

Wärmetransport von der Atmosphäre durch den Untergrund zu Trinkwasser-versorgungsleitungen

Von Claus Haslauer, Elisabeth Nissler, Samuel Scherrer, Holger Class, Esad Osmancevic, Mark Hermannspan und Tanja Rank

Die Trinkwasserqualität in Trinkwasserrohrnetzen kann in heißen Sommermonaten durch hohe Temperaturen beeinträchtigt werden, da schädliche Bakterien dadurch ideale Wachstumsbedingungen vorfinden. Daher sind Wasserversorger daran interessiert, die Temperatur in ihren Trinkwasserrohrnetzen abzuschätzen. Wir untersuchen sowohl experimentell als auch mithilfe numerischer Simulationen den Wärme- und Wassertransport von der Geländeoberfläche in den Untergrund (d. h. oberhalb von Trinkwasserleitungen). Mithilfe eines ausgeklügelten Ansatzes berücksichtigen wir die meteorologischen Forcing Functions bei der Modellierung der Randbedingungen für die Wärmebilanz an der Boden-Atmosphären-Grenzfläche. Von August bis Dezember 2020 wurden Bodentemperaturen und Bodenfeuchte in Abhängigkeit von Bodenart, Bodenbedeckung und Wetterdaten an einem Pilotstandort gemessen. Dieser Standort wurde eigens für diesen Zweck an der Universität Stuttgart mit Polyethylen- und Gussrohren und unter typischen In-situ-Bedingungen errichtet. Wir haben diese Schnittstellenrahmenbedingung an der Grenze zwischen Atmosphäre und Boden in einen integrierten nicht-isothermen, variabel gesättigten (Richards') numerischen Simulator (DuMu³) integriert. Nach der Kalibrierung konnte dadurch eine Übereinstimmung mit den gemessenen Bodentemperaturen mit einer Genauigkeit von ± 2 °C ermöglicht werden. Die Bodenbedeckung beeinflusste die Bodentemperatur in bis zu 1,5 m Tiefe, der typischen Verlegetiefe von Trinkwasserrohren. Mit diesem Modell können wir die Temperatur der Grundwasserneubildung in der ungesättigten Bodenzone besser beschreiben und somit resiliente Trinkwasserversorgungsnetze auslegen.

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurde ungewöhnlich warmes Wasser in den Trinkwasserrohrnetzen beobachtet und vermutet, dass dies durch hohe Lufttemperaturen während des Sommers verursacht wird (Osmancevic & Hüsam, 2021). Solche Bedingungen stellen eine Gefahr für die Trinkwasserqualität dar, da erhöhte Temperaturen zu einer erhöhten und unerwünschten mikrobiellen Aktivität und damit zu einer Verschlechterung der Trinkwasserqualität führen können. Es wird befürchtet, dass sich diese Situation mit dem Klimawandel noch verschärfen wird. Daher sind detaillierte Kenntnisse über den Einfluss der Boden- und Grundwasserneubildungstemperaturen erforderlich, um die Wassertemperatur in den Trinkwasserrohrnetzen abschätzen zu können.

Im Allgemeinen werden höhere Bodentemperaturen über die letzten Jahrzehnte bestätigt (z. B. Chen et al., 2021) und sie haben verschiedene Auswirkungen auf mikrobiologische und physikalisch-chemische Prozesse sowie auf die Vegetationsperioden, die mit der Zeit variieren. Daher gibt es verschiedene Ansätze, die Bodentemperaturen mit einfachen, für spezielle Regionen validierten Modellen zu bestimmen.

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Temperaturentwicklung in Böden, die von der Atmosphäre zusammen mit dem Wasserfluss erzwungen wird. Ein Ansatz besteht darin, das thermische Feld des Bodens aus einer einzigen Messung zu rekonstruieren, ein Vorgehen, das von Wang (2012) entwickelt und validiert wurde. Ein anderer Ansatz, den auch wir verfolgen, besteht darin, die Energiebilanz an der Oberfläche zu lösen, dabei müssen die Evapotranspiration und der wahrnehmbare

Wärmefluss berücksichtigt werden. Dies wird beispielsweise bei Saito et al. (2006) in HYDRUS durchgeführt, wobei die Verdunstung als Randbedingung festgelegt wird (Bittelli et al., 2008) und Teil der Lösung ist.

In unserem Forschungsprojekt wird ein ähnlicher Ansatz wie HYDRUS verwendet, indem der wahrnehmbare Wärmefluss auf Grundlage der Penman-Monteith-Gleichung (Allen et al., 1998) und unter Verwendung geeigneter Messungen meteorologischer Daten berechnet wird. Die Verdunstung wird dann aus dem latenten Wärmefluss unter Verwendung des Bowen-Verhältnis berechnet, wie in Abschnitt 2.2.6 beschrieben. Ziel unseres Forschungsprojektes ist es, diese Art von Randbedingung in einem frei zugänglichen Code zu implementieren, anhand längerer Zeitreihen zu kalibrieren und schließlich Zeitreihen der Grundwasserneubildungstemperatur zu erhalten, die in diesem Fall das Trinkwassernetzmanagement bei sich ändernden klimatischen Bedingungen verbessern.

Wir modellierten den Einfluss der meteorologischen Forcing Functions, der Bodenstruktur und der Bodenbedeckung auf die Temperaturen zwischen Geländeoberfläche und Untergrund. An einem Pilotstandort konzentrieren wir uns mit unserer Analyse auf eine Tiefe von bis zu 1,5 m, also einer typischen Verlegetiefe für Trinkwasserleitungen in Deutschland. Obwohl in diesem Fachbericht der Fokus auf Wärmetransport zu Trinkwasserleitungen liegt, ist das Thema von allgemeiner Relevanz, da dieser Ansatz die Grundwasserneubildungstemperatur anhand meteorologischer Forcing Functions beschreibt und modelliert. Diese Temperaturverteilung und ihre Entwicklung aufgrund des Klimawandels sind entscheidend für eine widerstandsfähige städtische Infrastruktur.

