 713	FB 715	FB 716	FB 717	FB 3310	FB 3409
Zeitpunkt	TB 3	FB 5	FB 6	FB 7	FB 8	FB 9	FB 10
Jan	9.95	9.16	13.18	11.89	11.97	12.35	10.37
Feb	9.95	8.59	12.34	11.29	11.31	11.64	9.56
Mrz	9.92	8.21	11.70	10.83	10.89	11.12	8.86
Apr	9.94	8.16	11.44	10.76	10.70	10.84	8.37
Mai	9.95	8.55	11.50	10.93	10.91	11.09	8.14
Jun	9.94	9.30	11.93	11.41	11.61	11.80	8.38
Jul	9.92	10.32	12.78	12.12	12.30	12.33	9.12
Aug	9.91	11.12	13.62	12.97	13.00	12.61	10.05
Sep	9.91	11.67	14.32	13.43	13.49	12.93	10.98
Okt	9.91	11.55	14.85	13.60	13.83	13.23	11.62
Nov	9.91	11.14	14.91	13.44	13.67	13.46	11.80
Dez	9.96	9.88	13.99	12.56		13.10	11.20
Gesamt	9.93	9.80	13.05	12.10	12.15	12.21	9.87
Sommertemp.	9.92	10.60	13.16	12.48	12.60	12.42	9.63
Dif. Min/Max	0.05	3.51	3.47	2.84	3.13	2.62	3.66
Ausbautiefe [m]	34.70	10.00	9.85	10.43	10.57	11.00	11.50

Der Einfluss der Ausbautiefe auf die Schwankungsbreite der Temperatur zeigt sich auch im Fall der Horizontalfilterbrunnen (Abbildung 22). Im Vergleich zu allen weiteren untersuchten Brunnen liegen beide Horizontalfilterbrunnen hinsichtlich der Ausbautiefe im mittleren Bereich. Auffällig ist jedoch, dass Hori 1 mit 7,73°C eine sehr hohe Schwankung der Temperatur im Jahresgang aufweist. Mit der Ausbautiefe ist die Vulnerabilität des Brunnens hinsichtlich der Temperatur daher nicht ausschließlich zu begründen.

Grundsätzlich ist, sowohl bei den besser vor jahreszeitlichen Temperaturschwankungen geschützten Tiefbrunnen als auch bei den vulnerablen Flachbrunnen, keine einheitliche Aussage zum Temperaturmaximum und Temperaturmittel zu treffen.

Beispielsweise treten die höchsten Temperaturen im Jahresmittel sowohl bei Flachbrunnen (FB 6), als auch bei Tiefbrunnen (TB 1) auf. Gleichzeitig sind auch die niedrigsten Jahresmitteltemperaturen sowohl bei Tief (TB 4), als auch bei Flachbrunnen (FB 2) zu finden. Entsprechend sind hier weitere Einflussfaktoren, unabhängig von der Ausbautiefe, zu berücksichtigen.

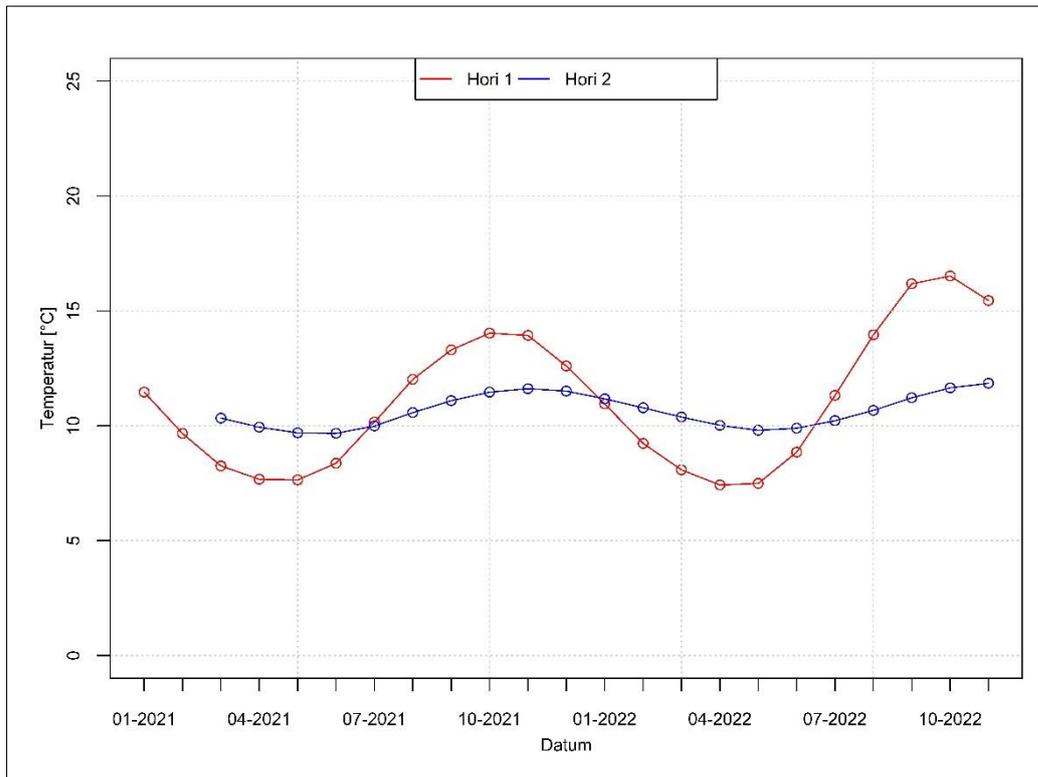


Abbildung 22: Brunnentemperatur der Horizontalfilterbrunnen 120 und 221 im Untersuchungszeitraum (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Bei den drei untersuchten Tiefbrunnen ist eine Temperaturzunahme mit zunehmender Ausbautiefe der Brunnen festzustellen (Tabelle 12). Tiefbrunnen TB 3 ist mit einer Ausbautiefe von 34,7 m und einer Mitteltemperatur von 9,93°C hinsichtlich der Temperatur als deutlich besser einzuordnen als Tiefbrunnen 1 mit einer Ausbautiefe von 59,1 m und 12,76°C.

Die höheren Temperaturen des tieferen Brunnens sind mit der Temperaturzunahme mit der Tiefe zu begründen, wie dies auch in Abbildung 6 dargestellt ist. Demnach nimmt ab 50 m Tiefe die Temperatur durch den Einfluss des Wärmestroms aus dem Erdinneren um  $\approx 3^\circ\text{C}$  pro 100 m zu (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2001). Eine allzu hohe Ausbautiefe der Tiefbrunnen ist daher im Hinblick auf die Temperatur zu vermeiden. Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 11 ist eine Ausbautiefe von etwa 30 m für Tiefbrunnen im Untersuchungsgebiet hinsichtlich der Temperatur zu bevorzugen.

Anzumerken ist, dass ein Versatz vom Temperaturmaxima im Boden zum Temperaturmaxima der Lufttemperatur im Jahresgang besteht, wie bereits in geringerer Tiefe anhand der Bodentemperaturmessungen in Kapitel 4.1 sichtbar wird. Mit zunehmender Tiefe ergibt sich ein deutlicher ausgeprägter Versatz der Temperaturmaxima im Boden zu dem der Luft im Sommer. Im Fall der Tiefbrunnen tritt daher das Temperaturmaxima in den frühen Sommermonaten auf. Jedoch ist die Differenz der Maximal- und Minimaltemperatur mit  $< 0,5^\circ\text{C}$  für alle Tiefbrunnen sehr gering. Im Allgemeinen kann für die hier untersuchten Tiefbrunnen von einer Temperaturstabilität im Jahresgang ausgegangen werden.

Tabelle 12: Ergebnisse der Temperaturmessung in den Tiefbrunnen (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Brunnen	Tiefbrunnen TB 1	Tiefbrunnen TB 2	Tiefbrunnen TB 3
Temperaturmittel	12,76°C	11,36°C	9,93°C
Sommertmittel	12,81°C	11,34°C	9,92°C
Differenz Min/Max	0,34°C	0,39°C	0,05°C
Ausbautiefe	59,10 m	48,00 m	34,70 m

In Abbildung 23 sind die Temperatur-Ganglinien der Flachbrunnen abgebildet. Die Maximaltemperatur im Jahresgang tritt bei dem Großteil dieser Brunnen in den Herbst- und den frühen Wintermonaten auf. Mit etwa 12,7°C im Mittel sind Oktober und November die wärmsten Monate. Für den Trinkwasserversorger gibt dies einen guten Hinweis zur Maßnahmenplanung, da die temperaturkritischen Monate im Rohrnetz in den Sommermonaten Juni bis September zu finden sind. Es besteht somit ein zeitlicher Versatz zwischen hohen Temperaturen in der Gewinnung (Herbst/Winter) und hoher Rohrnetztemperaturen (Sommer) im Versorgungsgebiet.

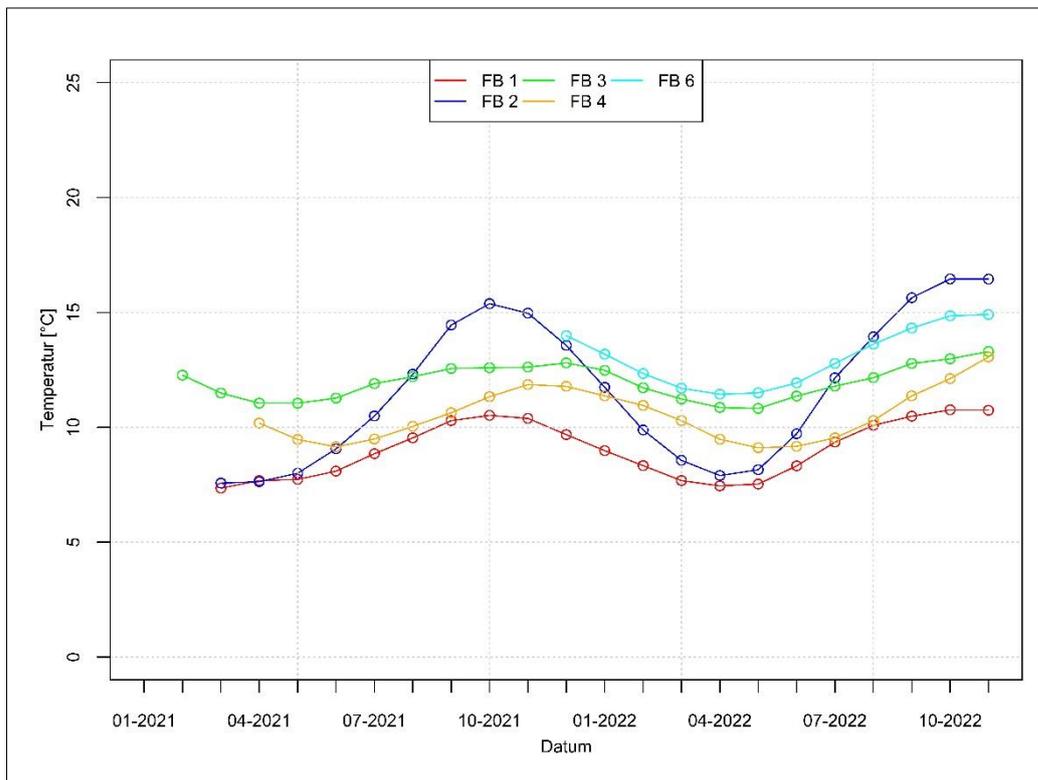


Abbildung 23: Brunnentemperatur ausgewählter Filterbrunnen als Beispiel im Vergleich (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Des Weiteren sind hohe Maximaltemperaturen nicht nur in Brunnen mit hoher Schwankungsbreite wie bei Hori 1 oder Flachbrunnen FB 2 festzustellen, sondern auch bei Brunnen mit geringerer Schwankung im Jahresgang, wie im Fall von Flachbrunnen FB 6.

Um die Temperaturentwicklung in den Flachbrunnen zu untersuchen, wird die Temperaturverteilung der IDW-Analyse herangezogen (Abbildung 21). Dabei soll überprüft werden, ob sich die Temperatur der Flachbrunnen, welche im oberen Grundwasserleiter ausfiltern, ähnlich der Temperatur

der Grundwassermessstellen verhält. Anhand der Daten war zu erwarten, dass eine Lechnähe von Flachbrunnen höhere Temperaturen begünstigt. Dies konnte durch die vorliegenden Daten nicht eindeutig bestätigt werden. Es besteht zwar eine Überschneidung von höher temperierten Brunnen (FB 2) und dem höher temperierten Bereich der IDW-Analyse oder kühleren Brunnen (FB 5) und kühleren Bereichen. Jedoch sind auch kühlere Brunnen (FB 4) in wärmeren und wärmere Brunnen (FB 6 – FB 8) in kühleren Bereichen zu finden (Abbildung 21).

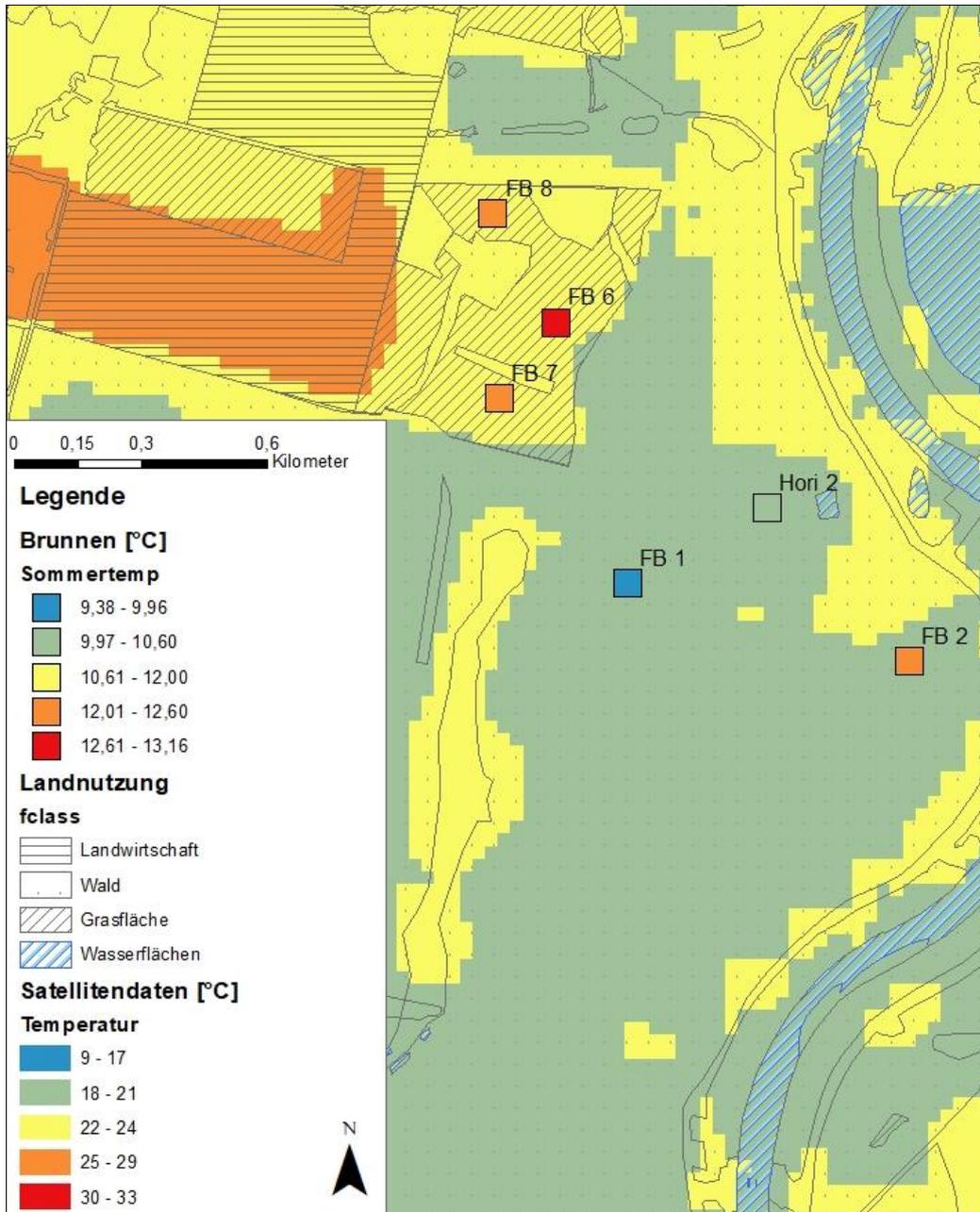


Abbildung 24: Oberflächentemperaturen nach Satellitendaten in einem ausgewählten Abschnitt im Schutzgebiet im Vergleich zu der Brunnentemperaturverteilung (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & OpenStreetMap contributors)

Grund hierfür ist das lokale Vorhandensein von Grundwassergeringleitern im Grundwasserleiter zu vermuten, sodass stellenweise der Einfluss des Gewässers auf das obere Grundwasser im Nahbereich verringert wird. Eindeutigere Ergebnisse hinsichtlich der räumlichen Temperaturverteilung lassen sich über Oberflächentemperaturen aus Satellitendaten entnehmen. In Abbildung 24 ist neben den Satellitendaten und Brunnentemperaturen auch die Landnutzung dargestellt. Dabei ist insbesondere der Unterschied zwischen landwirtschaftlich genutzten Flächen und bewaldeten Bereichen zu betrachten, da es hier zu einem Unterschied hinsichtlich der Bodentemperatur aufgrund geänderter Oberfläche und Beschattung kommt.

Unter Einbezug der Landnutzungsinformation stimmt die Brunnentemperatur gut mit den Temperaturbereichen aus Satellitendaten überein. Beispielsweise liegen die etwas wärmeren Brunnen FB 6 bis FB 8 in einem Bereich hoher Oberflächentemperaturen und folglich höheren Bodentemperaturen. Es handelt sich hierbei um Grasflächen ohne Abschattung. Ebenfalls hohe Oberflächentemperaturen sind im Bereich der Schießplatzheide erkennbar.

Waldflächen hingegen zeichnen sich durch kühlere Oberflächentemperaturen aus. Für die Temperatur von Flachbrunnen bedeutet dies, dass die Temperatur auch durch die Landnutzung bzw. die Beschattung des Grundwasserleiters im Nahbereich des Brunnens beeinflusst wird. Dies entspricht einer Beobachtung von Pluhowski & Kantrowitz (1963), wonach in einem untersuchten Grundwasservorkommen im Sommer die Temperaturen in bebauten oder unbewaldeten Gebieten höher als unter Waldflächen liegen (Pluhowski & Kantrowitz, 1963).

Zur Einordnung der Temperatur in Flachbrunnen muss demnach eine Kombination aus Lechnähe (IDW-Analyse) und Landnutzung (Oberflächentemperatur) betrachtet werden. Allgemein lässt sich festhalten, dass Flachbrunnen in ihrem Temperaturverhalten sehr divers sind. Flachbrunnen in Lechnähe oder in wenig beschatteten Bereichen sind demnach mit höherer Wahrscheinlichkeit als wärmer einzustufen, während Flachbrunnen, die in beschatteten Bereichen und nicht in der Nähe eines Fließgewässers liegen als kühler einzustufen sind.

Im Hinblick auf die klimatische Entwicklung ist außerdem zu berücksichtigen, dass eine hohe Luft- und Bodentemperatur in den Wintermonaten zu einer geringeren Abkühlung der Grundwassertemperatur führt. Daraus resultiert eine geringere Temperaturdifferenz zwischen den Sommer- und Wintermonaten und damit einhergehend eine schnellere Erwärmung des Grundwassers. Auch wenn die Maximaltemperaturen der Brunnen erst in den Herbst- und Wintermonaten auftreten, begünstigen milde Winter eine schnellere Temperaturzunahme in dem oberen Grundwasserleiter.

Ein Hinweis darauf kann der Tabelle 13 entnommen werden. Es handelt sich um Temperaturdaten dreier ausgewählter Grundwassermessstellen einzelner Monate sowie um die dazugehörigen Lufttemperaturdaten. Hier werden die, hinsichtlich der Lufttemperatur als etwas wärmer einzustufenden Winterzeiträume 2019/20 und 2021/22 mit dem als etwas kühler einzustufenden Winterzeitraum 2020/21 verglichen.

Tabelle 13: Grundwassertemperatur dreier ausgewählter Messstellen (GWM) und Monatsmitteltemperatur, nach Temperatur farbig markiert (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023 & Deutscher Wetterdienst, 2023)

Datum	Luft-Temp. [°C]	GWM 1 [°C]	GWM 2 [°C]	GWM 3 [°C]
Nov 19	4.87	11.74	11.59	12.18
Dez 19	2.24	10.54	11.37	11.36
Jan 20	2.02	9.36	10.89	10.24
Feb 20	5.09	8.75	10.45	9.19
Mrz 20	4.92	8.63	10.22	8.94
Apr 20	10.34	8.78	10.20	8.94
Mai 20	12.1	9.59	10.26	9.39
Jun 20	15.96	10.21	10.52	10.05
Jul 20	18.5	10.84	10.86	10.95
Aug 20	18.77	11.44	11.22	11.83
Sep 20	14.18	11.88	11.58	12.50
Okt 20	9.2	11.99	11.84	12.60
Nov 20	4.71	11.74	11.84	12.17
Dez 20	1.36	11.25	11.58	11.39
Jan 21	-0.31	10.55	11.15	10.30
Feb 21	2.38	9.70	10.71	9.15
Mrz 21	4.03	9.30	10.43	8.85
Apr 21	5.97	9.20	10.35	8.71
Mai 21	10.3	9.38	10.40	8.96
Jun 21	18.37	9.88	10.55	9.64
Jul 21	17.64	10.67	11.00	10.87
Aug 21	16.36	11.49	11.38	11.85
Sep 21	14.6	11.85	11.62	12.37
Okt 21	8.31	11.87	11.70	12.25
Nov 21	2.79	11.58	11.65	11.74
Dez 21	2.27	10.96	11.37	10.89
Jan 22	1.46	10.21	10.89	9.80
Feb 22	3.93	9.71	10.55	9.23
Mrz 22	4.45	9.34	10.34	8.80
Apr 22	7.32	9.12	10.20	8.61
Mai 22	14.69	9.37	10.24	8.99
Jun 22	18.78	10.01	10.46	9.88
Jul 22	19.7	10.73	10.81	10.86
Aug 22	19.51	11.37	11.23	11.73
Sep 22	12.93	11.84	11.62	12.46
Okt 22	12.26	12.00	11.87	12.64

So zeigen vor allem die Pegel GWM 1 und GWM 3 nach den wärmeren Winterzeiträumen eine etwas schnellere Temperaturzunahme. Im Fall beider Messstellen wurde nach dem etwas wärmeren Winterzeitraum 2019/20 schneller eine Grundwassertemperatur von  $> 10^{\circ}\text{C}$  erreicht (Juni) als nach dem etwas kühleren Winterzeitraum 2020/21 (Juli). Auch nach dem Winterzeitraum 2021/22 ist eine etwas schnellere Erwärmung, insbesondere der GWM 1 ersichtlich. Jedoch ist dieses Verhalten im Fall der Messstelle GWM 2 nicht erkennbar.

Hinzu kommt, dass die Temperaturentwicklung der Frühlings- und Sommermonate ebenfalls in die Betrachtung einbezogen werden muss, da hohe Frühjahrstemperaturen auch nach vergleichsweise kühlen Winterzeiträumen ebenfalls eine schnellere Temperaturzunahme begünstigen. Eine Langzeitbetrachtung der Temperaturentwicklung im Brunnen- und Grundwasser unter Berücksichtigung aller Klimaparameter (Temperatur, Niederschlag) im Jahresgang ist daher wichtig, um die Prozesse, welche sich auf die Temperatur im Grundwasser auswirken vollständig zu verstehen.

## 5.2 Einflussfaktoren in der Verteilung

In der Verteilung wirken zahlreiche Einflussfaktoren auf die Trinkwassertemperatur, die in Abbildung 25 skizziert sind. Ausgehend von der Eingangstemperatur, welche sich aus der Gewinnungstemperatur ergibt, wird die Temperatur im gesamten Netz betrachtet. Neben der Gewinnungstemperatur wird die Eingangstemperatur durch die Lage und Entfernung zu den Brunnen sowie durch die Gebäudeeigenschaften der einzelnen Hochbehälter, Wasserwerke und Übergabestationen beeinflusst.

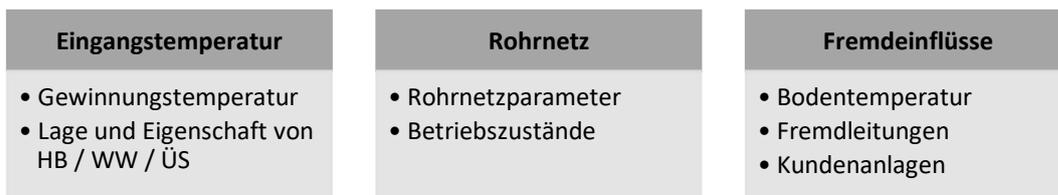


Abbildung 25: Übersicht über Einflussfaktoren in der Verteilung

Des Weiteren werden das Rohrnetz mit seinen Parametern und Betriebszuständen sowie die einzelnen Fremdeinflüsse näher betrachtet. Letztere sind besonders schwierig zu quantifizieren, da die Datenlage meist unzureichend ist. Im Folgenden wird darauf im Einzelnen eingegangen. Zudem muss die Temperaturentwicklung in den Kundenanlagen selbst betrachtet werden, da hier erhebliche Einflüsse auf die Wassertemperatur erfolgen können.

Die Bodentemperatur, welche den treibenden Faktor sowohl in der Gewinnung als auch in der Verteilung darstellt, wurde in Kapitel 4 besprochen, wird aber neben den klimatischen Faktoren auch durch Fremdleitungen wie Fernwärme beeinflusst.

Nachfolgend werden die einzelnen Einflussfaktoren in der Verteilung näher besprochen.

### 5.2.1 Speicherung und Verteilung

Eine gute Datenlage hinsichtlich der Temperatur besteht in der Speicherung, da an allen Übergabestellen, Wasserwerken und Hochbehältern vor der Einspeisung in das Netz kontinuierliche Temperaturmessungen stattfinden. Die unterschiedlich temperierten Wässer aus der Gewinnung mischen sich in den einzelnen Übergabestellen. Für die Entwicklung der Temperatur im Rohrnetz und die Modellierung der Trinkwassertemperatur ist die Information zur Einspeisetemperatur die entscheidende.

Zu beachten ist, dass auch in den Einspeisestellen bei einer langen Verweilzeit, beispielsweise in einem Hochbehälter, ein Angleichen der Temperatur an die Umgebung, beispielsweise die Raumtemperatur eines Hochbehälters, stattfindet. Je nach Bauweise des Behälters und Dauer der Verweilzeit führt dies vor allem im Sommer zu einer Temperaturzunahme des Trinkwassers in der Einspeisestelle.

Des Weiteren ist auch der Weg des Wassers von der Gewinnung bis zu der entsprechenden Speicher- bzw. Einspeisestelle zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich um Mischwasser verschieden temperierter Brunnen. Bei einer langen Fließstrecke auf dem Weg zu der Speicher- und Einspeisestelle kommt es zu einer Zunahme der Verweilzeit des Wassers im Boden. Damit nimmt auch die Zeit zu, in der ein Temperatúraustausch zwischen Boden und Trinkwasser stattfindet. Es kommt im Sommer somit zu einer Temperaturzunahme mit der länger werdenden Verweildauer des Wassers in der Leitung.

Dies kann auch über die Auswertung der Einspeisetemperatur nachgewiesen werden. So zeigen Einspeisestellen, denen eine lange Fließstrecke zu dem Gewinnungsgebiet vorangeht, im Sommer vergleichsweise hohe und im Winter eher niedrige Temperaturen. Grund hierfür ist die im Sommer höhere und im Winter eher niedrigere Bodentemperatur in Leitungsnähe im Vergleich zu der Gewinnungstemperatur, die zu einer Temperaturänderung führt.

Im Gegensatz dazu zeigen Einspeisestellen nahe der Gewinnungsgebiete geringere Sommertemperaturen, was aufgrund der kurzen Rohrstrecke und damit geringen Verweilzeit des Wassers in der Leitung zu begründen ist. Jedoch ist dies nicht bei allen Einspeisestellen mit kurzer Fließstrecke der Fall. So konnten in einer Einspeisestelle auffällig hohe Temperaturen im gesamten Jahresgang festgestellt werden. Hier ist entweder von einem Messfehler oder von gebäudespezifischen Einflussfaktoren auszugehen.

Die Verweilzeit des Wassers in der Leitung spielt grundsätzlich für die Betrachtung der Einspeisetemperatur eine zentrale Rolle. Einspeisestellen mit langer Fließstrecke zwischen Gewinnung und Speicherung, wie die beiden Hochbehälter im Westen der Stadt, sind somit hinsichtlich der Temperatur als vulnerabler einzustufen.

### 5.2.2 Rohrnetz und Betriebszustände

In einem Trinkwasserversorgungssystem, insbesondere in einem komplexen System wie in einer Großstadt, ist das Fließverhalten im Netz von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit in einem Rohrleitungsabschnitt ändern sich abhängig von der Einspeisestelle und -menge, der Abnahmemenge durch Kundenanlagen, der Rohrleitungsdurchmesser und durch Schieber im Netz. Aus der Kombination dieser Parameter ergeben sich verschiedene Betriebszustände. In einem vereinfachten Modell ist diese Komplexität eines großstädtischen Versorgungssystems jedoch schwer abzubilden, sodass der Faktor der Fließrichtung und -geschwindigkeit möglichst vereinfacht in das Modell einbezogen werden muss.

In dem Modell wurden vor allem häufig auftretende Situationen hinsichtlich des Verbrauchs im Netz betrachtet, wie beispielsweise ein Durchschnittstag zur Durchschnittsstunde, der Minimalverbrauch am Durchschnittstag oder die Spitzenstunde am Durchschnittstag. Diese Situationen stellen verschiedene Betriebszustände im Netz dar, welche sich in Form von verschiedenen Fließgeschwindigkeiten, -richtungen und Einspeisestellen äußern. Die Daten können aus einer Rohrnetzberechnung für jeden untersuchten Betriebszustand entnommen werden.

