



**Inhalt:**

1	Veranlassung	4
2	Gegenstand des hydrogeologischen Fachbeitrags zum Antrag auf Rahmenbetriebsplanerweiterung	5
3	Hydrogeologische Standortbeschreibung	5
3.1	Örtliche Situation	5
3.2	Hydrogeologische Verhältnisse	6
3.2.1	Geologie und Grundwasserleiter	6
3.2.2	Grundwasserströmung	7
3.2.3	Entwicklung der Grundwasserstände	9
4	Grundwasserströmungsmodell	10
4.1	Aufgabenstellung	10
4.2	Mathematische Grundlagen	11
4.3	Modellaufbau	12
4.3.1	Lage	12
4.3.2	Räumliche Dimensionalität	13
4.3.3	Zeitliche Dimensionalität (stationär/instationär)	13
4.3.4	Räumliche und zeitliche Auflösung	14
4.3.5	Modellgeometrie	15
4.3.6	Randbedingungen	18
4.3.7	Quell- und Senkenterme, sonstige besondere Modellelemente	25
4.3.8	Anfangsbedingungen	39
4.4	Modellparametrisierung	40
4.4.1	Aquiferkennwerte	40
4.4.2	Leakagekoeffizienten	40
4.5	Modellkalibrierung	41
4.5.1	Allgemeines	41
4.5.2	Verlauf der gemessenen und berechneten Grundwasserstände	42
4.5.3	Wasserbilanz des Grundwassermodells	44
4.5.4	Plausibilitätskontrolle Oberflächenabfluss	45
4.5.5	Modellunsicherheit	45
4.6	Prognosesimulationen	46
4.6.1	Methodik	46
4.6.2	Prognosesimulation 1, Ist-Zustand mit Bergbautätigkeit	48
4.6.3	Prognosesimulationen 2 und 3	48
5	Auswirkungen der geplanten Rahmenbetriebsplanerweiterung	51
5.1	Prognostizierte grundwasserhydraulische Veränderungen	51
5.1.1	Grundwasserstände und Aufhöhung/Absenkung des Grundwassers im Zu- und Abstrom des erweiterten Tageausees	51
5.1.2	Reichweite der Auswirkung auf das Grundwasser	52
5.1.3	Richtung der Grundwasserströmung	52
5.1.4	Flurabstandspläne	54
5.2	Überwachung und Vermeidungsstrategie	55
5.2.1	Monitoring	55

5.2.2	Vermeidungsstrategie	57
5.3	Grundwassernutzungen im Umfeld	58
5.4	Gefährdungspotentiale im Umfeld des Planvorhabens	58
5.5	Angaben zur Grund- und Seewasserbeschaffenheit, Prognose zur Entwicklung	59
5.6	Hydromorphologische Aspekte zur Tagebaugestaltung	61