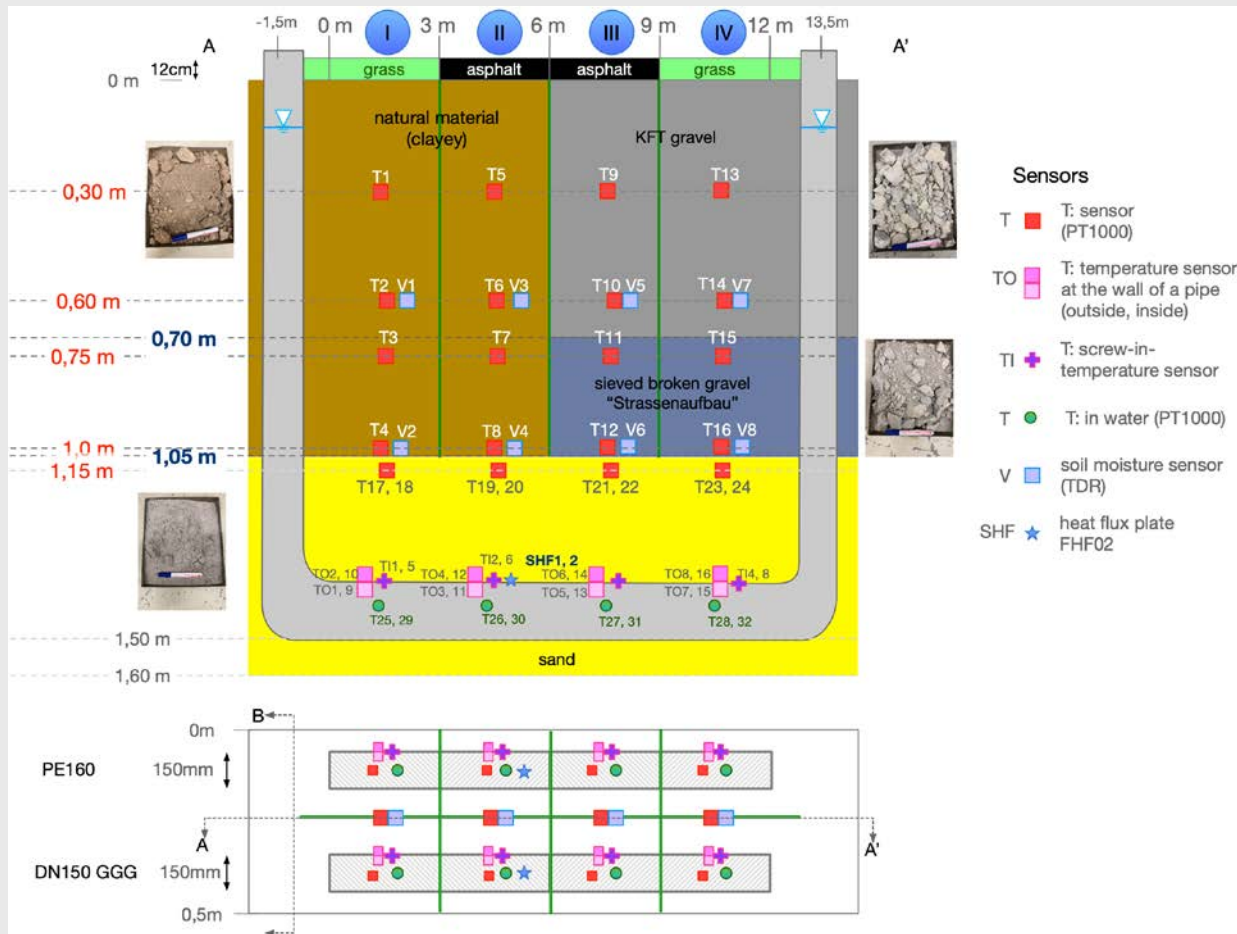


Bild 1: Aufbau der Pilotversuchsanlage

An dem Gelände der Universität Stuttgart wurde eine Versuchsanlage errichtet, in dem Trinkwasserrohre aus Polyethylen (PE) und Gusseisen in einer Tiefe von 1,50 m über eine horizontale Strecke von 15 m verlegt wurden. Der Graben wurde mit zwei verschiedenen Materialien verfüllt: mit kiesigem Material, typisch für die Bedingungen bei der Verlegung von Rohren unter Straßen, sowie mit natürlich vorkommendem schluffigem Ton. Auf der Oberfläche wurden zwei verschiedene Arten von Bodenbedeckung aufgebracht: natürliche Vegetation und Asphalt. Der Untergrund wurde mit 64 Temperatursensoren und acht Bodenfeuchtesensoren ausgestattet, und von der benachbarten Wetterstation der Universität Stuttgart liegen detaillierte hydrometeorologische Beobachtungen vor. Zusätzlich zu den Messungen haben wir einen numerischen Simulator zur Abschätzung der Bodentemperaturen und -feuchten angepasst und eingesetzt. Das Forschungsprojekt zielte darauf ab, die meteorologischen Forcing Functions und die variablen Sättigungsbedingungen einzubeziehen.

In Abschnitt 2 werden die Pilotversuchsanlage und die numerischen Simulationsmethoden beschrieben. Darüber hinaus werden in diesem Abschnitt das numerische Modell und der neuartige Ansatz vorgestellt, der zur Umsetzung der Bedingungen an der Grenzfläche zwischen Luft und Untergrund gewählt wurde. Der Abschnitt über die Ergebnisse (vgl. Abschnitt 3) enthält den Vergleich zwischen gemessenen Daten und numerischen Simulationen mit einem kalibrierten Satz von Parametern.

Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4 diskutiert, gefolgt von den Schlussfolgerungen (vgl. Abschnitt 5).

2 Materialien und Methoden

In diesem Abschnitt wird der Pilotversuchsstandort beschrieben und anschließend das numerische Modell vorgestellt. Ein besonderer Fokus wird auf die Anpassung des Modells gelegt, damit mit diesem die meteorologischen Forcing Functions in die Wärme- und Massenbilanzen einbezogen werden können.

2.1 Der Pilotstandort

Zwei Rohre, die in Bezug auf Dimension (Innendurchmesser: 150 mm) und Material (PE und Gusseisen) typisch für die Trinkwasserversorgung sind, wurden in einem 1,50 m tiefen, 15 m langen und ca. 1 m breiten Graben verlegt, vgl. **Bild 1**. Die Rohre wurden leicht schräg in Strandsand eingelassen und haben eine horizontale Länge von 12 m. An beiden Enden der Rohre wurden vertikale Verlängerungen über der Geländeoberfläche errichtet. Der Graben wurde mit zwei Arten von porösen Medien verfüllt, a) einem schluffigen Ton, dem natürlich vorkommenden Material am Standort, und b) kiesigem Material, das für den Straßenbau typisch ist („KFT-Kies“ und „gesiebter gebrochener Kies“). Auf der Geländeoberfläche wurden zwei ca. 12 cm dicke Schichten mit unterschiedlicher Bodennutzung aufgebracht, a) die natürlich vorkommende Vegetation („Gras“) und b) Asphalt. So wurden

insgesamt vier Kombinationen von porösen Medien und Boden-
nutzung nachgebildet, wobei die Stationen durch römische Ziffern
gekennzeichnet wurden. Jede Station war gegen die thermischen
Einflüsse der benachbarten Standorte isoliert.

Der Graben wurde in unmittelbarer Nähe der Wetterstation
der Universität Stuttgart (<https://lhg-902.iws.uni-stuttgart.de>)
angelegt, an der die folgenden hydrometeorologischen Größen
gemessen werden:

- » Einfallende Langwellenstrahlung
- » Einfallende Kurzwellenstrahlung
- » Lufttemperatur 2 m über dem Boden
- » Windgeschwindigkeit 2 m über dem Boden
- » Relative Luftfeuchtigkeit 2 m über dem Boden
- » Niederschlagsintensität

Am Standort befindet sich ein stationärer phreatischer Grundwas-
serspiegel in einer Tiefe von etwa 5,1 m unter der Geländeoberflä-
che, der auf einer lokalen niedrigleitenden Schicht („Arietenkalk“)
liegt. Der atmosphärische Druck wurde konstant auf einen Wert
von 101,325 Pa gesetzt, da sein Einfluss auf den Dampfdruck als
vernachlässigbar angesehen wurde.

Die Variablen Bodentemperatur und Bodenfeuchte wurden mit
insgesamt 64 Sensoren (24 Temperatursensoren in den porösen
Medien, 16 Temperatursensoren in jedem Rohr, 8 Bodenfeuch-
tesensoren) beobachtet, um die Entwicklung von Temperatur
und Bodenfeuchte von der Geländeoberfläche bis zu den Rohren
zu verfolgen. Die Temperaturen wurden mit PT1000-Sensoren
gemessen, die Bodenfeuchte mit „Teros 10“-Sensoren der Meter-
group. Die Zeitreihen aller Variablen wurden in 5-Minuten-Inter-
valLEN aufgezeichnet, gesichert und zur Datenverarbeitung in einer
hdf5-Datei mithilfe von Python (Virtanen et al., 2020) gespeichert.

Die beobachteten Daten werden mit numerischen Simulations-
ergebnissen verglichen, die durch die Einbeziehung meteorolo-
gischer Forcing Functions an der Geländeoberfläche bei Wärme-
und Wasserbilanzen erzielt wurden.