Die entsprechenden Situationen im Netz stellen Referenztage bzw. Referenzzeitpunkte dar und basieren auf Erfahrungswerten des Versorgungsunternehmens. Hierbei werden Verbrauchswerte der Vergangenheit herangezogen, um eine standardisierte Berechnungsgrundlage für beispielsweise die Rohrnetzberechnung zu gewährleisten. Der Durchschnittstag repräsentiert einen durchschnittlichen Wasserverbrauch hinsichtlich der Daten zu Einspeisemenge, Verbrauch, Fließgeschwindigkeit und -richtung. Am Durchschnittstag entspricht die Durchschnittsstunde einem festgelegten Zeitpunkt am Nachmittag, während der Minimalverbrauch für den Referenztag in der Nacht auftritt. Die Spitzenstunde hingegen tritt am Vormittag auf, da hier der größte Verbrauch stattfindet.

Um die verschiedenen Situationen im Netz zu berechnen, wurden diese Referenztage bzw. Referenzzeitpunkte gewählt. Dadurch können fiktive Betriebszustände mit Daten aus der Netzberechnung beschrieben werden. Im Folgenden werden diese als Betriebszustände mit den Buchstaben A bis E gekennzeichnet. Betrachtet wurde im Fall der Betriebszustände A, B und C die Verbrauchssituation „Spitzenstunde/Durchschnittstag“. Der Unterschied zwischen diesen Betriebszuständen besteht in der Einspeisesituation im Süden der Stadt (Druckzone Süd). Während bei Betriebszustand A alle Einspeisestellen aktiv sind, werden in den Betriebszuständen B und C nur jeweils zwei von drei Einspeisestellen betrieben.

Insbesondere in den relevanten Sommermonaten ist anhand der Betriebserfahrung von einem größeren Verbrauch auszugehen, sodass die Betriebszustände A bis C „Spitzenstunde/Durchschnittstag“ häufiger anzunehmen sind als „Durchschnittsstunde/Durchschnittstag“ (Betriebszustand D). Grund hierfür ist der größere Trinkwasserverbrauch in den Sommermonaten und insbesondere während längerer Hitzeperioden. Des Weiteren wird der Betriebszustand E „Minimalverbrauch/Durchschnittstag“ untersucht, um das „Worst-Case-Szenario“ einer langen Verweilzeit des Wassers im Netz zu errechnen.

In Abbildung 26 ist dargestellt in welcher Form die Daten der Betriebszustände A bis E vorliegen, die später in dem Modell verarbeitet werden. Jedem individuellen Rohrleitungsabschnitt (STANET-ID) wird eine Fließgeschwindigkeit zugeordnet.

STANET-ID	A-Durchfluss	A-Geschwindigkeit	B-Durchfluss	B-Geschwindigkeit	C-Durchfluss	C-Geschwindigkeit	D-Durchfluss	D-Geschw.	E-Durchfluss	E-Geschw.
							m <sup>3</sup> /h	m/s	m <sup>3</sup> /h	m/s
PIPE44717F	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,0000	0,000
PIPE44717F	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,0000	0,000
PIPE44717F	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	-0,000	-0,0000	-0,001	-0,0000
PIPE4472BE	18,840	0,5809	18,840	0,5809	18,840	0,5809	12,872	0,3969	3,408	0,1051
PIPE4472CE	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000
PIPE44966D	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	-0,000	-0,0000	-0,000	-0,0000
PIPE4496DE	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	-0,000	-0,0000
PIPE4498DE	91,205	0,1314	91,205	0,1314	91,205	0,1314	91,205	0,1314	91,205	0,1314
PIPE4498DE	91,205	0,3329	91,205	0,3329	91,205	0,3329	91,205	0,3329	91,205	0,3329
PIPE4498DE	474,999	0,4707	474,999	0,4707	474,999	0,4707	474,999	0,4707	474,999	0,4707
PIPE4498DE	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000
PIPE4498DE	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000
PIPE4498DE	398,414	0,5742	322,451	0,4647	417,188	0,6012	310,744	0,4478	258,246	0,3722

Abbildung 26: Auszug von Fließgeschwindigkeit A-E aus STANET® (swa [1], 2023)

Bei einer hohen Abnahme im Netz sind (meist) alle Einspeisestellen aktiv, während bei geringer Abnahme (nachts) die Hochbehälter im Westen des Versorgungsgebiets gefüllt werden. Dies führt zu einer Fließrichtungsumkehr in einigen Abschnitten des Netzes, was sich direkt auf die Verweilzeit des Wassers in der Leitung auswirkt.

Für jeden gewählten Fall der Fließgeschwindigkeit muss den einzelnen Rohrnetzabschnitten die zugehörige Einspeisestelle zugeordnet und später als Routentabelle berechnet werden. In Kapitel 7.2 wird dies näher ausgeführt. Weitere Rohrnetzparameter, welche für das Modell relevant sind, werden in Kapitel 7.4 besprochen.

### 5.2.3 Fremdleitungen

Aufgrund der konkurrierenden Nutzung im Straßengraben befinden sich neben den Trinkwasserleitungen noch einige weitere Leitungssysteme. Für die Stadt Augsburg sind folgende Fremdleitungen relevant:

- Abwasserleitung
- Gasleitung
- Fernwärmeleitung
- Nahwärmeleitung
- Stromleitungen (10-20 kV und 100 kV)

Jede dieser Leitungen steht in einem Temperatúraustausch mit dem umliegenden Boden. Dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik folgend besteht grundsätzlich ein Wärmeaustausch zwischen dem Boden und den Leitungen. Abhängig von der Temperatur der Fremdleitung und dem Boden ändert sich die Richtung des Temperatúraustauschs. So können Fremdleitungen nicht nur zu einer Temperaturerhöhung, sondern auch zu einer Temperaturabnahme im Bereich der Trinkwasserleitung führen. Ob und wie stark der Einfluss der Fremdleitungen auf nahegelegenen Trinkwasserleitungen ist, wird im Folgenden näher ausgeführt.

#### 5.2.3.1 Abwasser

Der großflächige Einfluss der Abwasserkanäle auf die Trinkwassertemperatur konnte schnell ausgeschlossen werden, da die Abwasserleitungen meist deutlich tiefer als Wasserversorgungsleitungen verlegt sind (Grombach, Haberer, & Trueb, 1985, S. 722). Nach Informationen der Stadtentwässerung kann im Durchschnitt von einer Kanaltiefe von 4-5 m ausgegangen werden. Einige Kanäle

befinden sich sogar in einer Tiefe von 10 m. Lediglich Hausanschlüsse sind in einer Tiefe von ca. 2,5 m angeschlossen. Es besteht somit ein großer Abstand zu dem Trinkwassernetz, was den Einfluss der Wärmeübertragung minimiert.

In Tabelle 14 sind an vier ausgewählten Punkten im Abwasserleitungsnetz Durchschnittstemperaturen der Sommermonate 2021 und 2022 erfasst worden. Diese Daten wurden den Bodentemperaturen der Asphaltflächen in 100 cm gegenübergestellt. Auch wenn die Abwasserleitungen meist deutlich tiefer verlegt sind, bietet dies eine gute Möglichkeit, um die Temperaturdifferenz zwischen Boden und Abwasserleitung genauer zu untersuchen. Die Asphalttemperaturen stellen die Ober- und Untergrenzen der Bodentemperatur im Nahbereich der Trinkwasserleitung dar. Bei einer deutlich höheren Temperatur einer Fremdleitung im Vergleich zur gemessenen Bodentemperatur in Leitungsnähe – insbesondere der festgelegten Obergrenze der Bodentemperatur – ist von einer Temperaturerhöhung im Boden durch die Fremdleitung auszugehen.

Mit Ausnahme von größeren Industrieanlagen liegt die Abwassertemperatur (A1 bis A3) jedoch im Bereich der Bodentemperatur in einer Tiefe von 100 cm und überschreitet nicht die angenommene Temperaturobergrenze Asphalt Sonne. Es ist folglich nicht davon auszugehen, dass keine deutliche Erwärmung der Bodentemperatur in Leitungsnähe zu befürchten ist, zumal die Abwasserleitungen tiefer als die Trinkwasserleitungen verlegt sind. Lediglich bei hoher Abwassertemperatur und einem gleichzeitig geringen Abstand zwischen Abwasser- und Trinkwasserleitung kann ein lokaler Einfluss vermutet werden. Genaue Informationen dazu liegen aufgrund der geringen Datenlage jedoch nicht vor. Es sei darauf hingewiesen, dass bei einigen Industrieanlagen eine aktive Abkühlung des Abwassers stattfindet, wenn hohe Abwassertemperaturen bekannt sind.

*Tabelle 14: Durchschnittliche Abwassertemperaturen Sommer 2021/22 (Eigene Darstellung nach Daten aus Stadt Augsburg Mobilitäts- und Tiefbauamt, 2022)*

Durchschnittliche Temperaturen im Medium Abwasser in °C					
Zeitraum	Messstationen				
	Bodentemperatur 100 cm Asphalt Sonne	Bodentemperatur 100 cm Asphalt Schatten	Abwasser- temperatur A1	Abwasser- temperatur A2	Abwasser- temperatur A3
<b>2021</b>					
<b>Juni</b>	19.64	16.37	18.0	16.6	13.4
<b>Juli</b>	21.02	17.75	19.8	17.8	14.1
<b>August</b>	21.43	18.12	19.9	18.3	14.6
<b>September</b>	20.46	17.06	18.8	18.2	15.2
<b>2022</b>					
<b>Juni</b>	21.06	17.01	16.5	17.2	14.7
<b>Juli</b>	23.73	19.37	22.1	18.8	16.2
<b>August</b>	24.83	19.96	23.5	19.8	17.0
<b>September</b>	20.19	17.18	18.4	18.9	16.5

### 5.2.3.2 Gasnetz

Ein weiteres Fremdleitungssystem im Straßengraben ist das Gasnetz. Das Gasnetz verläuft im Untersuchungsgebiet parallel zu einem Großteil des Trinkwasserleitungsnetzes. Um eine mögliche Auswirkung der Gasnetztemperatur auf den umgebenden Boden zu untersuchen, wurde ebenfalls die Temperatur einiger Gasverteilerstellen analysiert. In Tabelle 15 sind die Sommermitteltemperaturen aufgelistet und erneut den Bodentemperaturen in 100 cm gegenübergestellt. Hier ist, ähnlich wie im Fall des Abwassers, zu erkennen, dass im Sommer die Temperaturen im Gasnetz im Bereich der mittleren Bodentemperatur liegen. Teilweise werden auch Temperaturen erfasst, welcher eher unterhalb der Bodentemperatur liegen.

Eine Auswirkung des Gasnetzes auf die Trinkwassertemperatur kann aufgrund des geringen Unterschieds zwischen Gasnetztemperatur und Bodentemperatur als unwahrscheinlich angesehen werden. Ob möglicherweise sogar eine leichte Abkühlung des Bodens aufgrund der Gasleitung vorstellbar ist, kann aufgrund der geringen Datenlage nicht bestätigt werden.

*Tabelle 15: Durchschnittliche Temperaturen im Gasnetz 2021/22 und Bodentemperaturmessung (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)*

<b>Sommertemp. Juni - September</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>Asphalt Sonne 100cm [°C]</b>	<b>Asphalt Schatten 100cm [°C]</b>
<b>2021</b>	17.48	15.47	18.22	20.89	18.68	20.67	17.32
<b>2022</b>	19.84	16.76	21.18	14.90	19.75	22.45	18.38
<b>Mittel</b>	<b>18.66</b>	<b>16.11</b>	<b>19.70</b>	<b>17.90</b>	<b>19.22</b>	<b>21.56</b>	<b>17.85</b>

### 5.2.3.3 Starkstrom

Das Stromnetz kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Zum einen das Niederstromnetz mit 10 – 20 kV und zum anderen das Starkstromnetz mit 110 kV. Letzteres ist lediglich in einem kleinen Bereich im Stadtgebiet vorhanden, jedoch konnte eine Temperaturänderung des Bodens nahe Starkstromleitungen bereits nachgewiesen werden. Anzumerken ist, dass die Starkstromleitungen isoliert sind.

In einer Studie von Trinks (2010) zum Wärmehaushalt erdverlegter Energiekabel (110 kV) wurde eine durch die Strombelastung verursachte Erwärmung des Kabelmantels um 5°C gegenüber dem unbeeinflussten Boden gemessen. Die Kabeltemperatur ist abhängig von der Stromlast des Kabels und liegt für die Berechnungen der hier zitierten Studie zwischen 55°C und 85°C. Höhere Temperaturen können jedoch bei Spitzenlast auftreten.

Besonders interessant sind die Ergebnisse der Berechnung unter Asphalt, wonach in einer Entfernung von 100 cm zu der Starkstromleitung immer noch Temperaturen von über 30°C im Boden auftreten (Abbildung 27). Die Ergebnisse dieser Studie können auch in Hinblick auf die Nah- und Fernwärmeleitungen berücksichtigt werden, da hier ähnliche Temperaturen innerhalb der Fremdleitungen auftreten und entsprechend ein ähnlicher Temporaustausch zwischen der Leitung und dem Boden stattfindet.

Im Allgemeinen kann von Starkstromleitungen ein Einfluss auf die umliegenden Bodenschichten und somit auf Leitungen in diesen Bodenbereichen ausgegangen werden. In dem Modell wird dies in Form von höheren Bodentemperaturen dort berücksichtigt, wo entsprechende Leitungen verlaufen.

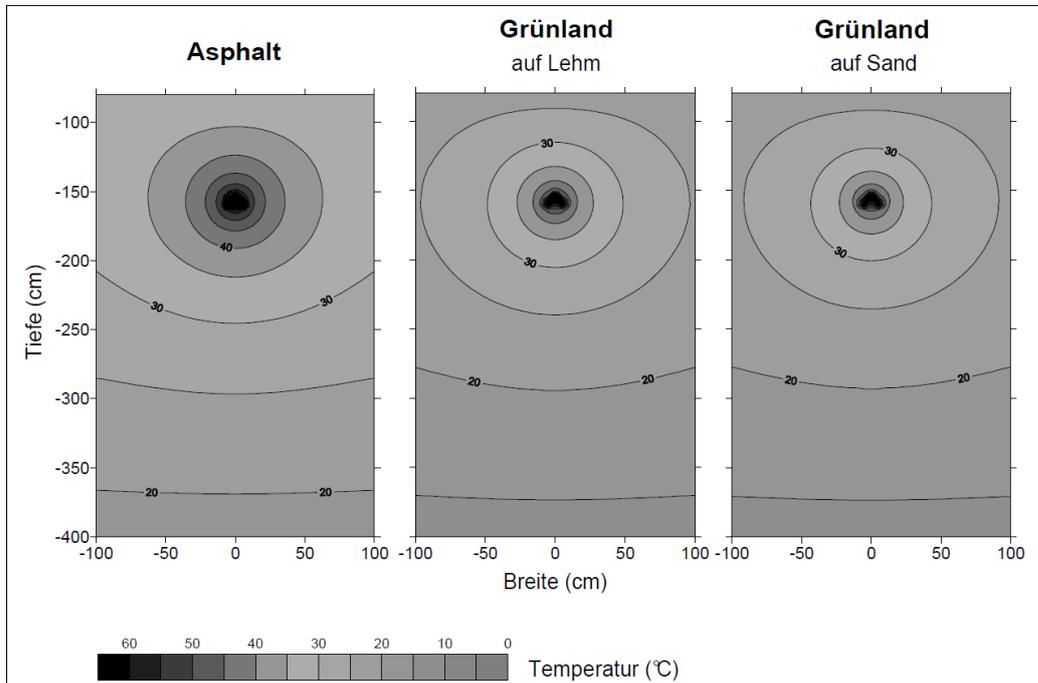


Abbildung 27: Temperaturprofil des Bodens um eine Starkstromleitung im Sommer (Trinks, 2010)

#### 5.2.3.4 Fern- und Nahwärme

Als Fernwärme wird eine Wärmeversorgung bezeichnet, die verschiedenen Kundenanlagen aus einer zentralen Heizquelle versorgt, während sich der Begriff Nahwärme eher auf kleinere Netze bezieht, die sich auf einen lokalen Bereich beschränken (Konstantin, 2018, S. 1).

Im Hinblick auf einen künftigen Ausbau des Fern- und Nahwärmenetzes ist dieser Einflussfaktor besonders sorgfältig zu überprüfen, auch da vergleichsweise hohe Temperaturen in diesen Netzen auftreten. Im Untersuchungsgebiet liegen die Temperaturen im Nahwärmenetz im Bereich von 40 bis 70°C, wobei der Vorlauf höhere Temperaturen mit 70°C aufweist als der Rücklauf (40 – 60°C). Deutlich höhere Temperaturen finden sich im Fernwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 120° und einer Rücklauftemperatur von 50°C.

Bei über lange Strecken parallel verlaufenden Leitungen und/oder einem geringen Abstand der beiden Leitungssysteme ist ein Einfluss durch das Fern- und Nahwärmenetz zu befürchten, besonders dann, wenn Stagnationsbereiche hinzukommen. Stagnationswasser ist Wasser, welches sich über einen Zeitraum von mehreren Stunden oder sogar Tagen in der Leitung befindet (Berger et al., 2020). Da mit zunehmender Verweilzeit ein Angleichen der Wassertemperatur an die Umgebungstemperatur stattfindet, sind Stagnationsbereiche im Einflussbereich von Fremdleitungen hinsichtlich der Temperatur besonders zu berücksichtigen.

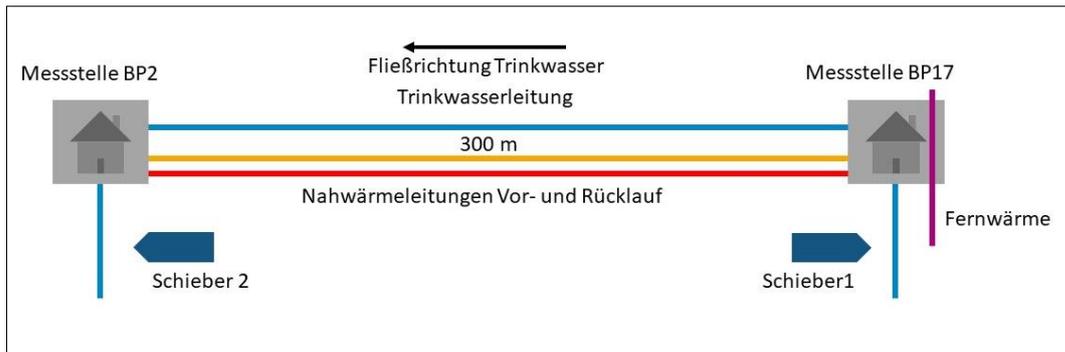


Abbildung 28: Versuchsaufbau Nah- und Fernwärme

Der Einfluss von Fern- und Nahwärme wurde unter anderem in einem Versuchsaufbau (Abbildung 28) näher überprüft. Die beiden Messstellen BP2 und BP17 befinden sich jeweils in einer Kundenanlage. Hier werden die Trinkwassertemperaturen sowie die Temperaturen in den Nahwärmeleitungen (Vor-/Rücklauf) in einem 10 min Intervall erfasst.

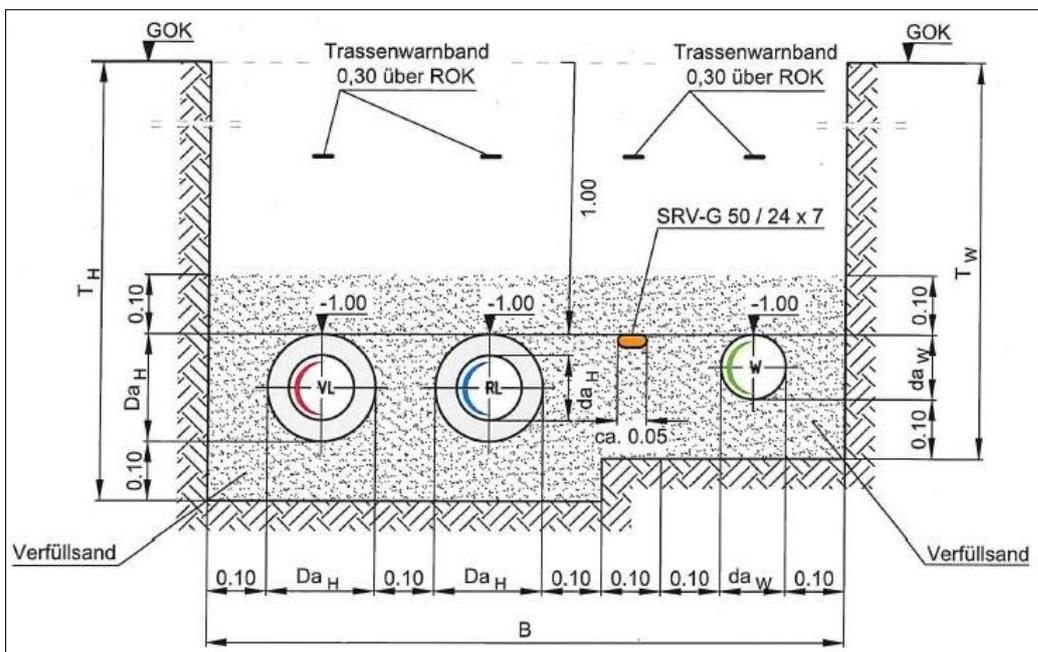


Abbildung 29: Leitungssystem Versuchsbereich mit  $w =$  Trinkwasserleitung, VL = Fernwärme Vorlauf, RL = Fernwärme Rücklauf, SRV-G = Leitungsverbund Breitband. (swa [1], 2023)

In Abbildung 29 ist skizziert, wie die Trinkwasser- und Nahwärmeleitungen im Straßenbett verlegt werden. Im Versuchsbereich befindet sich der Rücklauf der Nahwärmeleitung in einer Entfernung von etwa 40 cm zu der Trinkwasserleitung, gefolgt von dem Vorlauf. Die Nahwärme fließt im Vorlauf von Messstelle BP17 Richtung BP2, während der Rücklauf von BP2 nach BP17 verläuft. Sowohl Nahwärme- als auch Fernwärmeleitungen sind gedämmt, um die Wärmeübertragung in den Boden zu minimieren. Die Verlegetiefe der Trinkwasserleitung im Versuchsgebiet liegt bei 100 cm (GOK) (Abbildung 29).

Im Nahbereich der Messstelle BP17 befindet sich zusätzlich eine Fernwärmeleitung. An diesem Standort ist eine Trennung der beiden Einflussfaktoren Fern- und Nahwärme nicht möglich. Es sei

anzumerken, dass bei Fernwärmeleitungen ein vorgeschriebener Abstand von 1 m zu der Trinkwasserleitung einzuhalten ist, während im Gegensatz bei Nahwärmeleitungen vorgeschriebenen Abstände von 0,4 m eingehalten werden sollten (DVGW, 2004). Somit können diese, wie im Versuchsgebiet der Fall, deutlich näher an den Trinkwasserleitungen verlegt werden.

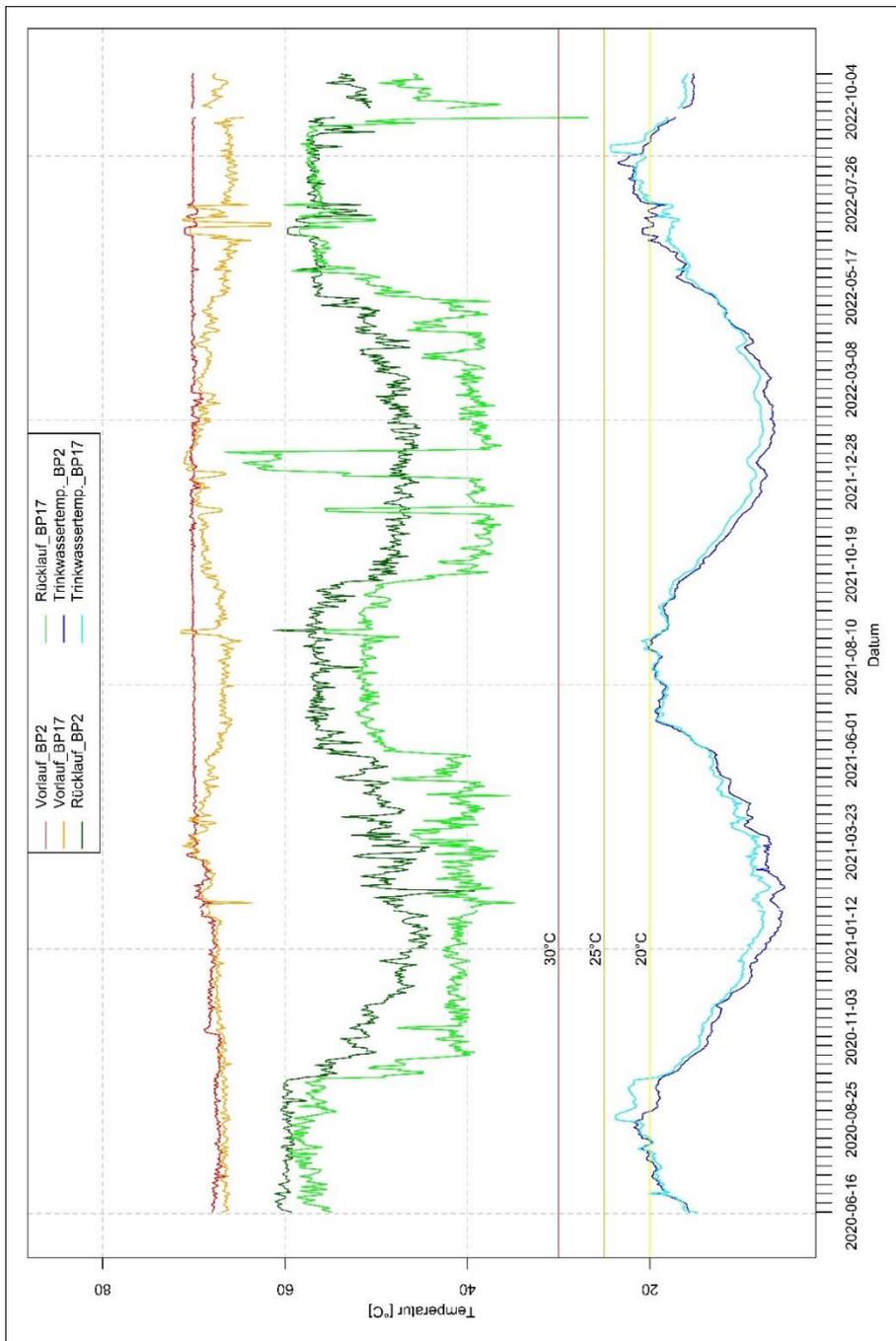


Abbildung 30: Zusammenstellung der Messergebnisse Nah- und Fernwärme im Versuchsgebiet (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Die Fließrichtung des Trinkwassers verläuft im Normalbetrieb von Messstelle BP17 in Richtung BP2. Betrachtet wird ein Leitungsabschnitt von ca. 300 m Länge. Bei der errechneten Fließgeschwindigkeit von 0,029 m/s ist eine Wegzeit von etwa 2,87 h zwischen BP17 und BP2 im

Durchschnitt zu erwarten. Um eine kontrollierte Fließrichtungsänderung oder Stagnationszone zu indizieren, können die Schieber 1 und 2 geschlossen werden.

Die Temperaturen der einzelnen Messungen sind in Abbildung 30 graphisch dargestellt, um das Temperaturverhalten im Jahresgang zu betrachten. Auf die Nahwärmtemperatur an sich soll nicht im Detail eingegangen werden. Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass die Nahwärmtemperatur im Vorlauf im Mittel bei 68,5 °C und die Rücklauftemperatur bei 49,9 °C liegt. Zudem ist vor allem bei der Rücklauftemperatur, eine Jahresschwankung erkennbar, die mit dem Heizbetrieb im Winter und der entsprechenden Wärmeentnahme zu begründen ist.

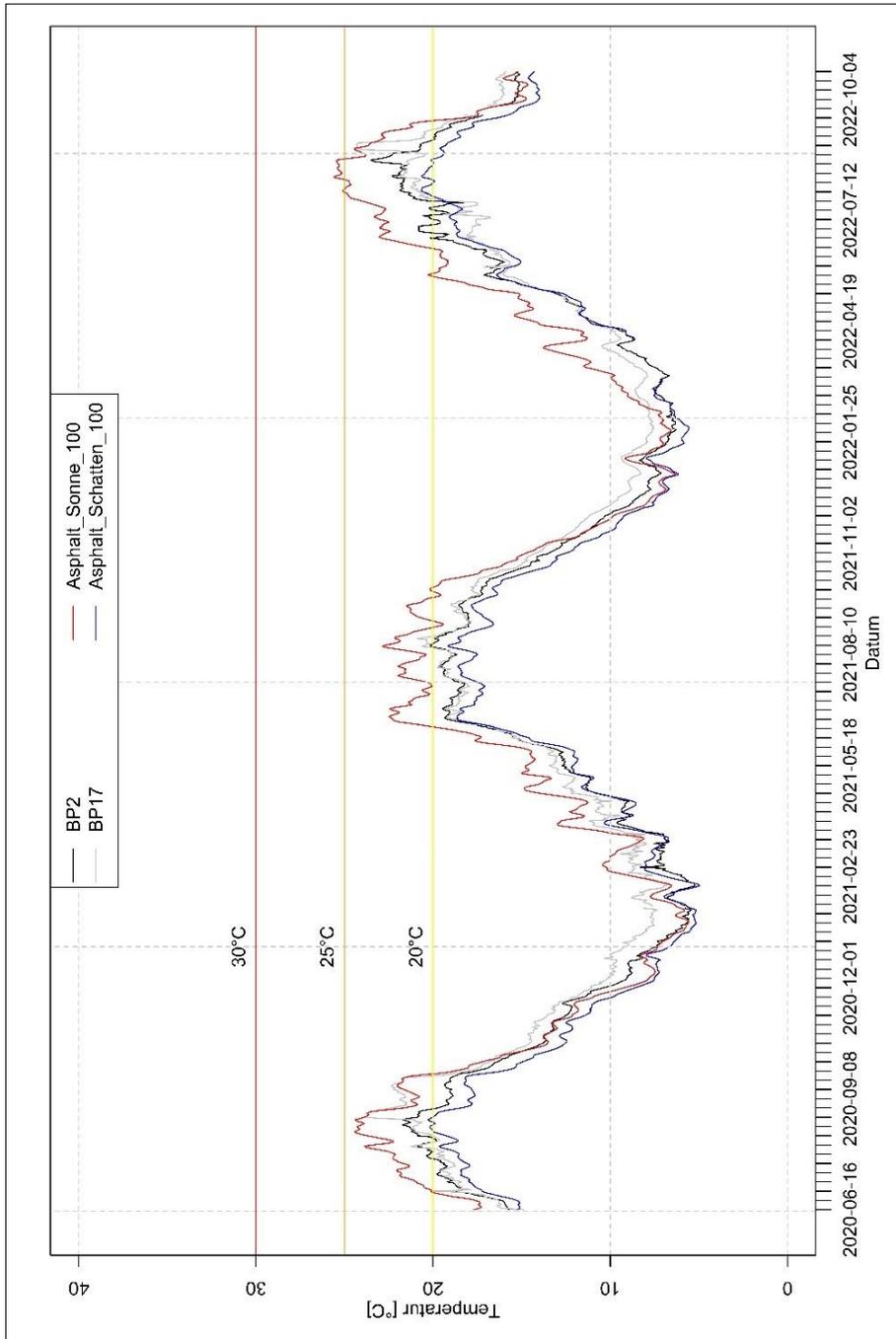


Abbildung 31: Trinkwassertemperatur an Messstelle BP2 und BP17 im Vergleich zu Bodentemperaturen (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Für die Auswertung der Trinkwassertemperatur und aufgrund des geringen Abstands (Abbildung 29) sind die Werte der Rücklauf­temperatur besonders relevant. Zu betonen ist, dass die höchsten Rücklauf­temperaturen von über 50°C aufgrund des geringeren Verbrauchs ebenfalls in den Sommermonaten auftreten.

