



Amt für Wasser
und Abfall (AWA)

Bau- und Verkehrsdirektion
des Kantons Bern



UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

CHYN
Centre d'hydrogéologie
et de géothermie

NUMERISCHES MODELL DES SEELAND-GRUNDWASSERLEITERS

Dr. Fabien Cochand

Rolf Tschumper

Prof. Philip Brunner

Prof. Daniel Hunkeler

Neuchâtel, 31.03.2020

Übersetzung der englischen Version vom 19.07.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Allgemeine Überlegungen	2
	2.1 Frühere Studien	2
	2.2 Seeland-Grundwasserleiter.....	2
	2.3 Modellgeometrie.....	3
	2.4 Simultanmessungen.....	5
	2.5 Allgemeine Modelliermethodik.....	5
3	Modellentwicklung	6
	3.1 Entwicklung des Modellnetzes.....	6
	3.2 Randbedingungen des stationären Modells	6
	3.2.1 Randbedingungen bei Flüssen.....	6
	3.2.2 Festpotential- und Pumpbrunnen-Randbedingungen	7
	3.2.3 Berechnung der randliche Zuflüsse	7
	3.2.4 Direkte Grundwasserneubildung durch Niederschlag	10
	3.3 Randbedingungen des instationären Modells	12
4	Stationäres Modell	15
	4.1 Kalibrierverfahren	15
	4.2 Kalibrierter Wert der hydraulischen Leitfähigkeit	16
	4.3 Simulierter Grundwasserspiegel.....	17
	4.4 Wasserhaushalt.....	19
	4.5 Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasserleiter.....	20
	4.6 Unsicherheiten.....	21
5	Instationäres Modell.....	23
	5.1 Kalibrierverfahren und Anfangsbedingungen	23
	5.2 Wiedergabe der Grundwasserdynamik durch das instationäre Modell	23
	5.3 Darstellung des minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstandes	28
	5.4 Zusammenfassung der Schwachstellen des Modells und der Unsicherheiten.....	28
6	Modellanwendungen.....	30
	6.1 Pumpversuch im Pumpwerk Gimmiz.....	30
	6.2 Verunreinigung durch die Zuckerfabrik	33
	6.2.1 Advektiver Transport der Verunreinigung	33
	6.2.2 Transportmodell	35
7	Schlussfolgerung und Möglichkeiten zu einer Weiterentwicklung des Modells	36
8	Referenzen	37
9	Anhänge	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht zur Geologie im Berner Seeland (aus WWA, 2004).....	3
Abbildung 2: Modellgebiet und Modellgrenzen	4
Abbildung 3: Modellnetz.....	6
Abbildung 4: Verwendete Randbedingungen	8
Abbildung 5: Berechnung der randlichen Zuflüsse: (a) Monatlicher Mittelwert der Niederschläge und Monatsmittelwert der berechneten PET, (b) Netto-Niederschläge und (c) Monatlicher Mittelwert der randlichen Zuflüsse.....	10
Abbildung 6: Bodentypen im Seeland (links) und Anteil der Landwirtschaft (rechts).....	11
Abbildung 7: Implementierte temporäre Pumpbrunnen.....	14
Abbildung 8: Pilotpunkte und gemessene GW-Spiegel zur Kalibrierung des Modells.	15
Abbildung 9: Kalibrierte hydraulische Leitfähigkeit.....	16
Abbildung 10: Beobachtete vs. simulierte GW-Stände.....	17
Abbildung 11: Abweichung zwischen beobachteten und simulierten GW Ständen an den Beobachtungspunkten.....	18
Abbildung 12: Simulierte Fluss-Grundwasserleiter-Wechselwirkungen	20
Abbildung 13: Reduzierung der relativen Unsicherheit, berechnet durch PEST	21
Abbildung 14: Messstellen mit Zeitreihen der Grundwasserstände	26
Abbildung 15: Schwachstellen des Modells.....	29
Abbildung 16: Pumpversuch Gimmiz Ganglinien	31
Abbildung 17: Beobachtete vs. simulierte Absenkung	32
Abbildung 18: a) Erwartete Ausbreitungsrichtung aufgrund der piezometrischen Karte (KELLERHALS+HAEFELI, 2018) und b) simulierte Ausbreitung mittels Partikelverfolgungsverfahren.	34

1 Einführung

Gemäss Artikel 39 bis 41 des kantonalen Wassernutzungsgesetzes (WNG) ist das Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA) zuständig für die Ermittlung von Grundlagen zur Nutzung und zum Schutz von Oberflächengewässer und Grundwasser.

In diesem Kontext erfüllt das AWA verschiedene Aufgaben:

- Das AWA unterhält ein hydrogeologisches Archiv mit verschiedenen Datensätzen (Blaue Berichte, lokale Studien, HydroPro, WAWIKO,...), das wichtige Grundlagen liefert für alle Aufgaben, die das Grundwasser betreffen. Diese Informationen sollten besser ausgewertet und für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.
- Aktualisierte Informationen über das Grundwasser müssen den kantonalen Behörden und interessierten Kreisen auf einfache Weise zur Verfügung gestellt werden.
- Die wichtigsten Informationen müssen der Öffentlichkeit als thematische Karten im Geoportal des Kantons Bern zur Verfügung gestellt und aktualisiert werden.
- Eine quantitative und qualitative Überwachung der aktuellen Situation des Grundwassers muss sichergestellt werden, gemäss der Wasserversorgungsstrategie 2010.

Als Beitrag zu den oben erwähnten Zielen und Aufgaben, wurde ein Grundwasserströmungsmodell mit der Software FEFLOW für das Gebiet des Berner Seeland entwickelt.

Dieser Bericht stellt die technische Entwicklung und die Ergebnisse des Seeland Grundwasser-Modells dar. Die Modellentwicklung basiert auf der Vorstudie "GROUNDWATER MODELLING TASK OF THE SEELAND AQUIFER - PRELIMINARY STUDY - 12.05.2017". In diesem Bericht werden wir uns auf Aspekte der technischen Modellierung konzentrieren und einige wichtige Punkte zusammenfassen.

2 Allgemeine Überlegungen

2.1 Frühere Studien

Zahlreiche geologische und hydrogeologische Untersuchungen wurden bisher dem Seeland-Grundwasserleiter gewidmet. Die erste umfassende hydrogeologische Studie des Seelandes findet sich in WEA (1976) (WEA ist heute AWA) und beinhaltet eine Strategie für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressource. Ein weiterer Bericht (WEA 1989) behandelt die Wechselwirkungen zwischen dem Grundwasserleiter, der Alten Aare und dem Hagneck-Kanal. Die bislang umfassendste Studie über den Grundwasserleiter ist in WEA (1998) dokumentiert. Die Studie umfasst auch ein numerisches Modell des gesamten Seeland-Grundwasserleiters (Nordteil und Südteil), um Wasserbilanzen zu erstellen und sein hydrodynamisches Verhalten zu bewerten. Weitere Studien untersuchten spezifischere Aspekte. Wanner und Böhi (2011) führten einen Pumpversuch in Gimmiz zur Erneuerung der Konzession durch. Jammet (2011) untersuchte die Wechselwirkungen zwischen dem Hagneck-Kanal, dem Grundwasserleiter und den Pumpbrunnen von Gimmiz während dieses Versuchs. Jordan (2000) entwickelte ein 2D-FEFLOW-Modell des nördlichen Teils (nördlich des Hagneck-Kanals), um den Zuströmbereich des Worben-Pumpbrunnens zu bestimmen. Es gibt auch mehrere Studien zur Wasserqualität und Hydrochemie, wie beispielsweise Hoffmayer (1995), Ullrich (1998) oder Baillieux et al. (2014). Alle diese Studien liefern viele wichtige Informationen und wurden intensiv verwendet.

2.2 Seeland-Grundwasserleiter

Abbildung 1 zeigt den geologischen Kontext des Seelandes. Der Grundwasserleiter besteht aus Kiesen, die als Aareschotter bezeichnet werden. Der Grundwasserleiter enthält auch feinere Sedimente mit einer geringeren Durchlässigkeit ("Verlandungsablagerungen und feinkörnige Sedimente" in Abbildung 1), aber die Aareschotter bilden die wichtigsten Ablagerungen des produktiven, durchlässigen Grundwasserleiters.

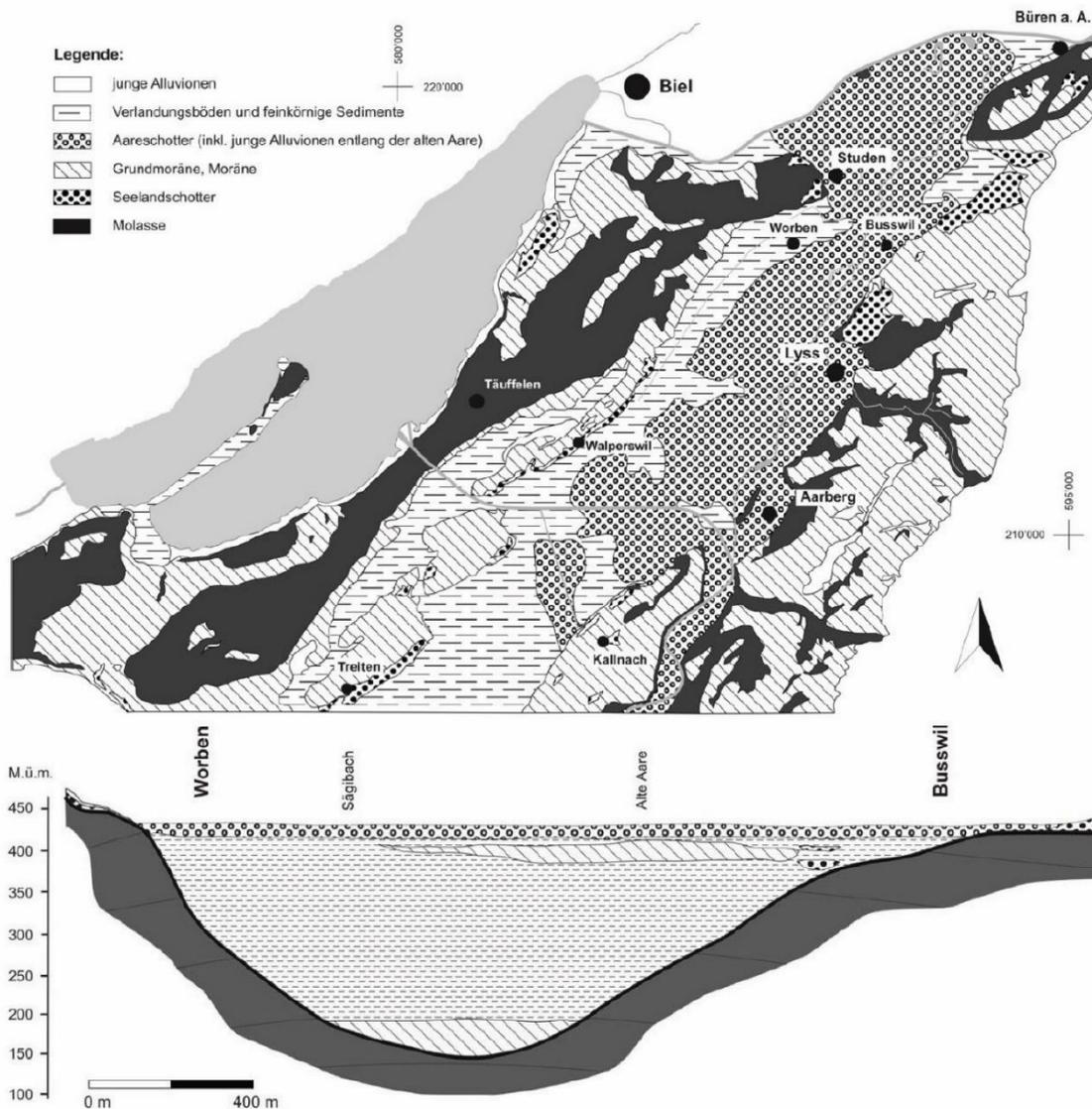


Abbildung 1: Übersicht zur Geologie im Berner Seeland (aus WWA, 2004)

2.3 Modellgeometrie

Das Modell wurde mit dem Computerprogramm FEFLOW 7 unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode entwickelt. Es wurde ein Modell für die horizontale 2D-Grundwasserströmung in einem ungespannten Grundwasserleiter erstellt. Das Modell ist oben durch die Bodenoberfläche begrenzt und unten durch den Grundwasserstauer, dessen Form vom AWA berechnet wurde (AWA, 2016). Der östliche und westliche Modellrand entspricht dem Übergang vom kiesigen Grundwasserleiter zu Molasse, Moräne oder kleineren Tälern (seitliche Grenzen in Abbildung 2 und entlang des Aaretals zwischen Aarberg und Mühleberg). Die nördliche Grenze folgt dem Nidau-Büren-Kanal. Obwohl der Fluss wahrscheinlich nicht den gesamten Grundwasserstrom entwässert und

nicht das Ende des Grundwasserleiters darstellt, stellt der Fluss eine pragmatische Grenze dar, da der Wasserstand des Flusses bekannt ist und somit eine Randbedingung der ersten Art leicht umgesetzt werden kann. Nördlich dieser Grenze ist der Grundwasserleiter weniger produktiv und entsprechend für das AWA von geringerer Bedeutung. Gegen Südwesten nimmt die Mächtigkeit und Durchlässigkeit des Aquifers stets ab und ist für die Trinkwasserproduktion nicht mehr geeignet. Jenseits der Modellgrenze Treiten-Fräschels (Abbildung 2) ist der Grundwasserleiter weniger produktiv und besteht aus feinkörnigen Ablagerungen (WEA, 1976). Nur 15% des Grundwasserstroms fließt über diese Grenze (siehe Anhang 2 und Anhang 3). Zusätzlich befindet sich innerhalb dieses Querschnitts ein Grundwasserbeobachtungspunkt, so dass eine Randbedingung erster Art angewendet werden kann (siehe nächsten Abschnitt für weitere Details zu den Modell-Randbedingungen).

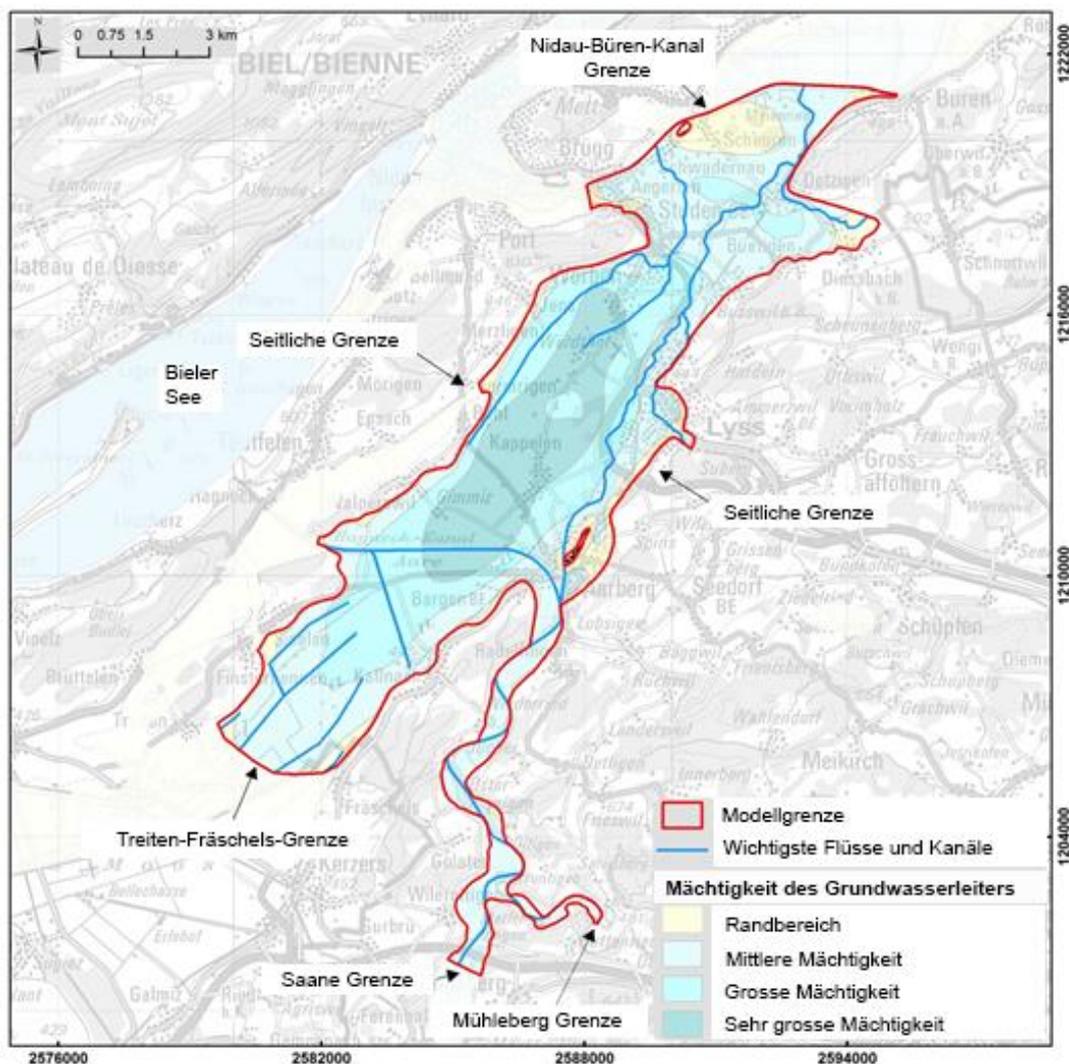


Abbildung 2: Modellgebiet und Modellgrenzen

2.4 Simultanmessungen

Am 4. April 2017 und am 20. November 2017 wurden zwei umfangreiche Feldmesskampagnen (Simultanmessung, Stichtagemessung) durchgeführt (AWA, 2017). Hauptziel dieser Kampagnen war es, eine grosse Menge an Grundwasserspiegeldaten und weitere Parameter zu gewinnen, um sie als Grundlage für die Kalibrierung des Modells zu verwenden. Im Rahmen dieser Kampagnen wurden Grundwasserstände in mehr als 200 Piezometern und Wasserstände in zahlreichen Flüssen gemessen (Messstellen sind in Abbildung 8 dargestellt). Am 4. April 2017 wurden auch Proben für umfangreiche chemische Analysen aus 35 Grundwassermessstellen und den Pumpbrunnen aller Wasserversorgungen im Modellgebiet entnommen.

2.5 Allgemeine Modelliermethodik

Zunächst wurde ein stationäres Modell mit PEST kalibriert (PEST, 2015), um den hydrogeologischen Zustand zum Zeitpunkt der ersten Simultanmessung (4. April 2017) wiederzugeben. Um das Modell zu bewerten, wurden die simulierten mit den gemessenen GW-Ständen verglichen. Weiterhin wurde der simulierte Wasserhaushalt den Schätzungen aus anderen Studien (hauptsächlich WEA (1976) und WWA (2004)) gegenübergestellt. Das kalibrierte stationäre Modell wurde als Ausgangspunkt für ein instationäres Modell verwendet, das den Zeitraum von Januar 2010 bis Dezember 2017 umfasst. Hauptziel dieses Schrittes war es, die Dynamik des Grundwasserleiters zu reproduzieren und die minimalen, maximalen und mittleren Grundwasserstände während der Simulationsperiode darzustellen. Um dies zu erreichen, wurden die hydraulischen Leitfähigkeiten und die Porosität so angepasst, dass sie am besten zu den instationären GW-Ständen passen. Beide Kalibrierschritte werden in Kapitel 4.1 und 5.1 näher beschrieben.

3 Modellentwicklung

3.1 Entwicklung des Modellnetzes

Das 2D-Netz (Abbildung 3) wurde mit dem Netzgenerator "Triangle" erzeugt, der in FEFLOW integriert ist. Ein Modellnetz mit möglichst gleichseitigen Elementen erleichtert die numerische Konvergenz und sorgt für eine gute numerische Stabilität. Daher galt als Vorgabe für den Netzwerkgenerator, Dreiecke mit einem Mindestwinkel von 34° zu erzeugen. Zusätzlich wurde das Netz in der Nähe der Hauptflüsse und Pumpbrunnen verfeinert. In diesen Zonen werden grosse hydraulische Gradienten erwartet, und entsprechend ist eine grössere Dichte an Berechnungsknoten nötig, um diese Gradienten genügend hoch aufzulösen. Elemente entlang von Flüssen haben eine maximale Länge von 10 m, Element um Pumpbrunnen von 4 m. Die Gesamtzahl der Knoten beträgt 127'706 und die Anzahl der Elemente 251'128.

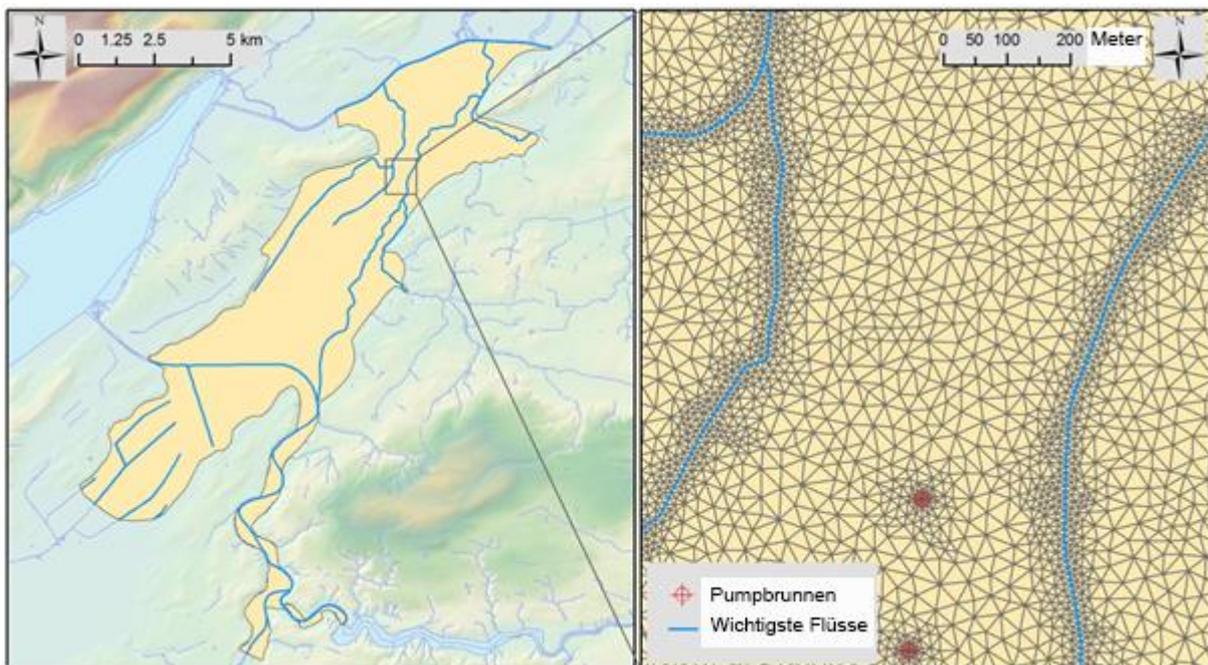


Abbildung 3: Modellnetz

3.2 Randbedingungen des stationären Modells

3.2.1 Randbedingungen bei Flüssen

Die Fluss-Grundwasser-Wechselwirkungen wurden mit Cauchy-Randbedingungen dargestellt (grüne Linien in Abbildung 4). Um diese Art von Randbedingungen umzusetzen, müssen

Flusswasserstände und Flussbetthöhen bekannt sein. Zur Festlegung der Wasserstände in den Flüssen wurden Daten von BKW, Kanton und Bund verwendet (rosa Dreiecke in Abbildung 4). Die Flusswasserstände zwischen den Messpunkten wurden durch lineare Interpolation abgeschätzt. Die Position der Flusssohle wurde aus dem DTM-Datensatz «Gerinneschläuche» hergeleitet. Der Datensatz «Gerinneschläuche» wurde auch zur Festlegung der Bodenoberfläche (Geo7, 2011) verwendet. Diese Daten waren jedoch nicht für alle Flüsse verfügbar (Anhang 4). Für Flüsse ohne Informationen wurden Felddaten während der Simultanmessung erhoben und verwendet (Anhang 5).

