

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 21 (2016)

Heft: 1

Artikel: Stärken und Schwächen von Grundwassermodellen, anhand eines Fallbeispiels im Berner Seeland = Strengths and weaknesses of groundwater models on the basis of a case study in the Bernese "Seeland"

Autor: Gobat, Julien / Böhi, Dieter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-658186>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Stärken und Schwächen von Grundwassermodellen, anhand eines Fallbeispiels im Berner Seeland

Strengths and weaknesses of groundwater models on the basis of a case study in the Bernese «Seeland»

Julien Gobat¹, Dieter Böhi¹

Stichworte: Seeland, Kappelen, Nidau-Büren Kanal, Hagneck Kanal, Hydrogeologie, Grundwassermodelle, Finite Elemente Methode, analytische und numerische Berechnungsmethoden

Zusammenfassung

Grundwassermodellrechnungen werden heute meist unter Zeitdruck und mit stark gekürztem Budget durchgeführt. Zur Auswahl stehen analytische und numerische Modellierungsmethoden. Analytische Modelle basieren dabei auf sehr vereinfachten Annahmen, welche einem kompliziert aufgebauten Grundwasserleiter nur näherungsweise gerecht werden. Numerische Modelle können komplexe Verhältnisse theoretisch problemlos abbilden. Allerdings wird oft sowohl bei der Datenerhebung wie auch bei der Verfeinerung des Modells und der Anzahl an Rechendurchläufen gespart. In der Folge wird mit falschen Randbedingungen und zu groben Modellen gerechnet, was zu fragwürdigen Resultaten und Fehlinterpretationen führen kann. Die Ergebnisse fliessen dann z. B. in Schutzzonenauscheidungen oder in Grundwassersanierungsprojekte ein, was zu falsch platzierten Filterbrunnen, abgelehnten Bauvorhaben etc. führen kann. Korrekt angewendet und kalibriert können Grundwassermodelle interessante Einsichten in die Funktionsweise von Grundwasserleitern bringen. Sie erlauben z. B., künftige Vorhaben zu testen und Prognosen über daraus resultierende Veränderungen zu erstellen.

Der Artikel vergleicht anhand des Seelandgrundwasserleiters zwischen Kerzers im Südwesten und dem Nidau-Büren-Kanal im Nordosten verschiedene Berechnungsmodelle. Geprüft wird die Tauglichkeit der Modelle zur Prognose der Grundwasserneubildung aus Niederschlag und Infiltration von Aarewasser und damit zur Prognose des Aarewasseranteils in Filterbrunnen.

Abstract

Calculations of groundwater models are often performed with lack of time and money. In a preliminary step, there can be chosen between analytical and numerical models.

Analytical models are based on simplifying assumptions which can't be more than an approximate approach in comparison to a complicated groundwater body.

The aim of numerical models is to reproduce complicated groundwater situations in their full complexity. Unfortunately, lack of money and thus reduced data collection as well as reduced refinement of model inputs and too few recalculations can lead to inaccurate results and misinterpretations. But those results are often used as a base while defining groundwater protection zones as well as during groundwater rehabilitation projects. Thus, consequences may be wrongly set groundwater wells, declined construction projects, unnecessary constraints, etc.

Nevertheless, accurately used groundwater models may give important insight into the functioning of groundwater bodies. If well calibrated, they allow testing of planned exploitations and predictions about the influence of such a project on the current situation.

Using the groundwater body of the Swiss «Seeland» between Kerzers (SW) and the Nidau-Büren-Channel (NE), the article compares different analytical and numerical models on their capability to predict recharge of groundwater by precipitation as well as by infiltration of fluvial Aare-water. The aim is to predict the fraction of Aare-water in a pumping well.

¹ Kellerhals+Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

1 Einführung

Der Seelandgrundwasserleiter erstreckt sich etwa von Kerzers im Südwesten bis zum Nidau-Büren Kanal im Nordosten. Der Hagneck-Kanal teilt diesen Grundwasserleiter in einen südlichen und einen nördlichen Teil (Kellerhals & Tröhler 1976). Die Modelle, welche im vorliegenden Artikel beschrieben werden, beschränken sich auf den nördlichen Teil des Seelandgrundwasserleiters. Die Neubildung des Grundwassers erfolgt hauptsächlich durch die flächenmässige Infiltration von Niederschlagswasser sowie

durch die Infiltration aus Oberflächenflussgewässern (Hagneck-Kanal und Alte Aare) (Baillieux et al. 2014, Biaggi et al. 2004).

Die Zusammensetzung der infiltrierenden Wasser ist sehr unterschiedlich. Das Niederschlagswasser durchsickert landwirtschaftlich intensiv genutzte Böden. Dabei reicht es sich mit typischen Stoffen aus landwirtschaftlich genutzten Gebieten, wie z. B. Nitrat, an. Zudem kommt dieses Wasser in Kontakt mit der Bodenluft, welche einen höheren CO_2 -Gehalt als die Atmosphäre auf-

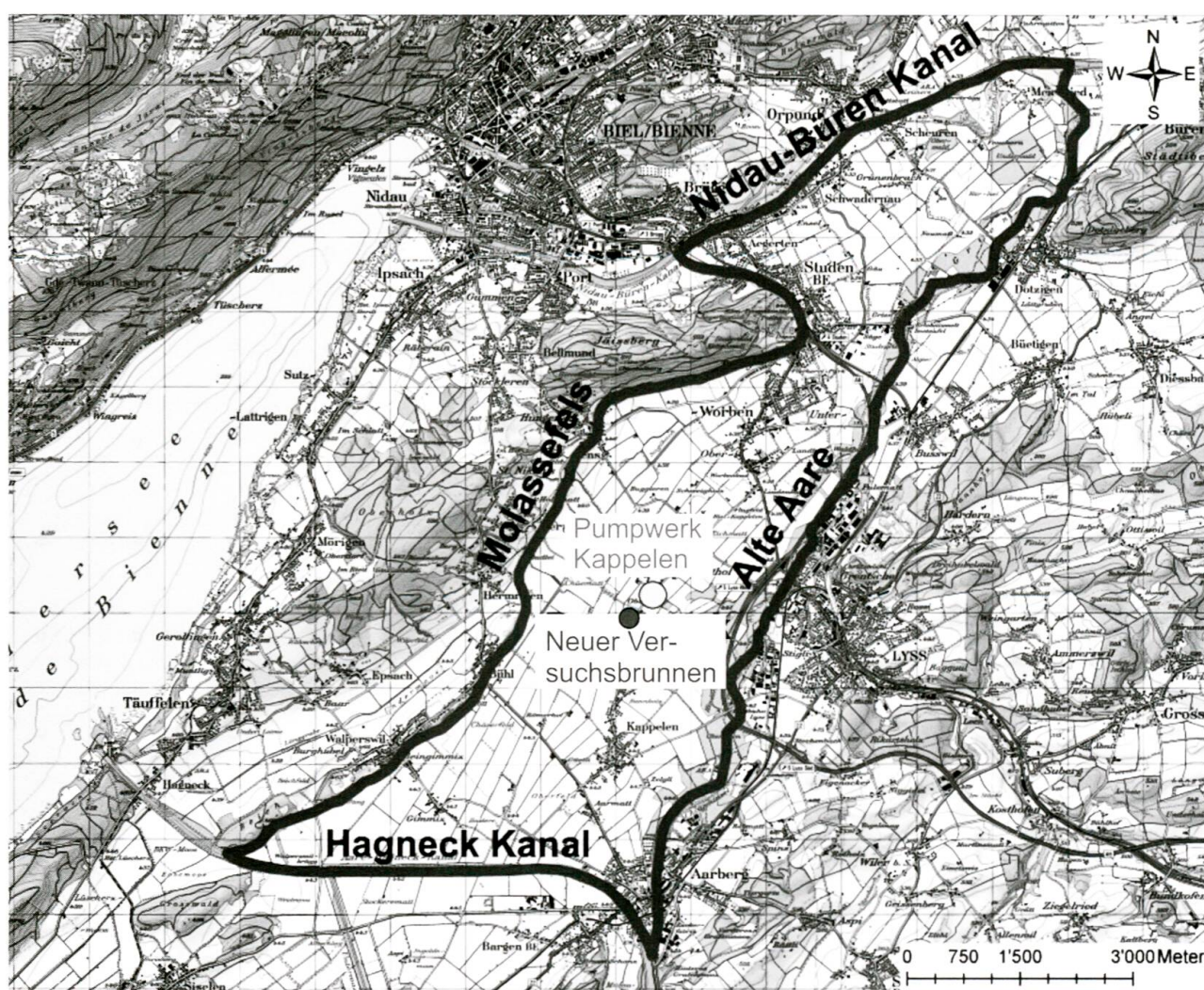


Fig. 1: Lage des nördlichen Teils des Seelandgrundwasserleiters, der Trinkwasserefassung von Kappelen und des neuen Versuchsbrunnens. Hintergrundkarte: Landeskarte 1:50'000, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, map.geo.admin.ch (27.01.2015). Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 1: Position of the northern part of the Seeland groundwater body, groundwater basin of the drinking water well of Kappelen as well as of the new testing well southwest of it. Background map: Swiss National Map 1:50'000, Federal Office of Topography swisstopo (map.geo.admin.ch, 27.01.2015). Modified after Gobat 2015.