2.2 Das numerische Modell

2.2.1 Bilanzgleichungen

Die Modellierung des Wärmetransports in einem teilweise wasser-
gesättigten porösen Medium erfordert die Lösung der gekoppel-
ten Bilanzen nach Wasser und Wärme. Das von uns beobachtete
System befindet sich in der variabel gesättigten Zone, in der die
Wasserbilanz in Form der Richards-Gleichung formuliert wer-
den kann. Sie kann als vereinfachte Version der Mehrphasen-
strömungsgleichung betrachtet werden, solange eine unendlich
mobile Gasphase angenommen wird. Die Richards-Gleichung
kombiniert die mehrphasige Version des Darcy-Gesetzes mit der
Kontinuitätsgleichung für Wasser und berücksichtigt damit die
Auswirkungen des Kapillardrucks und der relativen Permeabilität.

$$\frac{\partial \phi S_w \rho_w}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ \rho_w \frac{k_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \right\} = q_w \quad (1)$$

wobei S die Sättigung, ϕ die Porosität, ρ die Dichte, μ die dyna-
mische Viskosität, k_r die relative Permeabilität in Abhängigkeit

von der Sättigung, p der Druck, q_w der Quellterm für Wasser und
 K der hydraulische Leitfähigkeitstensor ist. Der Index w steht für
Wasser. Das Richards-Modell geht davon aus, dass der Druck der
Gasphase konstant ist, d. h. in unserem Fall bei atmosphärischen
Bedingungen 1 bar. Der Druck der Wasserphase hängt von der
Wassersättigung über die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung
ab, darauf wird unten näher eingegangen. Unter der Annahme
eines thermischen Gleichgewichts zwischen Feststoff und Flüs-
sigkeit lässt sich die Wärmebilanz, die an die Richards-Gleichung
gekoppelt ist, wie folgt schreiben:

$$\phi \frac{\partial (\rho_w u_w S_w)}{\partial t} + (1 - \phi) \frac{\partial (\rho_s c_s T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w h_w \mathbf{v}_w - \lambda \nabla T) = q_h \quad (2)$$

Dabei ist u_w die spezifische innere Energie der Wasserphase, c_s
die spezifische Wärmekapazität des Festkörpers, h die spezi-
fische Enthalpie, λ repräsentiert die durchschnittliche Wärme-
leitfähigkeit des flüssigkeitsgefüllten porösen Mediums, v_w die
Wasserphasengeschwindigkeit, die sich aus dem Darcy-Gesetz
ergibt, da sie bereits implizit in Gleichung (1) eingesetzt ist, T die
Temperatur und q_h der Ausgangsbegriff für Wärme.

2.2.2 Numerische Simulationsplattform

Für die numerische Umsetzung arbeiteten wir mit DuMu^x 3 (Koch
et al., 2020; Scheer et al., 2020), einem Open-Source-Simulator
und Forschungssoftware für Strömung und Transport in porösen
Medien. Mit seinem modularen Aufbau ermöglicht DuMu^x eine
flexible Auswahl an physikalischen und Diskretisierungsmethoden
sowie Lösungsverfahren und erleichtert die Implementierung
neuer Ansätze und Anpassungen wie in diesem Forschungspro-
jekt. Für die räumliche Diskretisierung haben wir in diesem For-
schungsprojekt die Box-Methode verwendet; für Details verwei-
sen wir auf Scheer et al. (2020). Bei der Box-Methode wird ein Fi-
nite-Elemente-Netz verwendet, das die Knoten enthält, an denen
die Lösung berechnet wird, während ein sekundäres Netz kons-
truiert wird, bei dem ein Finite-Volume-Schema verwendet wird.
Somit garantiert die Box-Methode die lokale Massenerhaltung.
Das numerische Modell löst die Druckverhältnisse des Wassers in
der variabel gesättigten Bodenzone und berechnet gleichzeitig
die Wärmeausbreitung im Untergrund bis zum Trinkwasserrohr.
Dabei werden die Richards Gleichung mit einer van-Genuchten-
Parameterisierung und die Wärmeausbreitungsgleichung gelöst
(Nissler et al., 2023)

2.2.3 Modellbereich

Auf unserem Pilotversuchsort wirkt die dominierende Kraft beim
Wärme- und Wassertransport in die z -Richtung (von der Oberflä-
che zum Boden). Es gibt in horizontaler Richtung keine Kraft für
einen Transport. Die den verschiedenen porösen Medien entspre-
chenden Zonen und Bodenbedeckungen erstrecken sich hori-
zontal nur über kurze Entfernungen (senkrecht zur Länge der Rohre
etwa 0,4 m, parallel zur Länge der Rohre ca. 3 m) und sind mit
Polystyrol thermisch isoliert. Grenzflächeneffekte in horizontaler
Richtung sind sehr gering und können vernachlässigt werden.
Daher haben wir die Entscheidung getroffen die vier Stationen
unseres Aufbaus (I, II, III und IV) jeweils mit einem 1D-Modell ohne
Modellierung des Rohres der Pilotversuchsanlage darzustellen.

Wir arbeiteten mit einer täglichen Auflösung der Zeitreihen-Randbedingungen. Für die verschiedenen Abschnitte des Grabens gab es Schichten in den festen Materialien, modelliert wie in **Bild 1** zu sehen. Jede Schicht hat spezifische thermische und hydraulische Eigenschaften. Die Deckschicht wurde als separate Schicht sowohl für Gras als auch für Asphalt modelliert.

2.2.4 Randbedingungen

Die Randbedingung am Boden des Bereichs am Grundwasserspiegel wurde als Dirichlet-Randbedingung modelliert, d. h., es wurde eine konstante Temperatur und ein konstanter Druck festgelegt. Die Temperatur wurde auf 10 °C, den langfristigen Grundwasserspiegelwert, eingestellt. Der Druck wurde auf das Äquivalent von 0,9 m eingestellt, was der langfristige Grundwasserspiegel in 5,1 m unter der Geländeoberfläche ist. Die Randbedingungen an der Geländeoberfläche für Wärme und Wasserströmung wurden als Neumann-Randbedingungen festgelegt, was bedeutet, dass sowohl die Wärme als auch die Wasserströme definiert werden mussten. Um die für die Neumann-Randbedingung erforderlichen Flusswerte zu bestimmen, haben wir die Wärme und die Wasserbilanzen an der Grenzfläche berechnet.

2.2.5 Berechnung der Neumann-Randbedingungen an der Grenzfläche

Das Systemverhalten wird durch den Wasser- und Wärmeaustausch mit der Atmosphäre bestimmt. Wir gehen von einer konstanten Temperatur aus, da wir tiefere Bodenschichten erreichen, wo die Bedingungen im Laufe der Zeit konstant sein sollten. Messwerte von Umwelteinflüssen wie Strahlung und Niederschlag und die daraus resultierenden Wärme und Wasserflüsse müssen berechnet werden, um diese Einflüsse als Neumann-Randbedingungen verwenden zu können.

2.2.5.1 Wärme

Die Wärmebilanz an der Grenze kann wie folgt geschrieben werden:

$$\text{Soil heat flux} = \text{Net radiation} - \text{Latent heat flux} - \text{Sensible heat flux} - \text{Heat flux due to net Water flux} \quad (3)$$

Die Temperatur der infiltrierenden Neubildung sowie der Beitrag des evapotranspirierenden Wassers wird über die spezifische Wärmekapazität des Wassers und der Lufttemperatur in 2 m Höhe berücksichtigt.

