



Thomas Haueisen, BSc

Modellierung des Wärmeeintrags und des Wärmetransports durch eine künstliche Grundwasseranreicherungsanlage im Grundwasserkörper Unteres Murtal

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Kupfersberger

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. BSc. Markus Pichler

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, 9. Jänner 2020

Kontakt:
Thomas Haueisen
thomas.haueisen@gmx.at

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

9. Jänner 2020

Datum / Date



Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt dabei:

Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Kupfersberger für die engagierte Betreuung, die vielen konstruktiven Gespräche und die Geduld, alle meine Fragen zu beantworten.

Den Mitarbeitern des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, die mir während der Entstehung der Arbeit mit Rat und anregenden Ideen zur Seite standen.

Meinen ehemaligen Kommilitonen, ohne deren Hilfe und Unterstützung ein positiver Abschluss des Studiums undenkbar gewesen wäre.

Meinen Eltern, für ihre aufopfernde Fürsorge und dafür, dass sie in allen Lebenssituationen stets hinter mir stehen.

Der Firma DHI, welche diese Arbeit durch das zur Verfügung stellen der Modellierungssoftware erst ermöglicht hat.

Kurzfassung

In Österreich wird Trinkwasser nahezu vollständig aus Grund- und Quellwasser generiert, etwa die Hälfte davon wird aus Grundwasser gewonnen. Um die Trinkwasserqualität des Grundwassers auch in Zukunft bei steigender Nutzung des Untergrundes, der existierenden Landnutzung und den zu erwartenden Klimaveränderungen aufrecht zu erhalten, ist Anreicherung, nachhaltige Nutzung und Überwachung der Grundwasserkörper unumgänglich.

Im Raum Fluttendorf und Donnersdorf im Unteren Murtal wird eine künstliche Versickerungsanlage zur Anreicherung des Grundwassers betrieben, da dort aufgrund hoher Nitratkonzentrationen im Zustrombereich die Trinkwasserqualität langfristig nicht mehr gesichert war.

Da die Temperatur des Grundwassers ein Schlüsselparameter für verschiedene physikalische, chemische und mikrobielle Prozesse ist, wurde im Zuge dieser Masterarbeit ein Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell dieser künstlichen Grundwasseranreicherung erstellt, um örtliche Temperatureinflüsse im Grundwasser vorhersagen und simulieren zu können. Das Hauptaugenmerk galt dabei dem Vermischungsvorgang zwischen dem örtlichen Grundwasser und dem an der Versickerungsanlage versickerten Wasser.

In Zukunft soll das vertikale 2D-Modell zur Erstellung von Prognosen und Trends der Grundwassertemperatur im modellierten Grundwasserkörper dienen und diverse Szenarien der Wärmeeinbringung in den Untergrund und deren Folgen analysieren können.

Schlüsselwörter:

Grundwassertemperatur,

Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell (2D-vertikal-Modell),

künstliche Grundwasseranreicherung

Abstract

In Austria, drinking water is almost entirely generated from groundwater and spring water, about half of which is obtained from groundwater. In order to maintain the water quality of the groundwater in the future, with increasing use of the subsoil, the existing land use and expected climate changes, enrichment, sustainable utilization and monitoring of the aquifers is essential.

In the area of Fluttendorf and Donnersdorf in the Lower Murtal, an artificial infiltration system is operated to enrich the aquifer, as drinking water quality was no longer guaranteed in the long term due to high nitrate concentrations in the catchment area.

As the temperature of the groundwater is a key parameter for various physical, chemical and microbial processes, this master thesis has developed a groundwater flow and heat transport model of this artificial groundwater recharge plant to predict and simulate local temperature effects in groundwater. The main focus was on the mixing process between the local aquifer and the infiltrated water at the infiltration plant.

In the future, the vertical 2D model will be used to generate forecasts and trends of the groundwater temperature in the modeled aquifer and to analyze different scenarios of heat input into the subsoil and its consequences.

Keywords:

groundwater temperature,

groundwater flow and heat transport model (2D-vertical-model),

artificial groundwater enrichment

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Motivation	2
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Grundlagen	3
1.3.1	Wassertransport	3
1.3.2	Wärmetransport.....	5
1.3.3	Rechtliche Grundlagen	8
2	Beschreibung des Untersuchungsgebietes, der Anlagen und der Daten	11
2.1	Hydrologische Eigenschaften des Untersuchungsgebietes	11
2.2	Beschreibung der Anlagen.....	12
2.2.1	Lage	12
2.2.2	Technische Beschreibung	13
2.3	Daten	14
2.3.1	Hydraulische Daten	14
2.3.2	Thermische Daten	17
3	Modellerstellung	23
3.1	Verwendete Software.....	23
3.2	Lokales Strömungsmodell.....	24
3.2.1	Netzgenerierung	24
3.2.2	Hydraulische Randbedingungen und Bodenkennwerte.....	26
3.3	Regionales Strömungsmodell	29
3.3.1	Netzgenerierung	29
3.3.2	Hydraulische Randbedingungen und Bodenkennwerte.....	30
3.3.3	Korrektur der Versickerungsmenge	31
3.4	Wärmetransportmodell.....	34
3.4.1	Temperaturrandbedingungen	34
4	Ergebnisse und Diskussion	37
4.1	Lokales Strömungsmodell.....	37
4.2	Regionales Strömungsmodell	38

4.3 Wärmetransportmodell	42
5 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick	47
Literaturverzeichnis	49
Anhang	i
Anhang A.....	ii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Darcy-Versuch mit homogenen Sandsäulen (Bear & Verruijt, 1987).....	4
Abbildung 2-1: Lage der Anlagen und Messstellen; Isolinien der Grundwasserströmung (https://gis.stmk.gv.at/atlas/, 04.09.2019, mod.)	12
Abbildung 2-2: Aufbau der Messstelle V1-1 (Fank et al., 2012).....	13
Abbildung 2-3: Schnittansicht der künstlichen Versickerungsanlage in Fluttendorf (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2009)	14
Abbildung 2-4: Grundwasserstandpegel der Messstellen UM13a, V1-1 und V1-2	15
Abbildung 2-5: Grundwasserneubildungsrate für das gesamte Untere Murtal.....	15
Abbildung 2-6: Beispiel für Messlücken und Loggerfehler im Datensatz der Versickerungsrate.....	16
Abbildung 2-7: Nach Kategorien ausgebesserte Messlücken und Loggerfehler	17
Abbildung 2-8: Ganglinie der Lufttemperatur an der Versickerungsanlage V1.....	18
Abbildung 2-9: Ganglinie der Wassertemperatur des zu versickernden Wassers.....	19
Abbildung 2-10: Ganglinie der Bodentemperatursonde TH02 im Vergleich mit der Lufttemperatur und der Bodentemperatursonde TH07	20
Abbildung 2-11: Temperaturganglinien der Saugkerzen SK06 - SK10 (Die Messwerte von SK07 wurden vernachlässigt); Temperaturganglinie der Mittelwerte von SK06 - SK10	21
Abbildung 2-12: Temperaturganglinien der Messsonde V1-1 und der Saugkerze SK09; Ganglinie der für die Kalibrierung des Wärmetransportmodells verwendeten Kombination.....	22
Abbildung 2-13: Zusammenfassung aller für das Wärmetransportmodell verwendeten Temperaturganglinien.....	22
Abbildung 3-1: Skizze des Aufbaus des lokalen Strömungsmodells (Supermesh).....	25
Abbildung 3-2: Generiertes Maschennetz des lokalen Strömungsmodells mit "Observation Points".....	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-3:	Interpolierte Grundwasserstandpegel der Zu- und Abflussrandbedingungen für das lokale Strömungsmodells	27
Abbildung 3-4:	Skizze der Eingangsgrößen des lokalen Strömungsmodells	29
Abbildung 3-5:	2D-horizontal-Modell zur Korrektur der Versickerungsmenge	32
Abbildung 3-6:	2D-vertikal-Modell zur Korrektur der Versickerungsmenge mit "Observation Points"	33
Abbildung 3-7:	Skizze der Temperatureingangsgrößen des Wärmetransportmodells	35
Abbildung 4-1:	Ganglinienvergleich der gemessenen Grundwasserstandpegel und der simulierten Werte des lokalen Strömungsmodells	37
Abbildung 4-2:	Residuen des lokalen Strömungsmodells	37
Abbildung 4-3:	Ganglinienvergleich der Grundwasserstandpegel des regionalen Strömungsmodells vor und nach der Kalibrierung	40
Abbildung 4-4:	Residuen des regionalen Strömungsmodells vor und nach der Kalibrierung	41
Abbildung 4-5:	Vergleich der gemessenen Grundwasserstandpegel mit den zeitgleich berechneten Werten des regionalen Strömungsmodells	41
Abbildung 4-6:	Ganglinienvergleich der Temperaturen des Wärmetransportmodells vor der Kalibrierung und danach	44
Abbildung 4-7:	Residuen des Wärmetransportmodells vor und nach der Kalibrierung	45
Abbildung 4-8:	Vergleich der gemessenen Grundwassertemperaturen mit den zeitgleich berechneten Werten des Wärmetransportmodells	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit einiger Bodenbestandteile und Böden (Van Wijk & De Vries, 1963, mod.).....	6
Tabelle 3-1: Koordinaten der Anlagen und Messstellen im Bundesmeldenetz (Mach et al, 2019)	27
Tabelle 3-2: Eingangsgrößen des lokalen Strömungsmodells	28
Tabelle 3-3: Bezeichnung, Typ und Lage der Sensoren an der Messstelle V1-1	30
Tabelle 3-4: Absolute Höhen der Messstellen und Anlagen.....	30
Tabelle 3-5: Art, Wert und Vergleich der Herkunft der Eingangsgrößen des regionalen und des lokalen Strömungsmodells	31
Tabelle 3-6: Temperatureingangsgrößen des Wärmetransportmodells	35
Tabelle 4-1: Kalibrierungsparameter des hydraulischen Strömungsmodells.....	39
Tabelle 4-2: Werte der objektiven Gütekriterien des regional Strömungsmodells.....	42
Tabelle 4-3: Kalibrierungsparameter des Wärmetransportmodells	42
Tabelle 4-4: Werte der objektiven Gütekriterien des Wärmetransportmodells	46

Abkürzungsverzeichnis

BM GFJ	Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend
GZÜV	Gewässerzustandsüberwachungsverordnung
EU	Europäische Union
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWSP	Grundwasserstandpegel
BMN	Bundesmeldenetz
m ü.A.	Meter über Adria
RB	Randbedingung
SK	Saugkerze

1 Einleitung

Im Osten Österreichs und damit auch im Unteren Murtal stellen die dort vorhandenen Talgrundwasserkörper ein hervorragendes Reservoir für die Trinkwasserversorgung dar. Der Wasserversorger "Wasserverband Wasserversorgung Grenzland Südost" betreibt dort im Raum Fluttendorf und Donnersdorf vier Brunnen zur Trinkwassergewinnung und zur regionalen und überregionalen Versorgung der Bevölkerung. Bei diesen Brunnenanlagen war die Grundwassergewinnung mit Trinkwasserqualität aufgrund der hohen Nitratkonzentration für einen Zeithorizont von zehn bis zwanzig Jahren nicht gesichert. Für die kurz- bis mittelfristige Sicherung der Trinkwasserqualität wurde daher eine künstliche Anreicherung des Grundwassers im Einzugsgebiet der beiden am stärksten betroffenen Brunnenstandorte Fluttendorf 2 und Donnersdorf 1 errichtet, an welcher Wasser mit niedrigerer Nitratkonzentration aus anderen Teilen des Grundwasserkörpers versickert wird. (Kupfersberger et al., 2014)

In Österreich wird Trinkwasser nahezu vollständig aus Grund- und Quellwasser generiert, etwa die Hälfte davon aus Grundwasser (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018). Nicht nur deshalb ist der Grundwasserschutz eine vom Gesetzgeber vorgegebene Pflicht, sondern ein Anliegen der Gesellschaft, der Wirtschaft und der Ökologie (Fank et al., 2002). Die nachhaltige Nutzung, Anreicherung und Überwachung der Grundwasserkörper ist aufgrund der existierenden Landnutzung, den zu erwartenden Klimaveränderungen und etwaigen anderen Einflüssen, wie Nassbaggerungen oder Heizungssystemen, äußerst wichtig.

Mit Hilfe von Stofftransport- und Wärmetransportmodellen können Umwelteinflüsse und sich verändernde klimatische Bedingungen untersucht und deren Auswirkungen auf das stromabwärts gelegene Grundwasser analysiert werden.

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Während erhöhte Grundwassertemperaturen für das Heizen mit Wärmepumpen potentiellen Nutzen darstellen, sind diese für die Trinkwassernutzung eine ernst zu nehmende Gefährdung.

Die Temperatur des Grundwassers ist ein Schlüsselparameter für verschiedene physikalische, chemische und mikrobielle Prozesse. Temperaturveränderungen von wenigen °C im Temperaturbereich von 0 - 20 °C weisen zwar nur geringfügige Auswirkungen auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers auf. Die Wechselwirkung zwischen Gasen, insbesondere deren Löslichkeit, und der Temperatur, sowie die Grundwasserfauna sind hingegen weitaus sensibler. Die Bedeutsamkeit dieser Mikroorganismen und der im Grundwasser befindlichen Ökosysteme liegt im Abbau von organischen Stoffen, was wesentlich zur Reinigung des Grundwassers beiträgt. (Schartner & Kralik, 2011)

Um die zukünftige Trinkwasserqualität des Grundwassers bei steigender Nutzung des Untergrunds zu sichern, ist es notwendig die Temperatur des Grundwassers zu kontrollieren und zu überwachen.

Rund um die Anlage bei Fluttendorf und Donnersdorf wird ein Modell des Grundwasserkörpers erstellt, mit dessen Hilfe örtliche Temperature Auswirkungen im Grundwasser vorhergesagt und simuliert werden können. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit gilt dabei der Untersuchung des Vermischungsvorganges zwischen Grundwasserleiter und dem an der Versickerungsanlage versickerten Wasser.

1.2 Zielsetzung

Das generelle Ziel künstlicher Grundwasseranreicherungsanlagen ist es, eine quantitative und qualitative Verbesserung des Grundwasserleiters zu schaffen. Dies geschieht durch Versickern von Oberflächenwasser (meist Vorreinigung notwendig) oder Wasser aus anderen Teilen des Grundwasserkörpers in Versickerungsbecken, Sickerschlitze oder Schluckbrunnen.

Da Grundwasser nicht zu jeder Zeit und an jedem Ort in ausreichender Menge vorhanden ist, spiegelt sich die quantitative Verbesserung in der Erhöhung des Grundwasserdargebots wieder, was vor allem bei Grundwasserleitern mit geringer Mächtigkeit von Bedeutung ist. Die qualitativen Veränderungen werden i.d.R. durch Verdünnung und Verdrängung des aufzubereitenden Grundwasserleiters erzielt. Dabei sind örtliche Gegebenheiten, Zusammensetzung des Grundwassers, Qualität und Menge des versickerten Wassers und dessen Aufenthaltszeit im Untergrund die ausschlaggebenden Faktoren.

Im Zuge dieser Masterarbeit wird ein lokales Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell der künstlichen Grundwasseranreicherungsanlage bei

Fluttendorf und Donnersdorf erstellt, um die dynamische thermische Wechselwirkung zwischen dem in der Anlage versickerten Wasser, dem zuströmenden Grundwasser und dem Wärmeaustausch zwischen Untergrund und Atmosphäre zu untersuchen. Die simulierte Auswirkung auf die stromabwärts gelegene Grundwassertemperatur wird anschließend mit gemessenen Daten verglichen und analysiert.

Das Modell soll zukünftig zur Erstellung von Prognosen und Trends der Grundwassertemperatur des modellierten Grundwasserleiters dienen und diverse Szenarien der Wärmeeinbringung in den Untergrund und deren Folgen einbinden, darstellen und analysieren können.

1.3 Grundlagen

Im Folgenden werden Wassertransport und Wärmetransport im Boden, sowie einige rechtliche Grundlagen und Definitionen erläutert.

1.3.1 Wassertransport

In allen natürlichen Böden ist Wasser vorhanden. Ist der Porenraum vollkommen mit Wasser gefüllt, herrschen gesättigte Verhältnisse, andernfalls liegen ungesättigte Verhältnisse vor.

1.3.1.1 Potentialgesetz von BUCKINGHAM

In der ungesättigten Zone werden Wasserbewegungen über das Potentialkonzept von *Buckingham (1907)* beschrieben, nach welchem Wasser stets von Stellen höheren Potentials zu Stellen mit niedrigerem Potential fließt. Nach *Böttcher (2007)* ergibt sich das auf das Wasser im Boden wirkende *Gesamtpotential* Ψ aus der Summe aller Teilpotentiale (*Gravitationspotential* Ψ_z , *Matrixpotential* Ψ_m , *Gaspotential* Ψ_g und *Osmotisches Potential* Ψ_o), diese beschreiben alle auf ein Wasserteilchen im Boden wirkenden Kräfte:

$$\Psi = \Psi_z + \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o \quad \text{Gleichung 1-1}$$

1.3.1.2 Strömungsgleichung von DARCY

Die Basis der Grundwasserhydraulik bildet die empirisch entwickelte Strömungsgleichung von *Darcy (1856)*. Diese besagt, dass die mittlere transportierte Wassermenge, welche ein homogenes Medium laminar durchströmt, zum hydraulischen Gradienten proportional ist. Die Gleichung zum in Abbildung 1-1 dargestellten Versuch von *Darcy* mit homogenen Sandsäulen wird wie folgt beschrieben:

$$Q = -\kappa * A * \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{L} \quad \text{Gleichung 1-2}$$

Dabei ist Q die *Durchflussrate*, der *Proportionalitätsfaktor* K wird als der Durchlässigkeitsbeiwert oder auch als die hydraulische Leitfähigkeit definiert, A ist der

durchflossene Querschnitt, L stellt die Länge des durchflossenen Versuchskörpers dar und $(dh=\Phi_1-\Phi_2)$ beschreibt die Höhendifferenz der Wassersäulen im Zu- und Abfluss.

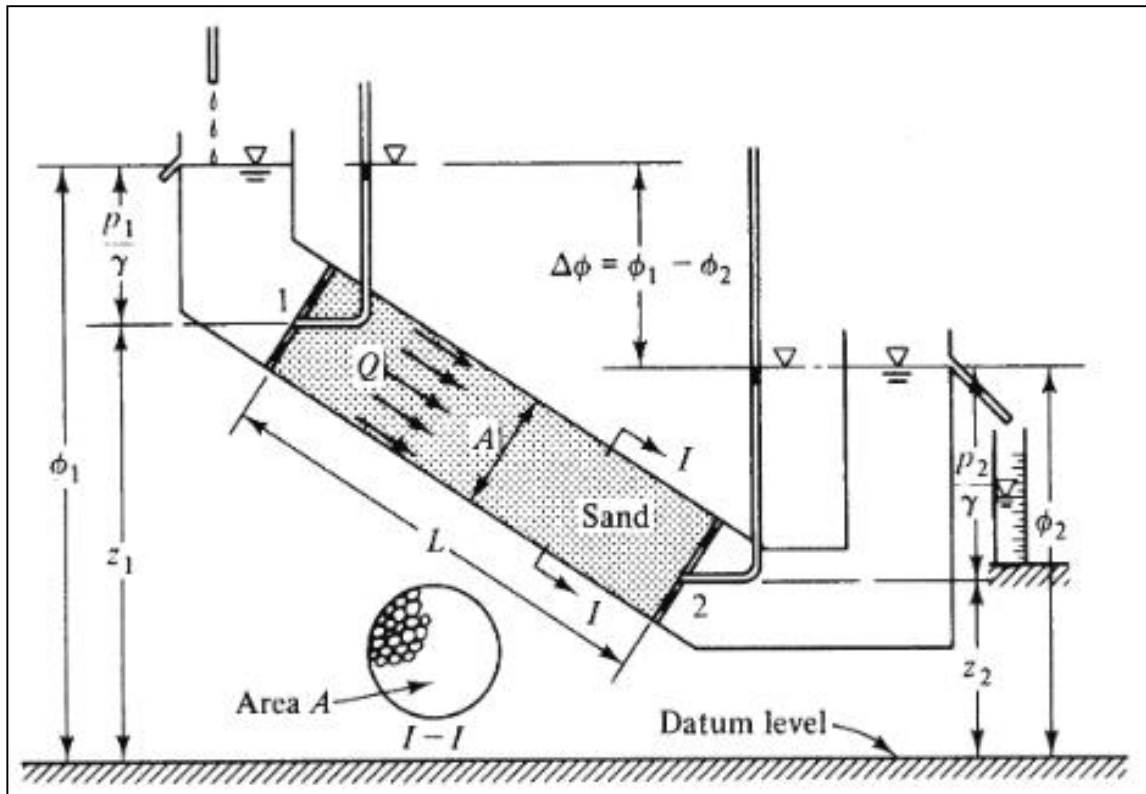


Abbildung 1-1: Darcy-Versuch mit homogenen Sandsäulen (Bear & Verruijt, 1987)

Mit dem Gradienten in Längsrichtung $dh/dl=(\Phi_1-\Phi_2)/L$ und dem spezifischen Durchfluss $q_w=Q/A$ gelangt man zur üblichen Schreibweise des Darcy-Gesetzes:

$$q_w = -\kappa * \frac{dh}{dl} \quad \text{Gleichung 1-3}$$

Der spezifische Durchfluss q_w wird auch Filtergeschwindigkeit oder Darcy-Geschwindigkeit genannt. Laut Aeschbach-Hertig (2005) beschreibt der Durchlässigkeitsbeiwert K die innere Reibung des Fluides und den Strömungswiderstand des durchflossenen Mediums.