Die Ergebnisse der Trinkwassertemperatur an beiden Messstellen sind in Abbildung 31 dargestellt. Zusätzlich sind die relevanten Bodentemperaturdaten der Standorte Stadtwald Sonne und Stadtwald Schatten in einer Tiefe von 100 cm abgebildet. Wichtig für die Auswertung der Fremdleitungen sind folgende Annahmen:

1. Das Trinkwasser nimmt mit zunehmender Verweilzeit in der Leitung die Umgebungstemperatur des Bodens an. Es entsteht ein Temperaturgleichgewicht nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Baehr & Stephan, 2006, S. 284).
2. Die Bodentemperatur für das Versorgungsgebiet bewegt sich voraussichtlich zwischen Bodentemperaturen der Standorte Asphalt Sonne und Asphalt Schatten, da beide Messstellen Extremstandorte repräsentieren (Kapitel 4.1).
3. Bei einer deutlichen Überschreitung der Temperatur Asphalt Sonne in den Sommermonaten, muss davon ausgegangen werden, dass Fremdleitungen eine Temperaturerhöhung über die Bodentemperatur hinaus verursachen.

Durch Schieberschließungen (Tabelle 16) konnte jeweils eine Stagnation und somit maximale Verweilzeit im Leitungsnetz simuliert werden. Mit Ausnahme der Schieberschließung 1 liegen die Schieberschließungen in den Sommermonaten.

*Tabelle 16: Schieberschließung und deren Untersuchungsziel (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)*

Schließung Nr.	Stagnation bei	Untersuchung Einflussfaktor	Datum
1	BP2	Nahwärme	11.11.2020 – 23.12.2020
2	BP17	Nah- und Fernwärme	23.08.2020 – 25.09.2020
3	BP2	Nahwärme	17.08.2022 – 24.08.2022
4	BP17	Nah- und Fernwärme	26.08.2022 – 02.09.2022

Betrachtet man die Durchschnittstemperatur im Normalbetrieb (ohne Schieberschließung) liegt die Messstelle BP17 mit 14,04°C erkennbar über der Temperatur der Messstelle BP2 mit 13,55°C. In Abbildung 31 sind, besonders in den Wintermonaten, höhere Temperaturen an Messstelle BP17 feststellbar. Dies bietet einen Hinweis auf einen Einfluss der Fernwärmeleitung an Messstelle BP17.

Um die Temperatur bei den Schieberschließungen zu vergleichen, ist die Regressionsanalyse in Abbildung 32 hilfreich. Bei allen Schieberschließungen, mit Ausnahme der Schieberschließung 1 (Winter), ist eine Temperaturzunahme erkennbar, da sich die Werte außerhalb der Regressionsgeraden bewegen (für BP17 links der Geraden und für BP2 rechts der Geraden).

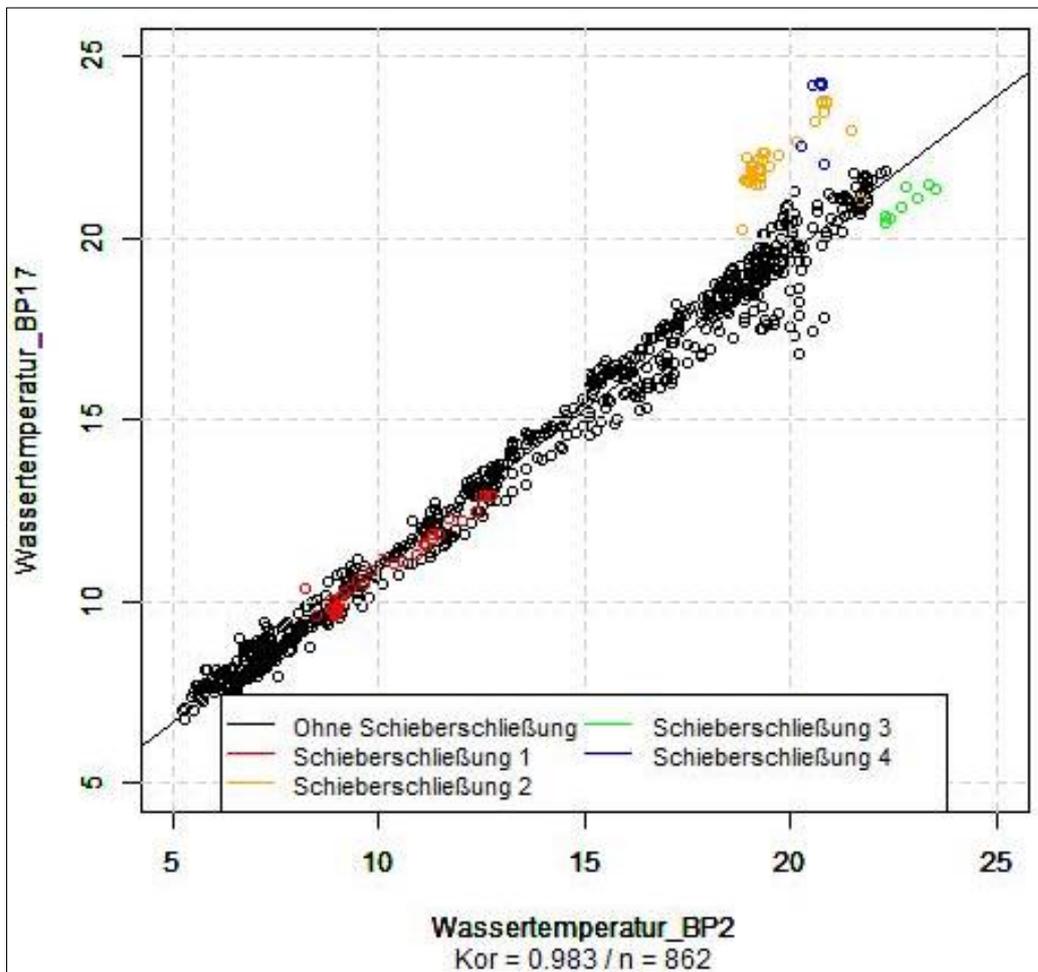


Abbildung 32: Regressionsgerade zum Verhalten der Temperatur bei Schieberschließung (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1])

Der Übersicht halber sind die Schieberschließungen auch in der Diagrammansicht in Abbildung 33 markiert. Die Schieberschließung S1 befindet sich in den Wintermonaten und zeigt für die Messstelle BP2 nur eine geringe, dennoch in den Rohdaten erkennbare Temperaturzunahme. In den Sommermonaten ist die Temperaturzunahme an BP2 nach der Schieberschließung 3 deutlich ausgeprägter. Nach einem Tag beträgt hier die Temperaturzunahme  $0,95^{\circ}\text{C}$  (Schieberschließung während des Tages, folglich  $< 24\text{h}$ ) und nach zwei Tagen  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Sehr signifikant ist die Temperaturzunahme an Messstelle BP17 nach der Schieberschließung 2 mit  $1,97^{\circ}\text{C}$  im Laufe von einem Tag und  $2,9^{\circ}\text{C}$  im Laufe von zwei Tagen. Im Fall der Schieberschließung 4 ist nach einem Tag eine Temperaturzunahme von  $1,02^{\circ}\text{C}$  und nach zwei Tagen sogar von  $3,18^{\circ}\text{C}$  festzustellen.

Betrachtet man die beiden Randtemperaturen der Bodenmessungen aus Abbildung 31 lässt sich an Messstelle BP17 nach beiden Schieberschließungen eine Annäherung bzw. eine leichte Überschreitung der oberen Bodentemperaturgrenze (Asphalt Sonne) feststellen. Ausgehend davon, dass die Bodentemperatur im Untersuchungsgebiet zwischen Asphalt Sonne und Asphalt Schatten liegt, sind derart hohe Wassertemperaturen auffällig. Entsprechend der Annahme 3 kann somit davon ausgegangen werden, dass ein Fremdeinfluss eine zusätzliche Temperaturzunahme über die klimatische Bodentemperatur hinaus im Bereich der Trinkwasserleitung verursacht. Für Messstelle BP17 ist eine Kombination aus Fern- und Nahwärme als Begründung anzusehen.

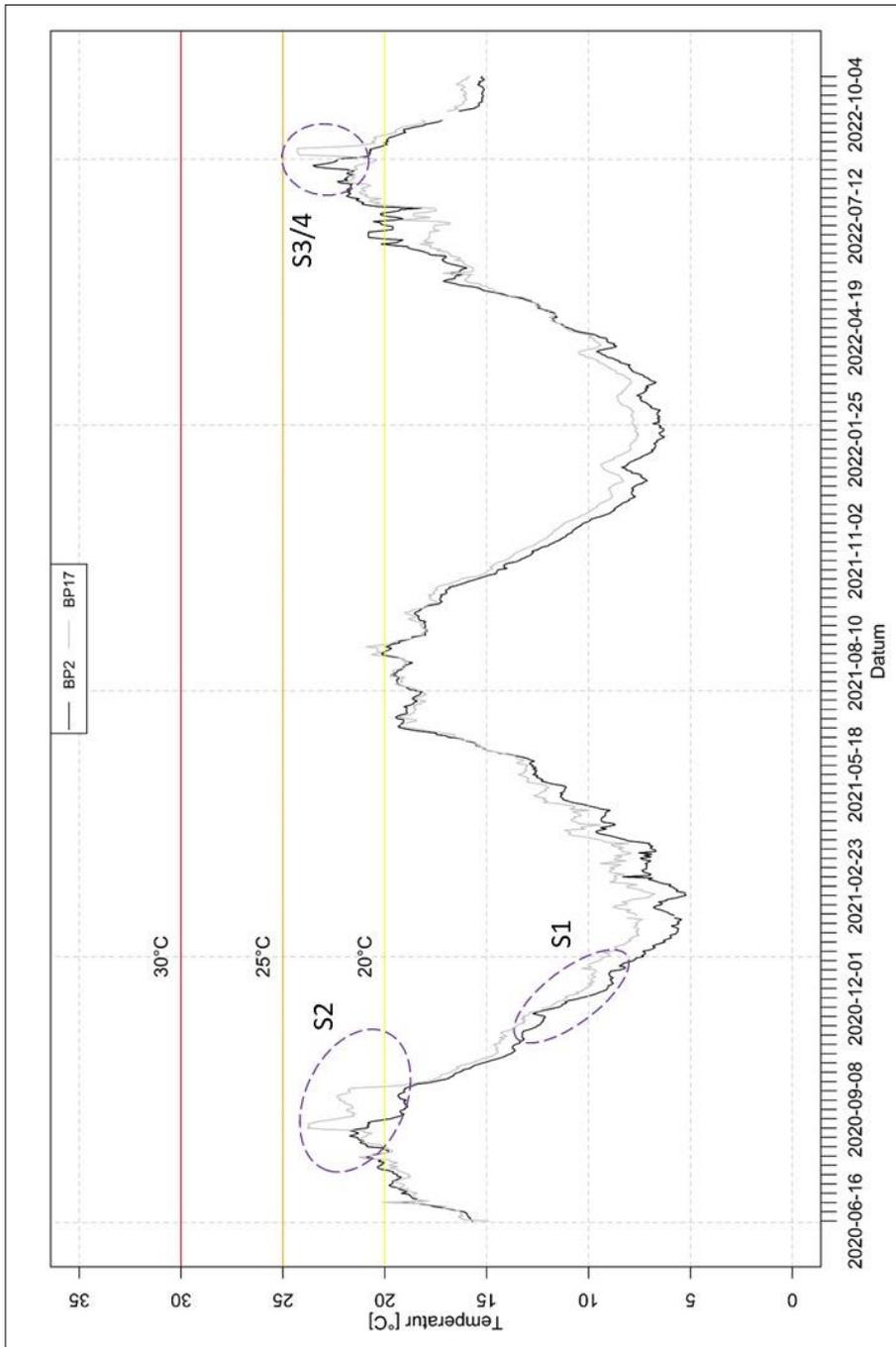


Abbildung 33: Trinkwassertemperatur inkl. markierter Schieberschließungen (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Bei einer Stagnation ist grundsätzlich von einer Temperaturzunahme im Trinkwasser bis zur entsprechenden Bodentemperatur auszugehen. Ob die Trinkwassertemperatur im Versuchsbereich aufgrund der Fließstrecke und Verweildauer bereits die Bodentemperatur angenommen hat, oder ob erst durch die provozierte Stagnation eine Erwärmung auf die Bodentemperatur stattfindet, kann nicht zweifelsfrei bestätigt werden, da keine unbeeinflusste kontinuierliche Messstelle in der Nähe vorhanden war.

Eine weitere Untersuchung zur Auswertung der Fernwärme wurde im September 2020 mithilfe von Hydrantenmessungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 34 skizziert. Dabei stellt Hydrant H2 den Startpunkt der Fließrichtung dar. Die Hydranten H3 und H1 liegen in einer etwa gleichen Entfernung von 1,2 km zum Ausgangspunkt, wobei zwischen H2 und H1 ein Fernwärmeeinfluss entlang der gesamten Strecke zu berücksichtigen ist.

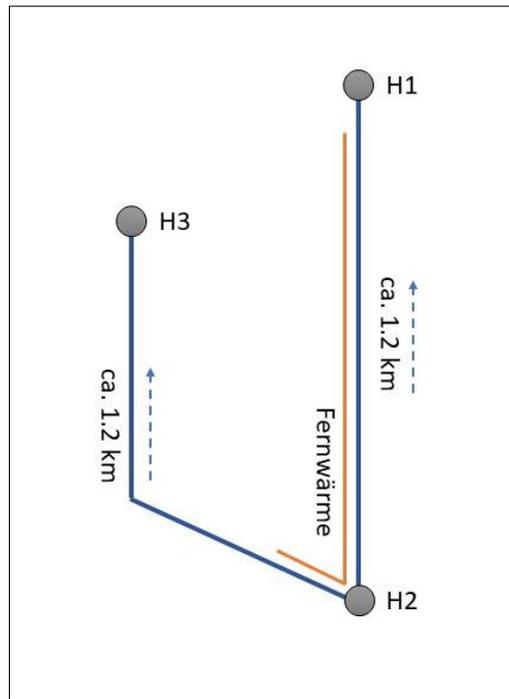


Abbildung 34: Skizze der Hydrantenmessung zu Fernwärmeeinfluss

Entlang beider Strecken ist eine Temperaturzunahme zwischen Start und Endpunkt gemessen worden (Tabelle 17). Hierbei zeigt sich, dass der Hydrant H1 mit Fernwärmeeinfluss eine größere Temperaturzunahme im Vergleich zu dem unbeflussten Hydranten H3 aufweist. Hierbei handelt es sich um eine Stichprobe, jedoch wird erneut die Vermutung bestätigt, dass ein Fernwärmeeinfluss bei über langen Strecken parallel verlaufende Leitungen besteht.

Tabelle 17: Hydrantenmessung zu Fernwärmeeinfluss September 2020 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Hydrant	H2	H3 ohne Fernwärmeeinfluss	H1 mit Fernwärmeeinfluss
Temperatur [°C] 10.09.2020	13,1	14,6	15,2

Insgesamt zeigen die Auswertungen hinsichtlich der Nah- und Fernwärmeleitungen, dass noch Unsicherheiten bezüglich einiger Punkte für den Einflussfaktor Fremdleitung bestehen. Zusammenfassend können auf Basis der vorliegenden Daten folgende Aussagen getroffen werden:

- In Stagnationsbereichen besteht ein Einfluss von Nah- und Fernwärmeleitungen auf die Trinkwassertemperatur. Der Einfluss der Fernwärme ist dabei deutlich höher.
- Bei lange parallel verlaufenden Fern- und Trinkwasserleitungen ist ein Einfluss auf die Trinkwassertemperatur festzustellen.
- Nahwärmeleitungen haben bei lange parallel verlaufenden Leitungen mit großer Wahrscheinlichkeit einen leichten Einfluss auf die Trinkwassertemperatur.
- Ohne Fremdleitungseinfluss besteht eine erneute Abkühlung auf die Umgebungstemperatur des Bodens.

#### 5.2.4 Kundenanlagen

Das Temperaturverhalten in Kundenanlagen muss ebenfalls betrachtet werden. Das Trinkwasserversorgungsunternehmen ist grundsätzlich für die Qualität des Trinkwassers bis hin zum Zähler verantwortlich. Temperaturmessungen werden jedoch im Rahmen der Trinkwasserprobenahme an Armaturen innerhalb einer Kundenanlage durchgeführt. Eine Temperaturänderung in der Hausanschlussleitung und Kundenanlage wird durch die Raumtemperatur gesteuert (Zlatanovic et al.,

2017). Dies führt dazu, dass bei hohen Raumtemperaturen ein Anstieg der Trinkwassertemperatur zwischen Zähler und Armatur angenommen werden kann.

Um das Verhalten der Temperatur in Kundenanlagen näher zu untersuchen, wurden in fünf Kundenanlagen Wasserzähler mit Temperaturloggern ausgestattet. Erfasst wurde dabei sowohl die Trinkwassertemperatur als auch die Raumtemperatur als Temperaturminima und -maxima eines Tages sowie der Temperaturmittelwert. Anzumerken ist, dass die verwendeten Zähler relativ ungenaue Werte liefern. Für eine statistisch signifikante Auswertung bietet es sich an, die Anzahl der Temperaturmessungen zu erhöhen. Der Messzeitraum umfasst den 01.06.2021 bis 19.09.2022. In Tabelle 18 sind die Kennwerte der Kundenanlagen im Mittel aufgeführt.

*Tabelle 18: Kennwerte der Temperaturmessung an den installierten Zählerstandorten (2021 - 2022) (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)*

Anlage	Wassertemperatur			Lufttemperatur		
	Min [°C]	Max [°C]	Mean [°C]	Min [°C]	Max [°C]	Mean [°C]
<b>Kundenanlage 1</b>	6	20	13	9	21	16
<b>Kundenanlage 2</b>	5	22	14	10	22	16
<b>Kundenanlage 3</b>	5	23	14	13	24	19
<b>Kundenanlage 4</b>	5	22	13	13	24	19
<b>Kundenanlage 5</b>	6	23	13	9	25	16

Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen jeweils das Verhalten der Wasser- und Raumtemperatur zweier Kundenanlagen im Vergleich. Der Jahresgang der Temperatur im Trinkwasser wird in beiden Kundenanlagen ersichtlich, wenngleich die Schwankungsbreite unterschiedlich ausgeprägt ist. So ist die Amplitude in Kundenanlage 1 im Mittel etwas geringer, auch wenn die Kundenanlage 5 einige Ausschläge nach oben hin zeigt.

Auch die Lufttemperatur an beiden abgebildeten Kundenanlagen weist jahreszeitliche Schwankungen auf, welche jedoch in Abhängigkeit von der Kundenanlage stärker oder schwächer ausfällt und mit unterschiedlichen Raumtemperaturen in den Anlagen zu begründen ist.

Anhand der später näher erläuterten Modellierung der Trinkwassertemperatur im Versorgungssystem (Kapitel 6) werden Temperaturbereiche im Stadtgebiet ersichtlich. Den Ergebnissen soll hier kurz vorgegriffen werden. Während sich die Kundenanlagen 2 und 3 in einem Bereich des Versorgungssystems befinden, für den hohe Temperaturen identifiziert worden sind, liegen die Kundenanlage 1 und Kundenanlage 5 in einem Bereich mit eher niedrigen Temperaturen. Kundenanlage 4 ist in einem mittleren bis hohen Bereich zu verorten. Dies entspricht den Ergebnissen der Temperaturmessung an den Zählern, vor allem bei der Betrachtung der Maximaltemperatur.

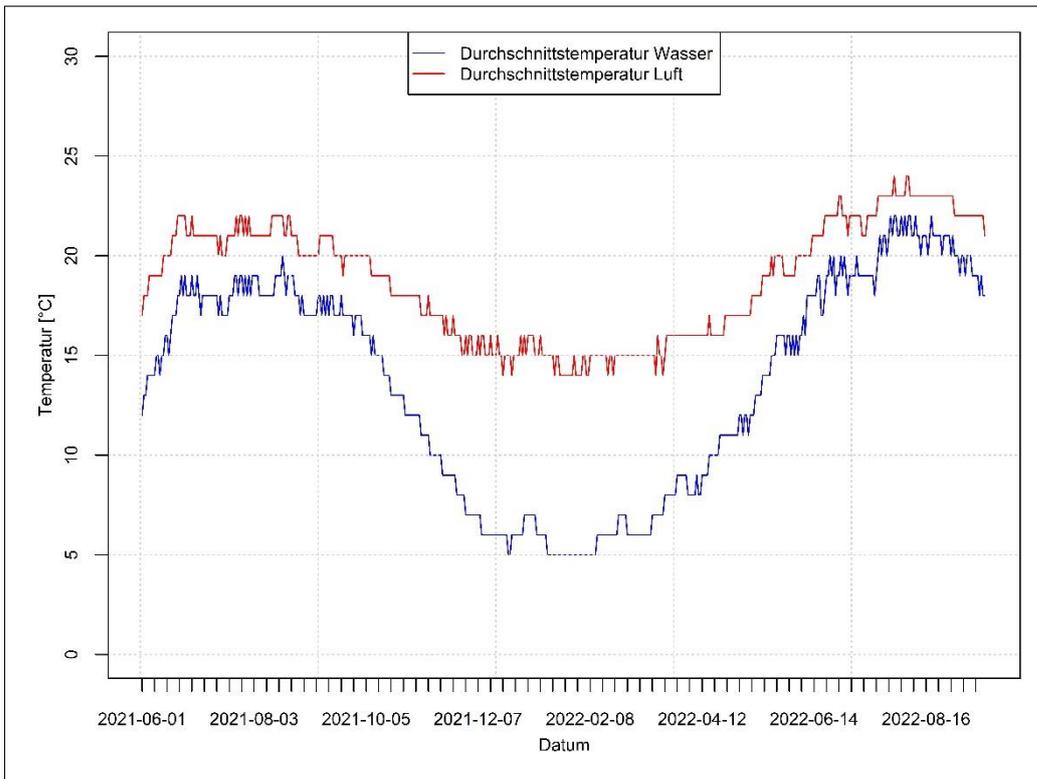


Abbildung 35: Wasser- und Lufttemperatur an Zähler in Kundenanlage 1 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

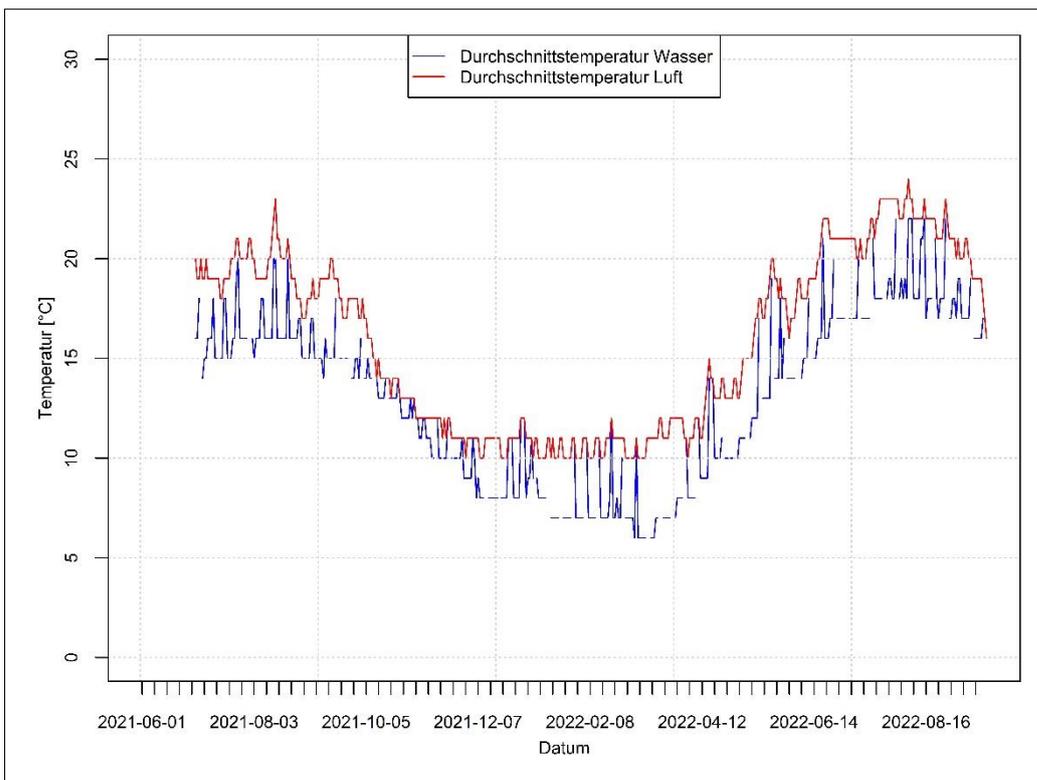


Abbildung 36: Wasser- und Lufttemperatur an Zähler Kundenanlage 5 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Die Mitteltemperatur in Kundenanlage 5 beinhaltet zahlreiche Fehlwerten und wies mehrere ungewöhnliche Temperaturspitzen auf. Die markanten Temperaturspitzen fallen jeweils auf Tage mit einer Null-Abnahme, welche mit Wochenenden und Feiertagen übereinstimmen. Der Grund hierfür ist, dass es sich bei der Kundenanlage 5 um ein gewerblich genutztes Gebäude handelt, sodass regelmäßig eine Nullabnahme stattfindet. Demnach kommt es aufgrund der Stagnation des Wassers in der Leitung zu einem Angleichen der Trinkwassertemperatur an die Raumtemperatur. Für gewerblich genutzte Kundenanlagen ist dies regelmäßig der Fall und sollte bei der Temperaturmessung während einer Probenahme oder im Fall des Ausbaus von weiteren Messstellen durch das Versorgungsunternehmen berücksichtigt werden.

Die höchsten Temperaturen wurden während des Hitzesommers 2022 erfasst. In Abbildung 37 sind die Maximaltemperaturen zweier Kundenanlagen dargestellt. Die Kundenanlagen 2 und 3 liegen beide in einem eher höher temperiertem Bereich des Versorgungsgebietes und können hinsichtlich Ursachen der gemessenen Wassertemperatur verglichen werden.

Hier ist der Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur im Zählerraum und der Wassertemperatur ersichtlich. Kundenanlage 2 zeigt höhere Lufttemperaturen und Wassertemperaturen im Vergleich zu Kundenanlage 3. Eine leichte Erhöhung der Trinkwassertemperatur innerhalb der Kundenanlage selbst aufgrund einer höheren Raumtemperatur ist somit wahrscheinlich.

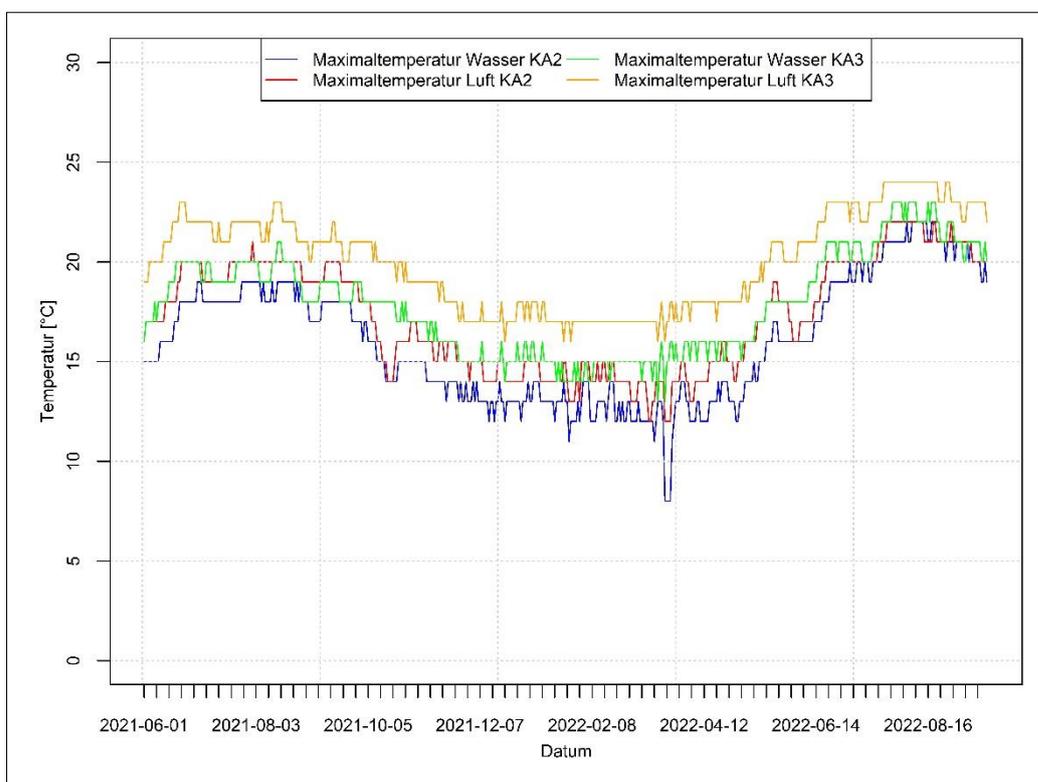


Abbildung 37: Vergleich der Maximaltemperatur an Kundenanlage 2 und 3 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Um den Nachweis der Temperaturentwicklung zwischen Rohrnetz und Kundenanlage zu erbringen, wurden vor einigen Kundenanlagen händische Messungen an Hydranten durchgeführt. Es handelt sich hierbei um punktuelle Messungen des Versorgungsnetzes. Problematisch dabei ist der

Vergleich zu den Messungen in Kundenanlagen, insbesondere zu den Kundenanlagen mit Loggern an den Zählern. Bei den Loggern werden lediglich die Tagesminima und -maxima sowie die Durchschnittstemperaturen aufgezeichnet. Der Vergleich zu den Hydrantenmessungen zu einzelnen Zeitpunkten war daher nach Auswertung der Daten nicht zielführend.

