

Grundwasserströme und Grundwasserbilanzen : Grundwassermodell Thurtal

Autor(en): **Gmünder, Christian / Spring, Ulrich**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft**

Band (Jahr): **63 (2009)**

PDF erstellt am: **23.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-593752>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Grundwasserströme und Grundwasserbilanzen – Grundwassermodell Thurtal

Christian Gmünder und Ulrich Spring

1 Einleitung

1.1 Der Nutzen von numerischen Grundwassermodellen

Informationen über Grundwasserleiter können nur punktweise, mit Hilfe von Bohrungen beschafft werden. Mit Bohrlochversuchen kann zum Beispiel kleinräumig die Durchlässigkeit der Schotter ermittelt werden, oder Tracerversuche können Angaben zur Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers zwischen zwei Punkten liefern. Um diese meist teuer beschafften Informationen zu einem Gesamtbild der Grundwasserströmung zu verknüpfen, braucht es Modelle. Häufig befinden sich diese konzeptionellen, qualitativen Modelle in den Köpfen der Hydrogeologen. Wer garantiert jedoch, dass in diesen Modellen die Massenerhaltung erfüllt wird, und Zeitabhängigkeiten zwischen Infiltration und Grundwasserspiegelreaktion richtig interpretiert werden? Dazu braucht es numerische Modelle.

Numerische Grundwassermodelle verknüpfen die hydrologischen und geologischen Kenntnisse eines Gebietes mit der physikalischen Strömungsgleichung und der hydraulischen Kontinuitätsgleichung. Sie haben den Zweck, die Grundwasserströmung in einem bestimmten Grundwasserleiter zunächst quantitativ zu verstehen, um dann Voraussagen über die Auswirkungen von geplanten Eingriffen in den Grundwasserhaushalt treffen zu können. Grundwassermodelle können zum Beispiel für folgende Aufgaben eingesetzt werden:

- Bestimmung von Einzugsbereichen, Vergabe von Entnahmekonzessionen,
- Prognose der Auswirkungen von Eingriffen an Oberflächengewässern und in den Grundwasserhaushalt,
- Planung von Erkundungs- und Überwachungsprogrammen, Interpretation beobachteter Grundwasserhöhen und -qualitäten,
- Risikoabschätzungen bei Altlasten, Planung der Sicherungsmassnahmen,
- Erstellung von Wärmelastplänen für die Wärmenutzung des Grundwassers.

1.2 Grundwassermodell des Thurtals

Im Jahr 1983 liess der Kanton Thurgau erstmals ein numerisches Grundwassermodell des Thurtals erstellen. Der gesamte Thurtalschotter wurde damals mit 94 Elementen und 255 Knoten abgebildet. Da das Modell nur beschränkt Aussagen über die Wasserbilanz im Thurtal erlaubte, wurde es durch eine hydrogeologisch fundierte Analyse ergänzt (Büchi & Müller 1988).

Im Rahmen der 2. Thurkorrektur stellte der Kanton Thurgau im Jahr 2006 ein Team aus Geologen, Flusshydraulikern, Vermessern und Grundwasser-Modellierern zusammen und beauftragte sie mit dem Aufbau eines neuen Grundwassermodells (Baumann et al. 2009). In den 25 Jahren seit der Erstellung des ersten Modells haben sich die Kenntnisse über die numerische Modellierung von Grundwasserleitern verbessert. Zudem stehen schnellere Lösungsalgorithmen und stärkere Rechner zur Verfügung, sodass heute wesentlich komplexere Modelle erstellt werden können. Der vorliegende Beitrag beschreibt den Aufbau des neuen Grundwassermodells und die damit gewonnenen Erkenntnisse zur Grundwasserströmung und der Grundwasserbilanz im Thurtal.

2 Aufbau des Grundwassermodells

2.1 Modellgebiet und Unterteilung in Finite Elemente

Das Grundwassermodell umfasst den Thurtalschotter zwischen Bürglen und Gütinghausen sowie den Murg-Schotterfächer bei Frauenfeld (Naef & Frank 2009). Die darunterliegenden Seeablagerungen und Grundmoränen sowie der Molassefels werden im numerischen Modell als Stauer betrachtet. Mit Ausnahme der oberflächlichen Deckenschotter existieren im Thurtalschotter keine, über grössere Distanzen durchgehende, schlecht durchlässige Schichten. Der Grundwasserleiter bildet eine zusammenhängende Einheit, seine Mächtigkeit ist im Vergleich zur horizontalen Ausdehnung klein. Deshalb kann der Thurtalschotter im regionalen Massstab mit einem horizontal-zweidimensionalen Grundwassermodell abgebildet werden. Die Transmissivität eines Modellelementes ergibt sich aus der vorgegebenen Durchlässigkeit, multipliziert mit der aktuellen Mächtigkeit des Grundwasserkörpers.

Für die numerischen Berechnungen wurde FEFLOW eingesetzt. FEFLOW ist ein Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien (Diersch 2006). Die Numerik beruht auf der Methode der Finiten Elemente. Mit Finiten Elementen kann das Berechnungsnetz an natürliche Strukturen wie Flüsse, Brunnenstandorte oder unregelmässige Modellumrisse angepasst werden. Das gesamte Modellgebiet wurde in 21 097 Dreieckselemente mit 10 989 Knoten unterteilt. *Abbildung 1* zeigt einen Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz.

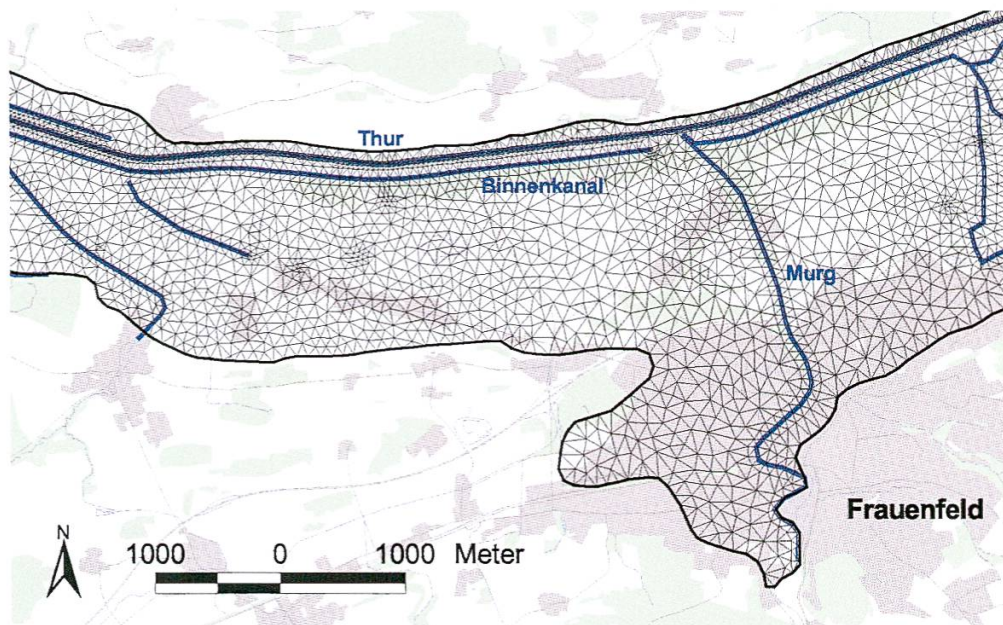


Abbildung 1: Finite-Elemente-Netz im Bereich von Frauenfeld. Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

2.2 Grundwasserdynamik im Thurtal

Im Ostteil des Modells liegt der Grundwasserspiegel einige Meter unter der Terrainoberfläche. Das Grundwasser wird durch die Infiltration aus der Thur

und durch versickernden Niederschlag gespeisen. Die Speisung ist bei Hochwasser der Thur und bei Starkniederschlägen deutlich höher als in trockenen Perioden und verursacht dann einen Anstieg des Grundwasserspiegels. Ein Teil des Grundwassers wird bei Weinfeldern in verschiedenen Brunnen gefasst. Der ungenutzte Anteil fließt langsam nach Westen ab, was bei Trockenwetter zu einem Absinken des Grundwasserspiegels führt. Das Verhalten wird in der *Abbildung 2* am Beispiel des Pegels bei der Kehrlichtverbrennungsanlage Weinfeldern dokumentiert. An dieser Stelle betrug die Differenz zwischen maximalem und minimalem Grundwasserstand in den Jahren 1998 bis 2008 über sechs Meter. Es gab in dieser Zeit nie einen längeren Zeitabschnitt mit konstantem Grundwasserspiegel. Aufgrund dieser Dynamik musste das Grundwassermodell instationär, d.h. zeitabhängig ausgeführt werden.