3.2.2 Festpotential- und Pumpbrunnen-Randbedingungen

Die folgenden Daten wurden für die Festlegung von Randbedingungen mit einem fixen Grundwasserstand verwendet, wie in Abbildung 4 dargestellt ist:

- Treiten-Fräschels Grenze: Beobachtete Grundwasserstände in der kantonalen Messstelle G104 zum Zeitpunkt der ersten Simultanmessung.
- Nidau-Büren-Kanal Grenze: Beobachteter Wasserstand an der BAFU-Abflussmessstation "Aare – Brügg #2029" zum Zeitpunkt der ersten Simultanmessung und Wert aus der Simultanmessung.
- Saane Grenze: Beobachteter Grundwasserspiegel während der Simultanmessung.
- Mühleberg Grenze: In diesem Bereich lagen keine Daten vor. Daher wurde der Flusswasserspiegel zum Zeitpunkt der ersten Simultanmessung als Annäherung für den Grundwasserspiegel gewählt.

Für die öffentlichen Pumpbrunnen wurden die mittleren jährlichen Förderraten verwendet.

3.2.3 Berechnung der randliche Zuflüsse

Zur Berechnung der randlichen Zuflüsse ins Modellgebiet wurde die gleiche Methodik verwendet, die für das Modell des Emmentaler Grundwasserleiters entwickelt wurde. Zunächst wurden alle Teileinzugsgebiete, die ins Modellgebiet entwässern, mit einem Geländemodell mit 25x25m Auflösung und den hydrologischen Werkzeugen des ArcMap-GIS-Pakets definiert.

Diejenigen Teileinzugsgebiete, die hauptsächlich über Fließgewässer entwässert werden, wurden nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass alle in Abbildung 4 dargestellten Teileinzugsgebiete einen diffusen seitlichen Grundwasserzulauf ins Modellgebiet aufweisen. So wurde beispielsweise das Einzugsgebiet des Lyssbachs nicht einbezogen, da wir davon ausgegangen sind, dass der grösste Teil des Wassers durch den Lyssbach entwässert wird und somit der Grundwasserzulauf vernachlässigbar ist.

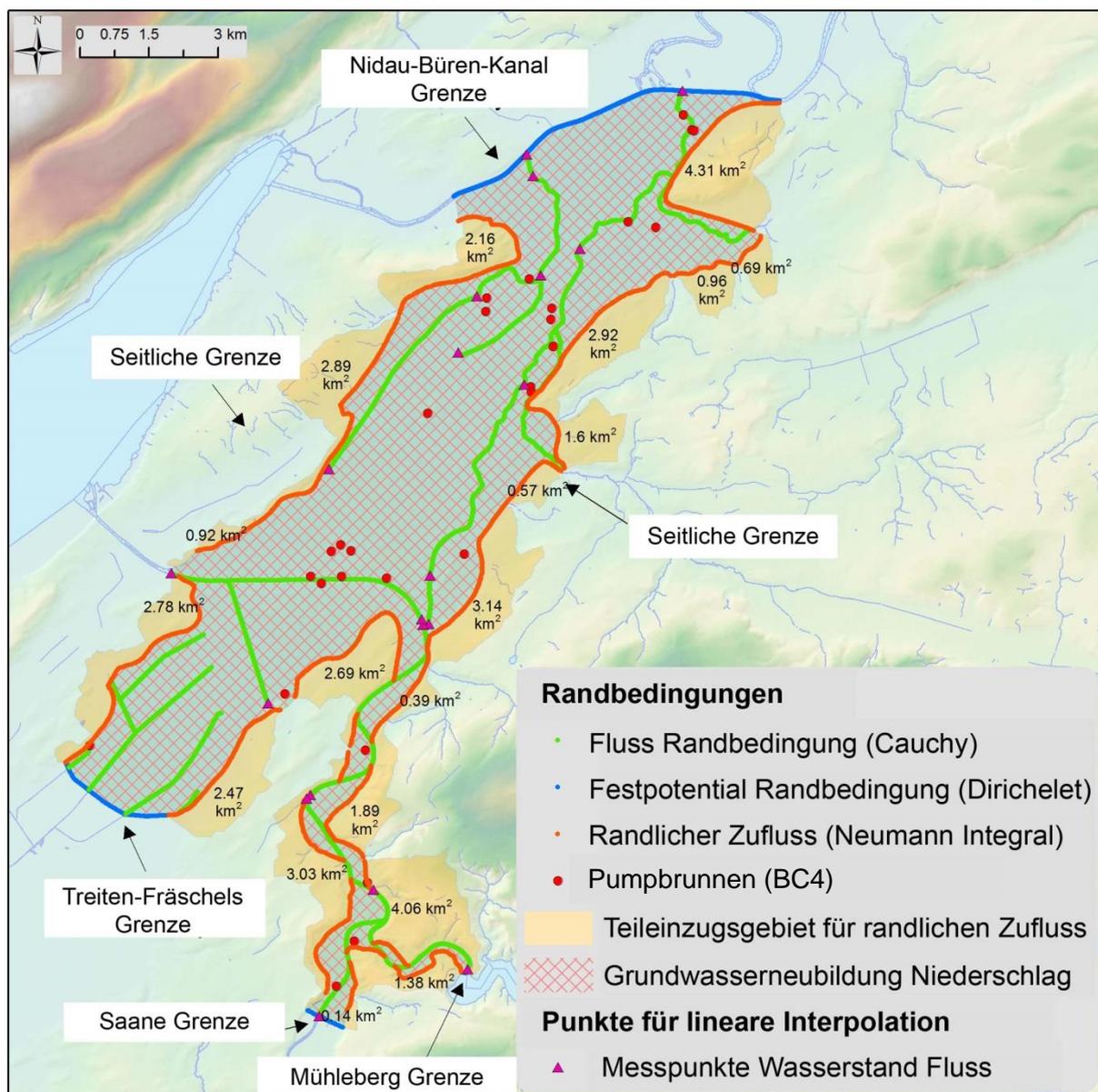


Abbildung 4: Verwendete Randbedingungen

Anschliessend wurde anhand der Daten der Meteostation Mühleberg die monatliche mittlere Wasserbilanz der einzelnen Teilgebiete berechnet. Um die Methodik der Wasserhaushaltsberechnung

zu veranschaulichen, zeigt die Abbildung 5 jeden Berechnungsschritt für das Teilgebiet #8. In Abbildung 5a sind die potentielle Evapotranspiration (PET) und der Niederschlag für dieses Teileinzugsgebiet dargestellt. Die PET (Gleichung 1) wurde mit der Oudin-Gleichung wie folgt berechnet (Oudin et al., 2005):

$$\text{PET} = \frac{R_e}{\lambda \rho} \cdot \frac{T_a + 5}{80} \quad (1)$$

R_e ist die extraterrestrische Strahlung, die nur vom Breitengrad und dem Julianischen Tag abhängt, λ ist die latente Verdampfungswärme für Wasser, ρ ist die Wasserdichte, T_a ist die an der Meteostation Mühleberg gemessene Tagesmitteltemperatur. Anschliessend wurden 85%¹ der PET von der Niederschlagsmenge abgezogen, um den monatlichen mittleren Nettoniederschlag zu erhalten (Abbildung 5b). Schliesslich wurde der Nettoniederschlag in geeignete Einheiten umgewandelt, um den randlichen Zufluss abzuschätzen. Im stationären Modell wurde der Monatsmittelwert verwendet, im instationären Modell ein gleitender Mittelwert über sechs Monate (Abbildung 5c). Die mit dieser Methodik erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 4.4 diskutiert.

¹ Annahme, dass PET nicht zu 100% wirksam ist. 85% der PET ist ein häufig beobachteter Wert (siehe laufendes Projekt zur Grundwasserneubildung des BAFU durch das CHYN).

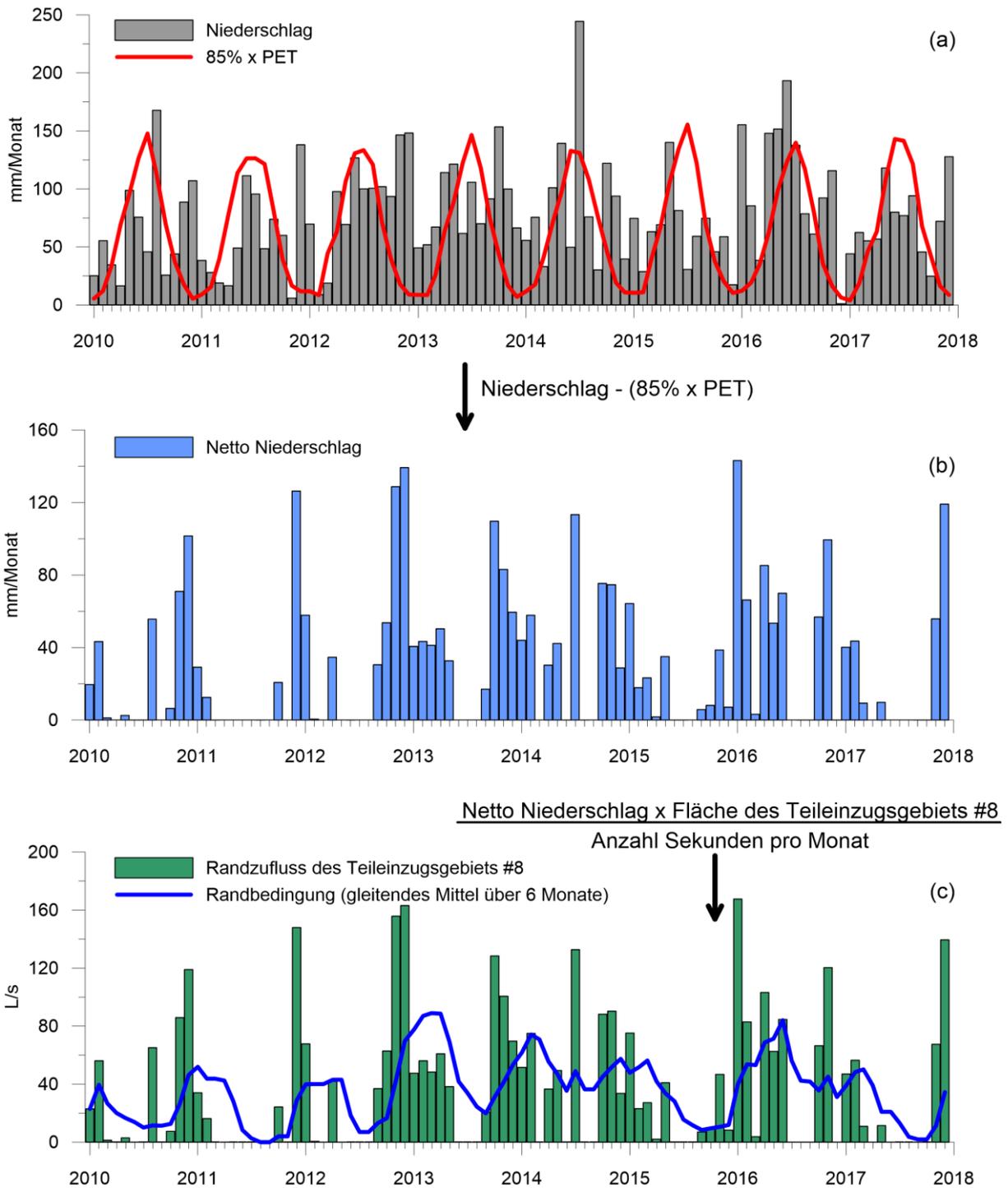


Abbildung 5: Berechnung der randlichen Zuflüsse: (a) Monatlicher Mittelwert der Niederschläge und Monatsmittelwert der berechneten PET, (b) Netto-Niederschläge und (c) Monatlicher Mittelwert der randlichen Zuflüsse

3.2.4 Direkte Grundwasserneubildung durch Niederschlag

Die direkte Grundwasserneubildung durch Niederschlag und der Bewässerungsbedarf wurden mittels eines Modells für den Bodenwasserhaushalt von landwirtschaftlichen Flächen, CropSyst, ermittelt. CropSyst berechnet den Wasserhaushalt für unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen

mit einem täglichen Zeitschritt. CropSyst wurde zur Untersuchung der Auswirkungen von Klima, Boden und Bewirtschaftungsmethoden auf die Produktivität von Agrarsystemen, die Grundwasserneubildung und den Bewässerungsbedarf entwickelt (Stöckle et al., 2003). Die notwendigen Daten für die Verwendung von CropSyst sind Bodeneigenschaften, Kulturarten und Meteodaten. Als Grundlage für die Anwendung von CropSyst wurden im Frühjahr 2017 im Rahmen einer Masterarbeit die Bodeneigenschaften im Seeland ermittelt (Rüfenacht, 2017). Drei Haupttypen von Böden wurden identifiziert (Abbildung 6 links). Für jeden Bodentyp wurde ein vertikaler Querschnitt mit repräsentativen Bodeneigenschaften (Porosität, hydraulische Leitfähigkeit usw.) erstellt. Anschliessend wurden anhand von Daten zu den landwirtschaftlichen Kulturen vom Bundesamt für Landwirtschaft (Abbildung 6 rechts) und anhand von Meteodaten der Messstation Mühleberg CropSyst-Simulationen für den Zeitraum 2010-2018 durchgeführt.

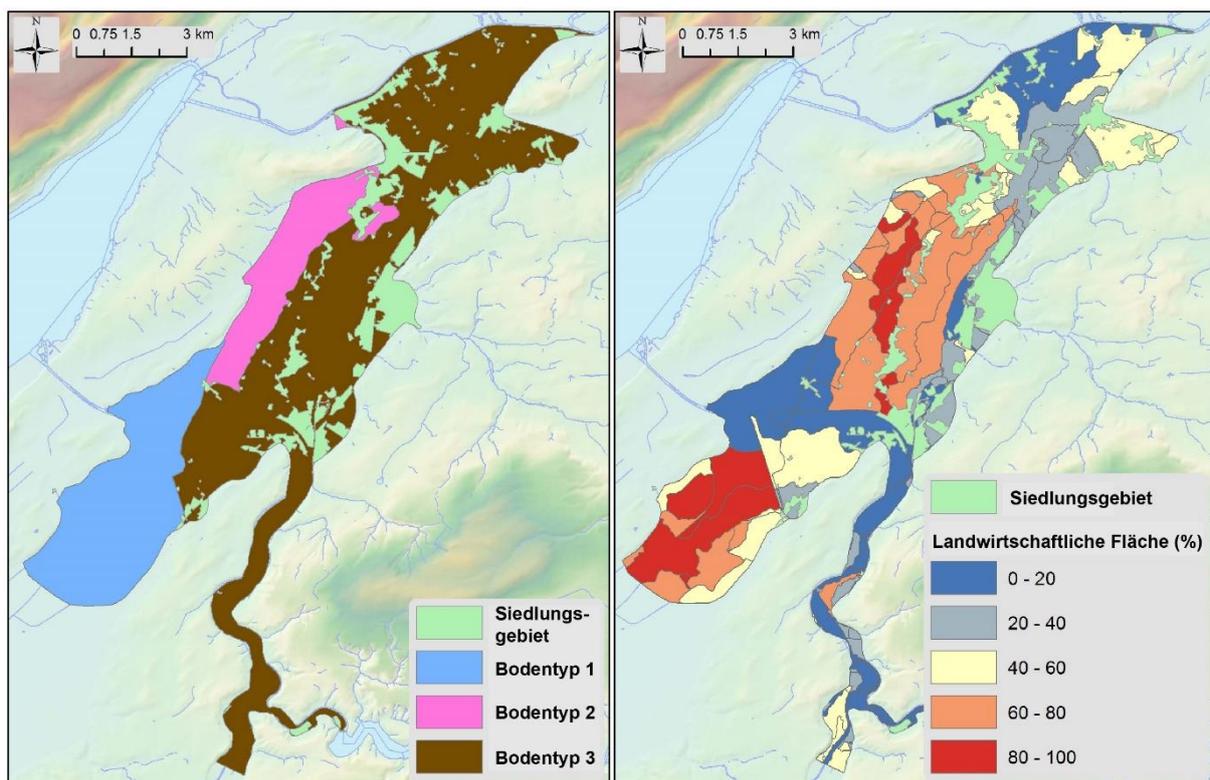


Abbildung 6: Bodentypen im Seeland (links) und Anteil der Landwirtschaft (rechts).

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse von CropSyst zusammen. Diese Ergebnisse werden in einem späteren Kapitel ausführlicher diskutiert.

Tabelle 1 Simulierte mittlere jährliche Grundwasserneubildung und Bewässerungsbedarf

	Boden 1	Boden 2	Boden 3
Grundwasserneubildung (mm/Jahr)	412	401	409
Bewässerung (mm/Jahr)	4	5	4

3.3 Randbedingungen des instationären Modells

Das instationäre Modell umfasst den Zeitraum vom 1. Januar 2010 bis zum 31. Dezember 2017. Für das instationäre Modell müssen die Randbedingungen angepasst werden. Die wesentlichen Anpassungen der Randbedingungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Anpassung der instationären Randbedingungen

Randbedingung für Flüsse
<ul style="list-style-type: none"> • Es wurden tägliche Mittelwerte der Wasserstände in Flüssen festgelegt. Die Anzahl der Messstationen oder Messpunkte, die zur Interpolation der Flusshöhe verwendet wurden, war jedoch im instationären Zustand weniger wichtig als im stationären Zustand. Daher sind einige leichte Unterschiede in den Fluss-Randbedingungen zwischen dem stationären und instationären Modell zu beobachten. • Die Wasserstände der Kanäle im südlichen Teil des Grundwasserleiters wurden als konstant angenommen. • Die Datenlücke bei der Messstation Mühleberg wurde mit einer Sinuskurve geschlossen (siehe Zeitreihe #35 im instationären Modell).
Festpotential-Randbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> • Tagesmittelwerte wurden auch für die Festpotential-Randbedingungen verwendet. • Eine lineare Regression zwischen den Piezometern G106 und G104 wurde verwendet, um die Datenlücke des Beobachtungsbrunnens G104 zu schliessen, der als Randbedingung für die Treiten-Fräschels-Grenze verwendet wurde (siehe Zeitreihe #21 im instationären Modell). • An der Saane-Grenze wurde ein Meter vom Wasserstand der Saane abgezogen, um die Randbedingung zu definieren. • An der Grenze bei Mühleberg wurde davon ausgegangen, dass der Grundwasserspiegel aufgrund des stromaufwärts liegenden Damms nicht schwankt. Daher wurde die gleiche Randbedingung wie beim stationären Modell verwendet. • Nach dem Kraftwerk Mühleberg wurde der Grundwasserspiegel während einer Baumassnahme auf rund 461 m gehalten. Zur Reproduktion dieses Grundwasserspiegels wurde eine temporär fixe Randbedingung verwendet (siehe Zeitreihe #901).

Randbedingung für Pumpbrunnen

- Für die Randbedingung bei Pumpbrunnen wurden monatliche mittlere Förderraten verwendet.
- Während des Gimmiz-Pumpversuchs 2011 (siehe Kapitel 6.1) wurden für die Pumpbrunnen Gimmiz und Römerstrasse Tagesmittelwerte verwendet.
- Zusätzliche Randbedingungen für Pumpbrunnen (siehe Abbildung 7) wurden verwendet, um temporäres Pumpen während Bauarbeiten bei Studen, Aarberg und Lyss darzustellen.

Randbedingungen für randliche Zuflüsse

- Zunächst wurden Monatsmittelwerte als Randbedingung im Modell verwendet. Die Ergebnisse zeigten jedoch zu grosse Abweichungen. Daher wurden die randlichen Zuflüsse Schritt für Schritt durch gleitende Mittelwerte ersetzt. Das beste Ergebnis wurde mit einem gleitenden Mittelwert der letzten 6 Monate erzielt (Abbildung 5).

Direkte Grundwasserneubildung durch Niederschlag und Bewässerung

Die täglichen mittleren Infiltrationsraten des CropSyst-Modells wurden für die drei Bodenzonen verwendet.