## Anhänge und Anlagen

Anhang 1:	Physikalische und mathematische Grundlagen der Grundwasserströmungsmodellierung
Anhang 2:	Berechnungsgang zur Ermittlung der Sickerwasserrate
Anhang 3:	Dokumentation der instationären Modellkalibrierung
Anhang 4:	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Seewasserbeschaffenheit 1982 – 2014 im Abbaufeld Haltern der Quarzwerke GmbH
Anlage 1	Ergebnisse der Modellkalibrierung: exemplarische Ganglinien der Grundwasserstände
Anlage 2.1	Berechneter Grundwasserhöhengleichenplan, Oberes Grundwasserstockwerk, Ergebnis der Kalibrierung Zeitschritt 24 ~ Apr. 2005
Anlage 2.2	Berechneter Grundwasserhöhengleichenplan, Oberes Grundwasserstockwerk, Ergebnis der Kalibrierung Zeitschritt 138 ~ Okt. 2014
Anlage 3.1	Grundwasserhöhengleichenplan, Prognose 2 (genehmigter Zustand), Zeitschritt 94 (hoher Grundwasserstand)
Anlage 3.2	Grundwasserhöhengleichenplan, Prognose 2 (genehmigter Zustand), Zeitschritt 138 (niedriger Grundwasserstand)
Anlage 3.3	Grundwasserhöhengleichenplan, Prognose 3 (geplanter Zustand), Zeitschritt 94 (hoher Grundwasserstand)
Anlage 3.4	Grundwasserhöhengleichenplan, Prognose 3 (geplanter Zustand), Zeitschritt 138 (niedriger Grundwasserstand)
Anlage 4.1	Grundwasserhöhendifferenzenplan, Prognose 3 (Planzustand) minus Prognose 2 (genehmigter Zustand), Zeitschritt 94 (hoher Grundwasserstand)
Anlage 4.2	Grundwasserhöhendifferenzenplan, Prognose 3 (Planzustand) minus Prognose 2 (genehmigter Zustand), Zeitschritt 138 (niedriger Grundwasserstand)
Anlage 5.1	Grundwasserflurabstände, Prognose 3 (geplanter Zustand), Zeitschritt 94 (hoher Grundwasserstand)
Anlage 5.2	Grundwasserflurabstände, Prognose 3 (geplanter Zustand), Zeitschritt 138 (niedriger Grundwasserstand)
Anlage 6.1	Grundwasserhöhendifferenzenplan, Prognose 4 (Rücknahmestandard) minus Prognose 2 (genehmigter Zustand), Zeitschritt 94 (hoher Grundwasserstand)
Anlage 6.2	Grundwasserhöhendifferenzenplan, Prognose 4 (Rücknahmestandard) minus Prognose 2 (genehmigter Zustand), Zeitschritt 138 (niedriger Grundwasserstand)

## 1      **Veranlassung**

Die Quarzwerke GmbH plant die Erweiterung des Tagebaus Haltern-Sythen. In diesem Zusammenhang wurde die GEOBIT Ingenieur-Gesellschaft mbH mit Schreiben vom 27.10.2017 von der Quarzwerke GmbH mit der Erstellung des hydrogeologischen Fachbeitrags zum bergrechtlichen Rahmenbetriebsplanverfahren beauftragt.

Im Rahmen dieses hydrogeologischen Fachbeitrags wurde ein numerisches Grundwasserströmungsmodell aufgebaut, mit dessen Hilfe die Auswirkungen der Tagebautätigkeit auf das Grundwasser ermittelt wurden. Hierzu zählen u.a. insbesondere die Bestimmung der Reichweite der sich aus der Tagebautätigkeit ergebenden Grundwasserabsenkung bzw. -aufhöhung.

Das Erfordernis des Aufbaus eines numerischen Grundwasserströmungsmodells ergibt sich aufgrund der Komplexität der hydrogeologischen Verhältnisse und Randbedingungen am Standort. Aufgrund fehlender geeigneter analytischer Berechnungsansätze können die im Rahmen des Verfahrens zu beantwortenden Fragen ohne ein solches numerisches Modell nicht befriedigend beantwortet werden.

Im Vorlauf wurde als Basis für den Modellaufbau eine vertiefende hydrogeologische Systemanalyse durchgeführt. Wesentliches Ergebnis dieser Analyse war die Feststellung, dass am Standort und im Umfeld langfristig fallende Grundwasserstände herrschen. Die Ursache für dieses allgemeine Absinken der Grundwasserstände ist nach dieser Analyse in regional wirksamen Grundwassereingriffen begründet. Die Entwicklung der Grundwassererneubildungsrate dagegen weist im Betrachtungszeitraum nach den vorliegenden Daten keinen Trend auf.

Aus der Systemanalyse ergab sich aufgrund der regional wirksamen Einflüsse auf das Grundwasser, dass ein kleinräumiges numerisches Modell für das Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen die Fernwirkung der maßgeblichen Grundwasserentnahmen nicht befriedigend berücksichtigen kann. Um bei den Prognosen zur voraussichtlichen künftigen Entwicklung stets zwischen den Auswirkungen des Planvorhabens selbst und den nicht beeinflussbaren äußeren Einflüssen auf das Grundwasser unterscheiden zu können, wurde der Aufbau eines regionalen Grundwasserströmungsmodells empfohlen, welches sich an regional wirksamen natürlichen hydrologischen Grenzen orientiert.