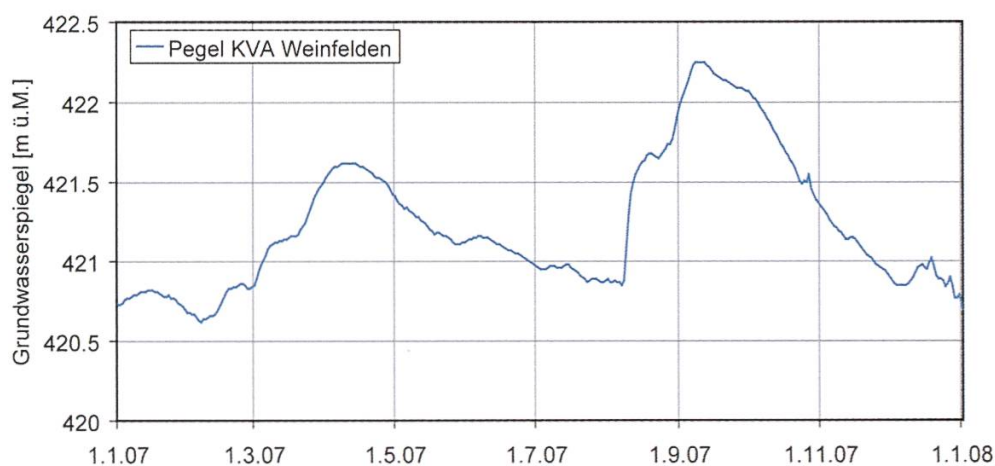


Abbildung 2: Grundwasserganglinie bei der KVA Weinfeldern.

Im Westteil des Modells liegt der Grundwasserspiegel nahe an der Terrainoberfläche. Das Grundwasser wird dort durch Drainagegräben und die entlang der Thur verlaufenden Binnenkanäle drainiert. Zwar verursachen auch dort die Starkniederschläge und Thurhochwasser Grundwasserspiegelschwankungen. Der Pegel kehrt jedoch immer wieder auf einen konstanten Wert zurück. Als Beispiel für dieses Verhalten wird in *Abbildung 3* der Pegel Erzenholz dargestellt.

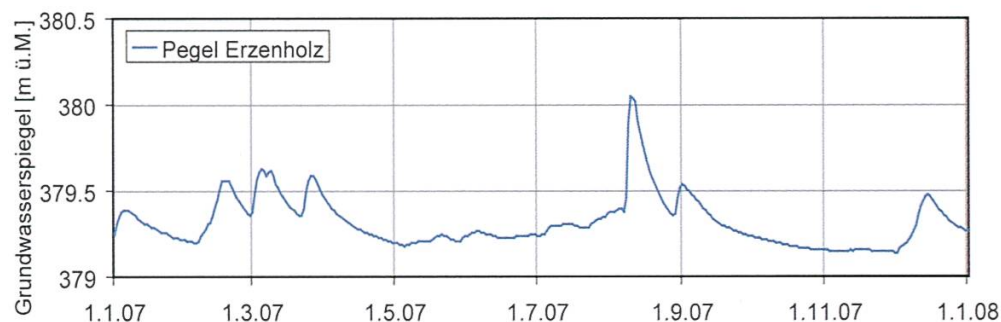


Abbildung 3: Grundwasserganglinie bei Erzenholz, westlich Frauenfeld.

3 Randbedingungen des Modells

3.1 Überblick

Abbildung 4 zeigt einen Überblick über die Randbedingungen des Grundwassermodells. Am seitlichen Modellrand fließt dem Thurtalschotter aus benachbarten Einzugsgebieten Grundwasser zu. Da der angrenzende Untergrund vorwiegend aus schlecht durchlässigen Moränen, Seebodenlehm und Fels besteht, ist der Seitenzufluss klein. Im Innern des Modells werden die Oberflächengewässer mit Cauchy-Randbedingungen (siehe Kapitel 3.3), die Grundwasserentnahmen mit vorgeschriebenen Flüssen oder Neumann-Randbedingungen und die Grundwasserneubildung als flächenhafter Zufluss vorgegeben. Die Randbedingungen werden im folgenden ausführlicher beschrieben.

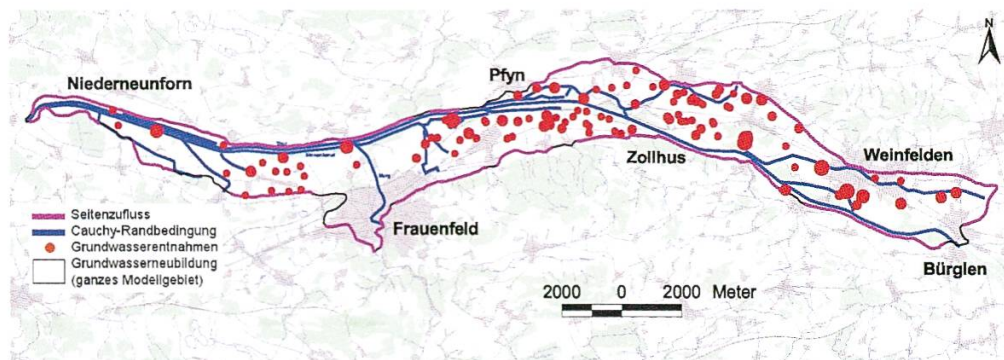


Abbildung 4: Überblick über die Randbedingungen des Modells (violette Linie: Seitenzufluss, blaue Linien: Cauchy-Randbedingung, rote Punkte: Grundwasserentnahmen, Fläche innerhalb Polygon: Grundwasserneubildung). Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

3.2 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag kann aus der hydrologischen Wasserbilanz oder aus der beobachteten Reaktion des Grundwasserspiegels bestimmt werden (Gat & Seiler 2007). Für das Grundwassermodell des Thurtals wurde ein kombinierter Ansatz verwendet. Die Höhe der jährlichen Grundwasserneubildung wurde aus der hydrologischen Wasserbilanz gewonnen, während die zeitliche Verteilung aus der beobachteten Reaktion des Grundwasserspiegels in Märstetten bestimmt wurde.

Ermittlung der Grundwasserneubildung aus der hydrologischen Wasserbilanz

Für ein ausgewähltes Bilanzgebiet gilt die folgende Bilanzgleichung:

$$N - ET - G - A = \Delta S$$

- mit
- N: Niederschlag
 - ET: Evapotranspiration
 - G: Grundwasserneubildung
 - A: Oberflächenabfluss
 - ΔS : Speicherveränderung

Das Bilanzgebiet umfasst die Oberfläche und die ungesättigte Zone des Untergrundes. Grundwasserneubildung bedeutet hier deshalb den Übergang von Wasser aus der ungesättigten in die gesättigte Grundwasserzone. Die Speicheränderung bezieht sich auf die Speicher der Oberfläche und der ungesättigten Bodenzone (*Dracos 1980*). Der Niederschlag ist eine messbare Grösse. Alle übrigen Glieder der Gleichung müssen modelliert werden und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet (*Allen et al. 2006, Menzel 1997, Mockus 1972*).

Ermittlung der Grundwasserneubildung aus der Reaktion des Grundwasserspiegels
 Abbildung 5 zeigt die aus der hydrologischen Wasserbilanz resultierenden Bilanzkomponenten für einen typischen Zeitraum. Im Juli übersteigt die Evaporation den Niederschlag und es erfolgt keine Grundwasserneubildung. Im August füllt sich mit den ersten Niederschlägen vorerst der Bodenspeicher. Erst im September kommt es zu einer Grundwasserneubildung (grüne Balken).