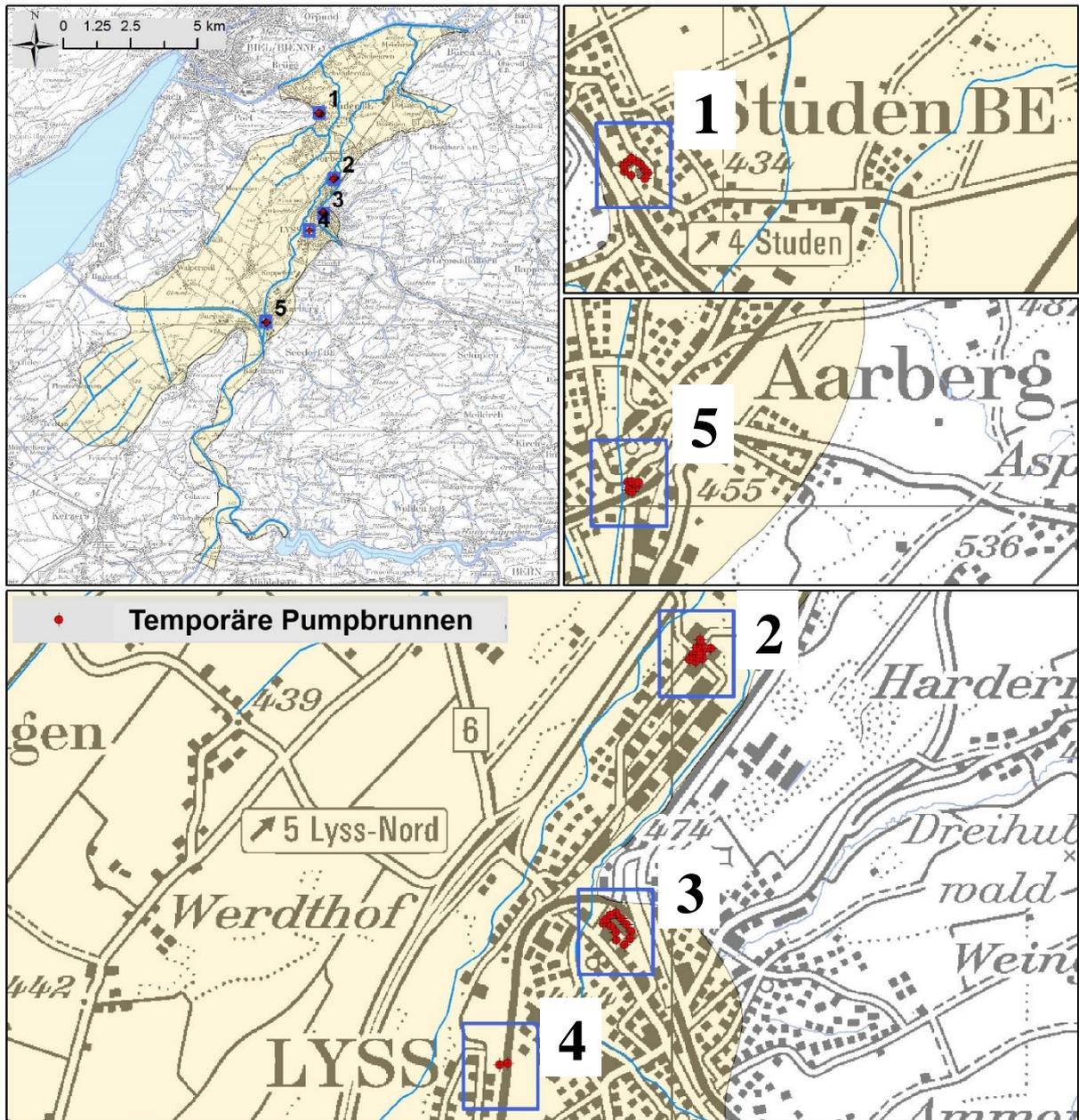


Abbildung 7: Implementierte temporäre Pumpbrunnen

4 Stationäres Modell

4.1 Kalibrierverfahren

Zur Kalibrierung des Modells wurde die in FEPEST verfügbare Pilotpunktmethode verwendet. Abbildung 8 zeigt die Lage der Pilotpunkte sowie die Messung der GW-Spiegel, die zur Kalibrierung des Modells verwendet wurden. Der Schwerpunkt der Kalibrierung lag auf der hydraulischen Leitfähigkeit und der Austauschrate zwischen Fluss und Grundwasserleiter, mit dem Ziel, beobachtete Grundwasserstände und Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasserleiter zu reproduzieren.

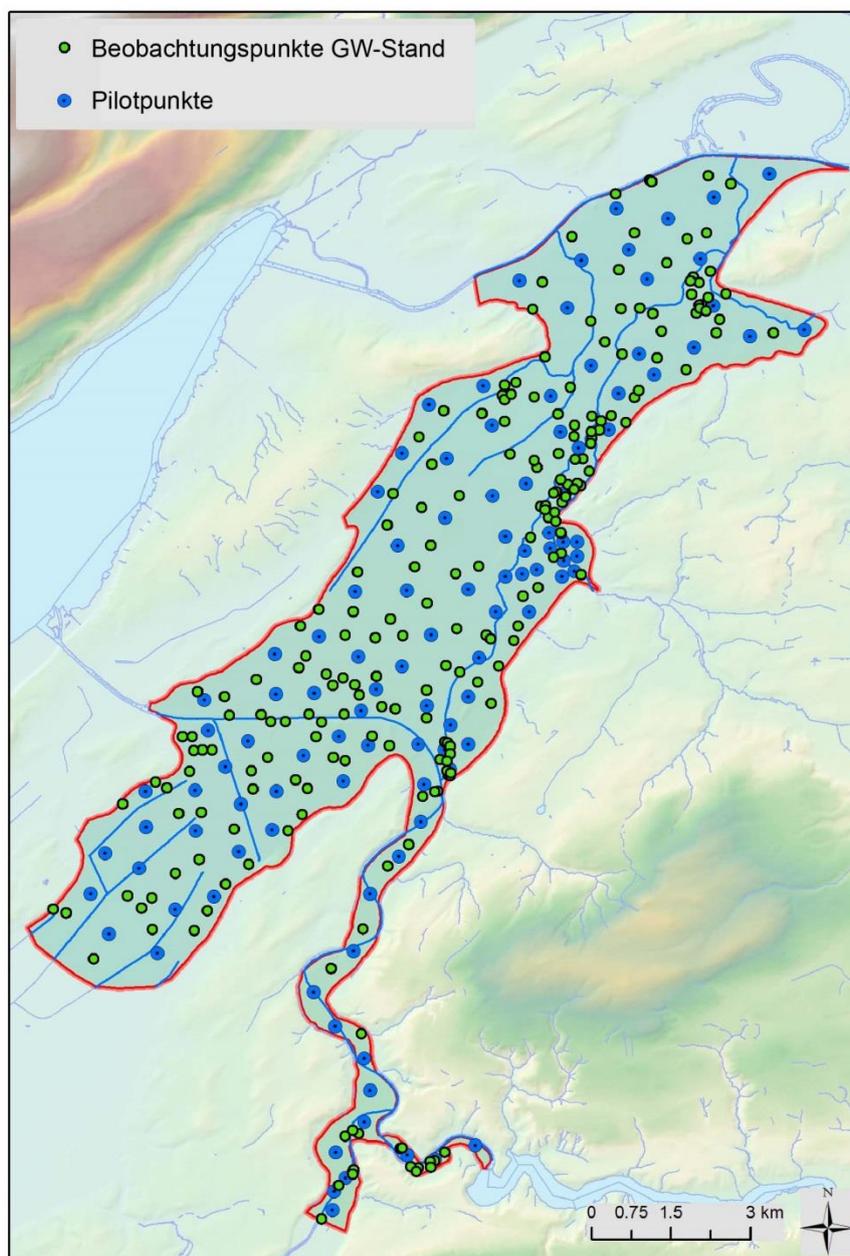


Abbildung 8: Pilotpunkte und gemessene GW-Spiegel zur Kalibrierung des Modells.

4.2 Kalibrierter Wert der hydraulischen Leitfähigkeit

Abbildung 9 zeigt die kalibrierte hydraulische Leitfähigkeit des Modells. Die kalibrierten Werte haben die gleiche Grössenordnung wie die in WWA (2004) dargestellten Werte. Darüber hinaus ermöglichte die mit Pilotpunkt durchgeführte Kalibrierung die Reproduktion der grossräumigen Heterogenität des Grundwasserleiters. Es ist zu erkennen, dass Bereiche mit einer höheren hydraulischen Leitfähigkeit, die wahrscheinlich auf ehemalige Mäander der Aare zurückzuführen sind, in der Mitte des Grundwasserleiters zwischen dem Hagneck-Kanal und dem Nidau-Büren-Kanal auftreten. Umgekehrt werden auch Bereiche mit geringerer hydraulischer Leitfähigkeit (z.B. lakustrine Ablagerungen) am Rande und im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes mit der Pilotpunktkalibrierung gut wiedergegeben.

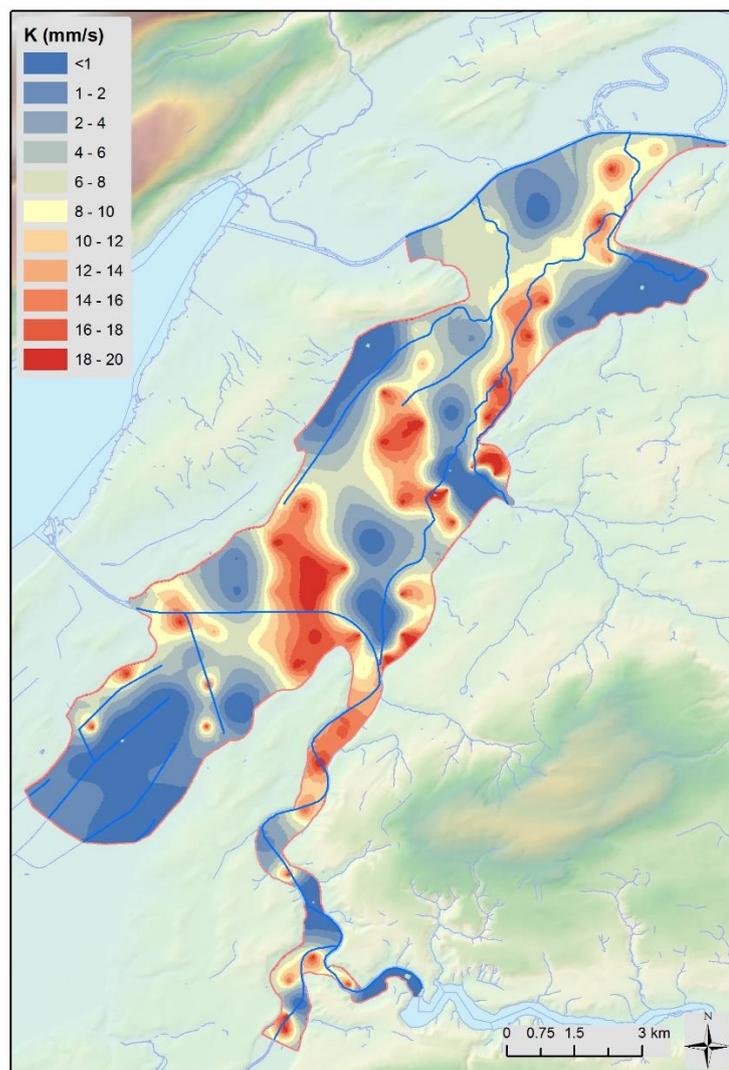


Abbildung 9: Kalibrierte hydraulische Leitfähigkeit

4.3 Simulierter Grundwasserspiegel

Abbildung 10 zeigt die Korrelation zwischen beobachteten vs. simulierten Grundwasserständen. Wie dargestellt, reproduziert das Modell die beobachteten GW-Stände im Allgemeinen gut. Mit Ausnahme von fünf Beobachtungsbrunnen sind die Abweichungen von simulierten und gemessenen Grundwasserständen kleiner als ± 50 cm (ein Histogramm der Abweichungen ist im Anhang 6 : aufgeführt).

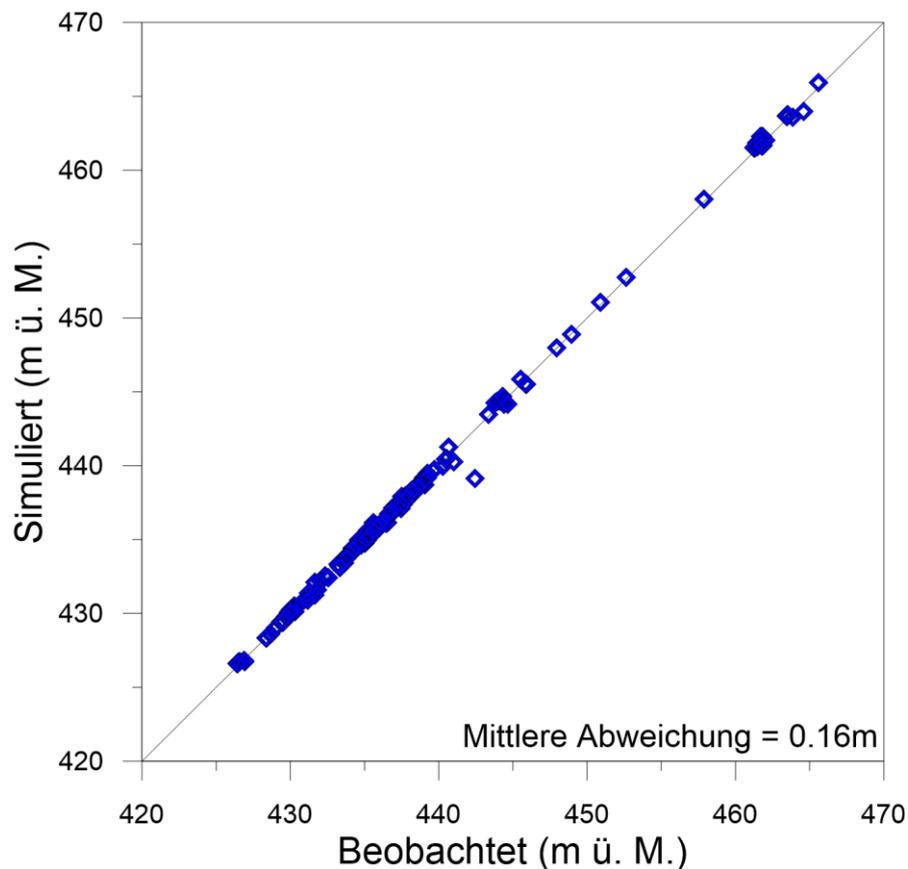


Abbildung 10: Beobachtete vs. simulierte GW-Stände

Die simulierten Grundwasserstände mit einer Abweichung von mehr als ± 50 cm befinden sich in der Nähe anderer, gut reproduzierter Messstellen (Abbildung 11) und weisen keine Abweichung von mehr als 80 cm auf. Dies deutet darauf hin, dass das Modell die lokale Heterogenität des Grundwasserleiters nur ungenau wiedergibt. Eine Ausnahme ist ein Messpunkt in Lyss (Abbildung 11), für den der simulierte Grundwasserstand 3.6 m unter dem Messwert liegt. Während des Kalibrierungsverfahrens wurden an dieser Stelle zusätzliche Pilotpunkte hinzugefügt (siehe Abbildung 8), um eine grössere Heterogenität zu erreichen. Dieser Ansatz hat jedoch nicht

funktioniert. Dies deutet eindeutig auf ein grundsätzlicheres Problem hin, das auf mehrere Ursachen zurückzuführen sein kann. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters kann falsch sein, die Messung des Grundwasserstandes kann falsch sein, der laterale Zufluss kann falsch eingeschätzt sein, oder die Wechselwirkung mit dem Lyssbach falsch wiedergegeben sein. Trotz mehrerer Versuche zur Korrektur der simulierten Grundwasserhöhe, die darin bestanden, die Grundwassermächtigkeit lokal zu variieren, den Randzufluss zu modifizieren oder den Austauschkoefizienten zwischen Fluss und Grundwasserleiter zu ändern, blieb die Abweichung zum gemessenen Wert hoch. Wie vom AWA angedeutet, kann dieser Fehler auch durch einen Fehler bei der GPS-Messung verursacht worden sein.

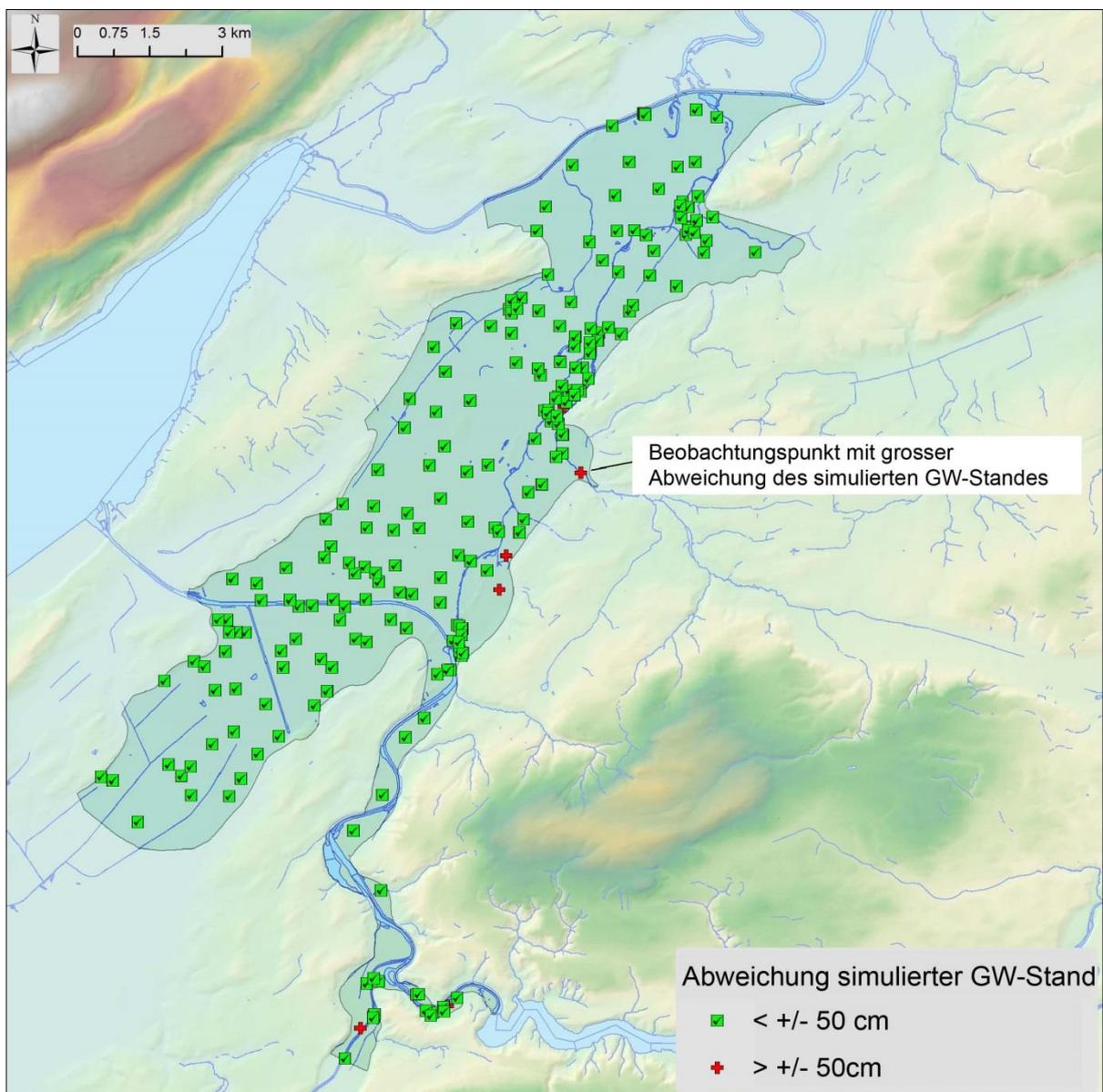


Abbildung 11: Abweichung zwischen beobachteten und simulierten GW Ständen an den Beobachtungspunkten

4.4 Wasserhaushalt

Tabelle 3 zeigt den simulierten Wasserhaushalt des stationären Modells. Diese Werte werden mit den in der WEA (1998) und WWA (2004) berechneten oder geschätzten Werten verglichen. Ein detaillierter Vergleich kann Anhang 2, Anhang 3 sowie Anhang 7 bis Anhang 10 entnommen werden.

Tabelle 3: Vergleich des simulierten Wasserhaushaltes mit früheren Daten

Modellkomponente	Simuliert		WEA (1998) und WWA (2004)	
	Zustrom [l/s]	Wegfluss [l/s]	Zustrom [l/s]	Wegfluss [l/s]
Grundwasserneubildung durch Niederschlag und Bewässerung	691	0	760	
Randlicher Zufluss	375	0	380	
Flussinfiltration:	719	887		
Alte Aare (Aarberg-Lyss)	160	0	190	400
Alte Aare (Lyss-Meienried)	213	21	22-229	0-400
Aare (Aarberg-Mühleberg)	56	103		
Lyssbach	4	0	12-28	0
Hagneck-Kanal	157	28	100-305	34-148
Binnenkanal	1	193	0	156-190
Sägibach	43	0	1-32	0
Unterwasserkanal	0	190	40	50
Südlicher Kanal	27	190	30-70	150-330
Saane	0	15		
Nordrand Nidau-Büren-Kanal	0	700		870
Südrand Treiten-Fräschels	0	43		86
Rand Saane	18	0		
Rand Mühleberg	0.35	0		
Pumpbrunnen	0	218		

Die mit CropSyst berechnete Grundwasserneubildung und der mit Hilfe von Teileinzugwasserbilanzen berechnete Randzufluss liegen sehr nahe an den zuvor geschätzten Werten in WEA (1998) und WWA (2004). Dies bestätigt die Zuverlässigkeit der Ansätze zur Abschätzung dieser Wasserflüsse. Was die Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasserleiter betrifft, so

scheinen die Ergebnisse auch mit den Beobachtungen übereinzustimmen, obwohl die Beobachtungen erhebliche Unsicherheiten aufweisen können. Die Grössenordnung ist ähnlich und die beiden wichtigsten Flussabschnitte, der Hagneck-Kanal und die Alte Aare (von Aarberg bis Meienried), sind gut nachgebildet. Schliesslich haben die Zu- und Wegflüsse an den beiden Hauptgrenzen die gleiche Grössenordnung wie die früher ermittelten Werte, was bedeutet, dass der gesamte Wasserhaushalt gut wiedergegeben wird. Der Wasserhaushalt ist schematisch in den Karten (erstellt von der AWA) im Anhang 11 und im Anhang 1 dargestellt.

4.5 Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasserleiter

Abbildung 12 zeigt die simulierten Fluss-Grundwasser-Wechselwirkungen. Diese simulierten Wechselwirkungen (Infiltration oder Exfiltration) sind ähnlich wie in WEA (1998) mit Ausnahme des Hauptkanals im südlichen Teil des Modellgebietes. Eine kleine Änderung des Wasserstandes im Kanal von nur 10 bis 20 cm führt zu einer Umkehr der Wechselwirkung von Infiltration zu Exfiltration. Diese kleine Abweichung ist im Massstab des Modells nicht reproduzierbar. Allerdings sind Grundwasserspiegel und Wasserhaushalt im südlichen Teil des Grundwasserleiters gut reproduziert, so dass das Modell in diesem Bereich nicht verändert wurde.