Das Gesetz von Darcy (1856) ist nur für gesättigte Strömungsverhältnisse anwendbar. Weiters ist diese Form der Gleichung 1-3 nur für isotrope poröse Medien gültig, bei diesen ist die hydraulische Leitfähigkeit K in alle Richtungen gleich groß und der Wassertransport ist immer parallel zum Gradienten. Da poröse Medien allerdings meist anisotrop sind wird K als 3-dimensionaler Tensor (Matrix) ausgebildet und ∇h beschreibt den Gradienten in alle drei Richtungen.

$$\vec{q} = -\vec{K} * \nabla h \quad \text{Gleichung 1-4}$$

Legt man die Koordinatenachsen entlang der Hauptrichtungen der Leitfähigkeit, erhält man für K eine Diagonalmatrix:

$$\begin{matrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{matrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & & \\ & K_{yy} & \\ & & K_{zz} \end{bmatrix} * \begin{matrix} \frac{dh}{dx} \\ \frac{dh}{dy} \\ \frac{dh}{dz} \end{matrix} \quad \text{Gleichung 1-5}$$

Normalerweise ist die vertikale hydraulische Leitfähigkeit K_{zz} aufgrund der Sedimentschichtungen im Boden deutlich kleiner als die horizontalen Leitfähigkeiten K_{xx} und K_{yy} , in diesem Fall wird meist $K_{zz}=0.1*K_{xx}$ angenommen.

1.3.1.3 RICHARDS-Gleichung

Auf Basis seines Potentialkonzepts erweiterte *Buckingham* in späterer Folge das Gesetz von *Darcy*, wodurch dieses auch für ungesättigte Strömungsverhältnisse anwendbar wurde. Die hydraulische Leitfähigkeit K , welche bislang als Konstante in die Gleichung einging, wird nun als eine Funktion des Wassergehalts angesehen:

$$q_w(z, t) = -\kappa(\theta) \frac{d}{dz} * \psi_H(z, t) \quad \text{Gleichung 1-6}$$

Durch einsetzen dieser *Darcy-Buckingham*-Gleichung in die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{d\theta}{dt} - \frac{dq_w}{dz} = 0 \quad \text{Gleichung 1-7}$$

erhält man die *Richards*-Gleichung, welche das Gesetz zur Berechnung der Sickerströmungen von Fluiden in porösen Medien beschreibt, dabei sind sowohl gesättigte als auch ungesättigte Strömungsverhältnisse zulässig:

$$\frac{d}{dt} \theta(\psi(z, t)) = \frac{d}{dz} \left[\kappa(\psi(z, t)) \left(\frac{d}{dz} \psi(z, t) - 1 \right) \right] \quad \text{Gleichung 1-8}$$

Der Wassergehalt $\theta(\Psi(z,t))$ und die hydraulische Leitfähigkeit $K(\Psi(z,t))$ sind von der Funktion $\Psi(z,t)$, dem *Matrixpotential zur Zeit t* an einem Ort z , abhängig. Somit beschreibt die *Richards*-Gleichung die Änderung des Bodenwassergehalts pro Zeiteinheit in Abhängigkeit des Ortsgradienten, des Matrixpotentials und der Durchlässigkeit entlang der Raumachse. (Böttcher, 2007)

1.3.2 Wärmetransport

Wärmeleitung ist der primäre Wärmetransportprozess im Untergrund, zusätzlich tritt aufgrund der im Boden befindlichen, strömenden Wärmeträger (meist Wasser aber auch Gase) Wärmekonvektion auf. Wärmestrahlung kommt lediglich an der Erdoberfläche, an der der Temperatureaustausch zwischen Boden und Atmosphäre stattfindet, zu tragen. (Markert, 2012)

Die Eindringtiefe und die Geschwindigkeit, mit welcher Wärme transportiert wird, hängt von der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmekapazität C des Unter-

Einleitung

grundes ab. Die Wärmekapazität wird nach De Vries (1963) durch die Summe der spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Bodenkomponenten, multipliziert mit deren Volumenanteilen, gebildet. Die Wärmeleitfähigkeit ist von den einzelnen Bestandteilen des Untergrundes nicht linear abhängig und somit aufwändiger zu ermitteln (Markert, 2012). Der Wassergehalt im Boden spielt sowohl für die Wärmekapazität als auch für die Wärmeleitfähigkeit eine maßgebliche Rolle. Beide Werte steigen mit dem Vorhandensein von Wasser in flüssiger oder gasförmiger Form an, wie in der Tabelle 1-1 ersichtlich ist.

Tabelle 1-1: Spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit einiger Bodenbestandteile und Böden (Van Wijk & De Vries, 1963, mod.)

Bodenbestandteile/Böden	Spezifische Wärmekapazität C [J/gK]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Wasser	4,18	0,57
Quarz	0,8	8,8
Tonminerale	0,9	2,92
organisches Material	1,92	0,25
	Wassergehalt	
Sandiger Boden (40% Porosität)	0%	0,8
	20%	1,18
	40%	1,48
toniger Boden (40% Porosität)	0%	0,89
	20%	1,25
	40%	1,55

Nach dem Gesetz von *Fourier (1822)* ist der Wärmetransport durch Wärmeleitung analog zum Gesetz von *Darcy (1856)* in Kapitel 1.3.1.2:

$$Q = -\lambda * A * \frac{T_{H1} - T_{H2}}{d} \quad \text{Gleichung 1-9}$$

Mit dem *spezifischen Wärmestrom* $q_H=Q/A$ erhält man:

$$q_{HL} = -\lambda * \frac{dT}{dz} \quad \text{Gleichung 1-10}$$

Der *Wärmestrom* q_H ist proportional zum Temperaturgradienten, λ gibt die *Wärmeleitfähigkeit des Mediums* an, dT ist die *Änderung der Temperatur* und z beschreibt die *Dicke des durchströmten Körpers*.

Konvektion innerhalb der Bodenmatrix ist abhängig vom *spezifischen Durchfluss* q_h , der *Wärmekapazität* c_h und der *Temperatur* T des beweglichen Mediums, sowie von der Größe des Gesamtporenvolumens. Der Konvektionsterm kann wie folgt beschrieben werden:

$$q_{HK} = C_H T q_H \quad \text{Gleichung 1-11}$$

Die Summe von Wärmeleitung und Wärmekonvektion ergibt dann den Wärmetransport im Untergrund:

$$q_H = -\lambda \frac{dT}{dz} + C_H T q_H \quad \text{Gleichung 1-12}$$

1.3.2.1 Wärmeeintrag in oberflächennahe Grundwässer

Die Temperaturen oberflächennaher Grundwasserkörper werden durch den Energieaustausch zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre, der Temperatur des zuströmenden Grundwasserleiters und durch den aus dem Erdinneren zur Oberfläche gerichteten Wärmestrom, dem geothermischen Tiefengradienten, bestimmt, wobei keine der Variablen als stationär behandelt werden kann. Im Gegensatz zur Strahlung der Sonne als Hauptwärmequelle des oberflächennahen Bodens hat der geothermische Tiefengradient seinen Ursprung in der Wärmeentwicklung beim Zerfall radioaktiver Isotope im Erdinneren und wirkt über den Grundwasserstauer stabilisierend auf den darüber liegenden Grundwasserleiter ein. Der Wärmeeintrag und -austrag an der Erdoberfläche durch die Atmosphäre unterliegt grundsätzlich periodischen Schwankungen, die entsprechend dem jährlichen Verlauf der Jahreszeiten verlaufen und täglichen Schwankungen durch den Tag-Nacht-Rhythmus. Die Temperatur der Oberflächen dringt mit abnehmender Intensität in den Untergrund ein. Die Dämpfung und die Verschiebung der Grundwassertemperatur nehmen mit der Tiefe zu, wobei sich die Phasenverschiebung mit einer Verzögerung von mehreren Monaten in den Untergrund ausbreitet. (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2019)

Generell ist die Eintragungssituation von Wärme in den oberflächennahen Untergrund von vielen diffusen Faktoren abhängig. Dazu zählen unter anderen:

- die Landnutzung (z.B. Wald, Gras, Asphalt oder andere Arten der Versiegelung, landwirtschaftliche Nutzung),
- die Untergrundnutzung (z.B. U-Bahntunnel, Abwasserrohre und deren Versickerung),
- die naturräumlichen Bedingungen (z.B. Flurabstand und Oberflächengewässer) und
- die anthropogene thermische Nutzung (z.B. Gebäude, Heizungs- und Kühlsysteme).

Zuzüglich zum Wärmeeintrag durch die Atmosphäre, dem geothermischen Tiefengradienten und dem Grundwasser kommt bei einer künstlichen Versickerungsanlage eine weitere potentielle Wärmeeintragsquelle, das zu versickernde Wasser, zu tragen. Dieses wird meist in Rohren, oft über längere Strecken hinweg, zur Versickerungsanlage gepumpt und kann dadurch signifikant wärmer oder kälter sein als das Grundwasser vor Ort.

1.3.3 Rechtliche Grundlagen

Im Folgenden werden einige Begriffe und Definitionen bezüglich des Grundwassers aus den in Österreich geltenden Normen erläutert. Die Vorgaben der Europäischen Union, sowie die Gesetzeslage in Österreich, werden ebenfalls kurz beschrieben.

1.3.3.1 Definitionen der ÖNORM B 2400

Die Nachfolgenden Begriffe werden durch die ÖNORM B 2400 (2016-03-01) definiert.

Grundwasser ist unterirdisches Wasser, welches Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt, unter höherem oder gleichem Druck wie die Atmosphäre steht und dessen Bewegungen durch Schwerkraft und Reibungskräfte bestimmt wird. Dabei werden drei Typen des Grundwassers unterschieden:

- Porengrundwasser: Grundwasser in Lockermassen, deren durchflossene Hohlräume hauptsächlich aus Poren gebildet werden.
- Kluftgrundwasser: Grundwasser in Trennfugen von nicht verkarsteten Gesteinen
- Kapillarwasser: durch die Oberflächenspannung in den kapillaren Boden- oder Gesteinshohlräumen gehaltenes, unterirdisches Wasser.

Grundwasserleiter, auch Aquifere genannt, sind gut durchlässige Boden- oder Gesteinskörper, in dessen Hohlräumen Grundwasser fließen oder stehen kann.

Grundwasserstauer hingegen sind gering durchlässige Boden- oder Gesteinskörper, die als hydraulische, untere Begrenzung des Grundwasserleiters fungieren.

Der Höhenunterschied zwischen der Grundwasseroberfläche und der Grundwassersohle (Grundwasserstauer) wird **Grundwassermächtigkeit** genannt.

Der Bodenkörper oberhalb von Grundwasseroberflächen (Stockwerke möglich) wird **Grundwasserüberdeckung** genannt. Die Ausnahme bei der Benennung bildet der **Flurabstand**, welcher den Höhenunterschied zwischen der Geländeoberkannte und der Grundwasseroberkannte des obersten Grundwasserstocks beschreibt.

Grundwasser in den tieferen Schichten der Erdrinde wird als **Tiefengrundwasser** bezeichnet. Bedingt durch die oft weit entfernte Neubildung und weiträumige Überlagerung von Deckschichten, ergeben sich lange Aufenthaltszeiten im Untergrund und besondere Drucksituationen, wodurch diese Wässer meist besondere physikalisch-chemische Eigenschaften auf weisen.

Dringt Wasser in den Untergrund oder direkt in den Grundwasserleiter ein, nennt man das **Versickerung** oder **Infiltration**. Das sich dabei in der Abwärtsbewegung befindliche Wasser ist **Sickerwasser**.

Als **Grundwasserneubildung** wird das Wasservolumen bezeichnet, das einem Grundwasserkörper in einem bestimmten Zeitabschnitt, im Mittel, zufließt. Der nutzbare Anteil der Grundwasserneubildungsrate, dessen Nutzung wirtschaftlich und ökologisch vertretbar ist, wird **nutzbares Grundwasserdargebot** genannt.

1.3.3.2 Gesetzliche Regelungen in Österreich

In Österreich wird der generelle und flächendeckende Schutz des Grundwassers als Grundlage für die Trinkwasserversorgung im Wasserrechtsgesetz 1959 geregelt. Die Trinkwasserverordnung, festgelegt vom BM GFJ, ist für die Festlegung von Konzentrationsgrenzen der im Grundwasser und somit auch im Trinkwasser befindlichen Stoffe zuständig. Die Form und Häufigkeit der Kontrollen des Zustandes der Gewässer, in weiterer Folge auch des Grundwassers, wird durch die GZÜV festgelegt.

1.3.3.3 Gesetzliche Regelungen der EU

Die EU sieht in der Wasserrahmenrichtlinie im Bereich Grundwasser zwei Umweltziele und zwei Ziele speziell für Grundwasserkörper vor. Zu den Umweltzielen gehören Schutz, Verbesserung und Sanierung aller Grundwasserkörper, sowie die Gewährleistung eines Gleichgewichts zwischen Grundwasserentnahme und der Neubildung. Grundwasserkörper werden als Bewirtschaftungs- und Beurteilungseinheit festgelegt und des weiteren als abgegrenztes Grundwasservolumen innerhalb eines oder mehrerer Grundwasserleiter definiert. In Punkto Zustandsanalyse bestimmt die EU ein Verschlechterungsverbot, insbesondere die Einleitung von Schadstoffen in das Grundwasser ist zu verhindern oder zu begrenzen. Um die zeitliche Entwicklung der Schadstoffkonzentration abschätzen zu können und gegebenenfalls Maßnahmen für die Umkehrung von steigenden Trends zu ergreifen, bedarf es Trendbestimmungen.

In der Wasserrahmenrichtlinie werden Ökosysteme als legitime Wassernutzer definiert. Um diese zu schützen und zu erhalten, ist auch die Temperatur des Grundwassers und deren Trend von immenser Wichtigkeit, siehe Kapitel 1.1.

2 Beschreibung des Untersuchungsgebietes, der Anlagen und der Daten

Das Untere Murtal liegt im Süden der Steiermark und erstreckt sich vom Raum um Ehrenhausen entlang des nördlichen Ufers der Mur, welche über weite Strecken die südliche Staatsgrenze zu Slowenien bildet, bis an die östliche Staatsgrenze. Das Untersuchungsgebiet ist ein kleiner Teil des Grundwasserkörpers Unteres Murtal und befindet sich zwischen den Ortschaften Fluttendorf und Donnersdorf, welche in etwa auf halber Fahrstrecke zwischen Mureck und Bad Radkersburg liegen. Fluttendorf und Donnersdorf weisen je zwei Brunnenanlagen auf, welche gemeinsam die Trinkwasserversorgung der umliegenden Gebiete sicherstellen.

Bei diesen Brunnenanlagen war die Grundwassergewinnung mit Trinkwasserqualität aufgrund von erhöhten Nitratkonzentrationen für einen längeren Zeitraum nicht gesichert. Im Einzugsgebiet der beiden am stärksten betroffenen Brunnen Fluttendorf 2 und Donnersdorf 1 wurde daher eine künstliche Versickerungsanlage errichtet, welche die Nitratkonzentration durch Versickern von Wasser aus einem anderen Teil des Grundwasserkörpers verringert. (Kupfersberger et al., 2014)

2.1 Hydrologische Eigenschaften des Untersuchungsgebietes

Der Talraum des Unteren Murtales ist ein durch eiszeitliche Flussarbeit geprägtes, treppenförmig ansteigendes Terrassensystem mit vier Terrassen. Der Grundwasserstauer besteht aus mächtigen, jungtertiären Ablagerungen, welche an der Oberfläche von der Mur erodiert und mit quartären Sedimenten überdeckt wurden. Der steile Anstieg des Stauerreliefs zwischen den Terrassen weist ein Gefälle von 7,8 ‰ auf, im unmittelbaren Talbereich des Grundwasserstauers beträgt das West-Ost Gefälle etwa 1,6 ‰. Großteils verläuft die Grundwasserströmungsrichtung vom Talrand zum Vorfluter hin, wobei es im murnahen Bereich zu lokalen Verschwenkungen kommt. Die wasserführenden Schichten der holozänen Austufe bestehen aus Kiesen mit unterschiedlichen Sand- und Schluffanteilen und weisen auf der Niederterrasse Mächtigkeiten von 5 m bis 8 m auf. Der Grundwasserkörper in der Umgebung der Ortschaften Fluttendorf und Donnersdorf wird neben der Mur, dem Gnasbach und diversen Augewässern noch von einigen offenen Grundwasserflächen (Maierteiche, Schleinteiche und diverse Schotterteiche) beeinflusst, was vor allem für die Grundwasserstandsverhältnisse von Bedeutung ist. (Fank et al., 2002)

2.2 Beschreibung der Anlagen

Im Folgenden werden die Anlagen hinsichtlich ihrer Lage im Untersuchungsgebiet und ihrer Funktion beschrieben. Des Weiteren wird die Modellumgebung genau abgegrenzt und die für die Modellierung verwendeten Datensätze erläutert.

2.2.1 Lage

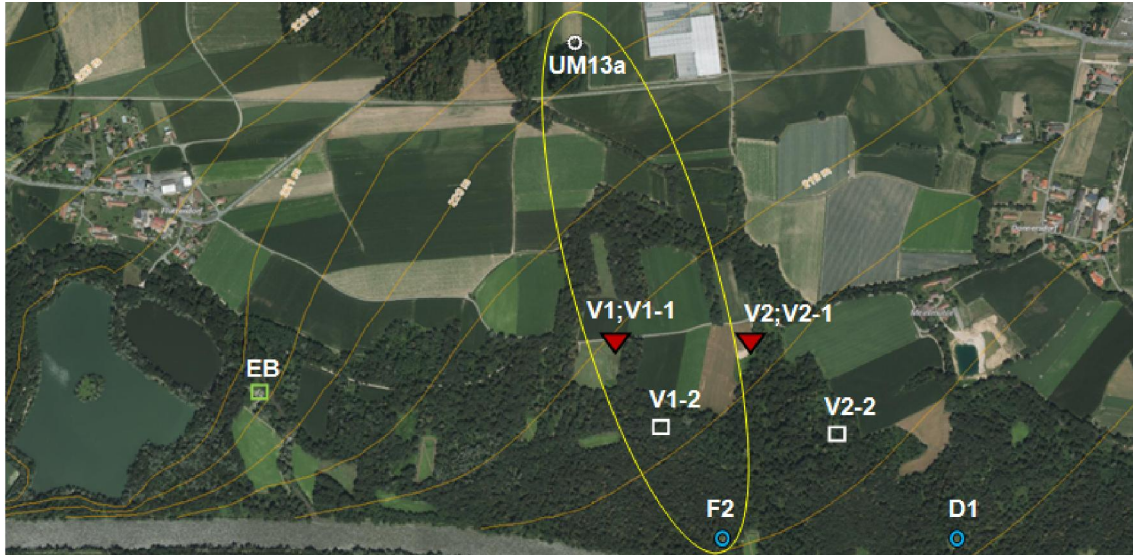


Abbildung 2-1: Lage der Anlagen und Messstellen; Isolinien der Grundwasserströmung (<https://gis.stmk.gv.at/atlas/>, 04.09.2019, mod.)

In Abbildung 2-1 sind die Lage der Anlagen und Messstellen sowie die Isolinien der Grundwasserströmung dargestellt. Die beiden Grundwasseranreicherungsanlagen (V1 und V2) und die daran gekoppelten tiefenorientierten Probenahmestellen (V1-1 und V2-1) sind durch rote Dreiecke gekennzeichnet. Die Grundwassermessstellen (V1-2 und V2-2) sind durch weiße Quadrate dargestellt und befinden sich zwischen den Brunnen Fluttendorf 2 bzw. Donnersdorf 1 (blaue Kreise) und den Versickerungsanlagen. Die Messstelle UM13a, durch einen weißen Kreis markiert, sowie der Wasserentnahmebereich (EB), aus welchem nitratarmes Wasser zur Versickerung entnommen wird, sind ebenfalls abgebildet.

Die Messstellen V1-2 und V2-2 liegen in etwa auf halber Strecke zwischen den Versickerungsanlagen und dem jeweiligen Brunnen. Sie dienen lediglich zur Pegelmessung und Probeentnahme.

In dieser Arbeit ist für das Modell lediglich der Zustrombereich des Brunnens Fluttendorf 2 (F2) von Bedeutung (siehe gelbe Ellipse), der Zustrombereich des Brunnenstandorts Donnersdorf 1, wird nicht modelliert.

2.2.2 Technische Beschreibung

Die tiefenorientierten Probenahmesonden V1-1 und V2-1 liegen jeweils fünf Meter stromabwärts der Versickerungsanlagen. Insgesamt 13 Sensoren pro Messstelle liefern Sauerstoffgehalt, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Wasserstandsmessungen zwischen Mutterboden und Grundwasserstauer, sieben weitere Bodentemperatursonden liefern Aufschlüsse über oberflächennahe Temperaturen im obersten Bodenhorizont. Der Aufbau der Messstellen ist in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

ANMERKUNG zur Abbildung 2-2: Die GOK an der Messstelle V1-1 liegt auf 222,38 m ü.A., die Rohroberkante des Abstiches befindet 1,3 m darüber.