weist. Dies führt zu einem höheren CO_2 -Gehalt im Grundwasser, welcher wiederum dazu führt, dass mehr Kalzium und Bikarbonat aus den karbonathaltigen Lockergesteinen des Grundwasserleiters gelöst werden. Die Härte des Wassers wird dadurch erhöht. Das Aarewasser ist dagegen nur schwach mineralisiert und reduziert im Grundwasser die Hauptionenkonzentration (Baillieux et al. 2014).

Die beiden Wässer unterscheiden sich auch bezüglich der stabilen Wasserisotope. Das Einzugsgebiet der Aare ist topografisch höher und weiter im Landesinnern gelegen, als das Seeland. Dadurch sind die Niederschläge im Einzugsgebiet der Aare mit leichten Wasserisotopen angereichert, während die lokalen Niederschläge im Seeland einen erhöhten Anteil an ^2H und ^{18}O aufweisen. Die Messung der stabilen Wasserisotopen des Grundwassers erlaubt es, die prozentuale Anteile des Aare- und des Meteorwassers anhand einer Mischgleichung zu bestimmen (Baillieux et al. 2014).

Kürzlich durchgeführte Analysen von Felddaten (Gobat 2015) zeigen, dass die vertikale Durchmischung der beiden Wässer auch in einer Entfernung von ca. 3'300 m vom Hagneck-Kanal bzw. der Alten Aare noch nicht vollständig abgeschlossen ist. In tieferen Bereichen des Grundwasserleiters ist der Aarewasseranteil gegenüber den oberflächennahen Bereichen stark erhöht. So beträgt der Anteil Aarewasser in 4 m Tiefe etwa 20%, in einer Tiefe von 22 m aber bereits rund 50%. Die beschriebenen Messresultate stammen aus einem speziell für diesen Zweck installierten Versuchsbrunnen, welcher es erlaubt, Grundwasser in drei verschiedenen Tiefen zu beproben. Zusätzlich wurde das oberflächennahe Grundwasser in einem sehr nahe gelegenen Piezometer beprobt, was es erlaubte, den Aarewasseranteil in vier verschiedenen Tiefen zu bestimmen (Fig. 2).

Verschiedene Wasserversorgungen nutzen das Seelandgrundwasser für ihre Trinkwas-

serbeschaffung. Die Fassung der Gemeinde Kappelen befindet sich in Werdthof, ca. 3'700 m vom Hagneck-Kanal entfernt. Sie ist 17 m tief, was in etwa der halben Mächtigkeit des Grundwasserleiters entspricht. Die Gemeinde fördert im Durchschnitt 240 l/min Trinkwasser aus dieser Fassung. Die Messung der stabilen Wasserisotope hat ergeben, dass das geförderte Wasser zu 29 – 38% aus Aarewasser besteht (Gobat 2015).

Anhand von Pumpversuchen im oben erwähnten Versuchsbrunnen und anhand von Modellrechnungen wurde untersucht, wie weit die Gemeinde Kappelen die Qualität ihres Trinkwassers verbessern kann, wenn vermehrt Aarewasser aus den tieferen Bereichen des Grundwasserleiters gefördert wird und somit die Nitrat-Konzentration und die Härte des geförderten Wassers reduziert

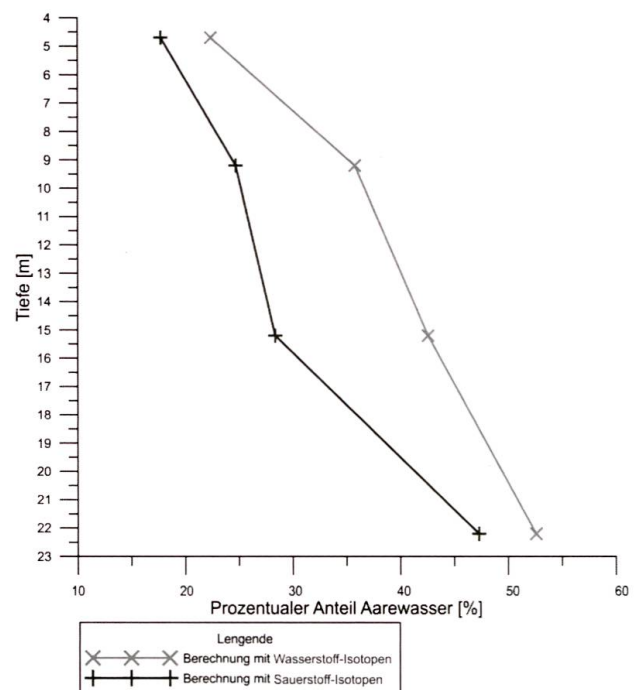
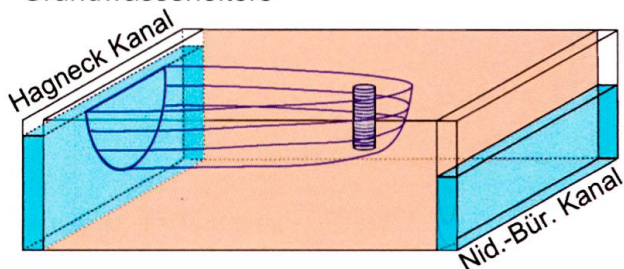


Fig. 2: Verteilung des Aarewasseranteils im Versuchsbrunnen in Abhängigkeit von der Tiefe. Berechnet anhand der stabilen Sauerstoffisotopen (dunkelgraue Kurve) bzw. anhand der stabilen Wasserstoffisotopen (hellgraue Kurve). Modifiziert nach Gobat 2015.

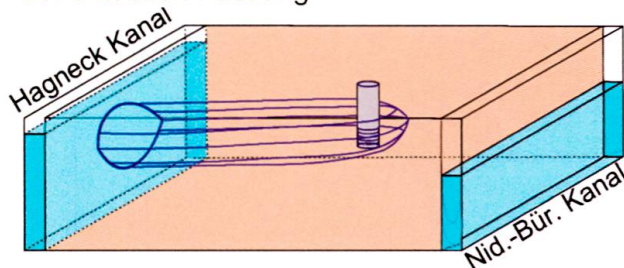
Fig. 2: Fraction of Aare-water percentage as a function of depth in the new testing well. Calculated by means of stable oxygen isotopes (dark grey line) respectively stable hydrogen isotopes (light grey line). Modified after Gobat 2015.

wird. Dazu wurden zwei mögliche Anpassungen der aktuellen Fassung überprüft. Einerseits wurde überprüft, wie sich die Qualität des geförderten Wassers verändert, wenn der obere Teil der Fassung abgedichtet wird und nur im untersten Meter Grundwasser gepumpt wird. Andererseits wurde auch überprüft, wie sich die Wasserqualität verändert,

Aktuelle Fassungskonfiguration:
Filterstrecke bis in die Hälfte des Grundwasserleiters



Erster Modifikationsvorschlag:
Filterstrecke im unteren Bereich der aktuellen Fassung



Zweiter Modifikationsvorschlag:
Filterstrecke an der Basis des Grundwasserleiters

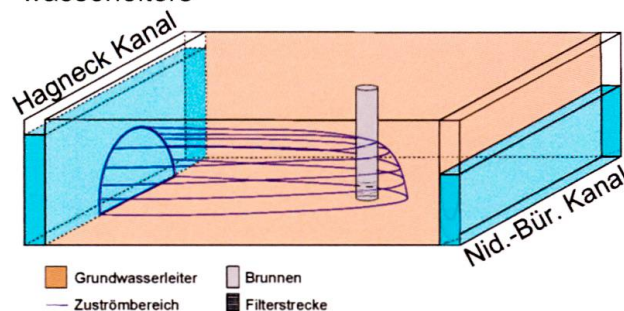


Fig. 3: Konzeptuelles Modell der Zuströmbereiche für die aktuelle Konfiguration der Fassung und die zwei Modifikationsvorschläge. Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 3: Conceptual model of the current configuration of the drinking water well of Kappelen and of two modifications of it. Modified after Gobat 2015.

wenn die Fassung bis zur Basis des Grundwasserleiters, d. h. bis in eine Tiefe von etwa 30 m, verlängert wird und wenn nur noch in diesem untersten Bereich gepumpt wird. Diese Anpassungen sind in Fig. 3 als konzeptuelles Modell schematisch dargestellt. Die Zuströmbereiche der verschiedenen Konfigurationen sind ebenfalls schematisch abgebildet.