Eingehende Langwellen- und Kurzwellenstrahlungen werden direkt gemessen. Unter Berücksichtigung der Albedo (Verhältnis von ein- und ausgehender Kurzwellenstrahlung; ω), der Oberfläche und das Boltzmannsche Gesetz für ausgehende langwellige Strahlung ergibt sich folgendes:

$$\text{Net radiation} = H_{\text{short,in}} \times (1 - \omega) + H_{\text{long,in}} - \sigma \times T_{\text{abs}}^4 \quad (4)$$

Diese Gleichung kann direkt gelöst werden, aber latente und sensible Wärmeströme können nicht direkt berechnet werden. Daher verwenden wir das so genannte Bowen-Verhältnis:

$$\frac{\text{Sensible heat}}{\text{Latent heat}} = \frac{H_{\text{sens}}}{H_{\text{ET}}} = \gamma \times \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial e}{\partial z}} \quad (5)$$

Das Verhältnis von latentem (H_{ET}) zu sensiblem (H_{sens}) Wärmestrom ist gleich dem Verhältnis der vertikalen Gradienten von Temperatur T und Dampfdruck e , multipliziert mit einer Konstanten, der so genannten psychrometrischen Konstante γ . Dies beruht auf der Annahme, dass ihre turbulenten Diffusionskoeffizienten ähnlich sind. Wir nähern nun die Gradienten von e und T über eine Höhe z durch die Differenz ihrer Messwerte in 2 m (e_m und T_m) und an der Oberfläche (e_{surf} und T_{surf}) an. Dann lösen wir die Gleichung nach H_{ET} :

$$\begin{aligned} \frac{H_{\text{sens}}}{H_{\text{ET}}} &= \gamma \times \frac{T_{\text{surf}} - T_m}{(e_{\text{surf}} - e_m)} \rightarrow H_{\text{ET}} \\ &= \frac{(e_{\text{surf}} - e_m) \times H_{\text{sens}}}{(T_{\text{surf}} - T_m) \times \gamma} \end{aligned} \quad (6)$$

Dies gibt uns eine Beziehung für H_{sens} und H_{ET} , definiert sie aber nicht. H_{ET} ist definiert als der Wärmestrom beim Phasenübergang, dies bedeutet latente Verdampfungswärme mal Wasserdichte $\Delta H_{\text{vap}} \times \rho_w$ mal der Evapotranspirationsrate ET :

$$H_{\text{ET}} = ET \times \Delta H_{\text{vap}} \times \rho_w \quad (7)$$

Zur Annäherung von ET verwenden wir nach Allen et al. (1998) die Penman-Monteith-Gleichung.

BARTHAUER
SOFTWARE

BaSYS
smart IT for smart cities



Software für das
Infrastrukturmanagement
und die Wasserwirtschaft

- Planung und Bestandserfassung
- Kataster und Fortführung
- Zustandserfassung und -bewertung
- Strategien zur Bewertung und Instandsetzung

- Vermögensbewertung
- Wartungsmanagement und Betriebsführung
- Masterplan und Generalentwässerungsplanung



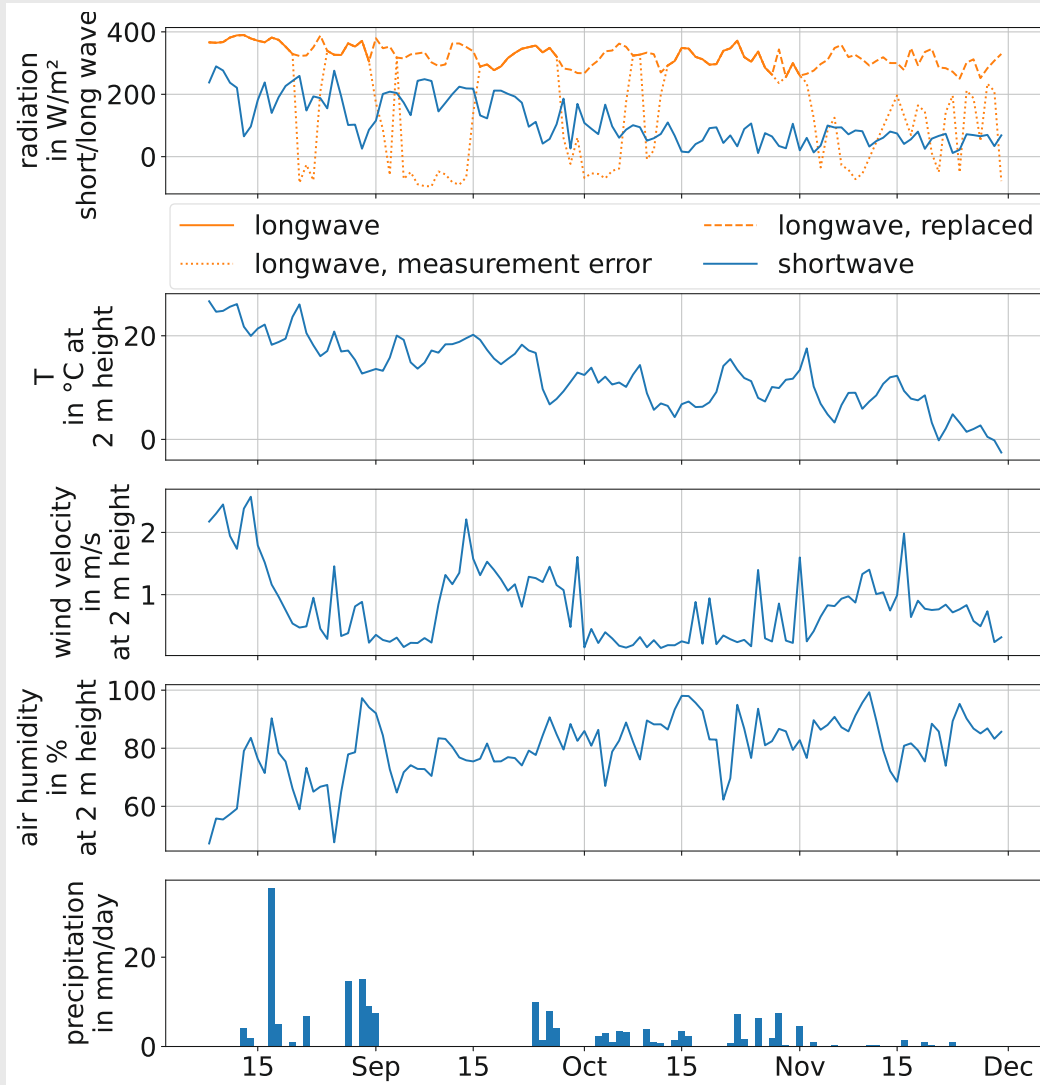


Bild 2: Meteorologische Forcing Functions: Daten der nahegelegenen Wetterstation

2.2.5.2 Wasser

Mit der in Gleichung (7) definierten ET kann die Wasserbilanz (8) gelöst werden, da die Niederschlagsintensitäten gemessen wurden.

$$\text{Incomingwater} = \text{Precipitation} - \text{Evapotranspiration (ET)} \quad (8)$$

Die Grundbilanzen gelten für den Übergang von Luft zu Boden. Die Asphaltdecke kann mit ihren Materialparametern beschrieben werden. Für die Bodenbedeckung müssen wir einen zusätzlichen Widerstand hinzufügen, da das Gras als zusätzlicher Widerstand wirkt. Dieser Widerstand kann wie in Gleichung (9) berechnet werden, allerdings mit dem Oberflächenwiderstand r_s anstelle des aerodynamischen Widerstands.

$$H_{\text{sens}} = \frac{\epsilon \times \Delta H_{\text{vap}} \times \gamma}{T_{\text{kv}} \times R_s} \times \frac{u_m}{208} \times (T_{\text{surf}} - T_m) \quad (9)$$

Die Gleichung für den Widerstand λ der Grasnarbe wird nachstehend angegeben, wobei der Wert von r_s nach Allen et al. (1998) auf 71 m s^{-1} festgelegt wird.

$$\lambda = \frac{T_{\text{kv}} \times R_s}{\epsilon \times \Delta H_{\text{vap}} \times \gamma} \times r_s \quad (10)$$

2.2.6 Kalibrierung des Modells

Die erforderlichen Modellparameter sind in unterschiedlichem Maße bekannt und sind mit unterschiedlichen Unsicherheiten behaftet. Wie bereits in der obigen Beschreibung der Randbedingungen angegeben, müssen bei einigen Modellparameter, wie z. B. bei der Durchlässigkeit des Asphalts, „scheinbare“ Werte angenommen werden, da für eine 1D-Vereinfachung unberücksichtigte multidimensionale Aspekte so einfacher integriert werden können.

3 Ergebnisse

3.1 Gemessene Daten

Die Ergebnisse der Messungen, die wir als die meteorologische Forcing Functions für die Temperaturentwicklung an den verschiedenen Stationen unsere Pilotversuchsanlage gemessen haben, sind in Bild 2 dargestellt.