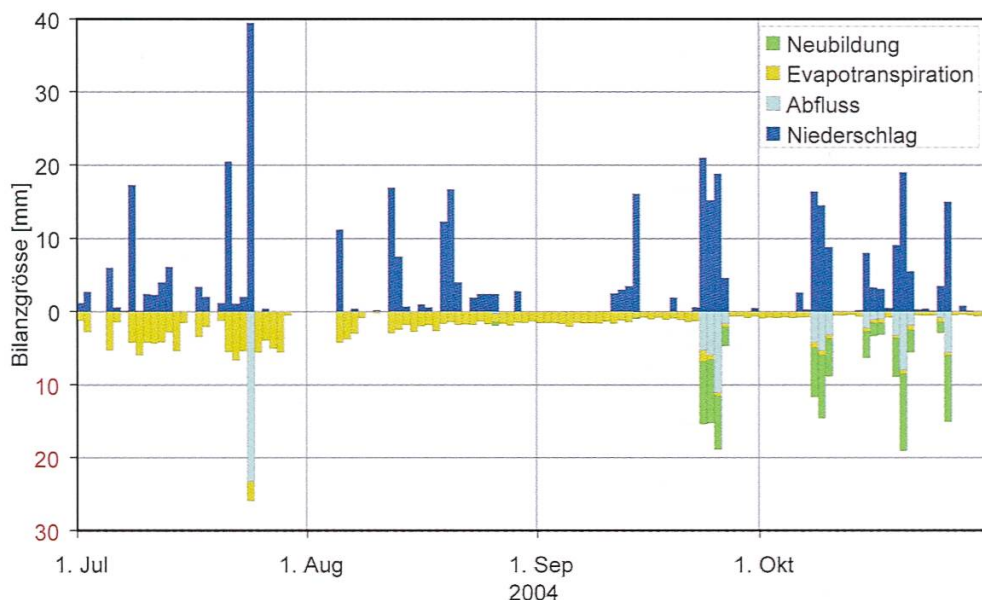


Abbildung 5: Komponenten der hydrologischen Bilanzgleichung (ohne Speicher). Grundwasserneubildung, Evaporation und Abfluss werden auf der negativen Achse dargestellt, da sie einen Abfluss aus dem Bilanzgebiet bedeuten.

Abbildung 6 zeigt den Verlauf des Pegels Märstetten, zusammen mit der aus den Klimadaten ermittelten Grundwasserneubildung und dem Thurspiegel bei Amlikon. Vergleicht man die Situation im August 2006 mit jener im Februar 2007 (gelb markierte Bereiche), so sieht man, dass der Thurpegel eine ähnliche Kurve beschreibt. Der Pegel in Märstetten bleibt im August 2006 unverändert, im Februar 2007 steigt er steil an. Dies ist nur mit der unterschiedlichen Grundwasserneubildung der beiden Zeiträume erklärbar. Die Grafik verdeutlicht damit, dass der Pegel Märstetten primär auf die Grundwasserneubildung reagiert. Diese Tatsache wurde dazu benutzt, die zeitliche Verteilung der Grundwasserneubildung aus der in Märstetten beobachteten Reaktion zu bestimmen.

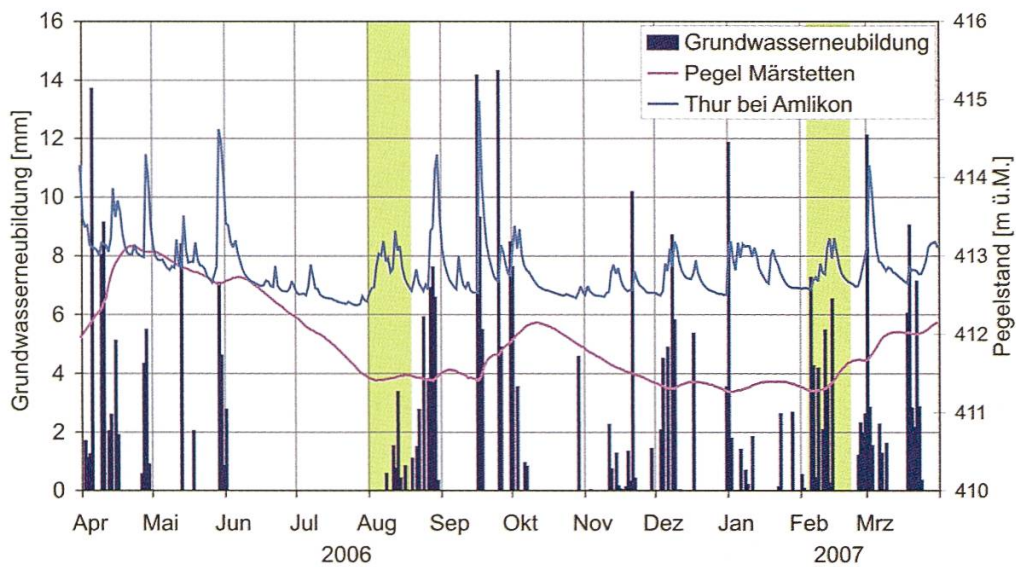


Abbildung 6: Thurpegel bei Amlikon, aus der hydrologischen Wasserbilanz ermittelte Grundwasserneubildung und beobachtete Reaktion des Grundwasserspiegels in Märstetten.

3.3 Infiltration aus Oberflächengewässern

Die Modellierung der Randbedingung entlang der Oberflächengewässer wird von *Gmünder & Spring (2009)* in diesem Band detailliert erläutert. Es wurde für alle Gewässer die Cauchy-Randbedingung eingesetzt. Bei der Cauchy-Randbedingung wird der Wasseraustausch zwischen Gewässer und Grundwasser in Funktion der Differenz zwischen Oberflächenwasserspiegel und Grundwasserspiegel berechnet. Die Sohle wird durch einen Widerstandswert, welcher auch als Leakagewert bezeichnet wird, berücksichtigt. Cauchy-Randbedingungen eignen sich für Gewässer mit wechselnden Infiltrations- und Exfiltrationsbedingungen.

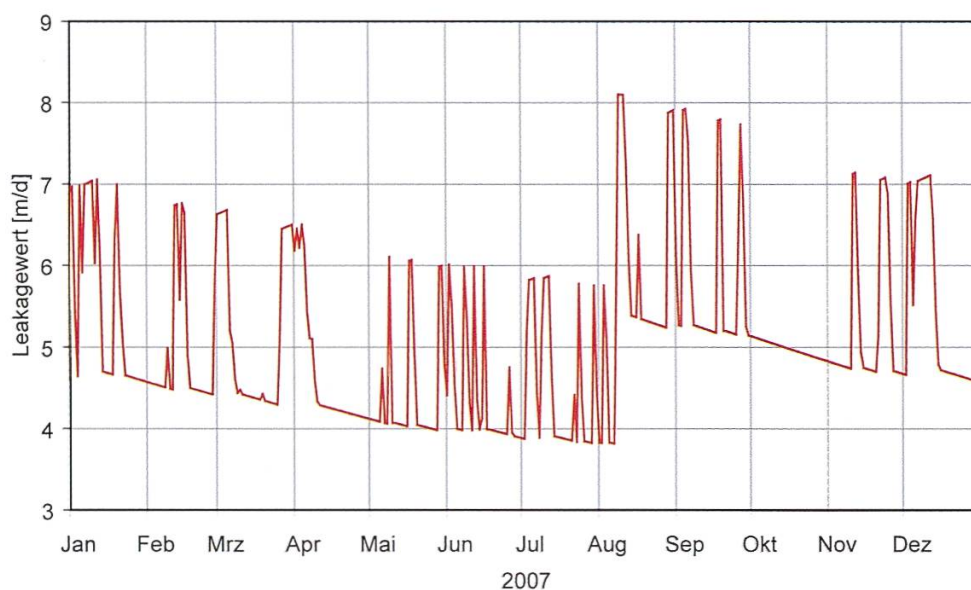


Abbildung 7: Zeitlich variabler Leakagewert im Thurabschnitt westlich Amlikon (kurzfristige Anstiege = erhöhte Wasserführung der Thur und damit grössere benetzte Fläche, sinkender Trend = Kolmation, Anstieg im August = Aufreissen der Kolmation bei Thurhochwasser).

Der Leakagewert bildet insbesondere die benetzte Fläche und die Durchlässigkeit der Gerinnesohle ab. Diese beiden Eigenschaften variieren in Funktion des Thurabflusses und der Zeit. Der Leakagewert wurde im Modell deshalb mit einer Flächenfunktion und einer Kolmationsfunktion multipliziert und als zeitabhängiger Wert vorgegeben. *Abbildung 7* zeigt als Beispiel die Variabilität des Leakagewertes im Bereich westlich von Amlikon.