Pumpversuche wurden in allen drei Tiefenbereichen des Versuchsbrunnens durchgeführt. Aus organisatorischen und logistischen Gründen konnten jedoch nur 135 l/min gefördert werden und der längste Pumpversuch, welcher im untersten Tiefenintervall durchgeführt wurde, dauerte nur 55 Stunden. Über diese Pumpdauer und mit der angegebenen Pumpmenge blieb der Anteil Aarewasser am geförderten Wasser konstant. Dies war auch in den übrigen Intervallbereichen so. Das heisst: die Konzentration der Hauptionen blieb in allen drei Intervallbereichen über die gesamte Pumpdauer ebenfalls mehr oder weniger konstant (Gobat 2015).

Da die Randbedingungen für die Pumpversuche nicht optimal waren, wurden diese in Form einer numerischen Modellierung nachgestellt, mit welcher die zeitlichen und logistischen Begrenzungen der Pumpversuche umgangen werden konnten. Damit konnte der Einfluss der zwei Anpassungsvorschläge an der Trinkwasserfassung auf den Aarewasseranteil und damit auf die Wasserqualität überprüft werden. Dies bei einem kontinuierlichen Pumpvorgang mit einer Fördermenge von 240 l/min, entsprechend dem Verbrauch der Gemeinde Kappelen (Gobat 2015).

2 Analytische Modelle

In einem ersten Schritt wurde versucht, die Verteilung des Aarewassers im Grundwasserleiter mit Hilfe analytischer Modelle mathematisch zu beschreiben. Zwei Modelle wurden dazu verwendet. Das erste Modell

betrachtet allein die Advektion des Wassers im Grundwasserleiter. Das zweite Modell berücksichtigt auch die Dispersion des Wassers.

2.1 Advektives Strömungslinienmodell

Ein rein advektives Strömungslinienmodell wurde in einem ersten Schritt erstellt. Das zweidimensionale Modell entspricht einem vertikalen Längsschnitt durch den Grundwasserleiter, welcher als Box modelliert wurde. Der Hagneck-Kanal bzw. die Alte Aare kann als Punkt (Wasserquelle) in der oberen linken Ecke der Box betrachtet werden. Die Infiltration des Niederschlags wurde gleichmässig über die Oberseite der Box verteilt. Der Grundwasserstrom durchfliesst das Modell von links nach rechts. Die Grenze [G] zwischen Aare- und Meteorwasser (blaue Linie in Fig. 4) kann in Abhängigkeit der Distanz [x] zur Aare bzw. zum Hagneck-Kanal mit folgender Formel berechnet werden:

$$G = \frac{I \cdot x}{q}$$

I entspricht dabei dem Niederschlagsanteil, welcher zur Grundwasserneubildung führt. q entspricht dem Grundwasserfluss durch das Modell und kann ausgedrückt werden durch:

$$q = K \cdot i$$

wobei: K = Durchflusskoeffizient bei gegebener Grundwassermächtigkeit und i = Gefälle des Grundwasserspiegels.

Die Grenze zwischen Aare- und Meteorwasser ist in Fig. 4 in einem vertikalen Querschnitt durch den Grundwasserleiter dargestellt.

2.2 Dispersives Flussmodell

Ein weiteres analytisches Modell wurde erstellt, damit auch die Dispersion des Aare-

wassers im Grundwasserleiter berücksichtigt werden kann. Das Modell geht von punktuellen Dirac-Impulsen von Aarewasser an den Punkten, welche zum Fluss gehören, aus. Weiter wird von einem Grundwasserfluss mit einer Geschwindigkeit [v] in der x-Richtung ausgegangen. Dieser Impuls kann durch folgende Formel mathematisch ausgedrückt werden:

$$C_{\delta}(x, y, z, t) = \frac{x \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{4D_x t}} \cdot e^{-\frac{(y-y_0)^2}{4D_y t}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4D_z t}}}{(2\sqrt{\pi})^3 \cdot \sqrt{D_x D_y D_z} \cdot t^{5/2}}$$

Diese Gleichung beschreibt die Verbreitung eines punktuellen Dirac-Impulses in Raum [x, y, z] und in der Zeit [t]. Sie hängt von den richtungsabhängigen Dispersionskoeffizienten [D_x, D_y, D_z] und von der Fliessgeschwindigkeit [v] in der x-Richtung ab. In der Formel entspricht y₀ der y-Koordinate des Injektionspunktes.

Um aus dieser Gleichung einen Dirac-Impuls entlang einer Linie (schematische Darstellung der Aare) zu erhalten, muss sie von y = -∞ bis y = +∞ integriert werden. Zudem muss die Gleichung für eine kontinuierliche Injektion von t = 0 bis t = +∞ integriert werden. Die Dispersion [D] kann unter Vernachlässigung der molekularen Diffusion in Form der Dispersivität [α] ausgedrückt werden. Die Dispersivität hat eine longitudinale Komponente [α_L] parallel zur Fliessrichtung und eine transversale Komponente [α_T] senkrecht dazu. Das Resultat ist in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$C_{Linie}(x, z) = \frac{x \cdot e^{\frac{x}{2\alpha_L}} \cdot K_1 \left(\frac{\sqrt{x^2 + z^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}{2\alpha_L} \right)}{2\pi \sqrt{\alpha_L \alpha_T} \sqrt{x^2 + z^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}$$

Dabei entspricht K_1 der modifizierten Bessel-Funktion erster Ordnung. Wird der Fluss nicht als eindimensionales Linienelement modelliert, sondern wird auch die Wassermächtigkeit des Flusses $[B]$ berücksichtigt, so ändert sich die obige Formel zu:

$$C_{Linie}(x, z, B) \approx \frac{x \cdot e^{\frac{x}{2\alpha_L}} \cdot K_1\left(\frac{\sqrt{x^2 + z^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}{2\alpha_L}\right)}{\sqrt{\alpha_L \alpha_T} \sqrt{x^2 + z^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}} \cdot \frac{B}{\pi} \cdot C_0$$

In obiger Formel wurde zudem die Konzentration einer Substanz im Flusswasser $[C_0]$ eingefügt. Es handelt sich um eine Näherungsgleichung, welche nur gültig ist, wenn das Verhältnis «Tiefe des Flusses B » zu «Distanz zum Fluss x bzw. z » klein genug gewählt wird ($\frac{B}{x \text{ bzw. } z} \ll 1$). Folgende Regeln sollten hierzu eingehalten werden:

$$z \leq 200 \cdot B$$

$$x \geq 6B \sqrt{\frac{\alpha_L}{\alpha_T}}$$

Können diese Bedingungen nicht erfüllt werden, so muss folgende Gleichung, mit der Gauss'schen Fehlerfunktion $[erf]$ verwendet werden:

$$C(x, z, B) = \frac{x \cdot e^{\frac{x}{2\alpha_L}}}{4\sqrt{\pi\alpha_L\alpha_T}\sqrt{v}} \int_0^\infty \frac{e^{-vt} \frac{x^2}{4\alpha_L vt}}{t^{3/2}} \left\{ erf\left(\frac{B+z}{2\sqrt{v\alpha_T t}}\right) + erf\left(\frac{B-z}{2\sqrt{v\alpha_T t}}\right) \right\} dt C_0$$

Das Modell geht von einem natürlichen Grundwasserfluss aus, welcher sich horizontal von links nach rechts durch das Modell bewegt. Berechnet wurden drei Modellanordnungen, einmal mit einer longitudinalen Dispersivität von 10 m und einer transversalen Dispersivität von 1 m, einmal mit einer longitudinalen von 5 m und einer transversalen von 0.5 m und einmal mit einer longitudinalen von 0.5 m und einer transversalen von 0.05 m. Die Resultate sind in der Fig. 5 dargestellt.