Lediglich Kundenanlagen mit händischen Messungen zu einem ähnlichen Zeitpunkt und in geeigneter Fließrichtung im Vergleich zu Hydrantenmessungen, können belastbare Aussagen zu dem Temperaturverhalten liefern. Jedoch war die Anzahl der geeigneten Messungen im Untersuchungszeitraum nicht groß genug, um statistisch signifikante Daten zu erhalten. Grund hierfür sind auch unvorhergesehene Fließrichtungsänderungen. So stellte sich beispielsweise heraus, dass sich einige Hydrantenmessungen, welche im Nahbereich von Kundenanlagen beprobt wurden, nicht im Zustrom der jeweiligen Kundenanlage befanden, da sich eine unvorhergesehene Fließrichtungsumkehr ergeben hatte.

Einige Hydranten- und Kundenanlagenmessungen konnten dennoch miteinander verglichen werden. So zeigt beispielsweise eine Messung (Juli 2021) an Hydrant und Kundenanlage im Nord-Osten der Stadt, eine Temperaturzunahme zwischen Hydrant ( $17,8^{\circ}\text{C}$ ) und Kundenanlage ( $18,7^{\circ}\text{C}$ ) um knapp  $1^{\circ}\text{C}$ .

Auffällig war im gleichen Zeitraum eine weitere Kundenanlage im selben Stadtteil. Hier war zwischen einem Hydranten ( $23,1^{\circ}\text{C}$ ) und der Kundenanlage ( $21,3^{\circ}\text{C}$ ) eine Temperaturabnahme zu verzeichnen. Somit besteht die Vermutung, dass besonders kühle Kundenanlagen auch eine Temperaturabnahme bis zur Armatur begünstigen können.

Der Einfluss der Raumtemperatur innerhalb einer Kundenanlage auf die Trinkwassertemperatur ist mit einer Spanne von  $\pm 1-2^{\circ}\text{C}$  anzunehmen. Für Trinkwasserprobenahmen durch Versorgungsunternehmen kann die Messung der Raumtemperatur eine weitere hilfreiche Information zur Interpretation von Trinkwassertemperaturdaten liefern, zumal die Messung der Trinkwassertemperatur durch das Versorgungsunternehmen zur Überprüfung der Einhaltung der Regelwerksvorgaben innerhalb einer Kundenanlage stattfindet.

## 6 Berechnung der Temperaturentwicklung in Leitungsnetzen

Einen zentraler Teil der Temperaturstudie bildet die Modellierung der Trinkwassertemperatur im Netz. So sollen Bereiche identifiziert werden, bei denen hohe Temperaturen im Rohrnetz auftreten. In Hinblick auf die prognostizierte Temperaturänderung im Zuge des Klimawandels ist dies für die Planung von gezielten Maßnahmen hilfreich.

Die Modellrechnung basiert auf der Gleichung zur Temperaturänderung infolge des Wärmeaustausches entlang von Rohrleitungen (Formel 7) aus STANET® (Fischer-Uhrig, 2016, S. 1548f). Diese Formel berechnet in STANET® die Temperaturabnahme innerhalb von Fernwärmeleitungen aufgrund der Wärmeabgabe an die Umgebung und die daraus resultierende Endtemperatur in Fernwärmeleitungen. Im Fall des hier vorgestellten Modells zur Temperaturentwicklung in Trinkwasserrohrleitungen sind dieselben Prozesse zwischen der Temperatur in einer Leitung und dem umgebenden Boden wirksam. Dabei handelt es sich in den Sommermonaten um eine Temperaturzunahme innerhalb des Leitungsnetzes. Nach demselben Prinzip kann demnach auch die Temperaturabnahme in Trinkwasserrohrnetzen in den Wintermonaten berechnet werden.

*Formel 7: Temperaturänderung entlang von Rohrleitungen*

$$T_2 = T_u + (T_1 - T_u) \exp(\pi * d * U * l / c * \dot{m})$$

Mit:

T1 = Eingangstemperatur (Temperatur HB/WW/ÜS) [°C]

T2 = Endtemperatur (Temperatur im zu berechnenden Rohrleitungsabschnitt) [°C]

Tu = Umgebungstemperatur (Temperatur des Bodens in Leitungshöhe) [°C]

d = Durchmesser der Rohrleitung [m]

U = Wärmedurchgangszahl [W/m<sup>2</sup>\*K]

l = Länge der Rohrleitung [m]

c = Spezifische Wärmekapazität des Mediums (Wasser) [kJ/kg\*K]

$\dot{m}$  = Massenfluss im Rohr [kg/s]

In dem Modell wird die die Endtemperatur (T2) an jedem Punkt im Netz gesucht. Die Eingangstemperatur (T1) entspricht der Temperatur des Trinkwassers in den Übergabestationen, Wasserwerken und Hochbehältern (Kapitel 7.2) Diese Orte werden im Modell als Startpunkte bezeichnet, aus denen das Wasser in das Netz eingespeist wird. Mithilfe der Netzwerkanalyse wird im GIS ermittelt, welchem Punkt im Netz welcher Startpunkt zugeordnet werden kann. Den Startpunkten wiederum wird jeweils eine Eingangstemperatur (TmpE) zugeordnet. Diese Startpunkte stimmen allerdings an einigen Stellen im Netz nicht mit der Realität überein, da die Einspeisepunkte sowie Fließgeschwindigkeiten und -richtungen je nach Situation im Netz unterschiedlich sind. Insbesondere im Innenstadtbereich kommt es zu einer Überlappung verschiedener Einspeisestellen. So weist Buxmann (2008, S. 89 ff.) nach, dass sich das Wasser in einigen Bereichen der Stadt aus verschiedenen Einspeisestellen zusammensetzt. Demnach kommt es in Abhängigkeit von dem Betriebszustand dazu, dass sich in diesen Bereichen die Haupteinspeisestelle ändert. Es konnten jedoch Kernversorgungsgebiete errechnet werden, bei dem die dominierende Einspeisestelle angegeben werden konnte (Buxmann, 2008, S. 91 ff.).

Der treibende Temperaturfaktor in dem Modell ist die Umgebungstemperatur (Tu) des Bodens. Da die Trinkwassertemperatur nach entsprechend langer Verweilzeit in der Leitung die Umgebungstemperatur annimmt, stellt die Bodentemperatur die Temperaturobergrenze dar. Im Sommer

erwärmt sich das Trinkwasser mindestens auf die Umgebungstemperatur, während sich im Winter die Trinkwassertemperatur maximal auf die Bodentemperatur abkühlt.

Die Umgebungstemperatur ist eine problematisch zu erfassende Größe, da hier alle besprochenen Einflussfaktoren einbezogen werden müssen, welche sich auf die Trinkwassertemperatur auswirken. Abhängig von der Jahreszeit, Verlegetiefe und dem Klimaszenario sind verschiedene Umgebungstemperaturen gewählt worden. Diese werden in Kapitel 7.3 näher erläutert. In das Modell gehen diese Daten als Variable TmpU auf Basis der BodenID ein.

Die Länge (l) der Route selbst ergibt sich über die Entfernung zwischen Start- und Endpunkt. Der Durchmesser (d) der Rohrleitung ändert sich meist entlang einer Route. Da sich in der Attributtabelle des Rohrleitungs-Shapefiles die Durchmesser der einzelnen Abschnitte deutlich unterscheiden, muss das mit den einzelnen Abschnittswerten gewichtete Mittel des Rohrdurchmessers auf der Strecke berechnet werden.

Die Wärmedurchgangszahl (U) wird Mithilfe des Materials und der Wanddicke für die untersuchten Routen berechnet (Kapitel 7.4.2). Als Konstante wird die spezifische Wärmekapazität (c) des Mediums, in diesem Fall Wasser, in die Formel einbezogen.

Es gilt: die zur Erwärmung eines Körpers notwendige Wärmemenge ist proportional der Masse des Körpers und der zu erzielenden Temperaturdifferenz (Kulching, 2004, S. 259). Der Proportionalitätsfaktor ist demnach die spezifische Wärmekapazität  $c$  [kJ/(kg\*K)]. Für Wasser liegt dieser bei 4,19 kJ/(kg\*K). Die Fließgeschwindigkeit des Wassers wird über den Massenfluss im Rohr (m) mit einbezogen (Kapitel 7.4.3).

Für jede einzelne Route bzw. jeden einzelnen Punkt im Netz wird in ArcGIS über ein Python Skript die Formel 7 angewendet. Im Folgenden wird die Erstellung des Modells näher besprochen.

## 7 Datenlage und Vorbereitung von Modellparametern

Um die Modellierung der Temperatur mithilfe von Formel 7 durchzuführen, müssen die einzelnen Modellparameter festgelegt und für GIS vorbereitet werden. Außerdem ist es wichtig den Einfluss des Klimas in die Modellierung mit einzubeziehen. Das Klima wirkt sich in zwei Bereichen des Modells auf die Trinkwassertemperatur aus. Dies ist zum einen die Bodentemperatur wie in Kapitel 4 beschrieben und zum anderen die Eingangstemperatur. Letztere ist wie in Kapitel 5.1 aufgeführt hauptsächlich durch die Gewinnungstemperatur und die Lage und Entfernung der Einspeisestelle zu den Gewinnungsgebieten und dem daraus resultierendem Temperatúraustausch mit dem Boden bedingt. Weitere Variablen der Formel können über die Rohrnetzeigenschaften ermittelt werden.

### 7.1 Klimafaktor

Um die aktuelle Situation im Versorgungsgebiet realitätsnah zu modellieren, ist es wichtig Modelltage zu wählen, welche eine gute Repräsentation des Stadtklimas darstellt. Außerdem sollen Extremsituationen betrachtet werden, bei denen von besonders hohen Temperaturen im Netz auszugehen ist. Die beiden Modellparameter, welche mit einem Klimafaktor angepasst werden, sind die Eingangstemperatur und die Umgebungstemperatur der Leitung, welche über die Bodentemperatur ausgedrückt wird.

Die klimatische Entwicklung wird, wie in Kapitel 3 angesprochen, über die beiden Modellparameter Umgebungs- und Eingangstemperatur in das Modell einbezogen. Darauf wird in den folgenden Kapiteln im Detail eingegangen.

### 7.2 Eingangstemperatur

Für das Modell wird ausgehend von den Klimaszenarien (Kapitel 3) jeder Einspeisestelle eine Temperatur  $T_{mpE}$  zugeordnet (Tabelle 19). Diese wird auf Basis der Sommertemperaturen analog zu den Klimaszenarien und der Bodentemperatur aus den vorhandenen Messungen an den Einspeisestellen gebildet.

Tabelle 19: Einspeisetemperatur  $T_{mpE}$  von wärmster (rot) zu kühler (grün) für das Modell nach Klimaszenario

Einspeisestelle	Einspeise-ID	KD [°C]	KH [°C]	KK [°C]
ÜS/WW 1	1	13	16	17
ÜS/WW 2	2	12	18	19
ÜS/WW 3	3	11	13	14
HB 1	4	13	15	16
HB 2	5	16	17	18
ÜS/WW 4	6	11	15	16
HB 3	7	13	15	16
HB 4	8	12	14	15
ÜS/WW 5	9	13	16	17

Klimaszenario KD bildet sich entsprechend aus dem Sommertemperatur-Mittel (Juni – September) des Jahres 2021, welches einem Durchschnittsjahr zuzuordnen ist, während sich Klimaszenario KH aus dem Sommertemperatur-Mittel des Hitzejahres 2022 bildet. Für Klimaszenario KK wurde eine weitere Erwärmung um 1 °C gegenüber dem schon heißen Jahr 2022 für alle Einspeisestellen angenommen. In der Realität kann in einigen Einspeisestellen jedoch von einer deutlich stärkeren oder ggf. weniger starken Erwärmung ausgegangen werden.

Je nach Bauart der Einspeisestellen besteht eine individuelle Raumtemperatur, welche stärker oder schwächer durch die Außentemperatur beeinflusst wird. Um eine genaue Temperaturprognose durchführen zu können, ist eine detailliertere Messung der Wassertemperatur, Raumtemperatur und Außentemperatur der einzelnen Anlagen notwendig. Für die durchgeführten Berechnungen wurden für das Klimaszenario KK einheitliche Werte der Temperaturzunahme in allen Einspeisestellen verwendet. Eine individuelle Anpassung der einzelnen Werte der Anlagen ist jedoch möglich. So können auch detaillierte Szenarien hinsichtlich der Einspeisestellen erstellt werden. Beispielsweise kann eine Einspeisestelle mit besonders hohen oder niedrigen Temperaturen modelliert werden, um die Auswirkung einer Einspeisestelle im Detail zu untersuchen. Dadurch kann beispielsweise die Wirksamkeit von einer aktiven Kühlung einer Einspeisestelle auf das Netz überprüft werden.

### 7.3 Umgebungstemperatur der Leitung

Der treibende Faktor der Temperatur im Modell ist die Umgebungstemperatur der Leitung, welche wie in Kapitel 5.2.3 besprochen, nicht nur durch die Bodentemperatur an sich, sondern auch durch Fremdleitungen beeinflusst werden kann. Zunächst sollen die Umgebungstemperaturdaten aus den vorhandenen Bodenmessungen besprochen werden. Anschließend wird der Einfluss der Fremdleitungen hinzugefügt.

#### 7.3.1 Umgebungstemperaturdaten

Um die Umgebungstemperaturdaten der Leitung in das Modell einzubinden, wird das Versorgungsgebiet in Temperaturbereiche unterteilt. Dadurch können die Bodentemperaturen den einzelnen Leitungsabschnitten im Modell zugeordnet werden. In diesem Schritt werden die Informationen zu den LCZs mit den Satellitendaten verbunden, um Aussagen über die Temperaturbereiche im Untersuchungsgebiet zu erhalten. Die Verarbeitung dieser Informationen im Modell wird in Kapitel 8.2.1 näher besprochen.

Für das Modell ist es notwendig zu wissen, welche Bodentemperatur dem jeweiligen Standort zuzuordnen ist. Aufgrund der Datenlage und der Größe des Versorgungsgebietes muss hier eine Generalisierung durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden Temperatur-IDs (TmpID) erstellt und jedem Standort zugeordnet. Hierfür werden in das GIS (Abbildung 38) die Shapefiles der Satellitendaten (1), die LCZs (2) sowie der Rohrnetzdatensatz (3) eingelesen. Auf die Vorgehensweise in GIS wird in Kapitel 8.2 näher eingegangen. Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen den Satellitendaten und den LCZs zur Bildung der TmpID erläutert werden.

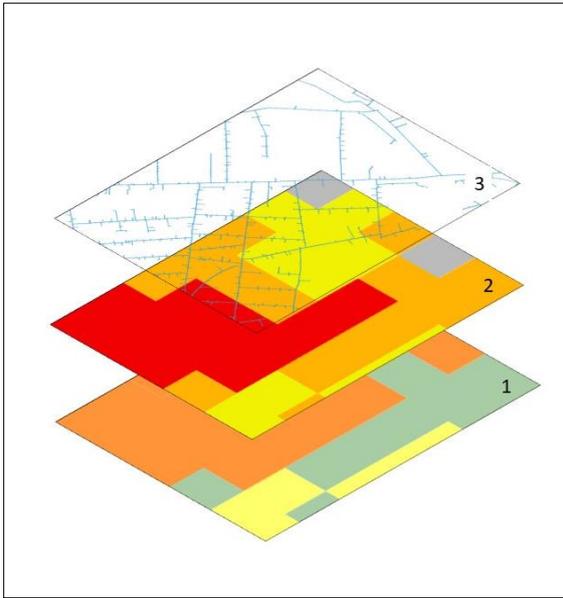


Abbildung 38: Layer zur Ermittlung der Bodentemperatur mit 1: Satellitendaten; 2: LCZ; 3: Rohrnetz

Eine Überschneidung (Abbildung 38) der Shapefiles aus Satellitendaten (1) und LCZs (2) in GIS über die Funktion „Überschneiden (intersect)“ lässt einen Vergleich beider Informationen zu. Eine großflächige Betrachtung der Überschneidung beider Daten ergibt eine gute Übereinstimmung warmer Bereiche mit stark versiegelten Flächen wie Large Low-Rise und Compact Mid-Rise. Die niedrigsten Temperaturen sind über Wasserflächen sowie über Wald (Dense Trees, Scattered Trees) zu finden. Im mittleren Temperaturbereich liegen die Flächen, welche als Open Low- und Mid-Rise sowie Low Plants klassifiziert werden.

Bei Letzteren handelt es sich um landwirtschaftliche Flächen, die einige sehr hoch temperierte Bereiche sowie einige moderate Bereiche aufweisen.

Bei entsprechend hoch temperierten Flächen ist davon auszugehen, dass diese zum Zeitpunkt der Aufnahme brach lagen und somit höhere Oberflächentemperaturen auftreten. Für die Temperaturen im Leitungsnetz sind diese Abweichungen jedoch nicht relevant, da sich die Trinkwasserleitungen hauptsächlich unter Asphaltflächen befinden.

Im Hinblick auf die Umgebungstemperatur des Modells lässt dies folgende Schlussfolgerungen zu:

1. Dem Stadtkern (Compact Mid-Rise) können höhere Oberflächen- und Bodentemperaturen zugeordnet werden.
1. Größere Industrie und/oder Gewerbegebiete (Large Low-Rise) können höheren Oberflächen- und Bodentemperaturen zugeordnet werden.
2. Es ist kein erkennbarer Unterschied hinsichtlich der Oberflächentemperatur zwischen den LCZ Open Low- und Open Mid-Rise festzustellen.
3. Bewaldeten Gebieten sind niedrigere Oberflächen- und Bodentemperaturen zuzuordnen.
4. Landwirtschaftliche Flächen (Low-Plants), Bare Soil or Sand und Wasser machen für das Modell nur einen geringen Anteil aus.

Aus der Kombination der LCZs und Satellitendaten des Versorgungsgebietes wird nun die TmpID gebildet. In Tabelle 20 ist die Einteilung der TmpID in Abhängigkeit davon, ob es sich um einen ländlichen Bereich (Land) oder ob es sich um einen Stadtbereich (Stadt) handelt, aufgeführt. Die Einteilung der Temperatur auf Grundlage der Satellitendaten basiert auf den Quantilen der Oberflächentemperatur am Untersuchungstag. Es ergeben sich 6 Temperaturbereiche, welche sowohl die Landnutzung über die LCZs als auch die über Satellitendaten erfassten Temperaturbereiche mit einbeziehen. Dabei sollen die Temperaturbereiche nicht die absolute Temperatur darstellen, sondern das Versorgungsgebiet in warme und kühle Bereiche unterteilen. Ziel ist es Bereiche für das Modell festzulegen in denen mit vergleichsweise hohen oder niedrigen Asphalttemperaturen zu rechnen ist. Den Temperaturbereichen (TmpID) können so für jedes Klimaszenario Temperaturen zugeordnet werden.

Tabelle 20: Zuordnung der TmpID nach LCZ und Satellitendaten (Eigene Darstellung nach Beck, et al. 2018 & U.S. Geological Survey, 2021)

TmpID	Bezeichnung	LCZ	Temperatur Sat. [°C]
1	Kalt Land	Bare Soil or Sand, Low Plants, Dense Trees, Scattered Trees	0 – 23
2	Warm Land		24 – 37
3	Sehr kalt Stadt	Compact Mid-Rise, Large Low-Rise, Open Low-Rise, Open Mid-Rise	12 – 22
4	Kalt Stadt		23 – 24
5	Warm Stadt		25 – 26
6	Sehr warm Stadt		27 – 43
0	Nicht angegeben	NA, Water	NA

Zudem werden in einigen Modellläufen die Fremdleitungseinflüsse mit einbezogen, die ebenfalls über die TmpID zugeordnet werden können. In diesem Fall wurden Bodentemperaturen mit Fremdleitungseinfluss entsprechend erhöht. Hierauf wird in Kapitel 7.3.2 näher eingegangen.

Die Informationen zu den Temperaturklassen des Bodens im Untersuchungsgebiet (Abbildung 38, 1 und 2) werden den einzelnen Leitungsabschnitten im Rohrleitungsdatensatz (Abbildung 38, 3) als TmpID (Tabelle 20) zugeordnet. Jeder Rohrleitungsabschnitt besitzt nun eine TmpID in Abhängigkeit von der Landnutzung, den LCZs, der Satellitentemperatur und dem Fremdleitungseinfluss.

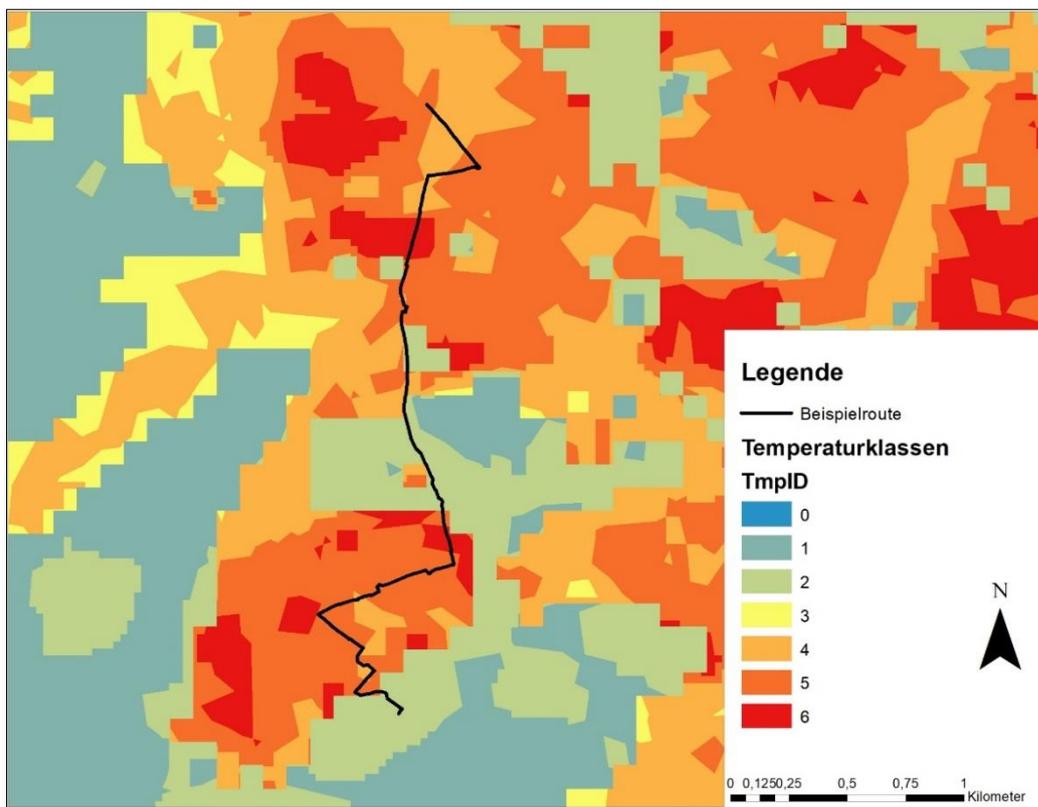


Abbildung 39: Entwickelte TmpID's entlang einer Beispielroute auf Basis Tabelle 20 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Um die Umgebungstemperatur einer gesamten Leitungsstrecke zu erhalten, wird das nach der Länge gewichtete Mittel der jeweiligen Leitungsstrecke betrachtet. Grund für die Wahl des gewichteten Mittels ist, dass eine Route verschiedene Temperaturbereiche durchläuft (Abbildung 39). Für die

Berechnung der Temperatur ist jedoch nicht nur die Temperatur am Linienende ausschlaggebend, da eine Temperaturübertragung über die gesamte Strecke betrachtet werden muss. Die Temperatur am Leitungsende ist grundsätzlich höher zu gewichten als am Leitungsanfang. Aufgrund des vereinfachten Modells wurde dies jedoch nicht realisiert.

Das gewichtete Mittel der TmpID einer gesamten Route wird als BodenID bezeichnet. Dieser Wert wird anschließend gerundet, um in einem nächsten Schritt den Temperaturen der einzelnen Klimaszenarien zugeordnet zu werden. Die Unterscheidung zwischen TmpID (Rohrleitungsabschnitt, nicht gewichtet) und BodenID (Route, gewichtet) ist für die Bearbeitung in den Python Skripten relevant, um eine individuelle Bezeichnung der Variablen im Skript zu gewährleisten.

Die BodenID ist ebenfalls in sechs Stufen unterschiedlicher Temperatur unterteilt (Tabelle 21). Hierüber wird die mit dem Temperaturlogger gemessene Bodentemperatur inklusive Klimafaktor in das Modell einbezogen.

Tabelle 21: Ermittlung der Daten für die TmpID und BodenID

BodenID	Beschreibung	Entspricht Daten aus Bodenmessung
1	Kühle unbebaute Fläche	Stadtwald
2	Warme unbebaute Fläche	Grünfläche
3	Kühle bebaute Fläche	Asphalt Schatten
4	Eher kühle bebaute Fläche	Mittel aus 2x Asphalt Schatten und 1x Asphalt Sonne
5	Eher warme bebaute Fläche	Mittel aus 2x Asphalt Sonne und 1x Asphalt Schatten
6	Warme bebaute Fläche	Asphalt Sonne

Für das Modell sind in Abhängigkeit der ID, der Verlegetiefe und des Klimaszenarios (KD, KH, KK) die Mittelwerte der Sommertemperatur Juni bis September errechnet worden, um jeweils einen repräsentativen Wert zu erhalten. Dieser Wert beschreibt den mittleren sommerlichen Wert der Umgebungstemperatur. Dabei handelt es sich um gerundete, ganzzahlige Temperaturwerte.

So ergibt sich die Temperatur des Bodens zu einem definierten Zeitpunkt, in einer definierten Tiefe von 100 oder 120 cm jeder Route. Im Modell wird diese als Umgebungstemperatur (TmpU) bezeichnet und ist für alle Kombinationen in Tabelle 22 aufgelistet. Der Wert TmpU ist für die Modellberechnung im weiteren Verlauf relevant, um die Klimaszenarien zu berechnen und stellt einen der wichtigsten Treiber in der Formel 7 dar.

Klimaszenario KD entspricht, wie im Fall der Eingangstemperatur dem Temperaturmittel der Sommermonate (Juni - September) 2021, während Klimaszenario KH der Sommertemperatur aus 2022 entspricht. Für Klimaszenario KK wird in jeder Bodentemperaturklasse eine durchschnittliche Temperaturzunahme von +1 °C in Bezug zum Szenario KH angenommen. Auch hier ist das Szenario KK eine Annahme, so dass eine stärkere oder schwächere Erwärmung einiger Bodentemperaturbereiche möglich ist. Da es sich bei der Bodentemperatur jedoch um sehr verallgemeinerte Werte handelt, ist eine gewisse Ungenauigkeit bekannt.

Verbesserungen in dem Modell könnten durch genauere Daten zu der Bodentemperaturen und ihrer räumlichen Verbreitung in den jeweiligen Leitungstiefen erreicht werden, wie in Kapitel 4 dargelegt.

Tabelle 22: Abschließende Temperatur  $T_{mpU}$  für die Modellberechnung

BodenID	KD 100 cm [°C]	KD 120 cm [°C]	KH 100 cm [°C]	KH 120 cm [°C]	KK 100 cm [°C]	KK 120 cm [°C]
1	13	15	14	14	15	15
2	19	17	21	19	22	20
3	18	17	20	19	21	20
4	19	18	22	19	23	20
5	20	19	23	22	24	23
6	21	20	25	25	26	26

### 7.3.2 Fremdleitungen

In dem Modell sollen auch die Auswirkungen von Fremdleitungen berücksichtigt werden. Dabei sind Fern- und Nahwärmeleitungen sowie die Starkstromtrassen zu berücksichtigen, da hier ein größerer Einfluss auf die umgebende Bodentemperatur besteht. Der Einflussbereich von Fremdleitungen ist, wie in Kapitel 5.2.3 dargestellt, hauptsächlich in der näheren Umgebung der Trinkwasserleitungen wirksam. Im GIS wurde ein Bereich von 2 m um die Fremdleitungen herum als Einflussbereich definiert wie in Abbildung 40 dargestellt.



Abbildung 40: Darstellung von Fremdleitungen in einer Umgebung von Trinkwasserleitungen als Vorbereitung für das GIS Modell (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Grund hierfür ist, dass bei allen vorliegenden Daten Messfehler im GIS hinsichtlich der Lage berücksichtigt werden müssen. Gesetzlich vorgeschrieben ist, wie in Kapitel 5.2.3 näher aufgeführt, ein Abstand von 1 m bzw. 0,4 m. Für Fremdleitungen und Starkstromleitungen wurde ein größerer Einfluss (+ 1,0°C) und für Nahwärmeleitungen ein geringer Einfluss (+ 0,5°C) bei

Überschneidungen mit Trinkwasserleitungen definiert. Die übrigen Leitungen sind mit „kein Einfluss“ gekennzeichnet.

### **7.3.3 Stagnationsbereiche**

Stagnationsbereiche werden über die Fließgeschwindigkeit in das Modell einbezogen. Anfangs wurde der Ansatz verfolgt, Endstränge zusätzlich im GIS zu identifizieren und ggf. stärker zu gewichten. Zu diesem Zweck ist es möglich beispielsweise im GIS Endpunkte einer Linie zu wählen und als Stagnationszone zu definieren. Allerdings können auch Endstränge, beispielsweise wenn Großabnehmer daran angeschlossen sind, gut durchspült sein. Da über die Rohrnetzrechnung Stagnationsbereiche bei einer Fließgeschwindigkeit von 0 m/s sichtbar werden, wurde die Thematik Stagnation in dem Modell nicht separat eingebunden, sondern über die Fließgeschwindigkeit realisiert. In kleineren Versorgungsnetzen kann eine detaillierte Betrachtung aufgrund der Übersichtlichkeit und anhand der Betriebserfahrung einfacher erfolgen. Für das großstädtische Netz ist eine solche Betrachtung deutlich umfangreicher.