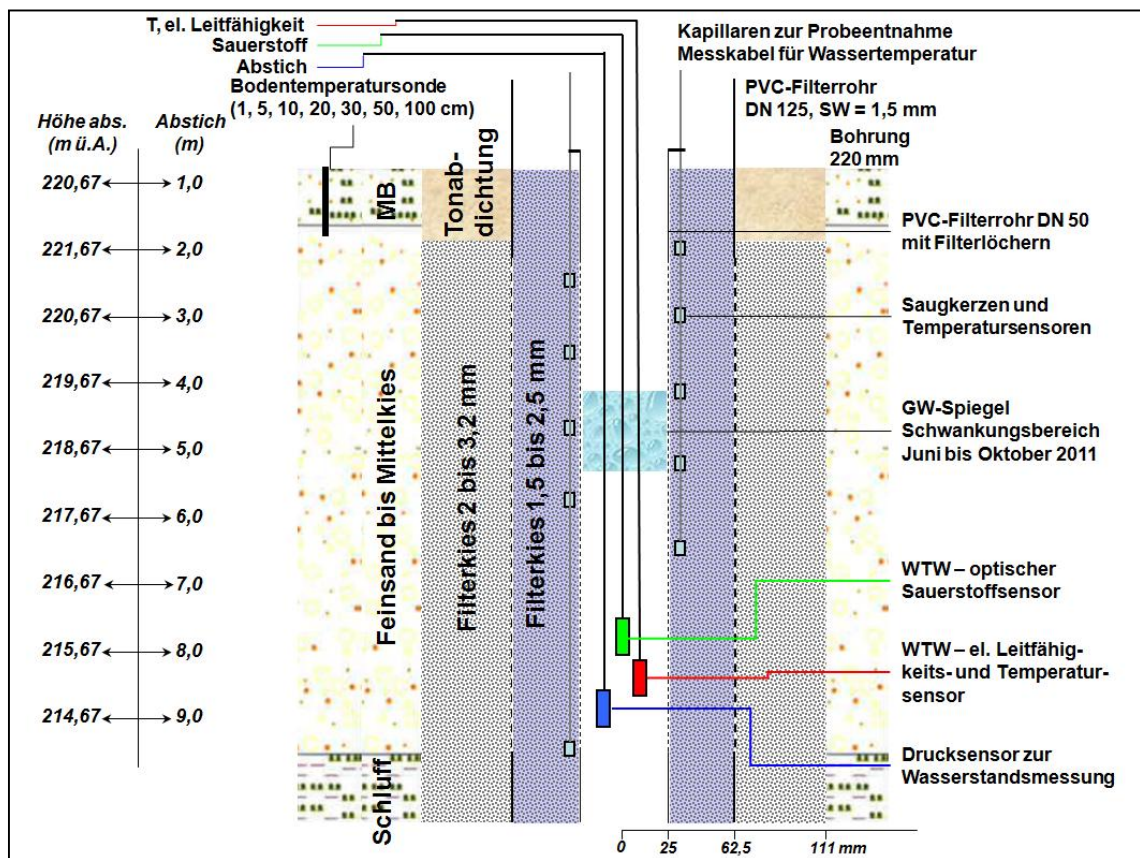


Abbildung 2-2: Aufbau der Messstelle V1-1 (Fank et al., 2012)

An der Sonde UM13a wird der auf den Förderbrunnen Fluttendorf 2 zuströmende Grundspiegel beobachtet, diese Einrichtung wird im Rahmen des Messprogramms des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung regelmäßig beprobt.

Die Gewinnung des nitratarmen Wassers zur Versickerung erfolgt durch zwei Brunnen im Entnahmbereich EB, welche alternierend betrieben werden und Entnahmemengen zwischen 6 l/s und 12 l/s liefern. Die Fördermenge des Brunnens Fluttendorf 2 schwankt zwischen 16 l/s und 22 l/s. (Kupfersberger et al., 2014)

Die Versickerungsanlage selbst besteht aus zwei baulich getrennten, begehbaren Kammern, Lüftungsanlagen, Rohren und Armaturen, drei Pumpen und drei

Sickerrohren sowie dem Filterkieskoffer. Ein vertikaler Schnitt der Anlage ist in Abbildung 2-3 abgebildet.

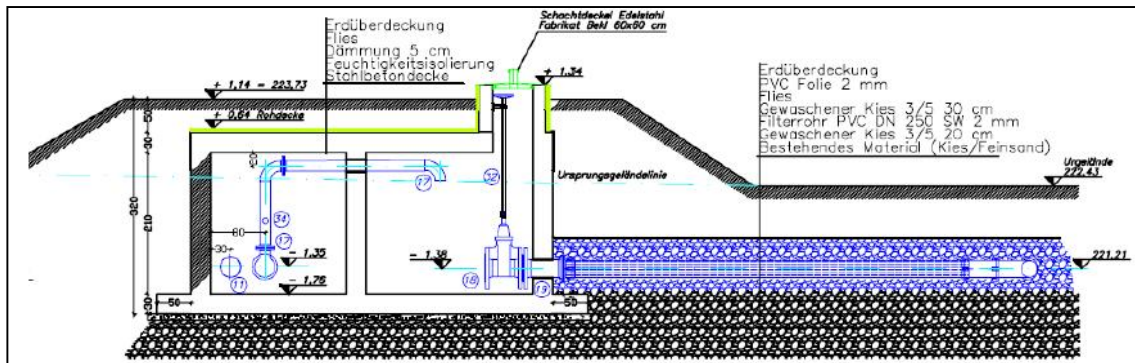


Abbildung 2-3: Schnittansicht der künstlichen Versickerungsanlage in Fluttendorf (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2009)

2.3 Daten

In diesem Kapitel werden die verwendeten Daten und Messreihen beschrieben, zur besseren Übersicht werden diese in hydraulische und thermische Daten aufgeteilt. Alle als Parameter und Eingangsgrößen verwendeten Datensätze beziehen sich auf das Jahr 2016, in diesem wird die Grundwasserströmung modelliert.

2.3.1 Hydraulische Daten

Die hydraulischen Daten sind all jene Zeitreihen welche zur Erstellung und Kalibrierung des hydraulischen Modells benötigt werden. Dazu zählen die Versickerungsrate, die Grundwasserneubildung und Pegelmessungen. Die verwendeten Messreihen und Daten wurden aus Mach et al (2019) entnommen, dieses Dokument beschreibt unter anderem Daten und Parameter eines Strömungsmodells des gesamten Unteren Murtals.

2.3.1.1 Grundwasserstand

Die hydraulischen Zu- und Abflussrandbedingungen des Modells sowie der zur Kalibrierung des Grundwasserflussmodells verwendete Datensatz der Probenahmesonde V1-1 sind Zeitreihen des Grundwasserstands. Die Zuflussrandbedingung bildet die Datenreihe der Messsonde UM13a, die Abflussrandbedingung liefert der Datensatz der Messstelle V1-2. Eine Darstellung der drei Messreihen ist in Abbildung 2-4 zu sehen. Zu erkennen ist, dass der Anstieg des Grundwassers zum Großteil im Februar und März geschah und das restliche Jahr ein stetiger Rücklauf stattfand. Die Unterschiede in der Dynamik der Messreihe von UM13a gegenüber der Zeitreihe der Messstation V1-2, ist durch dessen Nähe zum alternierend betriebenen Brunnen Fluttendorf 2 gegeben.

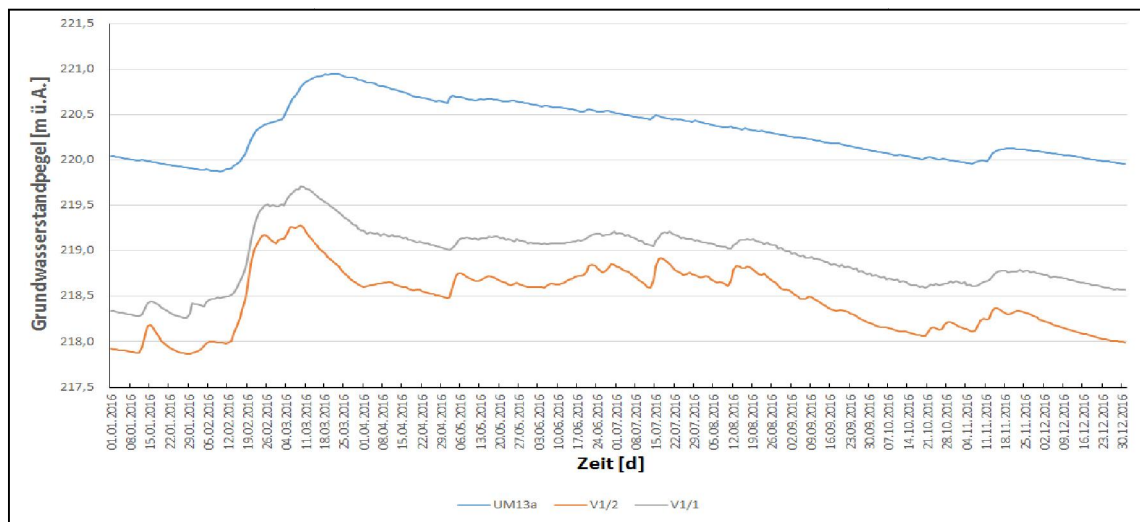


Abbildung 2-4: Grundwasserstandpegel der Messstellen UM13a, V1-1 und V1-2

Die Messdaten der Messstelle V1-2 (tägliche Messwerte) weisen am 01.12.2016 eine Datenlücke auf, welche durch lineare Interpolation der angrenzenden Tageswerte gefüllt wurde.

Die Datenreihe der Messstelle V1-1 wurde mittels Mittelwertbildung (arithmetisches Mittel) von stündlichen Messwerten auf Tageswerte zusammengefasst, dabei wurden drei fehlende Stundenwerte vom 14.09.2016 ignoriert. Der dafür verwendete Drucksensor zur Wasserstandmessung liegt laut Abbildung 2-2 in einer Tiefe von 7,5 m (214,88 m ü.A.).

2.3.1.2 Grundwasserneubildungsrate

Die Grundwasserneubildungsrate wurde aus dem Datensatz GWNB Hytop66 UMUR-GWA von Mach et al (2019) erstellt, dieser beschreibt die Neubildung für das gesamte Untere Murtal und ist in Abbildung 2-5 abgebildet. Deutlich erkennbar sind die Spitzenwerte der Neubildung im Februar und März sowie November und Dezember. In der Vegetationsperiode dazwischen erfolgte nahezu keine Grundwasserneubildung.

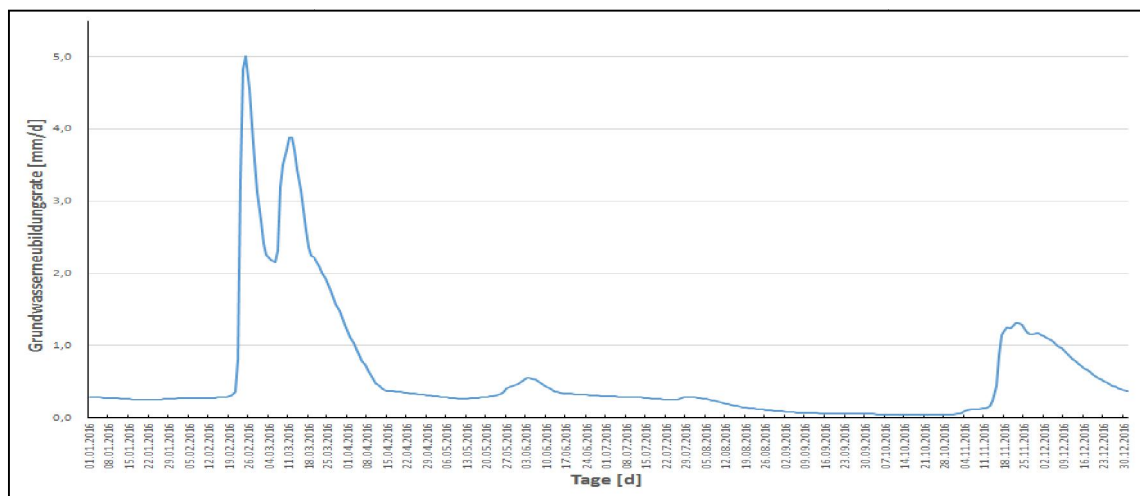


Abbildung 2-5: Grundwasserneubildungsrate für das gesamte Untere Murtal

2.3.1.3 Versickerungsrate

Der alternierende Betrieb der Versickerungsanlage begann am 29.01.2016 um 11:00 und lief größtenteils sechs Stunden, mit intermittierenden vier Stunden Pause. Davor war die Versickerungsanlage inaktiv. Die Zeitreihe der Versickerungsmenge ist als einzige Eingangsgröße des Modells auf 1h-Basis geführt, da ansonsten der stundenweise alternierende Betrieb der Versickerungsanlage im Modell nicht umgesetzt werden kann.

Die Datenreihe weist etliche, wie in Abbildung 2-6 gezeigte Messlücken (gänzlich fehlende Werte) bzw. Loggerfehler (signifikant hohe Ausreißer nach Messlücken) auf, aus diesem Grund wurde eine vierteilige Vorgangsweise entworfen, welche Unstetigkeiten ausbessert und Lücken füllt. Die Ausbesserung der Messlücken und Loggerfehler von Abbildung 2-6 ist in Abbildung 2-7 zu sehen.

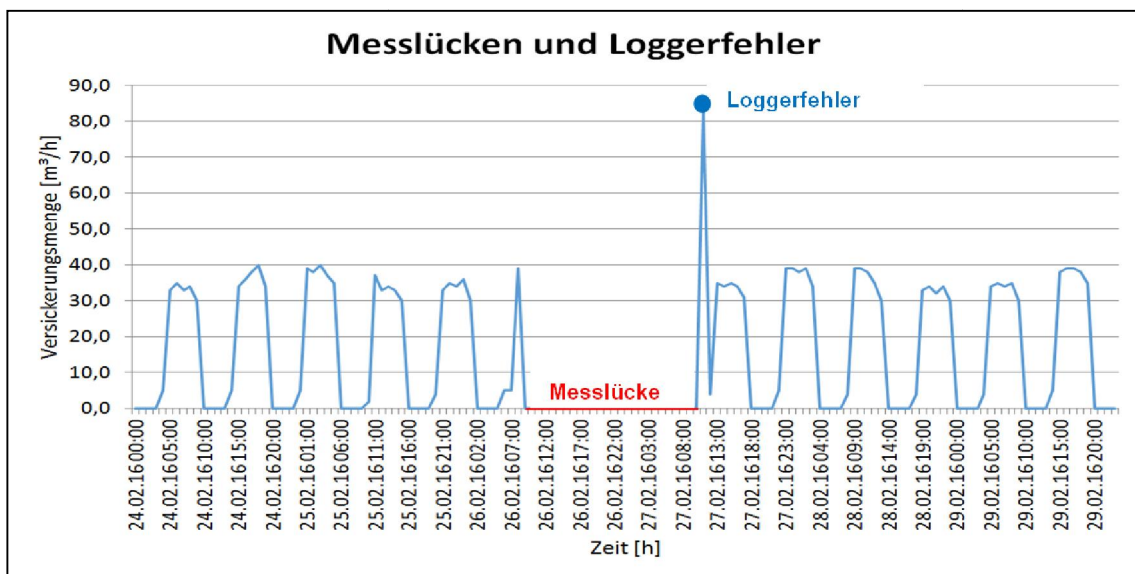


Abbildung 2-6: Beispiel für Messlücken und Loggerfehler im Datensatz der Versickerungsrate

Kategorien für fehlende Einträge (Beispiele im Anhang A):

1. Vor Versickerungsbeginn: Der Betrieb der Versickerung begann erst am 29.01.2016, davor wurde nicht versickert. Fehlende Werte im Zeitraum davor wurden mit dem Wert 0 eingefügt.
2. Während der Versickerungspause: Es wurde angenommen, dass die fehlenden Werte in der Pause zwischen den Versickerungsperioden liegen, diese Ergänzungen wurden ebenfalls mit dem Wert 0 hinzugefügt.
3. Während einer Versickerungsperiode: Die fehlenden Werte liegen in einer Versickerungsperiode, die Werte der Pausen sind allerdings vorhanden. In diesen Fällen wurden die Einträge aus den restlichen Versickerungswerten der selben Periode mit Hilfe des arithmetischen Mittels errechnet und kaufmännisch auf ganze Zahlen gerundet.

4. Große Lücken, die Pausen und Versickerungsperioden übergreifen: Fehlen mehr als drei Stunden am Stück (Ausnahme: Kategorie 1) und ziehen sich diese Messlücken über Versickerungsperioden und -pausen, wurden die Datensätze durch den arithmetischen Mittelwert des nächsten vollständigen 6h-Versickerungszyklus ermittelt. Sind einige Werte der unvollständigen Versickerungsperiode vorhanden, wurden diese in der Berechnung mit einbezogen. Diese Ersatzwerte wurden ebenfalls kaufmännisch auf ganze Zahlen gerundet.

In den Berechnungen für die Kategorien drei und vier wurden vorhandene Werte unter 15 [m³/h] nicht berücksichtigt, da diese die Ergebniswerte sehr vermindern würden.

Für offensichtlich falsche Werte durch Loggerfehler, welche des Öfteren nach Messlücken auftreten, wurde keine eigene Vorgangsweise entwickelt. Stattdessen werden diese Lücken als fehlende Werte angesehen und nach Kategorie eins bis vier behandelt.

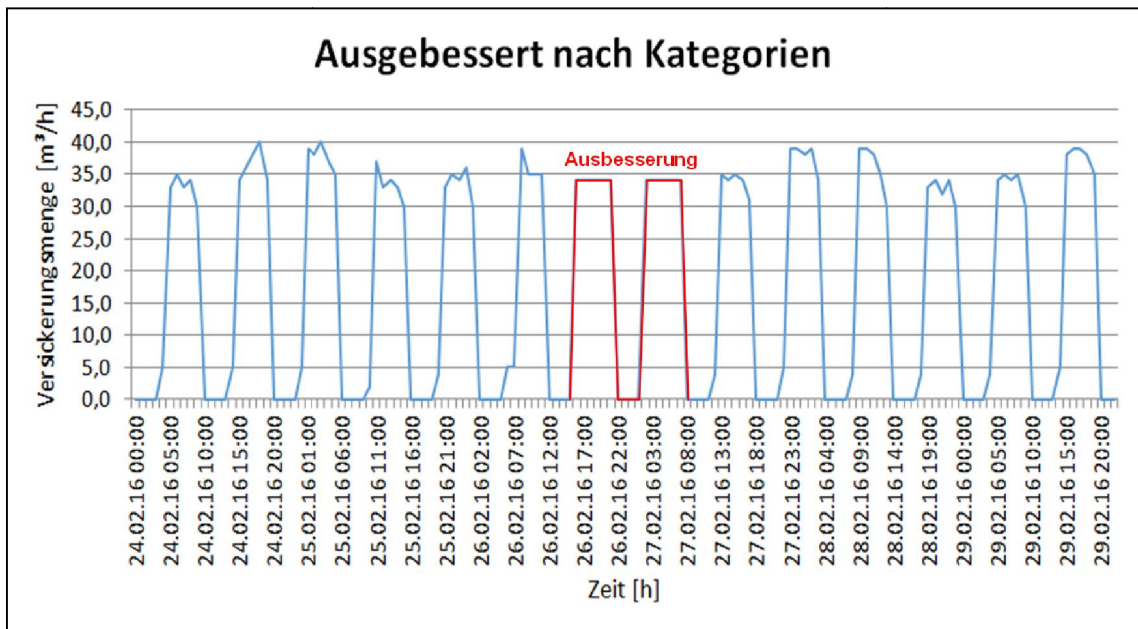


Abbildung 2-7: Nach Kategorien ausgebesserte Messlücken und Loggerfehler

ANMERKUNG:

Aufgrund der in Kapitel 3.3.3 angepassten Versickerung wurde die in Kapitel 2.3.1.3 beschriebene, ursprüngliche Zeitreihe der Versickerungsrate nur im lokalen Strömungsmodell verwendet.

2.3.2 Thermische Daten

Die thermischen Daten umfassen alle Temperaturzeitreihen, die zur Modellierung des Wärmetransportmodells benötigt wurden. Dazu zählen die Messungen der Lufttemperatur, der Temperatur des zu versickernden Wassers, der Bodentemperatursonden im obersten Bodenhorizont, der Saugkerzen in den Kies- und Sandsedimenten und die Temperatursonde V1-1 im Grundwasser, welche

zur Kalibrierung herangezogen wurde. Alle Temperaturdatenreihen wurden aus Draxler & Fank (2017) (jährliche Messungen) entnommen und mittels Mittelwertbildung (arithmetisches Mittel) von stündlichen Messwerten auf Tageswerte zusammengefasst.

2.3.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wurde direkt an der Versickerungsanlage V1 gemessen. Ihre Ganglinie ist in Abbildung 2-8 zu sehen, diese weist am 24.06. einen Maximalwert von 25,5 °C auf, die kälteste Lufttemperatur wurde mit -7 °C am 04.01. gemessen. Die Temperaturkurve der Luft unterliegt naturgemäß großen Schwankungen. Hervorzuheben sind dabei aber die Temperaturanstiege zwischen 04.01. und 24.01., 22.04. und 04.05., sowie zwischen 15.11. und 30.11.. Über das Jahr gesehen nahm die Temperatur von Ende Jänner bis Anfang Juli zu, anschließend bis Anfang Dezember wieder ab.

Bei der Zusammenfassung auf Tageswerte wurden drei fehlende Stundenwerte vom 14.09.2016 ignoriert.