2.3 Schlussfolgerungen aus den analytischen Modellen

Die analytischen Modelle basieren auf stark vereinfachenden Annahmen. Es wird von einem homogenen und isotropen Grundwasserleiter ausgegangen und der Grundwasserfluss in den Modellen wird als rein horizontal angenommen. Weder vertikale Strömungen noch der Pumpvorgang in einer Grundwasserfassung können berücksichtigt werden. Zudem kann der Hagneck-Kanal nicht als hydraulische Barriere modelliert werden.

Der grosse Vorteil des analytischen Strömungslinienmodells ist die Möglichkeit, neben der Flussinfiltration auch die Infiltration von Niederschlagswasser zu berücksichtigen. Das dispersive Flussmodell kann die Infiltration der Niederschläge nicht

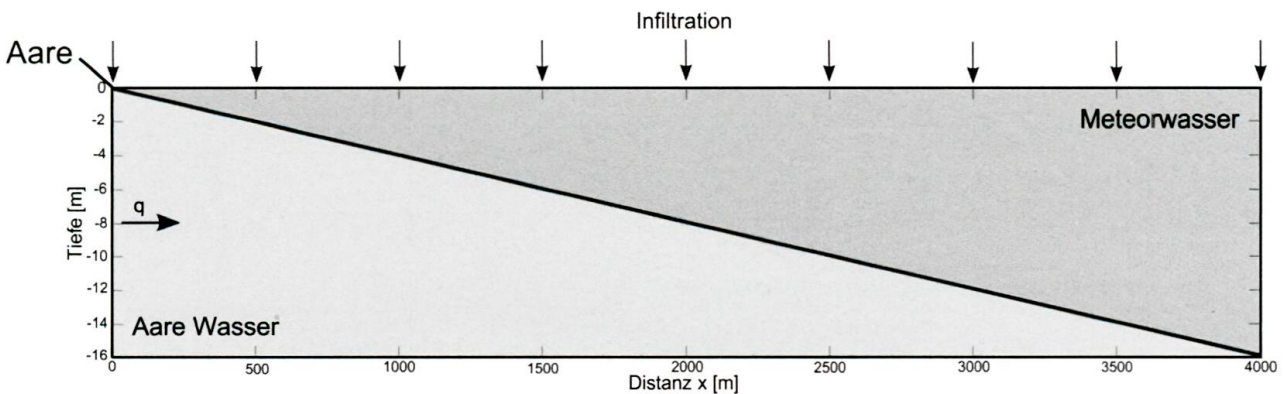
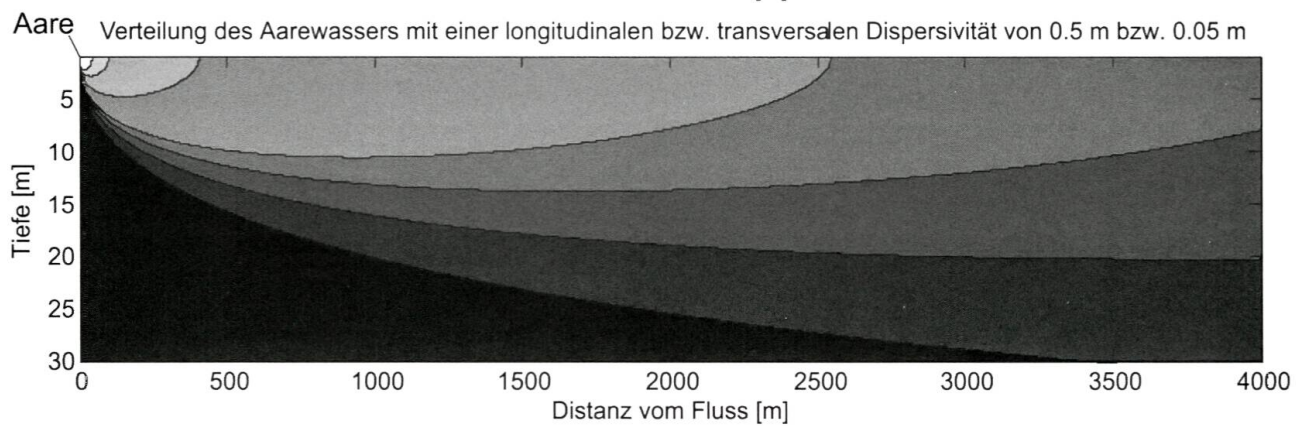
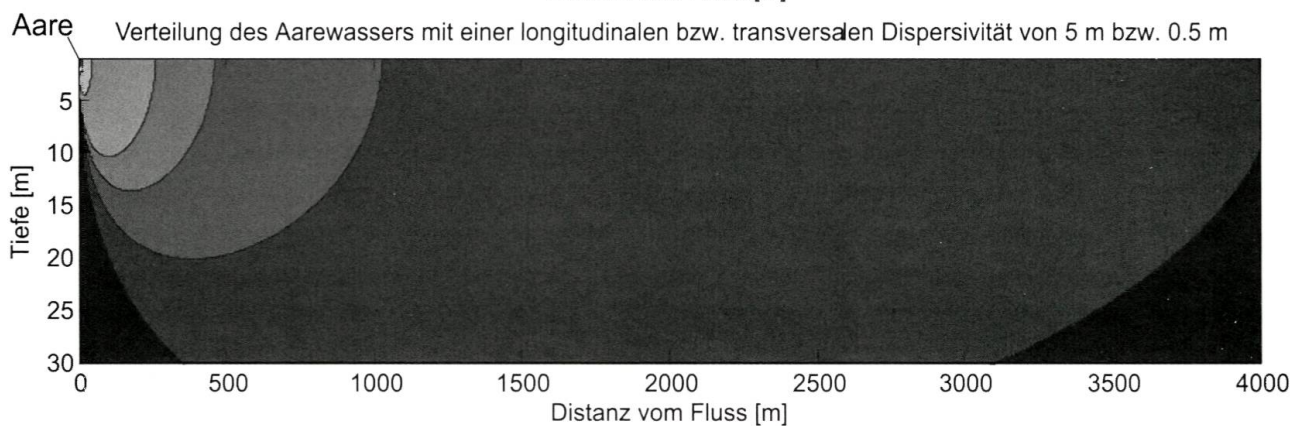
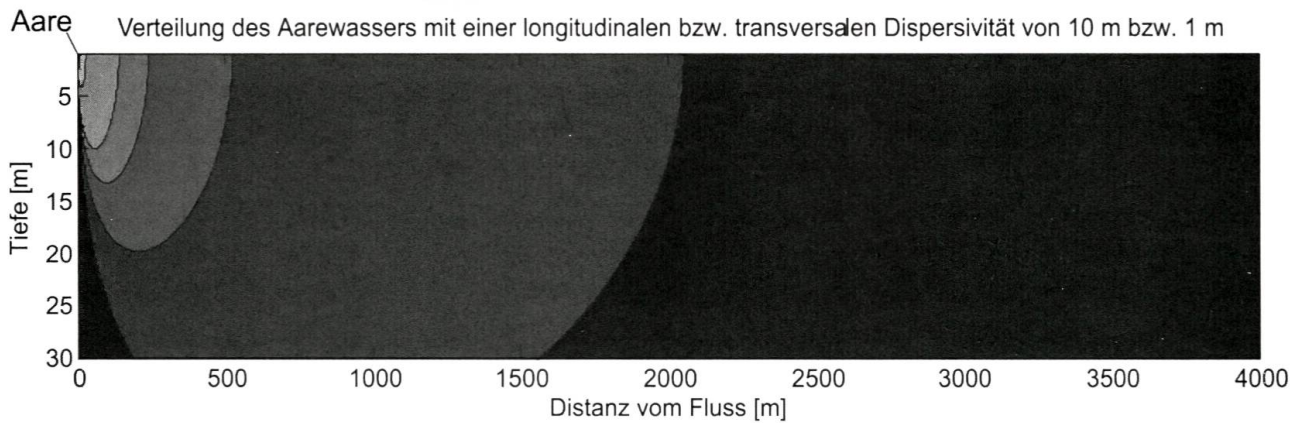


Fig. 4: Analytisches, advektives Modell der Verteilung des Aarewassers in einem vertikalen Querschnitt durch den als Box vereinfacht modellierten Grundwasserleiter. Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 4: Aare- and precipitation water distribution, calculated by means of an analytical advection model. Vertical cross-section through the aquifer which was simplified in form of a box. Modified after Gobat 2015.