3.4 Fördermengen

Im Thurtal existieren insgesamt etwa 250 Grundwasser-Entnahmestellen. Etwa 100 davon fördern weniger als 1 000 m³/Jahr und können deshalb im Grundwassermodell vernachlässigt werden. Die restlichen 150 Entnahmestellen wurden berücksichtigt. *Abbildung 8* zeigt die erfassten Fördermengen des Jahres 2007. Viele Brunnen werden nur im Sommer zu Bewässerungszwecken betrieben. Deshalb ist die Förderung im Sommer bedeutend höher als im Winter.

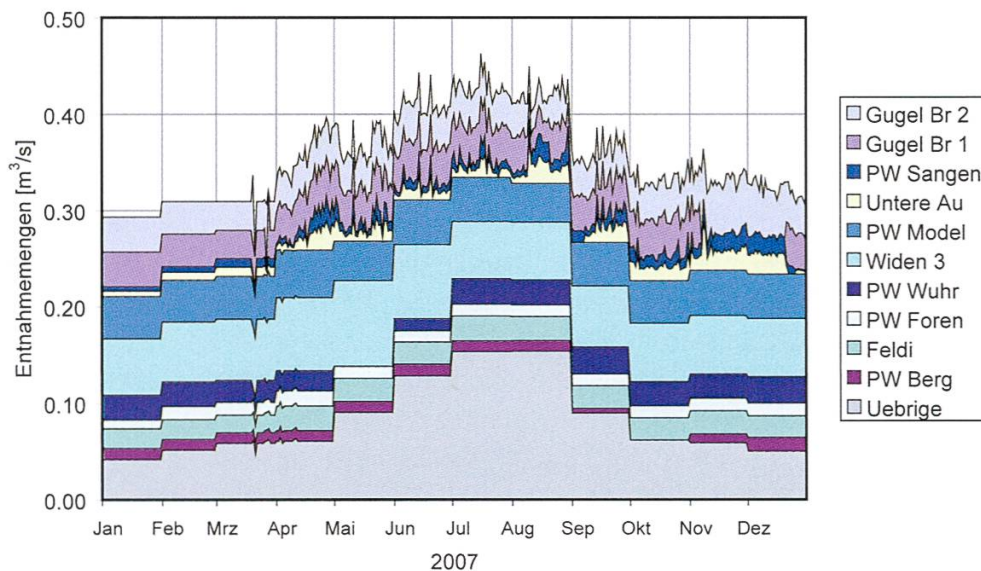


Abbildung 8: Fördermengen im Modellgebiet während des Jahres 2007 (Für die PW Gugel, Sangen und Untere Au liegen Tageswerte, für die anderen Entnahmestellen, mit Ausnahme der Periode der Stichtagmessung im März und April, nur Monatswerte vor).

4 Kalibrierung und Validierung

4.1 Vorgehen und erreichte Modellgenauigkeit

Bei der Modellerstellung wurde als erstes ein Ausgangsmodell erzeugt. Dazu wurden alle bekannten Daten zur Geometrie, zur Durchlässigkeit und zu den Randbedingungen in ein Modell umgesetzt. Im Ausgangsmodell wurde eine räumlich konstante Durchlässigkeit, ein räumlich konstanter Speicherkoeffizient und für jedes Gewässer ein zeitlich und räumlich konstanter Leakagewert vorgegeben. Anschliessend wurden die Modellparameter in ihren physikalisch plausiblen Grenzen so lange manuell variiert, bis die Modellresultate genügend genau mit den gemessenen Grundwasserständen übereinstimmten. Dieser Vorgang wird als «Kalibrierung» bezeichnet. Als Messdaten standen kontinuierliche

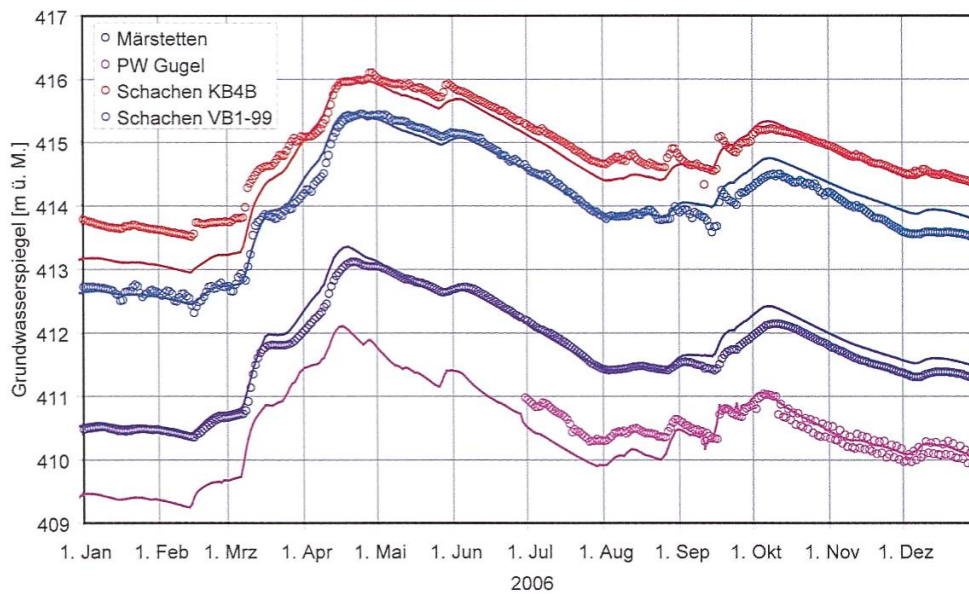


Abbildung 9: Visueller Vergleich der zeitlichen Übereinstimmung der Modellresultate mit den Messwerten von 4 Stationen im Raum Märstetten–Zollhus. Mit Symbolen sind die Messwerte, mit durchgehenden Linien die Modellresultate dargestellt.

Grundwasserlogger, periodische Handablesungen und zwei flächendeckende Stichtagsmessungen des Grundwasserspiegels zur Verfügung (Wyss & Dünnenberger 2009). Von den Loggerdaten wurden nur die Tagesmittelwerte verwendet. Insgesamt konnten etwa 35 000 Messdaten eingesetzt werden. Bei der Kalibrierung wurde einerseits die zeitliche Übereinstimmung mit den vorhandenen Loggerdaten des Grundwasserspiegels (Abbildung 9), andererseits

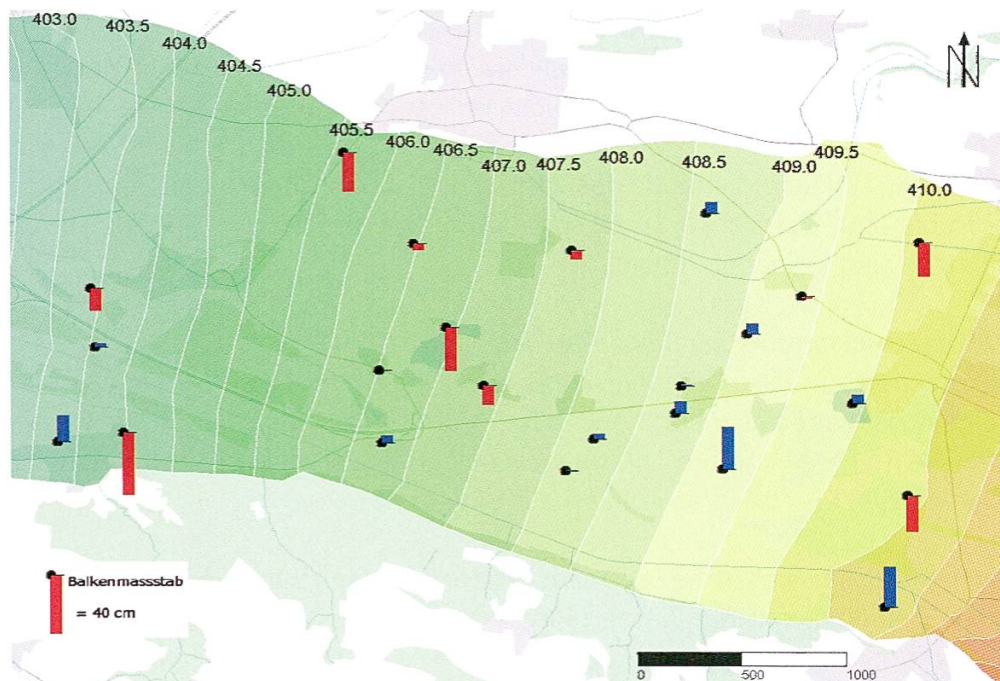


Abbildung 10: Visueller Vergleich der räumlichen Verteilung der Modellabweichungen am Stichtag vom 12.09.2006 (Modellausschnitt). Mit Balken wird die Differenz zwischen Modellwert und Messwert angegeben (blau: Modell zu hoch, rot: Modell zu tief). Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

die räumliche Übereinstimmung mit den Stichtagsmessungen (*Abbildung 10*) angestrebt. Als Mass für die Übereinstimmung von Modell und Messung wird die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSE) verwendet. Werden alle Messungen des Kalibrierungszeitraumes 2002 bis 2007 in den Vergleich einbezogen, so resultiert ein RMSE von 25 cm. 50% der Abweichungen betragen weniger als 14 cm. Der RMSE misst allen Messwerten das gleiche Gewicht bei und bewertet weder die berechneten Fließrichtungen noch die Neigung des Grundwasserspiegels. Die Bewertung der Modellvarianten muss deshalb mit einer visuellen Beurteilung ergänzt werden.

