

Amt für Wasser  
und Abfall

Office des eaux  
et des déchets

Bau-, Verkehrs-  
und Energiedirektion  
des Kantons Bern

Direction des travaux  
publics, des transports  
et de l'énergie  
du canton de Berne



CHYN  
Centre d'hydrogéologie  
et de géothermie



# GRUNDWASSERMODELL EMMENTAL

TECHNISCHE DOKUMENTATION

## Impressum

<b>Titel:</b>	Nachführung der Grundwasserkarte Grundwassermodell Emmental Projektbericht
<b>Ausgabe:</b>	November 2016
<b>Auftraggeber:</b>	Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern Reiterstrasse 11 3011 Bern
<b>Bearbeitung:</b>	<b>CHYN</b> Dr. Fabien Cochand (Modellierung) Prof. Philip Brunner Prof. Daniel Hunkeler
	<b>AWA</b> Rolf Tschumper (Projektleitung) Jonas Schmid Jean-Pierre Clément
	<b>Werner+Partner AG</b> Peter Biedermann (hydrogeol. Fachbegleitung) Fritz Lüthi
	<b>DHI-WASY</b> Peter Schätzl (Review)
<b>Übersetzung aus dem Englischen:</b>	Aline Kopf

**Hinweis:** Dieser Bericht dokumentiert die geleisteten Arbeiten und Resultate in Form einer Zusammenfassung. Ziel dieses Berichtes ist es, die einzelnen Bearbeitungsschritte für ein hydrogeologisch interessiertes Fachpublikum und für allfällige Folgeprojekte nachvollziehen zu können. Weitere Informationen, sowie das Modell selber können beim AWA auf Anfrage hin bezogen werden.

# Inhaltsverzeichnis

1	Ziele und allgemeine Methodik.....	1
2	Studiengebiet, konzeptionelles Modell und Randbedingungen .....	2
3	Modellentwicklung.....	4
3.1	Modellnetz.....	4
3.2	Schätzung der Neubildung und der seitlichen Grundwasserzuflüsse .....	5
3.3	Randbedingungen 3. Art.....	8
3.4	Numerische Parameter .....	8
4	Stationäres Modell .....	9
4.1	Kalibrierergebnisse .....	9
4.2	Wasserbilanz .....	12
4.3	Model Konvergenz.....	13
5	Instationäres Modell .....	14
5.1	Modelleinstellungen.....	14
5.2	Ergebnisse der Kalibrierung.....	16
6	Hohe, mittlere und tiefe GW-Stand-Karten .....	19
6.1	Korrekturen an den Karten für Hoch- Mittel- und Tiefstand .....	20
6.2	Auswertung .....	21
6.3	Zuverlässigkeit des Modells.....	24
7	Anwendung des Modells .....	26
7.1	Methodik und Modelleinstellungen .....	26
7.2	Ergebnisse.....	27
8	Modellverbesserungsvorschläge und Schlussfolgerungen .....	30
9	Referenzliste.....	32
10	Anhänge.....	33

## VERWENDETE BEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Beschreibung
AWA	Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern
AGI	Amt für Geoinformation des Kantons Bern
RB1	Randbedingung erster Art (Dirichlet-Randbedingung): Festpotentialrandbedingung, Vorgabe der Piezometerhöhe z.B. auf Teilen des Modellrandes
RB2	Randbedingung zweiter Art (Neumann-Randbedingung): Flussrandbedingung, Vorgabe eines Zu- oder Abflusses auf Teilen des Modellrandes oder an Fließgewässern
RB3	Randbedingung dritter Art (Cauchy-Randbedingung): Kombination der Dirichlet und Neumann Randbedingung. Wird oft für die realitätsnahe Umsetzung der In-/Exfiltrationsverhältnisse von Fließgewässern benutzt.
RB4	Randbedingung vierter Art: punktuelle Entnahmen (Pumpen), Infiltrationen
Blaue Berichte	Hydrogeologische Grundlagenberichte des WEA: Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern
CHYN	Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie, Universität Neuenburg
BVE	Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern
FEFLOW	Software der Firma DHI-WASY für die Modellierung von Grundwasserströmen
HW	Grundwasser-Hochstand ( $\neq$ Höchststand)
MW	Mittelwasser (ca. mittlerer Grundwasserstand)
NW	Niedrigwasser, Grundwasser-Tiefstand ( $\neq$ Tiefststand)
WEA	Wasser und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern
WEA-Modell	Grundwassermodell aus der Zeit des WEA, basierend auf der Grundlage der Blauen Berichte (Programmcode NSDG)

## 1 ZIELE UND ALLGEMEINE METHODIK

Diese Studie hat zum Ziel, ein hydrogeologisches numerisches Strömungsmodell zu entwickeln, welches die Dynamik des Emmentaler Grundwasserleiters reproduziert. Das Projekt erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen dem CHYN und dem AWA. Das Hauptergebnis ist ein kalibriertes, instationäres (transientes) Modell, welches die minimalen, maximalen und mittleren Grundwasserstände berechnet. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- 1) Entwurf eines Modellnetzes mit finiten Elementen
- 2) Berechnung und Auswertung der Grundwasseranreicherung durch Niederschlag mit meteorologischen Grid-Daten (MeteoSwiss 2013).
- 3) Abschätzung der seitlichen Grundwasseranreicherung mit denselben meteorologischen Daten.
- 4) Umsetzung des konzeptuellen Modells mit Feflow 6.2.

Das Modell wurde wie folgt kalibriert:

- 1) Zuerst wurde das Modell mit PEST (PEST 2015) für stationäre Zustände kalibriert. Als Bewertungsgrundlage der stationären Grundwasserströmungszustände, wurden die „Simultanmessung der Grundwasserstände am 21./22. Oktober 2013“ (AWA 2013) und die „Bilanzprofile WEA (1975-2002)“ benutzt. Dieser erste Schritt hatte zum Ziel, die Grundwasserstände zu reproduzieren und eine erste Grundlage für die komplexere instationäre (transiente) Kalibrierung zu liefern.
- 2) Das stationäre Modell wurde als Ausgangspunkt für das instationäre Modell der Jahre 2010 - 2013 genutzt. Die 33 auf dem Studiengebiet verteilten Grundwasserstandmessstellen wurden verwendet, um die Kalibrierung für den Zeitraum 2010-2013 zu validieren. Die Kalibrierung bestand in der Anpassung der hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten der einzelnen geologischen Zonen. Dieser zweite Schritt hatte zum Ziel, die Dynamik des Einzugsgebiets und die minimalen, maximalen und mittleren Grundwasserstände während den Trocken- und Nassperioden zu simulieren.
- 3) Aufgrund der Modellergebnissen wurden Karten der minimalen, maximalen und mittleren Grundwasserstände erstellt.

Die oben beschriebenen Punkte werden in den folgenden Abschnitten ausführlich diskutiert.

## 2 STUDIENGEBIET, KONZEPTIONELLES MODELL UND RANDBEDINGUNGEN

Die Fläche des Grundwasserleiters im Grossraum Emmental beträgt etwa 122 km<sup>2</sup>. Die Höhe variiert zwischen 450 und 910 m ü. M. Abbildung 1 zeigt das Gebiet des 2D horizontalen konzeptionellen Modells. Die seitlichen Ränder sind bestimmt durch die Ränder des Lockergesteinsaquifers. Die vertikale Modellbegrenzung wird durch die Terrainoberfläche und die Oberfläche des Grundwasserstauers definiert. Um das Modell zu vereinfachen und die Eichung zu erleichtern wurde das Studiengebiet, entsprechend den aktuellen hydrogeologischen Kenntnissen, in mehrere Zonen mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften unterteilt (siehe Anhang 1). Das Modell wurde für die Simulation gesättigter Strömung in einem ungespannten Grundwasserleiter entwickelt. Alle Geometriedaten (Stauerkote, Terrainkote, etc.), Grundwasser-Querschnittsdurchflüsse, Fluss-Grundwasser-Austauschraten, etc. basieren auf den „Blauen Berichten“ (WEA 1975-2002), sowie auf neuere Untersuchungen und Studien. Diese Daten wurden vom AWA zur Verfügung gestellt.

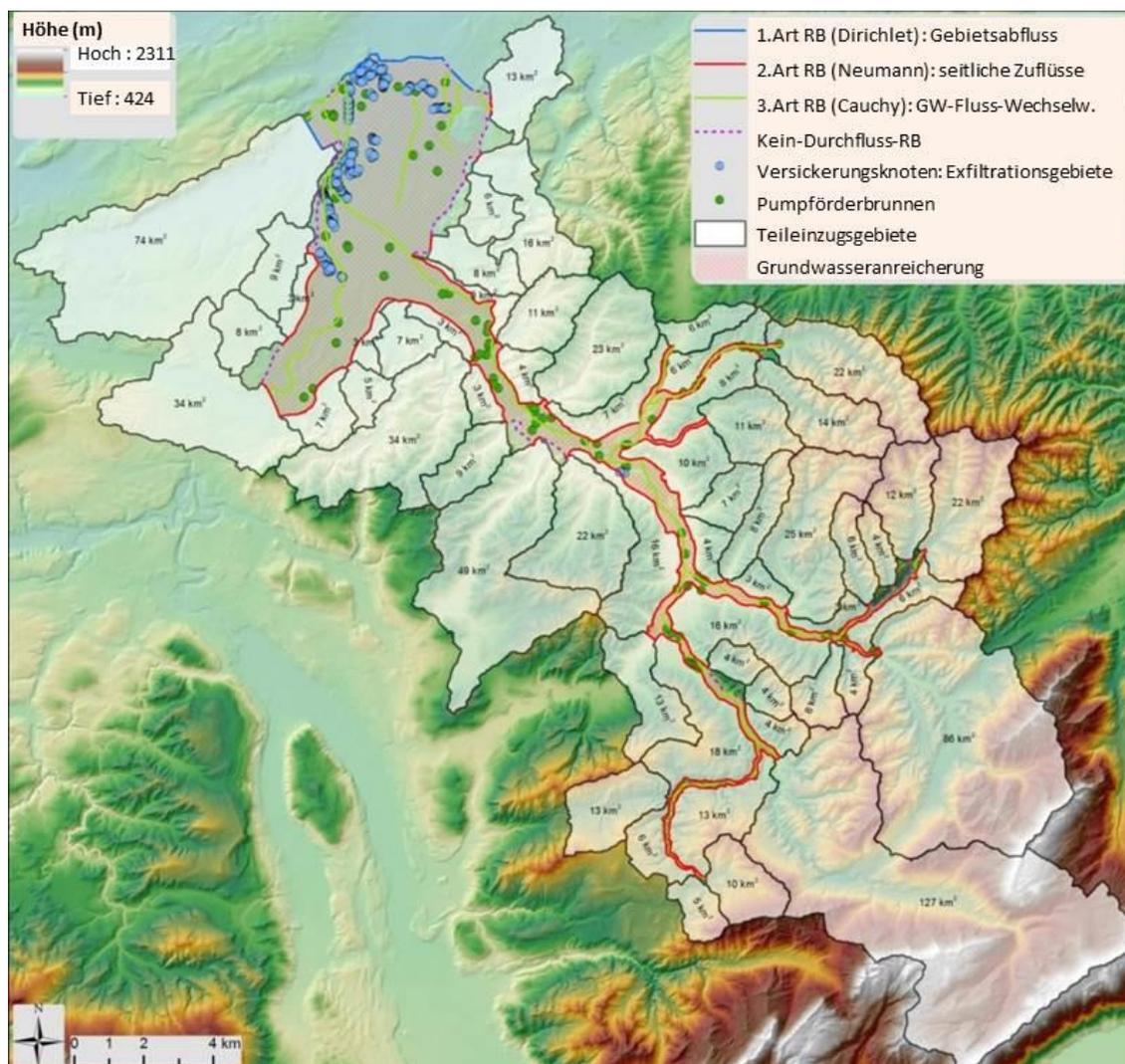


Abbildung 1 : Konzeptionelles Modell

Wie in Abbildung 1 gezeigt, wurden für das vorliegende Modell verschiedene Arten von numerischen Randbedingungen (RB) verwendet.

Um den Abfluss aus dem Modellgebiet zu simulieren, wurden am Modellausgang im Bereich der Kantonsgrenze zu Solothurn eine Randbedingung 1. Art gewählt (RB1, Dirichlet). Die seitlichen Grundwasserzuflüsse von Teileinzugsgebieten wurden mit Randbedingungen 2. Art (RB2, Neumann) definiert. Randbedingungen 3. Art (RB3, Cauchy) wurden für die Grundwasser-Fluss-Wechselwirkungen benutzt (siehe Kapitel 3.2 und 3.3). Die Exfiltrationszonen (vorwiegend im unteren Teil des Einzugsgebiets) wurden mit punktuellen Randbedingungen 4. Art (RB4) wiedergegeben. Diese Randbedingung wurde so definiert, dass eine Exfiltration an diesen Knoten nur dann erfolgt, wenn der berechnete Grundwasserstand über der Geländeoberfläche liegt. Schliesslich wurden Randbedingungen 4. Art ebenfalls benutzt um Wasserentnahmen durch Pumpförderbrunnen zu berücksichtigen.

Die Grundwasseranreicherung durch Niederschlag wurde durch ein eigenes Verfahren berechnet (siehe Kapitel 3.2).

### 3 MODELLENTWICKLUNG

Das 2D-Modell wurde mit dem Computerprogramm FEFLOW 6.2 entwickelt ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)). FEFLOW benutzt die Finite-Elemente-Analyse um die Strömungsgleichung für Grundwasser, sowie weitere Prozesse (z. B. Stofftransport), zu lösen. In diesem Modell wurde nur die Strömungsgleichung für gesättigten Grundwasserfluss mit den entsprechenden Gleichungslösern benutzt. Die Modellentwicklung wurde in mehrere Schritte aufgeteilt. Zuerst wurde ein dreieckiges Netz generiert, dann wurden RB für die seitlichen Grundwasserzuflüsse und für die Grundwasseranreicherung berechnet. Schliesslich wurde jede berechnete RB ins Modell integriert. Jeder Schritt wird im Detail in den folgenden Abschnitten diskutiert.

#### 3.1 MODELLNETZ

Die Abbildung 2 zeigt das 2D Netz (finite Elemente). Das Netz wurde in der FEFLOW-Benutzeroberfläche mit dem Netz-Generator "Triangle" erarbeitet. In Übereinstimmung mit dem konzeptionellen Modell entsprechen die Modellgrenzen den Rändern des Lockergesteinsaquifers. Ein Modellnetz mit möglichst regelmässigen Elementen ist die Grundlage für eine zuverlässige numerische Stabilität. Somit wurde der Netz-Generator so konditioniert, dass finite Elemente mit einem minimalen Winkel von  $34^\circ$  erzeugt werden. Zusätzlich wurde das Netz bei den relevanten Fliessgewässern und Pumpförderbrunnen verfeinert, um die erhöhten hydraulischen Gradienten adäquat zu simulieren. Die auf Fliessgewässer gelegenen Elemente haben eine maximale Seitenlänge von 30 m, die Elemente bei den Pumpförderbrunnen eine maximale Seitenlänge von 6 m. Die Gesamtknotenzahl liegt bei 180'505, die Anzahl Elemente ist 352'470.

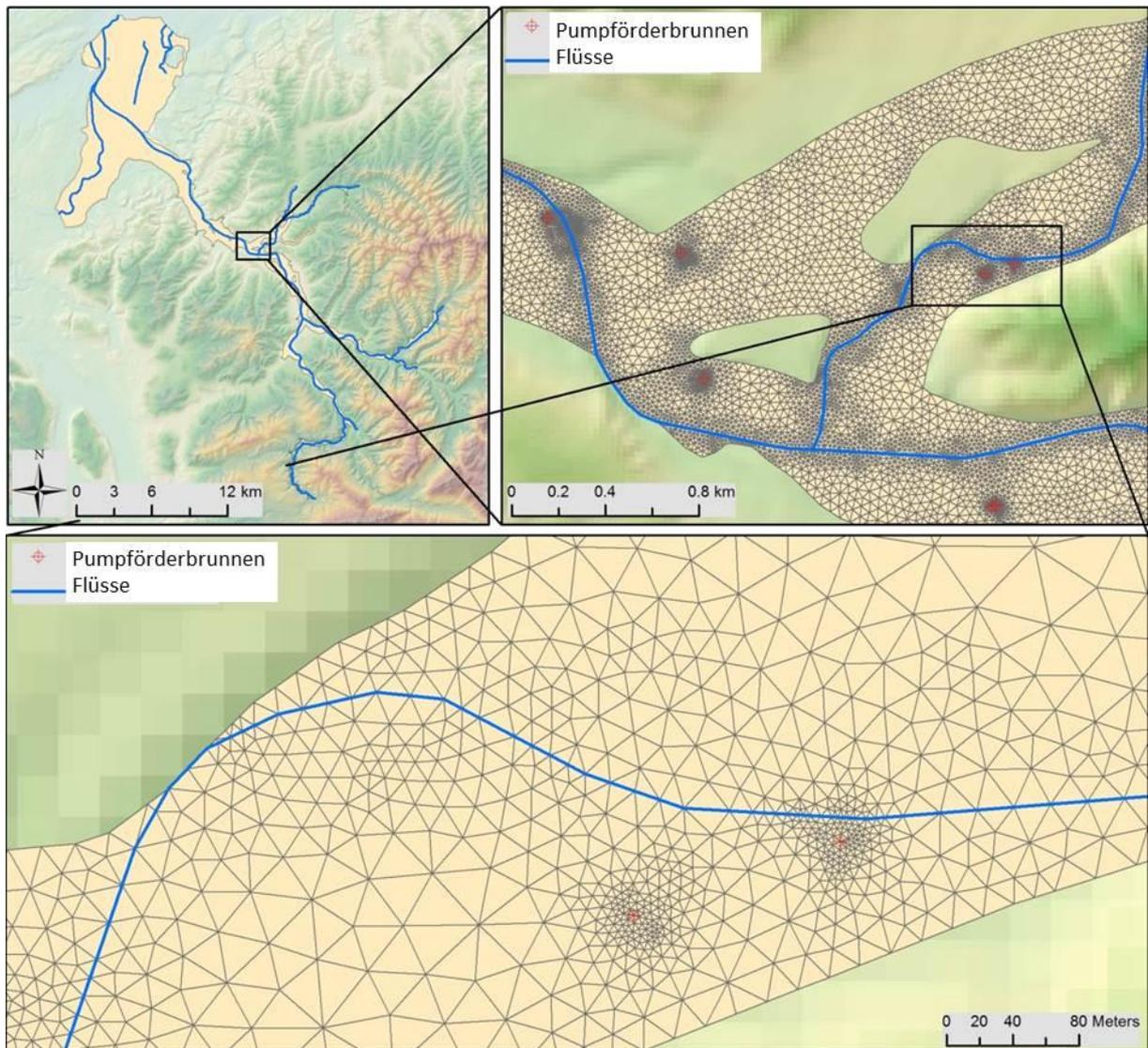


Abbildung 2 : Modellnetz

### 3.2 SCHÄTZUNG DER NEUBILDUNG UND DER SEITLICHEN GRUNDWASSERZUFLÜSSE

Die Berechnungen der GW-Neubildung durch Niederschlag und der seitlichen GW-Zuflüsse ist zentral für diese Studie. Diese Prozesse genau zu quantifizieren war im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Dennoch konnten sie genügend genau abgeschätzt werden.

Der erste Schritt ist die Kompilation der verfügbaren meteorologischen Daten. MeteoSwiss stellt Temperatur- und Niederschlag-Rasterdaten für das ganze Schweizer Gebiet mit verschiedenen Frequenzen (Tagesmittel, Monatsmittel, etc.) und Zeiträumen zur Verfügung. In dieser Studie wurden Monatsmittelniederschläge und -temperaturen von Januar 2010 bis Dezember 2013 verwendet. Abbildung 3 zeigen die Monatsmitteltemperaturen und -Niederschläge für Juni 2011.

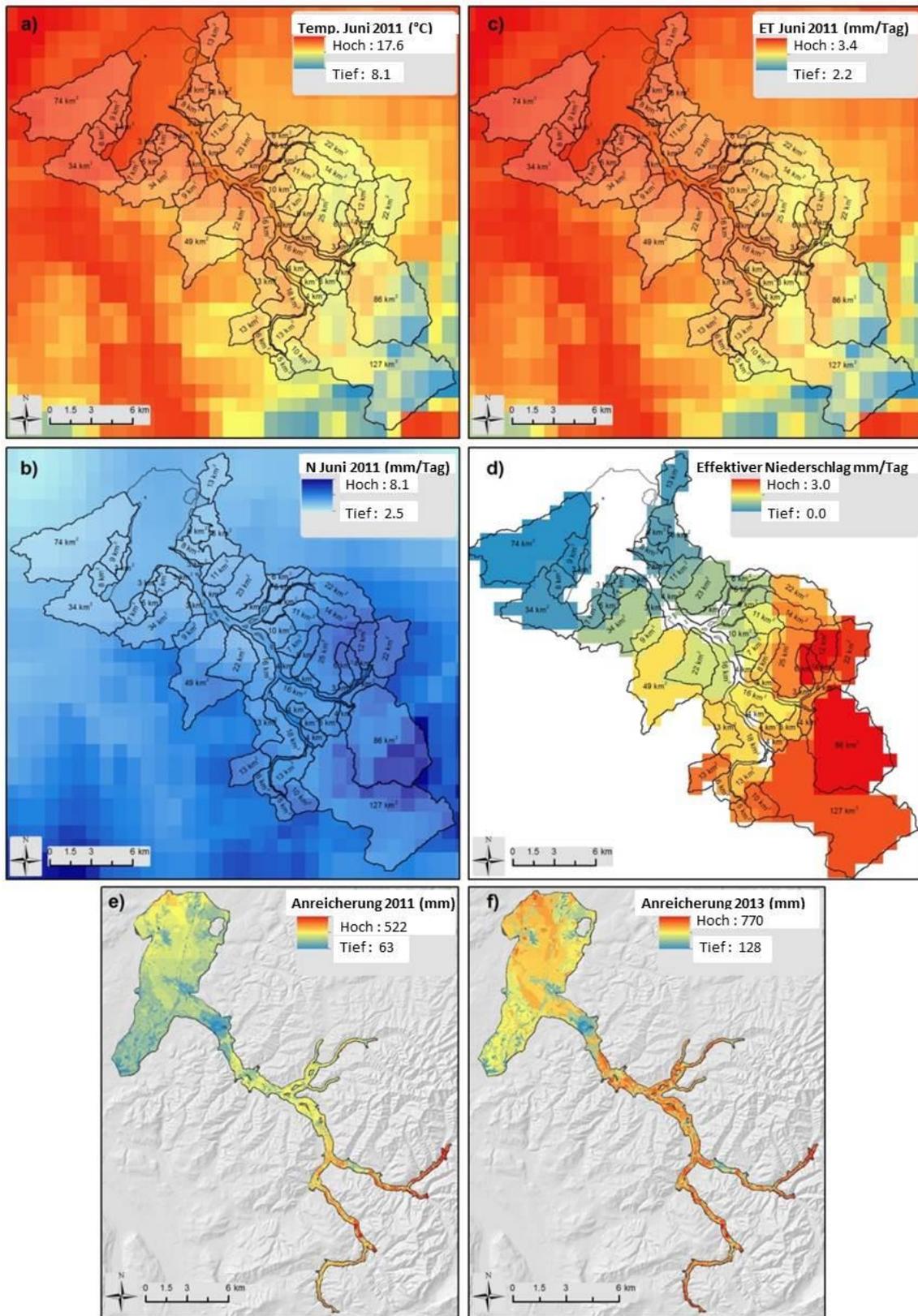


Abbildung 3 : Meteorologische Grid-Daten

a) Monatsmitteltemperaturen, b) Monatsmittelniederschläge, c) Monatsmittel-Evapotranspiration, d) Effektiver Monatsmittelniederschlag für Teileinzugsgebiete, e) Anreicherung 2011, f) Anreicherung 2013

Der zweite Schritt ist die Berechnung des mittleren monatlichen, potenziellen Evapotranspiration  $ETP$  [mm/Monat]. Die Turc-Gleichung (Gl. 1), welche die  $ETP$  aufgrund der Sonneneinstrahlung und Temperatur berechnet wird angewendet.

$$ETP = 0.013 \cdot (R_g) \cdot \left( \frac{T}{T + 15} \right) \quad \text{Gl. 1}$$

Wo  $T$  [°C] die Monatsmitteltemperatur von jeder Raster-Zelle ist und  $R_g$  [mm/Monat] die Sonneneinstrahlung, welche eine Funktion von Breitengrad, Jahrestag und der an der Bern-Zollikofen-Wetterstation beobachteten Monatsmittel-Bewölkung (MeteoSwiss 2014) ist. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 3c dargestellt.