### **7.3.4 Verlegetiefe**

Wie in der Auswertung der Bodentemperaturmessung (Kapitel 4) dargelegt wurde unterscheiden sich die Bodentemperaturen in einer Tiefe von 100 cm und 120 cm. Im Sommer besteht dabei ein Temperaturunterschied von etwa einem 1°C im Mittel zwischen 100 cm und 120 cm Tiefe. Im Modell muss die Temperatur der entsprechenden Verlegetiefe dem Leitungsabschnitt zugeordnet werden. Problematisch ist die Datenlage auf Seiten des Versorgungsunternehmens. In einem derart großen Versorgungsgebiet mit einem über 1.000 km langem Leitungsnetz, welches historisch gewachsen ist, sind erst in der jüngsten Vergangenheit alle Rohrnetzparameter wie die Verlegetiefe in Datenbanken aufgenommen worden. Demnach ist die Verlegetiefe für den Großteil des Leitungsnetzes unbekannt bzw. nicht gesammelt in einer Datenbank nutzbar.

Für das Modell wird daher eine einheitliche Verlegetiefe aller Leitungen auf 100 cm oder 120 cm festgelegt. So kann der Unterschied zwischen den Verlegetiefen modelliert und die Auswirkung der Verlegetiefe betrachtet werden.

## **7.4 Rohrnetzparameter**

Die im folgenden besprochenen Rohrnetzparameter werden für die Einbindung der Formel 7 in das Modell benötigt. Da, wie im Fall der Verlegetiefe, einige Parameter gar nicht oder nicht für alle Leitungen vorliegen, müssen entsprechende Informationen näherungsweise aus der Literatur ermittelt werden. Grundsätzlich bietet es sich als Versorgungsunternehmen an, diese Informationen künftig in den Rohrnetzdatensatz zu übernehmen. Für einen großen Versorger ist aufgrund des Alters des Leitungsnetzes eine rückwirkende Informationsbeschaffung aller Rohrleitungsabschnitte nicht realistisch.

### **7.4.1 Länge der Leitung**

Wie bereits angemerkt ist die Verweildauer des Wassers in der Leitung für die Temperaturentwicklung zu berücksichtigen. Ein Faktor hierbei ist die Länge der Strecke, welche das Wasser von der

Einspeisestelle zum Kunden zurücklegt, sowie der Rohrleitungsdurchmesser. Da sich der Durchmesser der Rohrleitung entlang der Route von Einspeisestelle bis hin zum Kunden ändert, wurde das, mit den jeweiligen Leitungsstrecken gewichtete Mittel des Durchmessers herangezogen.

#### 7.4.2 Wärmedurchgang

Im Modell wird unter anderem die Wärmeübertragung zwischen dem Boden und der Trinkwasserleitung berücksichtigt. Nach Kulching (2004, S. 325 f.) vollzieht sich ein Wärmedurchgang, wenn zwei unterschiedlich temperierte Körper durch eine „Wand“ getrennt sind. Für die Berechnung des Wärmedurchgangs ist die Wärmedurchgangszahl (Wärmedurchgangskoeffizient) relevant. Die Wärmedurchgangszahl ist abhängig von dem Material der Rohrleitung und deren Wanddicke.

Grundsätzlich gilt, je höher die Wärmedurchgangszahl desto schlechter ist die Wärmedämmung des Materials (Baehr & Stephan, 2006, S. 34). Nach Reick (1999, S. 6) wird der Wärmedurchgangswiderstand einer homogenen Schicht bestimmt durch:

*Formel 8: Wärmedurchgangswiderstand*

$$U = \frac{\lambda}{d}$$

Mit:

U = Wärmedurchgangswiderstand [W/(m<sup>2</sup>·K)]

d = Dicke der Schicht im Bauteil (Wanddicke) [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit des Stoffes [W/(m·K)]

Zur Berechnung der Wärmedurchgangszahl sind folglich die Dicke des Bauteils sowie das Material und dessen Wärmeleitfähigkeit relevant. Die Wanddicke kann aus den vorliegenden Unterlagen des Versorgungsunternehmens nicht entnommen werden. Für die Leitungsabschnitte ist jedoch die Nennweite der Leitung angegeben. Über die Nennweite und das angegebene Material lässt sich näherungsweise die Wanddicke des Rohrs über verschiedene Herstellerangaben bestimmen.

Dabei ist zu beachten, dass die genauen Hersteller der Rohrleitungen und somit Angaben zu den exakten Wanddicken nicht mehr nachvollziehbar sind. Dies betrifft insbesondere ältere Rohrleitungsabschnitte, zu denen keine Dokumentation vorhanden ist. Über Angaben verschiedener Hersteller lässt sich jedoch näherungsweise eine Wanddicke für jede Rohrleitung zuordnen.

Auch der Wert zur Wärmeleitfähigkeit des Materials lässt sich aus der Literatur in Annäherung entnehmen. Leichte Abweichungen in der Wärmeleitfähigkeit sind aufgrund der unterschiedlichen Hersteller der Rohrleitungen auch hier nicht auszuschließen. Die im Leitungsnetzen verbaute Materialien sind über den Rohrleitungsdatensatz zu entnehmen:

- Stahl (ST) und Edelstahl (V2A)
- Polyethylen (PE und PE-HD)
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Grauguss (GG) und Duktiles Gusseisen (GGG)
- Zementmörtel (ZM)

In dem GIS-Modell wird auf Basis dieser Daten mithilfe der Formel 8 der Wärmedurchgangswiderstand (U-Wert) für jeden Rohrabschnitt berechnet und anschließend als gewichtetes arithmetisches Mittel jeder Route zugeordnet.

### 7.4.3 Massenfluss im Rohr

Eine weitere Variable im Modell ist der Massenfluss im Rohr, welcher unter anderem die Fließgeschwindigkeit beinhaltet. Der Massenfluss (Massenstrom) kann durch die Formel 9 ausgedrückt werden (Boschorer & Költzsch, 2001, S. 238):

*Formel 9: Massenstrom allgemein*

$$\dot{m} = \rho * q_v$$

Mit:

$\dot{m}$  = Massenstrom [kg/s]

$\rho$  = Dichte von Wasser 997 [kg/m<sup>3</sup>]

$q_v$  = Volumenstrom im Rohr [m<sup>3</sup>/s]

Die Dichte des Wassers mit 997 kg/m<sup>3</sup> ist bekannt. Zudem wird der Volumenstrom im Rohr benötigt (Formel 10), welcher wiederum ausgedrückt wird durch (Kulching, 2004, S. 162f):

*Formel 10: Volumenstrom [kg<sup>3</sup>/s] im Rohr*

$$q_v = v * A$$

Mit:

$q_v$  = Volumenstrom im Rohr [m<sup>3</sup>/s]

$v$  = Fließgeschwindigkeit [m/s]

$A$  = Querschnitt des Rohres mit  $\pi * r^2$

Die Daten zur Fließgeschwindigkeit liegen dem Versorgungsunternehmen tabellarisch für jeden Rohrleitungsabschnitt in STANET® (Fischer-Uhrig, 2016) vor. Dabei kann die Fließgeschwindigkeit entweder zu einem definierten Zeitpunkt oder als Durchschnittswert für einen gewählten Betriebszustand errechnet werden. Für die Auswertung der Ergebnisse bietet es sich an mit Durchschnittswerten zu arbeiten, welche häufige Situationen im Netz repräsentieren.

Zur Berechnung der Formel 10 wird außerdem die Querschnittsfläche der Rohrleitung benötigt. Die Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>] wird mithilfe des Rohrdurchmessers ( $d$ ) berechnet über (Formel 11):

*Formel 11: Querschnittsfläche*

$$A = \pi * \left(\frac{1}{2} d^2\right)$$

Da es sich bei der Querschnittsfläche um einen Durchschnitt aller Rohrleitungen auf der untersuchten Strecke handelt, wird auch hier das gewichtete arithmetische Mittel, in Abhängigkeit von der Länge der Rohrleitung berechnet. Mithilfe der einzelnen Variablen kann letztlich der Massenfluss ( $\dot{m}$ ) im Rohr ermittelt werden (Formel 12):

*Formel 12: Massenfluss im Rohr*

$$\dot{m} = \rho * v * \pi * \left(\frac{1}{2} d^2\right)$$

Somit können die Rohrnetzdaten inklusive Fließgeschwindigkeit in das Modell einbezogen werden. Allerdings ändert sich die Fließgeschwindigkeit und auch die Fließrichtung je nach Betriebszustand. Abhängig davon stammt das Wasser an einem definierten Punkt im Netz von unterschiedlichen Einspeisestellen. Daher ist es wichtig je nach Szenario nicht nur die Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Rohrleitungsabschnitte, sondern auch die Einspeisestellen und dementsprechend auch die Routen richtig zuzuordnen.

## 8 Modellierung der Trinkwassertemperatur im Netz

Als Modellrahmen dient ArcGIS (Esri) und die im GIS implementierte *arcpy* Funktion, eine Python Erweiterung. Anzumerken ist, dass es sich bei dem hier entwickelten Modell um ein statisches Modell handelt. Durch das Verändern von verschiedenen Variablen können unterschiedliche Betriebszustände und Klimaszenarien berechnet werden. Der entstandene GIS-Datensatz beinhaltet als Ergebnis die errechneten Temperaturen an jedem Punkt im Netz für einen festgelegten Betriebszustand.

### 8.1 Aufbau eines Trinkwassertemperaturmodells

Obwohl das GIS bei der Verarbeitung der Daten einige Probleme aufwies, bietet es auch mehrere Vorteile. So liegen die meisten Daten von dem Versorgungsunternehmens bereits als Shapefiles vor. Außerdem kann der Versorger die Modellergebnisse im GIS gut zur graphischen Visualisierung nutzen, um Temperaturbereiche im Netz darzustellen.

Es ergeben sich jedoch auch einige Probleme durch die Nutzung des GIS. Es handelt sich bei dem Modell um ein statisches Modell. Eine dynamische Berechnung bei geänderten Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen war in diesem Projektumfang nicht umsetzbar. Jede Änderung von Modellparametern erfordert eine Anpassung der Attributtabelle der einzelnen Shapefiles im Vorfeld. Zum aktuellen Stand ist ein umfassendes Verständnis des Modells notwendig, um es zu nutzen. Dies ist für die Anwendung durch den Versorger entsprechend als problematisch zu betrachten. Für eine benutzerfreundliche Anwendung ist daher eine weitere Automatisierung notwendig. ArcGIS selbst ist zudem recht unperformant. Auf diese Problematik wird nachfolgend weiter eingegangen.

### 8.2 Vorbereitung der Datensätze

Das Modell wird über das in ArcGIS integrierte Python Modul *arcpy* ausgeführt. Aufgrund der Größe des Versorgungsgebietes sind die verwendeten Datensätze entsprechend groß. Da alle GIS Anwendungen über einen systemspeicherbasierten Workspace (In-Memory-Workspace) verfügen, füllt sich der Arbeitsspeicher in der 32-Bit Version während des Durchführens von Python Skripten (Kaiser, 2022, S. 341). Bedingt durch die Größe der Datensätze ergibt sich bereits nach kurzer Zeit ein Volllaufen des Arbeitsspeichers und es kommt zu einem Abbruch des Systems. Dieses Problem besteht in der 64-bit Version (ArcGIS Pro) jedoch nicht (Kaiser, 2022, S. 341). Insgesamt ergibt sich eine lange Rechenzeit, abhängig von den Systemvoraussetzungen.

Der Hauptteil des GIS Modells besteht aus zwei Shapefiledatensätzen (Linien) und zwei .csv Tabellen, wobei die Shapefiledatensätze für die Modellberechnung mit allen notwendigen Variablen vorbereitet werden müssen. Die Basis der Shapefiledatensätze ist die Rohrnetztafel aus STANET® als Shapefile. Die Rohrnetztafel beinhaltet für jedes Linienelement verschiedene Informationen aus STANET®, wobei folgende Daten aus dieser Tabelle für das Modell relevant sind:

- Nennweite Rohrdurchmesser (DM)
- Material des Leitungsabschnitts (MATERIAL)
- Länge des Leitungsabschnitts (RORL)
- Fließgeschwindigkeit (GESCHW)

Die Fließgeschwindigkeit wurde für verschiedene Betriebszustände errechnet und ist demnach unterteilt in Betriebszustand A-E (Abbildung 26). Je nach Richtung der Fließgeschwindigkeit ist der Wert in der Rohrnetztable positiv oder negativ. Für das GIS Modell wird der Betrag der Geschwindigkeit verwendet ( $VM\_A - VM\_E$ ), da einzelne Routen mit einheitlicher Fließrichtung von Start zu Endpunkt festgelegt werden müssen.

Um die Formel 7 zu verwenden, werden neben den vorhandenen Variablen weitere notwendige Informationen zur Rohrnetztable hinzugefügt und im GIS verarbeitet. Im Folgenden wird im Detail aufgeführt wie die Daten über die Attributtabelle der Shapefiles im GIS eingelesen werden.

### 8.2.1 Rohrnetztable

In einem ersten Schritt werden weitere relevante Informationen in die Attributtabelle der Rohrnetztable übertragen, um die Tabelle für das Modell vorzubereiten. Dies sind zum einen die Informationen zur Bodentemperatur, welche über die BodenID einbezogen werden, und zum anderen Werte zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Rohrleitungsabschnitte.

Die Bodentemperatur wird wie in Kapitel 4 und 7.3.1 besprochen über die BodenID in das Modell einbezogen. In GIS wird dies wie über die LCZs und mithilfe von Satellitendaten realisiert (Abbildung 38). Hierfür wird in einem ersten Schritt die Datensätze der LCZs und der Satellitendaten in das GIS eingelesen. Die Einteilung der Local Climate Zones des Untersuchungsgebiets liegt als .XYZ 3D Punkt-Feature Datensatz vor und wird unter Verwendung der „3D-Analyst“- und Konvertierungswerkzeuge in ArcMap in ein Raster konvertiert (esri [3], 2020). Für die weitere Verarbeitung muss der Datensatz als Polygon vorliegen. Um das Geoverarbeitungswerkzeug „Conversion – Raster in Polygon“ zu verwenden wird der Datensatz in einem ersten Schritt aggregiert (Mittelwert, Zellfaktor 1), um ein TIFF-Raster zu erhalten (esri [2], 2023). Anschließend wird dieses mit dem Data Management Werkzeug „Integrieren“ verarbeitet, um die Koordinatenposition der Stützpunkte zu analysieren (esri [4], 2023). Der entstandene Datensatz kann somit zu einem Polygondatensatz umgewandelt werden. Die Attributtabelle des LCZ Datensatzes enthält nun einen dedizierten Wert für jede LCZ. Jeder Standort im Untersuchungsgebiet kann somit einer LCZ zugeordnet werden.

Für die Verarbeitung der Satellitendaten wird wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben eine Skalierung des Datensatzes und Umwandlung in °C durchgeführt. Der Satellitendatensatz muss anschließend in ArcGIS, analog zum LCZ Datensatz aggregiert und anschließend integriert und in ein Polygon umgewandelt werden. Nun kann auch hier jedem Standort eine über Satellitendaten erfasste Temperatur zugeordnet werden. Für das Modell wird die in Kapitel 7.3.1 besprochene TmpID verwendet, um die Informationen aus Satellitendaten und LCZ dem Rohrnetzdatensatz zuzuordnen. Dies bietet die Möglichkeit verschieden temperierte Bereiche zu identifizieren und für die weiteren Modellierungsschritte zu generalisieren.

Beide Datensätze (Satellit und LCZ) können über das GIS Werkzeug *merge* mit dem Rohrnetzdatensatz verbunden werden. Eine Überschneidung (Abbildung 38) der Shapefiles aus Satellitendaten (1), LCZs (2) und dem Rohrnetz (3) ergibt einen Datensatz, in dem alle Informationen der drei Layer enthalten sind. Aus dem entstandenen Datensatz kann somit die Information zur LCZ und der Temperatur aus Satellitendaten für jeden Rohrleitungsabschnitt entnommen werden. Über eine IF-ELSE

Abfrage mithilfe der Feldberechnung in der Attributtabelle, wird auf Basis von Tabelle 20 jedem Rohrnetzabschnitt eine TmpID zugeordnet. Jeder Rohrleitungsabschnitt erhält somit eine TmpID über die ihm Bodentemperaturdaten in Abhängigkeit von Klimaszenarien zugeordnet werden können.

Zusätzlich werden in einigen Modellläufen die Fremdleitungseinflüsse mit einbezogen, die ebenfalls über die TmpID zugeordnet werden können. In diesem Fall wird bei Fremdleitungseinfluss die BodenID entsprechend erhöht. Der Rohrleitungsdatensatz beinhaltet nun für jeden Rohrleitungsabschnitt eine definierte TmpID, über die eine Bodentemperatur in Abhängigkeit von Klimaszenarien zugeordnet werden kann, wie in Kapitel 7.3.1 besprochen.

In einem nächsten Schritt wird die Tabelle des Rohrleitungsdatensatzes um Informationen zur Wanddicke des Bauteils sowie zur Leitfähigkeit erweitert. Diese Daten können auf Basis des Materials und der Nennweite der Rohrleitung anhand von Literaturangaben näherungsweise bestimmt werden. Aus diesen Daten kann nach Formel 8 der Wärmedurchgangswiderstand berechnet und anschließend als arithmetisches Mittel jeder Route zugeordnet werden.

Die Rohrnetztable beinhaltet nun alle Informationen, um in Kombination mit der Routentabelle die Temperatur an jedem Punkt im Netz berechnen zu können.

## **8.2.2 Routentabelle**

In einem nächsten Schritt muss ein zweiter GIS Datensatz erstellt werden, welcher einzelne Routen ausgehend von der Einspeisestelle bis hin zu den einzelnen Punkten im Netz beinhaltet. Dabei werden verschiedene Betriebszustände berücksichtigt, wie in Kapitel 5.2.2 dargestellt. Jeder Betriebszustand beinhaltet eine Fließgeschwindigkeit und -richtung als Funktion des Verbrauchs sowie die Information über die aktive Einspeisestelle. Um diesen Datensatz zu erstellen wird eine Netzwerkanalyse durchgeführt.

### **8.2.2.1 Netzwerkanalyse**

Zur Vorbereitung der Netzwerkanalyse wird eine File-Geodatabase erstellt, der ein neues Feature Dataset in einem passendem Koordinatensystem hinzugefügt wurde. In dieses Feature Dataset wird der Rohrnetz Datensatz als neues Feature Dataset importiert. Auf Basis dieses Linien-Shapefiles wird so ein Netzwerk-Dataset erstellt. Hierbei wurden keine weiteren Einstellungen wie beispielsweise Reisemodus oder Wegbeschreibung getätigt. Sofern Informationen zu geschlossenen Schiebern vorliegen kann in diesem Schritt eine „Beschränkung“ zugefügt werden. Dies erhöht die Genauigkeit in dem Modell. Aufgrund der fehlenden Informationen zu der Schiebersituation im Netz und den sich häufig ändernden Zuständen der Schieber wurde dies nicht in dem Modell umgesetzt.

Das Netzwerk-Dataset beinhaltet nun Datensätze mit einem Linien-Shapefile, den Kanten des Netzwerk-Datasets als Linien-Shapefile und einem Punkt-Shapefile, welches die Kreuzungen der Rohrleitungsabschnitte markiert. Die Kreuzungen sind in Abbildung 41 dargestellt und stellen gleichzeitig die Endpunkte in dem Modell dar. An jedem dieser Kreuzungspunkte soll in dem Modell die Temperatur errechnet werden.

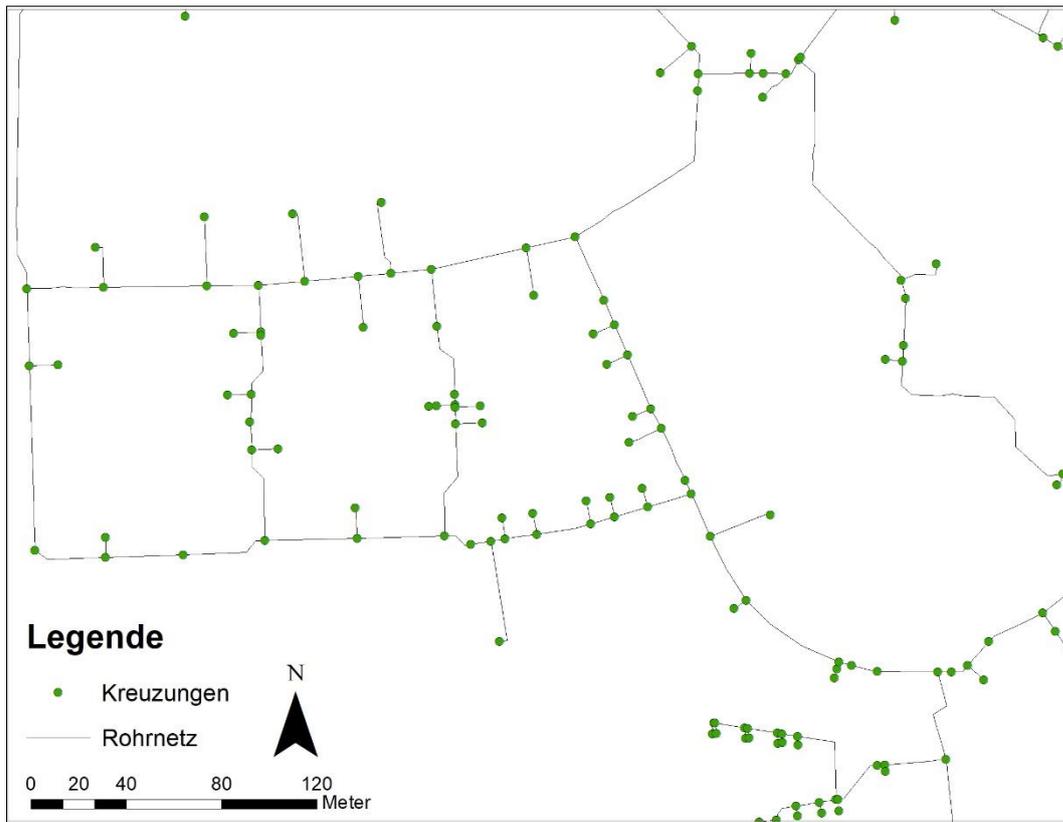


Abbildung 41: Darstellung der Linien (Rohrnetz) und Kreuzungen des Netzwerk Datasets (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Um den Routen-Datensatz zu erstellen, wird nun im GIS eine Netzwerkanalyse auf Basis des Netzwerk-Datasets durchgeführt. Die Startpunkte sind die jeweiligen Einspeisestellen in dem Versorgungsgebiet, während die Endpunkte durch die oben angesprochenen Kanten repräsentiert werden. Je nach Betriebszustand sind in dem Versorgungssystem unterschiedliche Einspeisestellen aktiv, somit ergeben sich unterschiedliche Startpunkte. Dementsprechend muss für jeden Betriebszustand ein eigener Routendatensatz errechnet werden, der jeweils mit allen weiteren Informationen gefüllt werden muss. Eine Standardisierung des Schritts zur Netzwerkanalyse und Einarbeitung aller weiterer Informationen würde zur Dynamisierung des Modells beitragen, sodass eine größere Anzahl an Betriebszuständen berechnet werden kann.

Über die Netzwerkanalyse entsteht ein Linien-Datensatz mit einzelnen Routen zwischen Einspeisestelle und dem jeweiligem Endpunkt (Kreuzung). Die einzelnen Routen überlagern sich hierbei, was in der graphischen Auswertung zu berücksichtigen ist. Die richtige Zuordnung einzelner Startpunkte zu den Endpunkten können in einem großen und komplexen Versorgungssystem wie im Fall einer Großstadt insbesondere in den Überlappungsbereichen Ungenauigkeiten aufweisen.

Grund hierfür ist, dass in der Netzwerkanalyse mithilfe der Funktion „Nächstgelegene Einrichtung“ für jeden Rohrleitungsabschnitt eine Einspeisestelle als Startpunkt zugeordnet wird. Hydraulisch bedingte Fließrichtungsänderungen aufgrund sich ändernden Abnahmemengen durch Kunden, Sackgassen in Form von kurzfristig geschlossenen Schiebern oder eine Mischung von Wasser aus mehreren Einspeisestellen wurden dabei nicht berücksichtigt. Um derartige Informationen vollständig einzubeziehen, ist eine Berechnung der Routen im Vorfeld über ein Rohrnetzprogramm sinnvoll.

Diese Einschränkung ist bei der Interpretation der Ergebnisse in den Überlappungsbereichen zu berücksichtigen. Eine Mischung des Wassers aus verschiedenen Einspeisequellen in einigen Bereichen der Stadt ist bereits aus der Betriebserfahrung bekannt und auch mithilfe von Rohrnetzrechnungen schwer zu erfassen.

#### 8.2.2.2 Variablen in der Routentabelle

Die Temperaturberechnung findet in der Attributtabelle des Routen-Datensatzes statt. Daher muss diese alle für die Formel 7 notwendigen Variablen beinhalten. Da sich Eigenschaften der Rohrleitung und die Bodentemperatur bzw. TmpID entlang einer Route ändern, müssen alle Werte abhängig von der Länge der Leitungsabschnitte gewichtet werden. Dies betrifft den U-Wert und die BodenID. In Abbildung 39 ist beispielhaft dargestellt, wie eine Route verschiedene Temperaturbereiche durchläuft. Das gewichtete arithmetische Mittel der TmpID wird zusätzlich in einen ganzzahligen Wert gerundet um in einem nächsten Schritt die Umgebungstemperatur, abhängig von dem Klimaszenario (KlimaID), zuzuordnen.

```
fc1 = "Routentabelle"
fc2 = "Rohrnetztabelle"
arcpy.management.AddField(fc1, "BodenID", "DOUBLE")
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc1, "CLEAR_SELECTION")
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc2, "CLEAR_SELECTION")
fc1_cnt = int(arcpy.management.GetCount(fc1).getOutput(0))
for i in range(0, 137737):
    currRoute=arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc1, "NEW_SELECTION", "FID="
+ str(i))
    arcpy.SelectLayerByLocation_management(fc2, "INTERSECT", fc1, 0, "NEW_SELECTION", "NOT_INVERT")
    fc2_cnt = int(arcpy.management.GetCount(fc2).getOutput(0))
    cursor = arcpy.SearchCursor(fc2)
    sum = 0
    RORLsum = 0
    Tsum = 0
    for row in cursor:
        val=row.getValue("RORL")
        RORLsum = RORLsum+float(val)
        val=(row.getValue("TmpID"))*(row.getValue("RORL"))
        Tsum = Tsum+float(val)
    if RORLsum == 0:
        ID = 0
    else:
        ID = Tsum/RORLsum
    cursor = arcpy.UpdateCursor(currRoute)
    for row in cursor:
        row.setValue("BodenID", ID)
        cursor.updateRow(row)
```

Skript 2: Errechnung der BodenID in ArcGIS

Die Gewichtung beider Werte wird durch ein kurzes Python Skript in GIS realisiert. In Skript 2 ist dieser Schritt für die BodenID abgebildet. Nach demselben Muster wird ebenfalls der U-Wert

gewichtet und in die Routentabelle übertragen. Wichtig in diesem Schritt ist der Einbezug aller Rohrleitungsabschnitte aus der Rohrnetztable entlang einer Route. Die einzelnen Routen aus fc1 (Routentabelle) werden nacheinander bearbeitet. Über den Befehl *arcpy.SelectLayerByLocation* werden für jede gewählte Route (fc1) alle Rohrleitungsabschnitte aus fc2 (Rohrnetztable) lagebezogen ausgewählt, die auf der jeweiligen Route liegen.

Die einzelnen TmpIDs werden nun abhängig von der Länge der einzelnen Abschnitte gewichtet. Das so gewichtete Mittel der TmpID wird als BodenID in die gewählte Route (fc1) über die Befehle *cursor* und *row.set.value* in die zuvor neu erstellte Spalte („BodenID“) der Routentabelle übertragen. Für jede einzelne Route wird dies in einem Loop durchgeführt und analog für den U-Wert wiederholt.

```
UT = str("UT")
data = str("data")
for i in range(1,7):
    globals()["UT%s"%(i-1)] = data
    for data in range(1,7):
        data = float(UTemp.at[(i),DatumU])
ET = str("ET")
data = str("data")
for i in range(1,12):
    globals()["ET%s"%(i-1)] = data
    for data in range(1,12):
        data = float(ETemp.at[(i),DatumE])
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc1,"CLEAR_SELECTION")
fc1_cnt = int(arcpy.management.GetCount(fc1).getOutput(0))
for i in range(0,137737):
    currRoute=arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc1, "NEW_SELECTION","FID=" + str(i))
    cursor = arcpy.SearchCursor(fc1)
    cursor = arcpy.UpdateCursor(currRoute)
    for row in cursor:
        FIDt = row.getValue("FAID")
        if FIDt == 1:
            TE = ET1
        elif FIDt == 2:
            TE = ET2
        elif FIDt == 4:
            TE = ET4
        elif FIDt == 5:
            TE = ET5
        elif FIDt == 7:
            TE = ET7
        elif FIDt == 8:
            TE = ET8
        elif FIDt == 9:
            TE = ET9
        elif FIDt == 10:
            TE = ET10
        elif FIDt == 11:
            TE = ET11
        else:
            TE = 0
    cursor = arcpy.SearchCursor(fc1)
    cursor = arcpy.UpdateCursor(currRoute)
```

```

for row in cursor:
    BID = int(row.getValue("BodenID"))
    if BID == 1:
        TU = UT1
    elif BID == 2:
        TU = UT2
    elif BID == 3:
        TU = UT3
    elif BID == 4:
        TU = UT4
    elif BID == 5:
        TU = UT5
    else:
        TU = 0
cursor = arcpy.SearchCursor(fc1)
cursor = arcpy.UpdateCursor(currRoute)
for row in cursor:
    row.setValue("TmpE", TE)
    row.setValue("TmpU", TU)
cursor.updateRow(row)

```

Skript 4: Einbindung der Daten TempU und TempE in den Routen Datensatz, Beispiel für August 2020 in 100 cm Tiefe

Die Umgebungstemperatur (TmpU) sowie die Eingangstemperatur (TmpE) werden über Skript 4 in die Attributtabelle des Routen-Datensatzes eingefügt. Hierfür ist das Paket *pandas* notwendig, um csv. Tabellen zu verarbeiten. In einem ersten Schritt werden die Tabellen TmpU und TmpE eingelesen mit:

```

UTemp = pandas.read_csv("TmpU.csv", delimiter=';', index_col = 1)
ETemp = pandas.read_csv("TmpE.csv", delimiter=';', index_col = 0)

```

Tabelle TmpU entspricht der Tabelle 22. Je nach Klimaszenario und Verlegetiefe werden die Bodentemperaturen über die BodenID der Tabelle und der BodenID im Routen-Datensatz den jeweiligen Rohrleitungsabschnitten zugeordnet. Dies geschieht mithilfe der IF-ELSE (*if-elif*) Abfrage. Bei übereinstimmender ID wird der jeweilige Temperaturwert über die Befehle *cursor* und *row.set.value* in die Attributtabelle der Routentabelle (fc1) übertragen.