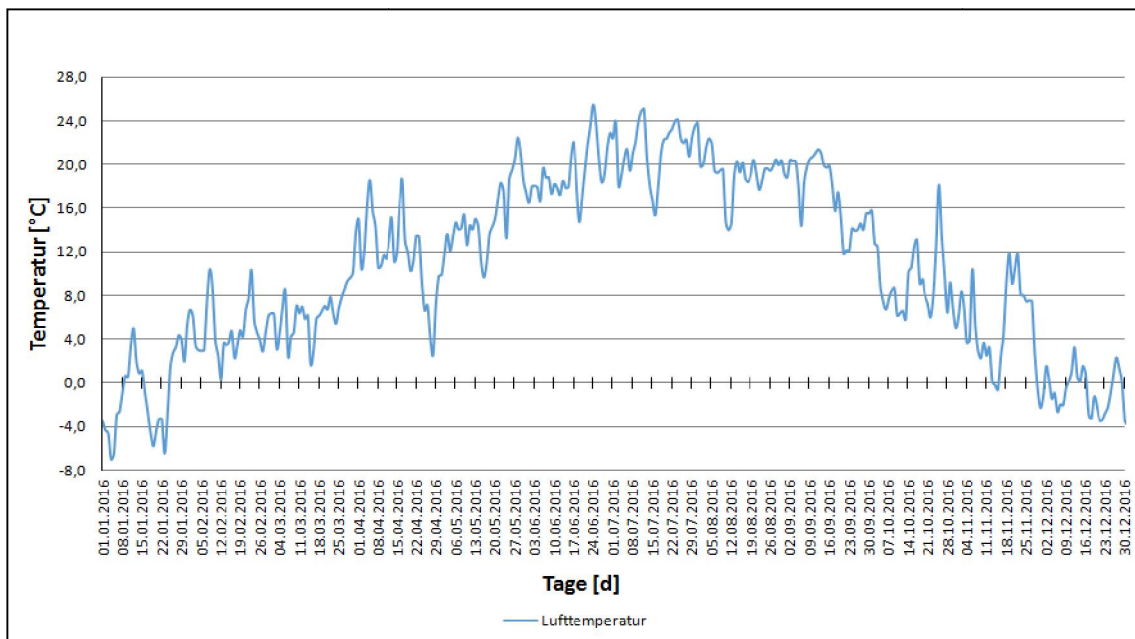


Abbildung 2-8: Ganglinie der Lufttemperatur an der Versickerungsanlage V1

2.3.2.2 Temperatur des zu versickernden Wassers

Die Temperatur des zu versickernden Wassers wird an dessen Entnahmebereich EB (siehe Abbildung 2-1) gemessen. Der Jahresgang ist in Abbildung 2-9 ersichtlich. Zu erkennen ist ein annähernd sinusförmiger Verlauf, dessen Maximalwerte Mitte Oktober mit 17 °C und Minimalwerte Mitte April mit 11,6 °C aufscheinen, was eine Phasenverschiebung zur Lufttemperatur von etwa drei Monaten und eine deutliche Dämpfung bedeutet.

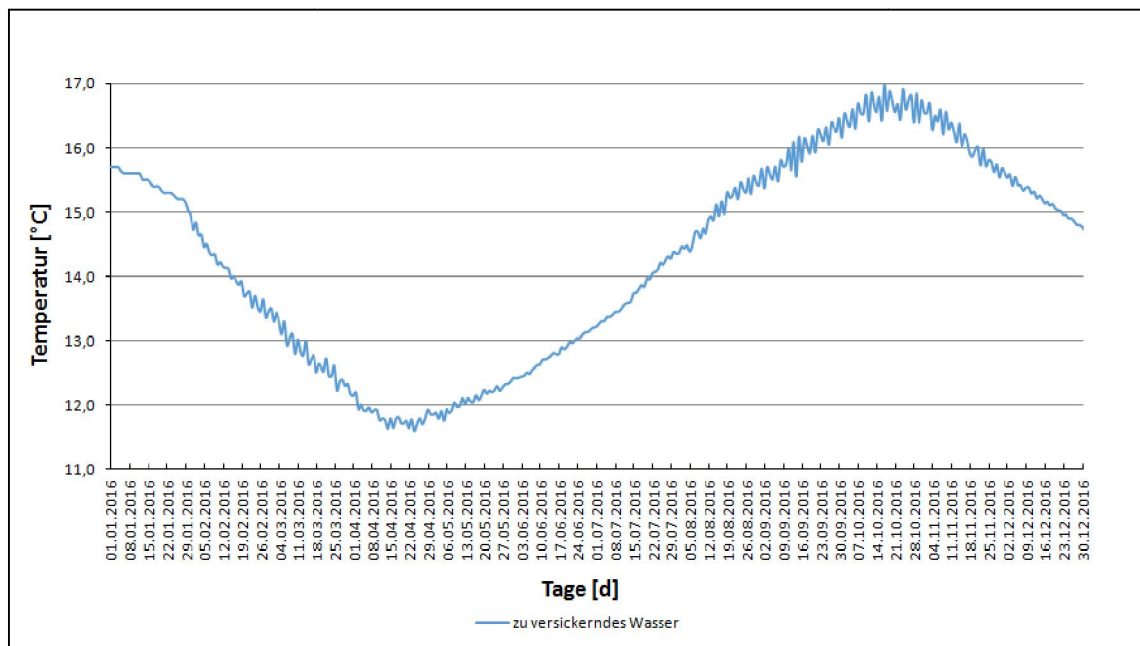


Abbildung 2-9: Ganglinie der Wassertemperatur des zu versickernden Wassers

Da die künstliche Versickerungsanlage nicht 24 Stunden durchgehend aktiv ist, wurde die Datenreihe der Temperatur des zu versickernden Wassers an die Ganglinie der Versickerungsmenge und somit an den intermittierenden Betrieb der Versickerungsanlage, angepasst. Die Temperaturrandbedingung ist nur dann aktiv, wenn die Brunnenrandbedingung ebenfalls aktiv ist. Dadurch wird sichergestellt, dass der Temperatureintrag des zu versickernden Wassers in das Modell nur dann stattfindet, wenn auch tatsächlich versickert wird.

ANMERKUNG:

Die Anpassung erfolgt auf die in Kapitel 3.3.3 korrigierte Versickerungsmenge, nicht auf die tatsächlich an der Versickerungsanlage gemessenen Werte von Kapitel 2.3.1.3.

2.3.2.3 Bodentemperatursonde TH02

Gemessen wird TH02 an der Messstelle V1-1, wo sich die Sonde im obersten Bodenhorizont, 0,05 m unter der GOK befindet, siehe Abbildung 2-2. Die Ganglinie dieser Messsonde, im Vergleich mit der Lufttemperatur und der Sonde TH07 (1 m unter GOK), ist Abbildung 2-10 abgebildet. Die Spitzen der Lufttemperatur sind generell deutlicher ausgeprägter als die der Bodentemperatursonde TH02. In den Monaten Jänner, Februar und März, sowie Oktober, November und Dezember ist die Bodentemperatur höher als die Lufttemperatur. Die maximale Temperatur an der Sonde TH02 lag am 24.07. mit 24 °C vor, am 23.01. war es mit 0,4 °C am kältesten. Die Datenreihe ist gänzlich vom Temperatureintrag zwischen Boden und Atmosphäre geprägt, eine dämpfende Einwirkung des zu versickernden Wassers ist, wie bei TH07, auszuschließen.

Beschreibung des Untersuchungsgebietes, der Anlagen und der Daten

Die Daten der Bodentemperatursonde TH02 wurden im Wärmetransportmodell als obere RB angesetzt und bilden den Wärmestrom zwischen Boden und Atmosphäre ab.

Bei der Zusammenfassung auf Tageswerte wurden drei fehlende Stundenwerte vom 14.09.2016 ignoriert.

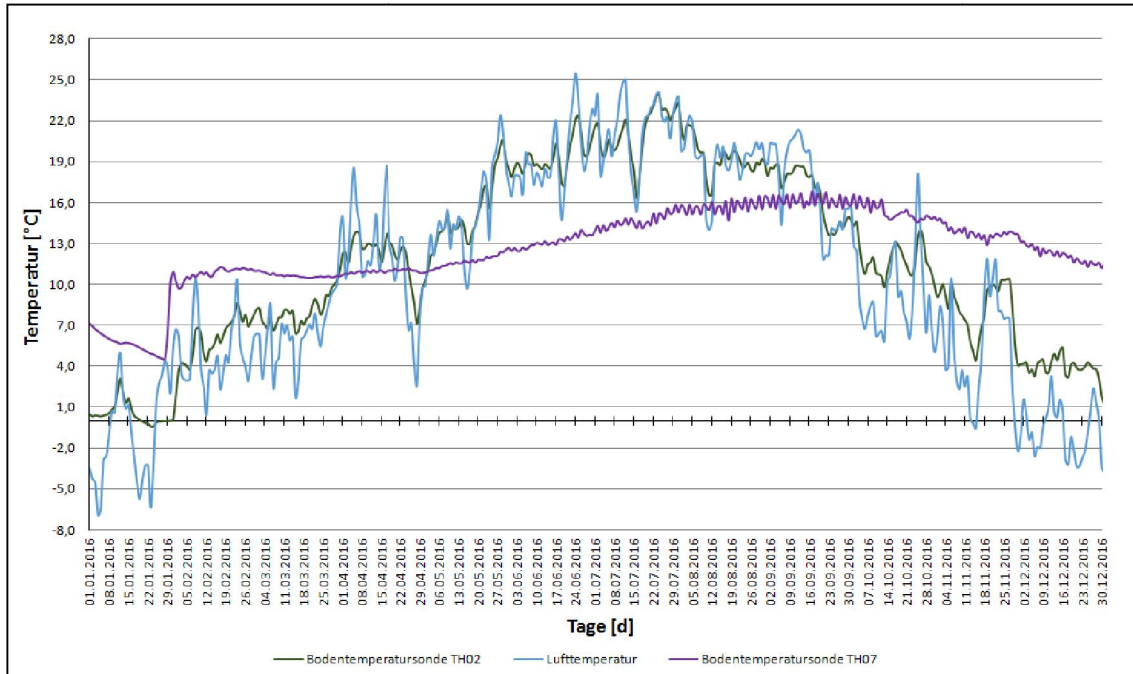


Abbildung 2-10: Ganglinie der Bodentemperatursonde TH02 im Vergleich mit der Lufttemperatur und der Bodentemperatursonde TH07

2.3.2.4 Saugkerzen mit Temperaturmessung SK06 - SK10

In den Kies-/Sandsedimenten an der Messstelle V1-1 befinden sich zehn Saugkerzen mit Temperaturmessung. SK06 - SK10 liegen dabei, laut Messungen des Drucksensors an der Messstelle V1-1, dauerhaft unterhalb des Grundwasserspiegels, siehe Abbildung 2-2.

Aufgrund fehlender Grundwassertemperaturmessungen in der Umgebung der künstlichen Versickerungsanlage, werden die Temperaturrandbedingungen für den Zu- und Abstrom des Grundwassers aus dem Mittelwert dieser Messsonden gebildet. Der Datensatz SK07 wurde allerdings aufgrund von groben Messfehlern und längeren Messlücken zwischen 01.01.- 03.08. zur Gänze vernachlässigt. Die Temperaturganglinien der Messstellen SK06 - SK10 sind in Abbildung 2-11 zu sehen. Eine Schichtung der Temperatur liegt im Grundwasser nur vor Versickerungsbeginn am 29.01. vor, mit dem Start der Versickerungsanlage findet an allen Saugkerzen ein Temperatursprung mit anschließendem, gedämpften und nahezu synchronem Verlauf statt. SK10, welche am Übergang der Kies-/Sandsedimente zum Stauer positioniert ist, hebt sich durch eine leichte Phasenverschiebung und Dämpfung von den restlichen Ganglinien ab. Sie ist

die am tiefsten liegende Saugkerze und wird von den Temperaturverhältnissen im Stauer beeinflusst.

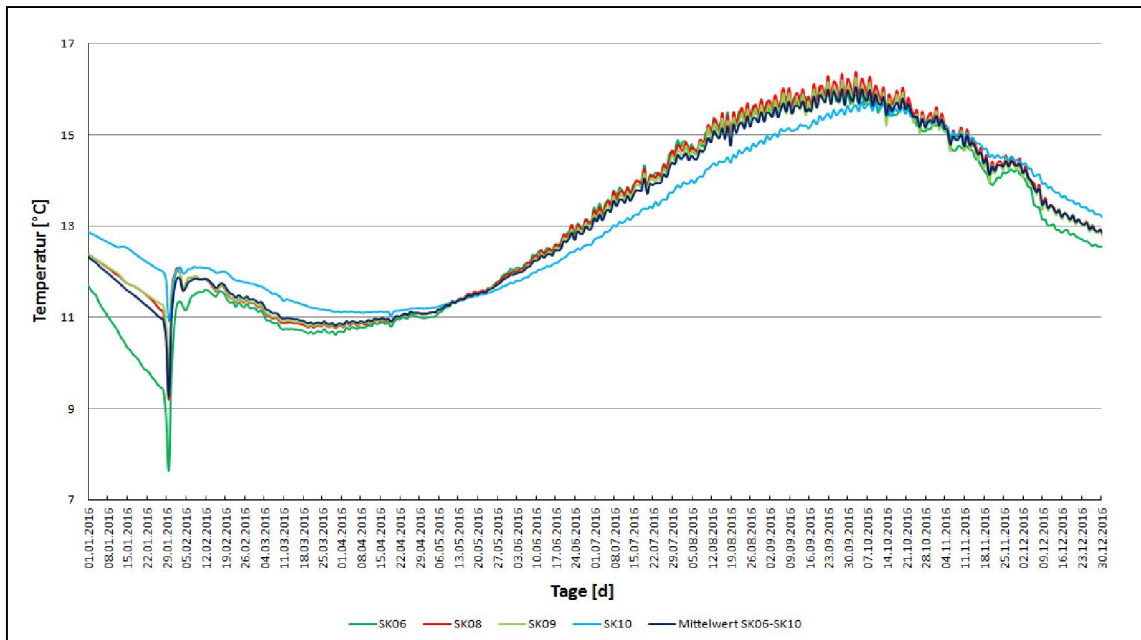


Abbildung 2-11: Temperaturganglinien der Saugkerzen SK06 - SK10 (Die Messwerte von SK07 wurden vernachlässigt); Temperaturganglinie der Mittelwerte von SK06 - SK10

2.3.2.5 Grundwassertemperatur an der Messstelle V1-1

Zur Kalibrierung des Wärmetransportmodells wird die Temperaturdatenreihe des Sensors für elektrische Leitfähigkeit und Temperatur an der Messstelle V1-1 herangezogen. Dieser liegt im permanent gesättigten Bereich in einer Tiefe von 7 m unter GOK (215,38 m ü.A.), 0,5 m über dem dazugehörigen Drucksensor.

Wie in Abbildung 2-12 ersichtlich, sind von 01.01. - 15.01. und 20.08. - 03.09. keine Messdaten vorhanden. Im Zeitraum von 11.08. bis 14.09. weist die Messreihe weitere Messfehler und Messlücken auf. Aus diesen Gründen wird für die Kalibrierung des Wärmetransportmodells für diese Zeiträume die am nächsten gelegene Saugkerze mit Temperaturmessung SK09 herangezogen.

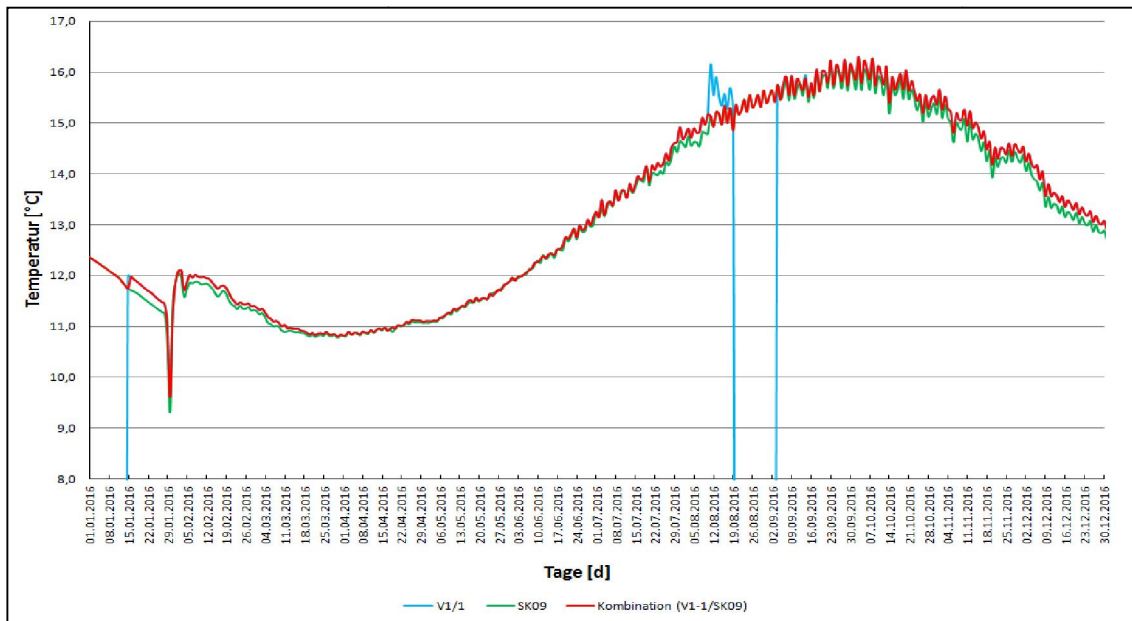


Abbildung 2-12: Temperaturganglinien der Messsonde V1-1 und der Saugkerze SK09; Ganglinie der für die Kalibrierung des Wärmetransportmodells verwendeten Kombination

2.3.2.6 Temperaturrandbedingungen des Wärmetransportmodells

In der folgenden Abbildung 2-13 sind alle für das Modell verwendeten Temperaturzeitreihen zusammengefügt. Die Temperaturganglinie der oberflächennahen Bodentemperatursonde TH02 hebt sich darin deutlich von denen des Grundwasserzuflusses, des zu versickernden Wassers und der kombinierten Kurve von SK09 und V1-1 ab. Die Temperaturkurven des Zuflusses und der Kombination verlaufen nahezu gleich. Das zu versickernde Wasser ist die flachste und im Durchschnitt wärmste Temperaturkurve.

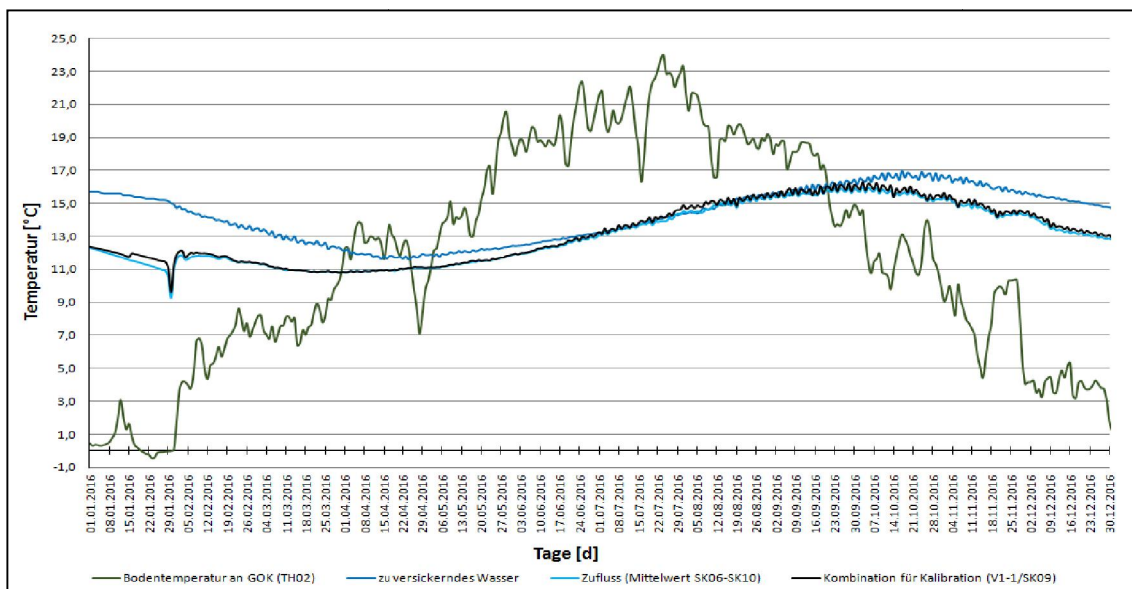


Abbildung 2-13: Zusammenfassung aller für das Wärmetransportmodell verwendeten Temperaturganglinien

3 Modellerstellung

Die Strömungsprozesse im Untergrund und somit auch der Wärmetransport sind grundsätzlich 3-dimensionale Vorgänge. Aus Gründen der Vereinfachung wurden diese in dieser Masterarbeit bewusst auf ein 2D-vertikal-Modell reduziert. Dadurch wird das Modell numerisch stabiler, benötigt weniger Rechenzeit und ist einfacher zu parametrisieren.

Die Modellierung des Wärmeeintrages durch die künstliche Versickerungsanlage setzt aufgrund deren Komplexität eine stufenweise Modellbildung voraus. Zunächst wurde von einem lokalen Strömungsmodell rund um die Versickerungsanlage ausgegangen. Dies war notwendig um herauszufinden, wie eine derartige Grundwasseranreicherungsanlage in das Modell implementiert werden konnte und um erste Erkenntnisse zu erlangen, ob die getroffenen Parametereinstellungen und Annahmen zielführend waren. Im zweiten Schritt wurde das Modell auf die endgültige Länge ausgebaut und auch bei den hydraulischen Zu- und Abflussrandbedingungen mit Messwerten als Eingangsgrößen versehen. Dieses regionale Strömungsmodell bildet die Basis für das später hinzugefügte Temperaturmodell und wurde mit Messungen des Grundwasserspiegels an der Messsonde V1-1 kalibriert. Im dritten und letzten Schritt wurde auf das regionale Strömungsmodell das Wärmetransportmodell aufgesetzt. Nachdem die thermischen Randbedingungen hinzugefügt wurden, wurde das endgültige Modell auf die kombinierte Temperaturkurve der Messsonde V1-1 und der Saugkerze SK09 kalibriert.