Im dritten Schritt wird der effektive Niederschlag zu berechnet, indem  $ETP$  vom Niederschlag (Abbildung 3b) subtrahiert wird. Diese Berechnungsmethode kann eine Unterschätzung des effektiven Niederschlags bewirken, da angenommen wird, dass die gesamte Menge der  $ETP$  entfernt wird, was nicht unbedingt der Fall ist. Wenn während des Kalibrierverfahrens ein Mangel an direkter Grundwasserneubildung oder seitlichen Grundwasserzuflüssen beobachtet wird, dann können diese geringfügig angepasst werden (siehe Kapitel 4.1 für die Anpassungen).

Im vierten Schritt werden seitliche Grundwasserzuflüsse mit einer Methode berechnet, welche sich von der Abschätzung der Grundwasserneubildung unterscheidet. Der effektive Niederschlag wird für jedes Teileinzugsgebiet ermittelt und schliesslich mit der Teileinzugsgebietsfläche in eine Durchflussmenge umgewandelt (Abbildung 3d). Teileinzugsgebiete mit einer Fläche kleiner als 3 km<sup>2</sup> werden vernachlässigt. Die berechneten, seitlichen Einträge bestehen sowohl aus oberflächlichen als auch als unterirdischen seitlichen Zuflüssen. Diese gilt es zu unterscheiden. Nach einer Untersuchung der oberflächlichen und unterirdischen Durchflussdaten in der Nähe der Roethenbach-Messstation wurde angenommen, dass 10% des Teileinzugsgebietswassers unterirdisch abfließt. Dieser Prozentsatz kann für jedes Teileinzugsgebiet individuell angepasst werden, wenn ein Mangel an Zuflüssen beobachtet würde (siehe Kapitel 4.1 für die Anpassungen).

Um die Grundwasserneubildung durch Niederschlag zu berechnen, wird der zuvor berechnete effektive Monatsniederschlag mit einem Infiltrationskoeffizienten multipliziert (Anhang 2). Dieser Infiltrationskoeffizient soll den Einfluss der Bodenbedeckung (Anhang 3), des Hanges (Anhang 4) und der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens (Anhang 5) auf Menge und Verteilung der Anreicherung einbeziehen. Wie Anhang 2 zeigt, ist der Infiltrationskoeffizient in der Nähe von Burgdorf oder Langnau klein, aufgrund der urbanen Bodenbedeckung, der Topographie und einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit des Aquifers. Umgekehrt kann dort wo die Geländeoberfläche flach ist,

nicht versiegelt ist und eine hohe hydraulische Leitfähigkeit des Bodens aufweist, ein hoher Infiltrationskoeffizient vorgefunden werden. Die Bodenbedeckungsdaten stammen vom Bundesamt für Statistik (SwissStatistics 2015), die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens stammt vom Bundesamt für Landwirtschaft, das Gefälle wurde mit dem DEM berechnet und die Infiltrationskoeffizienten basieren auf der ‚rationalen Methode‘. Abbildung 3e und 3f zeigen die berechnete Anreicherung des Jahres 2011 (trockenes Jahr) und 2013 (feuchtes Jahr).

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, gibt es bedeutende Niederschlags- und Temperaturunterschiede im Studiengebiet. In hoch gelegenen Gebieten sind die Temperaturen tiefer und die Niederschläge höher, umgekehrt sind in tief gelegenen Gebieten die Temperaturen höher und die Niederschlagsmengen geringer. Dies führt zu wichtigen Unterschieden im Wasserhaushalt. Die Verwendung von Temperatur- und Niederschlag-Rasterdaten ermöglicht es, diese Vorgänge zu reproduzieren.

### 3.3 RANDBEDINGUNGEN 3. ART

Abbildung 1 zeigt die Hauptgewässer im Modellgebiet. Um den Austausch zwischen Fließgewässer und Grundwasser  $Q$  [ $L^3T^{-1}$ ] zu modellieren, wurden Randbedingungen 3. Art verwendet, welche wie folgt definiert werden (Gl. 2):

$$Q = A \cdot \theta \cdot (h_{Fluss} - h_{GW}) \quad \text{Gl. 2}$$

Wo  $A$  [ $L^2$ ] die Fläche (in Funktion der Elementgröße),  $\theta$  [ $T^{-1}$ ] der Transferkoeffizient zwischen Fließgewässer und Grundwasser,  $h_{Fluss}$  der Flusspegel und  $h_{GW}$  der berechnete Grundwasserstand ist. Obwohl  $h_{Fluss}$  während der 'Simultanmessung' für die wichtigsten Fließgewässer im Modellgebiet gemessen wurde, wurden die 2-m-Rasterzellen-DEM verwendet um Flussbetthöhen und  $h_{Fluss}$  abzuschätzen, da die gemessenen und simulierten Austauschfluxe in guter Übereinstimmung waren. Des Weiteren wurden die Transferraten während des Kalibrierungsverfahrens geschätzt.

### 3.4 NUMERISCHE PARAMETER

Das Konvergenzkriterium wurde auf  $1 \times 10^{-3}$  für das stationäre und auf  $4 \times 10^{-3}$  für das instationäre Modell festgelegt. Es wurden keine Restriktionen für die Werte der Wasserstände festgelegt, d.h. theoretisch können die Grundwasserstände über dem Gelände oder unter das Niveau des Grundwasserstauers fallen. Die Restwassertiefe zur Berechnung der minimalen Durchlässigkeit, falls der Boden des Grundwasserleiters trocken ist, wurde auf 3 m gesetzt.

## 4 STATIONÄRES MODELL

Das Ziel des stationären Modells ist den mittleren Grundwasserstand während der Simultanmessung vom 21./22. Oktober 2013 zu reproduzieren. Um dies zu erreichen, wurden erstens die für den Monat Oktober berechnete direkte Grundwasserneubildung und die seitliche Grundwasserzuflüsse verwendet. Zweitens wurde PEST für die Kalibrierung der hydraulischen Leitfähigkeiten der hydrogeologischen Zonen (Anhang 1) benutzt. Die Austauschkoefiziente wurden manuell angepasst. Die Porosität wurde im stationären Modell auf 0.2 festgelegt (Porosität ist jedoch für stationäre GW-Strömungsgleichung kein notwendiger Parameter). Zuletzt wurden einige Anpassungen an den seitlichen Grundwasserzuflüssen vorgenommen, für den Fall dass die angewandte Methode zur Schätzung der seitlichen Zuflüsse lokal nicht plausibel war (siehe nächstes Kapitel).

### 4.1 KALIBRIERERGEBNISSE

Um die Qualität der Modellkalibrierung zu prüfen, wurden die simulierten und beobachteten Grundwasserstände, welche am 21./22. Oktober 2013 gemessen wurden (AWA 2013), verglichen. Abbildung 4 zeigt eine Karte mit den Differenzen zwischen simulierten und beobachteten Grundwasserständen, ein Streudiagramm mit den simulierten und beobachteten GW-Ständen und schliesslich eine Verteilung der Fehler. Grundwasserstände innerhalb des Gebietes sind gut reproduziert, mit einer homogenen räumlichen Verteilung eines Fehlers von max.  $\pm 0.5\text{m}$  (grüne Haken). Der mittlere absolute Fehler (MAE) liegt bei  $0.54\text{m}$ . Im Massstab dieser Studie wird ein Fehler von  $\pm 0.5\text{m}$  als eine sehr zufriedenstellende Kalibrierung angesehen. Die Fehlerverteilung zeigt auch, dass die meisten Ungenauigkeiten zwischen  $\pm 1\text{m}$  liegen, was akzeptabel ist. Nur 12 Beobachtungspunkte befinden sich ausserhalb dieses Bereichs. Der Grund für die Ungenauigkeiten an diesen Stellen ist unklar. Möglich ist eine Kombination von mehreren Umständen, wie eine unsichere Flusspegelschätzung, Unsicherheiten bezüglich Lage und Ausdehnung der geologischen Zonen oder lokal falsche Bewertung der seitlichen Grundwasserzuflüsse. Jedoch gehen wir davon aus, dass die 3 Grundwasserstände zufriedenstellend kalibriert wurden. Anhang 1 zeigt die durch die Kalibration berechneten hydraulischen Leitfähigkeiten.

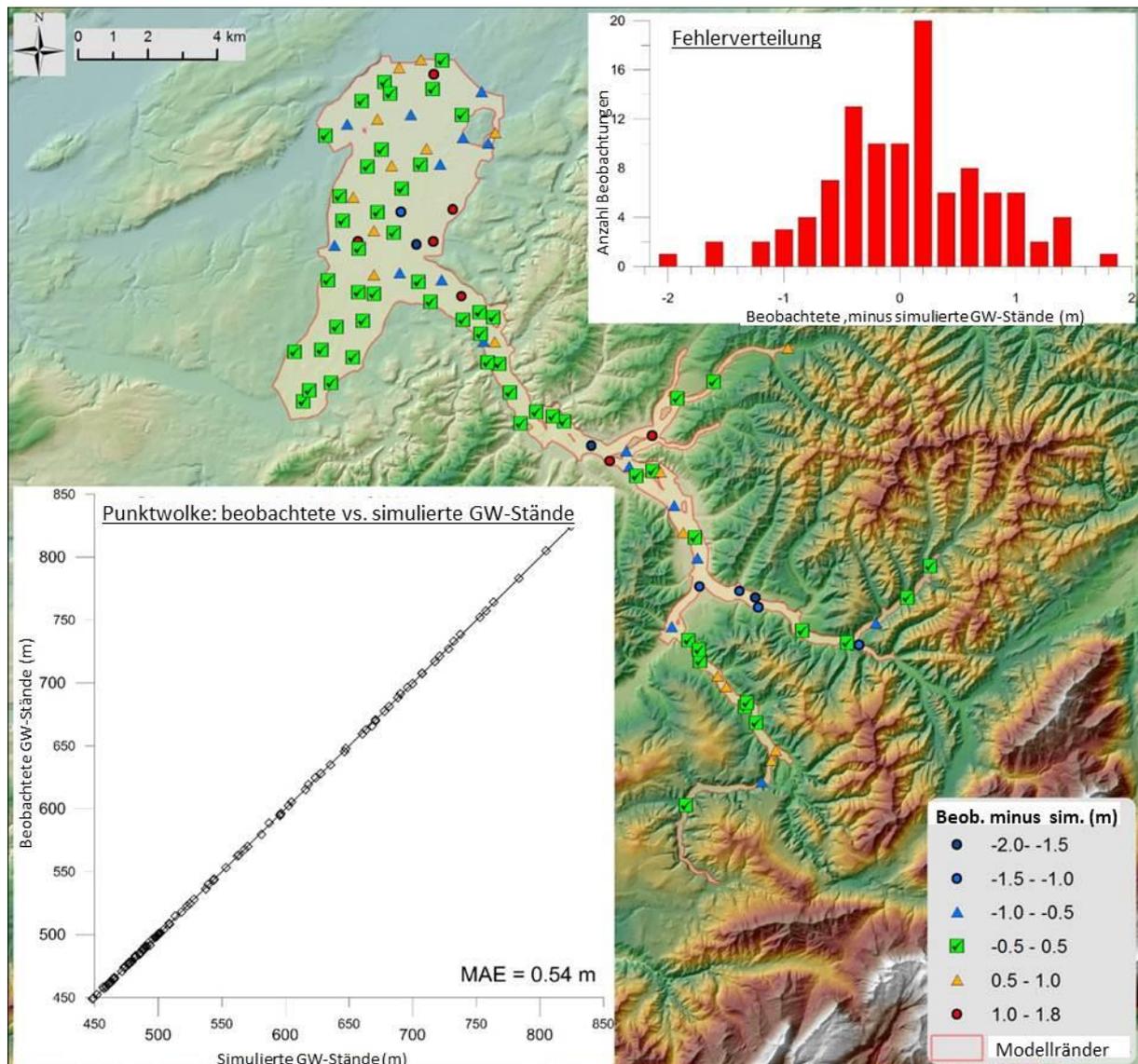


Abbildung 4 : Beobachtete vs. simulierte GW-Stände

Eine zusätzliche Analyse des Modells besteht aus einem Vergleich zwischen simulierten und geschätzten Grundwasserabflüssen (Querprofile). Dieser Vergleich wird in Abbildung 5 gezeigt. Die Resultate zeigen, dass das Modell generell in der Lage ist, GW-Durchflüsse durch Querschnitte zu reproduzieren. Die genauen Durchflussmengen gemäss den Blauen Berichten wiederzugeben war in diesem grossen und heterogenen Modellgebiet nicht möglich, da verschiedene komplexe Prozesse im Modell vereinfacht werden mussten (zum Beispiel die seitlichen Grundwasserzuflüsse, Fluss-Grundwasser-Wechselwirkungen, etc). Zudem stammen die geschätzten Durchflüsse in den Blauen Berichten aus verschiedenen Zeiträumen und Jahreszeiten von 1972 bis 2001, was im Vergleich zum modellierten Zeitraum zu bedeutenden Differenzen führen kann. Die Grössenordnung des GW-Durchflusses wird jedoch - mit einer Ausnahme - im gesamten Modellgebiet reproduziert, was eine gute allgemeine Modellwiedergabe bedeutet. Im Gebiet flussabwärts von Langnau i.E können die

GW-Durchflüsse nur unzureichend wiedergegeben werden. Warum der simulierte GW-Durchfluss dort rund drei mal kleiner als beobachtet ist, ist schwierig zu beurteilen. Umso schwieriger ist zu verstehen, weshalb das Modell den GW-Durchfluss unterschätzt, weil die simulierten GW-Stände dort auch etwas zu hoch sind. Wären die simulierten GW-Stände zu tief, könnten wir darauf schliessen, dass die Zuflussraten von Fluss, Anreicherung oder seitlichen Rändern nicht ausreichend waren, aber in unserem Fall ist der Durchfluss zu tief und die GW-Stände zu hoch. Das konzeptionelle Modell in diesem Gebiet ist wahrscheinlich unzureichend den lokalen Gegebenheiten angepasst.

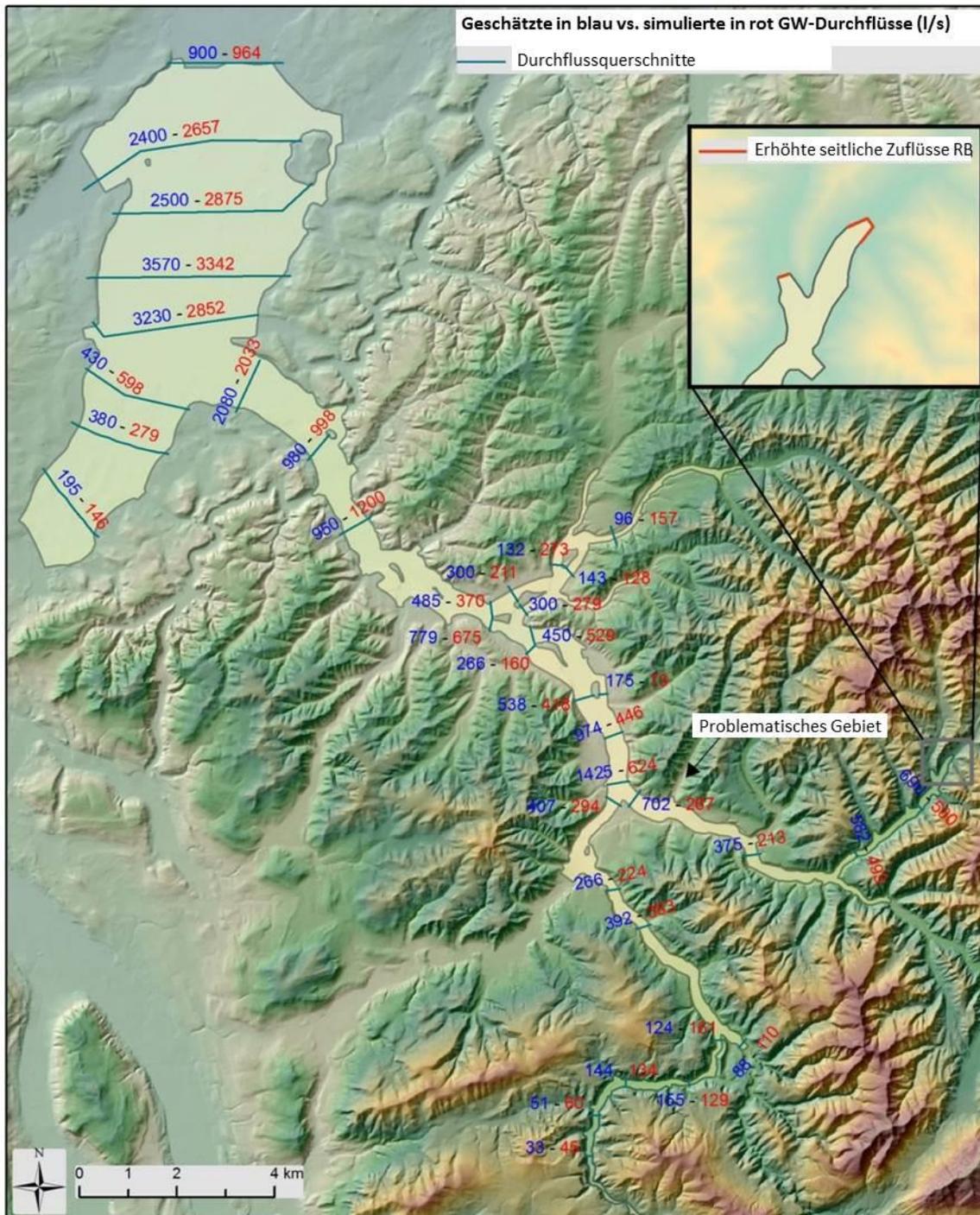


Abbildung 5 : Beobachtete vs. simulierte GW-Durchflüsse. Zusätzlich sind die Änderungen der Zufluss-RB des konzeptionellen Modells eingezeichnet (s. Diskussion unten)

Um die gute Performance des Modells zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 6 die beobachteten und simulierten Fluss-Grundwasserleiter-Wechselwirkungen. Die roten Linien repräsentieren Flussabschnitte, wo der Fluss den Grundwasserleiter anreichert, und die grünen Linien die Abschnitte, wo der Fluss den Grundwasserleiter drainiert. Wie in der Abbildung ersichtlich, reproduziert das Modell sehr gut die Gebiete der Infiltration und Exfiltration und ihre Wechselfolgen.

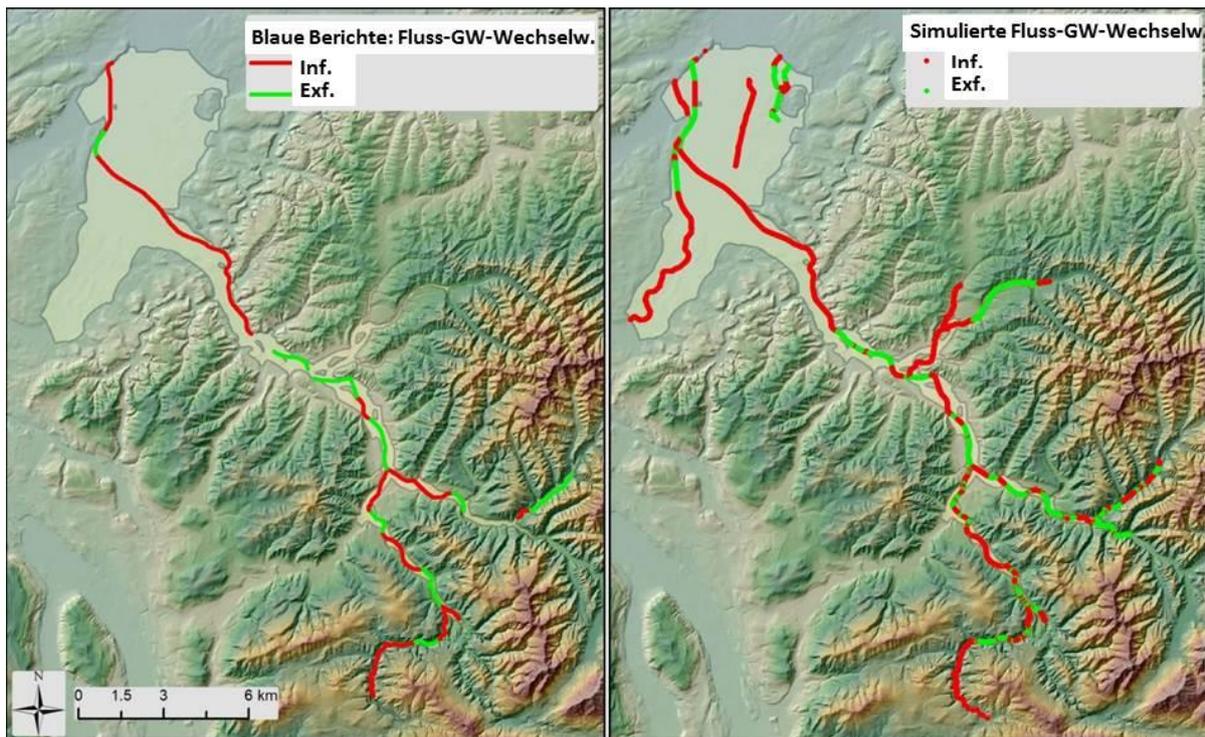


Abbildung 6 : Fluss-Infiltration oder -Exfiltration, a) beobachtete Wechselwirkungen (Blaue Berichte) und b) simulierte Wechselwirkungen

Schliesslich ist zu beachten, dass drei stromaufwärts des Trübtals gelegene Zufluss-RB angepasst wurden. In der Tat war der simulierte GW-Abfluss zu niedrig um mit der Schätzung übereinstimmen zu können. Darum wurden zwei Zufluss-RB in diesen beiden Seitentälern erheblich erhöht (um 600%, siehe Abbildung 5).

## 4.2 WASSERBILANZ

Abbildung 7 zeigt den simulierten Wasserhaushalt. Die Flussinteraktion spielt die wichtigste Rolle in den Grundwasserszuflüssen. Der Zufluss durch die Fliessgewässer beträgt etwa 3'000 l/s, die Niederschlagsanreicherung beträgt mit einem Zufluss von 1'450 l/s ca. die Hälfte davon und die seitlichen GW-Zuflüsse betragen etwa 2'500 l/s. Der grösste Teil der Exfiltration findet im unteren

Teil des Studiengebiets statt (siehe Kapitel 2) und beträgt etwa 3'200 l/s. Der Anteil der Exfiltration des GW in die Fließgewässer beträgt etwa 2'000 l/s, die Pumpförderrate 1'000 l/s und wie zuvor gezeigt der Versickerungsdurchfluss 964 l/s.