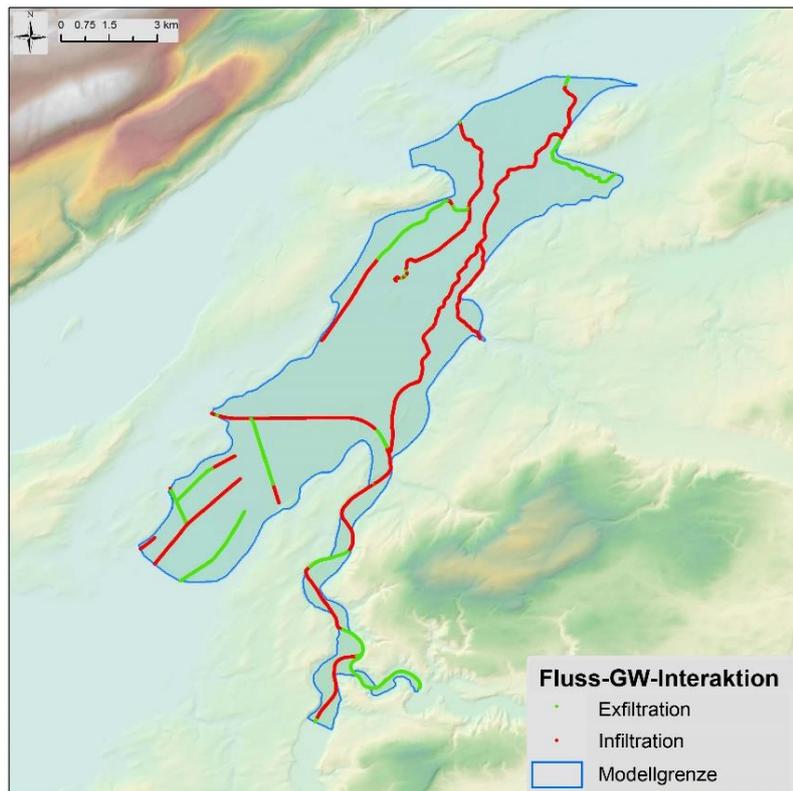


Abbildung 12: Simulierte Fluss-Grundwasserleiter-Wechselwirkungen

4.6 Unsicherheiten

Die Verwendung von Pilotpunkten zur Kalibrierung ermöglicht auch eine Unsicherheitsanalyse des Modells. Die Abbildung 13 zeigt die Reduzierung der Unsicherheit, die durch die Kalibrierung des Modells hervorgerufen wird. Ein Wert von 1 (grün) bedeutet eine vollständige Reduzierung der Unsicherheiten und 0 (rot) bedeutet keine Reduzierung der Unsicherheiten. Mit anderen Worten, rote Bereiche zeigen Bereiche mit mehr Unsicherheiten und grüne mit weniger Unsicherheiten. Abbildung 13 zeigt einen grossen Bereich in der Mitte des Grundwasserleiters, in dem Unsicherheiten grösser sind. Die sehr geringen hydraulischen Gradienten in diesem Bereich erschweren die Kalibrierung der hydraulischen Leitfähigkeit in diesem Bereich. Ein Grundwasserspiegel mit einem geringen hydraulischen Gradienten kann durch verschiedene hydraulische Leitfähigkeiten reproduziert werden, solange diese über einem Schwellwert liegen. Folglich weist die kalibrierte hydraulische Leitfähigkeit eine erhebliche Unsicherheit auf.

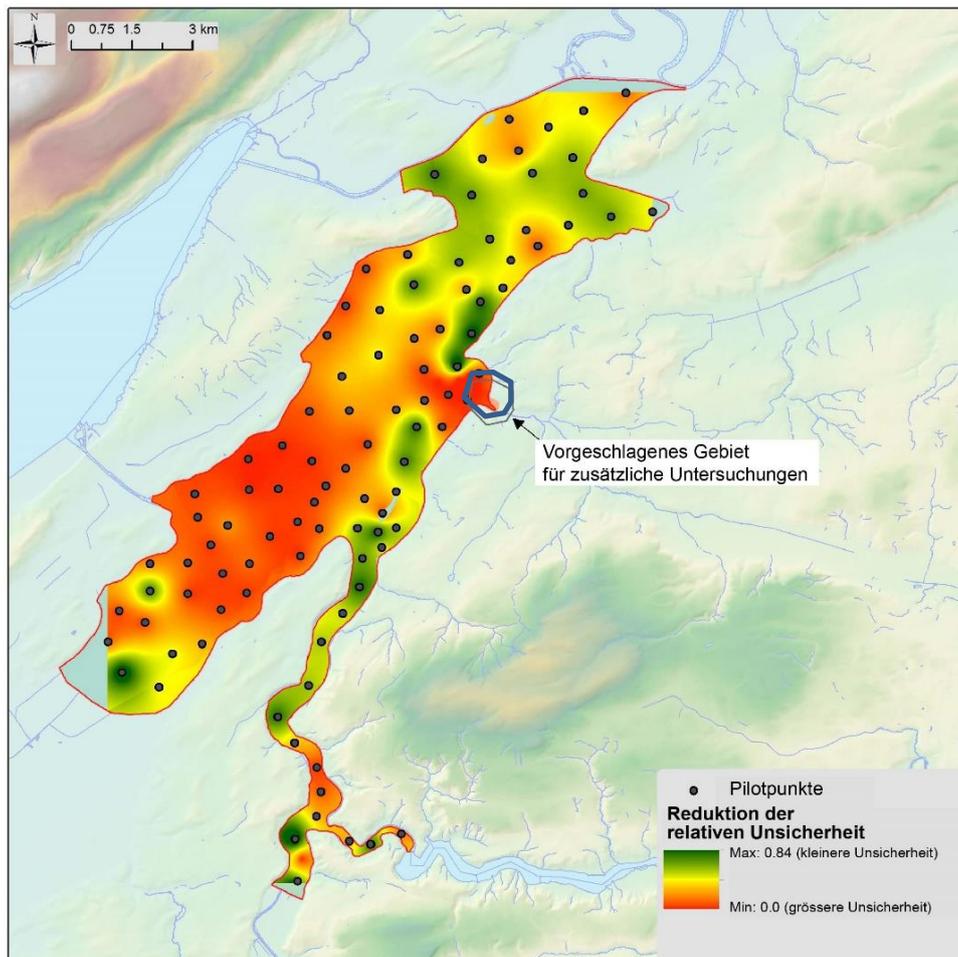


Abbildung 13: Reduzierung der relativen Unsicherheit, berechnet durch PEST

Diese Unsicherheitsanalyse kann auch verwendet werden, um Bereiche zu definieren, in denen Messungen (z.B. Erstellung neuer Beobachtungspunkte) im Hinblick auf eine Reduzierung der Unsicherheit am wirkungsvollsten wäre. In unserem Fall wäre der nach der Unsicherheitsanalyse und unserem Expertenwissen wichtigste Bereich die in Abbildung 13 blau umfasste Zone. In diesem Bereich war die Kalibrierung problematisch und die Analyse zeigt, dass in diesem Bereich noch Unsicherheiten bestehen. Die Kalibrierung und die Unsicherheitsanalyse wurden freundlicherweise von Herrn Doherty, dem Entwickler der PEST-Software, unterstützt und überprüft.

5 Instationäres Modell

5.1 Kalibrierverfahren und Anfangsbedingungen

Die Randbedingungen wurden gemäss Kapitel 3 festgelegt. Als Anfangsbedingung wurden die Grundwasserstände aus dem stationären Modell verwendet. Das instationäre Modell umfasst den Zeitraum vom 1. Januar 2010 bis zum 31. Dezember 2017. Da das stationäre Modell mit den Simultanmessungen vom 4. April 2017 kalibriert wurde, repräsentieren die Anfangsbedingungen nicht den Zustand am 1. Januar 2010. Entsprechend werden die Grundwasserstände in den ersten simulierten Monaten möglicherweise nicht genau reproduziert. Das erste Simulationsjahr (d.h. 2010) dient dazu, genauere Ausgangsbedingungen zu erhalten, und wurde bei der Kalibrierung nicht berücksichtigt.

Bei der instationären Kalibrierung wurde die Porosität leicht angepasst, um die Dynamik des Grundwasserspiegels zu reproduzieren. Leider war die Rechenzeit für das instationäre Modell zu lang, um die Pilotpunktmethod für die Kalibrierung zu verwenden. Daher wurde die Kalibrierung manuell unter Berücksichtigung von zwei Zonen durchgeführt, die Ebene des Seelandes und das Tal zwischen Aarberg und Mühleberg.

5.2 Wiedergabe der Grundwasserdynamik durch das instationäre Modell

Abbildung 14 zeigt die Beobachtungspunkte, die zur Validierung des instationären Modells verwendet wurden. Die beobachteten und simulierten instationären Grundwasserstände sind in Anhang 13 dargestellt. Mit wenigen Ausnahmen (siehe unten) werden die Ganglinien an allen Messstellen gut reproduziert, trotz der sehr unterschiedlichen Dynamik. Eine statistische Auswertung bestätigt die zufriedenstellende Wiedergabe der Grundwasserdynamik (Tabelle 4). Als Mass wurden die mittlere Abweichung, die positiv oder negativ sein kann, und der mittlere quadratische Fehler (RMSE), der stets positiv ist, verwendet. Die mittlere Abweichung und der RMSE betragen weniger als 50 cm (ausser PW Saanedamm).

- Im südlichen Teil des Grundwasserleiters, der aus feinkörnigen Ablagerungen mit einer geringeren Durchlässigkeit besteht, werden die Grundwasserstände in den Piezometern G106 und G107 sehr gut wiedergegeben.
- Eine gute Übereinstimmung kann auch für die Messstellen oder Pumpbrunnen Römerstrasse, Gimmiz 1 bis Gimmiz 5, G118 und G116 beobachtet werden. Dies verdeutlicht, dass die Wechselwirkung zwischen dem Grundwasserleiter und dem Hagneck-Kanal, die ein Schlüsselprozess für die Grundwasserdynamik ist, korrekt simuliert wird.
- Auch in Messstellen im nördlichen Teil des Grundwasserleiters (G282, G122, G286, G124, G125, PW Kappelen, G121, P4, P7, P9 P109 Worben, PW SWG, G126, P26, RB1, P33, G127, P41, P57, G129), die hauptsächlich von der Alten Aare und in geringem Ausmass vom Hagneck-Kanal beeinflusst werden, stimmt die simulierte und beobachtete Dynamik gut überein.
- Schliesslich werden auch die Messstellen zwischen Aarberg und Mühleberg (und dem kleinen Teil des Saanetal) korrekt wiedergegeben.

Bei den Messstellen G124 und G121 werden grössere Abweichungen beobachtet. Für die Messstellen G124 (Nähe von Lyss) war bereits die Kalibrierung des stationären Modells schwierig. Obwohl die Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Grundwasserständen nicht sehr gross ist, reproduziert das Modell die allgemeine Dynamik nicht. Wie bereits in Kapitel 4.3 erwähnt wurde, kann das konzeptionelle Modell in diesem Bereich falsch sein. Die Zone mit ungenauer Grundwasserdynamik ist jedoch wahrscheinlich klein, da die Dynamik der Messstelle G125, die nahe bei G124 liegt, genau reproduziert wird. Die simulierte Dynamik der Messstelle G121 entlang des Sägebachs ist ausgeglichener als die beobachtete Dynamik. Die niedrigen Grundwasserstände werden genau reproduziert, aber hohe Grundwasserstände werden systematisch unterschätzt. Der Austauschkoefizient des Sägebaches wurde modifiziert, um das Modell empfindlicher auf die Wasserstände des Flusses reagieren zu lassen, was ohne Erfolg blieb. Die Ursachen für diesen Fehler können vielfältig sein, wie z.B. ein falscher Flusswasserstand oder eine lokale Überschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit. Dennoch wird die Grundwasserdynamik in der Messstelle P109 Worben

und im Pumpwerk Worben, die sich ebenfalls entlang des Sägebachs befinden, sowie in PW Kappelen in der Mitte des Grundwasserleiters, gut reproduziert. Dies deutet darauf hin, dass sich die Abweichung auf die Nähe der Messstelle G121 beschränkt.

Obwohl Messstellen zwischen Aarberg und dem Zusammenfluss von Aare und Saane (CHYN1 bis CHYN5) installiert wurden, ist die Dauer der Beobachtungen zu kurz, um das Modell mit Sicherheit zu validieren. Daher sollten die Datenlogger in den Messstellen CHYN1 bis CHYN5 noch zwei bis drei Jahre weiterbetrieben werden, um längere Beobachtungsperioden zu erhalten. Wenn sich herausstellen sollte, dass das Modell überschätzte Grundwasseramplituden aufweist, könnte das Modell durch Anpassung der Austauschkoefizienten der Aare einfach angepasst werden. Die aktualisierten Daten von den Messstellen CHYN1 bis CHYN5 sind im Anhang 14 dargestellt (Zeitreihen bis Anfang 2019).

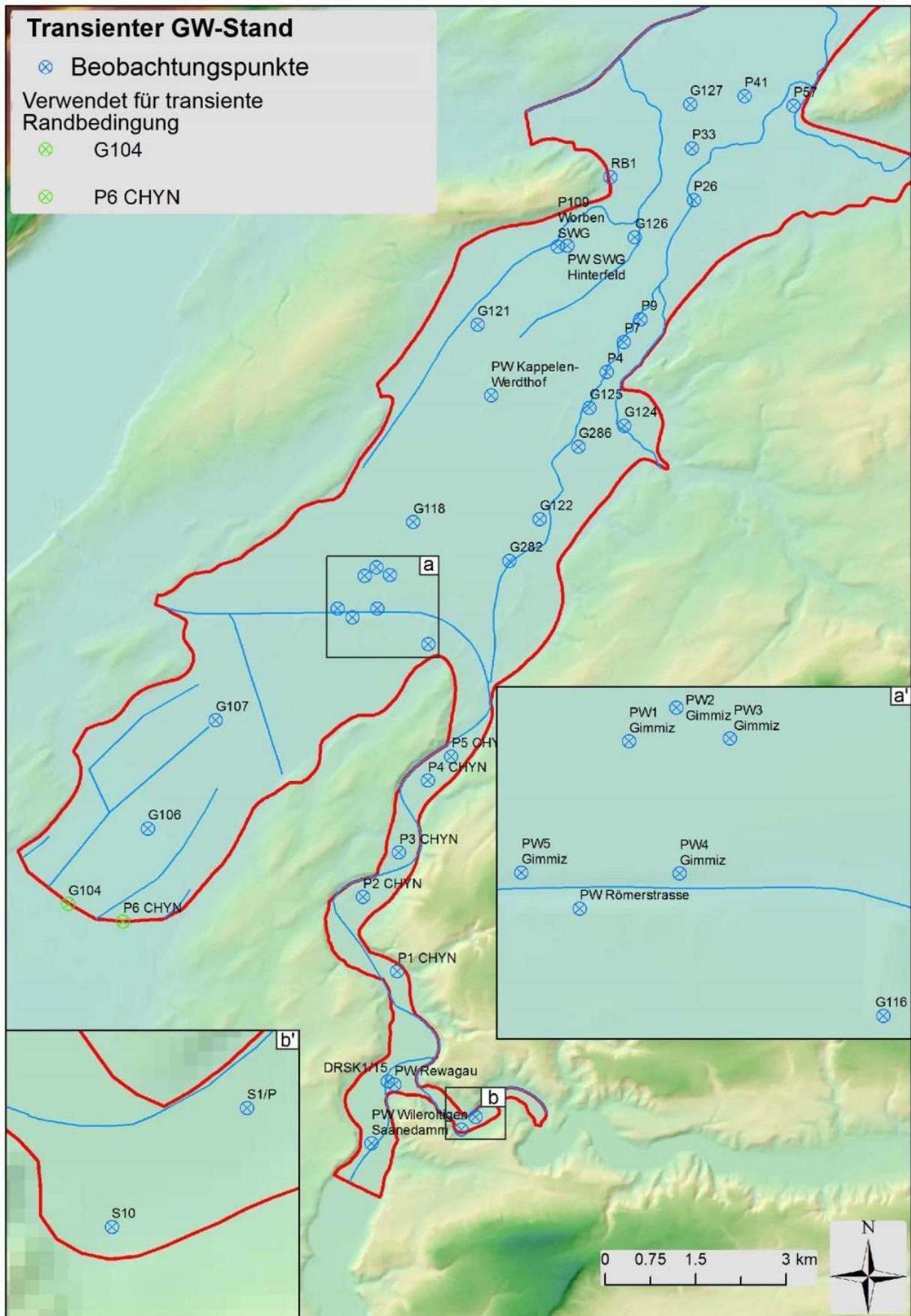


Abbildung 14: Messstellen mit Zeitreihen der Grundwasserstände

Tabelle 4 Statistik der simulierten Grundwasserdynamik

Messstelle	Mittlerer Fehler	RMSE	Standardabweichung
G106	-0.06	0.09	0.16
G107	-0.22	0.14	0.14
Römerstrasse	-0.24	0.21	0.32
GIMMIZ1	-0.11	0.12	0.29
GIMMIZ2	-0.02	0.11	0.29
GIMMIZ3	-0.18	0.13	0.28
GIMMIZ4	-0.37	0.19	0.34
GIMMIZ5	-0.37	0.19	0.33
G116	-0.24	0.24	0.35
G118	-0.08	0.16	0.27
G282	0.16	0.20	0.32
G122	-0.11	0.18	0.31
G286	0.12	0.04	0.12
G124	0.15	0.20	0.33
G125	0.15	0.13	0.19
P4	-0.04	0.07	0.13
P7	-0.02	0.05	0.09
P9	0.10	0.08	0.10
PW Kappelen	0.00	0.05	0.23
G121	0.39	0.26	0.25
P109 Worben	0.16	0.09	0.08
PW SWG	-0.03	0.08	0.07
G126	0.26	0.15	0.09
P26	0.17	0.21	0.12
RB1	0.35	0.11	0.13
P33	0.29	0.20	0.20
G127	-0.16	0.18	0.29
P41	0.31	0.19	0.12
P57	-0.08	0.16	0.26
G129	-0.06	0.13	0.23
CHYN5	0.05	0.03	0.21
CHYN4	0.10	0.03	0.21
CHYN3	-0.21	0.04	0.13
CHYN2	-0.34	0.03	0.07
CHYN1	0.10	0.42	0.41
PW REWAGAU	0.35	0.12	0.27
DSK1/15	0.15	0.08	0.26
PW Saanedamm	-0.77	0.38	0.32
S1	-0.60	0.35	0.10
S10	-0.01	0.05	0.18

5.3 Darstellung des minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstandes

Um den minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstand kartographisch darzustellen, wurde das DHI-WASY-Plugin verwendet. Dieses Plugin ermöglicht die Ausgabe von minimalen, mittleren und maximalen simulierten Grundwasserständen an jedem Berechnungsknoten des instationären Modells. Um falsche Werte zu vermeiden, die auf ungenaue Anfangsbedingungen zurückzuführen sind, wurde das erste Jahr des instationären Modells bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Daher sind die minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstände für den Zeitraum 2011-2017 repräsentativ. Schliesslich wurden die in der Abbildung 7 dargestellten temporären Pumpbrunnen entfernt, um durch Bauvorhaben bedingte temporär niedrige Grundwasserstände in der Karte zu vermeiden. Die mittleren Grundwasserstände, der Flurabstand und der Schwankungsbereich (H_{\max} - H_{\min}) sind in Anhang 15, Anhang 16 und Anhang 17 dargestellt.

5.4 Zusammenfassung der Schwachstellen des Modells und der Unsicherheiten

Abbildung 15 fasst die Schwachstellen des Modells in zwei Kategorien zusammen: Schwachstellen aufgrund der Unsicherheit der Randbedingungen (Bereich 1 in grün) und Schwachstellen aufgrund der Unsicherheit des konzeptionellen Modells (Bereich 2 in blau). Die Unsicherheiten im Gebiet bei Lyss sind wahrscheinlich auf ein ungenügendes Verständnis der lokalen Geologie zurückzuführen und wurden bereits in Abschnitt 4.3 diskutiert. Im Tal zwischen Aarberg und Oltigen kann das instationäre Modell noch nicht validiert werden, da längerfristige Zeitreihen der Grundwasserstände fehlen. Diese Unsicherheit können sich in den nächsten Jahren verringern, wenn mehr Daten verfügbar sein werden. Unsicherheiten bestehen auch bei Dotzigen, einem Gebiet, in dem der simulierte Grundwasserspiegel teils höher ist als die Bodenoberfläche, obwohl das stationäre Modell den Grundwasserstand gut reproduziert. Möglicherweise befinden sich in diesem Gebiet Drainagen, was aber bislang nicht bestätigt werden konnte. Daher sollten die Modellergebnisse in diesem Bereich mit Vorsicht genutzt werden. Die ersten hundert Meter nach der Saane-Grenze weisen aufgrund der gewählten Randbedingungen Unsicherheiten auf. Wie in der Abbildung 11 und in der simulierten Ganglinie des PW Saanedamm ersichtlich ist, ist der simulierte Grundwasserstand ausserhalb des Messbereiches. Daher empfehlen wir eine zurückhaltende Verwendung der

Modellergebnisse in diesem Bereich. Schliesslich können in Gebieten in der Nähe der Modellgrenzen und Randbedingungen die Modellergebnisse aufgrund der Vereinfachung der Prozesse auch mit Unsicherheiten behaftet sein. Wir empfehlen auch hier eine vorsichtige Verwendung der Modellergebnisse.

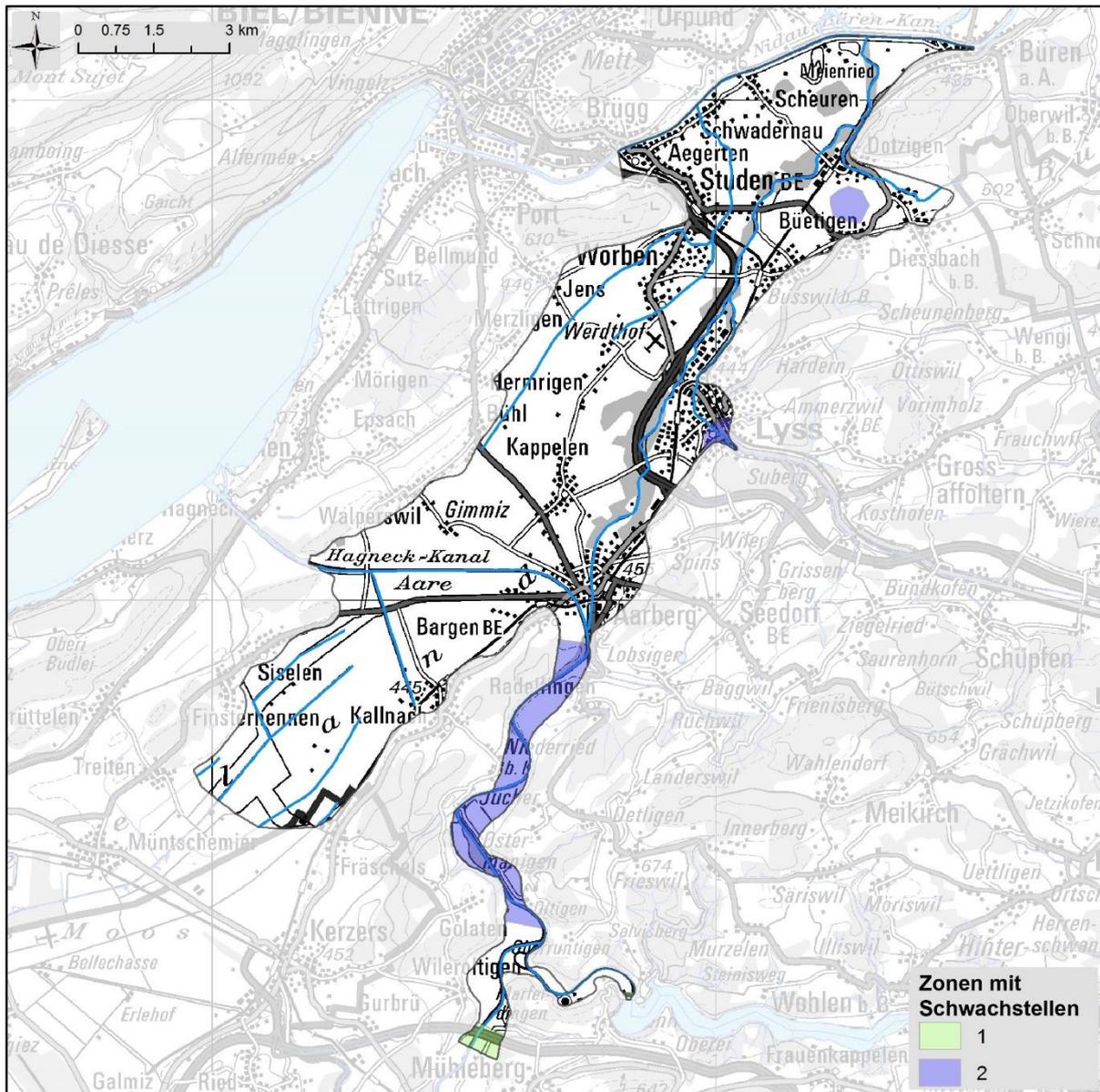


Abbildung 15: Schwachstellen des Modells

6 Modellanwendungen

Zusätzlich zum Vergleich von simulierten und beobachteten Grundwasserständen kann die Güte des Modells auch überprüft werden, indem Feldversuche (z.B. Pumpversuche) oder Markierversuche simuliert und mit Beobachtungen verglichen werden. In unserem Fall wurden zwei Beispiele ausgewählt, um das Modell zu testen: 1) ein Pumpversuch im Pumpwerk Gimmiz und 2) die Havarie mit einer versehentlichen Infiltration einer Zuckerlösung durch die Zuckerfabrik Aarberg.