3.1 Verwendete Software

Die für das Modell verwendete Software ist FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW and transport system) ist ein interaktives Grundwassermodellierungssystem der Firma DHI zur Berechnung und Simulation von

- 2-dimensionalen und 3-dimensionalen,
- horizontalen, vertikalen oder axensymmetrischen,
- gesättigten oder variabel gesättigten,
- stationären oder instationären

Durchflüssen und Stoff- und Wärmetransporten im Grundwasser. FEFLOW kann zur Beschreibung von räumlichen und zeitlichen Verteilungen von Grundwasserunreinigungen, geothermalen Prozessen, Berechnung der Verweildauer und Fließzeiten von chemischen Konzentrationen in Aquiferen und zur Planung und Gestaltung von Sanierungsstrategien, sowie zur Entwicklung von Alternativen und von Überwachungssystemen verwendet werden. (MIKE Powered by DHI Software, 2017)

3.2 Lokales Strömungsmodell

Zu Beginn wurde ein lokales Strömungsmodell entworfen, welches die unmittelbare Umgebung der Versickerungsanlage und den Schnitt durch einen Versickerungsstrang darstellt. Zur Vereinfachung des Modellaufbaus wurden dabei die Höhen des Modells, nach der Vorlage der Abbildung 2-2, als relative Höhen festgelegt.

3.2.1 Netzgenerierung

Die Sickerstränge der beiden Grundwasseranreicherungsanlagen haben eine Länge von je 6 m. Aus Gründen der Vereinfachung wurden für die Länge des Modells stromauf- und stromabwärts 6 m einbezogen, was eine Gesamtlänge von 18 m ergibt. Die Höhe des lokalen Strömungsmodells stellt die Mächtigkeit der Bodenschicht zwischen Grundwasserstauer und der GOK dar und wurde mit 9,5 m angesetzt. Die Mächtigkeit des obersten Bodenhorizontes (Mutterboden) wurde mit 1 m angenommen.

Die Sickerstränge wurden nur durch eine Achse dargestellt, welche in einer Tiefe von 1,22 m unter der GOK liegt und von einem 8 m x 0,75 m Filterkieskofter umhüllt wird, wobei sich 0,425 m Kies oberhalb und 0,325 m unterhalb der Achse befinden. Diese Werte wurden aus der Abbildung 2-3 entnommen, wobei der Rohrdurchmesser zum Kieskofter dazugerechnet wurde.

Der oberste Bodenhorizont, der Filterkieskofter sowie die restlichen Sedimente der Niederterrasse wurden im "Supermesh" durch einzelne Polygone gebildet, die Achse der Sickerstränge wurde durch eine Linie implementiert. Um in späterer Folge ein dichteres Maschennetz entlang des Überganges zwischen Filterkies und dem darunter liegenden Bodenkörper zu erhalten wurde entlang der Unterkante des Polygons des Kieskofters eine weitere Linie gezogen. Der grundlegende Aufbau des lokalen Strömungsmodells ist in der folgenden Abbildung 3-1 zu sehen.

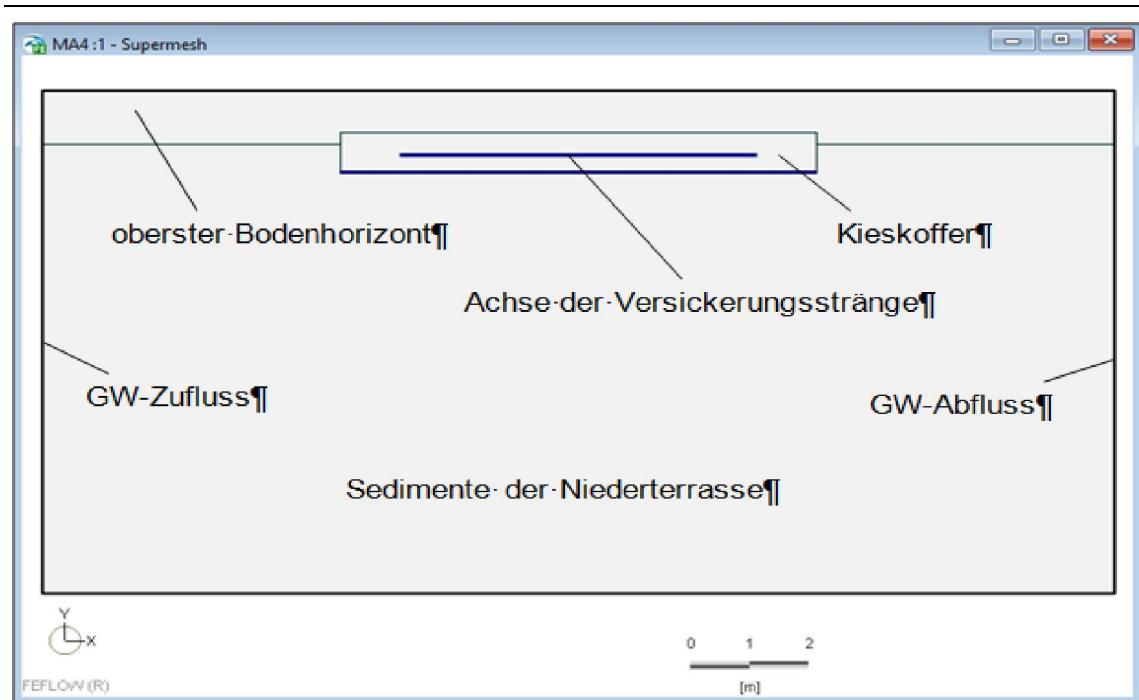


Abbildung 3-1: Skizze des Aufbaus des lokalen Strömungsmodells (Supermesh)

Zur Generierung des Maschennetzes wurde die Methode "Triangle-Mesh" verwendet, die Standardeinstellung von 1000 Elementen wurde beibehalten. Die beiden Linien wurden mit dem Faktor 10 verfeinert und die Linienzielgröße auf 0,05 m gesetzt. Dies stellt einen geringeren Knotenabstand in den Bereichen der wichtigsten Vorgänge der Simulation (Sickerstrang und Übergang zwischen Kiesbett und gewachsenem Boden) sicher und gewährleistet genauere Berechnungen.

Um an Punkten von Interesse im Modell Werte errechnen und Simulationsgraphen anzeigen lassen zu können, mussten "Observation Points" gesetzt werden. In diesem Modell entsprechen die gesetzten Punkte den Sensoren der Messsonden der Messstelle V1-1, deren Daten in späterer Folge zur Kalibrierung verwendet werden. Die Messstelle V1-1 ist 5 m stromabwärts von den Sickersträngen situiert, ihr Aufbau ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die sieben Temperatursensoren im obersten Bodenhorizont haben die Bezeichnungen TH01-TH07, die zehn Saugkerzen mit Temperaturmessung sind mit SK01-SK10 benannt und die im Bohrloch befindlichen Sensoren für Temperatur und Pegelmessungen sind V1-1. Das generierte Maschennetz sowie die "Observation Points" sind in Abbildung 3-2 zu sehen.

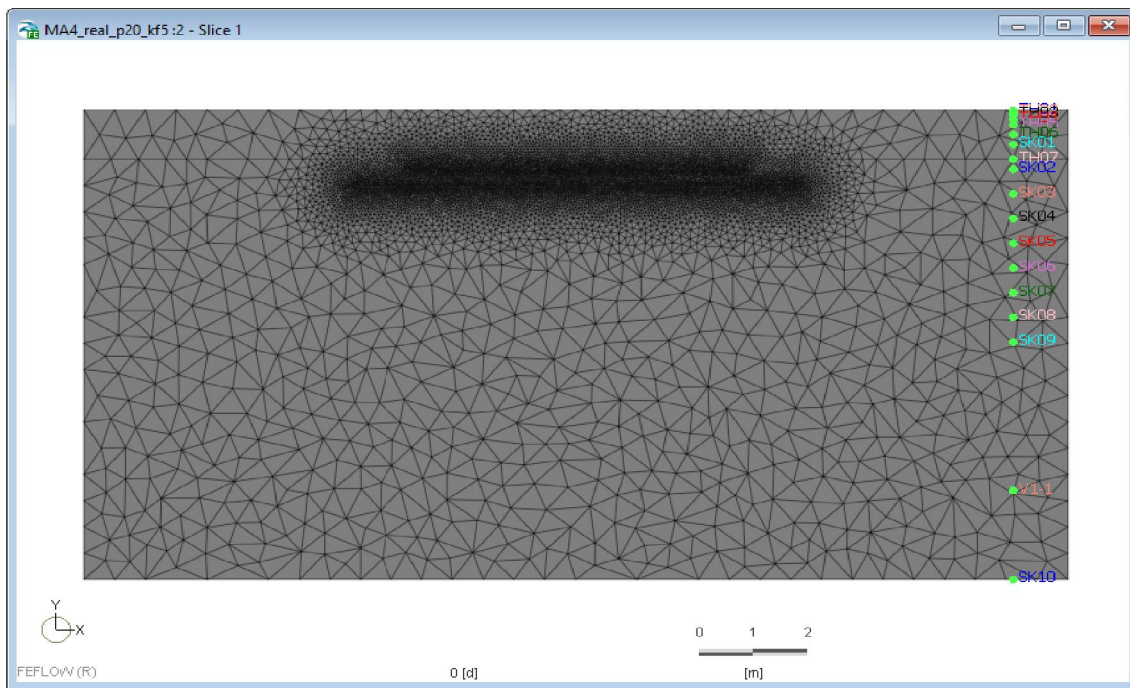


Abbildung 3-2: Generiertes Maschennetz des lokalen Strömungsmodells mit "Observation Points"

Um in FEFLOW einen vertikalen Schnitt des Grundwasserleiters abbilden zu können, wurde für die Projektion des Modells in den "Problem Settings" die Einstellung "vertikal, planar" gewählt. Mit Hilfe der "Richard's-Gleichung" ist das Modell im Stande die Grundwasserbewegung auch in der ungesättigten Zone zu berechnen. Mit der Einstellung "transient" wurden instationäre Verhältnisse für den Fließzustand des Grundwasserstroms vorgegeben.

3.2.2 Hydraulische Randbedingungen und Bodenkennwerte

Die in diesem Kapitel verwendeten Koordinaten des Bundesmeldenetzes und Annahmen der Bodenkennwerte wurden Mach et al (2019) entnommen.

Die Unterkante des Modells bildet die oberste Schicht des Grundwasserstauers ab, dieser wurde für dieses Modell als vollkommen undurchlässig angenommen wodurch ein vertikaler Aus- oder Zufluss von Grundwasser ausgeschlossen wird.

Zur Simulation des horizontalen Grundwasserflusses wurden am linken und rechten Modellrand hydraulischen Zu- und Abflussrandbedingungen angesetzt, welche den hydraulischen Gradienten definieren. Diese wurden als Zeitreihen des Grundwasserspiegels in das Modell eingefügt und als Randbedingungen 1. Ordnung (Diriclet) definiert.

Durch den dynamischen Betrieb des Brunnens Fluttendorf 2 eignen sich dessen Grundwasserspiegeldaten nicht als Randbedingung. Aus diesem Grund stellt die Messstelle V1-2 die untere Modellgrenze dar und deren Messdaten wurden für die Randbedingung verwendet.

Mangels gemessener Daten an den Modellgrenzen des lokalen Strömungsmodells wurden die Werte für die hydraulischen Zu- und Abflussrandbedingungen aus den Daten der Sonde UM13a und der Messstelle V1-2 linear interpoliert, diese beiden Anlagen bilden in späterer Folge die Modellgrenzen des regionalen Strömungsmodells und des Wärmetransportmodells. Die Ausgangswerte wie auch die interpolierten Werte werden in der Abbildung 3-3 graphisch dargestellt.

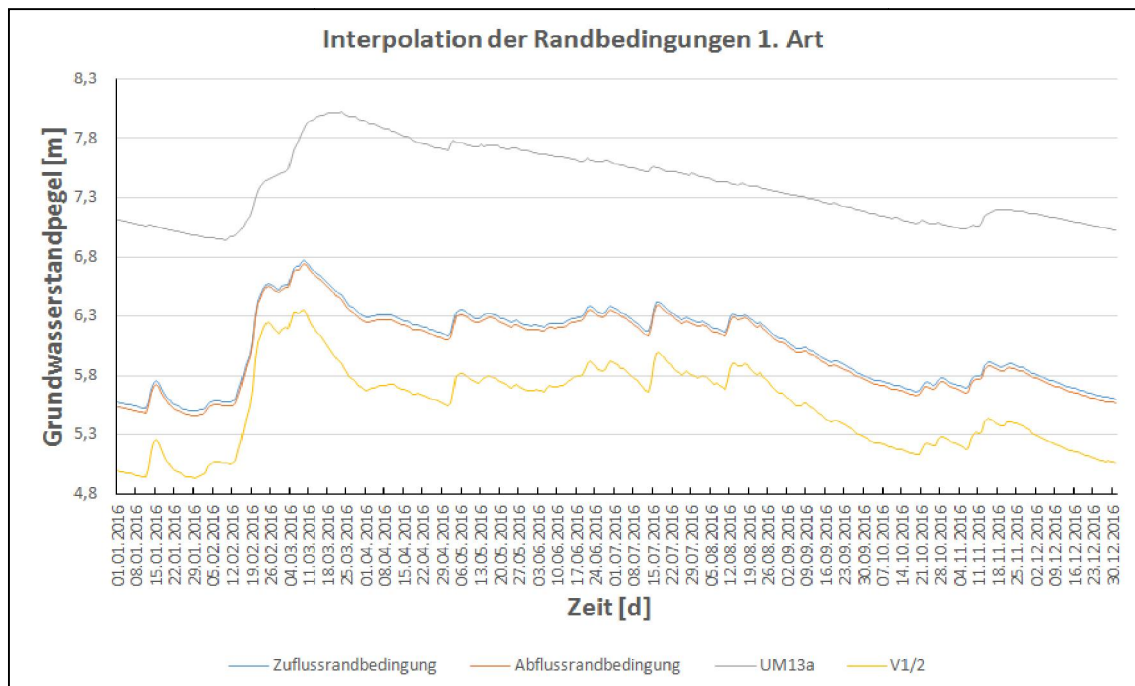


Abbildung 3-3: Interpolierte Grundwasserstandpegel der Zu- und Abflussrandbedingungen für das lokale Strömungsmodells

Die Entfernungen für die Interpolation wurden aus den Koordinaten der Anlagen im österreichischen Bundesmeldenetz errechnet. Das Land Steiermark wird im BMN durch den Meridianstreifen M34 abgedeckt, die Rechts- und Hochwerte der Versickerungsanlage V1 und der beiden Messstellen UM13a und V1-2 werden in Tabelle 3-1 gezeigt. Die Berechnungen ergaben eine Entfernung von 725,96 m zwischen UM13a und V1 und von 260,9 m zwischen V1 und V1-2, die Gesamtlänge des regionalen Modells beträgt somit 986,86 m.

Tabelle 3-1: Koordinaten der Anlagen und Messstellen im Bundesmeldenetz (Mach et al, 2019)

Bezeichnung	X_RW	Y_HW
GWA_V1	714468	176441
UM13a	714374,843	177160,954
GWA_V1-2	714593,85	176212,46

Modellerstellung

Die Grundwasserneubildungsrate wurde an der oberen Modellgrenze als Randbedingung 2. Ordnung (Neumann) implementiert.

Die Sickerrohre der künstlichen Grundwasseranreicherungsanlage wurden im Modell nur durch ihre Achse dargestellt, auf deren Linie bei der Maschengenerierung 129 Knoten in gleichen Abständen aufgeteilt wurden. An diesen Knoten wurde die Zeitreihe der Versickerung als negative Brunnenrandbedingung implementiert.

Die Korngrößenverteilung im Grundwasserleiter reicht von Feinsand bis Mittelsand, die Durchlässigkeit der Sedimente der Niederterrasse wurde für das lokale Strömungsmodell in einer ersten Annahme mit $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s angesetzt. Der k_f -Wert des Kieskoffers (Grobkies) wurde mit $5 \cdot 10^{-2}$ m/s angenommen und für den obersten Bodenhorizont wurde $5 \cdot 10^{-4}$ m/s verwendet. Die Anisotropie der Durchlässigkeit (k_h/k_v) wurde für das gesamte Modell mit dem Faktor 10 beschrieben und die Porosität des Untergrundes wurde mit konstanten 20% angenommen.

Für die variable Sättigung wurde das empirische Modell von *Van Genuchten* gewählt, wobei die Standardeinstellungen in FEFLOW ($\alpha=4,1$ [1/m] und $n=1,964$ []) erhalten bleiben.

Tabelle 3-2 fasst alle benutzerdefinierten Eingangsgrößen des lokalen 2D-Strömungsmodells nochmals zusammen.

Tabelle 3-2: Eingangsgrößen des lokalen Strömungsmodells

Eingangsgröße		Art	Wert	Datenherkunft*
Zufluss		Diriclet RB	Zeitreihe	Interpolation
Abfluss		Diriclet RB	Zeitreihe	Interpolation
Neubildungsrate		Neumann RB	Zeitreihe	Messwerte
Versickerungsrate		Brunnen RB	Zeitreihe	Messwerte
Durchlässigkeit k_f [m/s]	oberster Bodenhorizont	Bodenkennwert	$5 \cdot 10^{-4}$	Annahme
	Kies-/Sandsedimente	Bodenkennwert	$5 \cdot 10^{-3}$	Annahme
	Kieskoffer	Bodenkennwert	$5 \cdot 10^{-2}$	Annahme
Anisotropie der Durchlässigkeit k_h/k_v		Bodenkennwert	10	Annahme
Porosität		Bodenkennwert	0,2	Annahme

*aus Mach et al (2019)

In der Skizze des Modells in Abbildung 3-4 sind die hydraulischen Zu- und Abflussrandbedingungen links und rechts mit blauen Kreisen markiert, die Neubildungsrate ist mit roten Kreuzen an den Knoten der Oberkante eingefügt und die Versickerungsanlage ist mit grauen Quadraten im oberen Drittel des Modells gekennzeichnet. Dies spiegelt die Implementierung der jeweiligen Zeitreihen in der Softwareumgebung wieder.

Die Porosität und die Anisotropie der Durchlässigkeit (k_h/k_v) sind im gesamten Modell konstant.

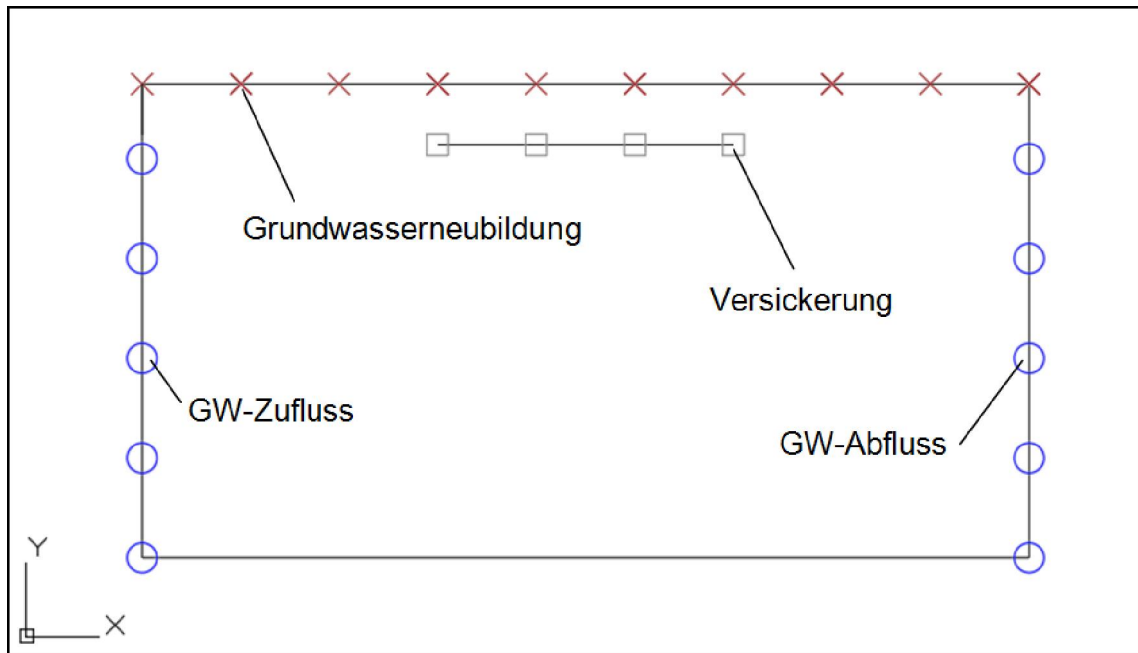


Abbildung 3-4: Skizze der Eingangsgrößen des lokalen Strömungsmodells

3.3 Regionales Strömungsmodell

Das regionale Modell verfügt bereits über die Ausdehnungen des späteren Wärmetransportmodells, welches auf das kalibrierte regionale Strömungsmodell aufgesetzt wird. Es ist wie das lokale Strömungsmodell ein vertikales 2D-Modell, allerdings werden die Höhen als absolute Höhen implementiert.

3.3.1 Netzgenerierung

Das regionale Modell erstreckt sich von der Sonde UM13a bis zur Pegelmessstelle V1-2 in Richtung der Hauptgrundwasserströmung und hat eine Gesamtlänge von 986,86 m. Der Abstand zwischen UM13a und der Versickerungsanlage V1 beträgt 725,96 m von V1-2 zu V1 sind es 260,9 m. Die Höhen des Modells, und somit auch die Abmessungen der Polygone im "Supermesh", ergeben sich aus den Daten von Mach et al (2019) in der

Tabelle 3-4. Die Anordnung und Tiefe der einzelnen Sensoren ist in Tabelle 3-3 abgebildet.

Die Einstellungen in den "Problem Settings" erfolgten gleich wie beim lokalen Strömungsmodell. Die einzige Ausnahme bildet die Anzahl an Elementen bei der Netzgenerierung, welche aufgrund der weitaus größeren Abmessungen von 1000 auf 10000 Elemente steigt.