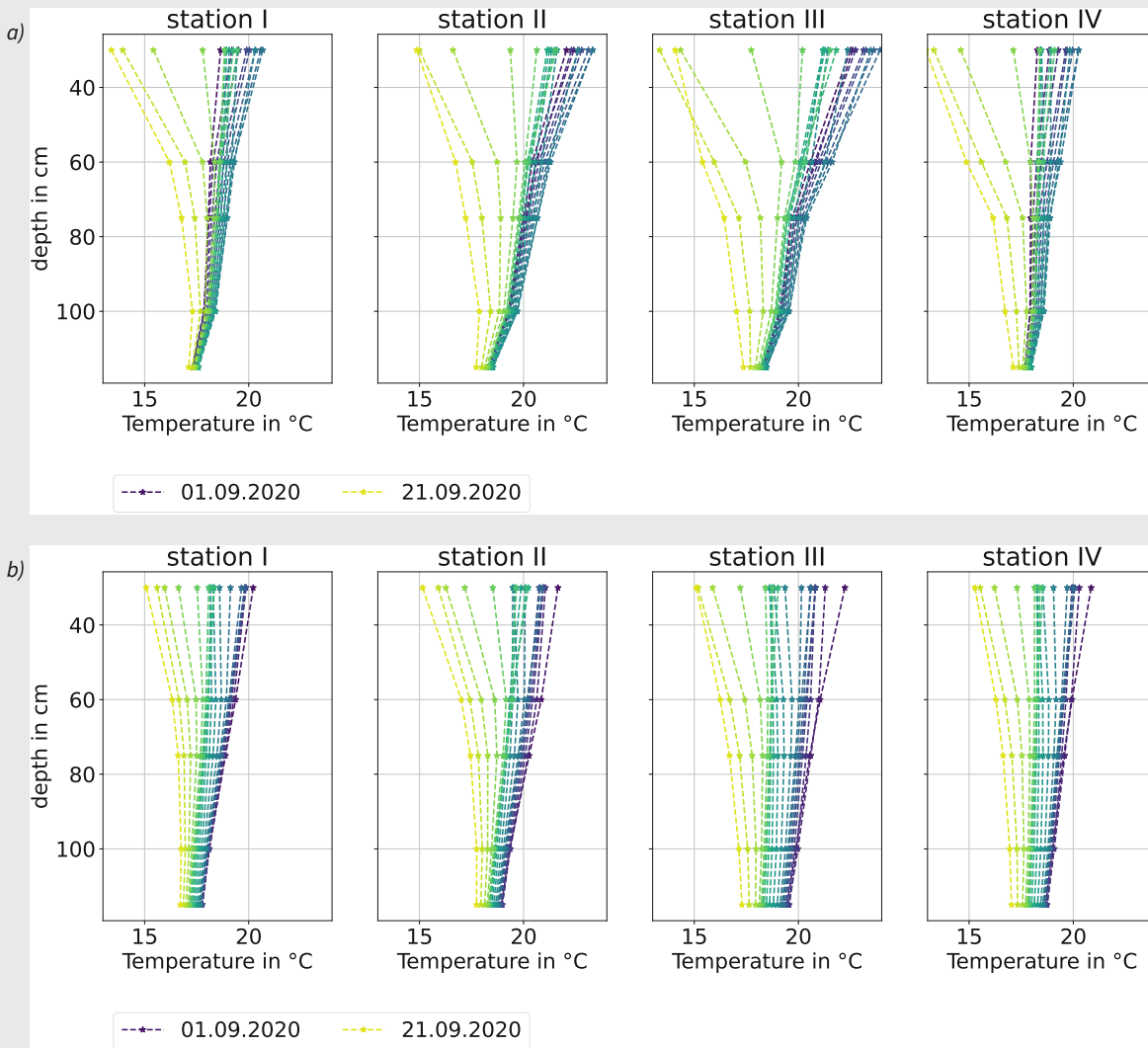


Bild 3: Entwicklung von Temperaturprofilen im Untergrund. (a) Temperatur über der Tiefe über mehrere Tage, gemessen, (b) Temperatur über Tiefe über mehrere Tage, simuliert. Die Legendendaten sind im Format TT.MM.JJJJ

Sie umfassen (von oben nach unten) lange und kurzwellige Strahlung, die Temperatur in einer Höhe von 2 m über dem Boden, die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, die Luftfeuchtigkeit und den Niederschlag. Die Daten zeigen den Übergang vom Sommer (d. h. August 2020) bis zum Winter (d. h. Dezember 2020) mit dem damit verbundenen Trend zu sinkenden Temperaturen und sinkender Strahlungsintensität sowie zunehmender Luftfeuchtigkeit.

3.2 Die Übereinstimmung zwischen Messungen und numerischem Modell

Die wichtigsten Ergebnisse dieses Forschungsprojektes sind die Kalibrierung des numerischen Modells im Vergleich zu den gemessenen Daten, die im Folgenden vorgestellt werden.

Bild 3 zeigt in zwei Teilgrafiken die Entwicklung von Temperaturprofilen im Untergrund an vier Stationen während eines Zeitraums von drei Wochen im September 2020. **Bild 3a** zeigt die gemessenen Temperaturen, und im Vergleich dazu zeigt **Bild 3b** die kalibrierten entsprechenden numerischen Simulationsergebnisse. Die Farbkodierung zeigt die Zeit vom 1. September (lila) bis zum 21. September (gelb) an. Eine größere räumliche Streuung kann unter

Asphalt (Stationen II und III) beobachtet werden. Im Gegensatz dazu wurden im Untergrund unter Gras (Stationen I und IV), kleinere Temperaturvariabilität beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass zumindest bei dieser Versuchsreihe die Art der Landnutzung einen stärkeren Einfluss auf die Temperaturentwicklung als die Bodeneigenschaften hat. Der Temperatur breitet sich unter Asphalt und mit Schotter verfüllt (Station III) mehr aus als im natürlich vorhandenen Material (Station IV), was zeigt, dass das Bodenmaterial einen Effekt auf die Temperaturverteilung hat. Im Allgemeinen ist das Modell in der Lage, die gemessene Dynamik der Bodenfeuchtigkeit bei verschiedenen Tiefen und auch unter verschiedenen Landnutzungen abzubilden.

Im Gegensatz dazu zeigen die simulierten Kurven die Auswirkungen des Niederschlags auf die Wassersättigung, d. h. auf die Bodenfeuchtigkeit feiner nuanciert. Insgesamt sanken im Zeitraum von August bis Dezember 2020 die Temperaturen im Untergrund wie erwartet nach dem Trend der saisonalen Durchschnittstemperaturen. Je tiefer unter der Geländeoberfläche, desto größer sind die Amplituden der Temperaturschwankungen abgeschwächt. **Bild 4**