6.1 Pumpversuch im Pumpwerk Gimmiz

Im Januar und Februar 2011 wurde ein Pumpversuch in den Förderbrunnen bei Gimmiz durchgeführt (KELLERHALS+HAEFELI (2011)). Die Tabelle 5 fasst die verschiedenen Phasen des Pumpversuchs zusammen. Die Menge des gepumpten Wassers und der Standort der Pumpbrunnen sind in Abbildung 14 dargestellt.

Tabelle 5: Pumpraten (l/min) und Phasen des Pumpversuchs

Phase	Datum	PW 1	PW 2	PW 3	PW 4	PW 5	PW Römer.	Total
1	11.01.2011 - 14.01.2011	8700	5000	7000	5600	8000		34300
2	14.01.2011 - 05.02.2011	8700	5000	7000	5600	8000	6000	40300
3	05.02.2011 - 10.02.2011	8700	5000	7000	5600	8000		34300
4	10.02.2011 - 23.02.2011	8700	5000	7000				21700

Mit der Modellanwendung soll abgeklärt werden, ob die beobachteten Grundwasserhöhen in den Pumpbrunnen mit dem Modell reproduziert werden können (Abbildung 16). Da der Pumpversuch während der instationären Kalibrierperiode stattfand, wurden die spezifischen Förderraten der einzelnen Brunnen bereits im instationären Modell berücksichtigt. Das Modell reproduziert den Pumpversuch insgesamt gut. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Modell nicht speziell kalibriert wurde, um diesen Pumpversuch zu reproduzieren, was bei einer lokalen Anwendung jedoch der Fall wäre. Das Ausmass der Absenkung, sowie die Geschwindigkeit der Absenkung stimmen gut mit den Beobachtungen überein. Der Unterschied zwischen beobachtetem und simuliertem Grundwasserstand beträgt ca. 20-30 cm, wobei ein Teil der Differenz allenfalls auch aufgrund der leicht unterschiedlichen Abstichhöhen während dem Pumpversuch zugrunde liegen..

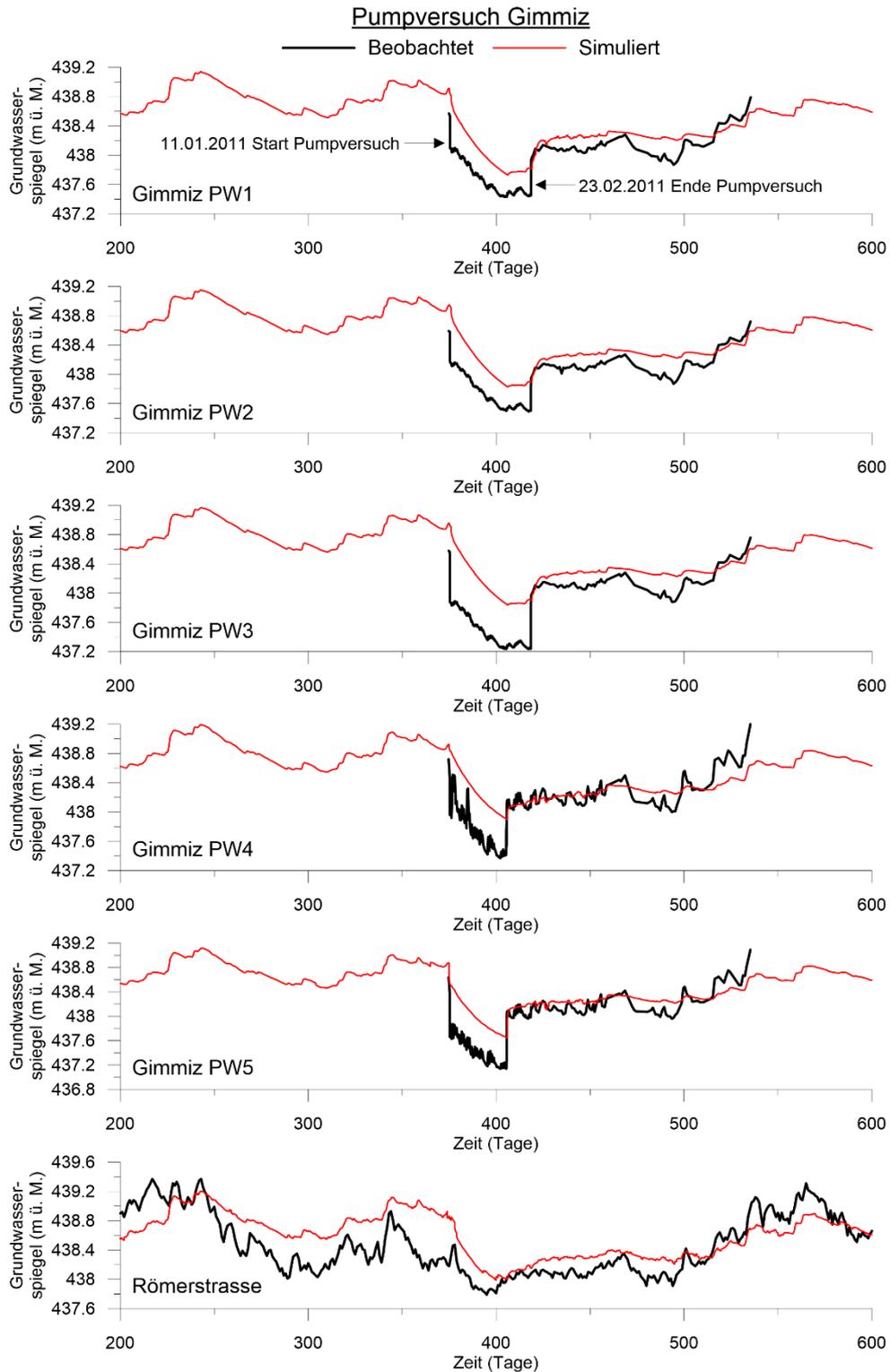


Abbildung 16: Pumpversuch Gimmiz Ganglinien

Abbildung 17 zeigt die interpolierte beobachtete und die simulierte Absenkung in der Nähe der Pumpbrunnen. Der beobachtete und interpolierte Absenkungseffekt sieht um die Bohrungen herum kreisförmiger aus als der simulierte Absenkungseffekt, aber das Modell simuliert auch die Verringerung des Absenkungseffekts auf der gegenüberliegenden Seite des Hagneck-Kanal. Das

bedeutet, dass die simulierten Wechselwirkungen zwischen dem Hagneck-Kanal und dem Grundwasserleiter realistisch sind. Das Ausmass der Absenkung ist jedoch im Modell grösser und erreicht 0.9 m statt 0.6 m bei Walperswil. Dies kann auf eine falsche Darstellung der Heterogenität des Grundwasserleiters oder auf die Unterschätzung des Randzuflusses bei Walperswil zurückzuführen sein. Es ist nicht verwunderlich, dass das Modell den Pumpversuch nicht perfekt reproduziert, da es nicht für diesen Zweck kalibriert wurde. Das allgemeine Verhalten des Grundwasserleiters wird jedoch durch das Modell gut wiedergegeben.

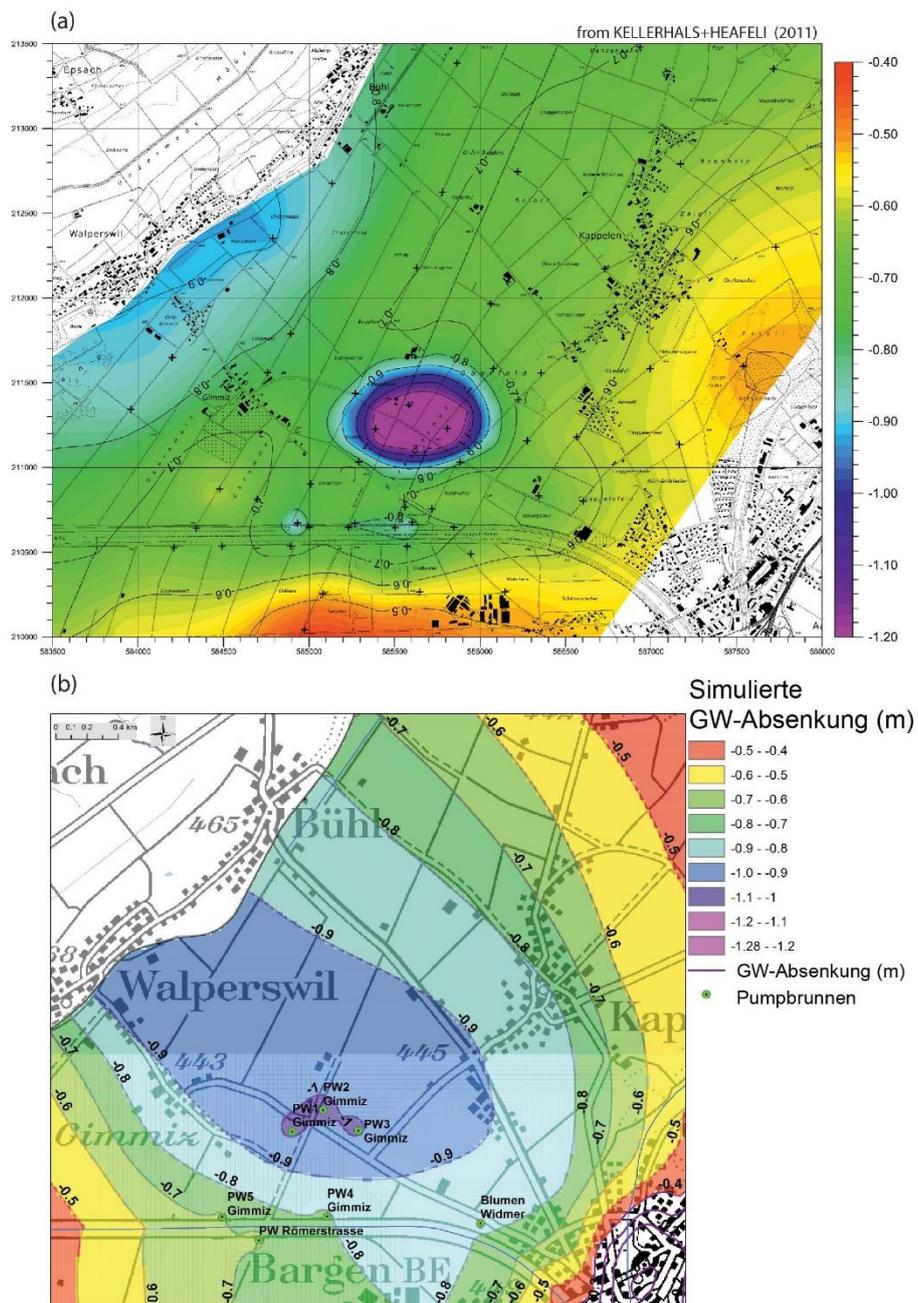


Abbildung 17: Beobachtete vs. simulierte Absenkung

6.2 Verunreinigung durch die Zuckerfabrik

In der Nacht vom 30. auf den 31. August 2014 hat die Zuckerfabrik Aarberg unbewusst rund 300 m³ Zuckerlösung (Melasse) mit einem Zuckergehalt von 67% freigesetzt. Der Hauptteil der ausgelaufenen Melasse wurde geborgen, aber eine unbekannte Menge ist in den Grundwasserleiter infiltriert (Details in KELLERHALS+HAEFELI (2018)). Dieser Unfall kann nachgestellt werden, um die Zuverlässigkeit des Modells abzuklären. Um dies zu erreichen, wurde das stationäre Modell mit zwei verschiedenen Ansätzen angewendet; der erste, indem nur die advektiven Prozesse für den Transport betrachtet wurden und der zweite, indem dispersive und advektive Prozesse in den Transport integriert wurden.

6.2.1 Advektiver Transport der Verunreinigung

Im ersten Fall (nur advektive Prozesse) wurde der erwartete Transport mit einem sogenannten Partikelverfolgungsverfahren (particle tracking) vorausgesagt und mit den Messwerten aus KELLERHALS+HAEFELI (2018) verglichen. Abbildung 18a zeigt die erwartete Ausbreitung der Verunreinigungen aufgrund der gemessenen Grundwasserstände (KELLERHALS+HAEFELI, 2018) und Abbildung 18b die simulierte Ausbreitung. Das erwartete und simulierte Verhalten der Verunreinigung ist ähnlich und folgt dem gleichen Muster: Nach der Infiltration bewegt sich die Verunreinigung nach Osten senkrecht zur Alten Aare und dreht dann nach Norden ab. Die Verunreinigung unterquert dann die Alte Aare und fließt in Richtung Kappelen. Da das Modell die Topographie des Grundwasserspiegels gut reproduziert, wird auch der advektive Transport einer Substanz gut wiedergegeben. Obwohl beim Partikelverfolgungsverfahren der Abbau und die Sorption nicht berücksichtigt werden, bietet das Partikelverfolgungsverfahren einen guten Einblick in das allgemeine Verhalten und die Entwicklung der Verunreinigung.

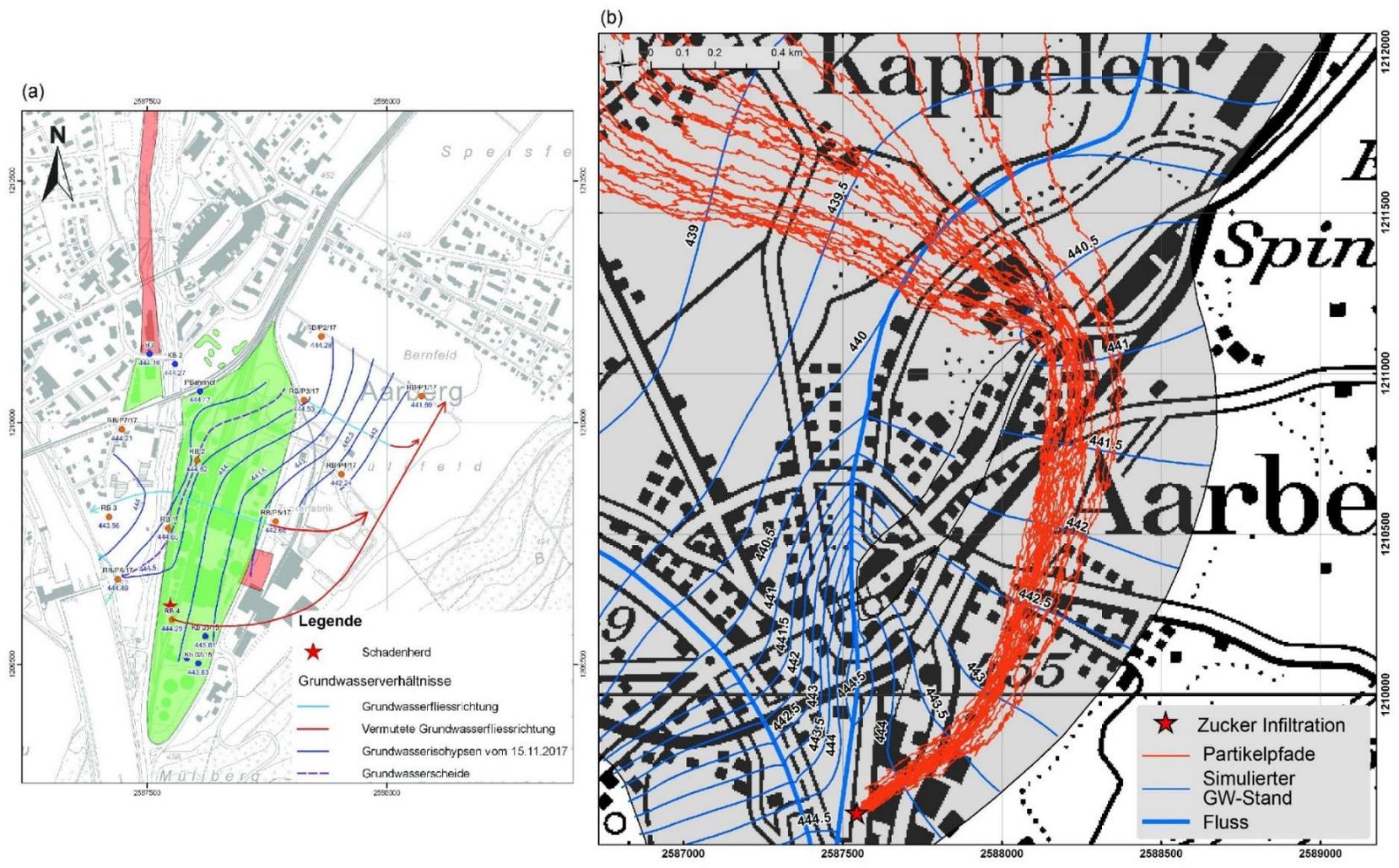


Abbildung 18: a) Erwartete Ausbreitungsrichtung aufgrund der piezometrischen Karte (KELLERHALS+HAEFELI, 2018) und b) simulierte Ausbreitung mittels Partikelverfolgungsverfahren.

6.2.2 Transportmodell

Um einen detaillierteren Einblick zu erhalten, müssen neben den advektiven Prozessen auch Dispersions- und Sorptionsprozesse berücksichtigt werden.

Die simulierten Konzentrationen sind im Anhang 18 für verschiedene Zeitpunkte dargestellt. Dabei wurde eine Längsdispersivität von 50 m und eine Quersdispersivität von 5 m nach Gelhar et al. (1992) verwendet. Der Retardationsfaktor betrug 4 (-) und es wurde angenommen, dass 1600 kg Melasse innerhalb eines Tages in den Grundwasserleiter gelangt.

Dieses Beispiel war nicht genau kalibriert und verschiedene Prozesse, wie der biologische Abbau, wurden nicht berücksichtigt. Das Hauptziel dieser Anwendung ist es, die Anwendbarkeit des Modells zu demonstrieren. Anhang 18 gibt jedoch einen groben Überblick über das Schadstoffverhalten und kann mit dem advektiven Verhalten verglichen werden. Es ist zu beachten, dass die dunkelblauen Werte im Anhang aufgrund der numerischen Dispersion eine sehr niedrige Konzentration darstellen und als Konzentration von 0 mg/l betrachtet werden können. Nach acht Jahren erreicht der vordere Teil der Verunreinigung die Alte Aare und es ist zu erkennen, dass die Dispersivität zu einer seitlichen Verunreinigung führt, die die Grenzen des Modells erreicht. Durch die Integration von zusätzlichen Daten und durch zusätzliche Kalibrierung könnte das Modell verwendet werden, um die Kontaminationsdynamik genauer zu reproduzieren und Vorhersagen zu machen.

7 Schlussfolgerung und Möglichkeiten zu einer Weiterentwicklung des Modells

Dieser Bericht dokumentiert die Entwicklung eines stationären und instationären Modells des Seeland Grundwasserleiters. Das Hauptziel war dabei, Karten des minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstandes zu erstellen. Das Modell wurde erfolgreich im stationären Zustand mit einem mittleren Fehler von 0.16 m zwischen simuliertem und beobachtetem Grundwasserstand kalibriert. Anschliessend wurde das Modell unter instationären Bedingungen kalibriert, um die tägliche Grundwasserdynamik des Zeitraums 2010 - 2017 zu reproduzieren. Auch hier war das Modellverhalten sehr zufriedenstellend. Die unterschiedliche Grundwasserdynamik, wie z.B. in der Nähe des Hagneck-Kanals oder im südlichen Teil des Grundwasserleiters, wurden gut reproduziert. Um die Zuverlässigkeit des Modells zu prüfen, wurde ein Pumpversuch und eine Kontamination des Grundwasserleiters simuliert. Auch hier konnte das Modell die beobachtete Dynamik reproduzieren. Alle diese Tests gewährleisteten eine hohe Zuverlässigkeit der Modellergebnisse und erlauben es, zuverlässige Karten des minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstandes zu erstellen, was das Hauptziel der Studie war. Das Modell könnte jedoch verbessert werden, wenn zusätzliche Beobachtungsdaten, vor allem zwischen Aarberg und Mühleberg, verfügbar wären. In diesem Bereich umfassen die Daten der Grundwasserbeobachtung keinen ausreichend langen Zeitraum, um das Langzeitmodellverhalten zu validieren. Schliesslich wäre eine Untersuchung der Grundwasserdynamik im Bereich von Dotzigen und insbesondere der möglichen Rolle von Drainagen nützlich, um das Modell in dieser Zone zu verbessern.