Tabelle 3-3: Bezeichnung, Typ und Lage der Sensoren an der Messstelle V1-1

Name	Typ	Tiefe in [m] unter GOK / Abstich	Absolute Höhe in [m ü.A.]
TH01	Bodentemperatursonde	0,01 / 1,31	222,37
TH02	Bodentemperatursonde	0,05 / 1,35	222,33
TH03	Bodentemperatursonde	0,10 / 1,40	222,28
TH04	Bodentemperatursonde	0,20 / 1,50	222,18
TH05	Bodentemperatursonde	0,30 / 1,60	222,08
TH06	Bodentemperatursonde	0,50 / 1,80	221,88
TH07	Bodentemperatursonde	1,00 / 2,30	221,38
SK01	Saugkerze mit Temperaturmessung	0,70 / 2,00	221,68
SK02	Saugkerze mit Temperaturmessung	1,20 / 2,50	221,18
SK03	Saugkerze mit Temperaturmessung	1,70 / 3,00	220,68
SK04	Saugkerze mit Temperaturmessung	2,20 / 3,50	220,18
SK05	Saugkerze mit Temperaturmessung	2,70 / 4,00	219,68
SK06	Saugkerze mit Temperaturmessung	3,30 / 4,50	219,18
SK07	Saugkerze mit Temperaturmessung	3,70 / 5,00	218,68
SK08	Saugkerze mit Temperaturmessung	4,20 / 5,50	218,18
SK09	Saugkerze mit Temperaturmessung	4,70 / 6,00	217,68
SK10	Saugkerze mit Temperaturmessung	8,18 / 9,48	214,20
V1-1 _{Druck}	Drucksensor und Wasserstandmessung	7,70 / 9,00	214,68
V1-1 _{Temp}	WTW-el. Leitfähigkeits- und Temperatursensor	7,20 / 8,50	215,18

Tabelle 3-4: Absolute Höhen der Messstellen und Anlagen

Anlage	GOK [m ü.A.]	Stauerhöhe [m ü.A.]
UM13a	223,83	ca. 215,5
V1	223,73	ca. 214,2
V1-1	222,38	ca. 214,2
V1-2	221,91	ca. 214,8

3.3.2 Hydraulische Randbedingungen und Bodenkennwerte

Gegenüber dem lokalen Strömungsmodell ändern sich nur die hydraulischen Zu- und Abflussrandbedingungen, welche, wie in Tabelle 3-5 dargestellt, nun die Grundwasserstandzeitreihen der Messstellen UM13a (Zufluss) und V1-2 (Abfluss) widerspiegeln.

Tabelle 3-5: Art, Wert und Vergleich der Herkunft der Eingangsgrößen des regionalen und des lokalen Strömungsmodells

Eingangsgröße		Art	Wert	Datenherkunft regionales Modell	Datenherkunft lokales Modell
Zufluss		Diriclet RB	Zeitreihe	Messwerte	Interpolation
Abfluss		Diriclet RB	Zeitreihe	Messwerte	Interpolation
Neubildungsrate		Neumann RB	Zeitreihe	Messwerte	Messwerte
Versickerungsrate		Pumpen RB	Zeitreihe	Messwerte	Messwerte
Durchlässigkeit k_f [m/s]	oberster Bodenhorizont	Bodenkennwert	$5 \cdot 10^{-4}$	Annahme	Annahme
	Kies-/Sand-sedimente	Bodenkennwert	$5 \cdot 10^{-3}$	Annahme	Annahme
	Kieskoffer	Bodenkennwert	$5 \cdot 10^{-2}$	Annahme	Annahme
Anisotropie der Durchlässigkeit k_h/k_v		Bodenkennwert	10	Annahme	Annahme
Porosität		Bodenkennwert	0,2	Annahme	Annahme

Vor der Kalibrierung wurde das hydraulische Strömungsmodell stationär, ohne Grundwasserneubildung und Versickerung simuliert. Dabei wurde der Grundwasserspiegel an den Modellrändern des Zu- und Abflusses als konstanter Wert (erster Wert beider Messreihen am 01.01.2016) angesetzt. Die sich dadurch einstellende Verteilung des hydraulischen Gradienten, wurde als shape-File gespeichert und dieses anschließend als **Anfangsbedingung** in das zu kalibrierende hydraulische Modell implementiert.

3.3.3 Korrektur der Versickerungsmenge

Schon die ersten Simulationsdurchläufe zeigten, dass das versickerte Wasser unzureichend abfließt. Das Modell ist nach bereits wenigen Versickerungstagen über weite Strecken vollständig gesättigt, was sich im Verlauf der Simulation nur mehr geringfügig ändert.

Nach einiger Recherche wurde die Brunnenrandbedingung, welche die künstliche Versickerungsanlage darstellt, als das Problem identifiziert. Diese ist in 2D-Vertikalmodellen in dieser Form nicht umsetzbar, da sie radiale Auswirkungen hat, die im Modell nicht abgebildet werden können.

Aus diesem Grund wurde die Versickerungsmenge in drei Schritten angepasst. Mit Hilfe eines zusätzlichen, horizontalen 2D-Modells wurde der Grundwasserstand pro Zeitschritt im Sickerschlitz ermittelt. Dieser wurde in einem weiteren Schritt in einem ebenfalls neuen 2D-vertikal-Modell als Grundwasserganglinie implementiert und mit den gemessenen Werten verglichen. Anschließend wurde anhand der Modellwasserbilanz eine Versickerungsmenge pro Zeit errechnet, welche anschließend in das ursprüngliche Modell implementiert wurde.

3.3.3.2 Schritt 2:

Im bestehenden 2D-vertikal-Modell wurde die in Schritt 1 modellierte Grundwasserganglinie unterhalb des gesamten Bereichs des Sickerschlitzes, wie in Abbildung 3-6 ersichtlich, flächig implementiert.

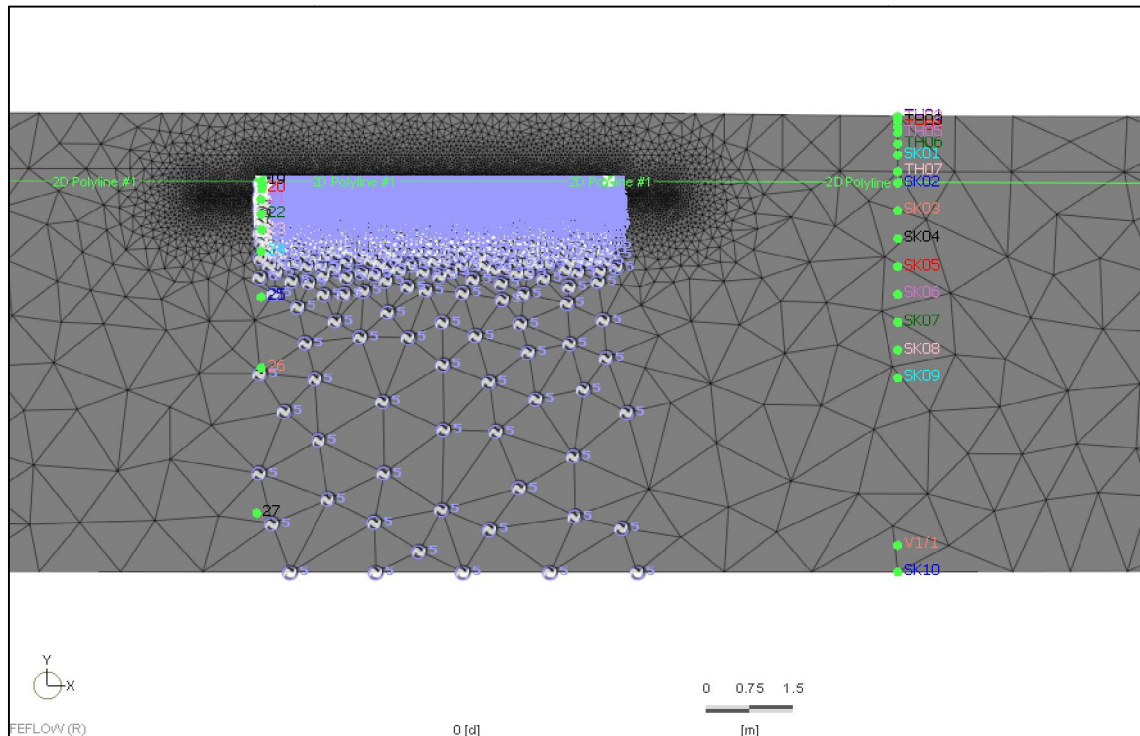


Abbildung 3-6: 2D-vertikal-Modell zur Korrektur der Versickerungsmenge mit "Observation Points"

Mit diesen Simulationen wurde kontrolliert, ob die modellierten Grundwasserstände am Messpegel V1-1 (5 m stromabwärts der Versickerungsanlage) mit den Messwerten annähernd übereinstimmen.

Nach den folgenden Änderungen in den "Problem Settings" waren die Grundwasserstände zufriedenstellend angepasst und die Zeitschritte der Simulationen verkürzt sich:

Unter "Numerical Parameters" wurde die "Error Tolerance" von $1 \cdot 10^{-3}$ auf $0,5 \cdot 10^{-3}$ herabgesetzt und das Fehlerkriterium von "Euclidian L2 integral (RMS) norm" auf "Maximum error norm" gewechselt.

Der "Equation-System Solver" wurde von "Standard Iterative" auf "Algebraic Multigrid" gewechselt.

3.3.3.3 Schritt 3:

Anhand der FEFLOW-Ergebnisdatei (.dac-Datei) konnte das "Period Budget" (die Grundwasserbilanz des Modells) für jeden Zeitschritt ausgewertet werden. Daraus wurde eine Zeitreihe der Versickerungsrate in m^3/d für jeden Zeitschritt generiert. Der Bilanzbereich dafür war die Knotenauswahl unterhalb des Berei-

ches der Sickerschlitz, in welchem die Grundwasserstandganglinien als Randbedingung implementiert wurden, siehe Abbildung 3-6.

Bei dieser Zeitreihe wurde die "Total Imbalance" betrachtet, da Wechsel von positiver zu negativer Imbalance zwischen den Zeitschritten die Simulationsdauer stark beeinflussen, indem sie die Länge der Zeitschritte wesentlich verkleinern. Deshalb wurde die positive Imbalance um die Werte der negativen korrigiert, die "Total Imbalance" muss dabei immer übereinstimmen.

Anschließend wurden die Zeitschritte zusammengefasst und die Versickerungsrate von m^3/d in eine Versickerungsrate pro Zeitschritt umgerechnet. Die Versickerungsrate/Zeitschritt wurde anschließend als neue Versickerungsrate als Brunnenrandbedingung im bestehenden 2D-Vertikalmodell implementiert.

Zur Kontrolle wurden die modellierten Grundwasserstände erneut mit den Messwerten von V1-1 verglichen, welche annähernd übereinstimmen.

ANMERKUNG:

Die vorgenommenen Änderungen sind rückwirkend auch für das lokale Modell relevant. Da dieses, aus bereits angegebenen Gründen, weder kalibriert noch verwendet wird, wurde das lokale 2D-Modell nicht weiter bearbeitet.

3.4 Wärmetransportmodell

Der Aufbau des vertikalen 2D-Wärmetransportmodells entspricht dem des kalibrierten regionalen Strömungsmodells. In den "Problem Settings" wurde die Funktion Wärmetransport aktiviert.

3.4.1 Temperaturrandbedingungen

Zusätzlich zu den bereits im regionalen Strömungsmodell implementierten Randbedingungen wurden nun Temperaturrandbedingungen hinzugefügt. Die verwendeten Temperaturdaten wurden Draxler & Fank (2017) entnommen.

Der Grundwasserstauer wird im Modell nur durch seine oberste Schicht (Unterseite des Modells) abgebildet. Um dessen stabilisierende Einwirkung auf den Grundwasserleiter im Modell darzustellen, wurde an der Modellunterseite ein konstanter Wärmestrom von $0,1 \text{ W/m}^2$ angesetzt.

Für die Temperatur des zu- und abströmenden Grundwassers wurde, aufgrund fehlender Grundwassertemperaturmessungen in der Umgebung der künstlichen Versickerungsanlage, der Mittelwert aus den Messsonden SK06 bis SK10 herangezogen. Diese Zeitreihe wurde am linken und rechten Modellrand als Temperaturrandbedingung implementiert. Der Datensatz SK07 wurde dabei wegen groben Messfehlern und längeren Messlücken gänzlich vernachlässigt.

Um den Wärmestrom zwischen Boden und Atmosphäre darzustellen, wurde die Temperaturzeitreihe der Bodentemperatursonde TH02 an der Modelloberseite als Randbedingung angesetzt.

Die Temperatur des zu versickernden Wassers wurde an den Knoten des Versickerungsstranges als Temperaturrandbedingung implementiert.

Tabelle 3-6 listet alle verwendeten Temperaturparameter auf, in Abbildung 3-7 wird deren Lage im Modell skizziert.

Tabelle 3-6: Temperatureingangsgrößen des Wärmetransportmodells

Eingangsgröße	Art	Wert	Quelle*
Temperatur GW-Zufluss	1. Art	Zeitreihe	Mittelwert SK06-SK10
Temperatur GW-Abfluss	1. Art	Zeitreihe	Mittelwert SK06-SK11
Wärmestrom an GOK	1. Art	Zeitreihe	Messwerte
Temperatur zu versickerndes Wasser	1. Art	Zeitreihe	modifizierte Messwerte
Einfluss des Grundwasserstauers	Heat-Flux	0,1 W/m ²	Annahme

*aus Draxler & Fank (2017)

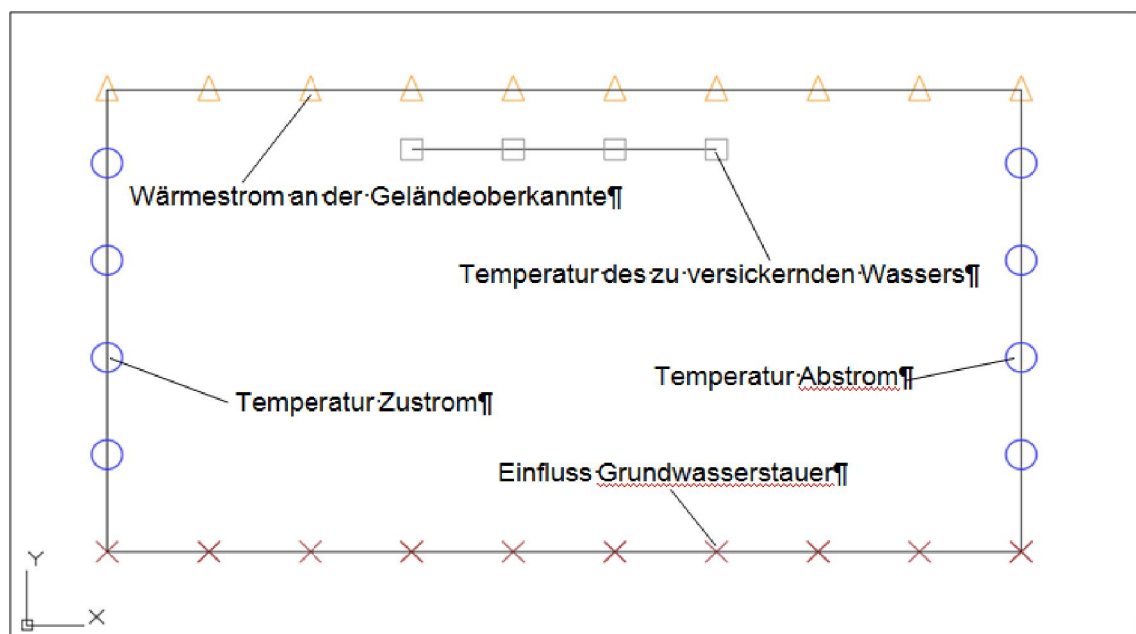


Abbildung 3-7: Skizze der Temperatureingangsgrößen des Wärmetransportmodells

Vor der Kalibrierung wurde das Wärmetransportmodell stationär, ohne die Temperatur des zu versickernden Wassers und ohne die Temperatureinwirkung der Atmosphäre simuliert. Dabei wurde die Grundwassertemperatur an den Modellrändern des Zu- und Abflusses als konstanter Wert (erster Wert der Messreihe der Mittelwerte von SK06 - SK10 am 01.01.2016) angesetzt, die Einwirkung des Tiefengradienten bleibt mit 0,1 W/m² konstant. Die Anfangsbedingung des hydraulischen Modells, wurde ebenfalls implementiert. Die sich dadurch einstellende Verteilung der Temperatur, wurde als shape-File gespeichert. Anschließend wurden sowohl die **Anfangsbedingung** der Temperatur als auch die Anfangsbedingung des "Hydraulic Head" in das zu kalibrierende Wärmetransportmodell implementiert.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse der drei Modellstufen dargestellt und analysiert.

4.1 Lokales Strömungsmodell

Das Modell konvergiert, weist allerdings hohe "Imbalance" (Rate-Budget) auf. Auf Grund der Nähe der Potentialrandbedingungen zur Versickerungsanlage und der interpolierten Randbedingungen für Zu- und Abfluss des Grundwassers wurde das lokale Modell nicht kalibriert. Der Ganglinienvergleich zwischen den Grundwasserstandpegel der Messstelle V1-1 und den simulierten Werten ist in Abbildung 4-1 zu sehen, Abbildung 4-2 zeigt die Residuen.

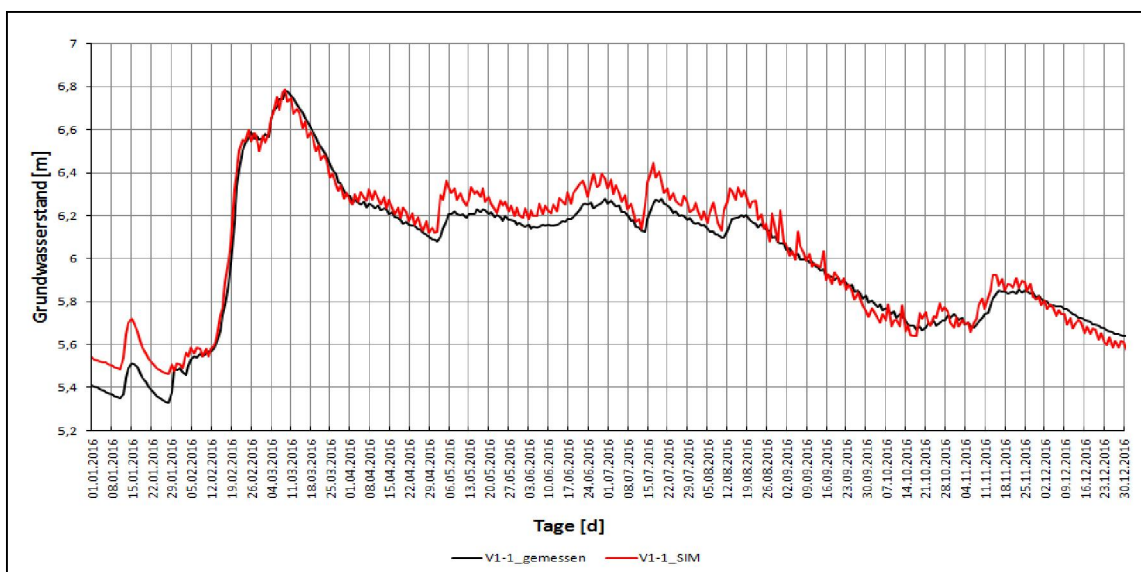


Abbildung 4-1: Ganglinienvergleich der gemessenen Grundwasserstandpegel und der simulierten Werte des lokalen Strömungsmodells

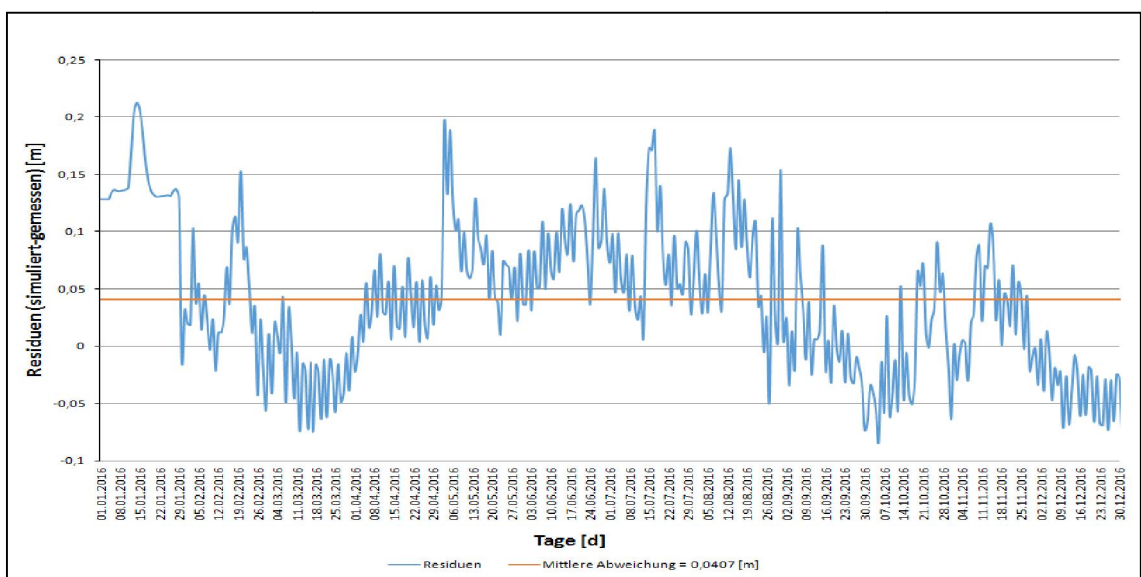


Abbildung 4-2: Residuen des lokalen Strömungsmodells

Das Modell bildet die Dynamik des Grundwasserstandes gut ab, von Mai bis August fallen die berechneten Spitzen etwas höher aus als bei den Messungen. Im Jänner weist die Simulation ein "Offset" von etwa 0,12 m auf. Anhand der Residuen ist eine weitreichende Überschätzung mit einer durchschnittlichen Abweichung von 0,041 m zu erkennen. Die maximale Abweichung beträgt 0,212 m.