Tabelle TmpE entspricht Tabelle 19. Der Wert TmpE wird ebenfalls über die ID den Einspeisestellen zugeordnet. Die einzelne Einspeise-ID entspricht der FacilityID der Attributtabelle, welche den Namen der jeweiligen Einspeisestellen beinhaltet. Temperaturwerte werden über diese Tabelle wie im Fall der Bodentemperatur über die IF-ELSE Abfrage ausgewählt und den einzelnen Einspeisestellen zugeordnet.

Für beide Tabellen entsprechen die Temperaturen des Szenarios KD dem Durchschnittsklima (2021) während das Szenario KH mit Werten aus 2022 berechnet wird, um ein Hitzejahr zu simulieren. Für KK (Klima-Klimawandel) wurde eine Erhöhung um 1°C gegenüber dem Jahr 2022 angenommen, wie in Kapitel 3 näher besprochen. Somit können drei verschiedene Klimaszenarien in das Modell einbezogen werden. Bei Bedarf ist es möglich die beiden Tabellen TmpU und TmpE um weitere Szenarien zu erweitern.

Im Skript wird über den Ausdruck „DatumE“ für TmpE und „DatumU“ für TmpU angegeben, welches Klimaszenario aus Tabelle 19 und Tabelle 22 gewählt wird:

```
DatumU = "KD_100"  
DatumE = "KD "
```

Die Unterscheidung in der Datumsbezeichnung ist notwendig, um neben dem Klimaszenario im Fall der Variable TmpU die Verlegetiefe 100 cm oder 120 cm mit einzubeziehen, da sich die Bodentemperatur beider Tiefen unterscheidet. Je nach Klimaszenario wird über den Spaltennamen das Klimaszenario und für TmpU zusätzlich die Verlegetiefe angesprochen. Jeder Einspeise-ID bzw. BodenID wird eine individuelle Temperatur für das gewählte Szenario zugeordnet. In einem zweiten Schritt werden diese Werte erneut über die Befehle *cursor* und *row.set.value* in die Attributtabelle der Routentabelle (fc1) übertragen. Anzumerken ist, dass das Skript jede einzelne Zeile der Attributtabelle nacheinander abarbeitet und die Temperaturen in die entsprechenden Zeilen TmpE und TmpU einfügt.

Bis auf die Fließgeschwindigkeiten sind alle weiteren Variablen der Formel 7 konstant, wie die Rohrlänge oder die oben angesprochenen gemittelten U-Werte. Die Fließgeschwindigkeit wird über das Hauptskript (Skript 5) in das Modell mit einbezogen (VM\_A bis VM\_E).

### 8.3 Temperaturberechnung in arcpy

Das Hauptskript (Skript 5) verläuft analog zu Skript 2, bei dem Variablen einzelner Rohrleitungsabschnitte lagebezogen anhand einer Route gewählt werden, die von der Route überlagert werden. Hierbei werden alle notwendigen Variablen aus der Rohrleitungstabelle (fc1) in dem Skript angesprochen. Anzumerken ist, dass aus dem Rohrdurchmesser innerhalb dieser Auswahl ebenfalls ein mit der Strecke gewichtetes Mittel (DM\_AM) gebildet wird.

Nach der Auswahl aller notwendigen Variablen wird für jede Route die Formel 7 angewendet und das Ergebnis wird in die Spalte TmpEnde der Routentabelle eingefügt. Für jede Route ergibt sich dadurch eine Endtemperatur.

Der relevante Abschnitt des Skriptes der die Formel 7 beinhaltet ist:

```
T2 = TmpU + ((TmpE - TmpU) * math.exp((( -math.pi) * (DM_AM / 1000) * u * TotalLen) / (c * m)))
```

Aufgrund der Bearbeitung nach einzelnen Routen innerhalb der Attributtabelle sind diese Schritte im GIS entsprechend zeitintensiv, jedoch kann das Modell jederzeit pausiert bzw. gestoppt werden. Für den erneuten Start muss im Skript die Nummer der neuen Startzeile angepasst werden. Dies kann in allen Skripten über den Ausdruck *for i in range (x,y)*: erfolgen. Hierbei gibt x die Startzeile und y die Endzeile an.

Schlussendlich wird für jeden Punkt im Netz eine Temperatur (T2) auf Basis der verwendeten Modellparametern errechnet. Diese Endtemperatur (TmpEnde) jeder einzelnen Route befindet sich nun in der Attributtabelle fc1. Dadurch kann die errechnete Endtemperatur für jeden Punkt im Netz über das GIS graphisch dargestellt werden. Zudem bietet die Attributtabelle die Möglichkeit die weiteren Eingangsparameter wie die TmpE und TmpU jeder Route direkt mit der errechneten Endtemperatur zu vergleichen.

```

arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc1,"CLEAR_SELECTION")
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc2,"CLEAR_SELECTION")
fc1_cnt = int(arcpy.management.GetCount(fc1).getOutput(0))

for i in range(0,137737):
    currRoute=arcpy.SelectLayerByAttribute_management(fc1, "NEW_SELECTION", "FID=" + str(i))
    arcpy.SelectLayerByLocation_management(fc2, "INTERSECT", fc1, 0, "NEW_SELECTION", "NOT_INVERT")
    fc2_cnt = int(arcpy.management.GetCount(fc2).getOutput(0))
    cursor = arcpy.SearchCursor(fc2)
    sum = 0
    dmsum = 0
    RORLsum = 0
    for row in cursor:
        val=row.getValue("VM_A")
        sum = sum+float(val)
        val=(row.getValue("DM"))*(row.getValue("RORL"))
        dmsum = dmsum+float(val)
        val=row.getValue("RORL")
        RORLsum = RORLsum+float(val)
    if RORLsum == 0:
        DM_AM = 200
    else:
        DM_AM = dmsum/RORLsum
    if sum == 0:
        V = 0.0025
    else:
        V = sum/fc2_cnt
    cursor = arcpy.SearchCursor(fc1)
    TotalLen = 0
    TmpE = 0
    TmpU = 0
    c = 4.19
    p = 997
    for row in cursor:
        TotalLen = row.getValue("Total_Län")
        TmpE = row.getValue("TmpE")
        TmpU = row.getValue("TmpU")
        u = row.getValue("u")
    R =0.5*float(DM_AM)
    A=(math.pi)*(R**2)
    m=p*V*A
    T2=TmpU+((TmpE-TmpU)*math.exp((-math.pi)*(DM_AM/1000)*u*TotalLen)/(c*m))
    cursor = arcpy.UpdateCursor(currRoute)
    for row in cursor:
        row.setValue("VM", V)
        row.setValue("DM", DM_AM)
        row.setValue("TmpEnde", T2)
    cursor.updateRow(row)

```

## 9 Herausforderung bei der Modellierung

Bei der Modellierung der Trinkwassertemperatur in dem komplexen Versorgungssystem einer Großstadt treten einige Herausforderungen auf. So ist vor allem die Datenlage ein Problem, da ein Trinkwasserversorgungsunternehmen im Normalbetrieb nicht alle notwendigen Informationen erfasst, welche für das Modell notwendig sind. Zusätzliche Daten sind auch aufgrund der Größe des Versorgungsgebietes schwer zu ermitteln, wie etwa die Bodentemperatur. Außerdem muss die Limitierung innerhalb des Modells in der ArcGIS Umgebung berücksichtigt werden.

### 9.1 Statisches Modell

Grundsätzlich ist bei der Interpretation der Modellergebnisse zu berücksichtigen, dass hier ein statisches Modell entwickelt wurde, welches nur einen ausgewählten Zeitpunkt abbildet. Bei den auf Basis verschiedener Betriebsszenarien errechneten Modelldurchläufen handelt es sich um Durchschnittswerte bekannter Situationen im Netz. In der Realität ändern sich die Fließgeschwindigkeiten, Fließrichtungen und Einspeisestellen dynamisch in Abhängigkeit von dem Verbrauch innerhalb eines Tages.

Neben den hier betrachteten Durchschnittswerten kann auch ein ausgewählter Zeitpunkt mit tatsächlichen Netzparametern berechnet werden, um das Modell beispielsweise mit Temperaturmessungen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Netz zu validieren. Hierfür muss jeweils eine neue Routentabelle mit den Fließgeschwindigkeiten zu dem jeweiligen Zeitpunkt erstellt werden, was eine zeitintensive Vorbereitung der Datensätze voraussetzt, da dieser Schritt nicht automatisiert wurde.

Eine Dynamisierung des Modells ist aufgrund der verwendeten Programme und der Datengrundlage in diesem Projektumfang nicht zu realisieren. Vor allem die Berechnung über Python innerhalb von ArcGIS ist für ein derart großes Versorgungsgebiet nicht optimal. Außerdem werden über Python die Rechenschritte jeder einzelnen Route nacheinander durchgeführt. Aufgrund der Größe des Versorgungsgebietes ergibt sich daraus eine große Anzahl an zu verarbeitenden Daten. Dies führt zu einem erheblichen Ressourcen- und Zeitaufwand bei der Berechnung.

Aufgrund der zeitintensiven Vorbereitung der Datensätze und der langen Berechnungszeit des finalen Modelldurchlaufs, konnte nur eine begrenzte Anzahl an Modelldurchläufen für das Versorgungsgebiet durchgeführt werden, ohne den zeitlichen Rahmen des Projektes zu sprengen. Für kleinere Versorgungsgebiete, im besten Fall mit nur einer oder zwei Einspeisestellen, ist die Anwendung des Modells praktikabler als im Fall einer Großstadt, sodass auch eine größere Zahl an Betriebszuständen hinsichtlich des Verbrauchs und der Fließgeschwindigkeit berechnet werden kann.

### 9.2 Datenlage und Ungenauigkeiten

Ein wichtiger Punkt, der die Genauigkeit eines Modells bestimmt, ist die Datenlage im Untersuchungsgebiet. In Abbildung 42 sind die fehlenden oder unvollständigen Daten schematisch dargestellt. Auch wenn eine gute Digitalisierung des Netzes im Versorgungsgebiet besteht, werden von einem Trinkwasserversorgungsunternehmen nicht alle für das Modell notwendigen Informationen erfasst. Eine nachträgliche Ermittlung dieser Informationen ist nicht immer möglich. Dies betrifft

beispielsweise die spezifische Wärmeleitfähigkeit sowie Wanddicke der Rohrleitungsabschnitte, insbesondere wenn es sich um alte Rohrleitungen handelt und keine Informationen zu den Herstellern vorliegen. Eine künftige Dokumentation dieser Informationen aus den Herstellerangaben der verwendeten Materialien ist für die Genauigkeit des Modells hilfreich.

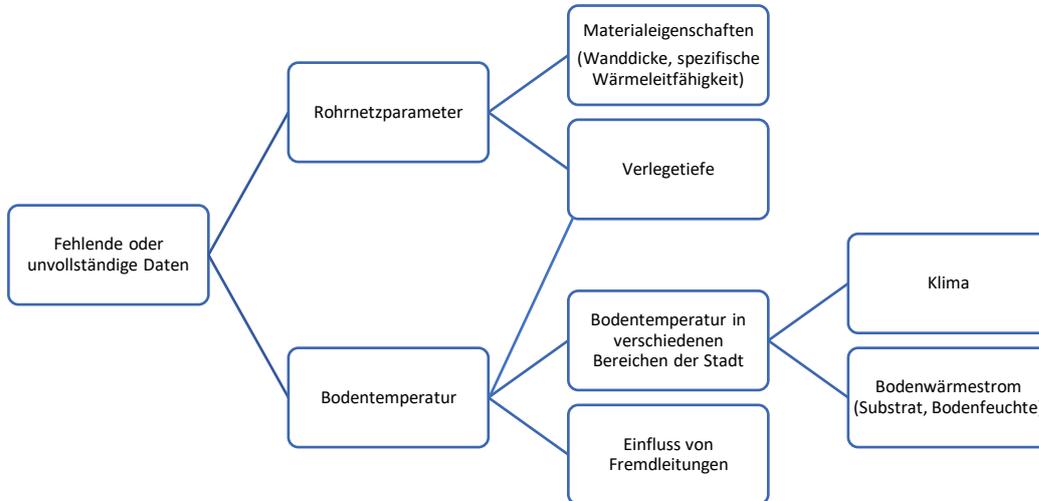


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Datenproblematik

Ein weiterer Rohrleitungsparameter, welcher aufgrund des Alters des Netzes nur für neu verlegte Rohrleitungsabschnitte und somit nur für einen kleinen Teil des Netzes erfasst worden ist, ist die Verlegetiefe. Diese ist notwendig, um die Bodentemperatur in dieser Tiefe dem Leitungsabschnitt als Umgebungstemperatur zuordnen zu können.

Grundsätzlich ist der Vergleich zwischen der Berechnung mit 100 und 120 cm Verlegetiefe eine gute Möglichkeit, um die Auswirkung der Verlegetiefe auf die Temperatur im Leitungsnetz zu untersuchen und entsprechende Maßnahmen zu entwickeln. In der Realität können auch einige Leitungen tiefer oder flacher verlegt worden sein. Für eine genaue Berechnung der Endtemperatur in der Leitung ist die Kenntnis der tatsächlichen Verlegetiefe im gesamten Leitungsnetz notwendig, da sich die Umgebungstemperatur im Modell aus der Bodentemperatur in der jeweiligen Verlegetiefe ergibt. Bereits wenige Zentimeter Verlegetiefe bedeuten eine Änderung in dem Parameter Umgebungstemperatur.

Die Bodentemperatur selbst ist ein großer Unsicherheitsfaktor. So ändert sich die Bodentemperatur kleinräumig, wie in Kapitel 4 dargestellt, je nach Standort in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit, Beschattung und der Stadtklimatologie. Außerdem müssen lokale Einflussfaktoren wie Fremdleitungen mit einbezogen werden.

Insgesamt ist die Datenlage hinsichtlich der Bodentemperatur im Untersuchungsgebiet nicht ausreichend, um eine statistisch signifikante Auswertung der Temperatur durchzuführen. Für die Studie liegen lediglich fünf eigens für das Projekt installierte Messstellen für eine vereinfachte Auswertung der Bodentemperatur vor.

So wurde für das Modell eine vereinfachte Auswertung vorhandener Bodentemperaturmessungen mit räumlichen Informationen zur Oberflächentemperatur verwendet. Kleinräumige

Temperaturunterschiede zwischen einzelnen Standorten konnten in dem komplexen Untersuchungsgebiet einer Großstadt nicht einbezogen werden. Auch bestehen Unsicherheiten bezüglich des Fremdleitungseinflusses, da hier eine geringe Informations- und Datenlage besteht und nur mit Temperaturbereichen gearbeitet werden konnte.

Die Installation einer geeigneten Anzahl an Messstellen an repräsentativen Standorten im gesamten Stadtgebiet und insbesondere im Bereich von Fremdleitungen war in dem Projektzeitraum nicht realisierbar. Insbesondere Straßenflächen müssen mit Datenloggern ausgestattet werden, um die Bodentemperatur unter Asphalt und im Bereich von Fremdleitungen zu untersuchen. Im Hinblick auf Fremdleitungen sollten dabei verschiedene Einflussfaktoren wie Starkstrom, Nah- und Fernwärme aber auch das Abwasser- und Gasnetz im Detail überprüft werden. Hinsichtlich der Messung bestehen allerdings in der Praxis mehrere Probleme bei der Umsetzung. Vor allem die Wartung und das Auslesen der Logger, sowie die Stromversorgung müssen gewährleistet sein.

Da die Straßengräben nach Angaben des Versorgungsunternehmens mit Verfüllsand homogen verfüllt und verdichtet sind, ist von einer gleichförmigen Temperaturübertragung im Boden auszugehen. Bisher nicht in das Modell einbezogen wurde in diesem Zusammenhang der Grundwassereinfluss bzw. die Bodenfeuchte. Neben fehlenden in-situ Messungen stellt auch die Verlegetiefe ein Problem dar.

Aufgrund der fehlenden Information zur Verlegetiefe kann der Abstand der Leitung zu den Grundwasserständen nicht ermittelt werden, um auszuschließen, dass die jeweiligen Leitungen sich in einem Grundwasserbeeinflussten Bereich befinden. Insgesamt sind keine nutzbaren Daten zu der tatsächlichen Bodenfeuchte im Leitungsbereich bekannt. Dies ist problematisch, da der Faktor Bodenfeuchte für die Temperaturübertragung im Boden wichtig ist.

Wärmebewegungen im Boden werden durch Wärmeleitung und Konvektion hervorgerufen, wobei in einem nicht wassergesättigten Boden der Wasserdampftransport als Wärmetransportmechanismus eine erhebliche Rolle spielt (Scheffer & Schachtschabel, 2002, S. 257). Da Wasser eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Luft besitzt, weist ein feuchter Boden folglich eine höhere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu trockenem Boden auf. Für Trinkwasserleitungen in einem feuchten Boden muss daher von einer schnelleren Wärmeübertragung im Vergleich zum trockenen Boden ausgegangen werden. Da jedoch für die Trinkwassertemperatur lang andauernde Strahlungswetterlagen mit hoher Lufttemperatur ausschlaggebend sind, ist in den relevanten Zeiträumen im Sommer von einem trockenen Zustand des Bodens auszugehen. Ein Einbezug der Bodenfeuchte ist zur Erhöhung der Genauigkeit des Modells jedoch sinnvoll, wenn entsprechende Daten erhoben werden können.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor besteht bei der Festlegung der Temperaturwerte für die einzelnen Klimaszenarien. Nicht nur bei der Bodentemperatur, sondern auch im Fall der Eingangstemperatur können als Klimaszenario lediglich Annahmen auf Basis der vorliegenden Daten getroffen werden. So ist im Fall der Eingangstemperatur auch die Entfernung zu den Gewinnungsgebieten sowie das gebäudespezifische Verhalten der Temperatur zu berücksichtigen. Sowohl für die Eingangstemperatur als auch für die Bodentemperatur müssen somit einige Unsicherheiten berücksichtigt werden, die jedoch hauptsächlich durch eine Verbesserung der Datenlage minimiert werden können.

Um die Problematik der geringen Datenlage betreffend die Bodentemperatur zu umgehen, ist die Einteilung des Bodens in Temperaturklassen verwendet worden. Für die modellierten Trinkwassertemperaturen bedeutet dies allerdings, dass die angesprochenen Ungenauigkeiten bei den Ergebnissen berücksichtigt werden müssen. Kleinräumige Unterschiede im Temperaturverhalten können in dem großräumigen Stadtgebiet somit nicht abgebildet werden.

Mit einem gezielten Ausbau von Bodentemperaturmessungen, insbesondere unter verschiedenen Asphaltflächen und im Fremdleitungseinfluss, erhöht sich die Genauigkeit im Modell. Außerdem ist eine Kombination mehrerer Modelle anzustreben, um ausgehend von den meteorologischen Daten die Bodentemperatur in unterschiedlichen Bereichen des Versorgungsgebietes zu ermitteln. Nachfolgend wird darauf genauer eingegangen.

### 9.3 Einbezug weiterer Modelle

Um das Trinkwassertemperaturmodell hinsichtlich der Bodentemperatur zu verbessern, ist eine Kombination des Modells mit weiteren Temperaturmodellen sinnvoll. So können auch die angesprochenen Herausforderungen und Ungenauigkeiten minimiert werden. In Abbildung 43 ist ein konzeptioneller Ansatz dargestellt, wie verschiedene Modelle und die daraus errechneten Daten verbunden werden können, um die Datenlage im Trinkwassertemperaturmodell zu verbessern.

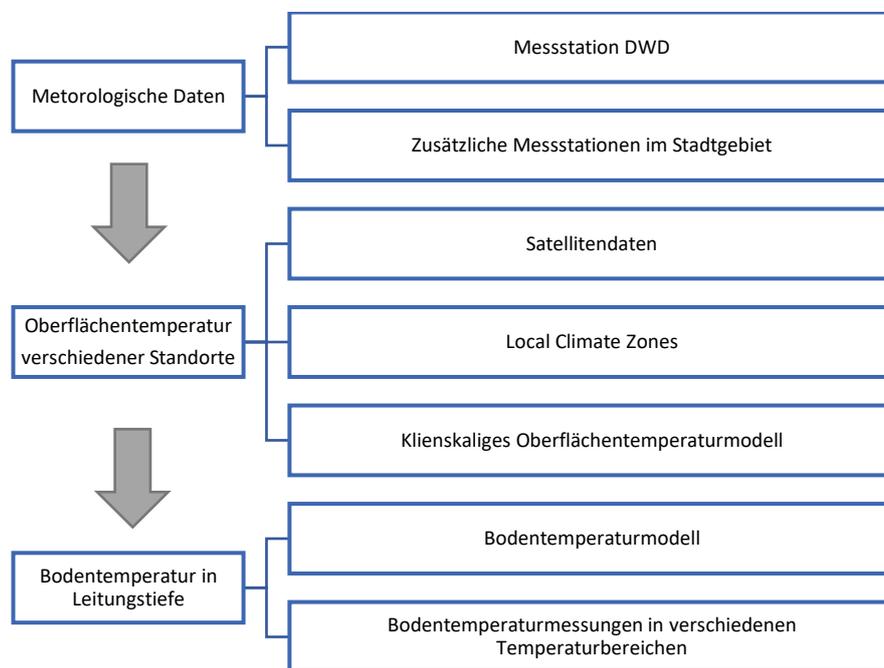


Abbildung 43: Konzeptionelle Darstellung der Kombination verschiedener Modelle zur Verbesserung der Datenlage

Insbesondere um verschiedene Klimaszenarien und deren Auswirkung auf die Trinkwassertemperatur zu betrachten, ist es praktikabel das gesamte Modell über meteorologische Daten als Eingangsparameter zu betreiben, da diese einfach zu erfassen sind. Außerdem können dadurch nicht nur offizielle Messstellen des DWD, sondern auch weitere lokale Messstationen im Untersuchungsgebiet als Datenquelle herangezogen werden. Über ein Netzwerk aus lokalen Klimastationen in verschiedenen Stadtteilen wie etwa in der Innenstadt oder in stark versiegelten Industriegebieten,

aus denen die Bodentemperatur errechnet wird, kann somit die Datenlage im Trinkwassertemperaturmodell verbessert werden. Dies bietet auch den Vorteil bekannte, temperaturkritische Bereiche im Stadtgebiet im Detail und zu ausgewählten Klimaszenarien zu untersuchen.

Zur Ermittlung der Oberflächentemperatur ist eine Kombination verschiedener Datenquellen sinnvoll, um das Untersuchungsgebiet in Temperaturbereiche zu unterteilen. Eine detaillierte Berechnung kann über kleinskalige Oberflächentemperaturmodelle durchgeführt werden. Sofern nicht das gesamte Untersuchungsgebiet modelliert werden kann, ist auch eine Modellierung einzelner Temperaturbereiche vorstellbar. So können Temperaturen einzelner repräsentativer Bereiche der Stadt modelliert werden, die anschließend auf das gesamte Untersuchungsgebiet, beispielsweise mithilfe der LCZs, übertragen werden. Wichtig dabei ist es alle Modelle, die zur Oberflächentemperatur entwickelt werden über Messungen der Oberflächentemperatur an verschiedenen signifikanten Standorten im Untersuchungsgebiet zu überprüfen.

Ausgehend von der Oberflächentemperatur ist eine Berechnung der Bodentemperatur in verschiedenen Leitungstiefen mithilfe eines Bodentemperaturmodells praktikabel. So können Temperaturwerte in einzelnen Tiefen und unter Annahme verschiedener Klimaszenarien errechnet werden. Eine detaillierte Berechnung der Wärmeübertragung im Boden ausgehend von der Oberflächentemperatur und unter Einbezug der Dichte und der spezifischen Wärme ist in den sehr homogenen Straßengräben gut realisierbar. Basierend auf den Angaben des Versorgungsunternehmens handelt es sich im Straßengraben um ein einheitliches Substrat aus Verfüllsand, sodass von einem gleichförmigen Temperaturverhalten ausgegangen werden kann. Wichtig dabei ist eine Validierung der errechneten Temperaturen mithilfe einer statistisch signifikanten Anzahl an in-situ Messungen.

## 10 Validierung des Trinkwassertemperaturmodells

Um die Validität des Modells und dessen Übertragbarkeit auf reale Bedingungen im Netz zu überprüfen, muss das Modell mithilfe von Messungen im Netz validiert werden. Die Schwierigkeit besteht zum einen darin geeignete Messpunkte zu wählen, welche das Versorgungsgebiet gut repräsentieren. Zum anderen muss das Modell mit einem Betriebszustand berechnet werden, welcher den Zeitpunkt der Messung im Netz abbildet.

Dabei ist es wichtig die Temperaturmessungen im Netz in einem möglichst kurzen Zeitraum durchzuführen, da sich die Fließbedingungen im Netz schnell ändern. Charakteristischerweise treten die höchsten Fließgeschwindigkeiten vormittags aufgrund einer hoher Abnahme auf, wohingegen am frühen Nachmittag eine eher durchschnittliche Fließgeschwindigkeit im Netz zu finden ist. Innerhalb einer kurzen Zeit müssen jedoch Messstellen im gesamten Stadtgebiet händisch beprobt werden, um verschiedene Standorte im Untersuchungsgebiet zu einer vergleichbaren Fließgeschwindigkeit abzubilden. Hierbei zeigen sich erneut die Herausforderungen, welche bei der Modellierung der Trinkwassertemperatur in einer Großstadt bestehen. Derartige Messkampagnen können in einem kleineren Versorgungsgebiet besser realisiert werden.

Hinsichtlich der Trinkwassertemperaturmessungen ergeben sich außerdem einige Ungenauigkeiten, die berücksichtigt werden müssen. Teilweise unterscheiden sich Messgeräte und Messmethoden, sodass bei einem direkten Vergleich der Ergebnisse verschiedener Messungen von Abweichungen auszugehen ist. Insbesondere bei händischen Messungen ist dies der Fall. Wie in Kapitel 5.2.4 ausgeführt, muss zwischen der Temperatur in Kundenanlagen und dem Rohrnetz unterschieden werden, da sich zwischen dem Rohrnetz und der Messstelle an einer Armatur innerhalb einer Kundenanlage bereits eine Temperaturänderung vollzieht.

Probleme bei der Validierung ergeben sich auch durch sich ändernde Betriebsbedingungen, Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen. Die genaue Fließrichtung kann im Vorfeld der händischen Messungen an Hydranten im Netz nicht immer ermittelt werden, da sie unmittelbar von der Abnahme im Netz beeinflusst wird. So wurden beispielsweise mehrere Messungen an Hydranten zu verschiedenen Zeitpunkten in signifikanten Bereichen geplant. Bei der Überprüfung der Fließrichtung durch die Rohrnetzberechnung anhand der tatsächlichen Verbrauchsdaten des Messtages wurde im Nachgang allerdings festgestellt, dass einige der Messstellen nicht verwendet werden können. Grund hierfür ist, dass sich eine Fließrichtungsänderung an diesem Rohrabschnitt ergeben hat und die Messergebnisse somit nicht zur geplanten Überprüfung einer gewählten Fließstrecke nutzbar waren. Dies ist im Zusammenhang mit den händischen Messungen an Hydranten grundsätzlich zu berücksichtigen.

Für die Validierung der Modellergebnisse wurden händische Messungen in Kundenanlagen und an Hydranten verwendet. Kontinuierliche Temperaturmessungen an Hauswasserzählern wurden aufgrund der bekannten Ungenauigkeit nicht herangezogen. Allerdings ist auch mithilfe von händischen Messungen eine exakte – auf die Nachkommastelle genaue – Übereinstimmung zwischen der Messung und dem Modell, aufgrund der angesprochenen Unsicherheiten sowohl im Modell (Kapitel

9.2), als auch im Fall händischer Messungen nicht realisierbar. Dennoch kann die errechnete räumliche Temperaturverteilung des Modells mit Temperaturmessungen im Netz überprüft werden.