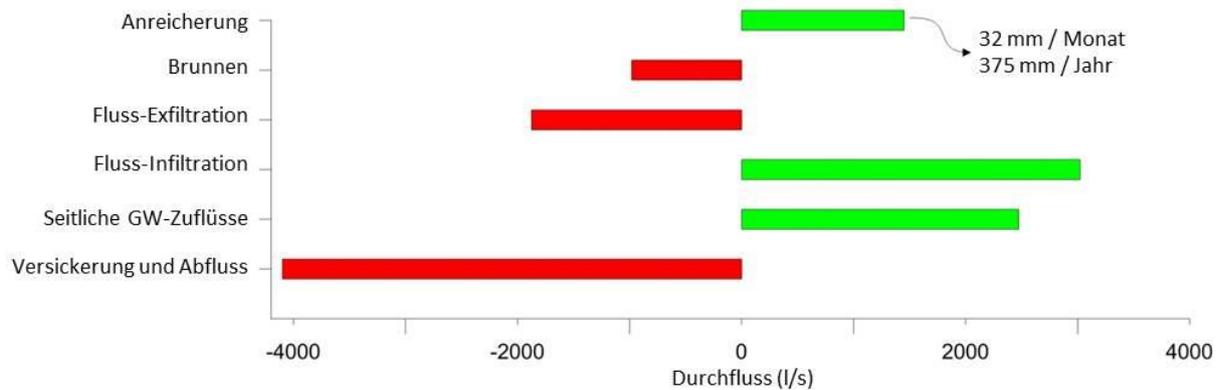


Abbildung 6 : Simulierte Wasserbilanz

### 4.3 MODEL KONVERGENZ

Das Modell hat über das ganze Gebiet zufriedenstellend konvergiert, ausser im Abschnitt des Dürrbachtals, östlich von Grünenmatt. In diesem schmalen Seitental ist das Modell nicht in der Lage zu konvergieren. Dies liegt eventuell an einer unzureichenden Elementverfeinerung, die numerische Instabilitäten zur Folge haben kann. In Übereinstimmung mit der AWA wurden die Elemente des Dürrbachtals deaktiviert. Dieses Problem könnte jedoch gelöst werden, wenn für diesen Abschnitt ein lokales Modell mit einer erhöhten Netzverfeinerung entwickelt würde. Ausserdem könnte die Anwendung einer Fluss-RB, welche den Dürrbach (Fluss) repräsentiert, ebenfalls helfen die Modelkonvergenz zu vereinfachen. Zum heutigen Zeitpunkt liegen für diesen Modellabschnitt jedoch zu wenig hydrogeologische Informationen vor.

## 5 INSTATIONÄRES MODELL

Das Hauptziel des instationären Modells ist, die Abbildung der Grundwasserdynamik und der Grundwasserstände bei niedrigen und hohen Durchflussperioden. Das Modell wurde für den Zeitraum vom 1. Januar 2010 bis 31. Dezember 2013 erstellt, da das Jahr 2011 ein trockenes und 2013 ein niederschlagreiches Jahr war. Auf diese Weise können einerseits die minimalen Wasserstände des Jahres 2011, und andererseits die maximalen Wasserstände des Jahres 2013 abgebildet werden.

### 5.1 MODELLEINSTELLUNGEN

Um die instationären Prozesse zu simulieren, wurden mehrere Anpassungen am stationären Modell vorgenommen. Um die tägliche Anreicherung durch Niederschlag zu erhalten, wurde zuerst die gesamte Grundwasserneubildung für den Zeitraum vom 1. Januars 2010 bis zum 31. Dezember 2013 berechnet, indem jede zuvor berechnete mittlere Monatswerte kumuliert wurden (siehe Kapitel 3.2). Danach wurde die Gesamtanreicherung mit einem täglichen Anreicherungskoeffizienten multipliziert, um einen täglichen Anreicherungswert zu erhalten. Der tägliche Anreicherungskoeffizient wurde wie folgt berechnet:

$$\text{Täglicher Anreicherungskoeffizient} = \frac{\tau}{\sum_{2010-2014} \tau} \quad \text{Gl. 3}$$

Wo  $\tau$  [L] der von MeteoSwiss berechnete Wasserhaushaltskoeffizient ist. Dieser Koeffizient ist gleich dem täglichen Regen minus der täglichen an der Berner-Zollikofen-Wetterstation beobachteten ET. Abbildung 8 zeigt den berechneten, täglichen Anreicherungskoeffizient (Zeitreihen #302 im Modell).

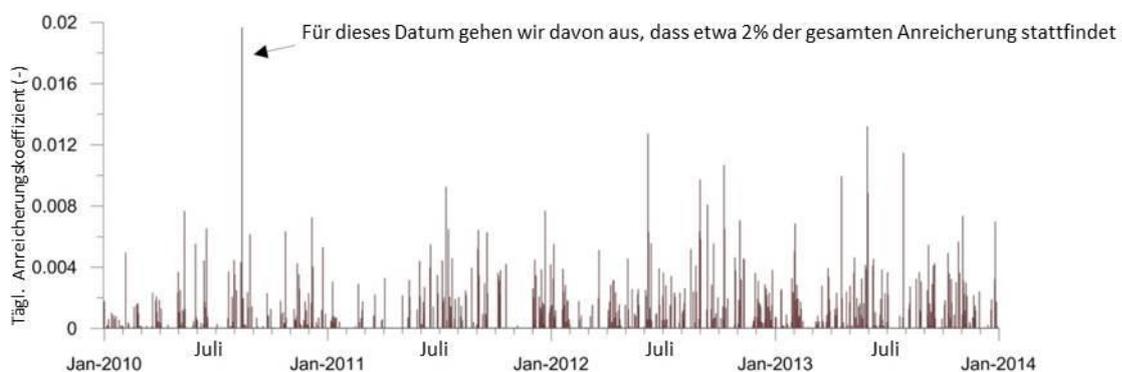


Abbildung 8: täglicher Anreicherungskoeffizient

Auf diese Weise wird die Anreicherung ohne die täglichen Rasterdateien zeitlich verteilt. Zweitens wurden die Cauchy-Fluss-RB durch Erhöhung oder Senkung des Transferkoeffizienten angepasst.

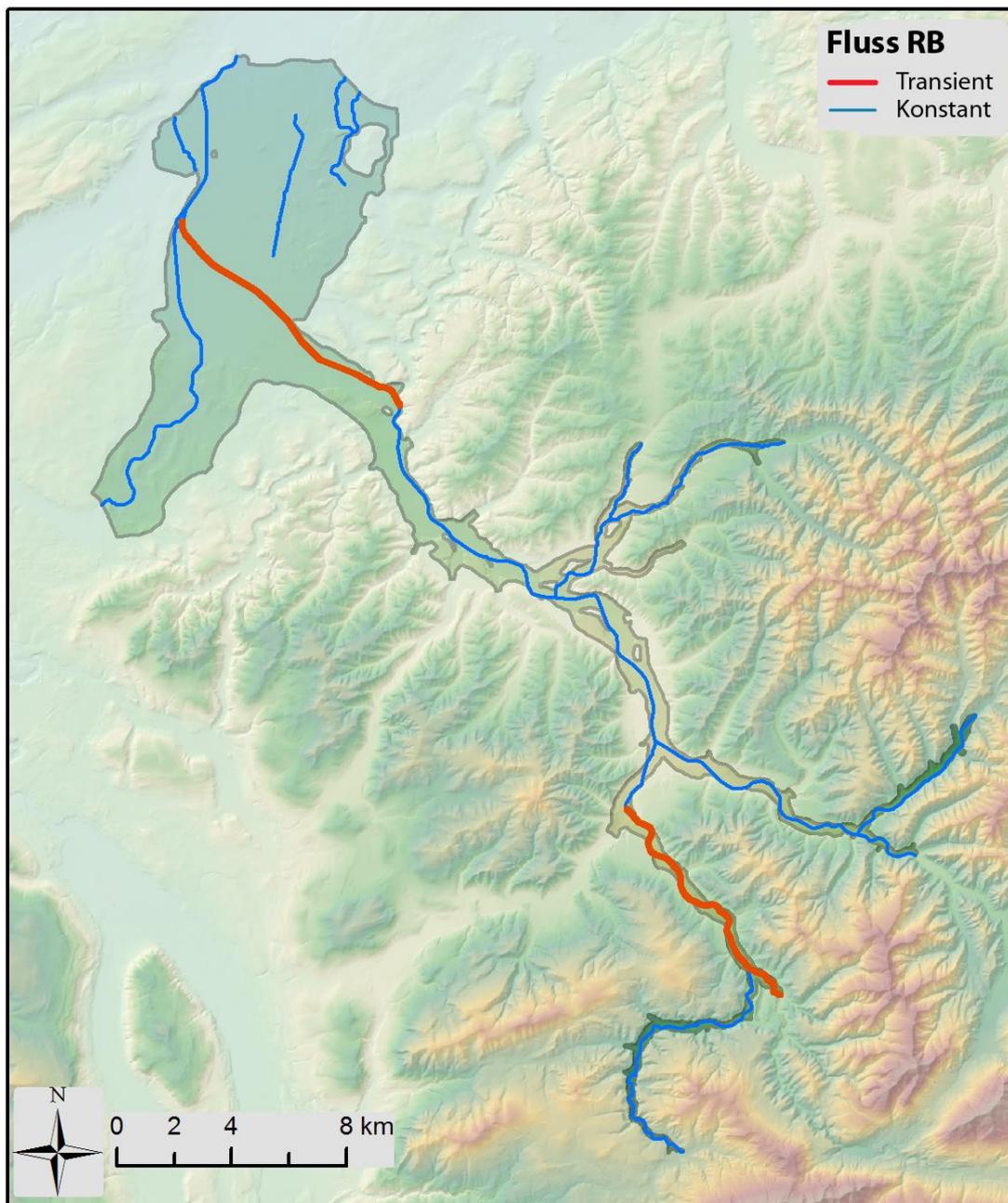


Abbildung 9 : Fluss-RB des Modells

Entlang der Emme und Ilfis wurden nicht alle Fluss-RB in der transienten Form verwendet. Dies, weil ihr Einfluss auf die simulierten Ergebnisse unbedeutend war (in den mittleren und oberen Abschnitten) und sie die Modellkonvergenz verlangsamt. Abbildung 9 zeigt Flussabschnitte wo konstante und transiente Flussrandbedingungen verwendet wurden. Zur Veranschaulichung der Wirkung der transienten oder konstanten Fluss-RB zeigt Abbildung 10 die G240-Abflussganglinie mit transientem und konstantem Flusspegelstand. Man sieht, dass die grüne Linie mit den Ergebnissen der transienten Fluss-Daten nicht dynamischer ist und die Ganglinie nicht genauer darstellt. Für die instationären Abschnitte der Emme und der Ilfis wurde  $h_{Fluss}$  mit den BAFU-Flusspegelständen und

einem speziellen 2m-Rasterzellen-DEM mit sehr genauen Flussprofilen (DEM-Gerinneschläuche) berechnet. Die Berechnung selbst basiert auf der linearen Regression zwischen den Messstationen und wurde mit ArcGIS und Python erzeugt.



Abbildung 10 : Fluss-RB des Modells - Abflussganglinie

Die mittleren monatlichen GW-Seitenzuflüsse (Kapitel 3.2) wurden an den Modellrändern ohne Anpassungen übernommen. Schliesslich wurde der berechnete Grundwasserstand des stationären Modells als Ausgangszustand des instationären Modells verwendet. Die Kalibrierung bestand im Wesentlichen aus kleineren manuellen Anpassungen der Fluss-Transferkoeffizienten und der zuvor im stationären Zustand kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeiten. Die Porosität wurde im stationären Modell auf 0.2 gesetzt. Diese wurde manuell für das instationäre Modell angepasst und variiert zwischen 0.1 und 0.37 (s. Anhang 6).

## 5.2 ERGEBNISSE DER KALIBRIERUNG

Um die Kalibrierung zu validieren, wurden die Daten von 31 Grundwassermessstellen verwendet (Abbildung 11). Anhang 7 zeigt die simulierten und beobachteten GW-Stände nach der Kalibrierung. Zuerst wird die Genauigkeit des Modells in Bezug auf die Dynamik gezeigt, dann seine Grenzen besprochen.

Als erstes sehen wir, dass die Piezometer G241, NTG01 oder G236 mit hauptsächlich von seitlichen Grundwasserzuflüssen beeinflusster Dynamik korrekt wiedergegeben werden. Des Weiteren werden die Piezometer mit hauptsächlich von Fluss-Grundwasserleiter-Wechselwirkungen beeinflusster Dynamik ebenfalls gut wiedergegeben. Das bedeutet, dass das Modell grundsätzlich in der Lage ist die Grundwasserdynamik zu reproduzieren. Mit Ausnahme der Piezometer G131 und G206, liegen die maximalen Unterschiede zwischen den simulierten und beobachteten GW-Ständen im Bereich

von  $\pm 1\text{m}$ . In diesem grossen und heterogenen Modellgebiet ist es schwierig eine noch bessere Übereinstimmung zu erreichen. Die Gesamtergebnisse erachten wir als sehr zufriedenstellend.

Im Anhang 7 sehen wir zwei Messstellen mit einer begrenzten Wiedergabe der Dynamik oder mit Abweichungen von mehr als  $\pm 1\text{m}$  (G131, G206).

Bei G131 sehen wir, dass die simulierten GW-Stände weniger dynamisch sind als die beobachteten. Der simulierte Unterschied zwischen den minimalen und maximalen GW-Ständen ist etwa 1m anstatt 2m. Dies liegt wahrscheinlich an einer unzureichenden Wiedergabe der Wechselwirkungen zwischen dem Grundwasserleiter und dem Oberholzbach und an einer unzureichenden Wiedergabe der Form des Grundwasserleiters in der Nähe des Messpunktes.

Bei G206 ist im Liniendiagramm ersichtlich, dass der Mindestwasserstand gut wiedergegeben wird aber der Maximalwasserstand um etwa 1 m unterschätzt wird. Allgemein ist der simulierte GW-Stand zu flach verglichen mit den Beobachtungen. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die Fluss-RB im konzeptionellen Modell die Wechselwirkung zwischen Grundwasserleiter und Oesch-Fluss mangelhaft darstellen. Die Annahme könnte in einem nächsten Schritt mit neuen Fluss-RB in diesem Gebiet getestet werden.

Schliesslich möchten wir die Aufmerksamkeit auf die im Ilfistal und im Tal der Grüene erhaltenen Ergebnisse lenken. In diesen Gebieten gibt es keine transiente Beobachtungsdaten, um die Kalibrierung zu validieren, und die GW-Dynamik kann je nach Lage des Messpunktes deutlich anders sein (z. Bsp. G241 und G240). Daher sollten die Modellergebnisse in diesen Gebieten mit grosser Vorsicht angewendet werden.

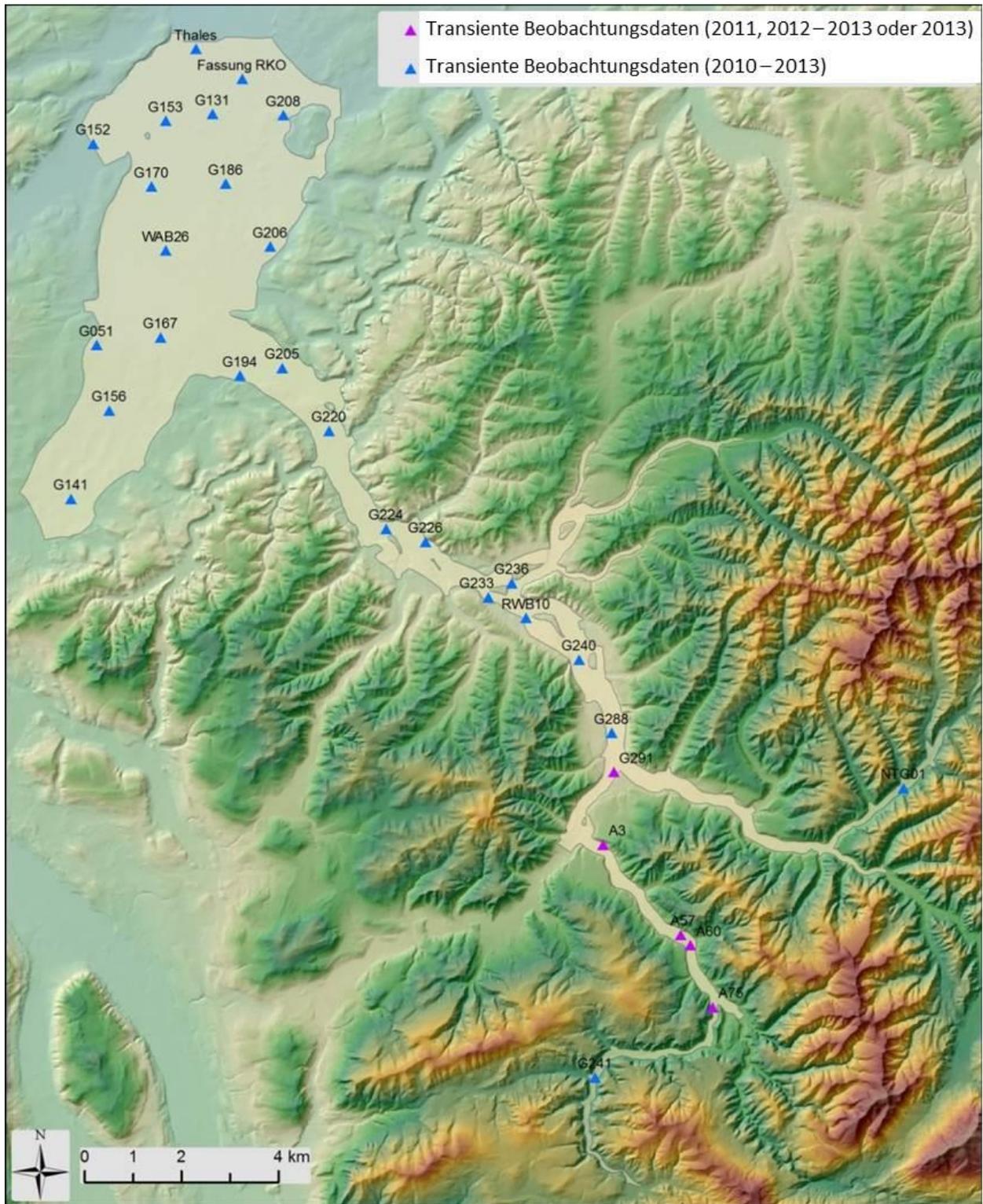


Abbildung 11 : Grundwassermessstellen

## 6 HOHE, MITTLERE UND TIEFE GW-STAND-KARTEN

Ein Hauptziel dieses Projektes bestand darin, Karten der minimalen, mittleren und maximalen Grundwasserstände zu erstellen. Wie im Kapitel 5.2 dargelegt, stellt das transiente Modell die GW-Dynamik gut dar. Jedoch bestehen in manchen Gebieten, z.B. bei der Grundwassermessstelle G206, Unstimmigkeiten zwischen den simulierten und den beobachteten GW-Stände. Um diese Unstimmigkeiten zu reduzieren, wurden für die Kartendarstellung die Ergebnisse sowohl des stationären wie auch des instationären Modells verwendet.

Als Erstes wurde versucht, Zeiträume mit minimalen, maximalen und mittleren Grundwasserständen im transienten Modell zu bestimmen. Dies war jedoch nicht möglich, da im Studiengebiet Gebiete mit unterschiedlichen Dynamiken vorkommen und minimale, mittlere und maximale GW-Stände je nach Gebiet nicht zur gleichen Zeit auftreten. Im Gegensatz zum Pilotmodell des Unteren Emmentals konnte diese Vorgehensweise hier nicht angewendet werden.

Wir gehen davon aus, dass das stationäre Modell im ganzen Modellgebiet einen mittleren Grundwasserstand repräsentiert. Die Simultanmessung vom 21./22. Oktober 2013 wurde eigens zu diesem Zeitpunkt festgelegt. Für die Kartendarstellung des mittleren GW-Standes wird deshalb das Ergebnis des stationären Modells verwendet.

Um Karten für den minimalen und maximalen Grundwasserstand zu erzeugen, wurden die mit dem instationären Modell simulierten transienten GW-Stände verwendet. Für die minimalen, mittleren und maximalen GW-Stände entwickelte FEFLOW eigens ein Plugin, welches die Entnahme von maximalen, mittleren und minimalen GW-Ständen an jedem Netzknoten über den ganzen Simulationszeitraum ermöglicht. Diese Resultate wurden ebenfalls für die Kartendarstellung der minimalen und maximalen GW-Stände benutzt.

Dazu wurden mit dem instationären Modell die simulierten relativen GW-Stände zwischen maximalen (A in Abbildung 12, minimalen (B in Abbildung 12) und mittleren GW-Stände berechnet (Plugin FEFLOW). Anschliessend wurden die Differenzen A und B zu zum stationären GW-Stand addiert, beziehungsweise subtrahiert (mittlerer GW-Stand). Auf diese Weise wird die genauere Kalibrierung des stationären Modells berücksichtigt, um die Abweichungen im instationären Modell zu verringern.



Abbildung 12 : Mittlerer, maximaler und minimaler Grundwasserstand

### 6.1 KORREKTUREN AN DEN KARTEN FÜR HOCH- MITTEL- UND TIEFSTAND

Da die berechneten GW-Stände nicht durch die Höhe des Grundwasserstauers begrenzt wurden, können diese im Modell unter das Niveau des Grundwasserstauers sinken (Abbildung 13). Um diese Situation zu vermeiden wurden lokal Korrekturen an den finalen Kartendarstellungen vorgenommen. An Stellen wo die simulierten GW-Stände tiefer lagen als der Grundwasserstauer, wurde die Höhe des Stauers als neuer GW-Stand festgelegt. Diese Korrekturen traten nur im oberen Teil des Röthenbachtals auf (weitere Details im Kapitel 6.2) und entlang einiger Stellen am Rand des Grundwasserleiter.

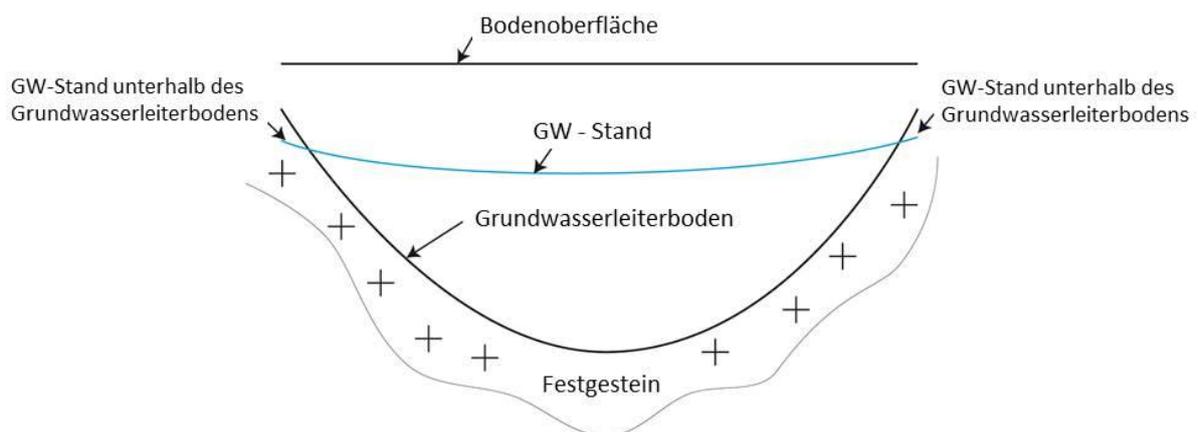


Abbildung 13 : Kartenkorrekturen

## 6.2 AUSWERTUNG

Abbildung 14 zeigt die simulierten Unterschiede zwischen den minimalen und maximalen GW-Ständen (GW-Schwankungskarte). Die Amplituden der Grundwasserschwankungen stimmen grundsätzlich mit den Beobachtungen überein.