4.2 Regionales Strömungsmodell

Im Zuge der Kalibrierung des regionalen Strömungsmodells wurden die hydraulischen Parameter solange verändert, bis sich die gewünschte Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsdaten einstellte. Dies wurde hauptsächlich nach subjektiven, visuellen Vergleichskriterien durchgeführt. Um die Qualität des Modells dennoch mit statistischen Kennzahlen beziffern zu können, wurden auch drei objektive Vergleichskriterien ausgewählt.

Subjektiv wurden die gemessenen Werte mit den berechneten Werten über die Zeit verglichen, der zeitliche Verlauf der Residuen (Differenzen zwischen Messung und Berechnung) beobachtet und die gemessenen Grundwasserpegel gegenüber den zeitgleich berechneten Grundwasserständen untersucht. Daraus erlangte man Aufschlüsse über die Dynamik der zu vergleichenden Datensätze, den Abstand zwischen den beiden Kurven und ob eine systematische Unter- oder Überschätzung vorliegt.

Als objektive Gütekriterien wurden die Werte der modifizierten Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE_{mod}), des modifizierten Index of Agreement (d_{mod}) und der RMSE-Observation Standard Ratio (RSR) gewählt. Durch die Kombination von diesen drei Werten kann die Güte von Simulationen gut beschrieben werden (Wedenig & Katz, 2018). Die Potenz j für NSE_{mod} und d_{mod} wurde mit dem Wert drei festgelegt.

$$NSE_{mod} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^j}{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|^j} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

$$d_{mod} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|x_i - y_i|)^j}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

$$RSR = \frac{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}]}{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}]} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

In der folgenden Tabelle 4-1 werden alle Parameter aufgelistet, die bei der Kalibrierung des hydraulischen Modells untersucht und verändert wurden.

Tabelle 4-1: Kalibrierungsparameter des hydraulischen Strömungsmodells

Untersuchte Parameter		Ausgangswert	Standardwert/ Annahme*	Endwert
Durchlässigkeit k_f [m/s]	oberster Bodenhorizont	$5 \cdot 10^{-4}$	Annahme	$5 \cdot 10^{-4}$
	Kies-/Sandsedimente	$5 \cdot 10^{-3}$	Annahme	$1,1 \cdot 10^{-1}$
	<i>Kieskoffer</i>	$5 \cdot 10^{-2}$	<i>Annahme</i>	$1,12 \cdot 10^{-1}$
Anisotropie der Durchlässigkeit k_h/k_v		10	Annahme	10
Porosität		0,2	Annahme	0,2
maximale Sättigung θ_s		1	Standard	1
residuale Sättigung θ_R		0,0025	Standard	0,0025
Empirisches Modell Van Genuchten	Formkoeffizient α	4,1	Standard	4,1
	Formparameter n	1,964	Standard	1

* aus Mach et al (2019)

Es ist ersichtlich, dass lediglich die Durchlässigkeit der Kies-/Sandsedimente und der Formparameter n des empirischen Modells zu einer verbesserten Annäherung der simulierten Werte an die Messdaten von V1-1 beitragen. Die Durchlässigkeit des Kieskoffers wurde am Ende des Kalibrierungsprozesses angepasst, sodass dessen Durchlässigkeit etwas höher ist als die der Kies- und Sandsedimente, da eine geringere Durchlässigkeit des Kieskoffers im Vergleich zum darunter liegenden, gewachsenen Boden einen Widerspruch darstellen würde.

Abbildung 4-3 zeigt die deutliche Annäherung der zu kalibrierenden Ganglinie an die Ganglinie der Messwerte von V1-1. Die Verbesserung der orangenen Kurve im Vergleich zur blauen resultiert ausschließlich aus der Erhöhung der Durchlässigkeit der Kies-/Sandsedimente im Modell. Die Durchlässigkeit der Kies-/Sandsedimente wurde von $5 \cdot 10^{-3}$ m/s auf $1,1 \cdot 10^{-1}$ m/s geändert, was eine Erhöhung um den Faktor 22 bedeutet und einem zu hinterfragenden hohen Wert entspricht. Durch die Änderung des Formfaktors n wird die restliche Annäherung (rote Kurve) an die Kurve der Messwerte erzielt. Die nachträgliche Änderung der Durchlässigkeit des Kieskoffers erzeugt eine geringfügige Verschlechterung der Anpassung, diese ist aber visuell kaum erkennbar.

Der sehr hohe Wert der Durchlässigkeit lässt sich anhand des Modells nicht erklären. Es wird vermutet, dass die, aufgrund der nicht abbildbaren radialen Eigenschaften der Brunnenrandbedingung, vorgenommen Änderungen der Versickerungsmenge, das lediglich einen Meter breite und somit in Querrichtung limitierte 2D-Modell und die, aus Niederschlagsmessungen berechnete und daher ungenaue, Grundwasserneubildungsrate Einfluss darauf nehmen.

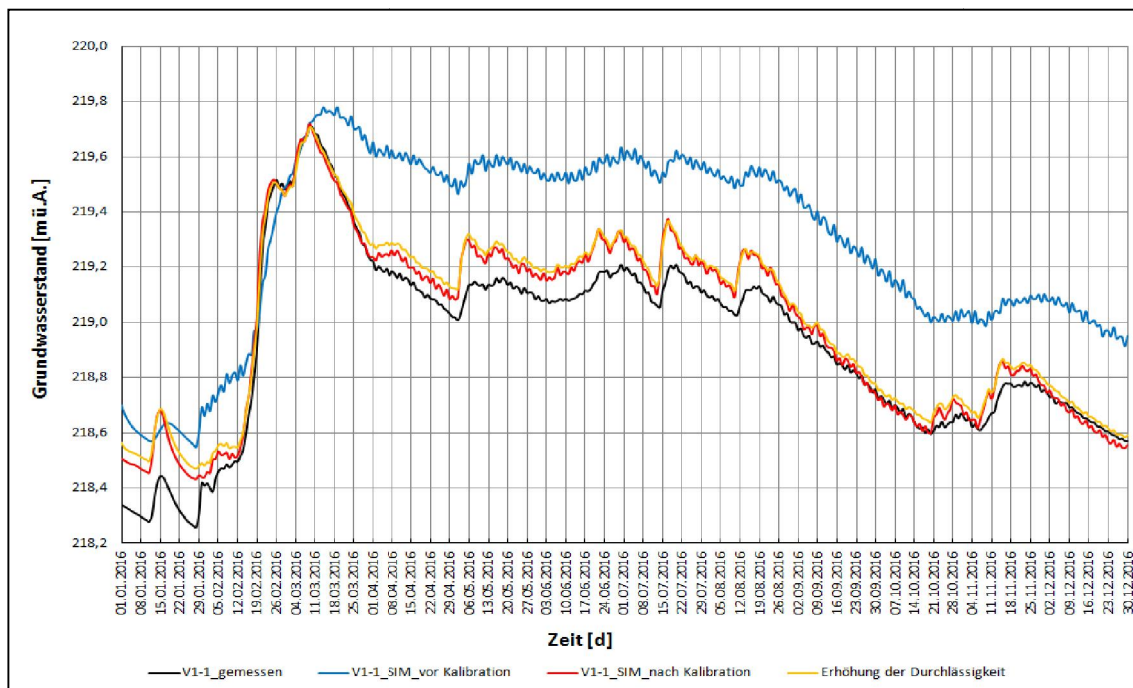


Abbildung 4-3: Ganglinienvergleich der Grundwasserstandpegel des regionalen Strömungsmodells vor und nach der Kalibrierung

Generell bildet das regionale Strömungsmodell die Dynamik der Messwerte gut nach. Vor allem der rasche Anstieg und der starke Rückgang des Grundwasserspiegels zwischen 12.02. und 01.04., sowie die Rückgänge von 26.08. bis 21.10. und 25.11. bis 31.12. werden sehr gut nachgebildet. Der rapide Anstieg der gemessenen Daten ab 28.01. und der Rückgang des Grundwasserstandes zwischen 01.04. und 15.04. (die Simulation zeigt einen Anstieg des Grundwassers) können allerdings nicht nachgebildet werden. Über das Jahr gesehen fallen die Spitzen und Anstiege der Simulation etwas höher aus als bei der Messung, im Zeitraum vom 12.02. bis 01.04. werden diese allerdings nahezu ideal simuliert. Im Jänner weist die Simulation ein "Offset" von etwa + 0,17 m auf, welches am 29.01. abrupt endet und einen Zusammenhang mit der am 29.01. beginnenden Versickerung und dem am 23.01. einsetzenden Tauwetter, siehe Abbildung 2-8 vermuten lässt. Die kurzfristigen Schwankungen, welche am 29.01. beginnen, sind das Resultat der intermittierend betriebenen künstlichen Versickerungsanlage.

Die Residuen des gemessenen Grundwasserspiegels nach der Kalibrierung in Abbildung 4-4 zeigen in der meisten Zeit eine leichte Überschätzung und weisen eine durchschnittliche Abweichung von 0,063 m auf. Die maximale Abweichung gibt es am 15.01. und beträgt 0,246 m. Wie beim Ganglinienvergleich ist auch bei den Residuen mit der Kalibrierung am 29.01. eine deutliche Reduktion um 0,154 m zu erkennen. Der rapide Anstieg der Residuen von 19.02. bis 01.04. vor der Kalibrierung ist nach der Kalibrierung nicht mehr vorhanden. Auffallend ist der entgegengesetzte Verlauf der Spitzen der Residuen nach der Kalibrierung im Vergleich zur Ausgangssimulation, siehe schwarze Pfeile.

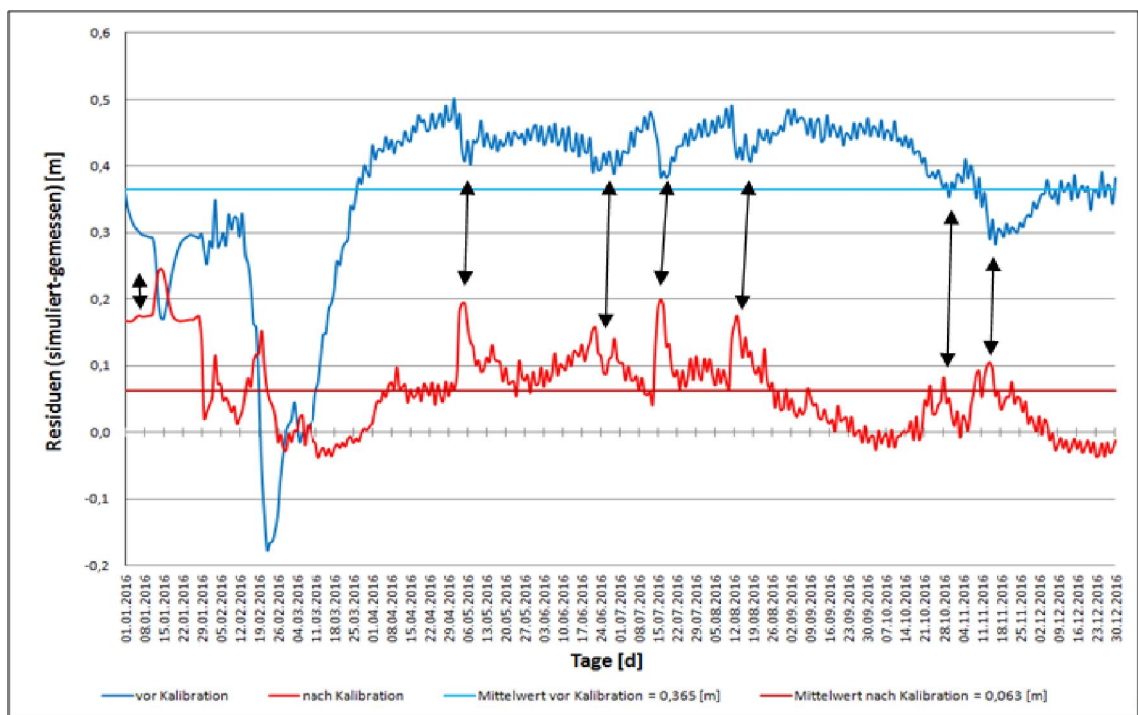


Abbildung 4-4: Residuen des regionalen Strömungsmodells vor und nach der Kalibrierung

Der Vergleich der gemessenen Grundwasserstände mit den zeitgleich berechneten in Abbildung 4-5 zeigt eine deutlich verbesserte Annäherung an die 1 zu 1 Linie im Vergleich zur Ausgangssimulation.

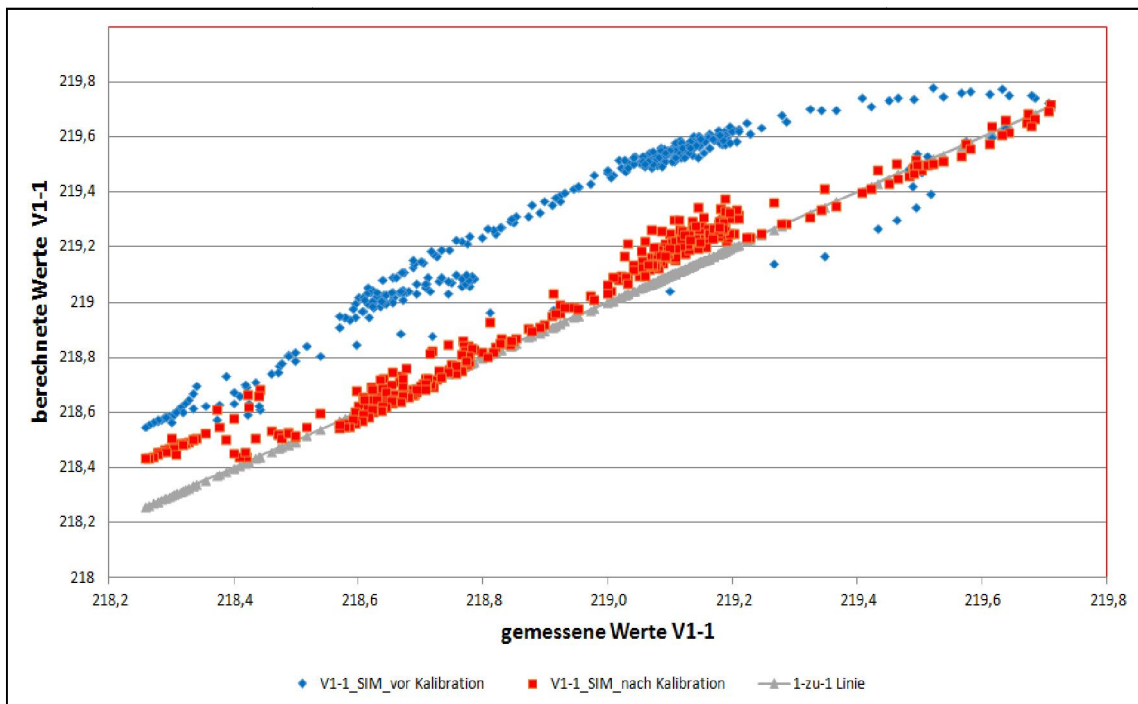


Abbildung 4-5: Vergleich der gemessenen Grundwasserstandpegel mit den zeitgleich berechneten Werten des regionalen Strömungsmodells

Die Werte der objektiven Vergleichskriterien sind in der folgenden Tabelle 4-2 abgebildet, darin ist auch mathematisch eine deutliche Verbesserung der Güte

der Simulation nach der Kalibrierung erkennbar. Besonders die Verbesserung von NSE_{mod} um 0,38 und RSR um 0,901 weisen auf eine stark verbesserte Annäherung an die Messwerte hin. Für NSE_{mod} und d_{mod} wäre der Wert einer perfekten Simulation 1, für RSR 0.

Tabelle 4-2: Werte der objektiven Gütekriterien des regional Strömungsmodells

Wert	vor Kalibrierung	nach Kalibrierung	Differenz
NSE_{mod}	0,597	0,978	0,380
d_{mod}	0,891	0,997	0,106
RSR	1,165	0,264	0,901

4.3 Wärmetransportmodell

Bei der Kalibrierung des Wärmetransportmodells wurden die thermischen Parameter solange verändert, bis sich die gewünschte Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsdaten einstellte. Die Durchführung erfolgte, wie bei der Kalibrierung des hydraulischen Strömungsmodells, nach subjektiven und objektiven Vergleichskriterien. Für die objektiven Gütekriterien wurden die selben Formeln für NSE_{mod} , d_{mod} und RSR verwendet.

In der folgenden Tabelle 4-3 werden alle Parameter aufgelistet, die bei der Kalibrierung des Wärmetransportmodells untersucht wurden.

Tabelle 4-3: Kalibrierungsparameter des Wärmetransportmodells

Untersuchte Parameter		Startwerte*	Endwerte
Wärmeperosität n [-]	oberster Bodenhorizont	0,3	0,01
	Kies-/Sandsedimente	0,3	0,08
	Kieskoffer	0,3	0,08
longitudinale Dispersion α_L [m]		5	3
transversale Dispersion α_T [m]	oberster Bodenhorizont	0,5	0,004
	Kies-/Sandsedimente	0,5	0,01
	Kieskoffer	0,5	0,01
Wärmekapazität c_s [MJ*m ⁻³ K ⁻¹]	oberster Bodenhorizont	2,52	2,52
	Kies-/Sandsedimente	2,52	1,7
	Kieskoffer	2,52	1,7
thermische Leitfähigkeit λ_s [J*m ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹]		3	3

* FEFLOW-Standardwerte

Die drei Bodenschichten oberster Bodenhorizont, Kies-/Sandsedimente und Kieskoffer wurden im Zuge der Wärmetransportmodellierung mit separaten Parametersätzen abgebildet. Während der oberste Bodenhorizont sich vom restlichen Bodenkörper abhebt, verhält sich der Kieskoffer bei allen Parametern nahezu gleich wie die Kies-/ Sandsedimente und weist daher dieselben Werte auf.

Das Ergebnis der Kalibrierung ergibt, dass sich die Wärmekapazität in den beiden unteren Schichten, Kieskoffer und Sedimente von $2,52 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ auf $1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ verringert und im obersten Bodenhorizont unverändert bleibt. Die Wärmeporosität wurde im obersten Bodenhorizont von 0,3 auf 0,01 und in den beiden anderen Schichten auf 0,08 geändert. Die markantesten Veränderungen gibt es bei der transversalen Dispersion. Hierbei ergibt die Kalibrierung, dass der Wert des obersten Bodenhorizontes vom Ausgangswert 0,5 m auf 0,004 m sinkt, die Werte der Kies-/Sandsedimente sowie des Kieskoffers wurden auf 0,01 m herabgesetzt. Nur so konnte die berechnete Ganglinie an die gemessene der Grundwassertemperatur angepasst werden. Die longitudinale Dispersion verringert sich im gesamten Modell von 5 m auf 3 m.

Die thermische Leitfähigkeit des obersten Bodenhorizontes und der Kies-/Sandsedimente wurde sowohl für höhere als auch niedrigere Werte untersucht, eine Verbesserung der Annäherung der simulierten an die gemessenen Werte konnte dadurch allerdings nicht erzielt werden. Aus diesem Grund wurde der FEFLOW-Standardwert von $3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ beibehalten. Die Wärmekapazität des Wassers sowie dessen thermische Leitfähigkeit wurden ebenfalls bei den Standardwerten von $c_w = 4,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$ und $\lambda_w = 0,65 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$ belassen.

Bei der Kalibrierung des Wärmetransportmodells war nach den ersten Simulationen mit geänderten Parametern schnell ersichtlich, dass lediglich das massive Herabsetzen der transversalen Dispersion zu einer signifikanten Annäherung der berechneten Grundwassertemperaturen an die Messdaten führt. Die Änderungen von 0,5 auf 0,01 bei Sedimenten und Kieskoffer und auf 0,004 im obersten Bodenhorizont verringern den vertikalen Wärmetransport um den Faktor 50 bzw. 125 und schränken diesen dadurch extrem ein. Abbildung 4-6 zeigt die deutliche Verbesserung der Simulation im Vergleich zur Messung durch die Verringerung der transversalen Dispersion in allen drei Bodenschichten (gesamtes Modell) von 0,5 auf 0,01. Die Verbesserung der orangen Kurve im Vergleich zur hellblauen resultiert ausschließlich aus der Verringerung der transversalen Dispersion. Die restliche Annäherung (rote Kurve) an die Kurve der Messwerte wird durch alle weiteren Parameterveränderungen erzielt.

Die Annäherung an die Messwerte nach der Änderung der transversalen Dispersion war schon sehr gut, in weiterer Folge wurde der Fokus auf zwei Dinge gelegt:

- Untersuchung der Temperaturunterschiede der gemessenen und berechneten Werte zwischen 29.01. und 11.03. und der in der Simulation nicht vorhandene Temperaturanstieg nach Inbetriebnahme der Versickerungsanlage am 29.01.,
- die Simulation der raschen, kurzzeitigen Temperaturschwankungen von Mitte Juni bis Jahresende.

Trotz etlicher Variationen der in Tabelle 4-3 angeführten Parameter war es nicht möglich die zuvor beschriebenen Punkte umzusetzen. Der Grund dafür, und für die sehr niedrige transversale Dispersion ist anhand des Modells nicht zu erklären. Es liegt die Vermutung nahe, dass die, aufgrund der Abbildung eines 3D-Prozesses durch ein 2D-vertikal-Modell vorgenommene Anpassung der Versickerungsmenge und deren Ganglinie Einfluss darauf nehmen.