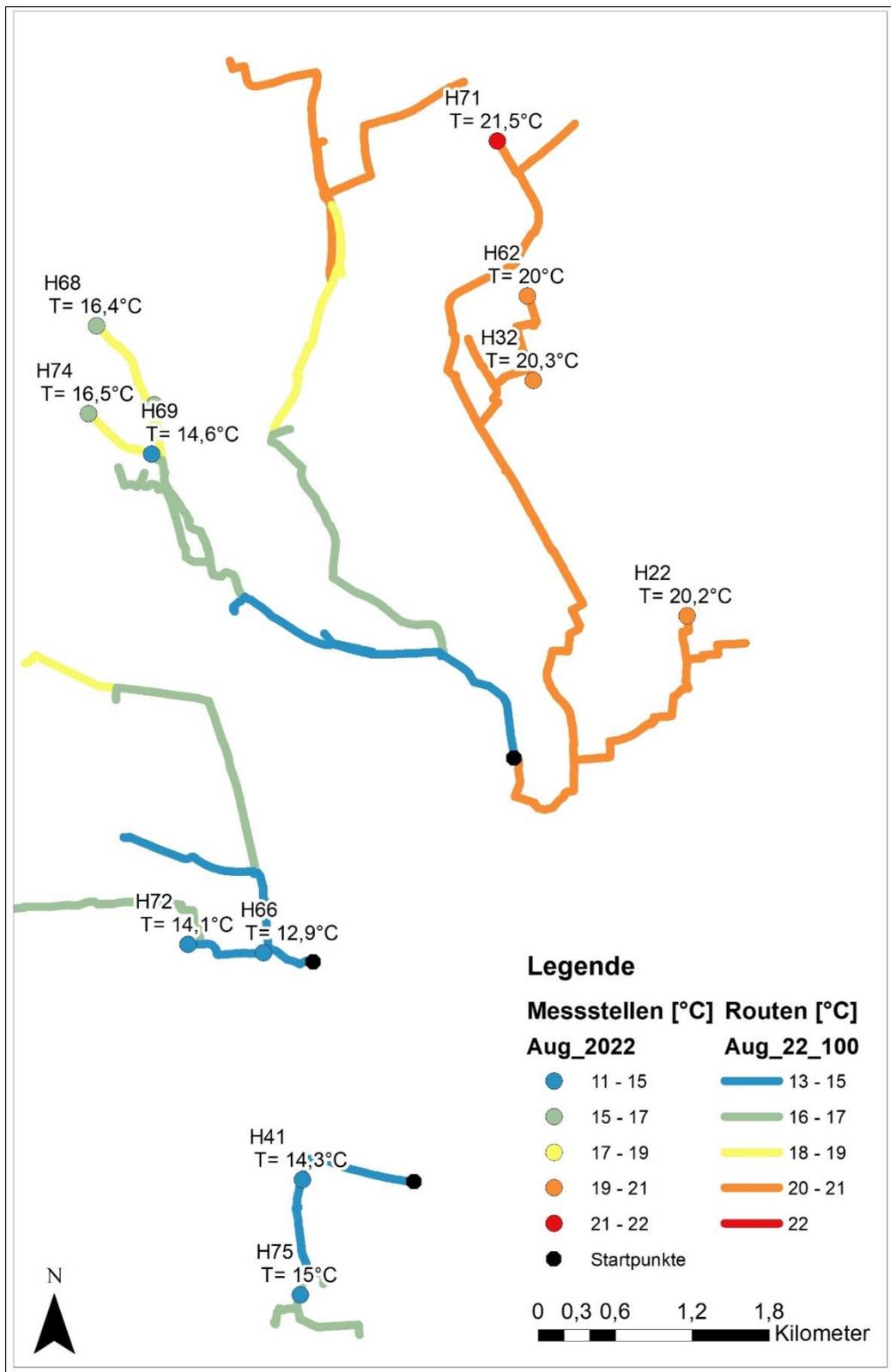


Abbildung 44: Modellierter Temperatur 100 cm und Messung im Vergleich für August 2022

Berechnet wurden Modelle mit den Boden- und Einspeisetemperaturen der Messzeitpunkte und der Fließgeschwindigkeit von Betriebszustand A (Spitzenstunde/Durchschnittstag). Dieser Betriebszustand kann für den Zeitpunkt der Messungen (Uhrzeit/Tag) als wahrscheinlich angenommen werden, da die meisten Messungen vormittags stattfanden. Als Verlegetiefe wurde die Tiefe von 100 cm für das gesamte Modellgebiet festgelegt. Zur Veranschaulichung sind die Modell- und Messergebnisse von Messtag 1 und Messtag 2 in Tabelle 23 und Tabelle 24 aufgelistet. In Abbildung 44 sind die Messrouten für Modelltag 1 abgebildet. Aufgrund der graphischen Darstellung ist zu berücksichtigen, dass sich die Linientemperatur auf das Liniende bezieht. Die Startpunkte der einzelnen Linien sind entsprechend kühler. Zum besseren Vergleich mit den gemessenen Hydranten (Punkt) wurde diese Darstellungsform gewählt.

Anzumerken ist, dass es sich bei der Validierung von Messtag 1 ausschließlich um Hydrantenmessungen (H) handelt, während bei Modelltag 2 eine Kombination aus Kundenanlagen (K) und Hydranten einbezogen wurde. Dabei sind die Kundenanlagen als höher temperiert einzuschätzen.

*Tabelle 23: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte Modelltag 1, nach Temperaturhöhe farblich unterteilt (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1])*

Messstelle	Gemessen [°C]	Modell [°C]	Dif [°C]
H 71	21.5	21	0.5
H 31	21.2	21.98	-0.78
H 67	21.1	21.93	-0.83
H 27	20.7	19.2	1.5
H 32	20.3	20.15	0.15
H 22	20.2	19.21	0.99
H 62	20	20.7	-0.7
H 73	19.9	21.96	-2.06
H 26	18.9	18.48	0.42
H 33	16.7	23.17	-6.47
H 74	16.5	17.57	-1.07
H 68	16.4	18.71	-2.31
H 70	15.9	15.34	0.56
H 63	15.3	17.22	-1.92
H 75	15	16.85	-1.85
H 69	14.6	16.63	-2.03
H 41	14.3	14.16	0.14
H 72	14.1	13.69	0.41
H 66	12.9	13.37	-0.47

Für die Hydrantenmessungen an Messtag 1 ist für 11 der 19 Messungen eine Temperatur berechnet worden, welche eine Differenz von weniger als 1°C aufweist (Tabelle 23). Eine größere Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur besteht an Messtag 2. Hier wiesen von 22 Messstellen nur neun eine Differenz von < 1°C zwischen Messung und Modell auf. 13 Messstellen wurden deutlich über bzw. unterschätzt. Dabei handelt es sich in sieben Fällen um Kundenanlagen, bei denen grundsätzlich von einer Temperaturdifferenz zwischen Rohrnetz und Zähler ausgegangen werden muss (Kapitel 5.2.4).

Im Allgemeinen ist anhand der Ergebnisse eine gute Repräsentation der Realität durch das Modell anzunehmen. Größere Ungenauigkeiten bestehen unter anderem im Innenstadtbereich, da hier auch eine große Variabilität der Fließbedingungen bekannt ist. Teilweise Überlap-

pen sich Bereiche, die durch verschiedene Einspeisestellen versorgt werden. Es kommt zu einer Mischung verschieden temperierter Wässer.

Hinzu kommt, dass vor allem ältere Leitungen – wie auch im Innenstadtbereich – tiefer als 100 cm verlegt worden sind. Die zur Validierung verwendeten Modellparameter basieren auf einer

Bodentemperatur in einer Tiefe von 100 cm. Da bei älteren Leitungen jedoch von 120 cm Tiefe ausgegangen werden muss, resultiert daraus eine Überschätzung der Bodentemperatur in dem Modell. In der Realität ist von niedrigeren Boden- und somit Wassertemperaturen auszugehen. Dies ist im Fall der niedrigen Temperaturen aus den Hydrantenmessungen H63, H68, H69 und H74 eine mögliche Begründung.

Weitere Ungenauigkeiten im Modell treten in der Druckzone Süd auf, da hier je nach Betriebszustand unterschiedliche Einspeise- und Fließbedingungen bestehen. Im Zusammenhang mit den Einspeisestellen fällt der Ausreißer an Messstelle H33 besonders auf. Hier überschätzt das Modell die Trinkwassertemperatur deutlich. Aufgrund dessen, dass sich dieser Hydrant in der Nähe des Hochbehälters befindet, ist möglicherweise eine höhere Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Messung aufgetreten. In der Modellberechnung ist eine längere Verweilzeit in der Leitung angenommen worden als es wahrscheinlich in der Realität der Fall ist, sodass sich eine große Temperaturdifferenz

Tabelle 24: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte Modelltag 2 (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1])

Messstelle	Gemessen [°C]	Modell [°C]	Dif [°C]
K 59	19.8	18.49	1.31
K 61	18.9	18.5	0.4
K 53	18.5	14.98	3.52
K 55	18	18.49	-0.49
K 46	18	18.45	-0.45
K 52	17.7	17.28	0.42
K 48	17.6	17.8	-0.2
K 56	17.1	18.5	-1.4
K 44	16.1	18.49	-2.39
K 51	15.8	16.9	-1.1
H 40	15.8	14.24	1.56
H 42	15.3	16.6	-1.3
H 9	15.2	16.61	-1.41
K 50	14.7	18.49	-3.79
K 49	14.7	15.53	-0.83
H 10	14.6	15.22	-0.62
H 39	14.3	17.44	-3.14
H 36	14.2	16.23	-2.03
H 37	13.8	16.46	-2.66
H 41	13.2	13.65	-0.45
H 0	13.1	14.19	-1.09
H 38	13	13.08	-0.08

bildet. Dies verdeutlicht erneut welche große Bedeutung die Fließgeschwindigkeit als Einflussfaktor einnimmt.

beider Daten im Vergleich ergibt.

Eine Verbesserung einiger Ergebnisse konnte durch die Änderung der Betriebszustände (Fließgeschwindigkeit und Einspeisestellen) im Modell erreicht werden (Tabelle 24). Beispielsweise wird zu Betriebszustand Spitzenstunde/Durchschnittstag für Hydrant H40 mit 15,8°C (gemessener Wert) zu Messtag 2 eine Temperatur von 14,24°C errechnet. Bei Betriebszustand D „Durchschnittsstunde/Durchschnittstag“ wurde mit 15,33°C jedoch eine deutliche Verbesserung im Modell erreicht. Die Änderung des Betriebszustands führt bei anderen Messstellen hingegen zu einer Verschlechterung der Modellergebnisse im Vergleich zu den Messungen.

Möglicherweise entsprechen die Fließgeschwindigkeiten im Nahbereich einiger Messungen zu dem jeweiligen Zeitpunkt eher dem Betriebszustand A, während in anderen Bereichen eher niedrigere Fließgeschwindigkeiten auftraten, sodass Betriebszustand D hier eher die Situation ab-

Grundsätzlich lässt diese Validierung eine gute Repräsentation der Trinkwassertemperatur durch das Modell vermuten. Jedoch sind die richtigen Modellparameter für die Genauigkeit ausschlaggebend, wie eine Überprüfung der Modellergebnisse mit Messungen zu einem dritten Zeitpunkt zeigt. Zum dritten Messzeitpunkt konnte keine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung erreicht werden, da ein Großteil der errechneten Temperaturen deutlich über den Temperaturmessungen lag. Dies lässt vermuten, dass für diesen Tag von falschen Modellparametern hinsichtlich des Betriebszustands auszugehen ist.

Lediglich im Osten des Versorgungsgebietes bestand an diesem Messtag eine vergleichsweise gute Übereinstimmung der gemessenen mit der im Modell errechneten Temperatur. Im übrigen Versorgungsgebiet konnte auf Basis der verschiedenen Betriebszustände keine signifikante Übereinstimmung erreicht werden. Zum Zeitpunkt der Messung ist möglicherweise von einem Zustand der Fließgeschwindigkeit und -richtung auszugehen, der nicht über einen der überprüften Betriebszustände abgebildet werden konnte. Dadurch zeigt sich erneut die Bedeutung der Fließgeschwindigkeit und -richtung für die Genauigkeit des Modells.

Im Allgemeinen ist bei der Validierung der Ergebnisse zu betonen, dass grundsätzlich fehlerhafte Modellparameter für die ausgewählten Tage und auch Unsicherheiten bei den Messungen der Hydranten und der Kundenanlagen berücksichtigt werden müssen. Jedoch stimmen die räumlichen Muster der Temperaturverteilung sowohl im Modell als auch bei den Messungen größtenteils überein. Das Modell kann somit die räumliche Temperaturverteilung im Stadtgebiet abbilden. Lediglich im Innenstadtbereich sind größere Abweichungen der Ergebnisse festzustellen.

Über eine Verbesserung der Eingangsparameter und eine regelmäßige Validierung mit geeigneten Messungen kann die Genauigkeit der Modellergebnisse erhöht werden.

# 11 Ergebnisse der Temperaturmodellierung

Die Ergebnisse der Temperaturmodellierung im Netz sind hilfreich, um einige Fragestellungen zu beantworten, die für ein Versorgungsunternehmen relevant sind:

- Wie ist die Temperaturverteilung im Versorgungsgebiet und wo sind kritische Temperaturen zu erwarten?
- Wo sind höhere Temperaturen bei einer Klimaänderung zu erwarten?
- Welche Auswirkung hat die Verlegetiefe auf die Trinkwassertemperatur?
- Welche Auswirkung ist durch Fremdleitungen zu erwarten?

Die Temperaturverteilung im Versorgungsgebiet und deren Entwicklung unter Berücksichtigung der prognostizierten Klimaänderung ist dabei die zentrale Frage, um als Trinkwasserversorger rechtzeitig Maßnahmen ergreifen zu können. Die Untersuchung der Auswirkung von Verlegetiefe und Fremdleitungen ist zudem hilfreich, um Informationen zur Maßnahmenplanung zu liefern.

Zunächst soll der Einfluss der Fremdleitungen näher betrachtet werden. Im GIS können einzelne Rohrleitungsabschnitte den jeweiligen Stadtteilen zugeordnet werden, was eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse in größeren Bereichen des Versorgungssystems zulässt. Die Temperaturmittel der einzelnen Stadtteile können somit gegenübergestellt werden. Auch hinsichtlich geänderter Modellparameter wie im Fall von Fremdleitungseinflüssen können die Ergebnisse eines Stadtteils verglichen werden. Hierbei zeigt sich, dass Stadtteile im Mittel nur einen geringen Unterschied der Trinkwassertemperaturen bei einem Modelldurchlauf mit und einem Modelldurchlauf ohne Fremdleitungseinfluss aufweisen. Im Mittel über alle Stadtteile liegt die Temperatur mit Fremdleitungseinfluss lediglich  $0,12^{\circ}\text{C}$  über dem Modelldurchlauf ohne Fremdleitungseinfluss für das Beispiel KD bei 100 cm Verlegetiefe und Betriebszustand A.

Größere Temperaturzunahmen im Modell aufgrund der Fernwärme sind im direkten Vergleich einzelner Leitungsabschnitte mit und ohne Fremdleitungseinfluss festzustellen. Abbildung 45 zeigt einen Ausschnitt aus einem Modelldurchlauf ohne Fremdleitungseinfluss im Vergleich zu einem Modelldurchlauf mit Fremdleitungseinfluss in Abbildung 46. In diesem Modellausschnitt handelt es sich um eine Kombination aus Fernwärme und Starkstromleitungen. Eine lokale Temperaturzunahme der über langen Strecken parallel verlaufenden Abschnitte aus Trink- und Fremdleitung ist, insbesondere in Endsträngen, ersichtlich.

Wie bereits in Kapitel 5.2.3 nachgewiesen wurde, besteht ein Einfluss von hoch temperierten Fremdleitungen wie Fernwärme oder Starkstrom auf den umliegenden Boden. Befinden sich Trinkwasserleitungen über einen langen Streckenabschnitt im Bereich dieser Fremdleitungen oder sind Endstränge mit Stagnationsbereichen betroffen, erwärmt sich das Trinkwasser über die klimatisch bedingte Bodentemperatur hinaus. Für Leitungen in bereits höher temperierten Bereichen des Versorgungsgebietes ist dies besonders kritisch.

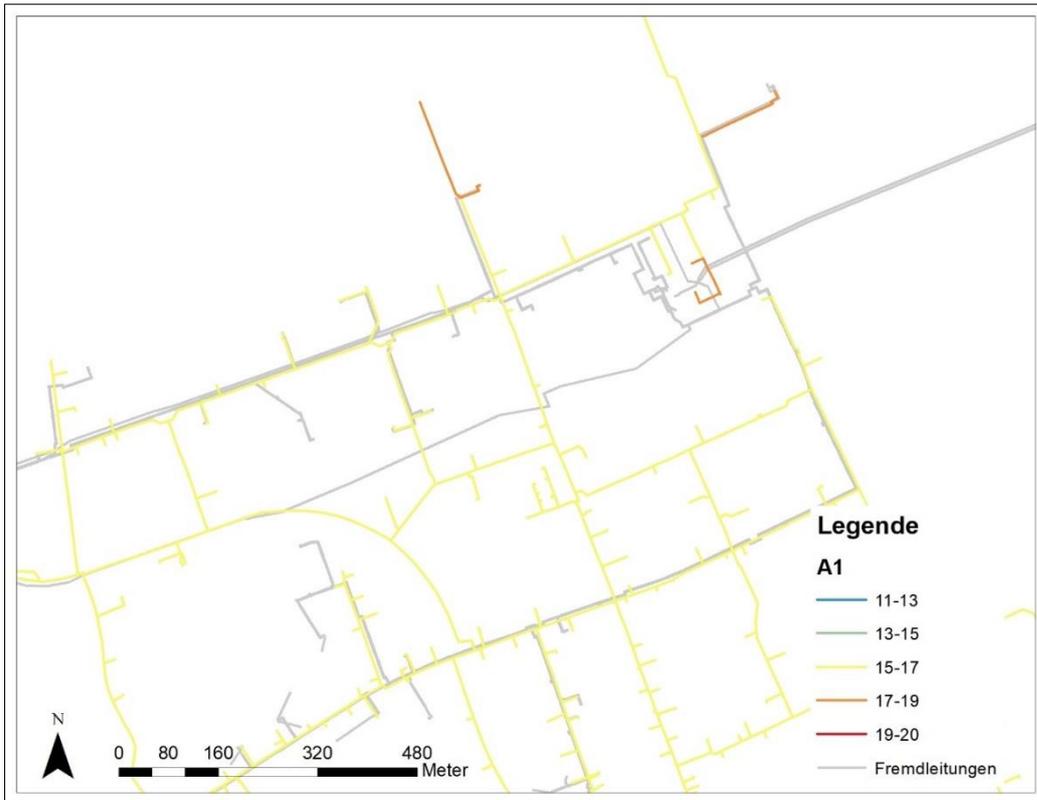


Abbildung 45: Ausschnitt aus einer Modellrechnung ohne Fremdleitungseinfluss (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

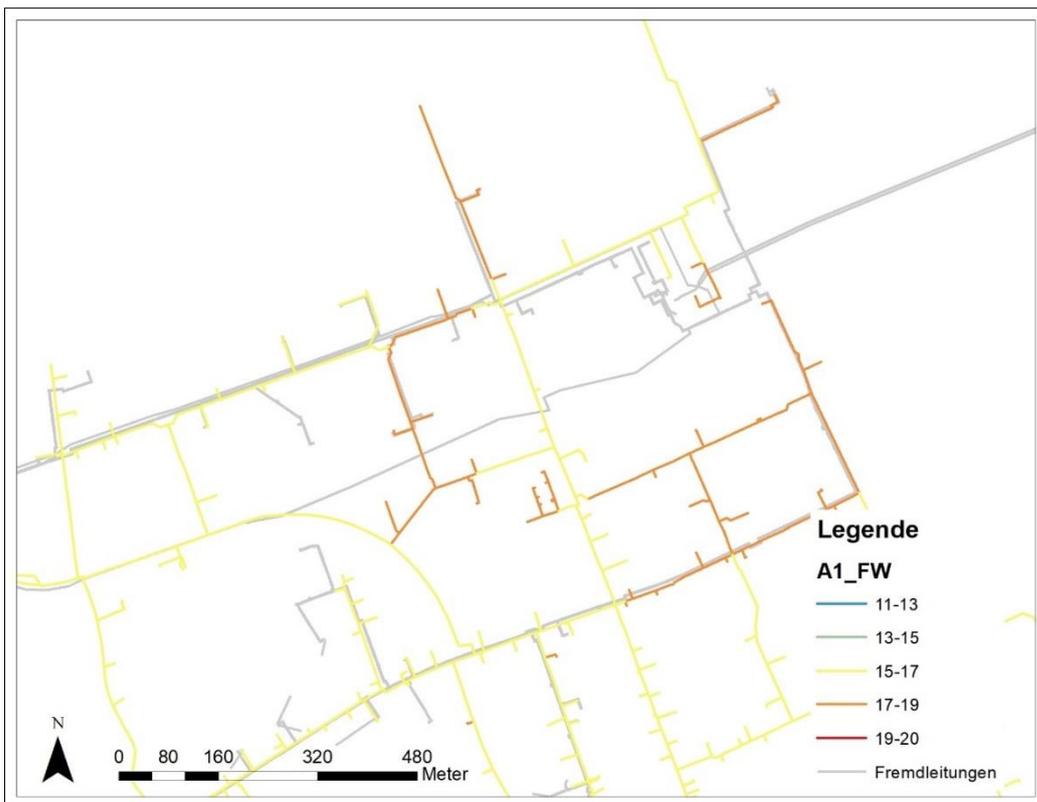


Abbildung 46: Ausschnitt aus einer Modellrechnung mit Fremdleitungseinfluss (Eigene Darstellung nach Daten der swa [1], 2023)

Der Einfluss der Fremdleitungen ist jedoch lokal begrenzt, da nur in der direkten Umgebung der Fremdleitung die Bodentemperatur erhöht wird. Nach Wegfall der Fremdleitungen sinkt die Bodentemperatur und die der Wassertemperatur in der Leitung kann maximal auf den Wert der unbeeinflussten Bodentemperatur ansteigen. Bei einem großflächigem Ausbau von Fremdleitungen im Nahbereich von Trinkwasserleitungen ist jedoch auch von einem großflächigen Einflussbereich der Fremdleitungen und somit von höheren bzw. von einem schnelleren Anstieg der Temperaturen in der Zukunft auszugehen.

Die Bedeutung der Bodentemperatur wird in einer direkten Gegenüberstellung der Endtemperaturen und Bodentemperaturen in Tabelle 25 dargestellt. Die Endtemperatur in dem Modell (TmpE) überschreitet die Umgebungstemperatur TmpU nicht, gleicht sich dieser allerdings an.

Außerdem sind in Tabelle 25 einige Leitungsabschnitte mit (A\_V1\_T2\_KD\_FW) und ohne Fremdleitungseinfluss (A\_V1\_T2\_KD) berechnet worden. Eine deutlicher ausgeprägte Temperaturerhöhung ist, wie im Fall von Rohrleitungsabschnitt Nr.1, vor allem in Bereichen mit lange parallel verlaufenden Leitungen oder Endsträngen errechnet worden. Leichte Temperaturerhöhungen lassen sich bei Leitungen mit nur kurzen Fremdleitungsabschnitten wie bei Nr. 4 und 5 feststellen. Auch hohe Fließgeschwindigkeiten und somit geringere Verweilzeiten in der Leitung können den geringen Unterschied zwischen beeinflusster und unbeeinflusster Ergebnisse verursachen.

Tabelle 25: Beispiel von Rohrleitungsabschnitten mit (A\_V1\_T2\_KD\_FW) und ohne (A\_V1\_T2\_KD) Fremdleitungseinfluss im Vergleich

Nr.	Länge [m]	TmpE [°C]	TmpU [°C] A_V1_T2_KD	TmpU [°C] A_V1_T2_KD_FW	V [m <sup>3</sup> /s]	U [W/(m <sup>2</sup> *K)]	DM [mm]	TmpE [°C] A_V1_T2_KD	TmpE [°C] A_V1_T2_KD_FW
1	8779.87	11	19	20	0.120283	7887.71	230.97	18.26	19.17
2	4966.21	11	19	19	0.130709	5351.97	390.11	14.14	14.14
3	4264.16	13	19	19	0.083952	6094.87	632.28	15.25	15.25
4	3865.61	13	18	19	0.141186	5348.64	401.72	14.47	14.77
5	2973.34	13	18	19	0.252087	6801.62	304.89	14.11	14.34

Dies ist beispielsweise im Innenstadtbereich der Fall. Hier war im Vorfeld ein erkennbarer Einfluss von Fremdleitungen zu erwarten, da hier eine hohe Dichte an Fremdleitungen besteht. Jedoch konnte in dem Modell keine deutliche Temperaturzunahme in diesem Bereich errechnet werden. Dies ist mit der hohen Abnahme zu begründen. Durch eine hohe Abnahme erhöht sich die Fließgeschwindigkeit und es kommt zu einer kürzeren Verweilzeit, sodass auch der Austausch zwischen der Bodentemperatur und der Temperatur in der Leitung kürzer ist als im Fall geringerer Fließgeschwindigkeiten. Dadurch wirken sich erhöhte Bodentemperaturen aufgrund einer hohen Fremdleitungs-dichte bei hohen Fließgeschwindigkeiten nicht erkennbar auf die Trinkwassertemperatur aus.

Das eine hohe Fließgeschwindigkeit im Innenstadtbereich besteht, kann über den Vergleich der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten nachgewiesen werden. So liegt die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit bei Betriebszustand A im gesamten Untersuchungsgebiet bei 0,039 m/s,

während gleichzeitig im Innenstadtbereich im Durchschnitt Fließgeschwindigkeiten von 0,065 m/s auftreten. Wie die Validierung aus gemessenen und modellierten Temperaturen zeigt, entsprechen vergleichsweise niedrige Temperaturen im Innenstadtbereich auch der Messung in der Realität. Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit wird in dem Innenstadtbereich durch das Modell somit gut wiedergespiegelt.

Einige Leitungsabschnitte zeigen keinen Unterschied zwischen beiden Modelldurchläufen mit und ohne Fremdleitungseinfluss, wie im Fall von Nr. 2 und 3 (Tabelle 25). Allerdings ist bei genauer Betrachtung der Standorte festzustellen, dass die Fremdleitungen im Bereich dieser Routen in einer Entfernung von > 2m zur Trinkwasserleitung verlegt sind. In das Modell wird allerdings eine Erhöhung der Bodentemperatur aufgrund von Fremdleitungseinfluss nur ab einer Entfernung von < 2m einbezogen. Folglich wird auch keine Erhöhung der Trinkwassertemperatur für diese Leitungsabschnitte errechnet. In der Realität nimmt der Einfluss von Fremdleitungen mit der Entfernung ab und muss in der Theorie stufenweise verringert werden. Außerdem ist aufgrund fehlender Messungen nicht klar, ob in einer Entfernung von > 2m möglicherweise doch ein Einfluss von Fremdleitungen besteht. Grundsätzlich kann eine Abnahme des Fremdleitungseinflusses über eine Abstufung der Einflusshöhe in das Modell einbezogen werden. Dies verdeutlicht erneut die Problematik der fehlenden Datenlage zur Bodentemperatur und Fremdleitungseinflüssen.

Für die Planung von Maßnahmen ist vor allem die Aussage zum Einfluss der Verlegetiefe bedeutend. In Tabelle 26 sind einige Endtemperaturen ausgewählter Leitungsabschnitte bei 100 cm (A\_V1\_T2\_KD) und 120 (A\_V1\_T3\_KD) cm Verlegetiefe gegenübergestellt. So zeigen Leitungsabschnitte mit langer Fließstrecke zwischen Start- und Endpunkt wie Nr. 2 und Nr. 4 in Tabelle 26 meist merkbare Temperaturunterschiede zwischen beiden Verlegetiefen. Jedoch sind auch bei einigen Leitungsabschnitten mit einer großen Routenlänge wie Nr. 1 nur geringe Unterschiede zwischen beiden Verlegetiefen aufgetreten. Dies lässt sich mit den weiteren Leitungseigenschaften begründen. Diese Route beinhaltet zahlreiche Leitungsabschnitte mit einem größeren Rohrdurchmesser von im Mittel 420 mm. Die Auswirkung der Bodentemperatur auf den Wasserkörper innerhalb der Leitung ist hierbei weniger stark ausgeprägt als bei kleineren Leitungsdurchmessern.

Tabelle 26: Beispiel von Rohrleitungsabschnitten in 100 cm (A\_V1\_T2\_KD) und 120 cm (A\_V1\_T3\_KD) Verlegetiefe im Vergleich

Nr.	Länge [m]	TempE [°C]	TempU [°C] A_V1_T2_KD	TempU [°C] A_V1_T3_KD	V. [m <sup>3</sup> /s]	U [W/(m <sup>2</sup> *K)]	DM [mm]	TempE [°C] A_V1_T2_KD	TempE [°C] A_V1_T3_KD
1	5831.55	11	19	18	0.119832	5545.77	420.76	14.67	14.21
2	3509.66	13	19	18	0.046149	8472.08	203.5	18.71	17.76
3	1777.39	12	19	18	0.141699	6248.20	333.6	13.41	13.01
4	7128.68	11	19	18	0.126088	7932.97	245.75	17.6	16.78
5	1375.93	11	19	17	0.179633	6635.85	228.67	12.53	12.15

Bei langer Verweilzeit und auch bei kleinen Leitungsdurchmessern zeigt sich die Auswirkung der Verlegetiefe mit unterschiedlicher Bodentemperatur besonders deutlich. Ein signifikanter

Unterschied beider Verlegetiefen ist andererseits in einigen Leitungsabschnitten nicht ersichtlich. Im Mittel ist bei Betriebszustand A (Durchschnittsklima, ohne Fremdleitungseinfluss) jedoch ein Unterschied von 0,76 °C zwischen 100 cm und 120 cm Verlegetiefe errechnet worden. Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass größere Verlegetiefen eine merkliche Auswirkung auf die Trinkwassertemperatur ausüben. Dennoch muss der erhebliche Kostenaufwand bei einer Vergrößerung der Verlegetiefe, insbesondere in großen Versorgungsgebieten, berücksichtigt werden. Für Trinkwasserversorger ist demnach die Entscheidung zum Kosten-Nutzen einer größeren Verlegetiefe zu treffen.

Des Weiteren wurden die verschiedenen Betriebszustände mit unterschiedlichen Einspeisestellen betrachtet. Zunächst zeigt sich, dass bei einigen Betriebszuständen ein größerer Unterschied zwischen beiden Verlegetiefen auftritt als bei anderen. Betriebszustand B wies dabei den größten Unterschied zwischen beiden Tiefen auf. Im Mittel ist eine Temperaturdifferenz von 2,17°C zu verzeichnen. Dies ist mit einer geänderten Verweildauer durch eine geänderten Einspeisestelle im Süden der Stadt und die schnellere Temperaturzunahme bei höheren Temperaturen zu begründen.

Im Allgemeinen besteht bei allen Betriebszuständen und Klimaszenarien ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Verlegetiefen, insbesondere in Bereichen mit langer Fließstrecke. In Kombination mit ohnehin erhöhten sommerlichen Wassertemperaturen führt eine Verringerung der Verlegetiefe zu einer zusätzlichen Temperaturerhöhung. Eine gezielte Maximierung der Verlegetiefe hingegen verbessert ausgehend von den Modellergebnissen die Temperatursituation in diesen Bereichen. Für Bereiche mit geringer Entfernung zu den Einspeisestellen und somit niedrigen Temperaturen ist eine derartige Maßnahme nicht notwendig.

Weiter zeigt sich ein Temperaturunterschied zwischen den einzelnen Betriebszuständen. Bei hoher Fließgeschwindigkeit (Spitzenstunde /Durchschnittstag) werden im Vergleich geringerer Fließgeschwindigkeit (Durchschnittstunde/Durchschnittstag oder Minimalverbrauch/Durchschnittstag) niedrigere Trinkwassertemperaturen modelliert. Grund hierfür ist die kürzere Verweilzeit bei höherer Fließgeschwindigkeit und somit eine kürzere Zeit, in der ein Temperatureaustausch zwischen Boden und Trinkwasser in der Leitung stattfindet.