Legende :

Anteil Aarewasser :

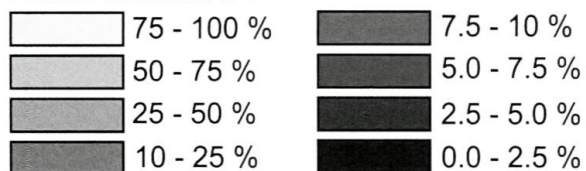


Fig. 5: Analytisches, dispersives Modell der Verteilung des Aarewassers in einem vertikalen Querschnitt durch den als Box vereinfacht modellierten Grundwasserleiter. Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 5: Aare-water distribution, calculated by means of an analytical dispersion model. Vertical cross-section through the aquifer which is simplified in form of a box. Modified after Gobat 2015.

berücksichtigen, was der grosse Nachteil dieses Modells ist. Das Modell zeigt eine natürlicherweise nicht mögliche Situation, in welcher das Grundwasser in den oberflächennahen Bereichen auch in sehr grosser Distanz von der Aare bzw. vom Hagneck-Kanal immer noch aus einem stark erhöhten Anteil an Aarewasser besteht. In den unteren Bereichen des Modells tritt Wasser auf, welches aus dem Durchfluss q unter dem Hagneck-Kanal stammt. Konzeptuell kann dieses Wasser als Grundwasser betrachtet werden, welches aus dem Bereich südlich des Hagneck-Kanals in das Modell hineinströmt. In der Realität ist die Situation genau umgekehrt wie vom Modell vorausgesagt. Das Aarewasser befindet sich zu höheren Anteilen in den tieferen Bereichen des Grundwasserleiters und nicht an seiner Oberfläche. Dieser Tatsache wird im advektiven Modell Rechenschaft getragen.

Der grosse Vorteil des dispersiven Modells ist die Berücksichtigung der Dispersion des Flusswassers, was im Strömungslinienmodell nicht möglich ist. In der Realität gibt es keine scharfe Grenze zwischen reinem Aarewasser und reinem Meteorwasser, wie dies vom advektiven Strömungslinienmodell vorausgesagt wird. Es gibt einen graduellen Übergang von Grundwasser, welches mehrheitlich aus Aarewasser besteht zu Grundwasser, welches mehrheitlich aus Meteorwasser besteht. Diese Durchmischung des Flusswassers mit dem Grundwasser wird vom dispersiven Flussmodell vorausgesagt, wobei die Mischverhältnisse in ihrer Tiefenlage nicht korrekt berechnet werden können.

Die tatsächliche Situation im Seeland müsste durch eine Kombination der beiden Modelle bestimmt werden. Die Infiltration der Niederschläge verdrängt das Aarewasser in die tieferen Bereichen des Grundwasserleiters, es gibt aber keine scharfe Grenze, sondern eine Mischgrenze zwischen Aare- und Meteorwasser.

Obwohl diese Modelle der Realität nur annähernd gerecht werden, weil keines der bei-

den die gemessene Verteilung des Aarewassers im Versuchsbrunnen reproduzieren kann, können aus diesen einfachen Berechnungen bereits interessante Einsichten über die Situation im Seelandgrundwasserleiter gewonnen werden. Das Strömungslinienmodell zeigt, dass bereits ab einer Distanz von 3'700 m (entspricht der Distanz zwischen dem Hagneck-Kanal und der Fassung von Kappelen) Meteorwasser bis in eine Tiefe von rund 15 m vorkommt. Dies bedeutet, dass bereits die Hälfte der Grundwassersäule mehrheitlich aus versickertem Meteorwasser besteht. Das Strömungslinienmodell erlaubt es also zu verstehen, warum mit der aktuellen Fassungskonfiguration, welche bis in die halbe Tiefe des Grundwasserleiters reicht, ein derart hoher Anteil an Meteorwasser (ca. 60–70%) gefasst wird.

Das dispersive Flussmodell zeigt, dass die Dispersivitäten klein sein müssen, um die natürliche Situation zu erhalten, in welcher auch in einer Distanz von rund 3'300 m vom Hagneck-Kanal (entspricht der Distanz zum Versuchsbrunnen) der Aarewasseranteil immer noch einen schichtweisen vertikalen Verlauf aufweist.

3 Numerisches Modell

3.1 Aufbau des Modells

Um die Nachteile der analytischen Modelle auszugleichen, wurde die gegebene Situation noch mit einem numerischen Modell gerechnet. Numerische Modelle (z. B. Berechnungen mit finiten Elementen oder finiten Differenzen) ermöglichen eine sehr genaue Abbildung der Wirklichkeit, da mit diesen Modellen viel mehr Randbedingungen berücksichtigt werden können und da es diese Modelle erlauben, auch kleinräumige Störungen im Grundwasserfluss zu berücksichtigen. Allerdings gilt auch hier wie bei allen Modellen, dass die Resultate nie besser sind als die Güte der eingegebenen Randbedingungen. Das heisst: sind die notwendigen

Randbedingungen nicht bekannt, kann das Modell auch keine guten Resultate liefern.

Zur Erstellung des numerischen Modells wurde die Software FeflowTM verwendet (Diersch 2014). FEFLOW arbeitet bei den Berechnungen mit finiten Elementen. Das Modell wurde so aufgebaut, dass sowohl der Einfluss der Infiltration der Niederschläge als auch die Dispersion des Aarewassers berücksichtigt werden konnten. Das Modell erlaubt zudem die Berechnung der Aufteilung in Aare- und Meteorwasser am Standort der Fassung Kappelen, sowohl für die aktuell betriebene Fassungskonfiguration wie auch für die beiden vorgeschlagenen Fassungsmodifikationen. Das Modell entspricht einem 1'000 m breiten, 4'000 m langen und 30 m tiefen quaderförmigen Ausschnitt aus dem Seeland.

Der Modellaufbau (Fig. 6) sah 30 Schichten à 1 m Tiefe bzw. 60 Schichten à 0.5 m Tiefe vor, welche horizontal in Form von Dreieckselementen diskretisiert wurden.

Um den Flusspiegel zu simulieren, wurden die obersten Knoten der Dreieckselemente im südlichen Bereich des Modells entlang eines 20 m breiten Streifens über die gesamte Modellbreite mit einer konstanten Druckhöhe von 30 m versehen. Die Elemente der obersten Schicht, welche sich direkt unterhalb dieser Knoten befinden, wurden mit einer geringeren hydraulischen Leitfähigkeit im Vergleich zum restlichen Grundwasserleiter versehen. Dies sollte die Kolmatierung des Flussbettes berücksichtigen und die Neubildung von Grundwasser durch den Hagneck-Kanal drosseln. Das Gitter wurde im Bereich des simulierten Hagneck-Kanals stark verfeinert, damit die Lösungen der Fliess- und Transportgleichung in diesem Bereich präziser berechnet werden konnten. Auf der nördlichen Seite des Modells wurde über die gesamte Tiefe eine konstante Druckhöhe von 28 m festgelegt. Damit kann der natürliche Fluss durch das Modell als Randbedingung mitgegeben werden.

Die Fassung von Kappelen wurde in einer Ent-

fernung von rund 3'700 m von der simulierten Aare (Hagneck-Kanal bzw. Alte Aare) auf der östlichen Seite des Modells platziert. Da die Fassung somit auf einer undurchlässigen Modellgrenze zu liegen kommt, wurde nur die Hälfte von deren Zuströmbereich simuliert. Um also nicht einen um das Zweifache zu grossen Zuströmbereich zu erhalten, wurde nur die halbe Pumpfördermenge an der Fassung eingestellt. Das Finite-Elemente-Netz wurde im Bereich der Fassung so stark verfeinert, dass die Kanten der Elemente etwa die gleiche Länge wie der Radius des Brunnens erhielten, also etwa 0.3 m. Die Elemente innerhalb des Brunnens wurden anschliessend gelöscht. An der Brunnenwand wurden die Knoten mit einer konstanten Druckhöhe versehen, um die Absenkung im Brunnen zu simulieren. Für die aktuelle Konfiguration der Fassung wurde die konstante Druckhöhe in einer Tiefe zwischen 4 m und 17 m festgelegt. Für die erste Anpassung wurden die Knoten in einer Tiefe zwischen 16 m und 17 m und für die zweite Anpassung zwischen 29 m und 30 m mit einer konstanten Druckhöhe versehen.