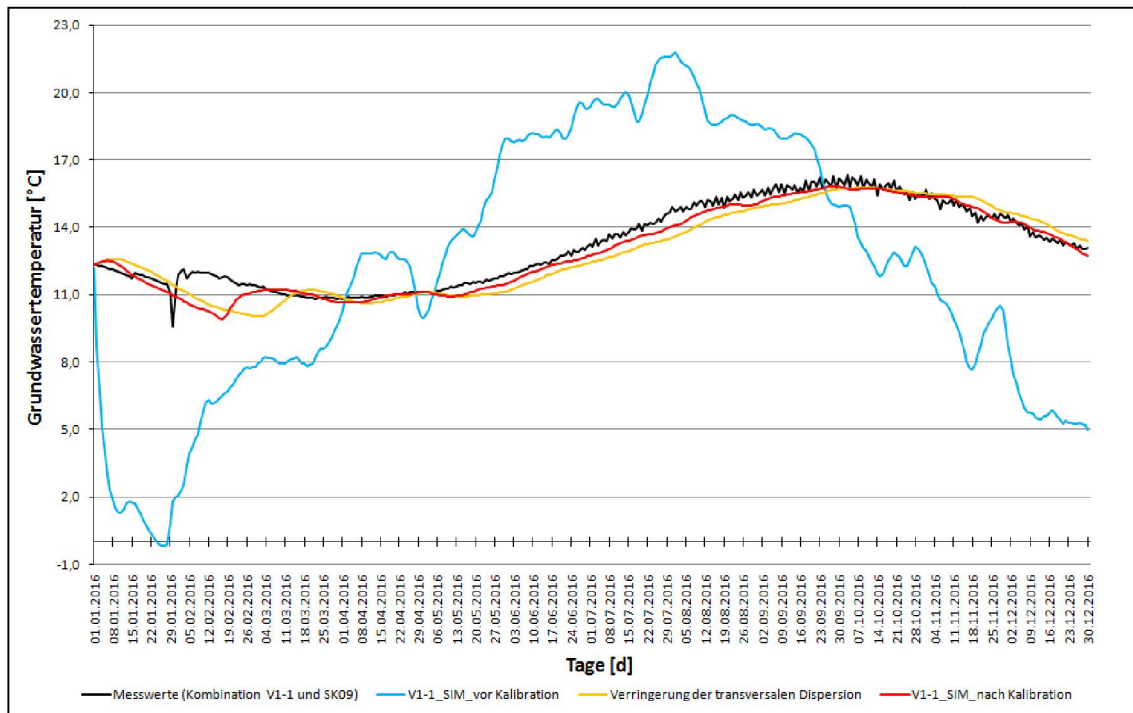


Abbildung 4-6: Ganglinienvergleich der Temperaturen des Wärmetransportmodells vor der Kalibrierung und danach

Generell ist die Annäherung der Simulation an die Messwerte sehr gut. Vor allem der gedämpfte Temperaturverlauf der Messwerte im Vergleich zur Ausgangssimulation werden nach der Kalibrierung gut nachgebildet.

Der Temperaturrückgang der Messwerte von 01.01. bis 29.01. kann im Modell nicht genau nachgebildet werden. In den ersten sieben Tagen der Simulation steigt die Grundwassertemperatur und sinkt anschließend rascher als bei der Messung. Von 29.01 auf 30.01. fällt die Temperatur der Messreihe rasant ab und steigt anschließend bis 03.02. ähnlich schnell wieder an. Dieser Temperatursprung wird mit dem Start der Versickerungsanlage am 29.01. in Verbindung gebracht.

Die in das Modell implementierte Temperatur des zu versickernden Wassers wird allerdings an dessen Entnahmestelle und nicht an der Versickerungsanlage gemessen. Über die Vorgänge zwischen Entnahme und Versickerung wurden die folgenden Vermutungen angestellt. Das zu versickernde Wasser ist vor Beginn der Versickerung im oberflächennahe verlegten Zubringerrohr gestanden. Daher wird vermutet, dass die niedrige Temperatur des Bodens das zu versickernde Wasser abgekühlt hat, was zum Temperaturabfall zu Beginn der

Versickerung am 29.01. führte. Nach dieser ersten kalten Welle steigt die Temperatur des zu versickernden Wassers an, was sich im anschließenden Anstieg der Temperaturen der Messreihe widerspiegelt. Der Temperaturabfall kann im Modell aufgrund der fehlenden tatsächlichen Temperatur des zu versickernden Wassers an der Versickerungsanlage nicht nachgebildet werden. In der Simulation sinkt die Grundwassertemperatur an der Messstelle V1-1 von 07.01. bis 27.02. daher nahezu stetig. Der Temperaturanstieg aufgrund des Beginns der Versickerung beginnt mit 19 Tagen Verzögerung am 17.02., wofür hauptsächlich die extrem niedrige transversale Dispersion verantwortlich sein dürfte.

Die raschen, kurzzeitigen Temperaturschwankungen der Messreihe von Mitte Juni bis Jahresende können in der Simulation nicht nachgebildet werden. Hier wird vermutet, dass vor allem die Veränderung der Ganglinie der Versickerung (geringere Versickerungsmenge sowie kürzere Versickerungszeiten) dafür verantwortlich ist.

Die Residuen der gemessenen Grundwassertemperatur nach der Kalibrierung in Abbildung 4-7 zeigen in der meisten Zeit eine leichte Unterschätzung und weisen eine durchschnittliche Abweichung $-0,25\text{ °C}$ auf. Die maximale Abweichung gibt es am 17.02. und beträgt $1,87\text{ °C}$. Die generelle Verringerung der Residuen nach der Kalibrierung im Vergleich zur Ausgangssituation ist sehr deutlich. Der Verlauf der Residuen vor der Kalibrierung ähnelt sehr der Temperaturganglinie vor der Kalibrierung, siehe Abbildung 4-6, was nach der Kalibrierung nicht mehr zutrifft. Die deutlichen Temperaturrückgänge und -anstiege vor der Kalibrierung sind nach der Kalibrierung nicht mehr vorhanden.

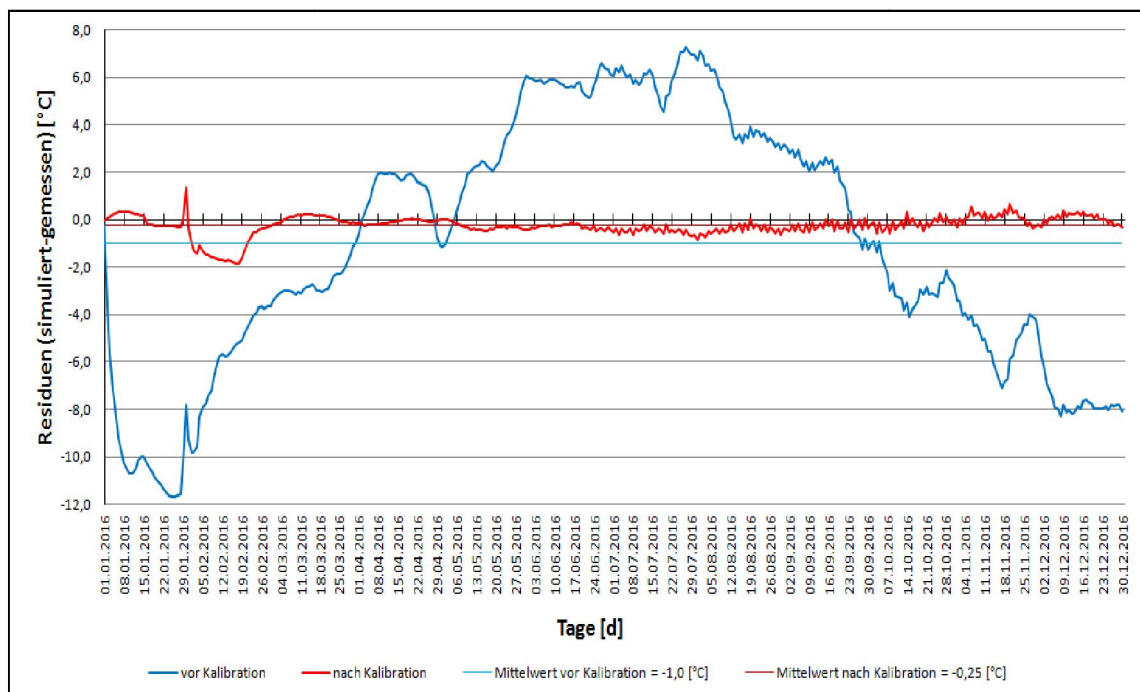


Abbildung 4-7: Residuen des Wärmetransportmodells vor und nach der Kalibrierung

Ergebnisse und Diskussion

Der Vergleich der gemessenen Grundwassertemperaturen mit den zeitgleich berechneten in Abbildung 4-8 zeigt ebenfalls eine deutlich verbesserte Annäherung an die 1 zu 1 Linie im Vergleich zur Ausgangssimulation.

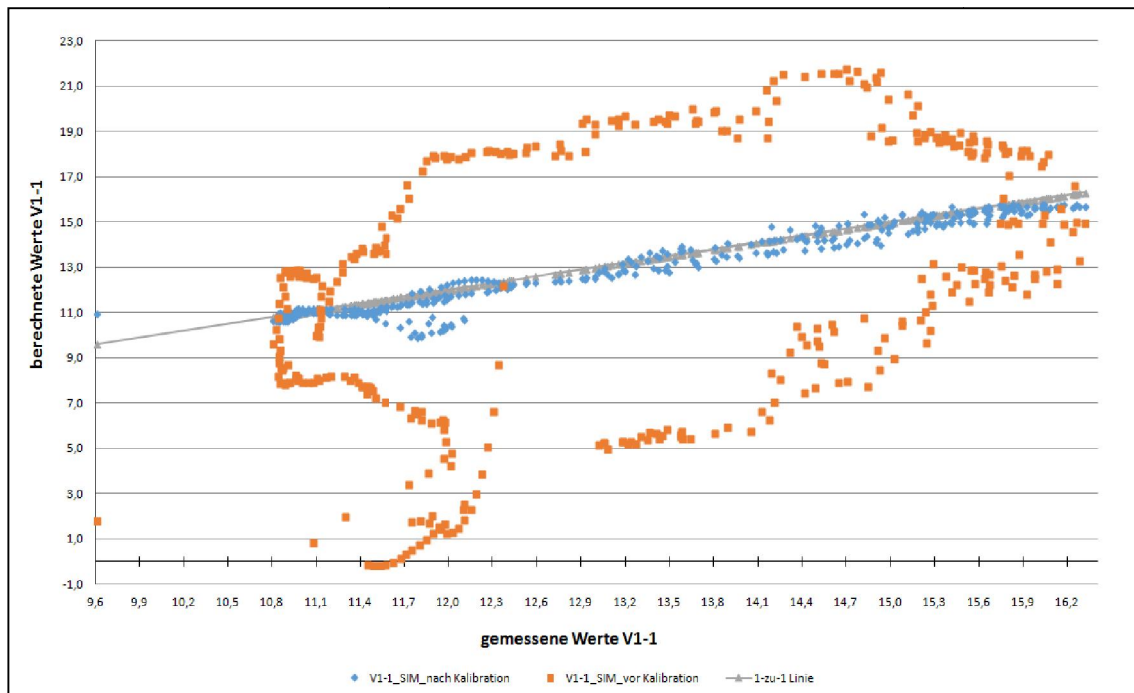


Abbildung 4-8. Vergleich der gemessenen Grundwassertemperaturen mit den zeitgleich berechneten Werten des Wärmetransportmodells

Auch die Werte der objektiven Vergleichskriterien in Für NSE_{mod} und d_{mod} wäre der Wert einer perfekten Simulation 1, für RSR 0.

Tabelle 4-4 zeigen eine wesentliche Verbesserung der Güte der Simulation im Vergleich zur Ausgangssituation. Besonders die Verbesserung von RSR um 2,317 von 2,547 auf 0,23 weist auf eine sehr gute Annäherung an die Messwerte hin. Für NSE_{mod} und d_{mod} wäre der Wert einer perfekten Simulation 1, für RSR 0.

Tabelle 4-4: Werte der objektiven Gütekriterien des Wärmetransportmodells

Wert	vor Kalibrierung	nach Kalibrierung	Differenz
NSE_{mod}	0,200	0,977	0,777
d_{mod}	0,551	0,997	0,446
RSR	2,547	0,230	2,317

5 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellierung des Wärmeeintrags und des Wärmetransports durch eine künstliche Grundwasseranreicherungsanlage ist aufgrund der 3-dimensionalen Strömungs- und Wärmetransportprozesse ein komplexer und umfangreicher Vorgang. Um diesen zu vereinfachen wurde für dessen Abbildung ein 2D-vertikal-Modell verwendet, welches in drei Stufen (lokales Strömungsmodell, regionales Strömungsmodell und Wärmetransportmodell) erstellt wurde.

Die Reduzierung auf ein 2D-vertikal-Modell erhöht die numerische Stabilität, verkürzt die Rechenzeit und vereinfacht die Parametrisierung des Modells. Allerdings mussten aufgrund dieser Vereinfachung auch Kompromisse eingegangen werden, da unter anderem die radialen Auswirkungen von Brunnenrandbedingungen, in einem 2D-vertikal-Modell, nicht abgebildet werden können.

Bei der Kalibrierung des regionalen Strömungsmodells erzeugen die Durchlässigkeit k_f und der Formparameter n des empirischen Modells die starke Verbesserung der Modellqualität. Vor allem die Verbesserung des objektiven Gütekriteriums RSR von 1,165 auf 0,264 weist auf eine stark verbesserte Annäherung an die Messwerte hin.

Die Qualitätsverbesserung des Wärmetransportmodells im Zuge der Kalibrierung wurde hauptsächlich durch die starke Verringerung der transversalen Dispersion ermöglicht. In Kombination mit weiteren Parametern konnte RSR schlussendlich von 2,547 auf 0,23 verbessert werden.

Generell ist das 2D-vertikal-Modell ein gutes Werkzeug um die Auswirkungen der Versickerungsanlage auf das Grundwasser darzustellen und zu simulieren, was sowohl den Grundwasserstand, als auch die Temperatur des Grundwassers betrifft. Um die Eigenschaften der Temperaturganglinie des Grundwassers in Zukunft noch besser abbilden zu können, ist meiner Meinung nach ein 3D-Modell notwendig, da bei diesem keine Kompromisse aufgrund eines vereinfachten Modellansatzes berücksichtigt werden müssen.

Literaturverzeichnis

- Aeschbach-Hertig, W. (2005) Physik aquatischer Systeme I, Kapitel 6, Universität Heidelberg, [online im Internet] URL: <http://web1.iup.uni-Heidelberg.de/institut/forschung/groups/aquasys/WAH/lehre/Material.html>, (Zugegriffen am 09. Jänner 2019).
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2009) FA13A-33.10-436/2009-13. WV Grenzland Süd-Ost – Brunnen Fluttendorf 2 und Donnersdorf 1, Konsenserhöhung sowie Errichtung einer künstlichen Grundwasseranreicherung Donnersdorf – Fluttendorf zur Qualitätsverbesserung; wasserrechtliche Bewilligung.
- Bear, J., Verruijt, A. (1987) Modeling Groundwater Flow and Pollution, Theory and Applications of Transport in Porous Media, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Böttcher, N. (2007) Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala, Technische Universität Dresden.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018) Wasserversorgung und -verwendung in Österreich, [online im Internet] URL: <https://www.bmnt.gv.at/wasser/nutzung-wasser/versorgung.html>, (Zugegriffen am 08.01.2020).
- De Vries, D.A. (1963) Thermal properties of soils, Physics of Plant Environment, (W. R. Van Wijk, Hrsg.), John Wiley Sons, Inc., New York.
- Draxler, J., Fank, J. (2017) Hydrogeologisches Monitoring der Brunnen des Wasserverbandes Grenzland Südost inklusive externer Einzugsgebietsüberwachung und Wassersicherheitsplan, unveröffentlichter Bericht der JR-AquaConSol GmbH, Graz, 155 Seiten, 82 Abbildungen, 4 Beilagen.
- Fank, J., Leis, A. und Fank, A. (2012) Beurteilung der Monitoringergebnisse Phase 1. Unveröff. Ber. JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES Inst. f. Wasser, Energie und Nachhaltigkeit – Wasser Ressourcen Management, 54 S., Graz.
- Fank, J., Rock, G., Fuchs, K., Dalla-Via, K. (2002) Grundwasserströmungs- und Transportmodell „Unteres Murta“ zur Erfassung der regionalen Strömungsverhältnisse und der Interaktion von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser in einem rezenten Auegebiet (Schlussteil-Endbericht) PROJ. NR. STA 28C/99; GRAZ.
- GIS-Steiermark (2019) [online im Internet] URL: <https://gis.stmk.gv.at/atlas/>, (Zugegriffen am 04. September 2019).
- Kupfersberger, H., Draxler, J. C., Rock, G. (2014) Fluttendorf – Donnersdorf künstliche Grundwasseranreicherung, Grundwasserhydrologisches Gutachten, Graz.

- Mach J., Rock G., Klammler G., Draxler J., Kupfersberger H., Fank J., (2019) Gekoppelte Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodelle in den Grundwasserkörpern Leibnitzer Feld und Unteres Murtal, unveröffentlichter Bericht der JR-AquaConSol GmbH, Graz, 154 Seiten, 71 Abbildungen, 4 digitale Anhänge.
- Markert, A. (2012) Einfluss von Substrateigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Böden, Bodenphysikalische Nutzungsaspekte von Erdwärmekollektoren, Technische Universität Berlin, Berlin.
- MIKE Powered by DHI Software (Hrsg.) (2017) FEFLOW 7.1, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, Introductory Tutorial.
- ÖNORM B 2400, 2016-03-01 Hydrologie - Hydrographische Begriffe und Zeichen - Ergänzende Bestimmungen zur ÖNORM EN ISO 772, Österreichisches Normungsinstitut (ON),
- Schartner, C., Kralik, M. (2011) Trends der Grundwassertemperatur, Untersuchung von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich, Report REP-0328, Umweltbundesamt GmbH, Wien.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (Hrsg.) (2019) Grundwassertemperatur 02.14 (Ausgabe 2016), Berlin, [online im Internet] URL: <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/kc214.htm>, (Zugegriffen am 18. Dezember 2019).
- Van Wijk, W.R., De Vries, D.A. (1963) Periodic temperature variations in a Homogeneous Soil, Physics of Plant Environment, (W. R. Van Wijk, Hrsg.), North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Wedenig, P., Katz, H. (2018) Zusammenfassung; Projekt KGM, KGM – Kompetenzzentrum Grundwassermodellierung Graz – Numerische Simulation von Wasser-, Wärme- und Stoffkreisläufen, Graz.

Anhang

Anhang A

Beispiele für Messlücken und Loggerfehler in der Versickerungszeitreihe

Anhang A

Beispiele für Messlücken und Loggerfehler in der Versickerungszeitreihe

Die gelb markierten Werte wurden nach 4 Kategorien ergänzt, siehe Kapitel 2.3.1.3.

- Kategorie 1: In der Zeit vor 29.01.2016 in der nicht versickert wurde
- Kategorie 2: In der Versickerungspause
- Kategorie 3: In der Versickerungsperiode
- Kategorie 4: Pausen und Versickerungszeiten übergreifende Lücken

1	2	3	4				
14.01.16 19:00	0,000	02.08.16 04:00	0,000	13.07.16 20:00	-38,000	16.05.16 21:00	-38,000
14.01.16 20:00	0,000	02.08.16 05:00	0,000	13.07.16 21:00	-14,000	16.05.16 22:00	-34,000
14.01.16 21:00	0,000	02.08.16 06:00	-23,000	13.07.16 22:00	0,000	16.05.16 23:00	-5,000
14.01.16 22:00	0,000	02.08.16 07:00	-39,000	13.07.16 23:00	0,000	17.05.16 00:00	0,000
14.01.16 23:00	0,000	02.08.16 08:00	-38,000	14.07.16 00:00	0,000	17.05.16 01:00	0,000
15.01.16 00:00	0,000	02.08.16 09:00	-39,000	14.07.16 01:00	0,000	17.05.16 02:00	0,000
15.01.16 01:00	0,000	02.08.16 10:00	-38,000	14.07.16 02:00	-21,000	17.05.16 03:00	0,000
15.01.16 02:00	0,000	02.08.16 11:00	-16,000	14.07.16 03:00	-34,000	17.05.16 04:00	-34,000
15.01.16 03:00	0,000	02.08.16 12:00	0,000	14.07.16 04:00	0,000	17.05.16 05:00	-34,000
15.01.16 04:00	0,000	02.08.16 13:00	0,000	14.07.16 05:00	0,000	17.05.16 06:00	-34,000
15.01.16 05:00	0,000	02.08.16 14:00	0,000	14.07.16 06:00	-32,000	17.05.16 07:00	-34,000
15.01.16 06:00	0,000	02.08.16 15:00	0,000	14.07.16 07:00	-11,000	17.05.16 08:00	-34,000
15.01.16 07:00	0,000	02.08.16 16:00	-19,000	14.07.16 08:00	0,000	17.05.16 09:00	-34,000
15.01.16 08:00	0,000	02.08.16 17:00	-33,000	14.07.16 09:00	0,000	17.05.16 10:00	0,000
15.01.16 09:00	0,000	02.08.16 18:00	-33,000	14.07.16 10:00	0,000	17.05.16 11:00	0,000
15.01.16 10:00	0,000	02.08.16 19:00	-34,000	14.07.16 11:00	0,000	17.05.16 12:00	0,000
15.01.16 11:00	0,000	02.08.16 20:00	-32,000	14.07.16 12:00	-21,000	17.05.16 13:00	0,000
15.01.16 12:00	0,000	02.08.16 21:00	-14,000	14.07.16 13:00	-33,000	17.05.16 14:00	-29,000
15.01.16 13:00	0,000	02.08.16 22:00	0,000	14.07.16 14:00	-33,000	17.05.16 15:00	-36,000
				14.07.16 15:00	-32,000		