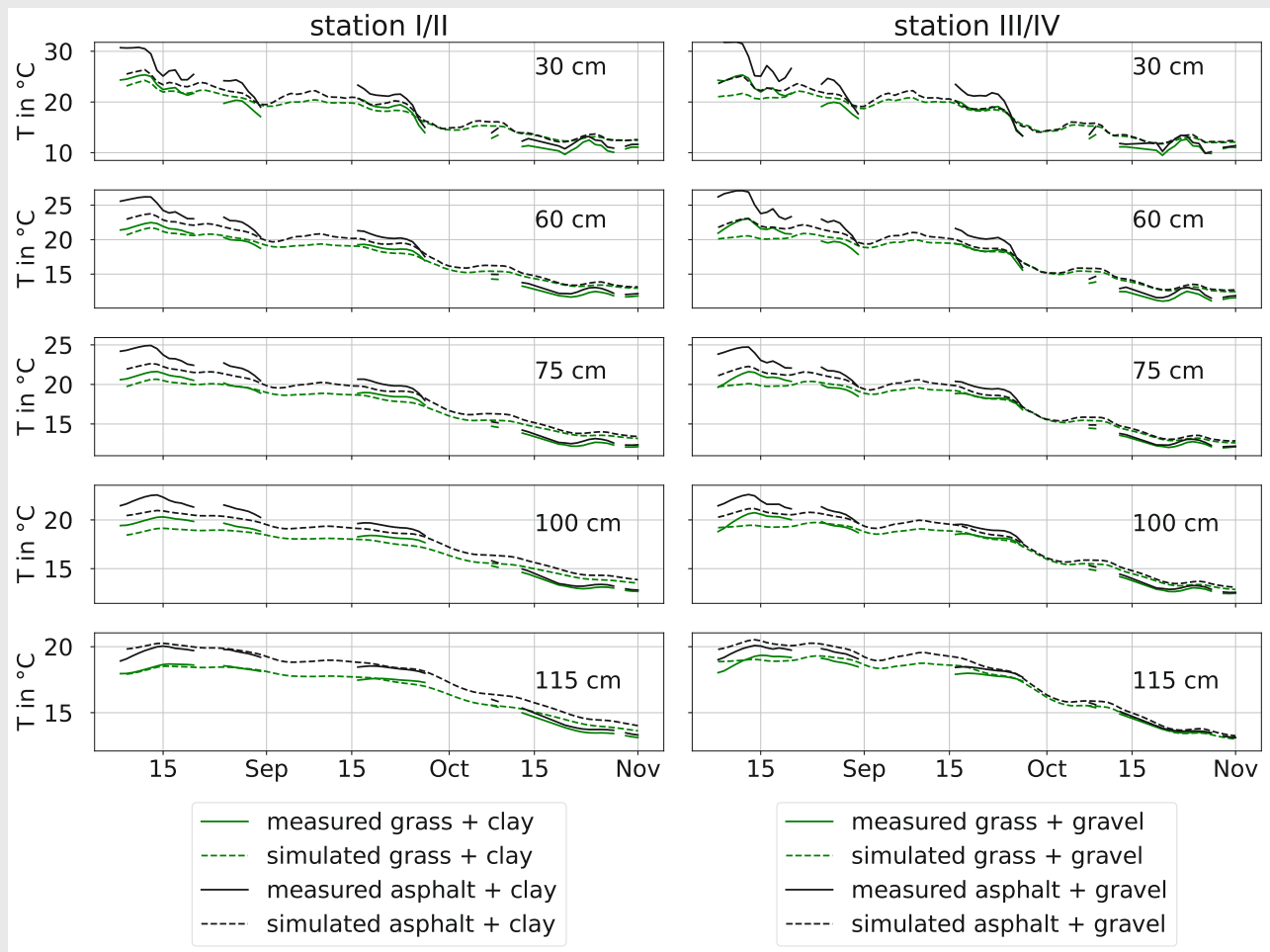


Bild 4: Simulierte (nach Kalibrierung) und gemessene Temperaturen in verschiedenen Tiefen im Zeitverlauf für alle Stationen

zeigt, wie das kalibrierte Modell die beobachteten Temperaturen in guter qualitativer Übereinstimmung wiedergibt; die Genauigkeit der Anpassung zwischen kalibriertem Modell und Beobachtung ist tendenziell in den tieferen Regionen in der Nähe der Trinkwasserleitungen besser. Die Kurven für das darunterliegende natürliche Material mit Asphalt/Gras oben (Stationen I/II) ist links dargestellt, entsprechend sind die Stationen III/IV mit darunter liegendem Schotter rechts zu sehen.

Die Asphaltbedeckung ist in schwarz und die Grasbedeckung in grün dargestellt. Die Amplituden der Temperaturen an der Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre werden mit zunehmender Tiefe größer und sind in einer Tiefe von 115 cm nicht mehr unterscheidbar. Bis zu einer Tiefe von etwa 1 m werden die kurzzeitigen hohen Temperaturamplituden gedämpft und treten am Pilotstandort mit einer Verzögerung von etwa 1 bis 2,5 Tagen auf.

Es besteht eine deutliche Diskrepanz zwischen gemessenen und simulierten Kurven für die Asphaltdecke in der Anfangszeit, was auf den noch heißen Asphalt nach dem Gießen zurückzuführen ist. Diese Diskrepanz verringert sich bis Anfang September.

Die Zeiträume, in denen die durchgezogenen Linien unterbrochen sind, weisen auf Datenlücken hin, insbesondere bedingt durch einen fehlerhaften Langwellensensor. Um das Modell lückenlos darstellen zu können, benutzen wir für diese Zeiträume die Daten der

langwelligen Strahlung aus 2015, als ähnliche statistische Momente von der Wetterstation gemessen wurden.

Offensichtlich folgen die simulierten Temperaturen meist den gemessenen Trends. Bei den absoluten Temperaturdifferenzen stellen wir fest, dass sie anfangs in geringer Tiefe kleiner als ca. 8 K sind, während sie in größerer Tiefe unter 1 K liegen. Mit dem Modell treffen wir die Temperatur nahe am Trinkwasserrohr gut. **Bild 5** und **Bild 6** sollen einen Eindruck von der Dynamik des Wärme- und Feuchtigkeits transports im Boden wie vom numerischen Modell vermitteln. Oben auf diesen Zeitdiagrammen sind die meteorologischen Forcing Functions angegeben, d. h. Gesamtwärme bzw. Gesamtwasser. Im Vergleich zwischen Stationen I und IV (beide Grasabdeckung, aber mit unterschiedlichen Schichten darunter), beobachten wir einen Unterschied in den Temperaturverteilungen: in Kies sind die Ausmaße der Zonen erhöhter Temperaturen größer bei kleineren Gradienten.

Die Kiessysteme reagieren erwartungsgemäß schneller als die lehmigen Zonen. Dieser Unterschied in der Wärmetransportdynamik ist für die Stationen II und III (mit Asphalt) kleiner. Hinsichtlich der Dynamik der Bodenfeuchtigkeit, wie sie in den Profilen der Wassersättigung über die Zeit in **Bild 6** abgebildet ist, ist zu erkennen, dass die Schotterschicht als effiziente Drainage dient (grüne Zonen). Es gibt zwar keine starken Unterschiede in