8 Referenzen

- AWA (Tschumper, R.): Dokumentation Stauerkarte, 2016.
- AWA (Tschumper, R.): Nachführung der Grundwasserkarte im Gebiet Seeland, Dokumentation Simultanmessung, 2017.
- Baillieux, A., Campisi, D., Jammet, N., Bucher, S., and Hunkeler, D.: Regional water quality patterns in an alluvial aquifer: Direct and indirect influences of rivers, *J. Contam. Hydrol.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2014.09.002>, 2014.
- Cochand, F., Brunner, P., and Hunkeler, D.: Groundwater modelling task of the Emmental aquifer. Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), Université de Neuchâtel, 2016.
- Gelhar, L. W., Welty, C., and Rehfeldt, K. R.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, 28, 1955-1974, doi:10.1029/92WR00607, 1992.
- Geo7: Qualitätsanalyse DTM Gerinneschläuche, 2011.
- Hoffmayer, P.: Hydrogéologie et hydrochimie dans l'aquifère du Seeland (Berne, Suisse). Postgraduate thesis in Hydrogeology. Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), Université de Neuchâtel, 1995.
- Jammet, N.: Caractérisation et suivi de la relation entre le canal d'Hagneck et les captages de Gimmiz (aquifère Nord du Seeland) sous différentes conditions de pompages. Masterthesis CHYN, Université de Neuchâtel, 2011.
- Jordan, P.: Modélisation de la partie nord de l'aquifère du Seeland (BE) – Méthode de détermination des aires d'alimentation Zu milieu poreux. Postgraduate thesis in Hydrogeology. Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), Université de Neuchâtel, 2000.
- KELLERHALS+HAEFELI: Grundwasserfassungen Gimmiz Pumpversuch "Januar / Februar 2011", 22, 2011.
- KELLERHALS+HAEFELI: Versickerung von Zuckerkonzentrat Grundwasserbeeinflussung: Stand Winter 2017/2018, 8, 2018.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C.: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling, *Journal of Hydrology*, 303, 290-306, 2005.
- PEST: <http://www.pesthomepage.org/>, 2015.

- Rüfenacht, F.: Soil Hydraulic Properties and Groundwater, Recharge in the Seeland, Master Thesis in Environmental Engineering - ETH Zürich, 2017.
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., and Nelson, R.: CropSyst, a cropping systems simulation model, European Journal of Agronomy, 18, 289-307, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0), 2003.
- Ullrich, S.: Distribution spatiale de l'état redox dans l'aquifère du Seeland entre Aarberg et Worben. Postgraduate thesis in Hydrogeology. Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), Université de Neuchâtel, 1998.
- Wanner, J., and Böhi, D.: Grundwasserfassungen Gimmiz: Pumpversuch Januar/Februar 2011. KELLERHALS + HAEFELI AG, GEOLOGEN, 3011 BERN 2011.
- WEA: Hydrogeologie Seeland. Geologen SIA, Bern, 1976.
- WEA: Nutzungs-, Schutz- und Überwachungskonzept Seeland - Technischer Bericht. Geotechnisches Institut AG, Bern, 1998.
- WWA: Hydrogeologie Seeland - Stand 2004. Geotechnisches Institut AG, Bern, 2004.

9 Anhänge

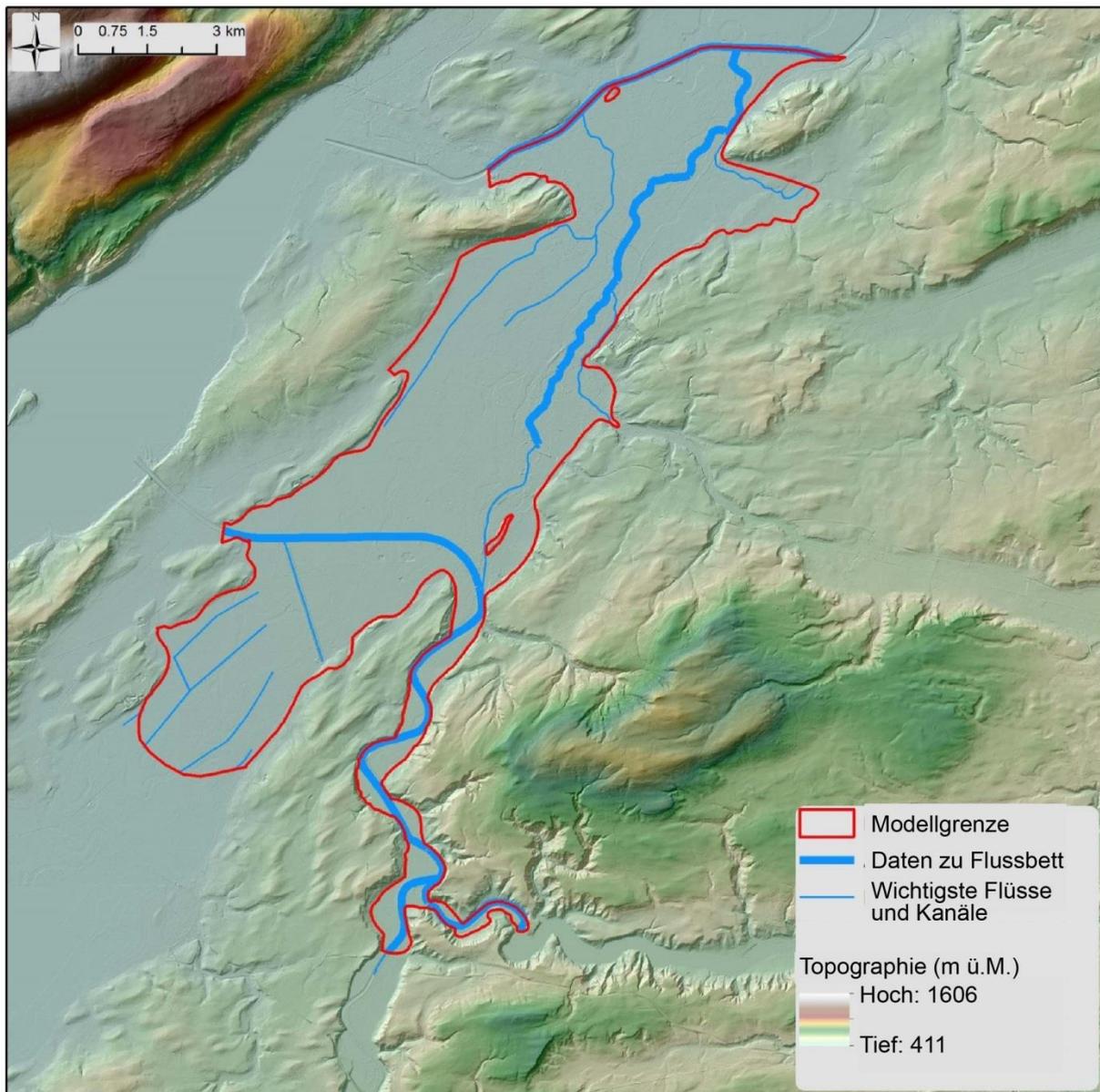
Anhang 2 Wasserhaushalt des südlichen Teils des Grundwasserleiters (aus WWA, 2004)

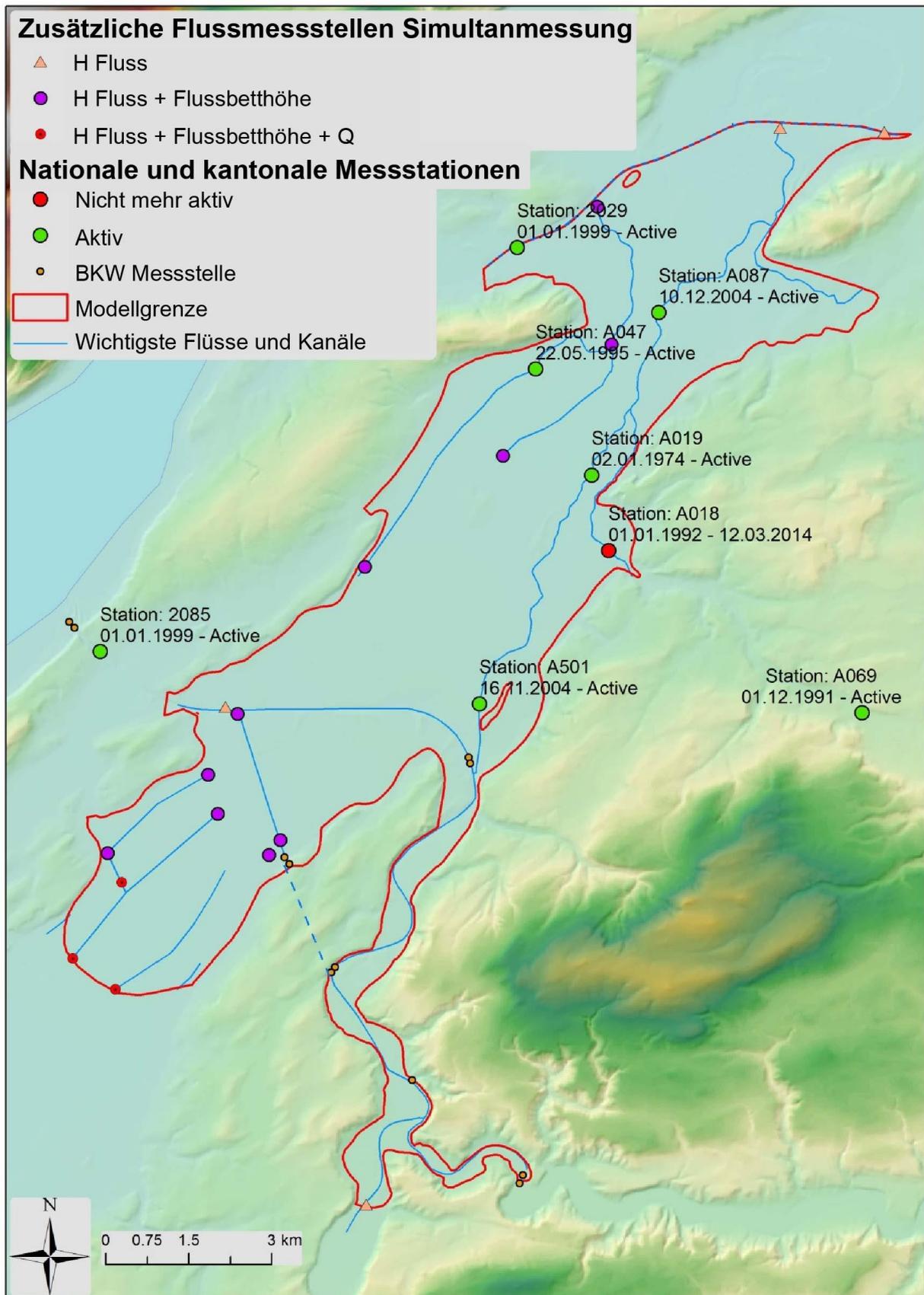
Südlicher Grundwasserstrom				
	Bilanzgrösse	Teilsumme [l/s]	Summe [l/s]	Anteil %
Zuflüsse	Profilzufluss Niederried		70	13%
	Grundwasserneubildung			
	- direkt durch versickerndes Regenwasser	230		
	- indirekt durch randliche Zuflüsse	80	310	55%
	Infiltrationen aus Fliessgewässern			
	- Aare-Hagneck-Kanal im Kanaloberlauf	110		
- Unterwasserkanal im Oberlauf	40			
- Div. kleinere Kanäle	30	180	32%	
	Summe der Zuflüsse		560	
Wegflüsse	Entnahmen			
	- Trinkwasser	-26		
	- Brauchwasser	-1		
	- Landwirtschaftliche Entnahmen	-7	-34	6%
	Exfiltrationen in Fliessgewässer			
	- Aare-Hagneck-Kanal (lokal bei Aarberg und im Kanalunterlauf)	-60		
	- Unterwasserkanal im Unterlauf	-50		
- Hauptkanal und div. kleiner Kanäle (inkl. Drainagen)	-330	-440	79%	
Profilwegfluss Kerzers - Müntschemier			-86	15%
	Summe der Wegflüsse		-550	

Anhang 3 Wasserhaushalt des nördlichen Teils des Grundwasserleiters (aus WWA, 2004)

Nördlicher Grundwasserstrom				
	Bilanzgrösse	Teilsumme [l/s]	Summe [l/s]	Anteil %
Zuflüsse	Profilzufluss Niederried		60	4%
	Grundwasserneubildung			
	- direkt durch versickerndes Regenwasser	530		
	- indirekt durch randliche Zuflüsse	300	830	58%
	Infiltrationen aus Fliessgewässern			
	- Aare-Hagneck-Kanal im Kanaloberlauf	250		
	- Alte Aare zwischen Aarberg und Lyss	190		
	- Alte Aare zwischen Lyss und Meienried	90		
	- Sägibach (unterer Verlauf)	2		
	- Lyssbach	20	552	38%
	Summe der Zuflüsse		1'440	
Wegflüsse	Entnahmen			
	- Trinkwasser	-183		
	- Brauchwasser	-13		
	- Landwirtschaftliche Entnahmen	-14	-210	15%
	Exfiltrationen in Fliessgewässer			
	- Aare-Hagneck-Kanal im Kanalunterlauf	-60		
	- Alte-Aare zwischen Lyss und Meienried	-50		
	- Binnenkanal/Sägibach	-190		
- Drainage Mühlebach (eingedolt)	-60	-360	25%	
- Nidau-Büren-Kanal (Profilwegfluss)		-870	60%	
	Summe der Wegflüsse		-1'440	

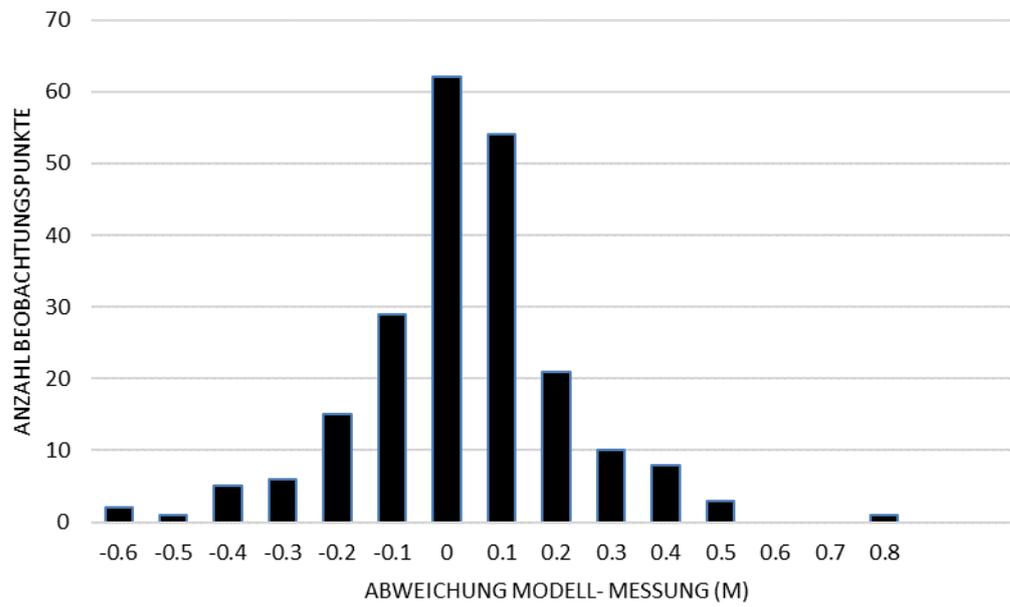
Anhang 4 Verfügbare Niveaus der Flusssohlen



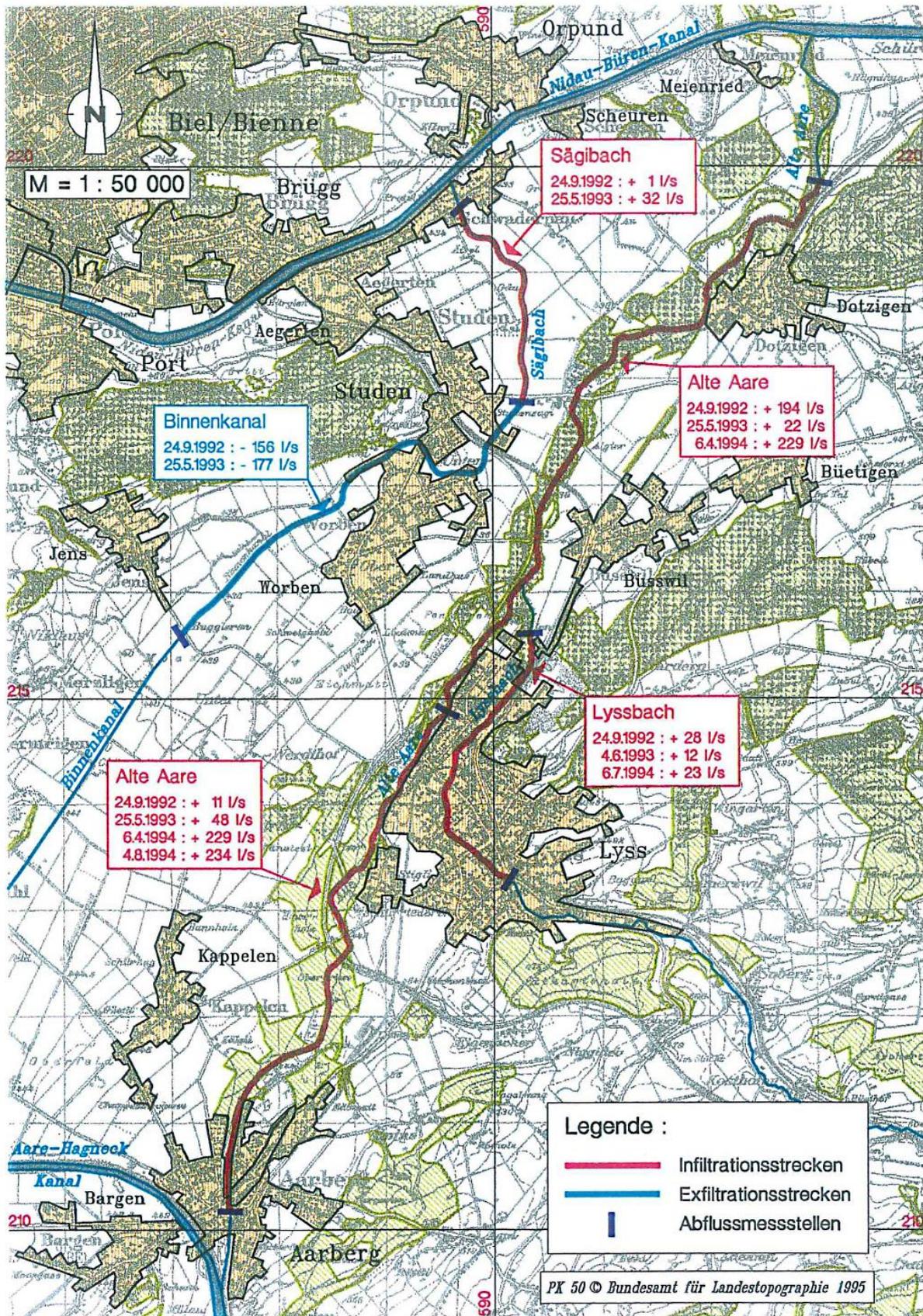


Anhang 6 : Verteilung der Abweichung der simulierten Grundwasserstände (stationäres Modell)

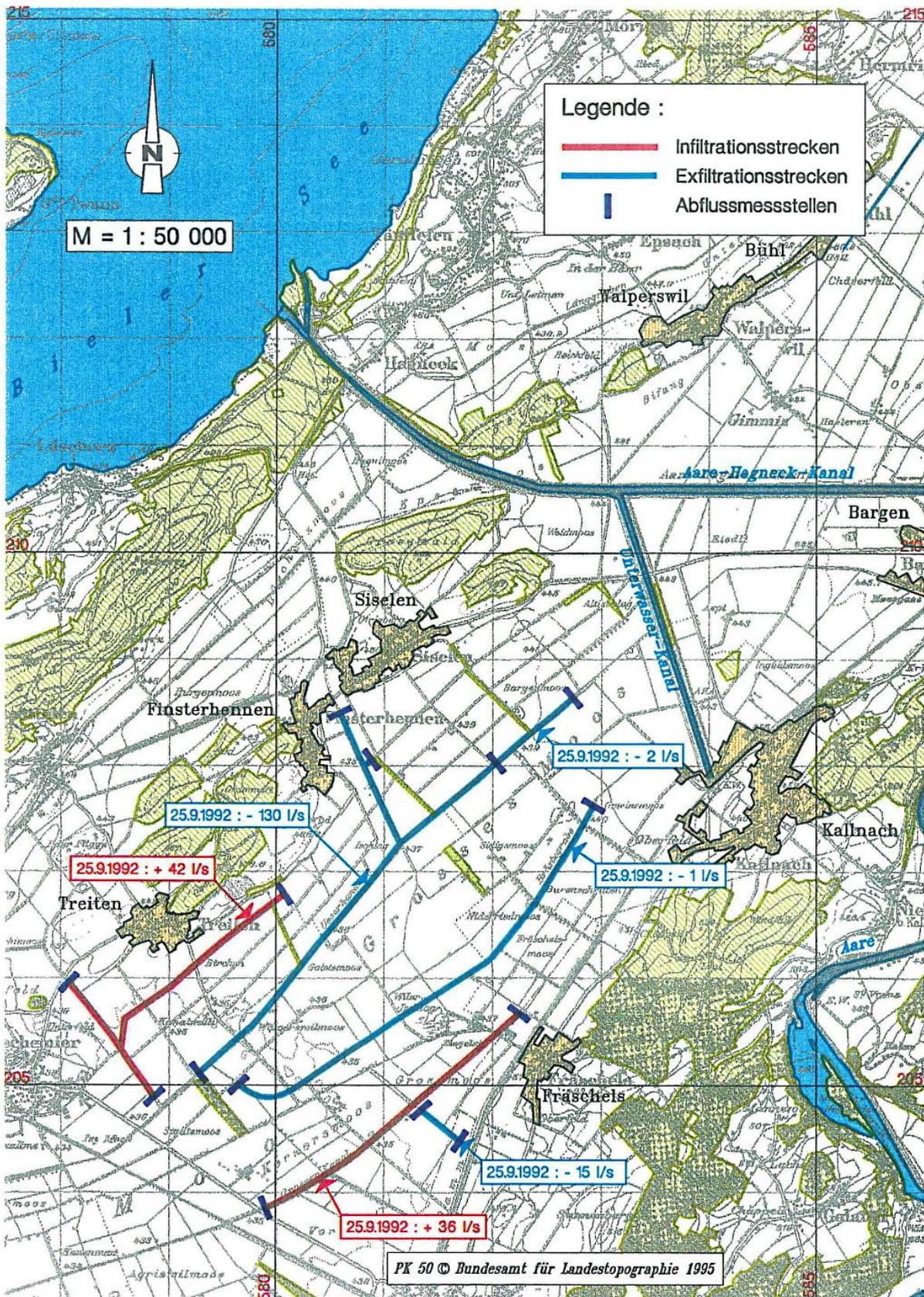
Histogramm der Abweichungen



Anhang 7: Wechselwirkung Fließgewässer-Grundwasser im nördlichen Teil (WEA, 1998)



Anhang 8: Wechselwirkung Fließgewässer-Grundwasser im südlichen Teil (WEA, 1998)