Jedoch gibt es einige Gebiete mit deutlichen Amplituden, für welche keine transienten Daten vorliegen und aus hydrogeologischer Sicht unrealistisch erscheinen. Diese Zonen wurden in Abbildung 14 grün markiert. Diese Gebiete betreffen vor allem seitliche Täler wo Zuflüsse während hohem Durchfluss signifikant sein können und somit bei hohem Durchfluss zu hohen GW-Ständen führen. Hier sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um diese Prozesse zu validieren (siehe Kapitel 8 für Modellverbesserungsvorschläge).

Rot markierte Gebiete entlang der Modellränder entsprechen Gebieten, wo der Grundwasserspeicher auch während hohem Durchfluss trocken bleibt. Diese Gebiete sollten in der Grundwasserkarte ausgeschnitten werden, da hier kein Grundwasser vorliegt.

Die blau markierten Zonen entsprechen den Gebieten wo der Grundwasserleiter ebenfalls während der meisten Zeit trocken bleibt, aber die Dynamik in diesen Gebieten (noch) nicht eindeutig verstanden wird. Im Moment ist es nicht möglich, hinreichend genaue Vorhersagen in diesen Gebieten zu machen (siehe Kapitel 8 für Modellverbesserungsvorschläge).

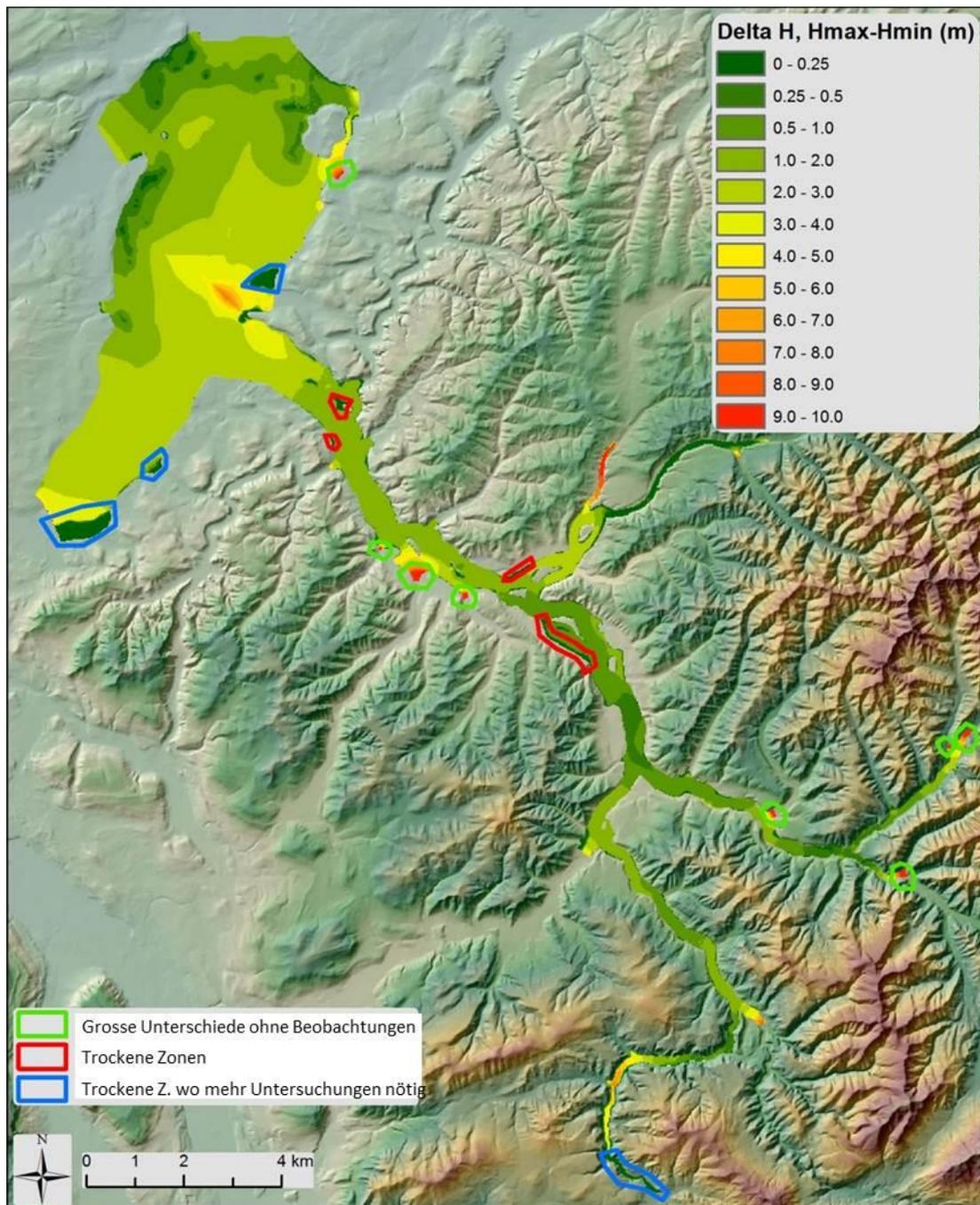


Abbildung 14 : Berechnete Unterschiede zwischen Hmax und Hmin

Schliesslich zeigt Abbildung 15 den Flurabstand, welcher vom Modell während hohem Durchfluss simuliert wurde. Man sieht, dass dieser je nach Standort deutlich variiert. Gebiete, in welchen das Grundwasser gemäss Modell über OK Terrain liegt, sind rot markiert. Diese Gebiete befinden sich vorwiegend entlang Seitentälern, wo Zuflüsse beträchtlich sein können. Gemäss Modell würde das Grundwasser hier an die Oberfläche exfiltrieren, was jedoch nicht der Fall ist. Zudem könnten diese Zonen lokal gespannt sein, wie dies z.B. im obersten Teil des Trubtals effektiv der Fall ist. Im Modell wird jedoch angenommen dass der gesamte Aquifer ungespannt ist. Nach mehreren Versuchen

konnten die GW-Stände in diesen Gebiete reduziert werden, indem der Grundwasserstauer nochmals überprüft und örtlich tiefer gesetzt wurde (im Einvernehmen mit der AWA). Gewisse Unstimmigkeiten bleiben jedoch bestehen. Die Gründe werden im Moment noch nicht verstanden. Lokale Untersuchungen würden helfen, ein besseres Verständnis zu erlangen (siehe Kapitel 8 für Modellverbesserungsvorschläge).

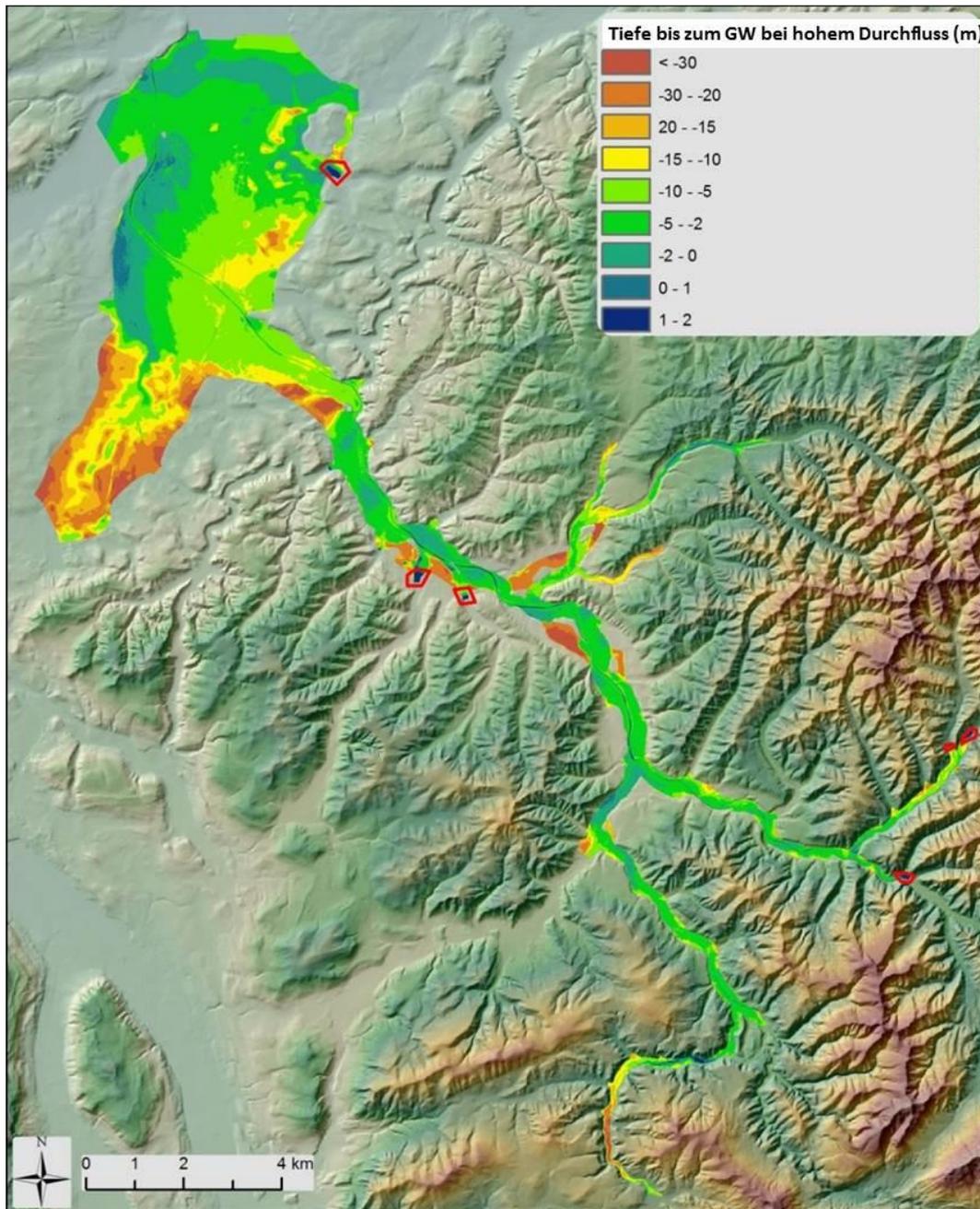


Abbildung 15 : Flurabstand während hohen Durchfluss-Perioden

### 6.3 ZUVERLÄSSIGKEIT DES MODELS

In einigen Gebieten gibt zu wenig oder gar keine Beobachtungspunkte um die minimalen, mittleren und maximalen simulierten Grundwasserstände validieren zu können. Abbildung 16 zeigt Gebiete, wo die Modellergebnisse deshalb mit Vorsicht verwendet werden sollten.

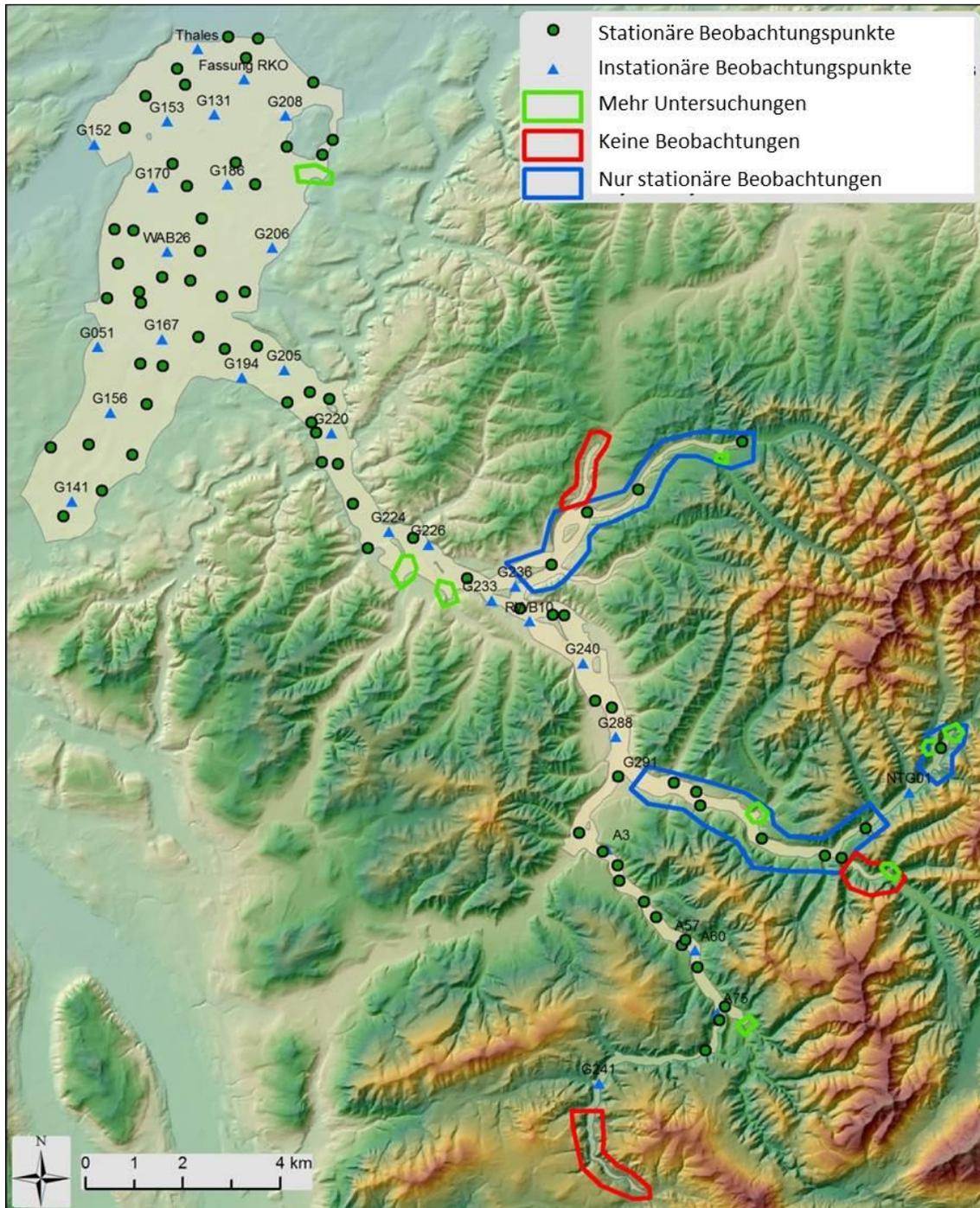


Abbildung 16 : Zonen mit unzureichender Datengrundlage

In den blau markierten Gebieten fehlen transiente Beobachtungspunkte um die Dynamik zu validieren. Es wird deshalb empfohlen, hier nur die Karte des mittleren Grundwasserstandes zu verwenden.

In den rot markierten Gebieten fehlen sowohl transiente wie auch stationäre Beobachtungspunkte zur Modellvalidierung. In diesen Gebieten sollten die Modellergebnisse nicht verwendet werden.

In den grün markierten Gebieten, wo die Dynamik der Zuflüsse nicht genügend gut verstanden wird und es keine Beobachtungspunkte für ein besseres Verständnis gibt, wird empfohlen nur die Karte des mittleren Grundwasserstandes zu verwenden.

Es wird zudem nicht empfohlen, lokale Ergebnisse in unmittelbarer Nähe von Modellrandbedingungen zu benutzen. Ersteres, weil jede Randbedingung eine konzeptionelle Sichtweise der Realität ist und lokal falsch geschätzt sein könnte. Zweitens können Randbedingungen lokal numerische Instabilitäten bewirken und daher Resultate hervorbringen, welche nicht im Einklang mit der Realität sind. Dies kann zum Beispiel für die eingekreisten Gebiete in Abbildung 15 der Fall sein.

Des Weiteren sollte im Auge behalten werden, dass das Modell als grosskaliges Model konzeptiert wurde und somit lokale Prozesse nicht im Detail simuliert werden können. Lokale Betrachtungen könnten lokal zu falschen Ergebnissen führen. Falls detailliertere Ergebnisse benötigt werden, muss ein Modell in kleinerem Massstab entwickelt werden. Das vorliegende Modell stellt hierfür jedoch eine gute Grundlage dar.

## 7 ANWENDUNG DES MODELLS

In diesem Kapitel wird ein Beispiel gezeigt, wie das Modell für eine konkrete Fragestellung benutzt werden kann. Um die Leistung des Modells zu veranschaulichen, wird die Auswirkung eines Renaturierungsprojektes an der Emme in der Nähe von Altwyden simuliert (Abbildung 17).

Der Ansatz besteht aus den folgenden Schritten:

1. Erstellung eines Modells, das den aktuellen Zustand darstellt, ohne Renaturierung.
2. Erstellung eines Modells, das den zukünftigen Zustand darstellt, mit Renaturierung.
3. Die aktuellen und zukünftigen Ergebnisse wurden verglichen, um die Auswirkungen der Renaturierung zu beurteilen.

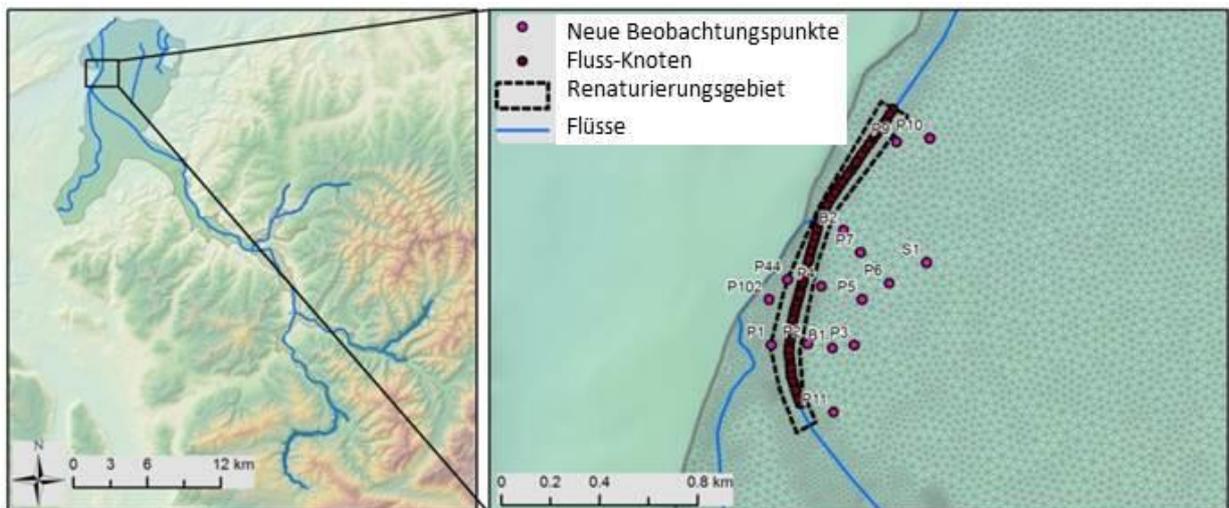


Abbildung 17 : Lageplan des Renaturierungsprojektes

### 7.1 METHODIK UND MODELLEINSTELLUNGEN

Das Modell des aktuellen Zustands wurde mit dem kalibrierten instationären Modell erstellt. Es wurden keine Änderungen am Modell vorgenommen mit Ausnahme, dass neue Beobachtungspunkte hinzugefügt wurden (Abbildung 17) und der Simulationszeitraum von 2010-2013 auf 2010 reduziert wurde. Durch die Renaturierung wird erwartet, dass sich das Flussbett in Bezug auf die In- und Exfiltrationsverhältnisse verändert. Um dies im Modell wiederzugeben, wurde angenommen, dass der Fluss nach den Renaturierungsarbeiten hydraulisch vollständig an den Grundwasserleiter angebunden sein wird. Zu diesem Zweck wurden die Fluss-Knoten-RB (Abbildung 17), die im Modell des aktuellen Zustands als 3. Art RB festgelegt sind, durch 1. Art RB ersetzt. Auf diese Weise wird eine direkte Verbindung zwischen den Fluss und den Grundwasserleiter hergestellt. Das Modell für den Zustand nach der Renaturierung wurde ebenfalls auf das Jahr 2010 beschränkt, um einen direkten

Vergleich der zukünftigen und aktuellen Zustände unter den gleichen Bedingungen vornehmen zu können (Anreicherung und seitliche Zuflüsse). Eine eventuelle seitliche Verlagerung der Emme während den Renaturierungsarbeiten und der Einfluss von mehreren kleinen Fließgewässern und austretenden Quellen in der Umgebung wurden in dieser Studie nicht speziell berücksichtigt.

## 7.2 ERGEBNISSE

Abbildung 18 zeigt die Grundwasserstandänderungen nach der Renaturierung. Diese Karte wurde erstellt, indem die simulierten GW-Stände vor der Renaturierung von den GW-Ständen nach der Renaturierung subtrahiert wurden ( $H_{\text{nachher}} - H_{\text{vorher}}$ ). Für die Darstellung in Abbildung 18 wurden die GW-Stände vom 6. Juni 2010 gewählt. Wir sehen, dass eine Abnahme der GW-Stände im nördlichen und mittleren Teil des Studiengebiets und eine Zunahme der GW-Stände in einem kleinen südlichen Teil des Studiengebiets stattfinden. Die maximale Abnahme, die sich knapp unterhalb des Flusses befindet, beträgt 1.7 m, die maximale Zunahme etwa 0.8m und kleine Schwankungen (ca. - 0.05 m) sind bis in eine Entfernung von 2km zu beobachten. Die "vorher" und "nachher" an den Beobachtungspunkten simulierten GW-Stände sind im Anhang 8 dargestellt. Der Anhang 9 zeigt die "vorher" und "nachher" simulierten GW-Stände für die Querschnitte gemäss Abbildung 18. Änderungen der GW-Stände entlang der Emme werden ebenfalls im Anhang 9 gezeigt.