Es gibt kein allgemein gültiges Mass für die Güte eines Modells (*Wohnlich 1999*). Die mit dem kalibrierten Modell erzielte Übereinstimmung wird jedoch als sehr gut betrachtet, da es sich um ein instationäres Modell handelt, welches die Grundwasserverhältnisse ohne korrigierende Eingriffe über die gesamte Zeitspanne von 2002 bis 2007 nachbildet.

4.2 Plausibilitätsprüfung

Mit der Kalibrierung wurde gezeigt, dass das Grundwassermodell die Grundwasserspiegel des Zeitraums 2002 bis 2007 nachbildet. Es bleibt die offene Frage, ob es auch andere Systemzustände und andere Grundwassergrößen richtig voraussagen kann. Dies wurde überprüft, indem neue, von der Kalibrierung unabhängige Daten hinzugezogen wurden:

- Grundwasserspiegelmessungen anderer Zeiträume,
- Abflussmessungen,
- Daten zur Grundwasserchemie.

Grundwasserspiegel des Zeitraums 1995 bis 2002

Mit dem kalibrierten Grundwassermodell wurde der Zeitraum von 1995 bis 2002 nachgebildet und mit den bisher nicht verwendeten Messdaten aus diesem Zeitraum verglichen. Für den Vergleich standen etwa 28 000 Messdaten zur Verfügung. Werden die Modellresultate mit allen Messungen des Zeitraumes 1995 bis 2002 verglichen, so resultiert ein RMSE von 29 cm. 50% der Abweichungen sind kleiner als 15 cm.

Abflussmessungen in den Binnenkanälen

In den meisten Fällen können Abflussmessungen der Oberflächengewässer keine Aussage zu den Infiltrations- oder Exfiltrationsmengen liefern, weil diese Mengen im Vergleich zum Abfluss klein sind. Beispielsweise infiltriert aus der Thur weniger als 10% ihres Abflusses in das Grundwasser.

Einen Spezialfall stellen die Drainagebäche und die Binnenkanäle im Westen des Modellgebietes dar. Ihre Wasserführung besteht bei Trockenwetter zu einem grossen Teil aus drainiertem Grundwasser. Die im Modell berechneten Drainagemengen wurden deshalb mit den gemessenen Abflussmengen der beiden Stichtage verglichen. Es zeigte sich, dass sie bei Trockenwetter am Stichtag vom September 2006 gut übereinstimmen. Im April 2007, nach einer Niederschlagsphase, führten die Binnenkanäle etwa doppelt so viel Wasser wie die

im Modell bestimmte Drainagemenge. Dies rührt daher, dass die Binnenkanäle auch natürliche Nebengewässer ableiten.

Kenntnisse über Beschaffenheit und Alter des Grundwassers

Die Infiltration der Thur ins Grundwasser ist mit einer hydrochemischen Veränderung des Wassers verbunden (Scholtis & Hoehn 2009). Die Beschaffenheit des Wassers wird im Laufe seines unterirdischen Weges durch Erhöhung oder Erniedrigung der Gehalte an gelösten Bestandteilen verändert. Die Kenntnis biogeochemischer Vorgänge erlaubt es, Rückschlüsse auf die Herkunft des Grundwassers zu ziehen (Matthess 1990). Aufgrund einer Karte der Karbonathärte können zum Beispiel Rückschlüsse auf Infiltrations- und Exfiltrationsbereiche der Thur gezogen werden. Diese stimmen mit den Resultaten des Modells weitgehend überein.

4.3 Parameterunsicherheit

Unsicherheit der Kalibrierung

Die manuelle Kalibrierung des Grundwassermodells führt zu einem Parametersatz, der eine gute Übereinstimmung der Modellresultate mit den für die Kalibrierung ausgewählten Messgrößen aufweist. Ob der Parametersatz wirklich der bestmögliche ist, lässt sich im Rahmen der manuellen Kalibrierung nicht nachweisen. Es bestehen diverse Algorithmen zur automatischen Parameterschätzung. Dabei wird die Abweichung der Modellausgabe von den entsprechenden Messgrößen als eine Funktion der Eingangsparameter des Modells aufgefasst. Diese sogenannte Zielfunktion weist ein globales Minimum auf, kann jedoch auch mehrere lokale Minima besitzen. Algorithmen, die auf die Identifikation des globalen Minimums ausgerichtet sind, erfordern extrem viele Rechenläufe. Da ein Rechenlauf des Kalibrierzeitraumes etwa 4 Stunden Rechenzeit erfordert, konnten solche Optimierungsmethoden nicht eingesetzt werden.

Sehr viel effizienter sind Algorithmen zur Bestimmung lokaler Minima, wie zum Beispiel der Gauss-Marquardt-Levenberg-Algorithmus, welcher im Programm PEST (Doherty 2004) implementiert ist. Dieser Algorithmus wurde für die Kalibrierung ausgewählter Parameter im östlichen Teil des Grundwassermodells eingesetzt (Simultec AG 2008). Das aus dem Einsatz von PEST resultierende 95%-Vertrauensintervall liegt für alle untersuchten Parameter im Bereich von $\pm 2\%$ der Parameterwerte. Das Vertrauen in die Kalibrierung wurde dadurch bestärkt.

Prognoseunsicherheit

Bei den Szenarienrechnungen für Hochwasserschutzprojekte im Raum Weinfelden-Bürglen wurde festgestellt, dass der prognostizierte Grundwasseranstieg sensitiv auf die Annahmen zum Leakagewert der Gerinne reagiert. Aus der Modellkalibrierung resultierte, dass sich für verschiedene Leakagewerte eine akzeptable Übereinstimmung des Modells mit den Messungen erzielen lässt, wenn die Veränderung durch eine Anpassung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag oder der Durchlässigkeit kompensiert wird. Es stellte sich daher die Frage, wie weit die Prognoseresultate durch die Unsicherheit der Modellkalibrierung beeinflusst werden.

Das Programm PEST wurde deshalb für eine Vorhersage-Analyse eingesetzt. Bei der Vorhersage-Analyse wird eine erlaubte Grösse der Zielfunktion vorgegeben. Innerhalb des Parameterbereiches, welcher zu kleineren Werten der Zielfunktion führt, sucht PEST diejenige Parameterkombination, welche zu einem Maximum, resp. Minimum der gesuchten Prognosegrösse führt. Aus dieser Analyse resultierte, dass sich der prognostizierte Grundwasseranstieg auch für sehr unterschiedliche Parameterkombinationen nur um 40 cm unterscheidet. Dies bedeutet, dass die Prognoseunsicherheit infolge der Modellkalibrierung klein ist.

5 Modellergebnisse

5.1 Grundwasserflüsse

Damit man die Grundwasserströmung im Thurtal verstehen kann, braucht es einige Vorkenntnisse über die relative Lage des Grundwasserspiegels zur Schotterbasis und zur Topografie. In den *Abbildungen 11* und *12* werden deshalb für einen mittleren Grundwasserstand die Grundwassermächtigkeit und der Flurabstand, d.h. der Abstand des Grundwasserspiegels zur Geländeoberfläche visualisiert. Man erkennt, dass die gesättigte Grundwassermächtigkeit in der östlichen Talhälfte sehr viel grösser ist als im Westen (*Abbildung 11*). Gleichzeitig ist im Osten des Modellgebietes auch der Flurabstand gross (*Abbildung 12*).