Die weiteren Modellvorgaben sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Das Wasser an den Knoten, welche zur Aare (Hagneck-Kanal bzw. Alte Aare) gehören, besteht zu 100% aus Aarewasser. Die Verteilung des Aarewassers im Grundwasserleiter wurde durch einen fiktiven, kontinuierlichen Markerversuch des Flusses berechnet. Bei diesem «Trick» wurde eine fiktive Tracerkonzentration von 1 mg/l (= 100% Aarewasser) an den Knoten, welche zu der simulierten Aare gehören, konstant eingegeben.

Während den Modellrechnungen wurde dieser Tracer im Grundwasserleiter advektiv und dispersiv verteilt. Im Grundwasserleiter wurden Tracerkonzentrationen zwischen 0 und 1 mg/l berechnet. Diese Konzentrationen können dem Anteil Aarewasser, welcher zwischen 0 und 100% schwankt, gleichgesetzt werden. Mit diesem Trick konnte an jeder Stelle im Modellgrundwasserleiter ein Aarewasseranteil berechnet werden.

Porosität	17 %
Horizontale hydraulische Leitfähigkeit	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s
Vertikale hydraulische Leitfähigkeit	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s*
	10^{-3} m/s**
	$5 \cdot 10^{-4}$ m/s***
Infiltration durch Meteorwasserversickerung (ausser im Bereich Hagneck-Kanal)	313 mm/Jahr

* Isotroper GW-Leiter, ** Anisotropie $K_{\text{horizontal}}$ zu $K_{\text{vertikal}} = 1:5$, *** Anisotropie $K_{\text{horizontal}}$ zu $K_{\text{vertikal}} = 1:10$

Tab. 1: Hydrodynamische Parameter des Modells. Aus Gobat 2015.

Tab. 1: Hydrodynamic model-parameters. From Gobat 2015.

3.2 Kalibration des Modells

Wie beim Kalibrieren von numerischen Modellen üblich, wurden nicht alle Parameter von Anfang an auf einen genau bestimmten Wert festgelegt. Viele der verwendeten Parameter waren zu Beginn der Simulation noch unbekannt. Insbesondere die Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit, die hydraulische Leitfähigkeit der Elemente unterhalb des simulierten Hagneck-Kanals (d. h. die Durchlässigkeit des Flussbettes) und die longitudinale sowie die transversale Dispersivität wurden im Verlauf der Kalibration des Modells durch Iteration angenähert. Die Durchlässigkeit des Flussbetts vom Hagneck-Kanal (= hydraulische Leitfähigkeit der Elemente unter den Knoten des Kanals) wurde so angenähert, dass die in früheren Untersuchungen gefundene Grundwasserneubildung durch Infiltration aus dem Hagneck-Kanal (Biaggi et al. 2004, Jordan 2000, Kellerhals & Haefeli 1989) reproduziert werden konnte. Es zeigt sich, dass die Leitfähigkeit der 1 m dicken Elemente zwischen $6.25 \cdot 10^{-7}$ und $5 \cdot 10^{-6}$ m/s liegen muss, damit die früheren Untersuchungsergebnisse modelliert werden können. Diese Werte sind 1'000 bis 10'000 Mal geringer als die hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters. Da für die Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit und für die distanzabhängige

Dispersivität keine Werte aus der Literatur bekannt sind, wurde mit drei Schätzwerten gearbeitet. So wurden vertikale hydraulische Leitfähigkeiten von $5 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-3}$ und $5 \cdot 10^{-4}$ m/s gewählt. Die drei ausgewählten longitudinalen und transversalen Dispersivitäten betragen 10 m und 1 m, 5 m und 0.5 m sowie 0.5 m und 0.05 m.

Im Verlauf des Kalibrationsprozesses wurden die drei Parameter solange iteriert, bis die vertikale Verteilung des Aarewassers im Versuchsbrunnen (VB) und der Anteil Aarewasser in der simulierten aktuellen Konfiguration der Gemeindefassung den im Feld gemessenen Werten entsprachen. Damit konnte die Modellanordnung kalibriert werden.

Die Verteilung des Aarewassers in einem vertikalen Längsschnitt ist in Fig. 7 dargestellt. Für die Berechnung der beiden Modellvarianten wurden die in Tab. 2 angegebenen Parameter verwendet. Die Resultate zeigen in der ersten Modellvariante im Bereich der Fassung eine stärkere Durchmischung mit Aarewasser.

3.3 Numerische Simulation der durchgeführten Pumpversuche

Um das Modell besser kalibrieren zu können wurde versucht, die im Feld durchgeführten Pumpversuche nachzustellen. Hierzu wurde

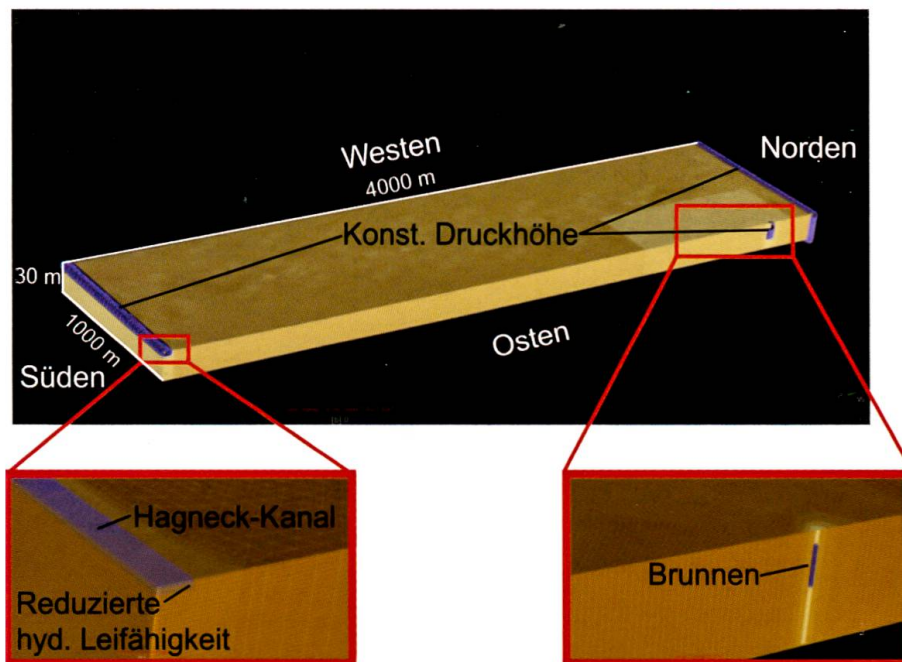


Fig. 6: Aufbau des numerischen Modells mit Angabe der Randbedingungen. Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 6: Structure of the numerical model including the boundary conditions. Modified after Gobat 2015.

die im Verlauf der Pumpversuche gemessene konstante Bikarbonatkonzentration angenähert. Die Bikarbonatkonzentration wurde gewählt, weil diese von den im Rahmen der Tiefenbeprobungen bestimmten Stoffen den grössten Gradient aufwies. In der Tat nahm die Bikarbonatkonzentration von 442 mg/l in einer Tiefe von 4 m auf 331 mg/l in einer Tiefe von 22 m ab.

Um die Simulation durchzuführen, wurden die einzelnen Schichten des Modells als Ausgangszustand mit einer konstanten Bikarbonatkonzentration versehen. Das heisst: die im Rahmen der Tiefenbeprobung gemessenen Werte wurden inter- bzw. extrapoliert und so ins Modell eingeführt. Anschliessend wurde die Entwicklung der Bikarbonatkonzentration des geförderten Wassers im Laufe der Pumpversuche mit einer transienten Modellierung berechnet. Der Brunnen konnte für transiente Bedingungen nicht wie oben beschrieben ins Modell eingebaut werden. Es musste die Funktion «Multilayer Well» verwendet werden. Die Berechnungen ergaben, dass Modelle, welche die grösste Durchmischung erlauben würden, mit einer grossen Dispersivität, einer isotropen hydraulischen Leitfähigkeit und einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Elementen

te unterhalb des Hagneck-Kanals ausgestattet sein müssen.