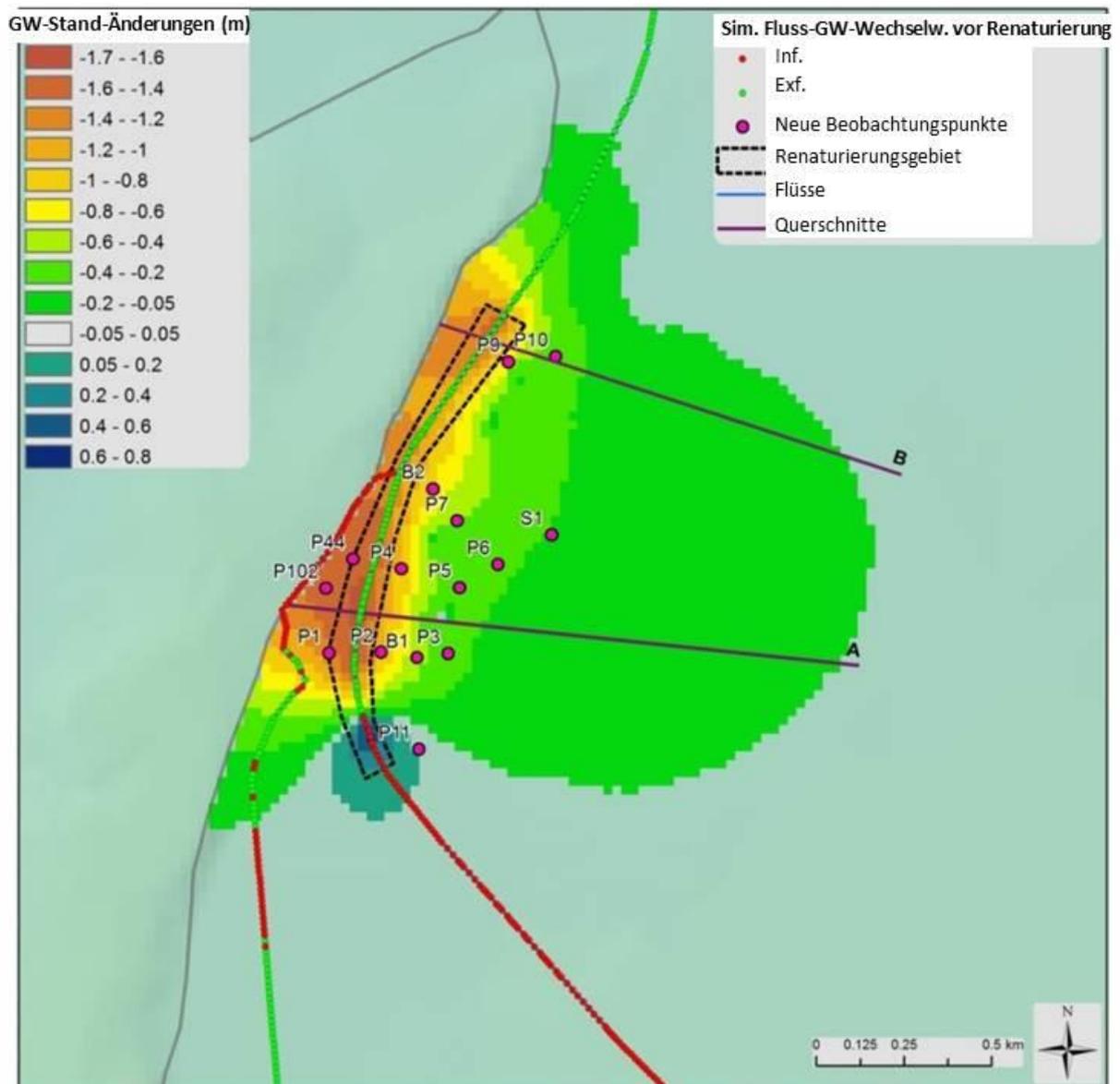


Abbildung 18 : Grundwasserstandänderungen nach der Renaturierung

Abbildung 18 zeigt auch, dass vor der Renaturierung der grösste Teil des Flussabschnitts den Grundwasserleiter drainiert (grüne Punkte). In jenem Teil, welcher oberhalb des Stauwehrs liegt, wird der Grundwasserleiter angereichert (rote Punkte). Nach der Renaturierung wird erwartet, dass das veränderte Flussbett diesen Vorgang verstärken wird. So werden nach den Renaturierungsarbeiten im entwässernden Flussabschnitt die GW-Stände aufgrund der höheren Drainagewirkung tiefer sein, und umgekehrt werden die GW-Stände im infiltrierenden Flussabschnitt aufgrund eines Anstiegs der Infiltrationsrate höher sein.

Die Ergebnisse dieser Studie liefern eine erste Abschätzung der Flussrenaturierung auf die Grundwasserstände. Selbstverständlich sollten weitere Abklärungen in kleinerem Masstab, mit genaueren Angaben zur Geometrie des Grundwasserleiters und der Gewässer, sowie der In- und

Exfiltrationsverhältnisse durchgeführt werden. Es wäre ebenfalls von Vorteil weitere, detailliertere Szenarien der Flussbettveränderung zu entwickeln. Im vorgestellten Fall gehen wir davon aus, dass der Fluss und der Grundwasserleiter nach den Renaturierungsarbeiten vollständig angebunden sein wird. Dies muss nicht zwingend der Fall sein. Um die Folgen von verschiedenen Flussbettveränderungen abzuschätzen, sollten mehrere Modelle mit verschiedenen Fluss-Grundwasserleiter-Transferkoeffizienten entwickelt und auch die Möglichkeit einer Seitwärtsbewegung der Emme mit einbezogen werden.

## 8 MODELLVERBESSERUNGSVORSCHLÄGE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Dieser Bericht zeigt die Entwicklung eines stationären und instationären Modells zur Reproduktion der Grundwasserdynamik und der minimalen, mittleren und maximalen GW-Ständen des Emmentaler Grundwasserleiters. Im Allgemeinen reproduziert das stationäre Modell die beobachteten GW-Stände und die geschätzten Grundwasserdurchflüsse sehr zufriedenstellend. Für das instationäre Modell wurden die Daten von 33 Grundwassermessstellen verwendet um das instationäre Modell zu validieren. Es wurde gezeigt, dass das instationäre Modell die Dynamik ebenfalls gut wiedergibt. Jedoch wurden aufgrund eines lokal unzureichenden konzeptionellen Modells (z.B. bei G206) einige Unstimmigkeiten beobachtet. Unsicherheiten verbleiben vor allem in Gebieten mit fehlenden Beobachtungspunkten. Deswegen schlagen wir drei wesentliche Anpassungen vor, um das Modell weiter zu verbessern.

Die erste Änderung betrifft das Gewässer der Oesch. Hier schlagen wir vor eine Fluss-RB hinzuzufügen, um die Wechselwirkungen zwischen der Oesch und dem Grundwasserleiter zu erzeugen (Abbildung 19). Auf diese Weise könnte die Dynamik der Messstelle G206 voraussichtlich deutlich verbessert werden.

Das Modell könnte ebenfalls verbessert werden, wenn mehr Beobachtungspunkte vorhanden wären. Somit gibt es, wie in den Kapitel 6.2 und 6.3 und erwähnt, in manchen Gebieten keine transiente Beobachtungen, um das Modell zu validieren. Es wäre möglich, diese Unsicherheiten deutlich zu verringern, wenn während Hochwasser- und Niedrigwasserperioden an diesen Stellen Grundwasserstandmessungen durchgeführt würden (Abbildung 19). Auf diese Weise könnten auf einfache Art genauere Informationen über die Grundwasserdynamik erhoben werden. Sofern die Differenz zwischen simulierter und beobachteter Dynamik bekannt ist, könnte das Modell an diesen Stellen auf einfache Art angepasst werden.

Ebenfalls sollte eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt werden, um die Gebiete mit grossen Unsicherheiten zu identifizieren. Diese Analyse erlaubt jene Gebiete zu identifizieren, wo neue Grundwassermessstellen installiert werden sollten, um die Unsicherheit im Modell zu reduzieren.

In Kapitel 6.2, sahen wir, dass seitliche Grundwasserzuflüsse bedeutend sein können und dass sie zu grossen GW-Stands-Schwankungen zwischen Hoch- und Niederwasser führen. Aber es besteht ein Mangel an Beobachtungsdaten und unzureichende Kenntnisse der komplexen Dynamik dieser Gebiete. Deswegen sollten mehr Untersuchungen, wie zum Beispiel Piezometerinstallationen, Wasserstandmonitoring, Schätzungen der GW-Durchflüsse und lokaler saisonbedingter

Wasserhaushalte durchgeführt werden. Auf diese Weise könnte die simulierte Dynamik bestätigt oder annulliert werden und die Modellergebnisse könnten verbessert werden.

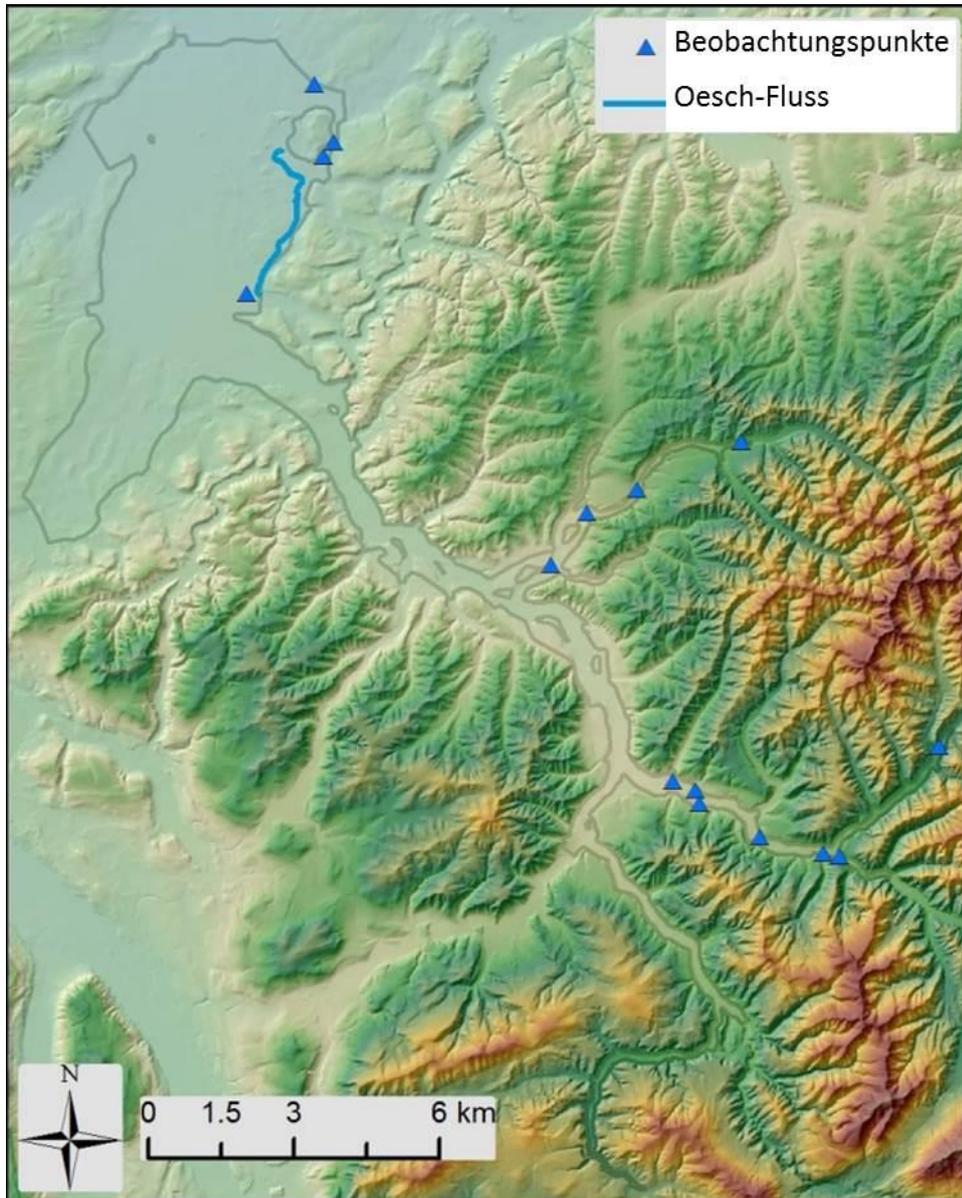


Abbildung 19 : Modellverbesserung

Schliesslich sollte beachtet werden, dass das Modell nicht für Studien in kleinem Masstab benutzt werden sollte. Wenn detaillierte lokale Ergebnisse erforderlich sind, sollte ein Modell in kleinerem Masstab entwickelt werden.

## 9 REFERENZLISTE

AWA (2013). Nachführung der Grundwasserkarte im Gebiet Emmental - Simultanmessung der Grundwasserstände am 21./22. Oktober 2013. BAU-, VERKEHRS- UND ENERGIEDIREKTION des Kantons Bern. Amt für Wasser und Abfall.

BLW (2015). Digital soil suitability map of Switzerland - Permeability, Federal Office for Agriculture.

MeteoSwiss (2013). MeteoSwiss Grid-Data Products, Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss.

MeteoSwiss (2014). SwissMetNet surface weather stations, Bern / Zollikofen, BER, Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss.

PEST (2015). <http://www.pesthomepage.org/>.

SwissStatistics (2015). Simplified land use statistics 1992/97, Swiss Statistics, GEOSTAT.

WEA (1975). Hydrogeologie Emmental Teil I, Oberes Emmental (Blauer Bericht)

WEA 1976. Hydrogeologie Emmental Teil II, Mittleres Emmental (Blauer Bericht)

WEA (1981). Hydrogeologie Emmental Teil III, Unteres Emmental (Blauer Bericht)

WEA (1983). Hydrogeologie Emmental Teil IV, Modellstudie zur Bestimmung des Grundwasserdargebotes im Testgebiet Emmental (Blauer Bericht)

WEA (1985). Hydrogeologie Emmental Rötenbachtal (Blauer Bericht)

WEA (1993). Hydrogeologie Emmental Truebtal (Blauer Bericht)

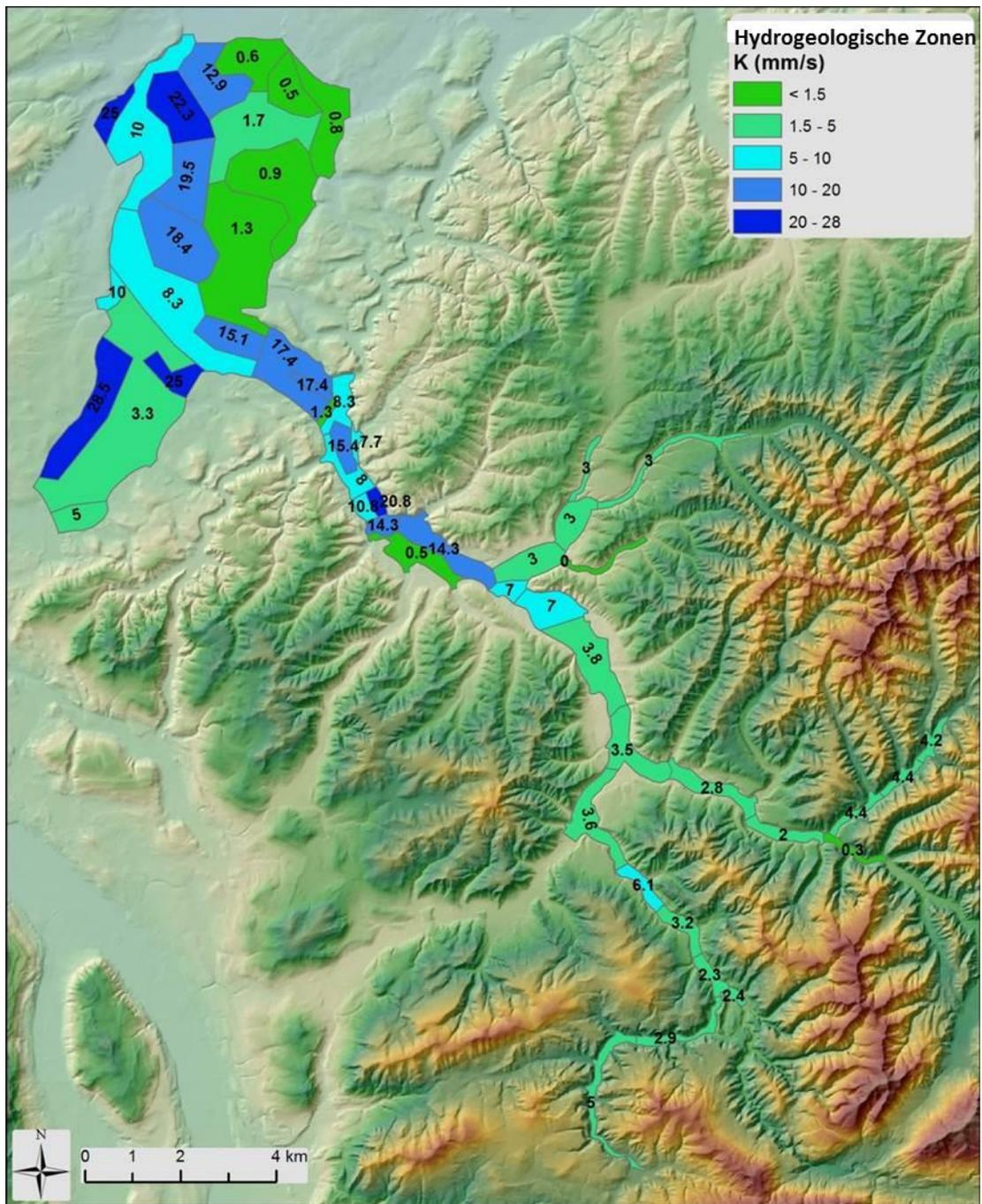
WEA (1994). Hydrogeologie Urtenental (Blauer Bericht)

WEA (1997). Hydrogeologie Emmental Oberstes Emmental, Synthesebericht (Blauer Bericht)

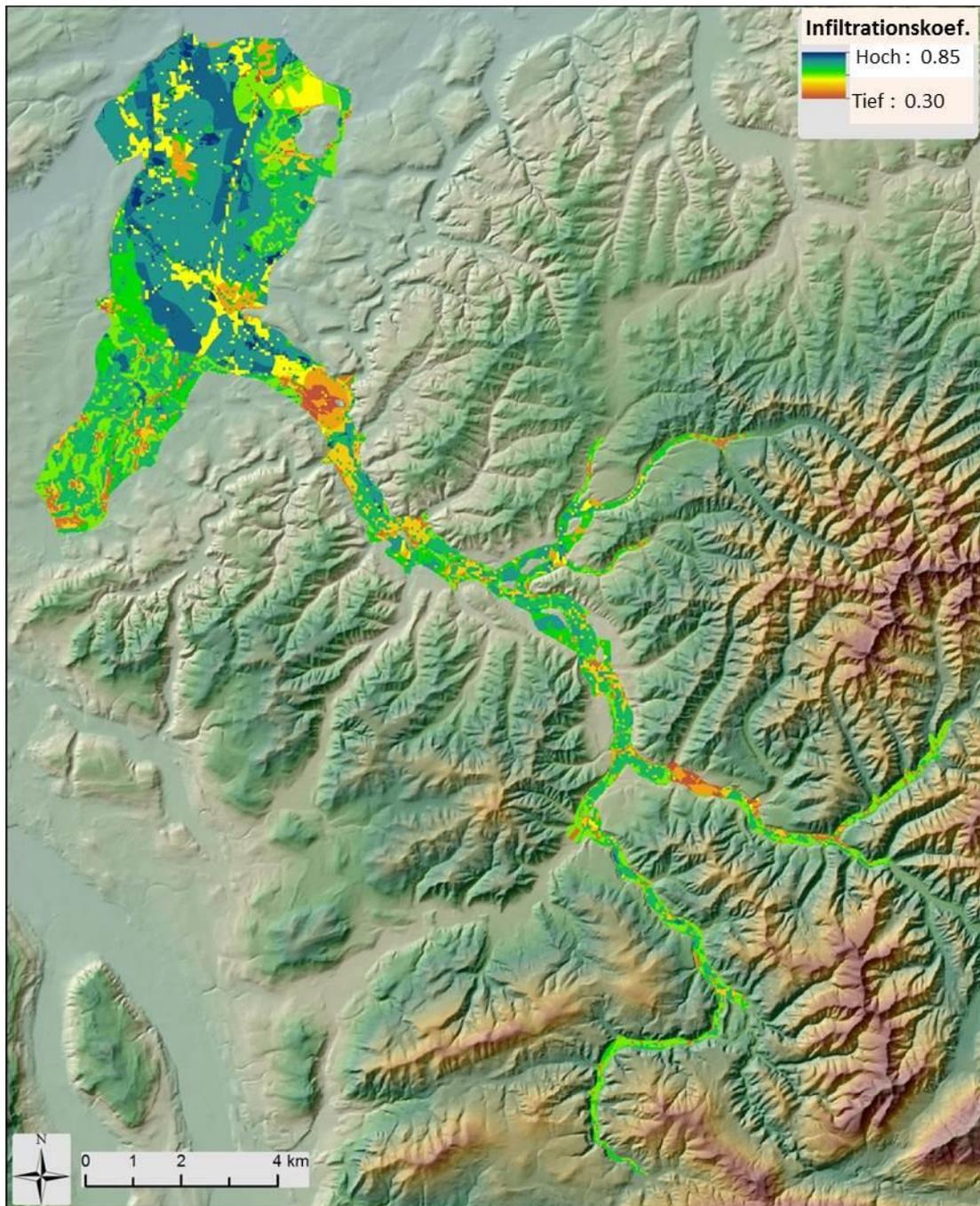
WEA (2002). Hydrogeologie Tal der Grüene (Blauer Bericht)