Die Grundwasserflüsse können in einem numerischen Grundwassermodell für jedes Finite Element bestimmt werden. Mit dem Begriff Darcy-Geschwindigkeit

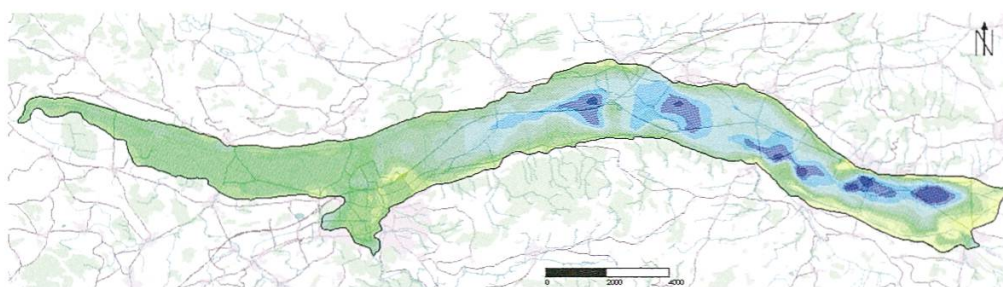


Abbildung 11: Gesättigte Grundwassermächtigkeit am 3.4.2007, bei mittlerem Grundwasserstand. Mit blauer Farbe sind grosse Grundwassermächtigkeiten, mit grüner und gelber Farbe kleine Grundwassermächtigkeiten dargestellt. Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

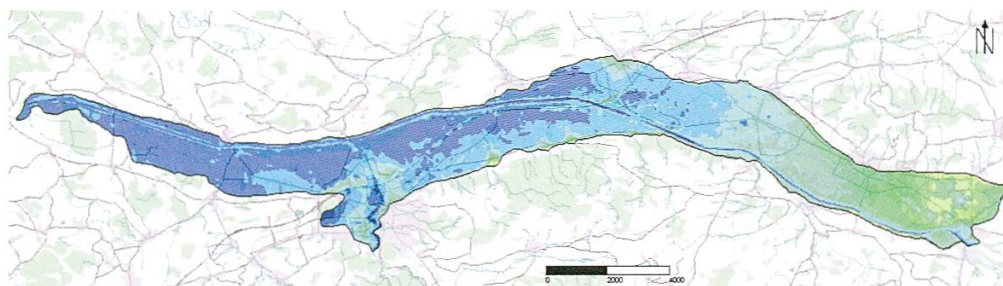


Abbildung 12: Flurabstand am 3.4.2007, bei mittlerem Grundwasserstand. Mit blauer Farbe ist ein kleiner, mit grüner und gelber Farbe ein grosser Flurabstand dargestellt. Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

wird die Wassermenge bezeichnet, welche in einer bestimmten Zeit einen Querschnitt des Grundwasserleiters durchströmt (Darcy 1856). In den Abbildungen 13 und 14 sind die Darcy-Geschwindigkeiten für je einen Talabschnitt im Westen und im Osten des Modells dargestellt. Im Westteil des Modells fließt deutlich weniger Grundwasser als im Osten. Dies ist eine Folge der kleineren

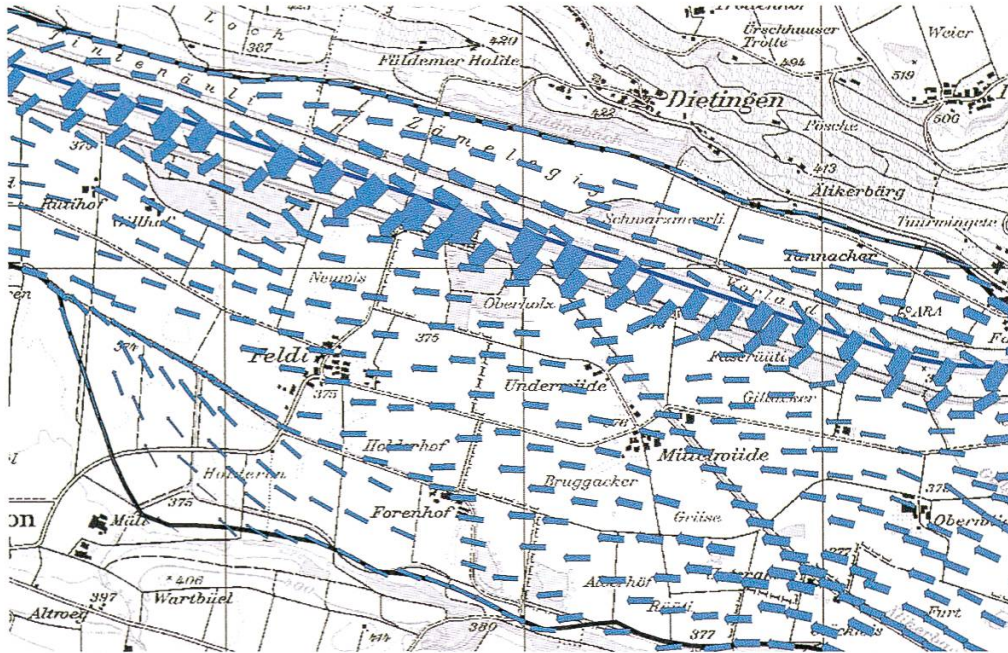


Abbildung 13: Resultierende Darcy-Flüsse in einem Talabschnitt im Westen des Modells am 12.09.2006. Die Orientierung der Pfeile gibt die Richtung der Grundwasserströmung an, die Dicke der Pfeile ist proportional zum Durchfluss über einen Querschnitt durch den Grundwasserleiter. Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

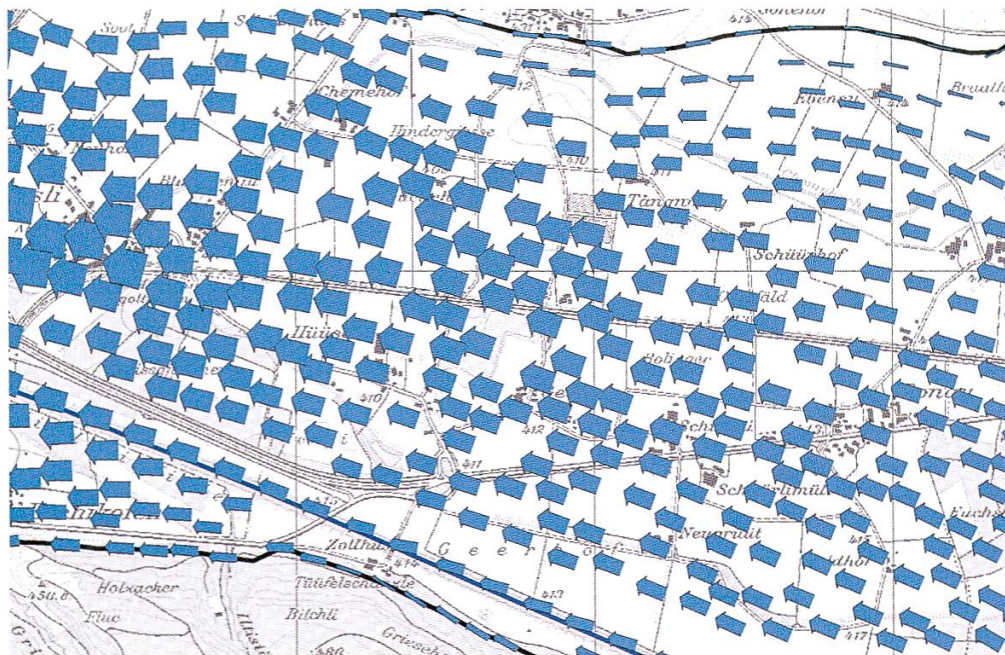


Abbildung 14: Resultierende Darcy-Flüsse in einem Talabschnitt im Osten des Modells am 12.09.2006. (Erklärung in Abbildung 13). Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

Schottermächtigkeit. Die Aufnahmekapazität des Schotters ist kleiner als die Infiltration aus der Thur. Das Grundwasser stösst deshalb an der Taloberfläche auf und wird von den dort vorhandenen Drainagen und Binnenkanälen drainiert. Die grössten Flüsse treten zwischen der Thur und den Binnenkanälen auf. Sie sind nahezu senkrecht zur Talrichtung. Im Ostteil des Modells fliesst mehr Grundwasser. Die Strömung ist parallel zur Thur gerichtet. Durch die Infiltration, resp. Exfiltration der Thur wird die Strömungsrichtung nur wenig beeinflusst.