Die Berechnungen zeigen, dass die Bikarbonatkonzentration selbst bei einer Versuchsanordnung, welche grösste Durchmischungen erlaubt, bei einer Pumpmenge von ca. 135 l/min über die gesamte Pumpdauer konstant bleibt. Diese Beobachtung ist aus Fig. 8 ersichtlich. In der erwähnten Modellordnung wurden die Elemente unter dem Hagneck-Kanal mit einer Leitfähigkeit von $3.75 \cdot 10^{-7}$ m/s versehen, der Grundwasserleiter als isotrop angenommen und die longitudinale bzw. transversale Dispersivität auf 10 m bzw. 1 m gesetzt. Schon ab dem ersten Iterationsschritt (Zeitschritt) bleiben die berechneten Bikarbonatkonzentrationen stabil und konstant über die gesamte Simulationszeit und hängen nur von der ursprünglichen Modellvorgabe ab. Die im Feld durchgeführten Pumpversuche konnten deshalb nicht zur weiteren Kalibration des Modells verwendet werden.

3.4 Resultate der numerischen Modellierung

Der Anteil Aarewasser, welcher am Fassungsstandort mit der aktuellen Fassungs-

	Erstes realistisches Modell	Zweites realistisches Modell
Durchlässigkeit Hagneck-Kanal	$2.5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$7.5 \cdot 10^{-7}$ m/s
Horizontale Durchlässigkeit Grundwasserleiter	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s
Vertikale Durchlässigkeit Grundwasserleiter	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s
Longitudinale Dispersivität	1 m	0.5 m
Transversale Dispersivität	0.1 m	0.05 m

Tab. 2: Parameterkombination in den zwei kalibrierten (realistischen) Modellanordnungen. Aus Gobat 2015.

Tab. 2: Model-parameters for the two calibrated (most realistic) model settings. From Gobat 2015.

konfiguration und den zwei vorgeschlagenen Fassungsanpassungen gefördert werden kann, wurde anhand der zwei FE-Modellanordnungen berechnet, welche anhand der vertikalen Verteilung des Aarewassers im Versuchsbrunnen und anhand des Anteils an Aarewasser in der aktuellen Gemeindefassung kalibriert worden sind (Fig. 7, Kap. 3.2).

Gemäss den Resultaten der Modellierungen kann, wenn in der bestehenden Fassung der

obere Teil abgedichtet wird und nur noch im untersten Meter Grundwasser gepumpt wird, nur 1-2% zusätzliches Aarewasser gefördert werden. Würde die Fassung bis zur Basis des Grundwasserleiters, d. h. bis in eine Tiefe von etwa 30 m, verlängert und nur noch in diesem untersten Bereich gepumpt, so könnte 5-6% mehr Aarewasser gefördert werden als im aktuellen Zustand. Die Qualität des geförderten Grundwassers würde daher mit den zwei vorgeschlagenen Fas-

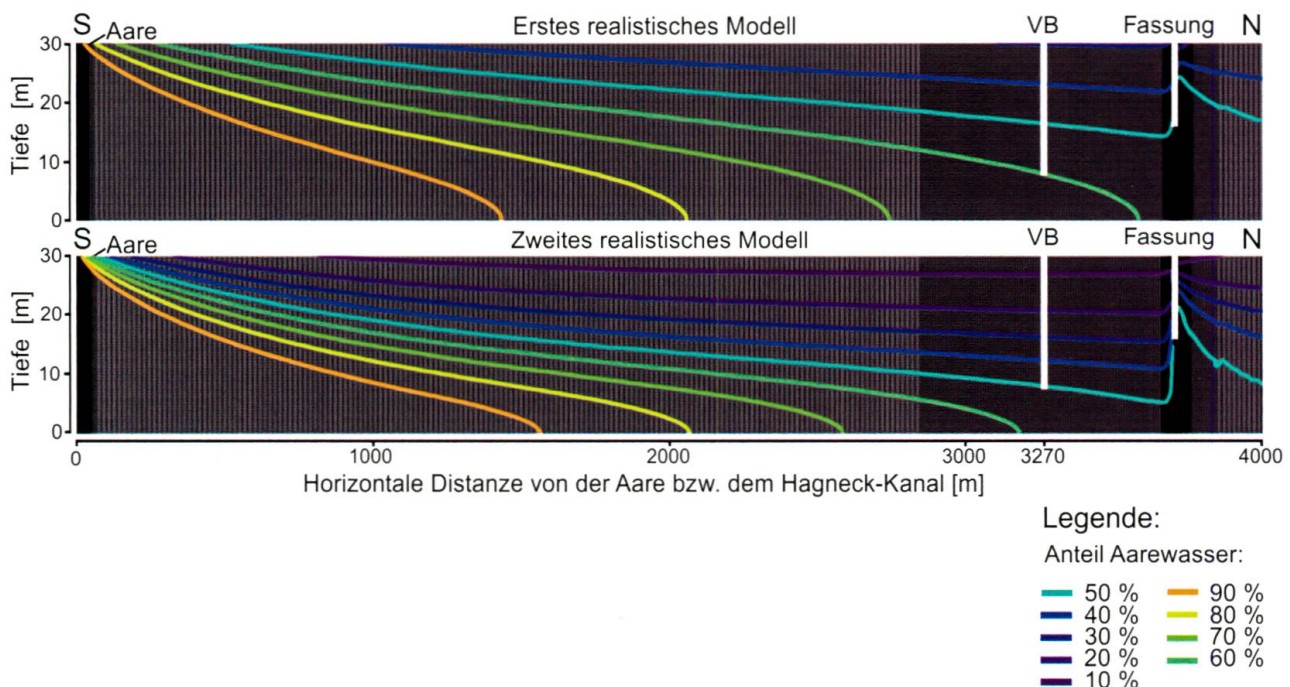


Fig. 7: Verteilung der Aarewasserkonzentration entlang eines vertikalen Längsschnitts durch den neuen Versuchsbrunnen und die Trinkwasserfassung der Gemeinde Kappelen. Modelleingaben gemäss Tab. 2. Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 7: Distribution of the Aare-water fraction on a longitudinal cross section between the Hagneck-channel, the new testing well (VB) and the existing drinking water well of Kappelen (Fassung). Model-parameters as listed in Tab. 2. Modified after Gobat 2015.

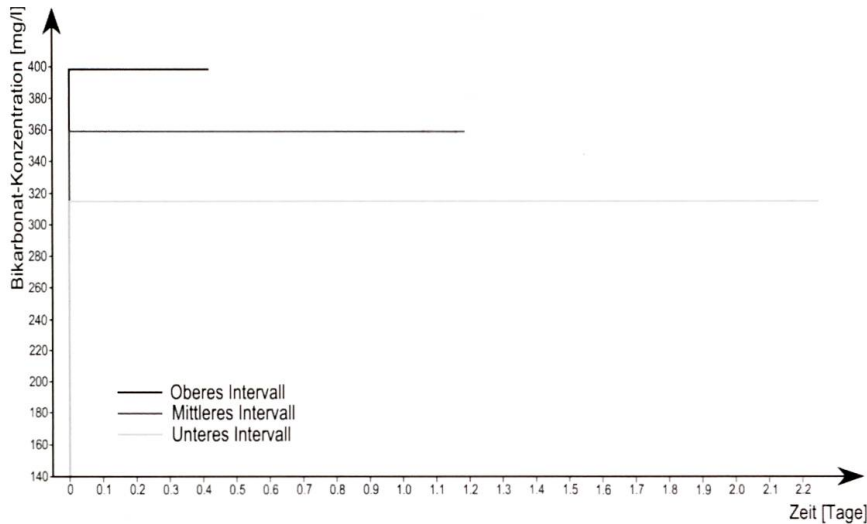


Fig. 8: Simulation der Pumpversuche und des Bikarbonatkonzentrationsverlaufes. Modifiziert nach Gobat 2015.

Fig. 8: Simulation of the pumping tests and calculated evolution of the bicarbonate concentration. Modified after Gobat 2015.

sungsanpassungen nur geringfügig verbessert. Diese geringen Unterschiede sind höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die Zuströmbereiche in den Modellen vertikal sehr stark ausdehnen, egal in welcher Tiefe gepumpt wird. Obwohl eine Schichtung des Wassers in den Modellen vorhanden ist, dehnen sich die Zuströmbereiche vertikal so stark aus, dass ein Gemisch von Wasser über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters angesaugt wird.