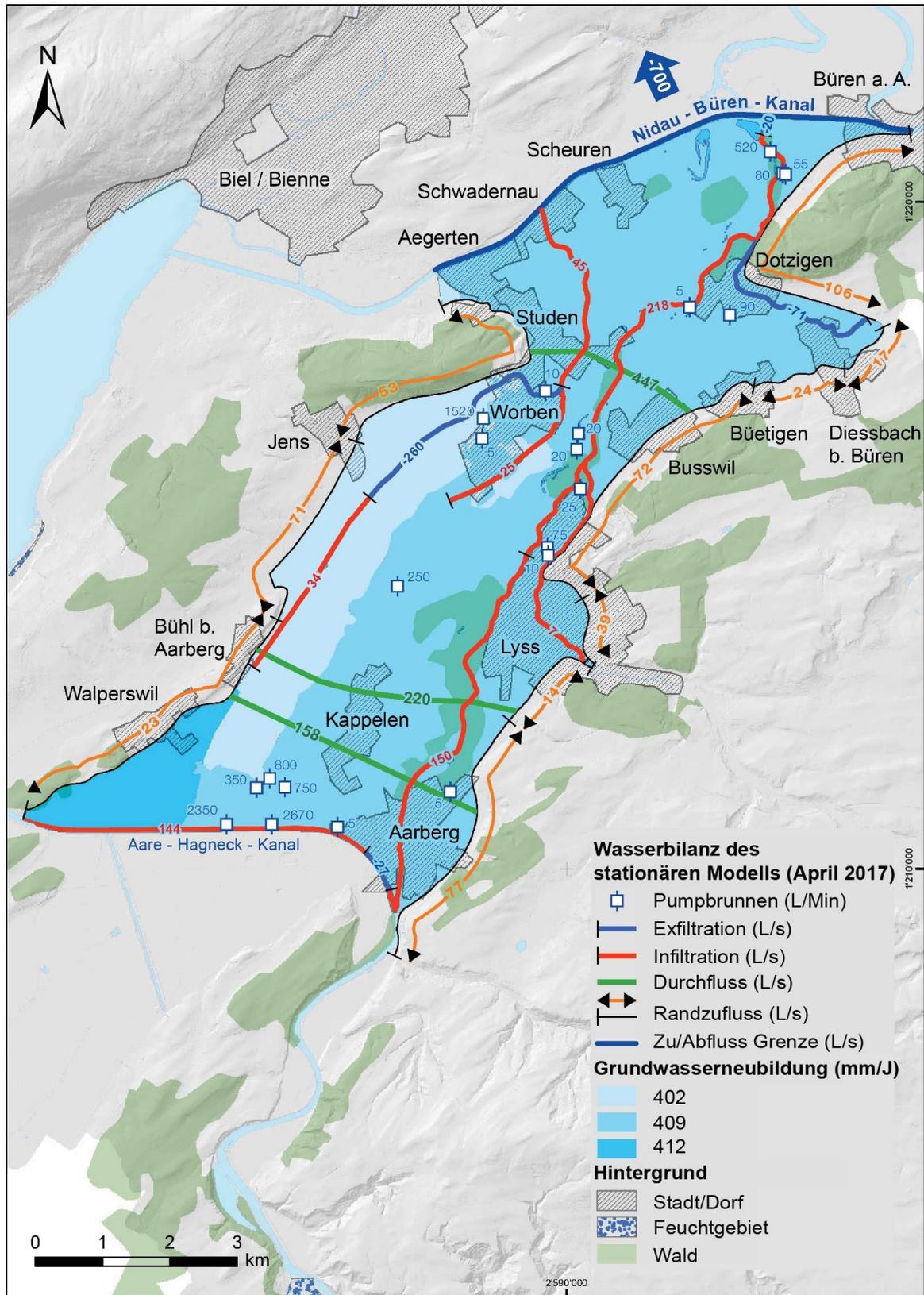
Anhang 9 Wasseraustausch zwischen Hagneckkanal und Grundwasserleiter (WWA, 2004)

Aare-Hagneck-Kanal				
Rechte Seite, Nordufer				
Quellennachweis	Datum	Wasserstand	Infiltration l/s	Exfiltration l/s
WEA (1988)	Ø 1986 - 1987		305	65
	02.06.1987	Sommerhochwasserstand	556	0
	13.01.1987	Winterniederwasserstand	84	56
WEA (1998)	Ø 1991 - 1993		123	57
	Juni / Juli 1993	Sommerhochwasserstand	300 - 310	10 - 20
	Januar 1993	Winterniederwasserstand	10 - 20	90 - 100
Jordan (2000)	Ø 1992 - 1993		235	148
	Juni / Juli 1993	Sommerhochwasserstand	300 - 400	70 - 100
	Januar 1993	Winterniederwasserstand	80 - 120	300 - 400
Linke Seite, Südufer				
WEA (1998)	1991 - 1993		100	34
	Juni / Juli 1993	Sommerhochwasserstand	250 - 290	0 - 10
	Januar 1993	Winterniederwasserstand	50	50

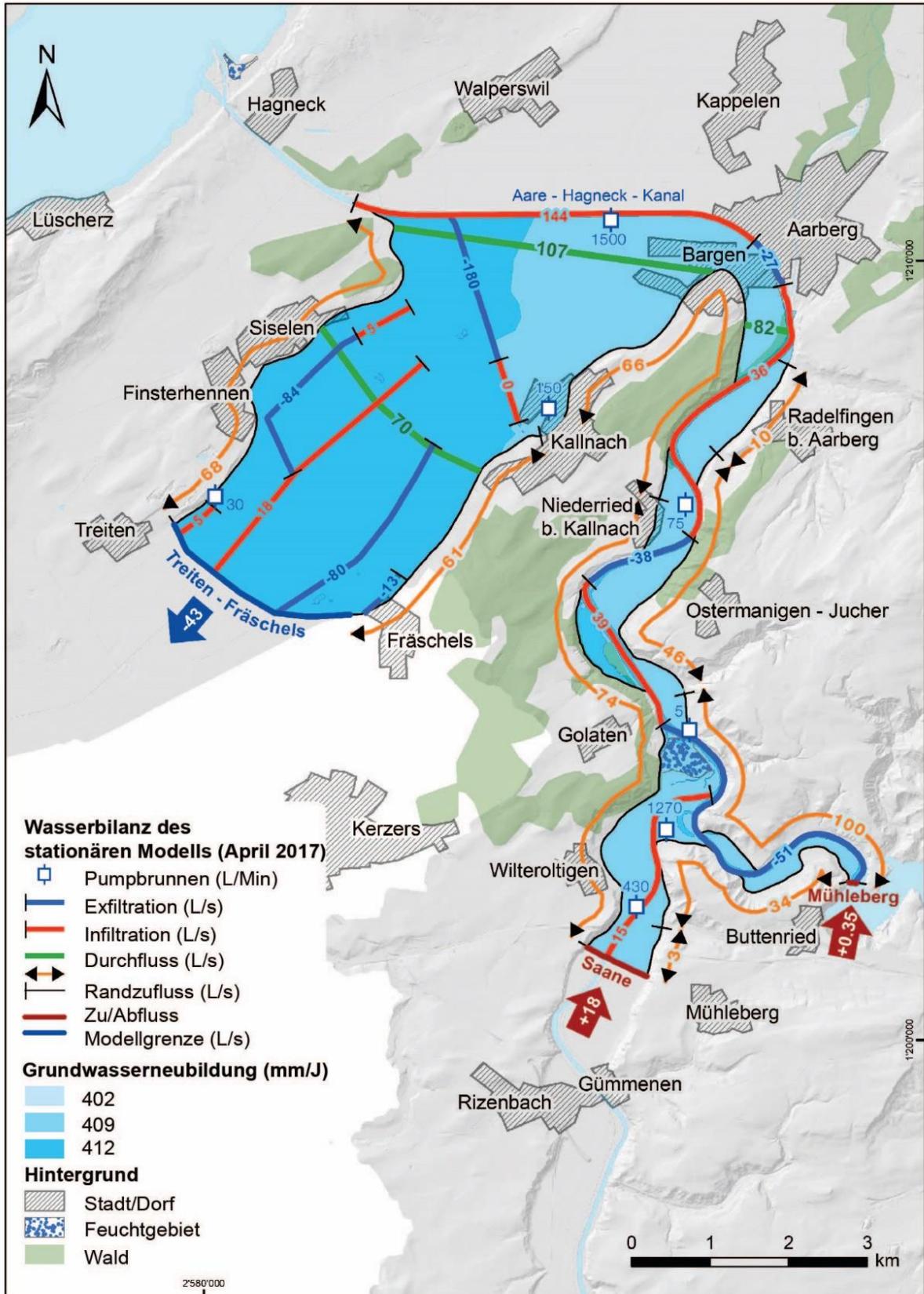
Anhang 10 Wasseraustausch zwischen Alter Aare und Grundwasserleiter (WWA, 2004)

Alte Aare				
Zwischen Aarberg und Lyss				
Quellennachweis	Datum	Abfluss bei Lyss	Infiltration l/s	Exfiltration l/s
GEOTEST (2000)	Mai 1999	4.34 m ³ /s	220	0
WEA (1988)	August / September 1987	4.0 - 4.3 m ³ /s	480	0
	Winter (allgemein)	4 m ³ /s	320	0
	80er-Jahre	4 m ³ /s	350	0
WEA (1998)	1992 – 1994, Ø 4 Messungen	4 m ³ /s	161	0
	1992 - 1994 (Modellergebnis)	4 m ³ /s	182	0
Zwischen Lyss und Meienried				
WEA (1998)	1992 – 1994, Ø 3 Messungen	4 m ³ /s	126	0
	Mai 1991 (Modellergebnis)	4.3 m ³ /s	87	12
	Juli 1991 (Modellergebnis)	4.3 m ³ /s	115	42
	Oktober 1991 (Modellergebnis)	4.0 m ³ /s	143	5
	November 1992 (Modellergebnis)	2.5 m ³ /s	0	400

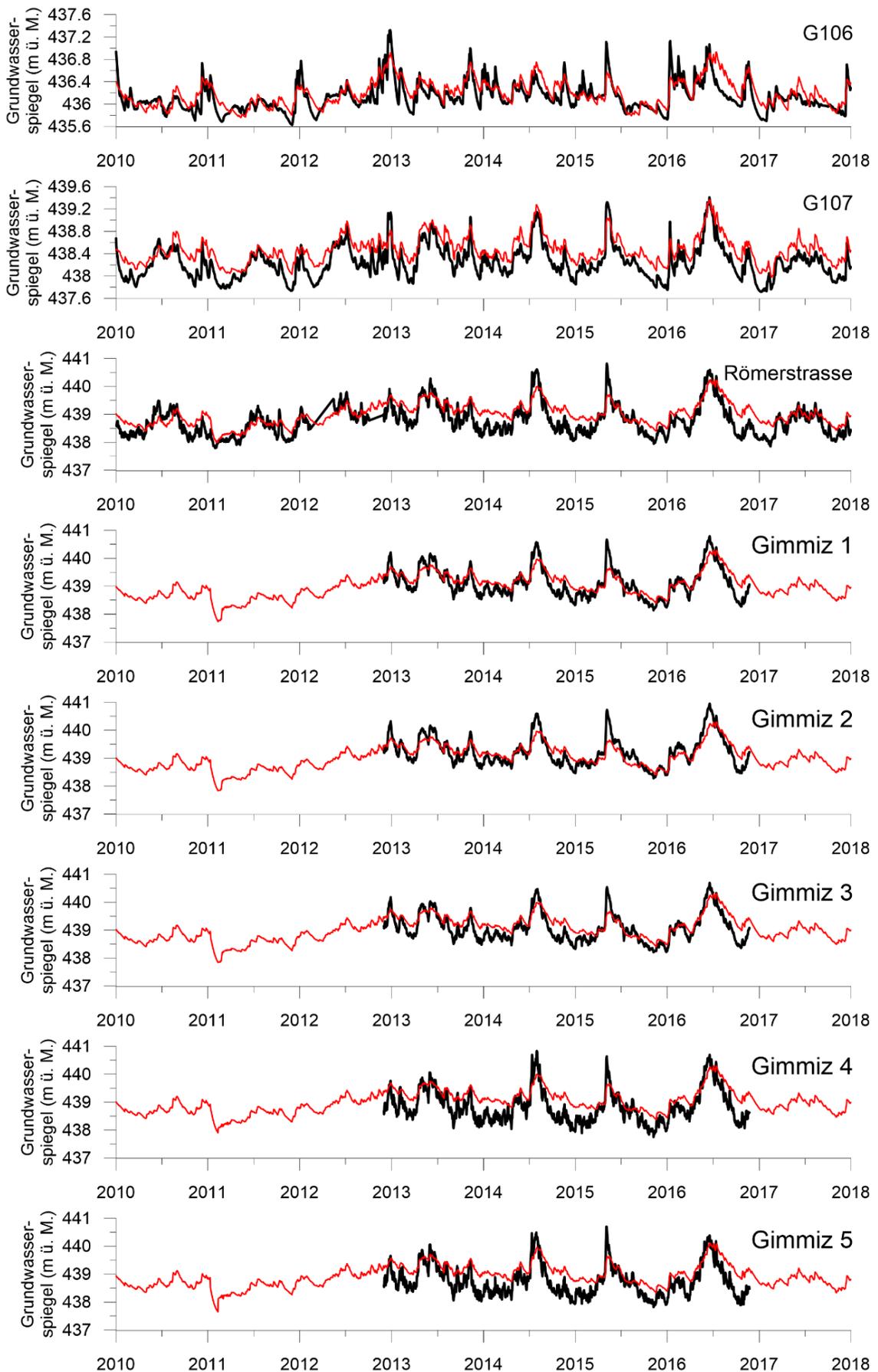
Anhang 11: Simulierter Wasserhaushalt des Nordteils

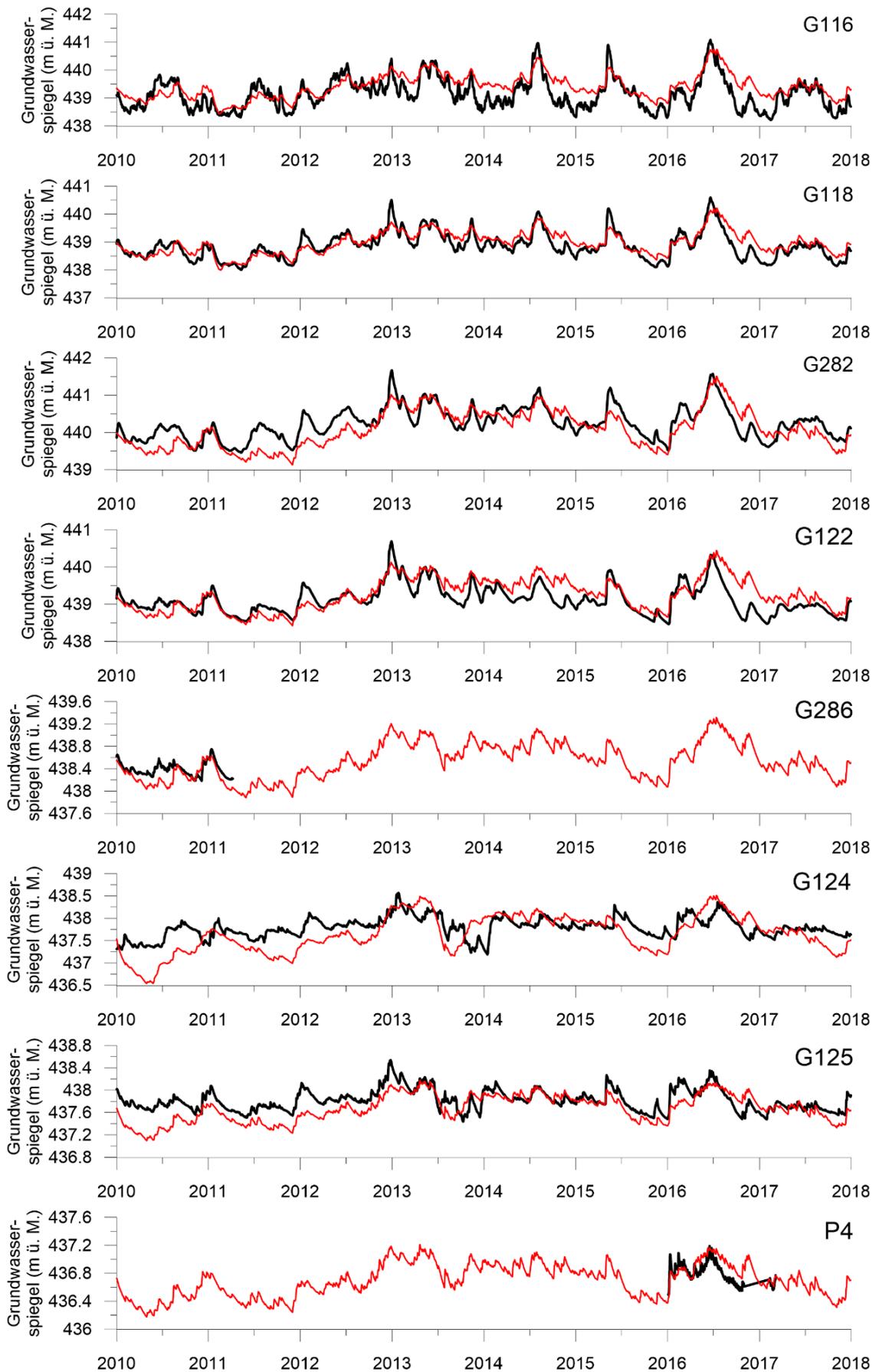


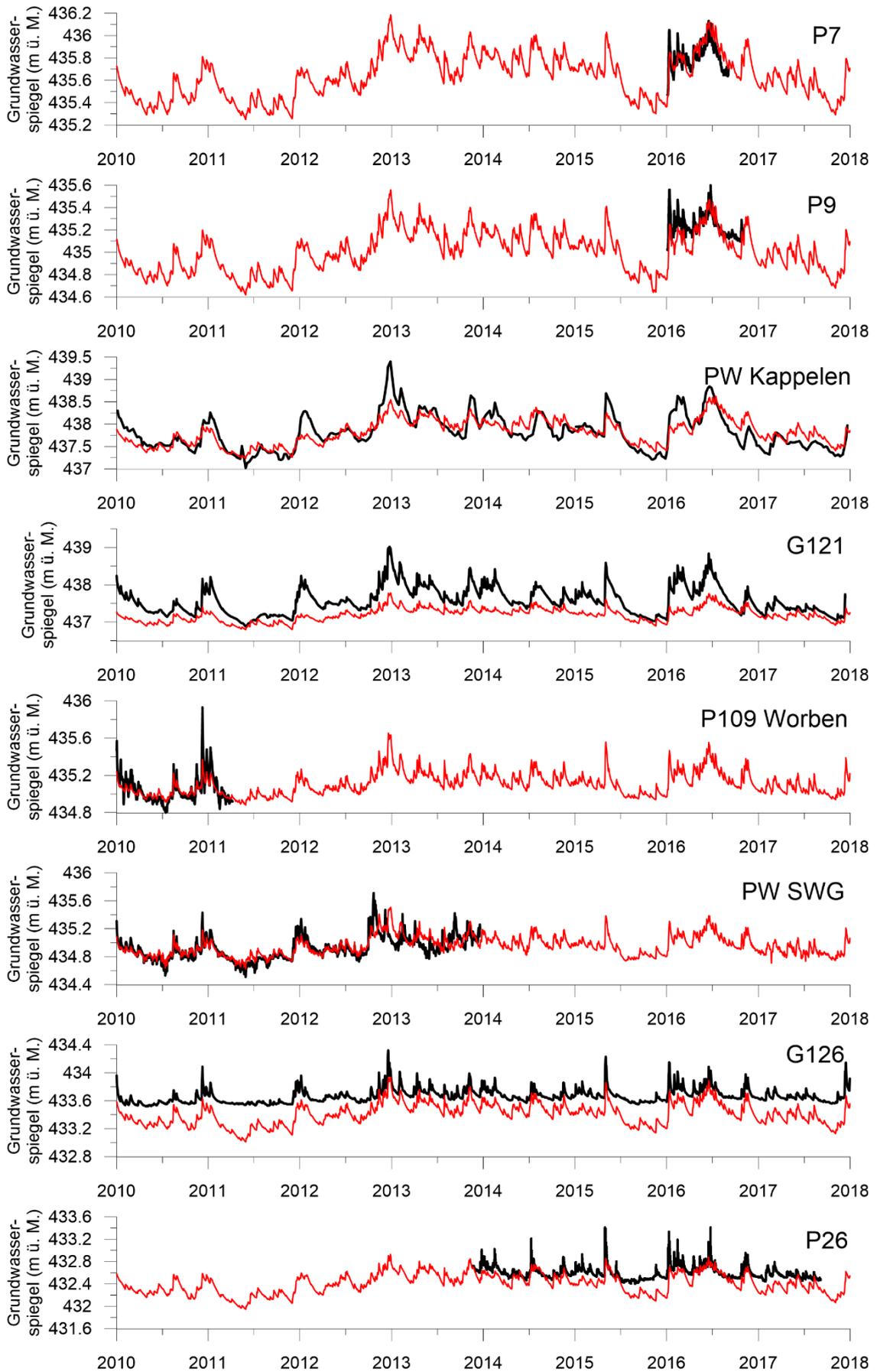
Anhang 12: Simulierter Wasserhaushalt des Südteils