5.2 Wechselwirkungen zwischen Thur und Grundwasser

Bilanziert man die Flüsse des gesamten Grundwassermodells über einen längeren Zeitraum, so stellt man fest, dass etwa 85% des zufließenden Wassers aus der Thur stammt. Nur 10% wird aus Niederschlag neu gebildet. Eine solche Gesamtbilanz wird jedoch dem dynamischen und räumlich differenzierten Verhalten im Thurtal nicht gerecht. Im Folgenden werden deshalb einige ausgewählte Aspekte der Wasserbilanz näher erläutert. Das numerische Grundwassermodell erlaubt die Erstellung von Bilanzen über frei gewählte Gebiete und Zeiträume.

Der zeitliche Aspekt der Wasserbilanz wird anhand von zwei je etwa 2 km langen Teilstrecken der Thur erläutert. Die erste Teilstrecke befindet sich bei Bussnang. Der Thurwasserspiegel ist dort immer höher als das Grundwasser, sodass immer Wasser aus der Thur infiltriert (Abbildung 15). Bei Hochwasser der Thur kann die Infiltration der Thur bis zehnmal höher sein als bei Niederwasser. Über die gesamte Infiltrationsmenge betrachtet, macht der Anteil der Niederwasserinfiltration trotzdem 60% der gesamten Infiltration aus.

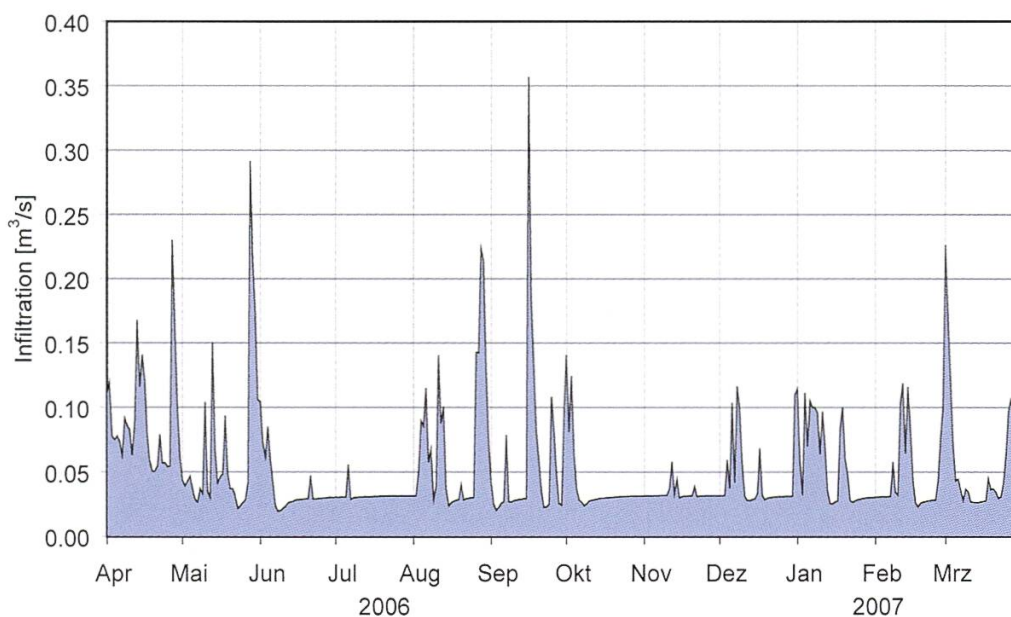


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Infiltration aus der Thur auf einem 2 km langen Teilabschnitt bei Bussnang (siehe Abbildung 17).

Die zweite Teilstrecke befindet sich unterhalb des Stauwehrs des Grüneckkanals. Es handelt sich um eine Exfiltrationsstrecke der Thur. Bei Hochwasser der Thur infiltriert jedoch auch in dieser Teilstrecke Wasser aus der Thur ins Grundwasser (Abbildung 16).

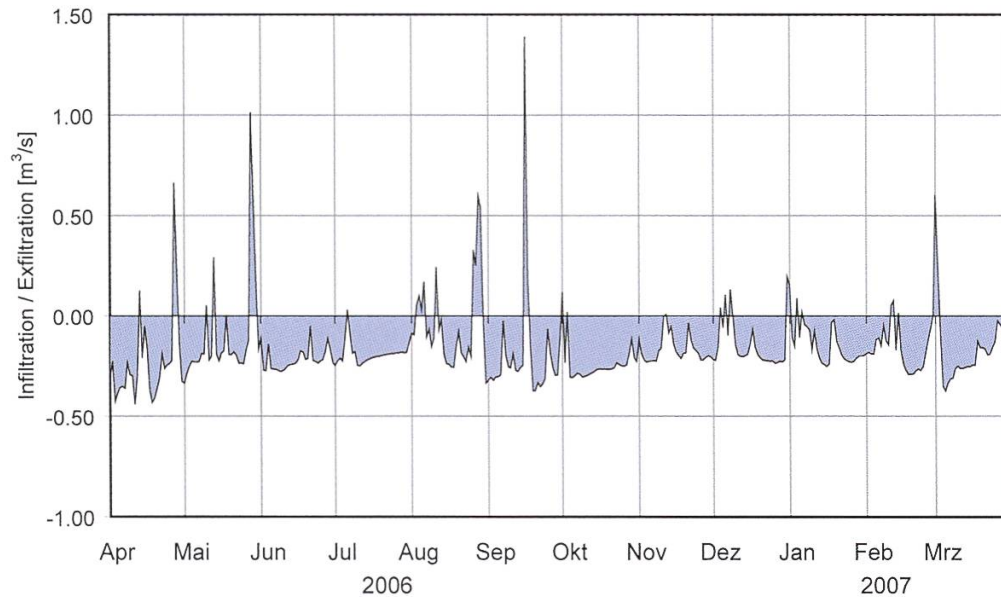


Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf der Infiltration (positive Achsenrichtung) und Exfiltration (negative Achsenrichtung) der Thur in einem 2 km langen Abschnitt bei Grüneck (siehe Abbildung 17).

Wird der Anteil der Infiltration am gesamten Wasseraustausch zwischen Thur und Grundwasser abschnittsweise aufgetragen, so ergibt sich die Verteilung gemäss Abbildung 17. Durch die tieferliegenden Binnenkanäle wird die Thur fast im gesamten westlichen Teil des Modells zur Infiltration gezwungen. Im Bereich der Talquerung wechseln sich Infiltration und Exfiltration in Abhängigkeit des Thurwasserspiegels und des Grundwasserspiegels ab. Kleinere Stufen in der Thur bewirken eine verstärkte Infiltration im Oberwasser und eine Exfiltration im Unterwasser. Östlich von Amlikon befindet sich die Thur immer oberhalb des Grundwasserspiegels. Es findet deshalb immer eine Infiltration statt.

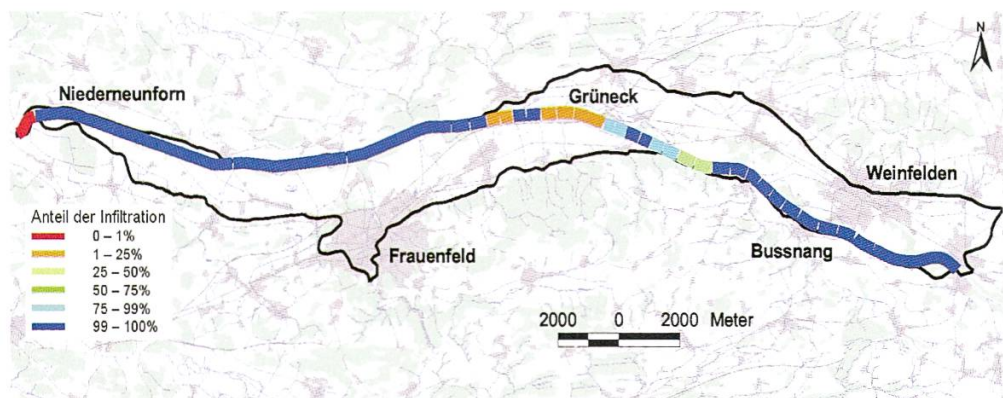


Abbildung 17: Anteil der Infiltration am gesamten Wasseraustausch im Bilanzzeitraum vom 1.4.2006 bis zum 31.3.2007 entlang der Thur. Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

5.3 Wasserbilanz

Der räumliche Aspekt der Grundwasserbilanz wurde in der *Abbildung 18* visualisiert. Das Thurtal wurde dazu in vier Abschnitte unterteilt, für die je eine Grundwasserbilanz über den Zeitraum vom 1.4.2006 bis 31.3.2007 erstellt wurde. Dieser Zeitraum wurde gewählt, weil der Grundwasserspiegel am Anfang und Ende des Zeitraums etwa gleich hoch sind und daher keine Veränderung des gespeicherten Grundwasservolumens berücksichtigt werden muss.