Die Aussage der Grundwassermodelle müsste noch durch Feldversuche bestätigt werden. Hierzu müssten länger andauernde Pumpversuche mit der mittleren Fördermenge der Gemeinde von Kappelen von 240 l/min im Versuchsbrunnen durchgeführt werden.

4 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Modellierungen zeigen, dass einem Modell nicht blindlings vertraut werden darf. Bevor Resultate interpretiert werden, muss überprüft werden, welche Resultate ein Modell liefern kann, und welche Resultate bereits durch die Modellanordnung vorgegeben sind. So liefert das advective Strömungslinienmodell nur Aus-

sagen, dass in den tieferen Bereichen am Standort der Fassung von Kappelen höhere Aarewasserkonzentrationen zu erwarten sind, als in den seichteren Bereichen, nicht aber eine Aussage über die tatsächliche Durchmischung zwischen versickertem Meteorwasser und Aarewasser. Das dispersive Flussmodell zeigt demgegenüber, wie sich Wasser mit zunehmendem Abstand von einem infiltrierenden Oberflächengewässer mit dem anderweitig gebildeten Grundwasser mischt. Es zeigt aber nicht, in welcher Tiefe die höchsten Konzentrationen zu erwarten sind.

Im Vergleich zum numerischen Modell weisen die analytischen Modelle den Vorteil auf, ohne grossen Zeitaufwand erstellt werden zu können. Sie ermöglichen es somit, in relativ kurzer Zeit erste Arbeitshypothesen zu testen oder in dringenden Fällen eine rasche Aussage zu machen. Im Seelandbeispiel wurde dieses Vorgehen angewendet, um mit dem dispersiven Flussmodell eine erste, grobe Grössenordnung für die Dispersion zu erhalten.

Die numerische Modellierung kann theoretisch alle möglichen Randbedingungen berücksichtigen. Allerdings können nicht alle Parameter, welche einen Prozess erklären, im Feld gemessen werden. Oder der Aufwand zum Messen bestimmter Parameter

wird unverhältnismässig gross. Numerische Modellierungen müssen deshalb immer durchgeführt werden, ohne dass alle Randbedingungen bekannt sind. Um dieses Dilemma zu umgehen, müssen die Modellannahmen kalibriert werden. Dies erlaubt es, fehlende Randbedingungen und Parameter festzulegen.

Die im Rahmen der vorgestellten Untersuchung durchgeführte Kalibration zeigt, dass im Feld gemessene Werte z. T. nicht sensitiv auf die möglichen Parameterveränderungen reagieren (Kap. 3.3). Entsprechend müsste die Güte der durchgeführten Modellrechnungen durch weitere, möglicherweise sehr aufwändige Feldversuche verifiziert werden. In der vorgestellten Untersuchung könnte erst dann bestimmt werden, ob die im Modell vorausgesagte Durchmischung des Grundwassers bei starkem Pumpbetrieb tatsächlich stattfindet, oder ob nur ein Parameter bzw. eine Randbedingung falsch gewählt worden ist. Gleichzeitig zeigt die vorgestellte Untersuchung aber, dass bei der Verwendung von gut kalibrierten Modellen zeitliche und organisatorische Begrenzungen von Feldversuchen umgangen werden können. Es ist zum Beispiel praktisch undenkbar, einen Wert für die distanzabhängige Dispersion über mehrere Kilometer z. B. mittels Färbversuch im Feld zu messen. Mit der durchgeführten Modellierung konnte jedoch die Dispersion mittels einer Kalibration der isotopischen Zusammensetzung des Wassers bestimmt werden. Das Aarewasser wurde dazu als natürlicher Tracer verwendet. Weiter konnten die zeitlich begrenzten Pumpversuche im Versuchsbrunnen mit Hilfe der Modellierungen unendlich verlängert und der mit einer geringeren Fördermenge durchgeführte Feldversuch auf die eigentliche Fördermenge der Gemeinde Kappelen extrapoliert werden.

Im Gegensatz zu den analytischen Modellen erlaubte die durchgeführte Modellierung im vorgestellten Fallbeispiel die Zuströmbereiche dreidimensional zu bestimmen. Für einen

freien Grundwasserspiegel und solch komplexe Brunnengeometrien mit Filterstrecken, welche nicht über die gesamte Grundwassermächtigkeit reichen, können dreidimensionale Zuströmbereiche nicht analytisch berechnet werden. Eine dreidimensionale Lösung ist jedoch unverzichtbar, da die Grundwassersammensetzung sowohl horizontal als auch vertikal variabel ist.

Ein enormer Vorteil von Grundwassermodellen ist, dass auch der Einfluss von zukünftigen Veränderungen (neue oder angepasste Brunnenanordnungen, regionale Veränderungen der Grund- oder Oberflächenwasserspiegel etc.) überprüft werden kann. Man kann quasi in die Zukunft sehen. So konnte im Fallbeispiel des Seelandes der Einfluss einer Brunnenmodifikation getestet werden. Zusätzlich wurde der Einfluss einer allfälligen zukünftigen Kolmatierung des Hagneck-Kanals getestet, indem die Elemente, welche sich direkt unterhalb der Kanalknoten befinden, mit einer verringerten Durchlässigkeit versehen wurden.

Die Resultate von Grundwassermodellierungen müssen aber immer kritisch hinterfragt werden, da kein Modell die Realität genau abbilden kann. Modelle sind immer stark vereinfachte Darstellungen der Wirklichkeit. So wurde der Lockergesteinsgrundwasserleiter im Seeland beispielsweise als homogen angesehen. In der Realität besteht er jedoch aus einer komplexen Abfolge von ineinander verzahnten Flusssedimenten. Dabei spielt die Lage der ehemaligen Flussrinnen und der feinkörnigen Sedimente der Überschwemmungsebenen beim Fliessverhalten des Grundwassers eine wichtige Rolle.

Zusätzlich zu den beschriebenen vereinfachten Randbedingungen muss berücksichtigt werden, dass numerische Lösungen die Fliess- und Transportgleichung immer nur approximativ lösen. Jede Berechnung ist somit mit einem Fehler behaftet, welcher eine gewisse Grösse nicht unterschreiten kann. Sonst konvergieren die Berechnungen

entweder gar nicht mehr oder die Berechnung dauert je nach Geschwindigkeit des verwendeten Rechners sehr lange. Eine Kontrolle der erreichten numerischen Rechengenauigkeit ist jedoch unabdingbar. Im vorgestellten Beispiel wurde deshalb sorgfältig kontrolliert, dass der Fehler der berechneten Konzentrationen nie grösser als 3% wurde. Genauere Resultate können nur erreicht werden, wenn das FE-Gitter stark verfeinert wird. Dies führt zu einer enormen Verlängerung der Rechenzeit, was den maximal möglichen Verfeinerungsprozess von der Leistung des verwendeten Computers abhängig macht.

Literaturverzeichnis

- Baillieux, A., Campisi, D., Jammet, N., Bucher, S. & Hunkeler, D. 2014: Regional water quality patterns in an alluvial aquifer: Direct and indirect influences of rivers. *Journal of Contaminant Hydrology* 169, 2014.
- Biaggi, D., Strasser, C., Backman, N., Cholet, N. & Abrecht, J. 2004: Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern, Hydrogeologie Seeland Stand 2004. WWA (Hrsg.), Bern 2004.
- Diersch, H.-J. G. 2014: Feflow – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Verlag, Berlin. 2014 (1. Auflage).
- Gobat, J. 2015: Vertikale Schichtung der Grundwasserzusammensetzung im Zuströmbereich der Trinkwasserfassung von Kappelen (BE). Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie, Masterarbeit 2015.
- Jordan, P. 2000: Modélisation de la partie nord de l'aquifère du Seeland (BE). Méthode de détermination des aires d'alimentation Z_u en milieu poreux. Application de la méthode Z_u au captage SWG 1950 de Worben et aux captages de la plaine du Seeland. Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie, Diplomarbeit, 2000.
- Kellerhals, P. & Haefeli, Ch. 1989: Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern, Seeland: Infiltration aus Hagneckkanal und Alter Aare. WEA (Hrsg.), Bern, 1989.
- Kellerhals, P. & Tröhler, B. 1976: Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern, Hydrogeologie Seeland. WEA (Hrsg.), Bern 1976.