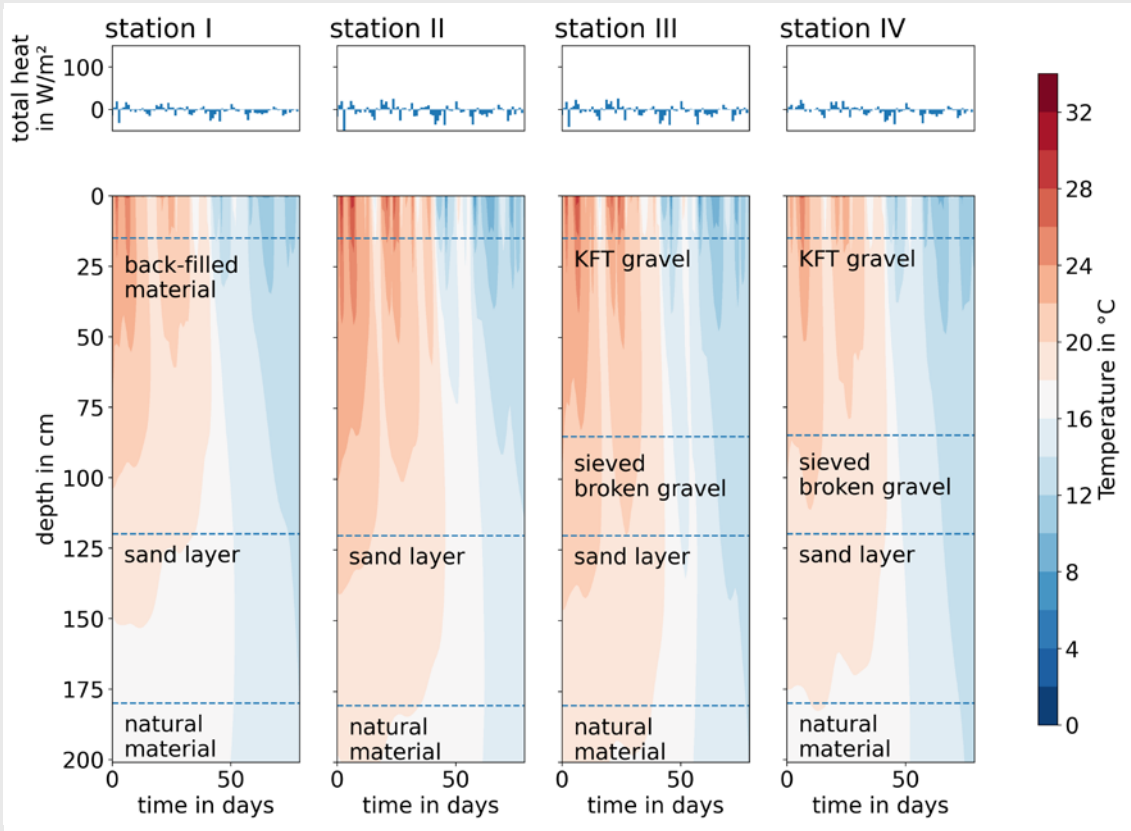


Bild 5: Bodentemperaturen aufgetragen über Zeit und Höhe mit Gesamtwärme als Antriebsfunktion (obere Felder)

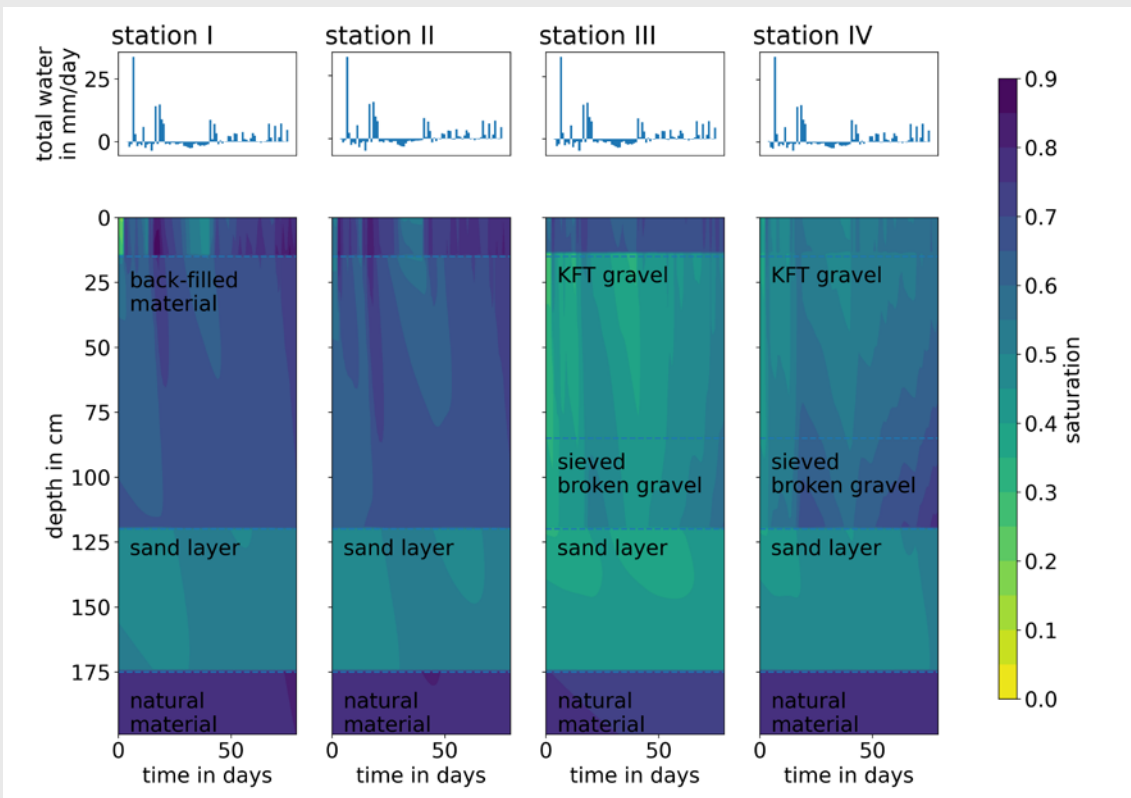


Bild 6: Konturdiagramme der Wassersättigung im Boden über die Zeit mit dem gesamten Wasserzufluss als Antriebsfunktion

der Dynamik der Bodenfeuchtigkeit zwischen Asphalt und Grasabdeckung für das verfüllte Material, die Kombination von Kies und Grasbewuchs führte jedoch tendenziell zu einem trockeneren Bodenkörper.

4 Diskussion

4.1 Die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation

Die kalibrierten numerischen Simulationen sind zufriedenstellend, teilweise passt das kalibrierte Modell sogar hervorragend zu den gemessenen Daten. Das Modell ist in der Lage die maßgeblichen physikalischen Prozesse des Wasser- und Wärmetransports von der Atmosphäre in den Untergrund zu beschreiben – nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ und auf einer saisonalen Zeitskala. Die Temperaturentwicklung wird angetrieben durch hydro-meteorologische Variablen, mit deren Hilfe die Wärmebilanz an der Geländeoberfläche aufgestellt und gelöst wird.

Es muss gesagt werden, dass die Kalibrierung nicht global optimiert wurde und keine Korrelationsmetriken berechnet wurden. Die simulierten Ergebnisse sind z. B. empfindlich gegenüber den van-Genuchten-Parametern für die relative Permeabilität und Kapillardruck. Wir haben mehrere Parametersets getestet. Dabei haben wir festgestellt, dass es für die Gesamtübereinstimmung zwischen Daten und Simulation besonders wichtig ist, die Sättigungen in den untersten und obersten Regionen anzugleichen und die van-Genuchten-Parameter entsprechend anzupassen. Das kalibrierte 1D-Modell musste mit einigen, offensichtlich mehrdimensionalen, Effekten fertig werden. Das bedeutet, dass die kalibrierten Parameterwerte nicht in allen Fällen die „echten“ Werte sind. Zum Beispiel ist die Asphaltdecke im Idealfall nahezu undurchlässig, während eine gewisse (kleine) Wassermenge an der Seite infiltrieren kann.

4.2 Zu den Anfangsbedingungen

Es gab einige Schwierigkeiten hinsichtlich der Anfangsbedingungen, die durch eine einjährige Spin-up-Phase gelöst wurden. Physikalisch lässt sich diese Phase auch dadurch erklären, dass die Verfüllmaterialien gemischt eingebaut wurden, somit die ursprüngliche (Temperatur-)Verteilung gestört wurde. Es ist auch wichtig zu beachten, dass die Messungen begannen, als der Asphalt noch frisch war und die Temperaturen einige Tage lang an der Asphalt-oberfläche erhöht waren. Bis sich diese Störungen im Untergrund ausgeglichen haben, ist noch etwas mehr Zeit verstrichen. Damit ist auch erklärt, warum die Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messungen in späteren Zeiträumen verbessert ist.

4.3 Zum Einfluss der Randbedingungen

Gras ist für praktische Messungen von variablen gesättigten Bodenparametern nicht homogen genug und Asphalt ist nicht wasser-durchlässig. Das Eindringen von Wasser erfolgt nicht durch die Asphalt-schicht selbst, da diese jedoch eine begrenzte seitliche Ausdehnung hat, von den Seiten, so dass die als 1D modellierte Situation in Realität zumindest als 2D betrachtet werden sollte. Alternativ könnte das System in 2D modelliert werden, was zu höheren Rechenkosten geführt hätte. Stattdessen haben wir die Durchlässigkeiten und van-Genuchten-Parameter so lange verändert, bis die resultierende Sättigung zu den Beobachtungen passte. Die Randbedingungen im 1D-System beeinflussen stark

die Feuchtigkeitsverteilung in den porösen Medien. Die beiden groben Schichten transportieren alles Wasser schneller. Für eine gute Kalibrierung in der Sättigung ist es wichtig, dass die Schicht unter den Rohren höhere Sättigungen aufweist als das zurückverfüllte Material, das über den Rohren rückverbaut wurde.