# 10 ANHÄNGE

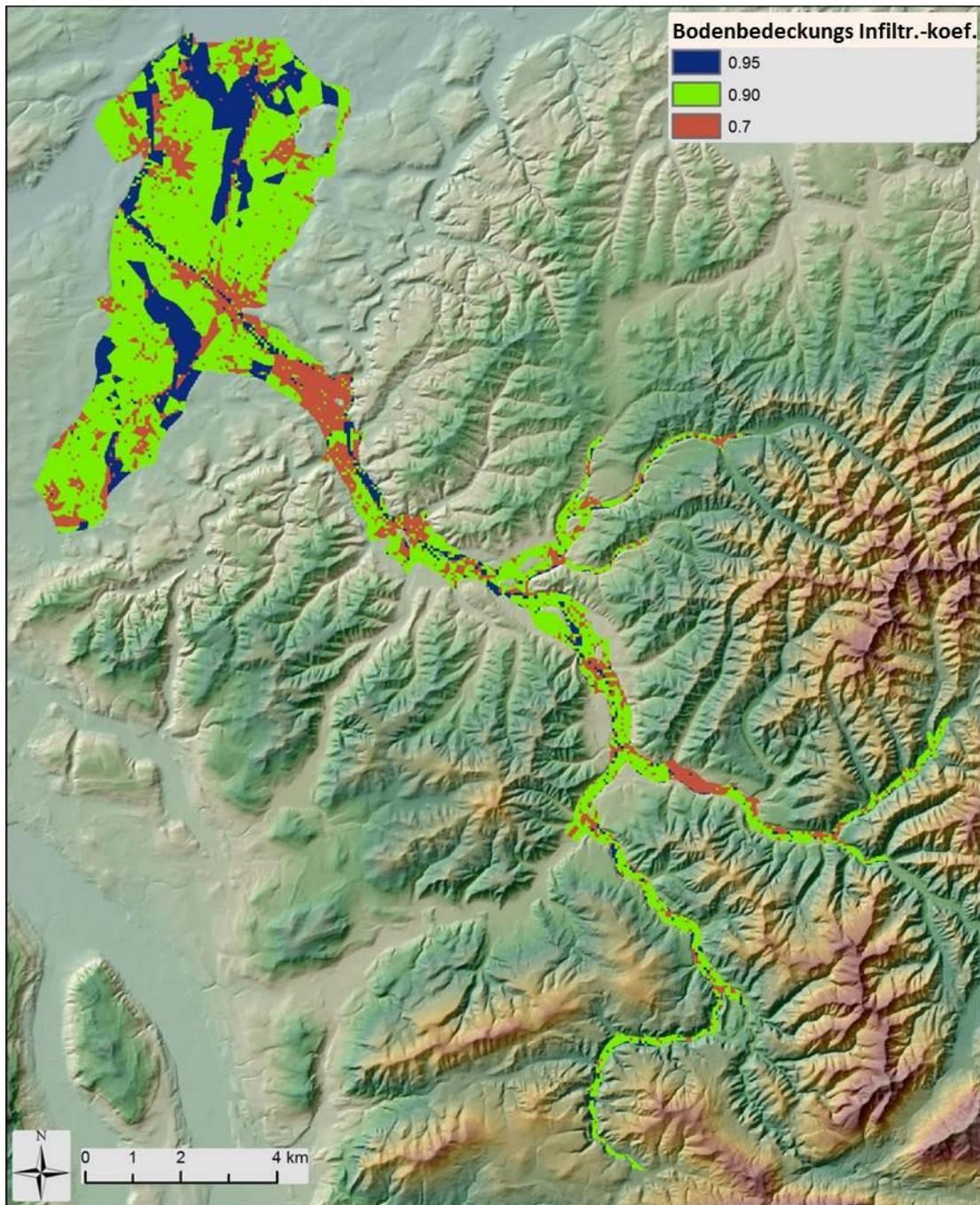
## Anhang 1 : Hydrogeologische Zonen



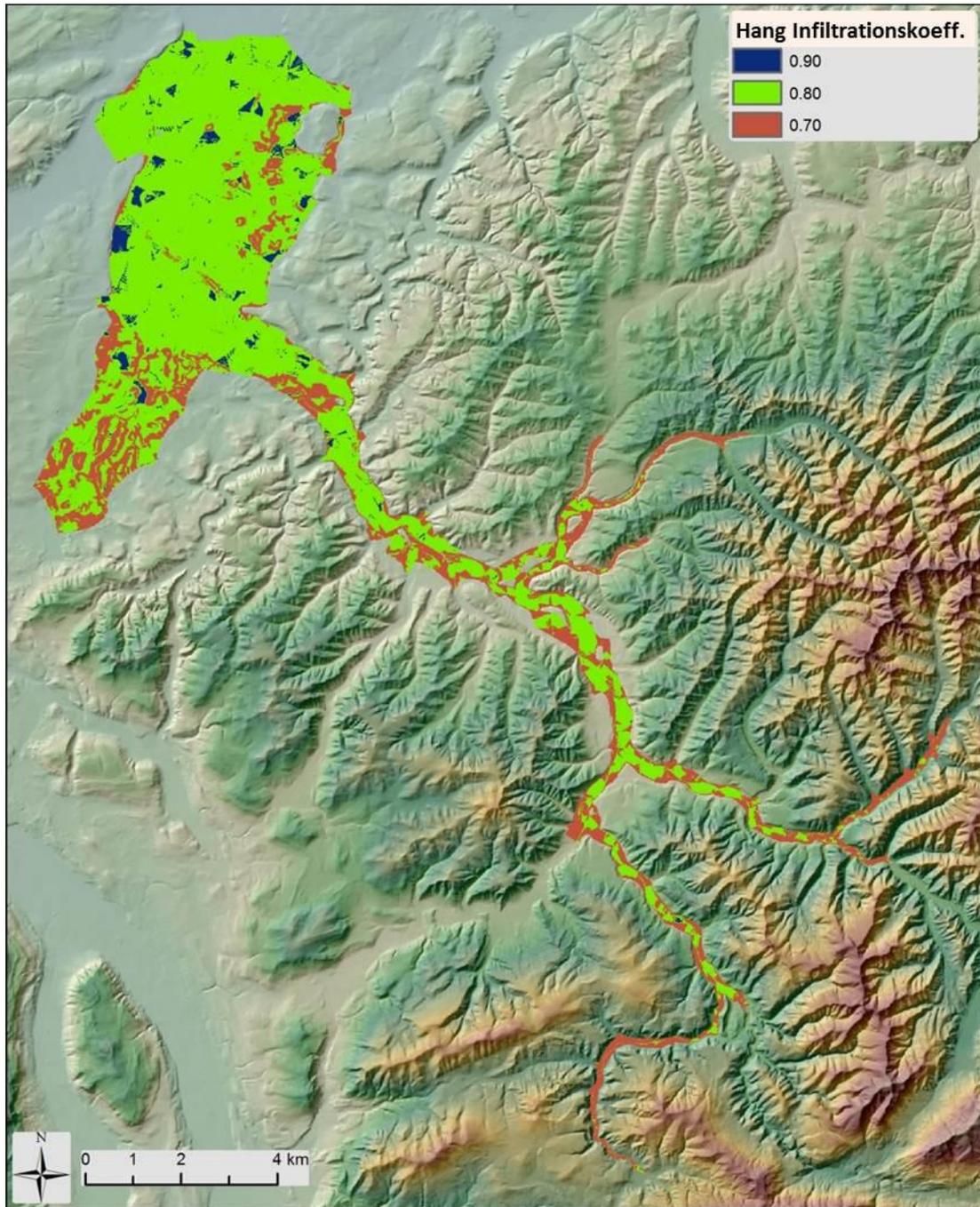
## Anhang 2 : Infiltrationskoeffizient



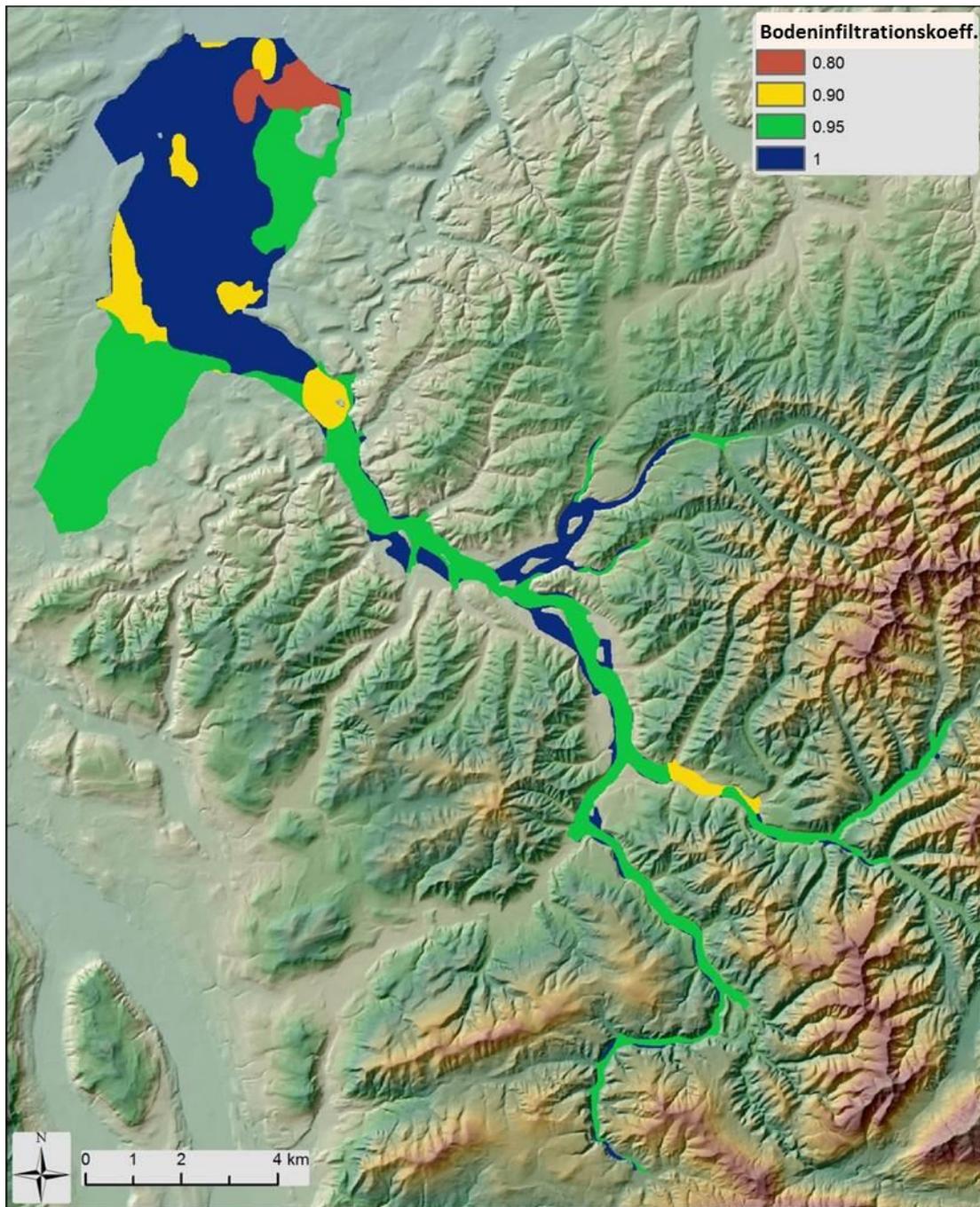
### Anhang 3 : Bodenbedeckungs-Infiltrationskoeffizient



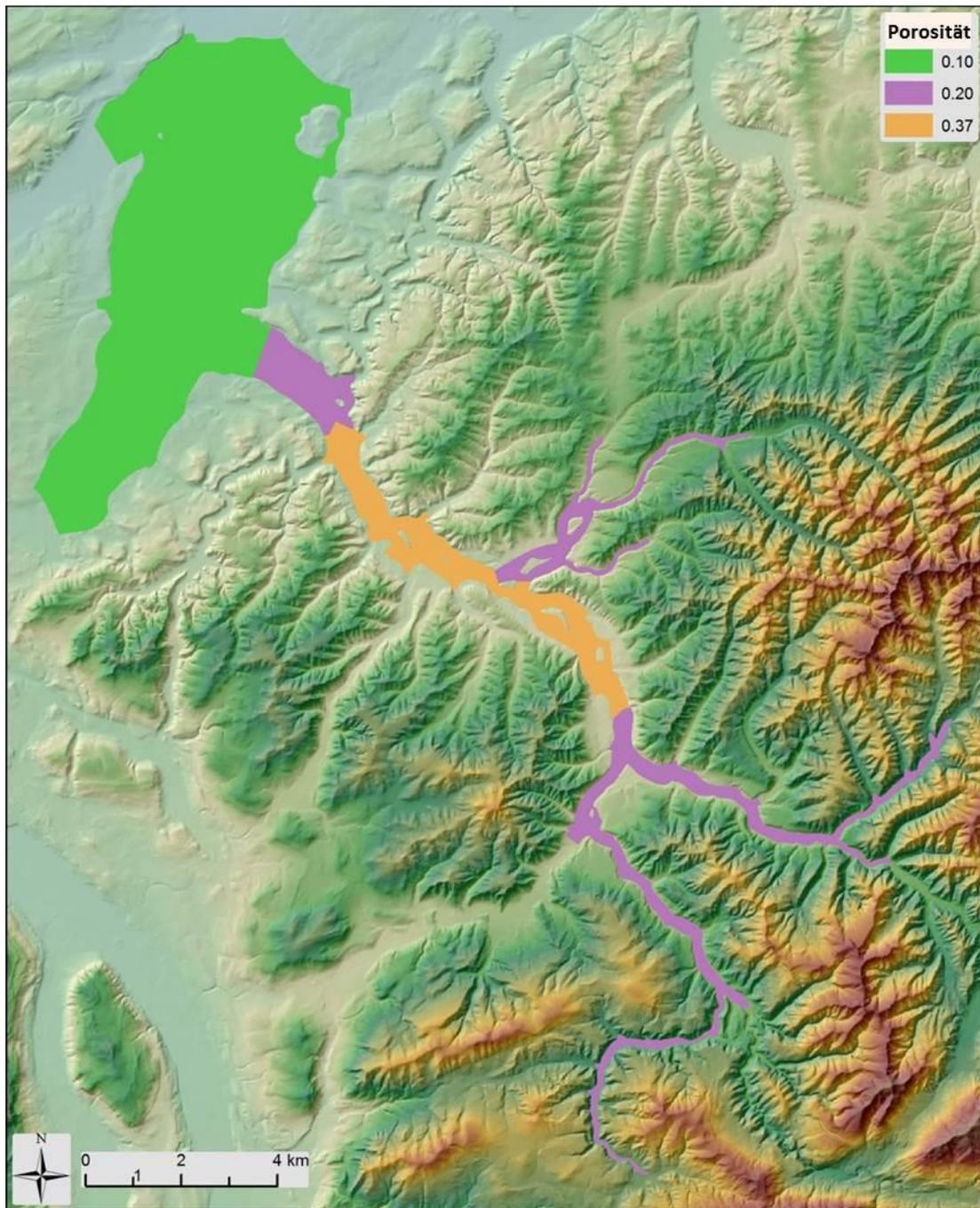
#### Anhang 4 : Hanginfiltrationskoeffizient



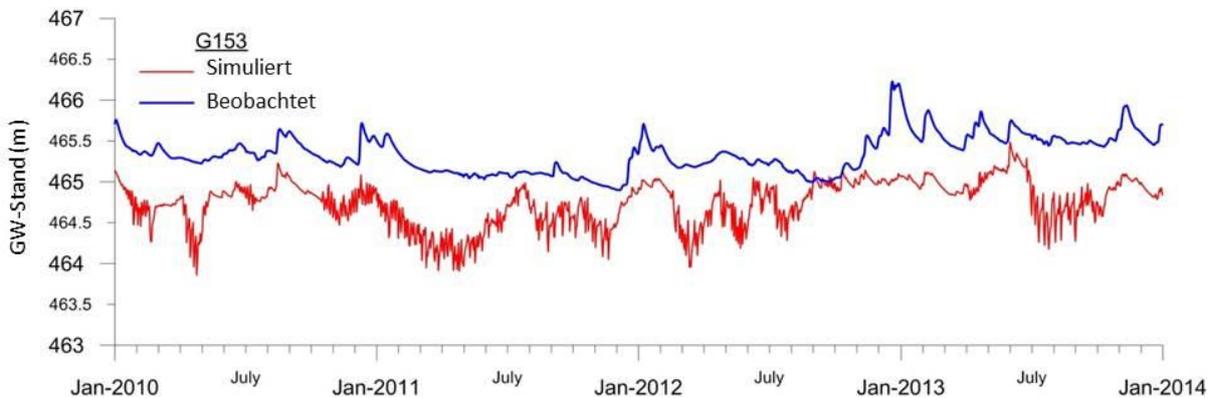
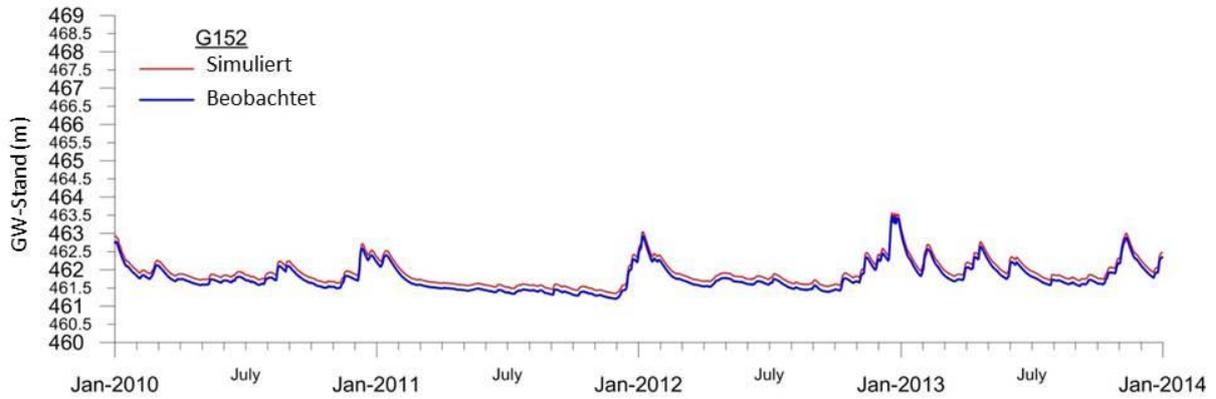
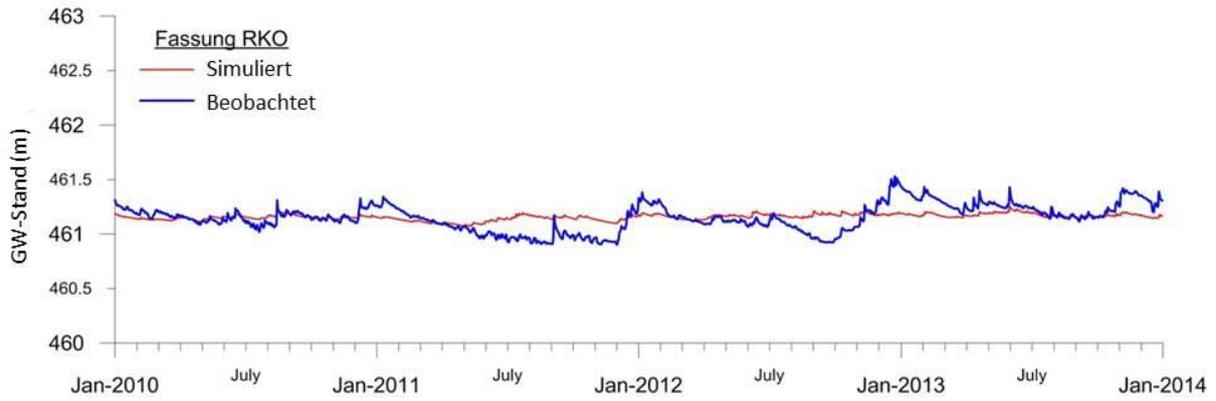
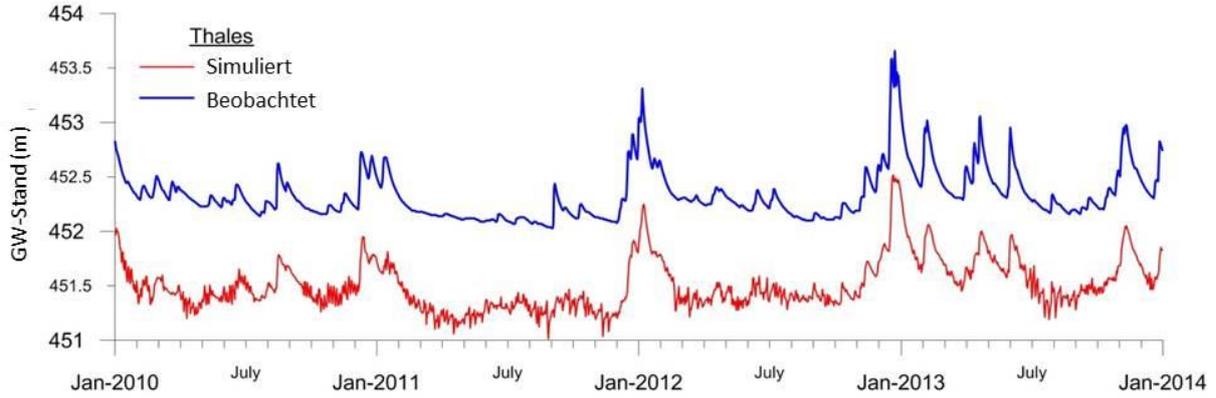
Anhang 5 : Infiltrationskoeffizient der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens

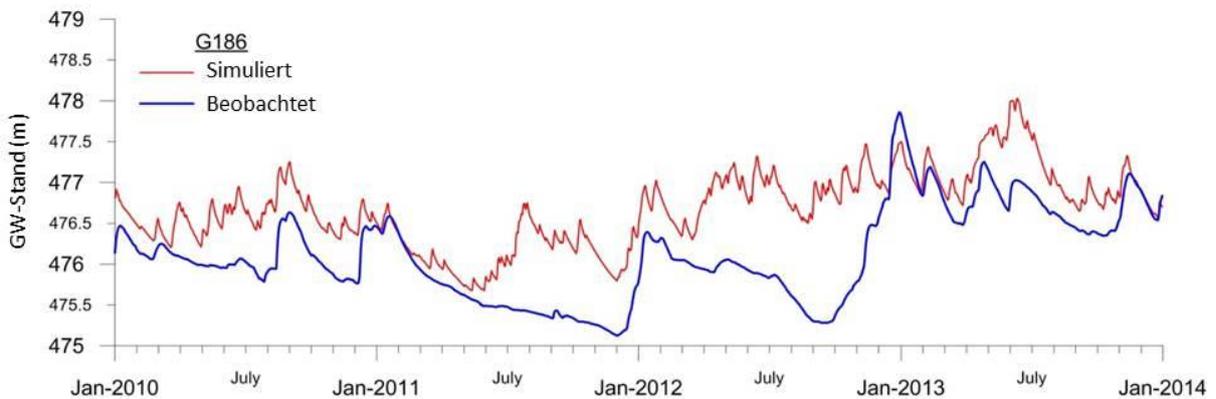
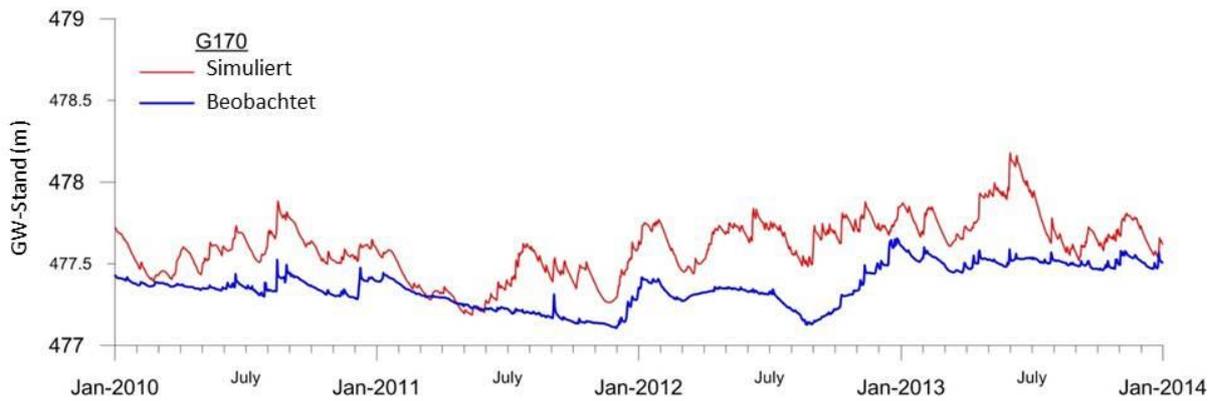
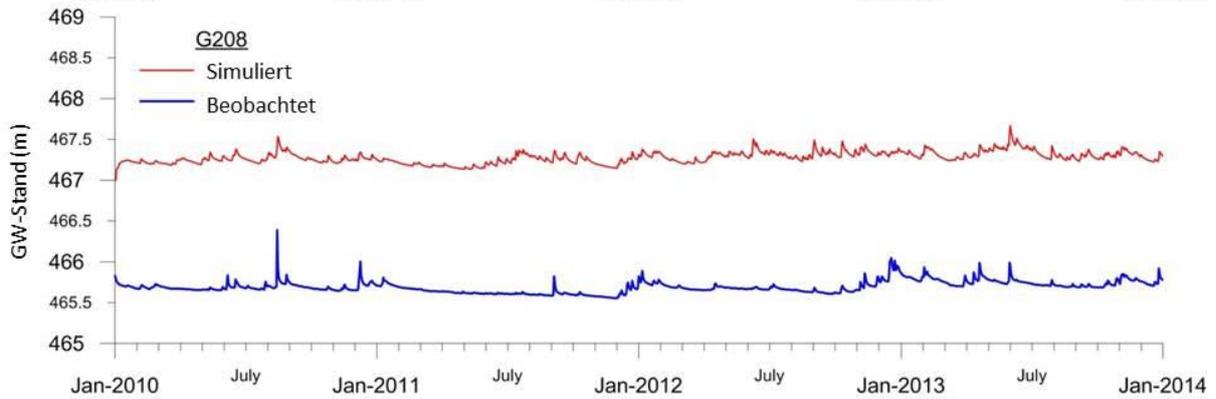
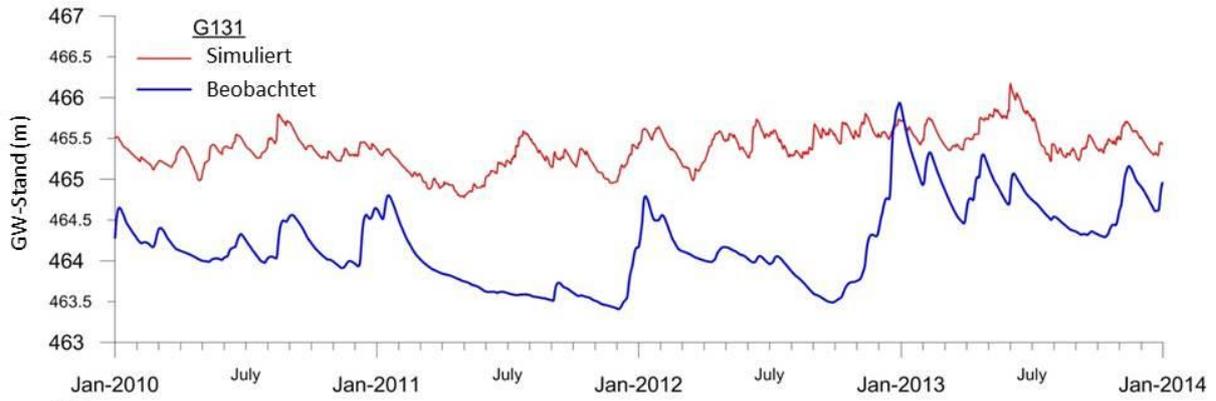