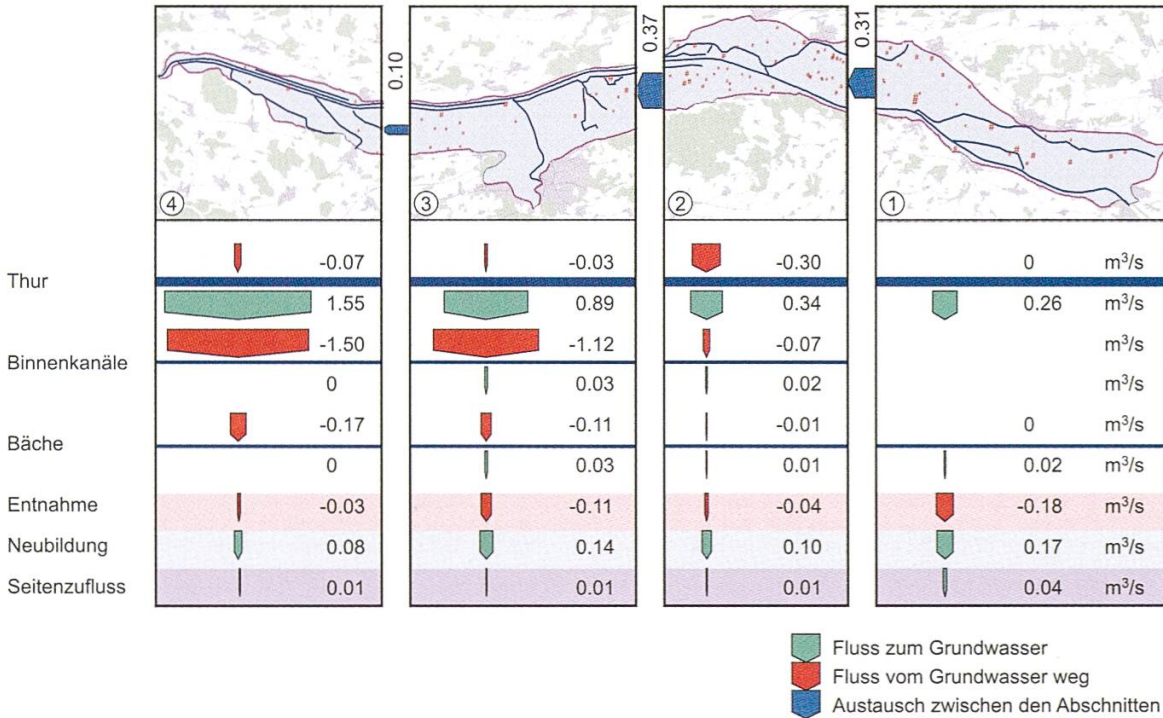


Abbildung 18: Grundwasserbilanzen in 4 Teilbereichen des Thurtals über den Zeitraum vom 1.4.2006 bis zum 31.3.2007. Hintergrundkarte reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091018).

Im östlichsten Abschnitt wirken alle Oberflächengewässer als Infiltrant. Grundwasser wird dem Thurtalschotter nur über die Pumpwerke entnommen. Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag entspricht etwa der geförderten Wassermenge. Etwa $0,3 \text{ m}^3$ Grundwasser fließen pro Sekunde über den westlichen Rand des Abschnittes ab. Im zweiten Abschnitt drainiert die Thur etwa die von Osten zuströmende Wassermenge ab. Etwa die gleiche Wassermenge infiltriert neu ins Grundwasser. Die Entnahme in Pumpwerken ist klein. Der dritte und vierte Abschnitt, im Westteil des Modells, zeigen eine ähnliche Charakteristik. Es infiltriert sehr viel Wasser aus der Thur. Durch die flankierenden Binnenkanäle wird jedoch der grösste Teil dieses Wassers wieder drainiert und in die Thur zurückgeleitet. Das infiltrierende Thurwasser stellt ein grosses, bisher ungenutztes Potenzial für zukünftige Grundwasserfassungen dar.

Wird berücksichtigt, dass ein grosser Teil des aus der Thur infiltrierenden Wassers nach kurzer Distanz wieder drainiert wird, so erhält die Neubildung aus Niederschlag trotz des relativ geringen Anteils ein grösseres Gewicht. Dies zeigt sich insbesondere am Chemismus des Grundwassers.

6 Schlussfolgerung

Mit dem kalibrierten regionalen Grundwassermodell liegt ein wertvolles Instrument zur Bewirtschaftung des Grundwasservorkommens im Thurtal vor. Durch die numerische Modellierung wurden wichtige Erkenntnisse über die generelle Grundwasserbilanz im Thurtal und im Speziellen über den Wasseraustausch zwischen den Oberflächengewässern und dem Grundwasser gewonnen. Das Grundwassermodell wurde im Jahr 2008 bereits für verschiedene Aufgaben im Hochwasserschutz, der Kraftwerksplanung und der Vergabe von Wasserrechten eingesetzt.

7 Literatur

- *Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M., 2006: Crop Evapotranspiration – FAO Irrigation and Drainage Paper No 56.*
- *Baumann M., Hoehn E., Jordan P., 2009: Die 2. Thurkorrektur erfordert einen neuen Blick auf das Thurtaler Grundwasser – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.*
- *Büchi & Müller AG, 1988: Simulation und Bilanzierung der Grundwasserströmungen im Thurtal. – Büchi & Müller AG, Frauenfeld, Bericht Nr. 1349.*
- *Darcy H., 1856: Les fontaines publiques de la ville de Dijon – Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines.*
- *Diersch H.-J. G., 2006: Feflow 5.3, User's Manual – Wasy GmbH.*
- *Doherty J., 2004: PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition – Watermark Numerical Computing.*
- *Dracos T., 1980: Hydrologie, Eine Einführung für Ingenieure – Springer-Verlag.*
- *Gat J. R. & Seiler K.-P., 2007: Groundwater Recharge from Run-Off, Infiltration and Perkolatation - Water Science and Technology Library.*
- *Gmünder C. & Spring U., 2009: Interaktion zwischen Thur und Grundwasser aus der Sicht der 2. Thurkorrektur – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.*
- *Matthess G., 1990: Die Beschaffenheit des Grundwassers – Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2.*
- *Menzel L., 1997: Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanzen-Atmosphäre – Geographisches Institut ETHZ. Zürcher Geographische Schriften, Heft 67.*
- *Mockus V., 1972: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall – National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10.*
- *Müller E. R., 2009: Die Vorstellungen über den Grundwasserstrom im Thurtal seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.*
- *Naef H. & Frank S., 2009: Neue Erkenntnisse zur Entstehung und Aufbau des Thurtaler Grundwasserträgers – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.*
- *Scholtis A. & Hoehn E., 2009: Beschaffenheit des Grundwassers im Thurtal – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.*

- *Simultec AG, 2008*: 2. Thurgauer Thurkorrektur, Grundwassermodell Thurtal, Unsicherheitsanalyse der Modellkalibration – Bericht z. H. Kanton Thurgau, Baudepartement, Amt für Umwelt.
- *Wohnlich S., 1999*: Hydrogeologische Modelle, ein Leitfaden für Auftraggeber, Ingenieurbüros und Fachbehörden – Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 10.
- *Wyss R. & Dünnenberger U., 2009*: Grundwassermonitoring – dem Grundwasser auf der Spur – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.

Adresse der Verfasser:

Christian Gmünder, Dipl. Bauingenieur ETH
Ulrich Spring, Dr. sc. techn., Bauingenieur ETH
Simultec AG, Hardturmstrasse 261, 8005 Zürich, E-Mail: info@simultec.ch