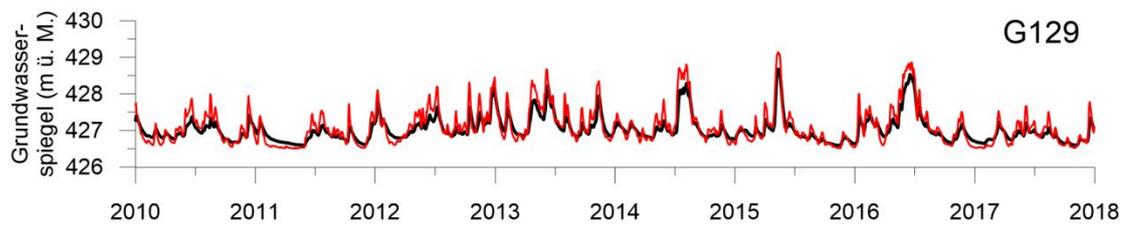
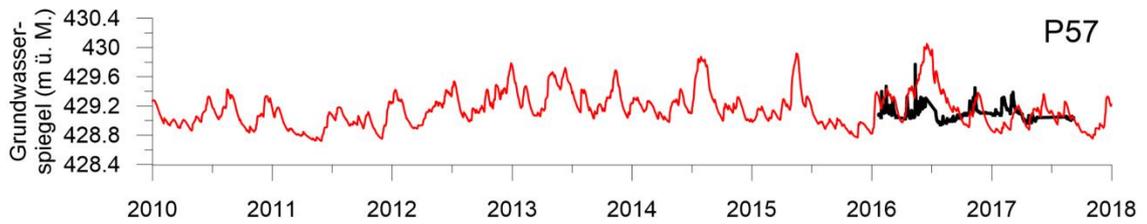
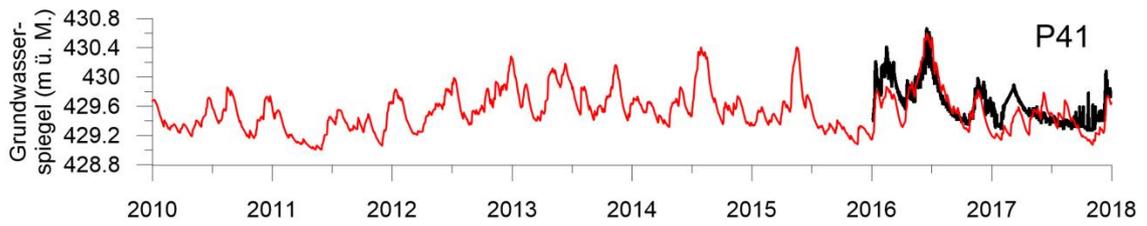
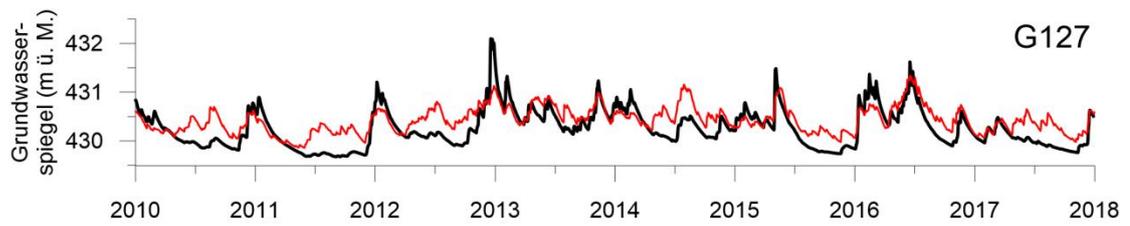
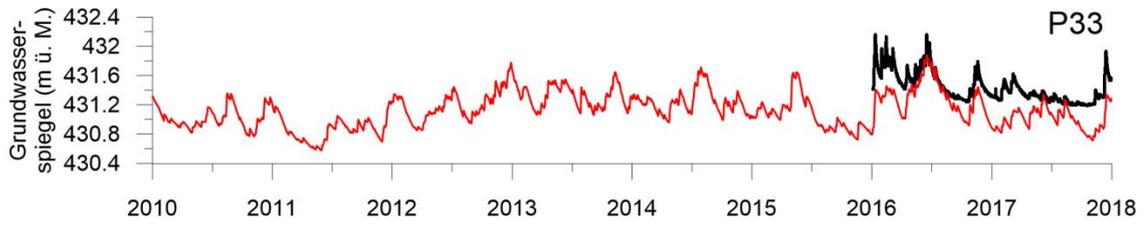
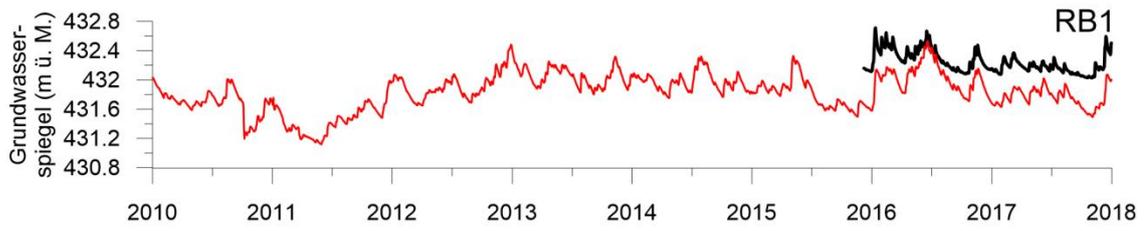


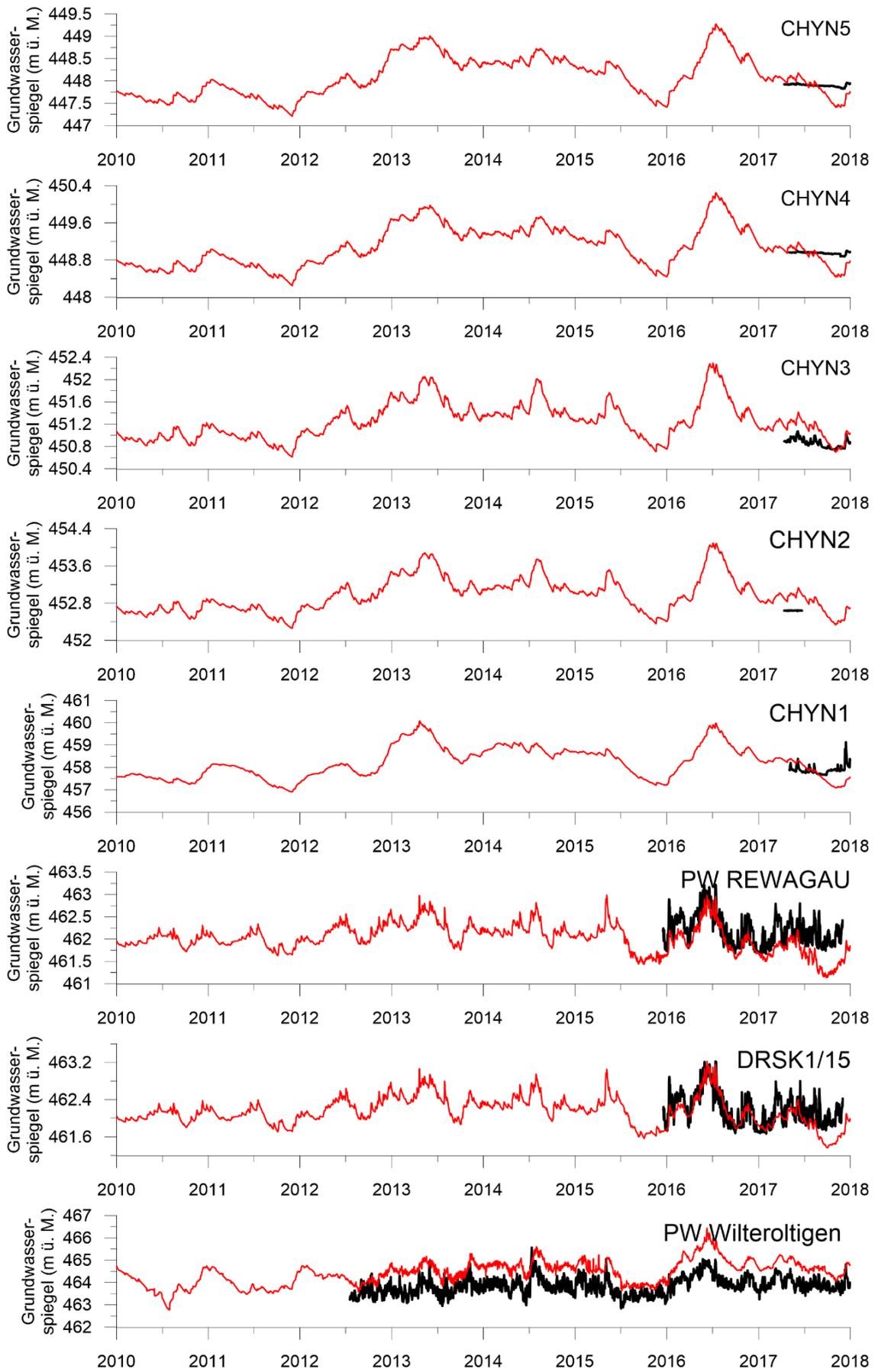
Anhang 13: Simulierter (in rot) und beobachteter (in schwarz) Grundwasserstand



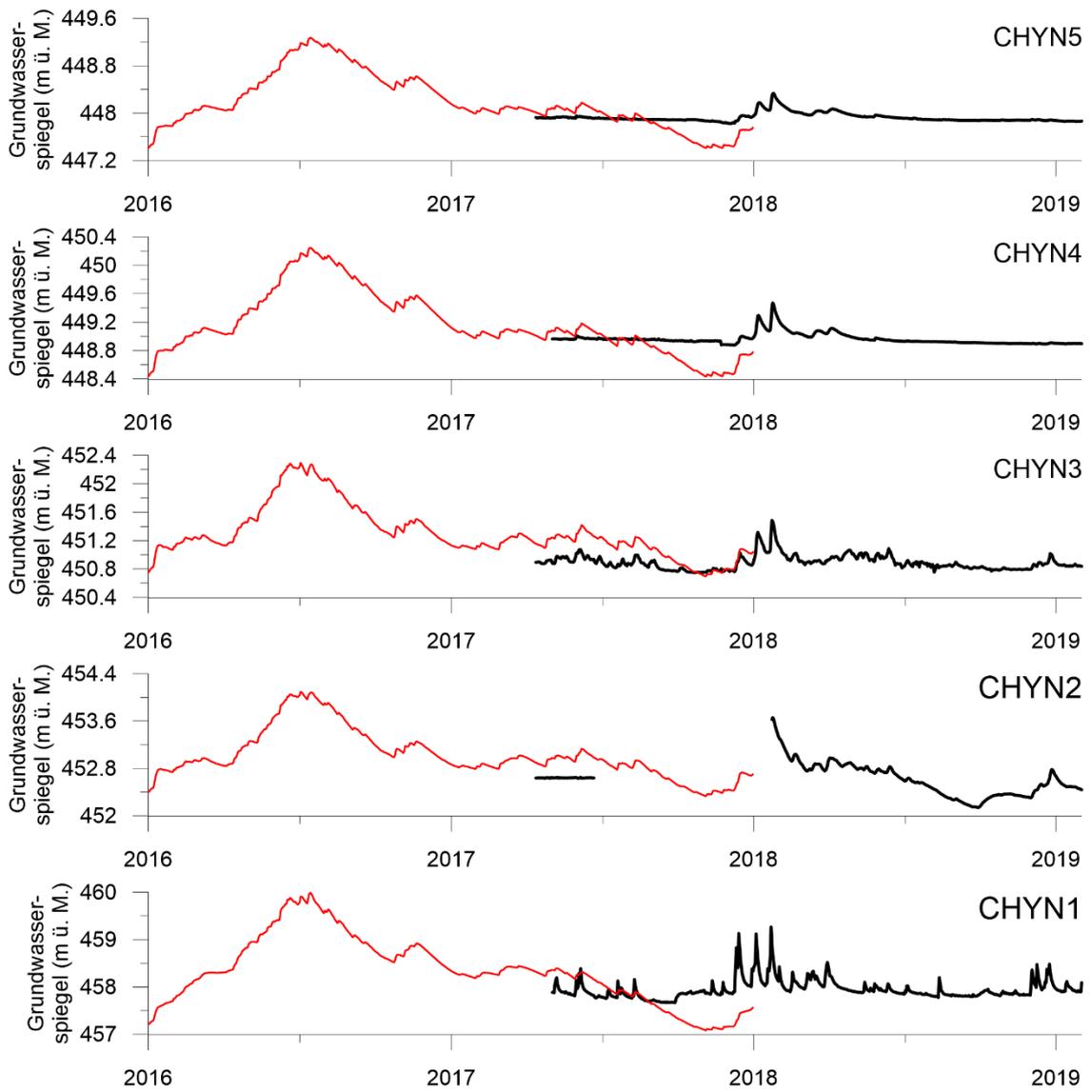




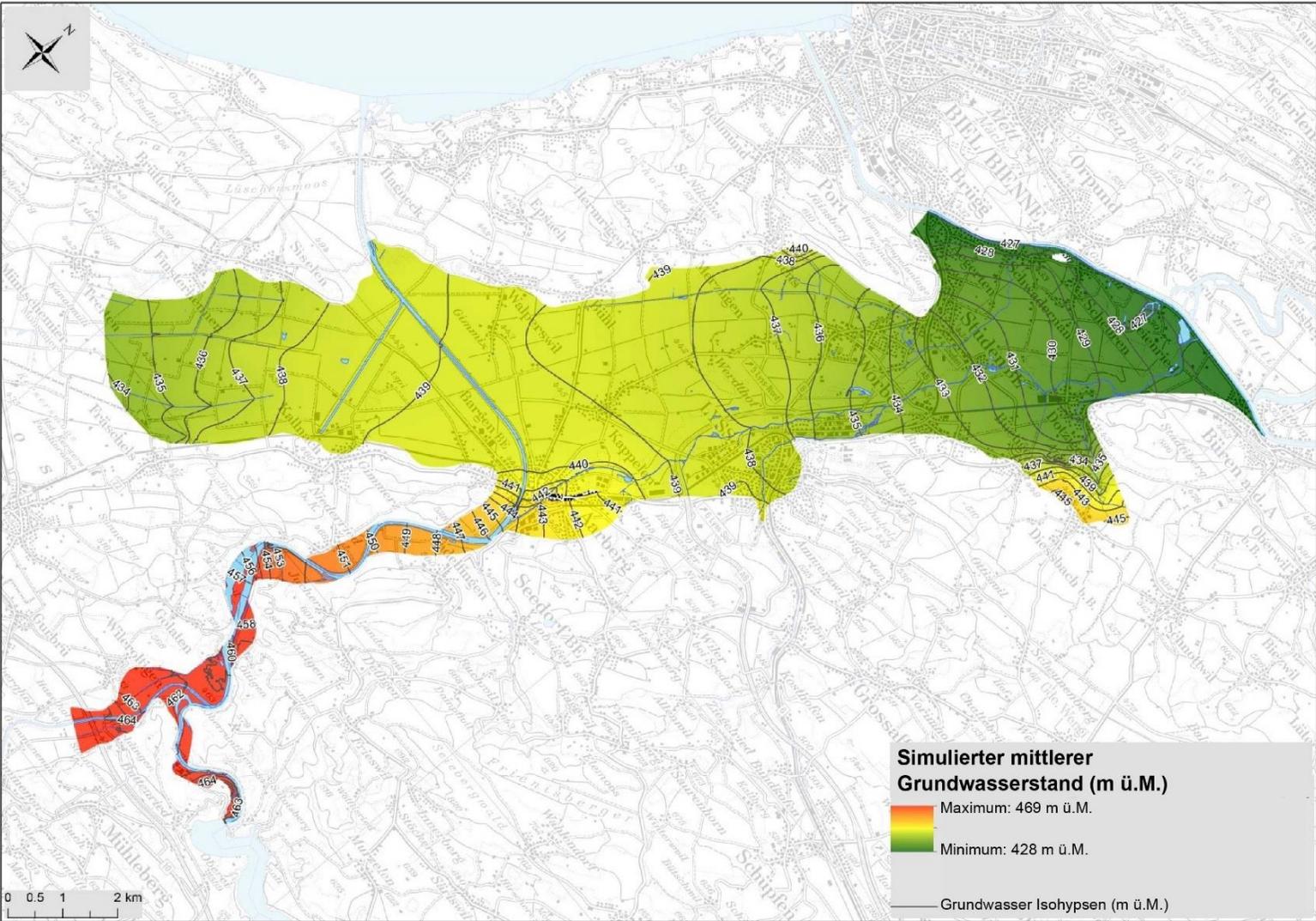




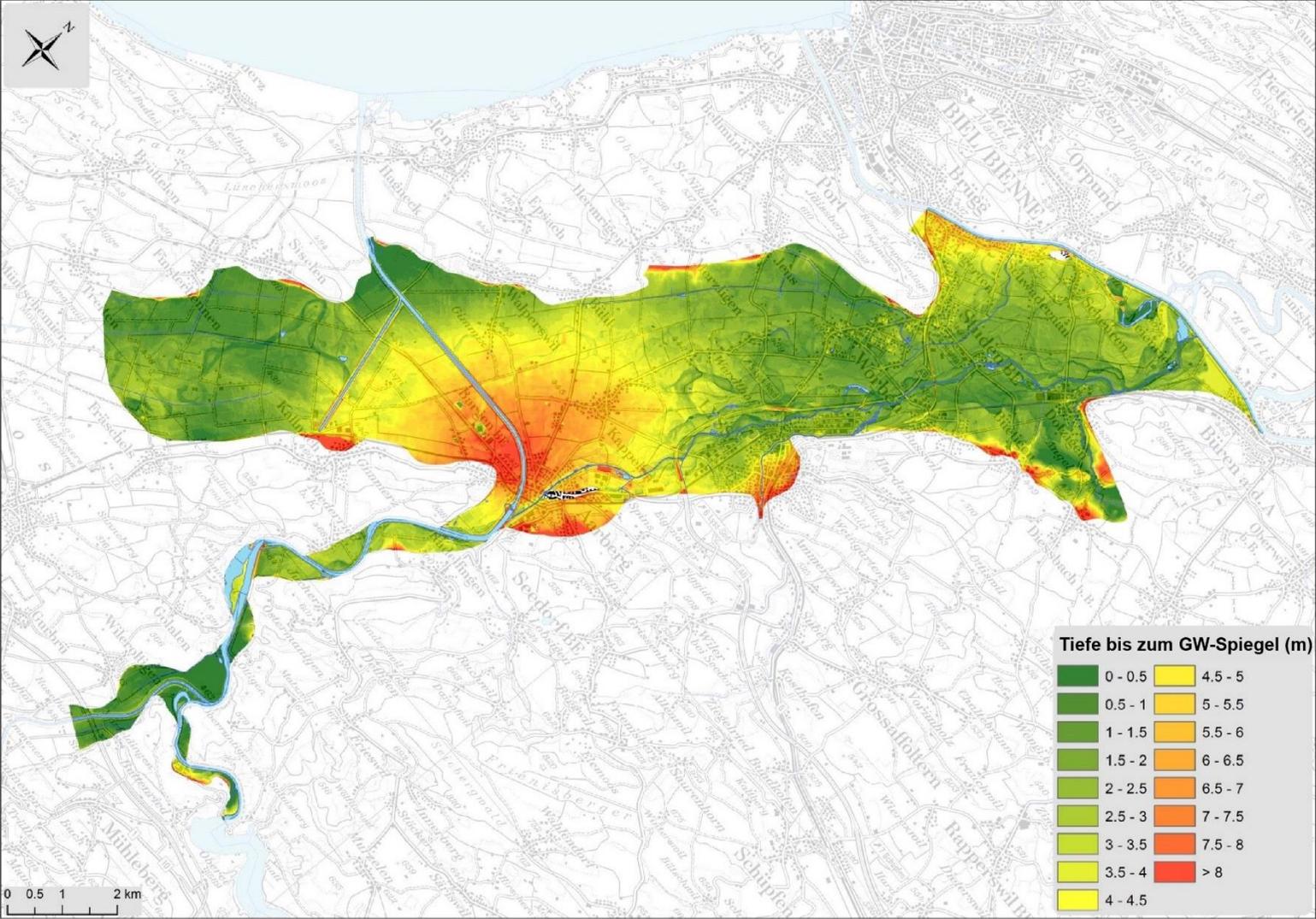
**Anhang 14: Simulierter (in rot) und beobachteter (in schwarz) Grundwasserstand
für die Piezometer CHYN1 bis CHYN5 mit aktualisierten Beobachtungen**



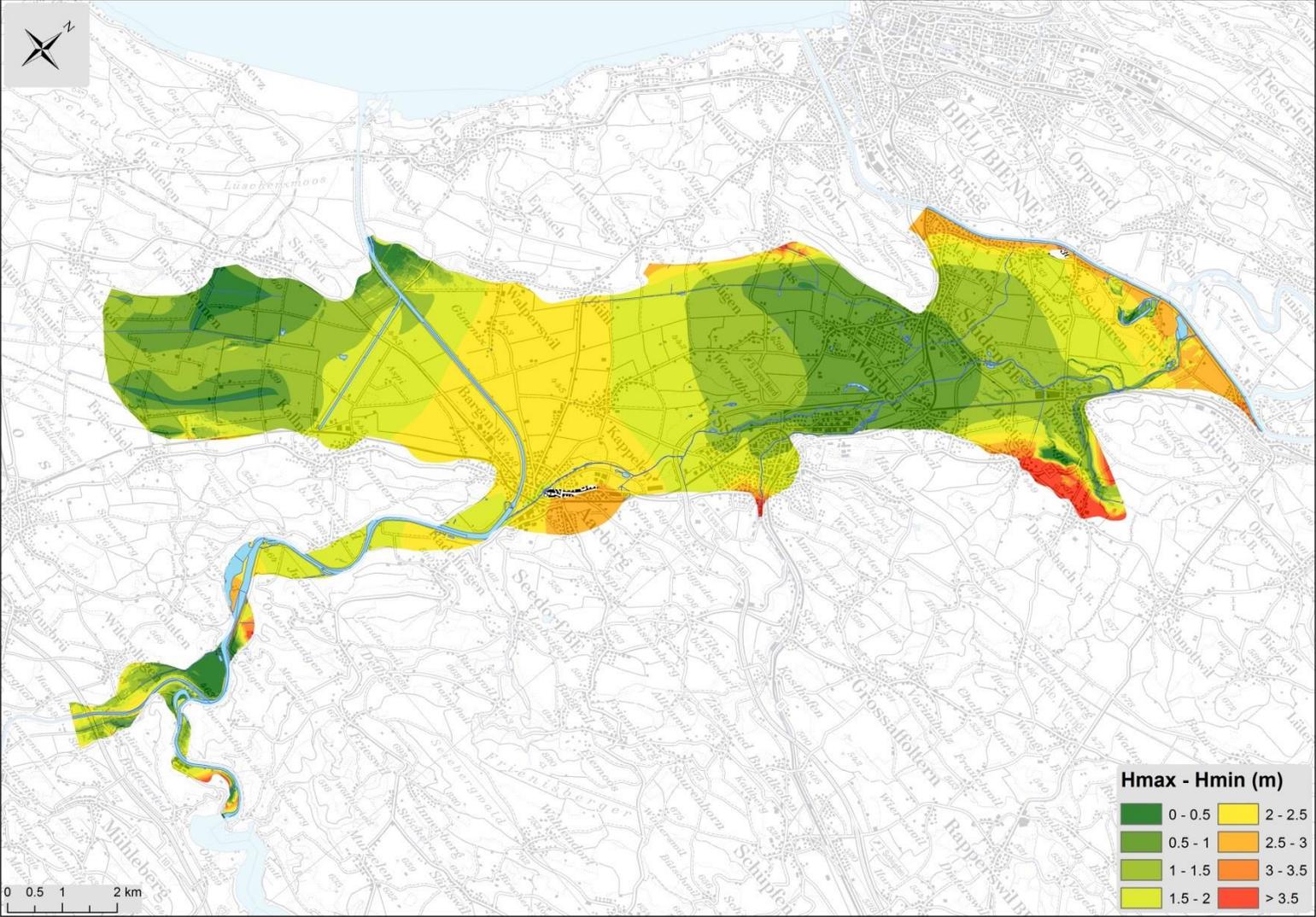
Anhang 15 Simulierte mittlere Grundwasserstände



Anhang 16: Flurabstand (mittlerer Grundwasserspiegel)



Anhang 17: Differenz in der Grundwasserspiegelhöhe (Schwankungsbereich Hmax-Hmin)



Anhang 18 Ausbreitung Zuckerlösung: Simulierte Konzentration zu verschiedenen Zeiten