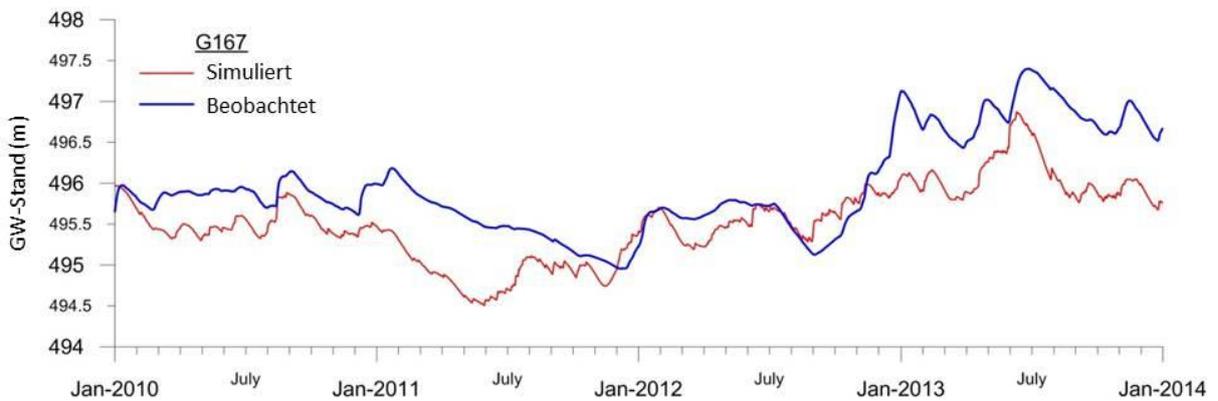
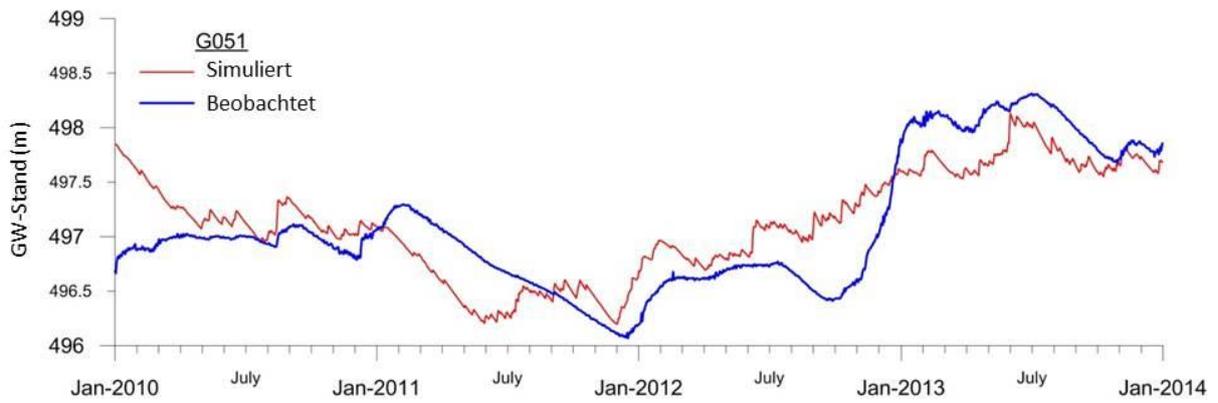
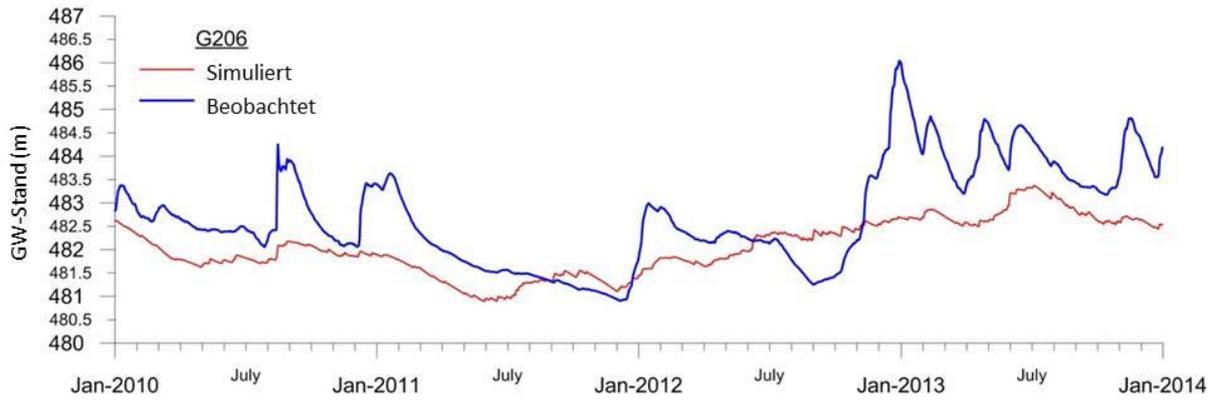
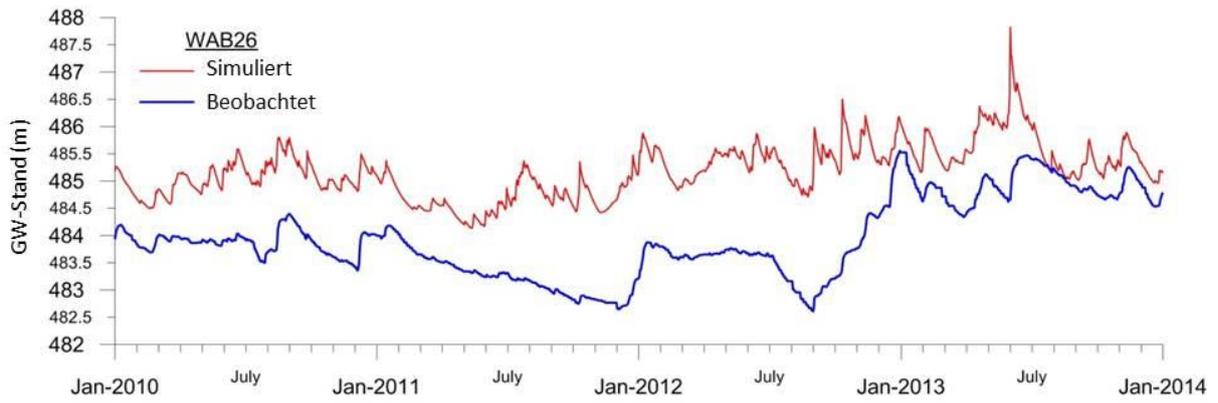
## Anhang 6 : Porosität des instationären Modells

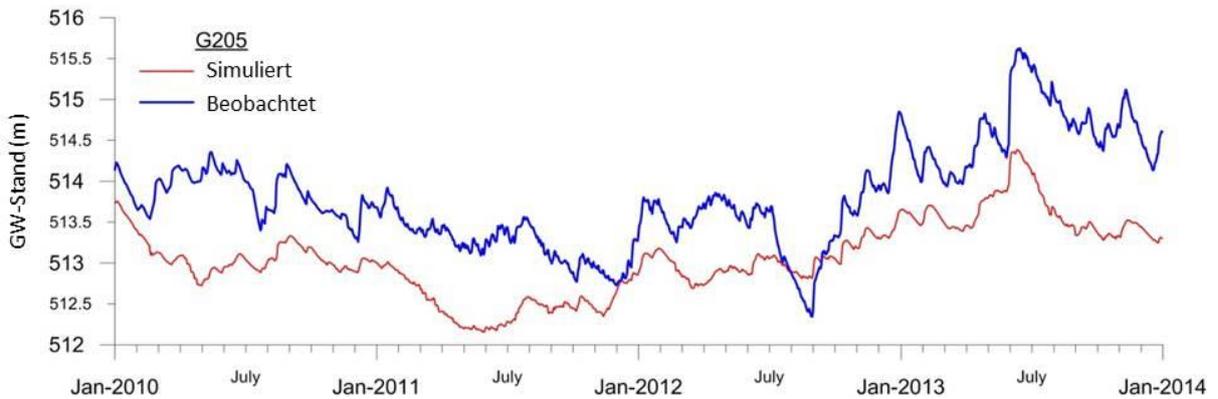
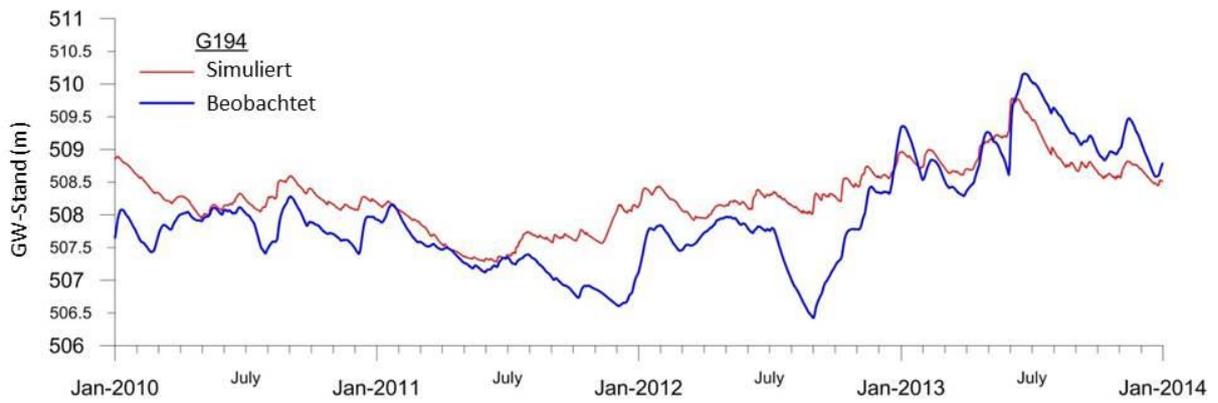
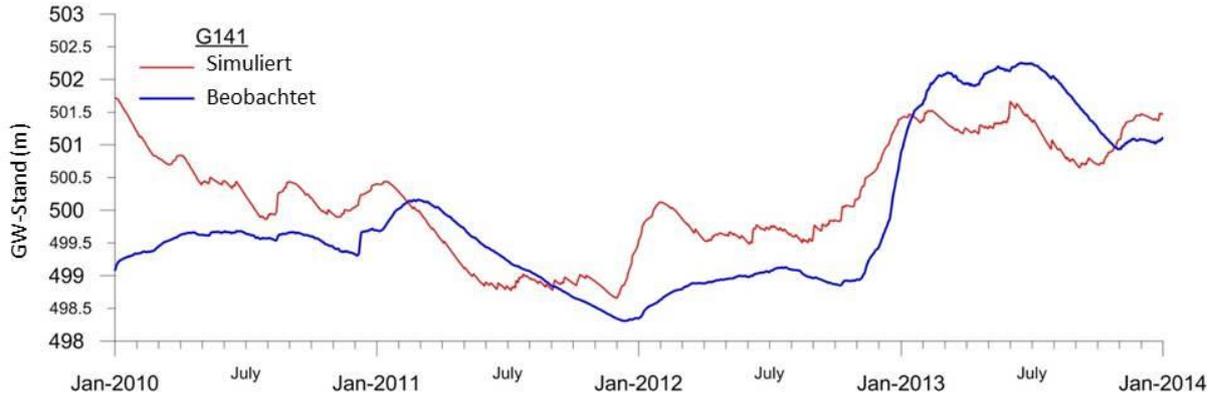
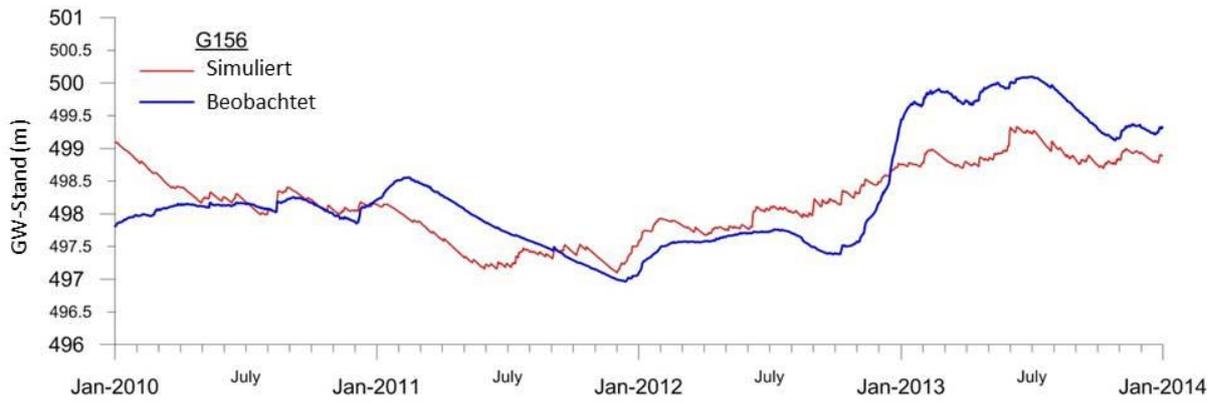


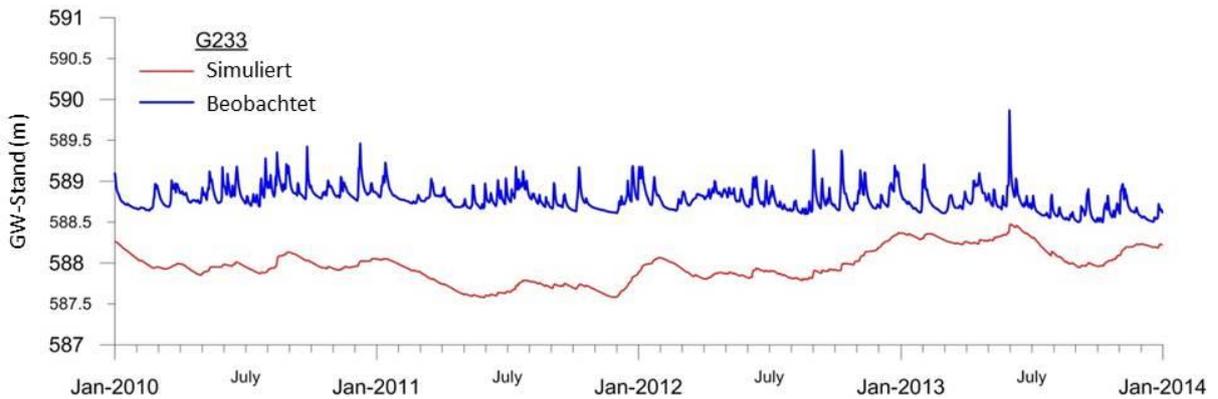
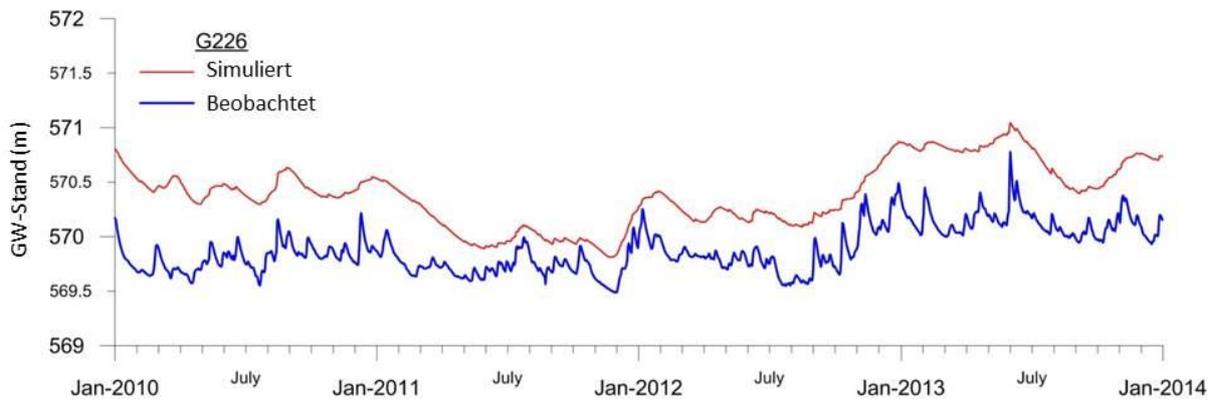
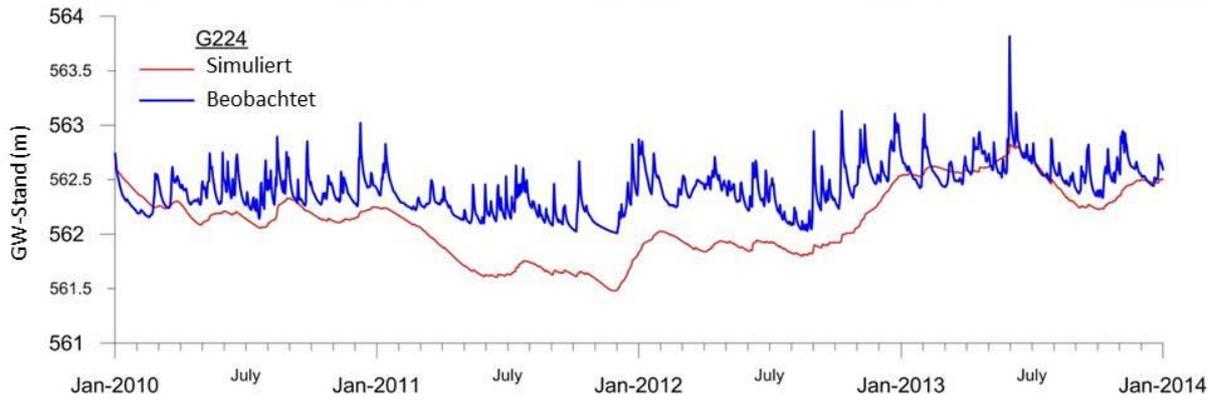
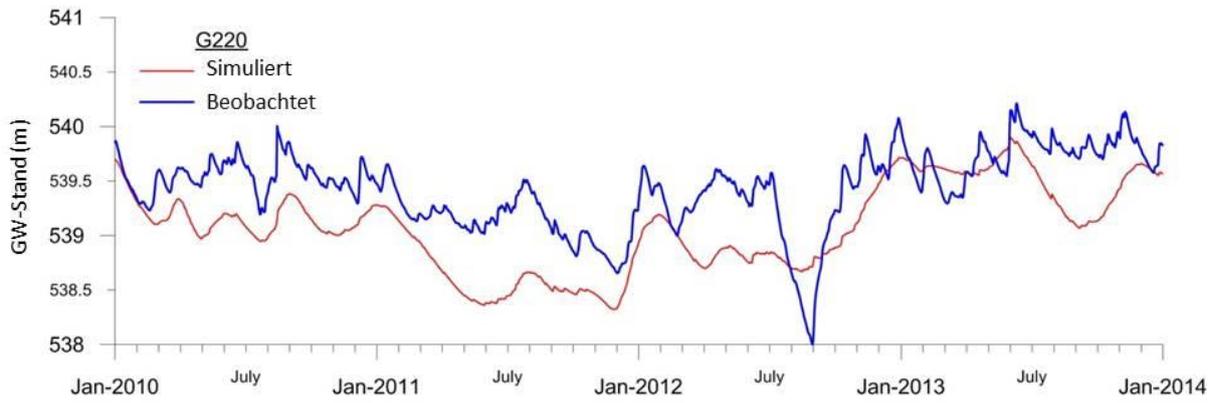
## Anhang 7 : Beobachtete vs. simulierte instationäre Grundwasserstände