Eine Ausnahme bildet Betriebszustand B. Hier ist trotz hoher Fließgeschwindigkeiten (Spitzenstunde/Durchschnittstag) eine etwas höhere Trinkwassertemperatur modelliert worden. In diesem Betriebszustand speist eine Einspeisestelle im Süden der Stadt mit vergleichsweise hohen Temperaturen stärker in das Netz ein als im Fall der anderen Betriebszustände. Dadurch ergibt sich eine höhere Starttemperatur, sodass in dem Modell einige Bereiche schneller höhere Trinkwassertemperaturen errechnet werden. Dies zeigt, dass nicht nur die Fließgeschwindigkeit und Verweildauer, sondern auch die Einspeisetemperatur eine deutliche Auswirkung auf die Trinkwassertemperatur ausübt.

Die räumliche Temperaturverteilung im Versorgungsgebiet folgt ebenfalls den Faktoren Verweilzeit im Netz und der Temperatur der Einspeisestelle. Das räumliche Muster der Temperaturverteilung im Versorgungsgebiet bleibt bei dem Vergleich verschiedener Klimaszenarien bestehen und unterscheidet sich meist lediglich in der errechneten absoluten Temperatur.

Der Unterschied in der absoluten Temperatur zu verschiedenen Klimaszenarien ist Tabelle 27 dargestellt. Hier ist für beide Verlegetiefen des Betriebszustands A die errechnete Temperatur im Mittel über das ganze Versorgungsgebiet als Beispiel herangezogen worden. Dabei zeigt sich der deutliche Unterschied zwischen den untersuchten Klimaszenarien, insbesondere zwischen dem Durchschnittsklima und dem Hitzejahr.

Anzumerken ist, dass es sich hierbei um Durchschnittswerte handelt. So sind in einigen Bereichen der Stadt deutlich höhere Temperaturen errechnet worden.

*Tabelle 27: Mittelwert der Temperatur im gesamten Netz bei verschiedenen Verlegetiefen und Klimaszenarien*

Betriebszustand	Durchschnittsklima (KD) [°C]	Klima Hitzejahr (KH) [°C]	Klima Klimawandel (KK) [°C]
A_100cm	15,64	18,5	19,5
A_120cm	14,88	17,20	18,20

Unter Berücksichtigung der klimatischen Entwicklung kann im GIS somit festgestellt werden, in welchen Stadtteilen unter den jeweiligen klimatischen Voraussetzungen von hohen Temperaturen im Trinkwasser auszugehen ist, die bei entsprechend langen Hitzeperioden die Einhaltung der Regelwerksvorgaben gefährden. Diese räumliche Visualisierung auf Basis der Modellberechnungen macht es zudem möglich in temperaturkritischen Bereichen gezielt Maßnahmen zu ergreifen, um Probleme hinsichtlich der Temperatur zu minimieren. Gleichzeitig können Bereiche im Versorgungsgebiet identifiziert werden, bei denen auch unter Einbezug der prognostizierten Klimaentwicklung keine kritische Temperatur im Netz befürchtet werden muss. Die Darstellung der räumlichen Temperaturverteilung unter Berücksichtigung der klimatischen Entwicklung bietet somit eine gute Handlungsgrundlage für das Versorgungsunternehmen.

Insgesamt konnten durch die verschiedenen Modellergebnisse wichtige Informationen zum Trinkwassertemperaturverhalten in einem großen Versorgungsnetz ermittelt werden. Vor allem der Vergleich verschiedener Einflussfaktoren unter Berücksichtigung der prognostizierten klimatischen Entwicklung bietet eine gute Hilfestellung zur Maßnahmenplanung, um negative Auswirkungen im Trinkwasser aufgrund steigender Temperaturen zu minimieren oder zu vermeiden.

## 12 Fazit und Ausblick

Aufgrund der Betriebserfahrung von Trinkwasserversorgungsunternehmen und im Hinblick auf die klimatische Entwicklung ist eine Beobachtung der Trinkwassertemperaturentwicklung notwendig, um die Einhaltung der Regelwerksvorgaben von maximal 25°C im Trinkwasser ohne zusätzliche Desinfektion gewährleisten zu können.

Aufgrund der Größe und Komplexität des hier untersuchten Versorgungssystems der Großstadt Augsburg ist vor allem die Identifizierung und Einordnung aller Einflussfaktoren, welche sich auf die Trinkwassertemperatur auswirken, bedeutend. Die hier herausgearbeiteten Informationen und die Ergebnisse des Trinkwassertemperaturmodells stellen ein gutes Werkzeug dar, um Risikobereiche im Versorgungsnetz zu identifizieren und um gezielt Maßnahmen in den temperaturkritischen Bereichen anwenden zu können.

Einige Einflussfaktoren konnten dabei aufgrund der Datenlage deutlich besser quantifiziert werden als andere. Dies zeigt, wie wichtig eine umfangreiche Datenerfassung ist. Für Versorgungsunternehmen ist künftig eine Dokumentation aller Rohrnetzparameter in einem GIS System hilfreich. Insbesondere bei alten Leitungen bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich einiger temperaturrelevanter Daten. Hierbei gibt es vor allem bei der Verlegetiefe Verbesserungsbedarf, da lediglich neu verlegte Leitungen georeferenziert in das GIS aufgenommen werden. Bei alten Leitungen bestehen größere Unsicherheiten hinsichtlich der Verlegetiefe aber auch im Hinblick auf Wanddicken und die Wärmeleitfähigkeit. Insgesamt sollten weitere Daten zu den verlegten Rohrleitungen, welche bisher nicht erfasst worden sind, dokumentiert werden.

Im Hinblick auf die Datenlage ist ein Ausbau der Temperaturmessungen notwendig, um Informationslücken zu schließen. Eine gute Datenlage besteht im Fall der Einspeisestellen. Hier können dennoch in der Zukunft zusätzlich über Raum- und Betontemperaturmessungen weitere Informationen zur Temperatur der Einspeisestellen erfasst werden. Außerdem ist eine Temperaturmessung in allen Brunnen hilfreich, um statistisch aussagekräftige Informationen zu dem Temperaturverhalten zu erhalten. Bisher wurden lediglich ausgewählte Brunnen hinsichtlich der Temperatur betrachtet. Ein detailliertes Temperaturprofil jedes einzelnen Brunnens ermöglicht eine bessere Planungsgrundlage für weitere Maßnahmen der Temperaturreduktion.

Besonders spärlich ist die Datenlage im Trinkwasserrohrnetz und in den Kundenanlagen, da hier hauptsächlich händische Messungen zu ausgewählten Zeitpunkten stattfinden. Dadurch ergeben sich einige Ungenauigkeiten. Geeignete kontinuierliche Messungen im Netz wie in Schächten oder Hydranten sind künftig hilfreich, um die Informationslage zu verbessern. Vor allem der Ausbau von Hauswasserzählern mit der Möglichkeit die Temperatur zu erfassen bietet sich an. Dabei sind die angesprochenen Probleme der hier verwendeten Trinkwasserzähler zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu vermeiden.

Die größte Schwierigkeit bestand darin die Bodentemperatur in Leitungsnähe zu messen. Für ein großes Versorgungsgebiet wie im Fall der Stadt Augsburg empfiehlt es sich in verschiedenen stadtklimatologischen Bereichen Bodentemperaturmessungen in 100 und 120 cm Tiefe unter Asphaltflächen zu installieren und dabei die Einflussfaktoren wie Fremdleitungen ebenfalls in die Messungen

mit einzubeziehen. Ein solcher Ausbau des Messsystems kann weitere wichtige Informationen zum Temperaturverhalten des Trinkwassers im Leitungsnetz liefern und die Unsicherheiten im Modell verringern. Für das hier vorgestellte Modell wurde die Bodentemperatur über eine Kombination aus Satellitendaten, der Einteilung in Local Climate Zones und mithilfe von einigen Bodentemperaturmessungen ermittelt. Eine Kombination verschiedener Bodentemperaturdaten, sowohl mithilfe von in-situ Messungen als auch mithilfe von Modellen oder Fernerkundungsdaten, ist in großflächigen Untersuchungsgebieten anzustreben, um gute Bodentemperaturdaten zu erhalten.

In der Gewinnung konnte der Unterschied zwischen Flachbrunnen, welche durch die Lage, Landnutzung und Entfernung zu Fließgewässern und den Tiefbrunnen, die durch die Ausbautiefe beeinflusst werden, herausgearbeitet werden. Sowohl für die Planung neuer Brunnen als auch für den Betrieb in den Sommermonaten ist eine Berücksichtigung der Brunnentemperatur hilfreich, um Eingangstemperatur in das Netz möglichst gering zu halten.

Eine wichtige Planungsgrundlage für das Versorgungssystem stellt das hier vorgestellte Trinkwassertemperaturmodell dar. Insbesondere in einem großen Versorgungssystem ist es hilfreich die Temperatur im Netz zu modellieren, sodass verschiedene Temperaturbereiche sichtbar werden. Mithilfe der in ArcGIS integrierten Python Erweiterung wird die Temperatur an jedem Punkt im Netz errechnet.

Die Temperatur in den Wasserwerken und Hochbehältern ist für die Modellierung der Temperatur im Netz als Eingangstemperatur bedeutend. Unter zusätzlichem Einbezug von Rohrnetzparametern wie Material, Durchmesser und der Fließgeschwindigkeit kann im GIS die Temperatur an jedem Punkt im Netz berechnet werden. Die Bodentemperatur ist als treibender Faktor für die Temperatur im Modell relevant. Aufgrund der geringen räumlichen Datendichte bestehen hier jedoch die größten Ungenauigkeiten im Modell.

Vor allem die Bodentemperatur verschiedener Standorte in verschiedenen, für die Trinkwasserleitung ausschlaggebenden, Tiefen und der Einfluss von Fremdleitungen muss in das Modell einbezogen werden. Dies macht die Notwendigkeit einer umfangreichen Datenerhebung und -auswertung der Bodentemperatur deutlich. Des Weiteren ist eine Kombination verschiedener Modelle zur Errechnung der Bodentemperatur auf Basis von meteorologischen Daten hilfreich, um das Trinkwassertemperaturmodell zu verbessern.

Die Auswertung des Temperaturverhaltens in der Gewinnung und die Bearbeitung der GIS Modellierung wurden auf Basis vorhandener Daten und Messergebnisse durchgeführt. Trotz der angesprochenen Ungenauigkeiten bietet das Temperaturmodell einen guten Überblick über das Trinkwassertemperaturverhalten im gesamten Versorgungsgebiet. Insbesondere das räumliche Temperaturverhalten im Netz wird so sichtbar gemacht. Außerdem können durch das Anpassen der Modellparameter verschiedene Klimaszenarien in der Zukunft errechnet werden.

Die Modellierung der Trinkwassertemperatur unter Annahme höherer Einspeise- und Bodentemperaturen durch eine Klimaänderung lässt dabei zwar eine gleichbleibende Verteilung wärmerer und kühlerer Trinkwassertemperaturbereiche erkennen, jedoch wird auch ersichtlich wo in der Zukunft Probleme im Hinblick auf die Regelwerksvorgaben zu erwarten sind. Dieser Einbezug der

prognostizierten Klimaänderung verdeutlicht, wie wichtig es ist die Temperaturentwicklung im Trinkwasser zu beobachten.

Wie die Praxiserfahrung von Trinkwasserversorgungsunternehmen zeigt, gewinnt die Thematik der Trinkwassertemperatur immer mehr an Bedeutung. Dabei wird in dem hier dargestellten Modell ersichtlich, dass noch Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Datenlage und Information zu den Einflussfaktoren besteht. Jedoch zeigen die Ergebnisse im Modell auch, dass die Temperatur an jedem Punkt im Netz berechnet werden kann. Dies ermöglicht eine gute räumliche Darstellung der Temperaturverteilung im Versorgungsgebiet und bietet einem Trinkwasserversorgungsunternehmen die Möglichkeit gezielt und rechtzeitig Maßnahmen zu ergreifen, um auch in der Zukunft eine einwandfreie Qualität des Trinkwassers zu gewährleisten.

## 13 Literaturverzeichnis

- Agudelo-Vera et.al. (2020). Drinking Water Temperature around the Globe: Understanding, Policies, Challenges and Opportunities. *Water*(12).
- Asaeda, T., & CA, V. T. (1993). The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: A numerical model. *Boundary-Layer Meteorology* (65), S. 159-179.
- Baehr, H., & Stephan, K. (2006). *Wärme- und Stoffübertragung* (15. neu bearbeitete und erweiterte Ausg.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2007). *Fluvioglaziale Schotter*. Abgerufen am 15. Mai 2023 von [https://www.lfu.bayern.de/geologie/hydrogeologie\\_karten\\_daten/hydrogeologische\\_raumgliederung/teilraum/doc/teilraum\\_fluvioglaziale\\_schotter.pdf](https://www.lfu.bayern.de/geologie/hydrogeologie_karten_daten/hydrogeologische_raumgliederung/teilraum/doc/teilraum_fluvioglaziale_schotter.pdf)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2012). *Der Klimawandel in Bayern. Auswertung regionaler Klimaprojektionen. Klimabericht Bayern*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (15. Mai 2023). *Datendownload Augsburg Hochablaß / Lech*. Von <https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/wassertemperatur/kelheim/augsburg-hochablass-12004002/download> abgerufen
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft. (2001). *Grundwassertemperatur - Tiefenprofilmessungen der bayrischen Wasserwirtschaftsverwaltung*. Zusammenfassender Bericht, Materialien Nr. 103, München.
- Beck, C., Straub, A., Breitner, S., Cyrus, J., Phillip, A., Rathmann, J., & Schneider, A. W. (2018). Climate evaluation of Local Climate Zones in the urban area of Augsburg (Southern Germany) under varying synoptic conditions. *Urban Climate*, S. 152-166.
- Bellasio, R., Maffei, G., Scire, S., Longoni, M. G., Bianconi, R., & Quaranta, N. (2005). Algorithms to account for topographic shading effects and surface temperature dependence on terrain elevation in diagnostic meteorological models. *Boundary-Layer Meteorology*, S. 595-614.
- Berger et al. (2020). *Trinkwasser aus dem Hahn*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Blokker, E. M., & Pieterse-Quirijns, E. (Januar 2013). Modeling Temperature in the Drinking Water Distribution System. *Journal-American Water Works Association*(105), S. 19-28.
- Boschorer, S., & Költzsch, K. (2001). *Technische Strömungslehre* (12., überarbeitete und ergänzte Ausg.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bruse, D., & Bruse, M. (2017). *Decoding Urban Nature*. Essen: ENVI\_MET GmbH. Abgerufen am 14. April 2023 von ENVI\_MET: <https://www.envi-met.com/de/medien/>
- Bundeskartellamt. (2016). *Bericht über die großstädtische Trinkwasserversorgung in Deutschland*. Bonn. Abgerufen am 15. Mai 2023 von [https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Berichte/Wasserbericht-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Berichte/Wasserbericht-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

- Buxmann, K. (2008). *Analyse des Augsburger Trinkwasserversorgungsnetzes mithilfe des Rohrnetzbergerrechnungsprogramms STANET*. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Wirtschaftsmathematik. Augsburg: Universität Augsburg.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MMS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* (113), S. 893-903.
- Deilmann et al. (2017). *Stadt im Spannungsfeld von Kompaktheit, Effizienz und Umweltqualität. Anwendungen urbaner Metrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Deutscher Wetterdienst. (2023). *Opendata*. Abgerufen am 7. März 2023 von [opendata.dwd.de](https://opendata.dwd.de)
- Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). (2012). *DIN 1988-200:2012-05. Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW*. Berlin: Beuth.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (02/2017). *DIN 2000. Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen*. Berlin, Bonn.
- Dohr. (2011). *Grundwassertemperaturen München. Messungen 2009 - 2010*. München: Referat für Gesundheit und Umweltschutz.
- Dugdale, S., Hannah, D., & Malcom, I. (2017). Rover temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Science Reviews*. Volume 175. P. 97-113.
- DVGW. (2004). *Technische Regel Arbeitsblatt W 400-1. Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWW). Teil 1: Planung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches.
- ENVI\_Met GmbH. (2023). *FAQ*. Abgerufen am 14. April 2023 von ENVI-met Simulationssoftware für das Mikroklima: <https://www.envi-met.com/de/software/#gettoknow>
- esri [2]. (2023). *ArcGIS Pro*. Abgerufen am 16. Februar 2023 von Aggregieren (Spatial Analyst): <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/aggregate.htm>
- esri [3]. (12. September 2020). *Technischer Support*. Abgerufen am 16. Februar 2023 von How To: Konvertieren von 3D-Punkt-Features im XYZ-Dateiformat in Raster in ArcMap: <https://support.esri.com/de/technical-article/000011466>
- esri [4]. (2023). *ArcGISvPro*. Abgerufen am 16. Februar 2023 von Integrieren (Data Management): <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/data-management/integrate.htm>
- Fezer, F. (1995). *Das Klima der Städte* (1. Aufl. Ausg.). (Perthes-Geographie-Kolleg, Hrsg.) Gotha: Justus Perthes Verlag.
- Fischer-Uhrig, F. (2016). *STANET Handbuch*. Berlin: Ingenieurbüro Fischer-Uhrig.
- Franz, B. A., Bailey, S. W., Kuring, N., & Werdell, P. J. (25. März 2015). Ocean color measurements with the Operational Land Imager on Landsat-8: implementation and elevation in SeaDAS. *Journal of Applied Remote Sensing* (9).

- Gisi et al. (1997). *Bodenökologie* (2., neu bearbeitete und erweiterte Ausg.). Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Grobe, S., & Jost, W. (Dez 2011). Mikrobiologische Trinkwasserqualität in der Wasserverteilung bei veränderten Temperaturen aufgrund des Klimawandels. In *dynaklim-Kompakt No. 07*. Essen: IWW Zentrum Wasser.
- Grombach, P., Haberer, K., & Trueb, E. (1985). *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*. München, Wien: Oldenbourg .
- Häckel, H. (2012). *Meteorologie* (7. Ausg.). Stuttgart: Ulmer UTB.
- Hartge, K.-H., Horn, R., Bachmann, J., & Peth, S. (2014). *Einführung in die Bodenphysik* (4. vollständig überarbeitete und erweiterte Ausg.). Stuttgart: Schweizerbart.
- Heineberg, H. (2017). *Stadtgeographie*. Paderborn: Ferdinand Schöningh.
- Heyer, E. (2006). *Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. (12., überarbeitete Ausg.). (P. Hupfer, & W. Kuttler, Hrsg.) Wiesbaden: Teubner.
- HydroConsult GmbH. (2014). *Numerisches 3D-Grundwasserströmungsmodell "Augsburg-Süd" für das 1. Tertiär Hauptgrundwasserstockwerk - Schlussbericht Modellkalibrierung* -. Augsburg: i.A. Stadtwerke Augsburg Wasser GmbH.
- Kaczmarczyk et al. (2008). Konstruieren eines Straßenoberbaus. In *Bautechnik für Bauzeichner* (S. 667-726). Wiesbaden: Vieweg+teubner.
- Kaiser, P. (2022). *ArcGIS Pro. Das Deutschsprachige Handbuch inklusive Einstieg in ArcGIS Online* (2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage Ausg.). (G. G. (Hrsg.), Hrsg.) Berlin: Wichmann. Abgerufen am 16. Februar 2023
- Kaspar, F., Imbery, F., & Friedrich, K. (2021). *Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021*. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klimaüberwachung.
- Konstantin, P. (2018). *Fernwärmesysteme im Überblick*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Köpke, P., & Sachweh, M. (2012). *Satellitenmeteorologie*. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Korth, A. (2018). Erhöhte Temperaturen bei der Wasserversorgung - Ein Problem? Dresden: DVGW, TZW.
- Krauss, M., & Lindl, S. S. (2014). *Der gezähmte Lech. Ein Fluss der Extreme*. München: Volk Verlag.
- Kulching, H. (2004). *Taschenbuch der Physik* (18. neu bearbeitet Ausg.). Leipzig: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- Latif, P. D. (2009). *Klimawandel und Klimadynamik* . Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Liebenthal, C. (2005). *On the determination of the ground heat flux in micrometeorology and its influence on the energy balance closure*. Universität Bayreuth.
- Liebing, N. (2013). *Unsere Bäche und Kanäle in Augsburg*. Augsburg: Landschaftspflegeverband Stadt Augsburg e.V.

- Linke, C (Hrsg.). (2023). *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bundes-Länder-Fachgesprächs "Interpretation regionaler Klimamodelldaten"*. Potsdam: Landesamt für Umwelt Brandenburg.
- Löffler, H. (2012). *Meteorologische Bodenmesstechnik (vormals: Instrumentenkunde)* (Dritte, vollständig überarbeitete Ausg., Bd. 6). Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst.
- Maloszewski, P., & Trimborn, P. (2. August 1997). Erfassung der Uferfiltration im Bereich des Trinkwassereinzugsgebietes der Stadt Augsburg. *Untersuchungsergebnisse zur Erfassung und Expositionsbewertung der Auswirkungen der Uferfiltration auf Grundwasser. Vorträge Workshop 11.-12.101995 in der GSF. GFS - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit* Bericht 3/97, S. 30-44.
- McCoy, J., Johnston, K., & Kopp, S. B. (2001). *ArcGIS 9. Using ArcGIS Spatial Analyst*. USA: ESRI.
- Mehra, S.-R. (2021). *Stadtbauphysik. Grundlagen klima- und umweltgerechter Städte*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Menberg et al. (2013). Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment*, S. 123-133.
- Moss et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *nature*, S. 747-756.
- ONSET Computer Corporation. (2018). *12-Bit Temperatur-Smart-Sensor (S-TMB-M0xx) Hanbuch*. Abgerufen am 15. Mai 2023 von [https://www.onsetcomp.com/sites/default/files/resources-documents/18470-F%20S-TMB%20Manual%20German\\_0.pdf](https://www.onsetcomp.com/sites/default/files/resources-documents/18470-F%20S-TMB%20Manual%20German_0.pdf)
- OpenStreetMap contributors. (2022). *Map data © OpenStreetMap contributors*. Abgerufen am 7. März 2023 von [www.openstreetmap.org/copyright](http://www.openstreetmap.org/copyright)
- Pietsch, J., & Kamieth, H. (1991). *Stadtböden. Entwicklungen, Belastungen, Bewertung und Planung*. Taunusstein: Eberhard Blottner.
- Pluhowski, E. J., & Kantrowitz, I. H. (1963). Influence of Land-Surface Conditions on Ground-Water Temperatures in Southwestern Suffolk County, Long Island, New York. (G. S. Research, Hrsg.) *Shprt Papers in Geology and Hydrology. Articles 1 - 59*, S. B186 - B188.
- Proxleitner, J. (2009). Klimaschutz - Themen und Projekte der obersten Baubehörde. Bauintern - Wohnungsbau, Straßen- und Brückenbau. *Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren. B20 769 E. Sonderheft Mai 2009*.
- Reichelt Chemietechnik. (2021). Thomaplast (R) the best. Halbzeuge und Befestigungselemente. *Datenblatt*. Reichelt Chemietechnik GmbH + Co. Abgerufen am 20. April 2023 von [https://www.rct-online.de/media/pdf/b3/4c/32/de-the\\_best\\_Halbzeuge.pdf](https://www.rct-online.de/media/pdf/b3/4c/32/de-the_best_Halbzeuge.pdf)
- Reick, M. P. (1999). *DIN EN ISO 6946*. Universität Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften. Deutsches Institut für Normung.
- Roedel, W., & Wagner, T. (2011). *Physik unserer Umwelt* (4. Ausg.). Heidelberg: Springer.

- Roth, G. D., & Lux, G. (2015). *Die BLV Wetterkunde. Das Standardwerk* (14. Neu- Ausg.). München: BLV.
- Sailor, D. J. (1994). Simulated Urban Climate Response to Modifications in Surface Albedo and Vegetative Cover. (A. M. (U.S.A), Hrsg.) *Journal of Applied Meteorology*, 34, S. 1694-1704.
- Schär, C., & Fischer, E. M. (2008). Der Einfluss des Klimawandels auf Hitzewellen und das Sommerklima Europas. *Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken - Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen*, S. 50 - 55.
- Scheffer, F., & Schachtschabel, P. (2002). *Lehrbuch der Bodenkunde* (15. Neubearb. und erw. Ausg.). Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Schubert, Thomas. (2016). Regionale Hydrogeologie von Deutschland. Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe, Hrsg.) *Geologisches Jahrbuch*, 163.
- Stadt Augsburg. (2022). *Statistisches Jahrbuch 2021*. Amt für Statistik und Stadtforschung. Augsburg: Stadt Augsburg. Abgerufen am 15. Mai 2023 von [https://www.augsburg.de/fileadmin/user\\_upload/buergerservice\\_rathaus/rathaus/statistiken\\_und\\_geodaten/statistiken/2021Jahrbuch\\_Internet.pdf](https://www.augsburg.de/fileadmin/user_upload/buergerservice_rathaus/rathaus/statistiken_und_geodaten/statistiken/2021Jahrbuch_Internet.pdf)
- Stadt Augsburg Mobilitäts- und Tiefbauamt. (2022). Daten zur Abwassertemperatur (nicht öffentlich zugänglich). Stadtentwässerung.
- Statistisches Bundesamt. (21. November 2018). *Pressemitteilung Nr. 451 vom 21. November 2018*. Abgerufen am 22. Februar 2023 von [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18\\_451\\_322.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_451_322.html)
- Stewart, I., & Oke, T. (Dezember 2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. In *The Bulletin of the American Meteorological Society* (S. 1879-1900). American Meteorological Society.
- swa, [1]. (2023). *Temperaturdaten und GIS Shapefiles*.
- swa, [2]. (2023). *Wir versorgen die Region mit unserem wertvollsten Gut*. (S. A. GmbH, Hrsg.) Abgerufen am 20. Januar 2023 von [https://www.sw-augsburg.de/fileadmin/content/6\\_pdf\\_Downloadcenter/2\\_Wasser/Wasser-Wasserbroschuere.pdf](https://www.sw-augsburg.de/fileadmin/content/6_pdf_Downloadcenter/2_Wasser/Wasser-Wasserbroschuere.pdf)
- swa, [3]. (2023). *Trinkwasser für Augsburg*. (S. A. GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 20. Januar 2023 von <https://www.sw-augsburg.de/wasser/swa-trinkwasser/#c1151>
- swa, [4]. (2015). *Technische Anlagen der Wasserversorgung*. Augsburg: Stadtwerke Augsburg Wasser GmbH.
- swa, [5]. (2023). *Eine lange Geschichte: Trinkwasser in Augsburg*. (S. A. GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 20. Januar 2023 von <https://www.sw-augsburg.de/welterbe/welterberleben/historie-trinkwasser-in-augsburg/#c1173>

- Tetzlaff, G. (1977). Zur Bestimmung des Bodenwärmestroms. (I. f. Hanover, Hrsg.) *Archiv für Meteorologie, Gophysik und Bioklimatologie(A)*, S. 383-397.
- Trinks, S. (2010). *Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel*. Berlin Friedrichshain: Fakultät VI der Technischen Universität Berlin.
- TZW/DVGW. (2019). *Erhöhte Wassertemperaturen. Untersuchungen zu den Ursachen erhöhter Wassertemperaturen im Trinkwassernetz und Identifizierung von Gegenmaßnahmen (W 201904)*. Abgerufen am 16. Mai 2023 von DVGW Forschungsprojekte: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-erhoehte-wassertemperaturen>
- TZW/DVGW. (2021). *MibiTemp. Untersuchung zu den Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen auf mikrobiologische Situationen bei der Trinkwasserverteilung (W 202016)*. Abgerufen am 16. Mai 2023 von DVGW. Forschungsprojekte: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-mibitemp>
- U.S. Geological Survey. (2021). *EarthExplorer*. Abgerufen am 7. März 2023 von <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- U.S. Geological Survey. (2021). *Landsat Collection 2*. Abgerufen am 15. Mai 2023 von <https://pubs.usgs.gov/fs/2021/3002/fs20213002.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2022). *Landsat - Earth Observation Satellites*. Abgerufen am 16. Februar 2023 von <https://pubs.usgs.gov/fs/2015/3081/fs20153081.pdf>
- Umweltbundesamt. (2016). *Rund um das Trinkwasser*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. 4. aktualisierte Auflage. Abgerufen am 15. Mai 2023 von Ratgeber: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba\\_rund\\_um\\_das\\_trinkwasser\\_ratgeber\\_web\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_rund_um_das_trinkwasser_ratgeber_web_0.pdf)
- United Nations. (2010). Resolution adopted by the General Assembly on 28 July 2010. Distr.: General: General Assembly.
- United Nations. (18. 10 2022). Unated nations educational, scientific and cultural organization. Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage. World Heritage committee. Forty-third session. Baku, Republic of Azerbaijan. 30 June - 10 July 2019., (S. 269-267). Paris. Von <https://www.unesco.de/kultur-und-natur/welterbe/welterbe-deutschland/augsburger-wassermanagement-system> abgerufen
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). (2022). *VDI 6023 Blatt 1:2022-09. Hygiene in Trinkwasser-Installationen - Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung*. Berlin: Beuth.
- Von Storch, H. C. (Hrsg.). (2011). *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg*. Heidelberg: Springer.

- Wagner, Kus, Kainzmaier, Spörlein, Wilferth, Veit, . . . Sprenger. (2009). Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500.000. *Hydrologische Übersichtskarte. Bayerisches Landesamt für Umwelt.*
- Wessolek, G., & Trinks, S. (2015). *Boden und Energiewende. Trassenbau, Erdverkabelung und Erdwärme.* (S. F. Wiesbaden, Hrsg.) Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Wetzel, K.-F., & Merkel, W. (2010). *Zusammenfassung und Ergebnisübersicht der Diplomarbeit von Kirstin Auerbach zum Thema: Entwicklung der Wassertemperatur am Beispiel des Lechs im Zeitraum von 1955 bis 2010 - Eine Analyse der Temperaturdaten ausgewählter Kraftwerke* -. Universität Augsburg, Fakultät für Angewandte Informatik, Institut für Geographie. Augsburg: Universität Augsburg.
- Zlatanovic et al. (2017). Development and validation of a drinking water temperature model in domestic drinking water supply systems. *Urban Water Journal* 14(10), S. 1031-1037.