4.4 Zur Länge des Simulationszeitraums

Wir haben nur die Abkühlungsphase (Herbst 2020) modelliert, da Werte aus anderen Zeitspannen nicht verfügbar waren. Andere Zeiträume haben möglicherweise einen Einfluss auf die Kalibrierung.

4.5 Zu der Wärmebilanz

Die Lösung der Wärmebilanz gekoppelt mit dem Feuchtigkeitstransport verwendet eine neuartige Interface-Condition am Interface zwischen Boden und Atmosphäre. Dies beinhaltet eine Reihe von Parametern, die bestimmt werden müssen, teilweise auf der Grundlage von idealisierten Annahmen, die möglicherweise nicht so ideal sind wie angenommen. Dies betrifft insbesondere die Annahme einer großen Fläche mit konstanter Vegetationshöhe, wie sie für die Berechnung der Evapotranspiration angenommen wird. Man könnte den Ansatz im Hinblick auf eine mögliche Überparametrisierung hinterfragen. Auf der anderen Seite ergab die gekoppelte, kalibrierte Lösung eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Daten und das Modell hilft dem besseren Prozessverständnis unter Einbeziehung meteorologischer Parameter das als ebenso wichtig erachtet wird wie die zuverlässige Vorhersage der Temperaturen.

Darüber hinaus erfordern solch anspruchsvolle Modelle zuverlässige meteorologische Zeitreihen über lange Zeiträume.

4.6 Zur zeitlichen Auflösung der Daten als Input für die Modellierung

Hinsichtlich der zeitlichen Auflösung der Messdaten im numerischen Modell haben wir eine tägliche Niederschlagszeitreihe verwendet anstatt der verfügbaren stündlichen Zeitreihen. Der Grund ist, dass die tägliche Zeitreihe glatter ist und wir somit nicht das Modell zwingen, plötzliche hohe Spitzenwerte aufzulösen. Solche Extremwerte hätten zu sehr starken Veränderungen der Sättigung, insbesondere beim Schotter geführt. Relativ zur Beobachtungszeit gehen wir davon aus, dass Tagesdurchschnittswerte nicht zu signifikanten Fehlern in der Wasserverteilung im Boden führten.

5 Schlussfolgerungen

Die transiente Dynamik der Wassersättigung und der Temperaturen im oberflächennahen Untergrund wurden erfolgreich in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung und dem Verfüllungsmaterial modelliert. Hydrometeorologische Daten sind für diesen Ansatz notwendig.

Über dieses Forschungsprojekt hinaus ist die Vorhersage von Sickerwassertemperaturen für weitere Anwendungen wie in geothermischen Heiz-/Kühlsystemen insbesondere in städtischen Umgebungen von Bedeutung. Der Einfluss der Hitzebilanzen, die an den Wassertransport gekoppelt sind und somit auch die Evapotranspiration umfassen, ist besonders hoch, da das Wasser sehr hohe latente Verdampfungswärme besitzt. Die Bodenbedeckung hat den größten Einfluss auf die Temperaturen und Sättigungen im Untergrund, während die Bodenstruktur auch relevant ist, aber nicht so sehr.

AUTOREN

Gute Ausgangsdaten in allen Tiefen haben sich als entscheidend erwiesen. Sie müssen entweder bekannt sein und bei (teilweisem) Fehlen durch eine Initialisierungsperiode im Modell erhalten werden. Um eine gute Qualität der vorhergesagten Temperaturverteilung zu erreichen, ist es wichtig, korrekte Sättigungsdaten zu haben. Das Modell reagiert empfindlich auf Sättigungsparameter und Strahlungsdaten, während die Dichte, die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit robuster sind. Es sind weitere Kalibrierungs- und Validierungsmaßnahmen erforderlich. Diesbezüglich planen wir auch die Frühjahrssaison, in der die Temperaturen eher steigen, und ganze Kalenderjahre zu kalibrieren. Damit sollte die Aussagekraft des Modells weiter steigen damit wir mit diesem Modell die Temperatur der Grundwasserneubildung in der ungesättigten Bodenzone besser beschreiben können und somit resiliente Trinkwasserrohrnetze auslegen.

Literatur

- [1] Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Chapter 2–fao penman-monteith equation. Crop evapotranspiration–Guidelines for computing crop water requirements (Irrigation and Drainage Paper no. 56). <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm>
- [2] Bittelli, M., Ventura, F., Campbell, G. S., Snyder, R. L., Gallegati, F., & Pisa, P. R. (2008). Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. *Journal of Hydrology*, 362(3-4), 191–205
- [3] Chen, L., Aalto, J., & Luoto, M. (2021). Decadal changes in soil and atmosphere temperature differences linked with environment shifts over northern eurasia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(3), e2020JF005865
- [4] Koch, T., Glaeser, D., Weishaupt, K., Ackermann, S., Beck, M., Becker, B., Burbulla, S., Class, H., Coltman, E., Emmert, S., Fetzner, T., Grueninger, C., Heck, K., Hommel, J., Kurz, T., Lipp, M., Mohammadi, F., Scherrer, S., Schneider, M., ... Flemisch, B. (2020). Dumu x 3 - An open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling. *Computers & Mathematics with Applications*, 81, 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.02.012>
- [5] Nissler, E., Scherrer, S., Class, H., Müller, T., Hermannspan, M., Osmancevic, E., Haslauer, C. (2023) Heat transport from atmosphere through the subsurface to drinking-water supply pipes, *Vadose Zone Journal*. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20286>
- [6] Osmancevic, E., & Hüsam, S. (2021). Einfluss des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung in Süddeutschland. *gwf Wasser und Abwasser*. <https://gwf-wasser.de/produkt/einfluss-desklimawandels-auf-die-trinkwasserversorgung-in-sueddeutschland/>
- [7] Saito, H., Šimůnek, J., & Mohanty, B. P. (2006). Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 784–800. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0007> Sandor, R., & Fodor, N. (2012). Simulation of soil temperature dynamics with models using different concepts. *The Scientific World Journal*, 2012, 590287
- [8] Scheer, D., Class, H., & Flemisch, B. (2020). Subsurface environmental modelling between science and policy. *Springer Cham*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51178-4>
- [9] Yang, J., & Wang, Z.-H. (2014). Physical parameterization and sensitivity of urban hydrological models: Application to green roof systems. *Building and Environment*, 75, 250–263

SCHLAGWÖRTER: Klimawandel, Lufttemperatur, Bodentemperatur, Trinkwassertemperatur, Wärmetransport, Wellenstrahlung, Trinkwasserrohrnetz



Auflösung 160

PD Dr.-Ing. **CLAUS HASLAUER**
 Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart
 Tel. +49 711 685 64716
 Claus.Haslauer@iws.uni-stuttgart.de



Auflösung 180

ELISABETH NISSLER
 Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart
 Tel. +49 711 685 64717
 Elisabeth.Nissler@iws.uni-stuttgart.de



SAMUEL SCHERRER
 ehem. Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart



Auflösung 120

HOLGER CLASS
 Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart
 Tel. +49 711 685-64678
 Holger.Class@iws.uni-stuttgart.de



Prof. Dr.-Ing. **ESAD OSMANCEVIC**
 RBS wave GmbH, Stuttgart
 Tel. +49 711 185 71-520
 E.Osmancevic@rbs-rave.de



MARK HERMANNSPAN
 RBS wave GmbH, Stuttgart
 Tel. +49 711 185 71-
 M.Hermannspan@rbs-wave.de



TANJA RANK
 RBS wave GmbH, Stuttgart
 Tel. +49 711 185 71-
 T.Mueller@rbs-wave.de