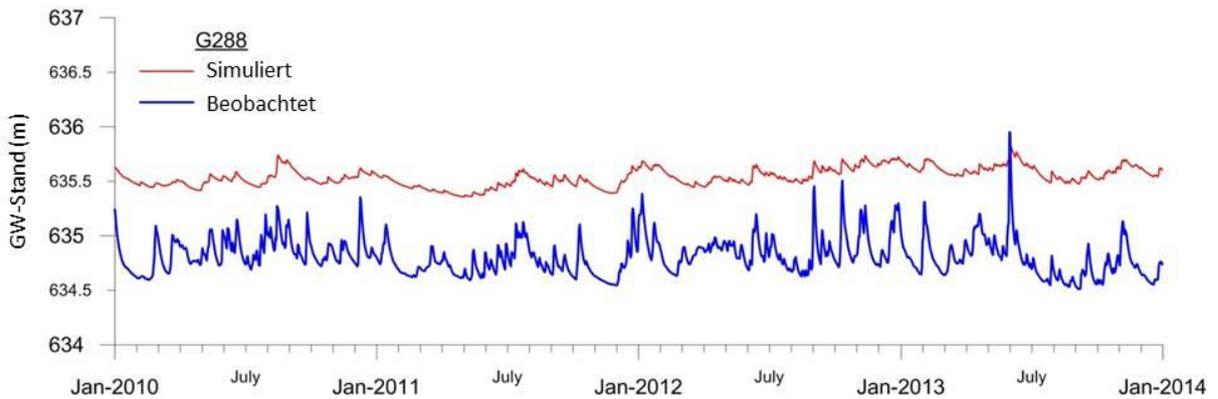
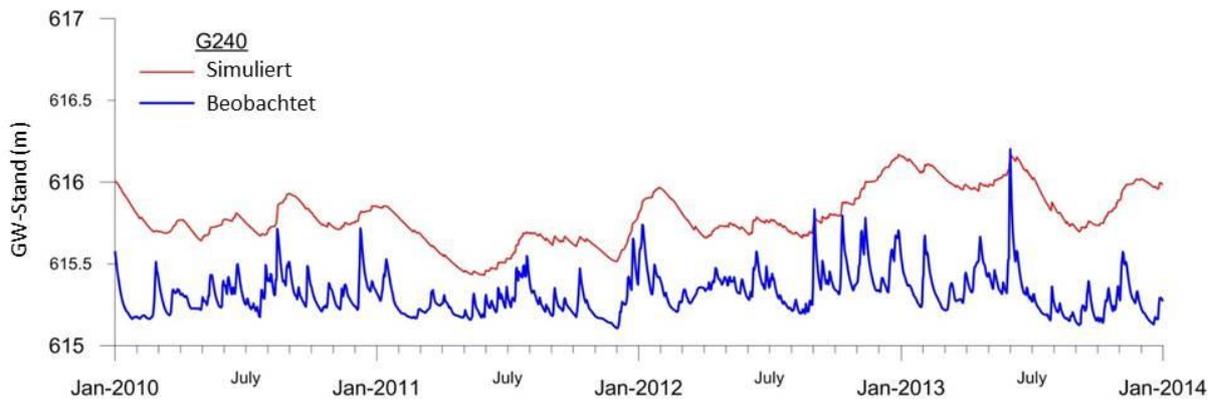
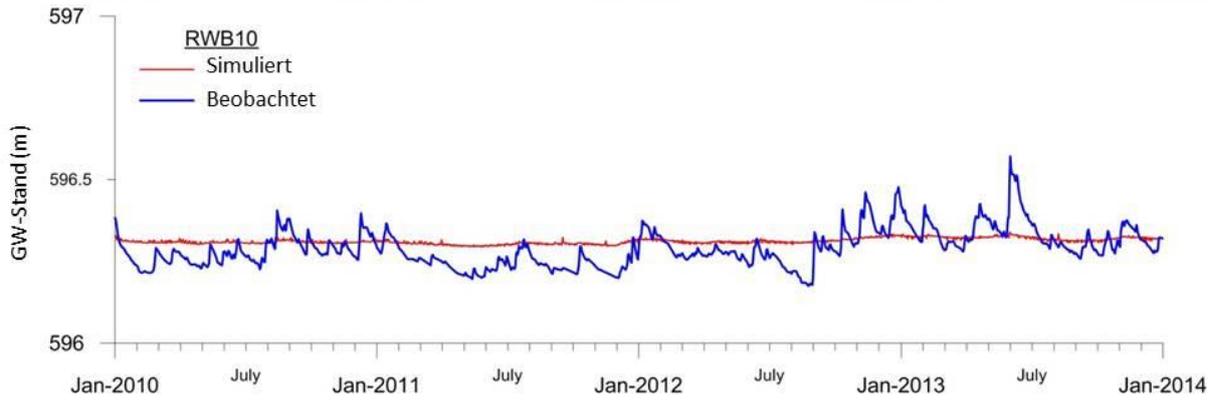
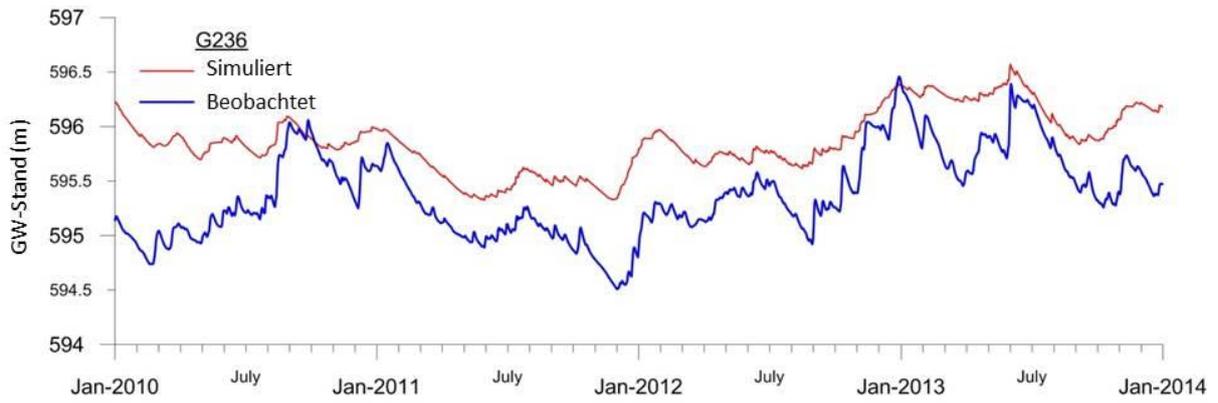


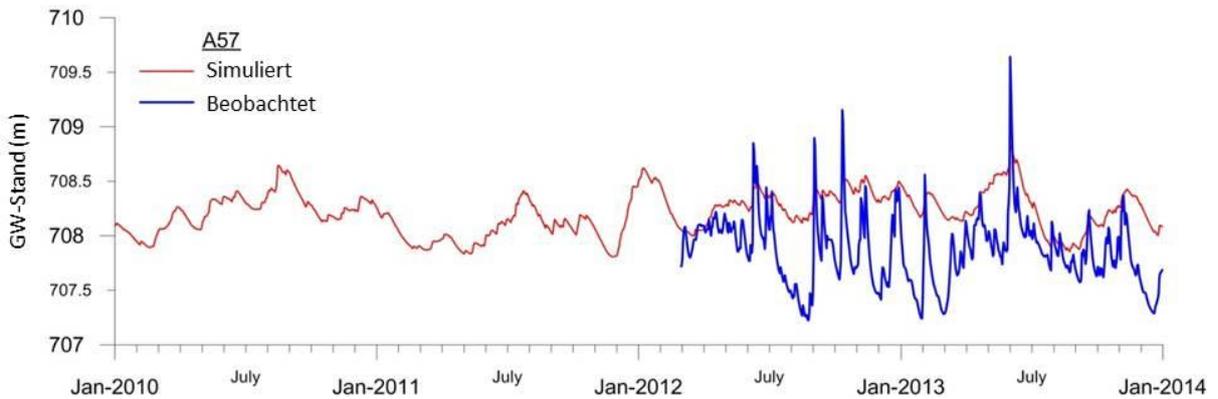
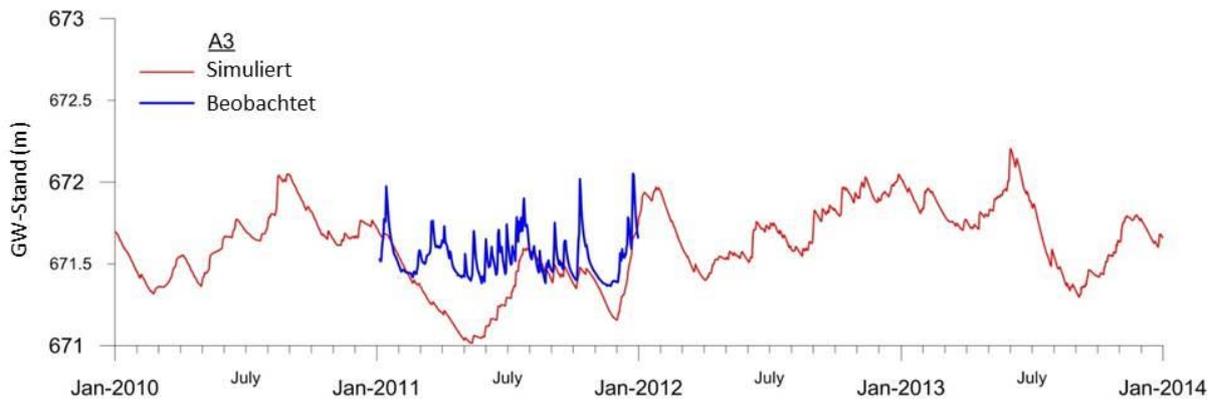
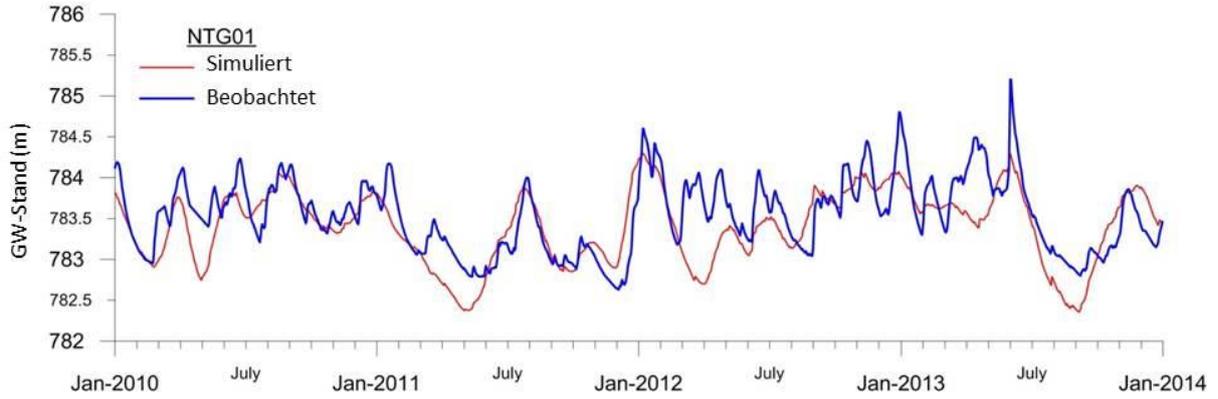
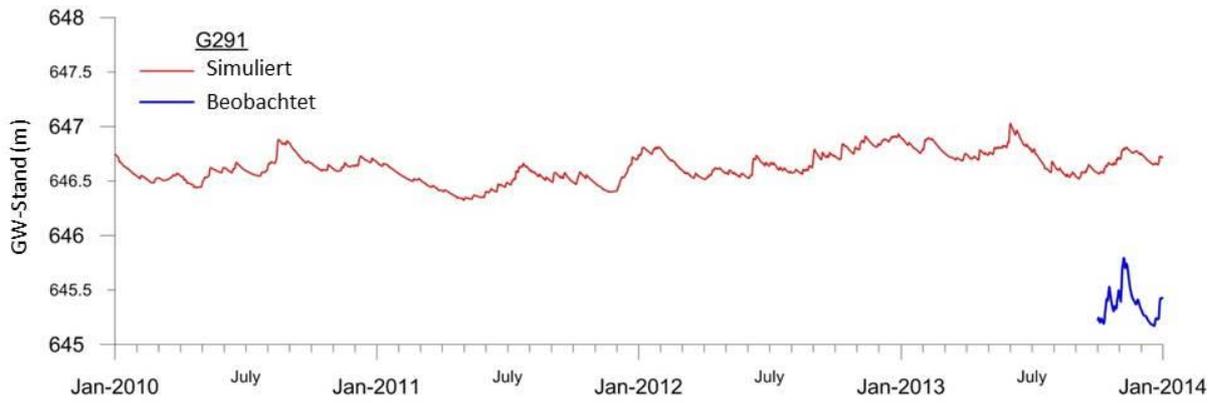


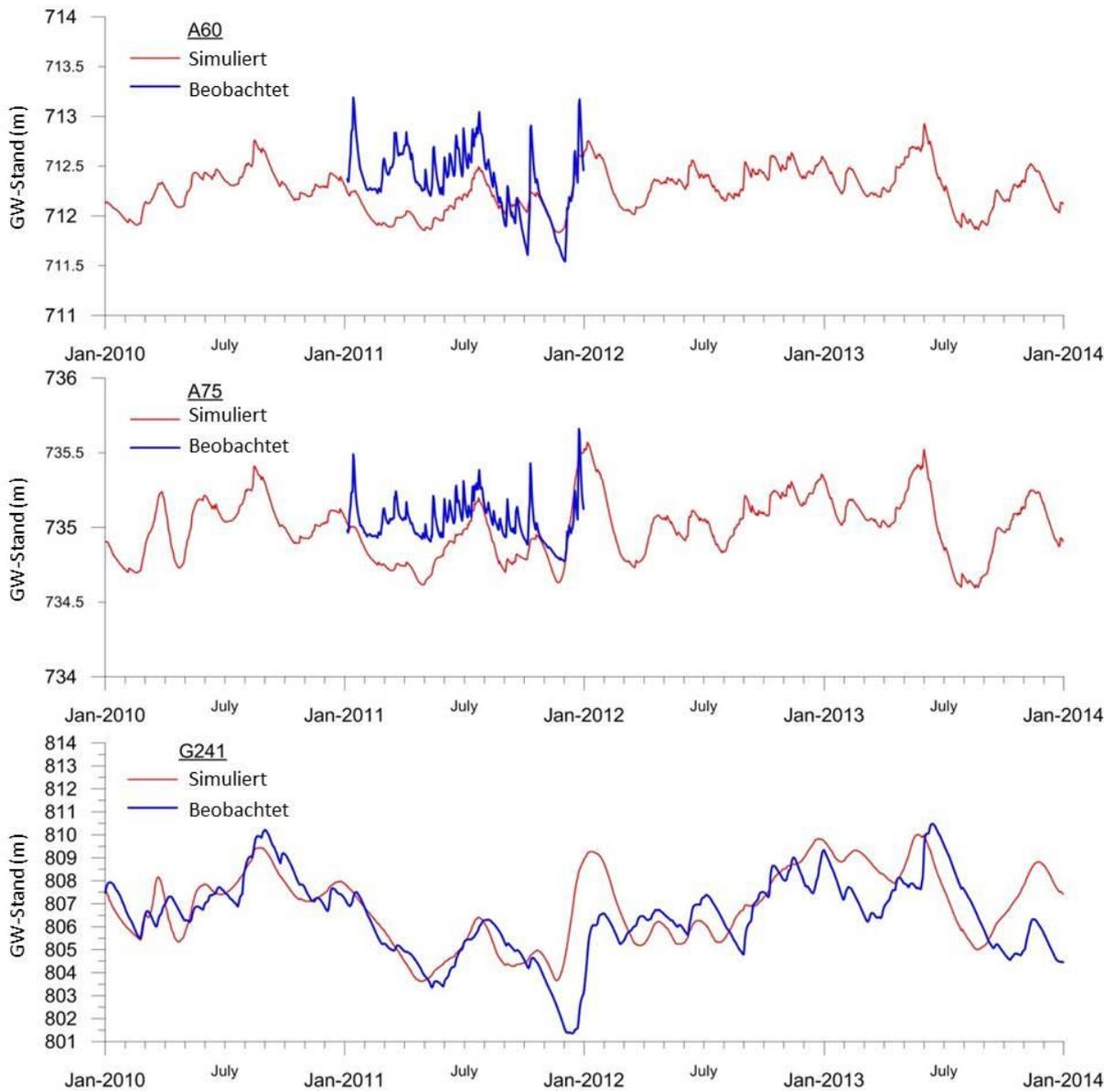




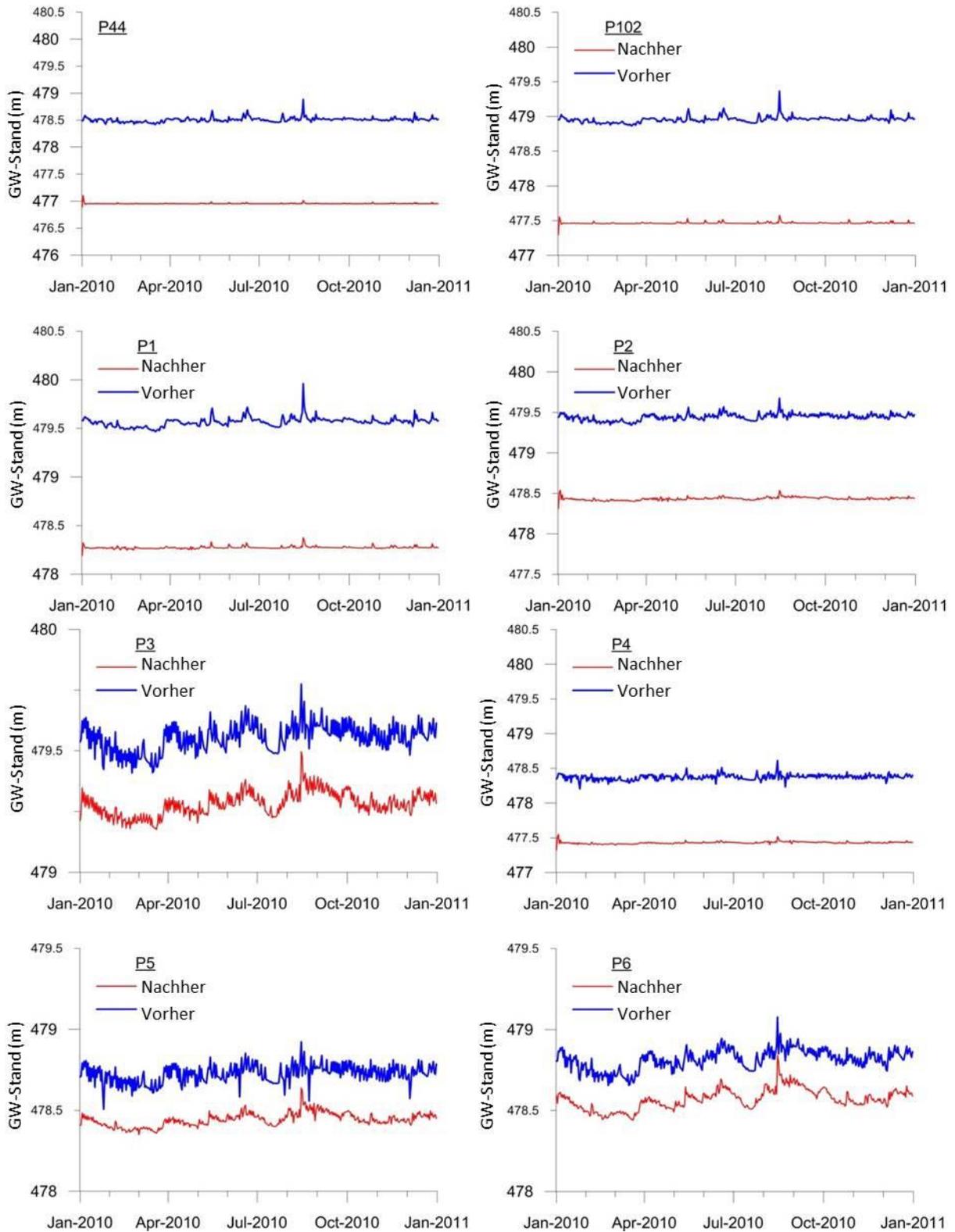


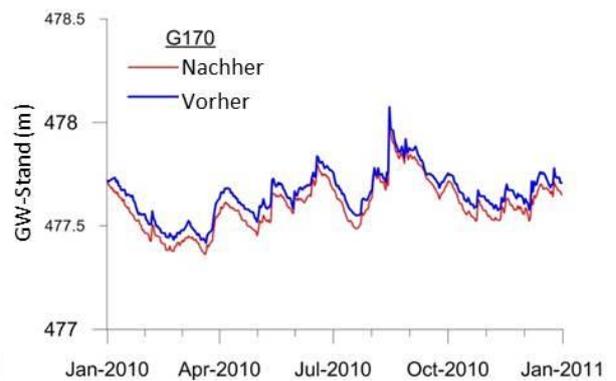
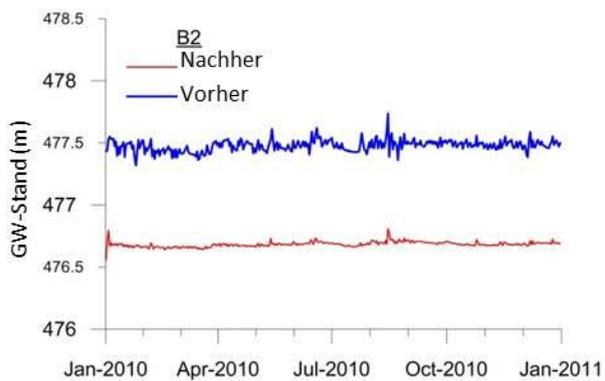
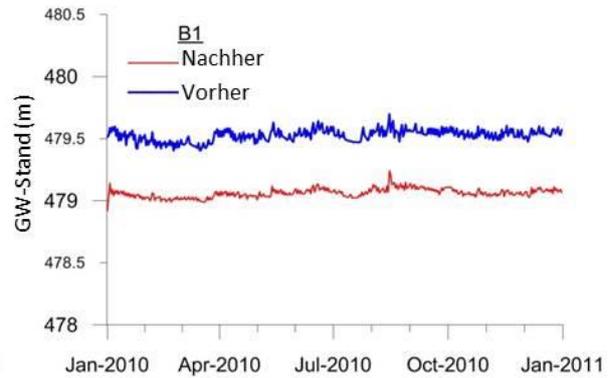
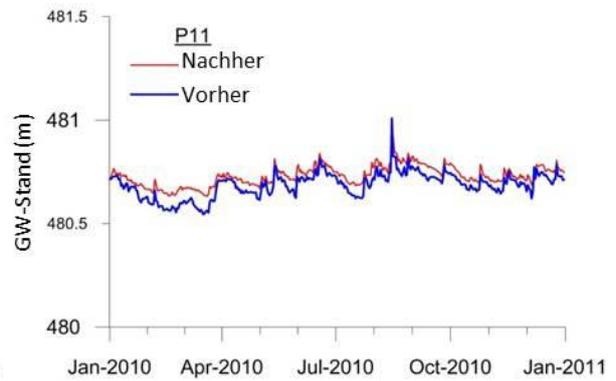
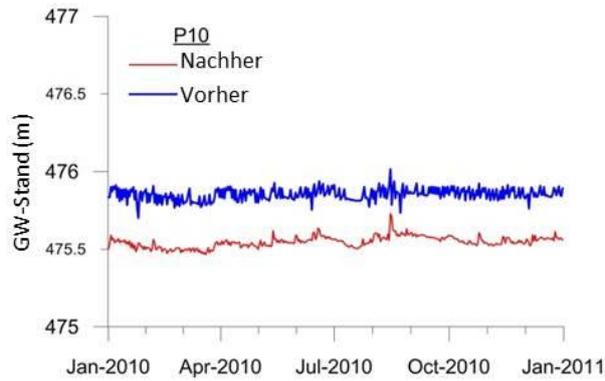
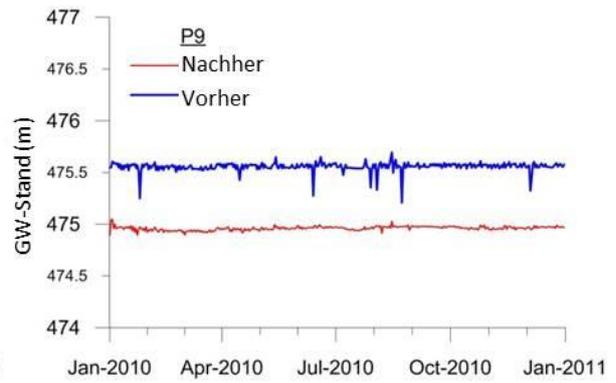
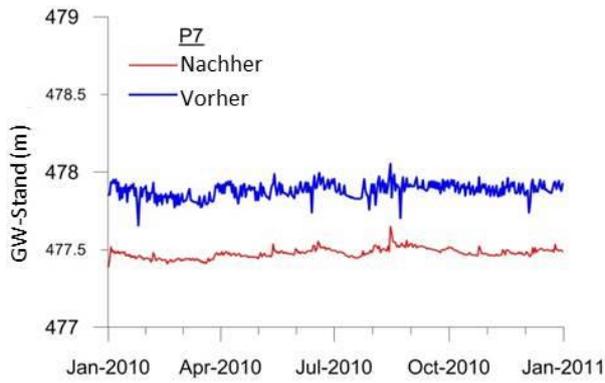






## Anhang 8: Simulierte GW-Stände vor und nach der Renaturierung





## Anhang 9: Simulierte Querschnitte des GW-Stands vor und nach der Renaturierung