Kapitel 2 enthält eine Auflistung der im Rahmen des hydrogeologischen Fachbeitrags abgehandelten Fragestellungen zu den Auswirkungen der geplanten Erweiterung des Rahmenbetriebsplangebietes.

In Kapitel 3 folgt eine allgemeine Beschreibung des Standortes zur Hydrogeologie des Standortes.

Kapitel 4 dieses Fachbeitrages enthält die Beschreibung des aufgebauten Grundwasserströmungsmodells, welcher zur Beantwortung der grundlegenden prognostischen Fragestellungen der Auswirkungen der geplanten Erweiterung des Rahmenbetriebsplangebiets herangezogen wird. Zunächst erfolgt in Kapitel 4.1 die Definition der Aufgabenstellung, welche einen wesentlichen Schritt beim Aufbau eines numerischen Grundwasserströmungsmodells darstellt. Die Kapitel 4.2 und 4.3 beschreiben den Modellaufbau hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Dimensionalität, Kapitel 4.4 die Modellparametrisierung. Ein weiterer zentraler Arbeitsschritt bei der Grundwasserströmungsmodellierung besteht in der Modellkalibrierung, welche in Kapitel 4.4 erläutert wird. Die Ergebnisse der Prognosesimulationen schließlich finden sich im Kapitel 4.6.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Modelluntersuchung sowie ergänzende Angaben des hydrogeologischen Fachbeitrages zu weiteren Aspekten des Planvorhabens gemäß Kapitel 2 enthält Kapitel 5. Dabei werden auch hydrochemische, limnologische und ökologische Aspekte erörtert.

## 2 Gegenstand des hydrogeologischen Fachbeitrags zum Antrag auf Rahmenbetriebsplanerweiterung

Der hydrogeologische Fachbeitrag hat die nachfolgend gelisteten Gesichtspunkte zum Gegenstand

- Grundwasserhydraulische Fragestellungen
  - Grundwasserstände und Aufhöhung/Absenkung des Grundwassers im Zu- und Abstrom des erweiterten Tagebausees
  - Richtung der Grundwasserströmung
  - Reichweite der Auswirkung auf das Grundwasser
  - Bereitstellung der Grundlagen zur Beurteilung des Einflusses auf grundwasserabhängige Feuchtbiotope durch Flurabstandspläne
- Überwachung der Grundwassersituation und Strategien zur Vermeidung negativer Auswirkungen
- Grundwassernutzungen im Umfeld und deren Beeinflussung durch das Planvorhaben
- Gefährdungspotentiale im Umfeld des Planvorhabens
- Angaben zur Grund- und Seewasserbeschaffenheit, Prognose zur Entwicklung
- Hydromorphologische Aspekte zur Tagebaugestaltung

Zur Beantwortung der grundwasserhydraulischen Fragestellungen wurde ein instationäres numerisches Grundwasserströmungsmodell aufgebaut.

Die beiden letztgenannten Punkte enthalten auch hydrochemische, ökologische und limnologische Aspekte.

## 3 Hydrogeologische Standortbeschreibung

### 3.1 Örtliche Situation

Das Quarzsand- und Mahlwerk Haltern der Quarzwerke GmbH gewinnt hochreinen Quarzsand im Nassabbau aus den Halterner Sanden. Bis in das Jahr 2012 fand ein Abbau parallel in den Gewinnungsseen Haltern-West und Haltern-Sythen statt, seitdem nur noch im See Haltern-Sythen. Der gewonnene Sand wird zusammen mit dem bei der Förderung anfallenden Wasser in Suspension über Druckleitungen der Aufbereitungsanlage zugeführt. Dazu wird See- bzw. Grundwasser genutzt. Das ehemals im See Haltern-West aktive Gewinnungsschiff wurde 2012 in den See Haltern-Sythen verbracht, so dass dort heute zwei Schiffe tätig sind. Der See West befindet sich mittlerweile bereits in rekultiviertem Zustand.

Der älteste Gewinnungssee Haltern-Ost ist heute nicht mehr in Abbau und ebenfalls bereits rekultiviert. Der See dient als Vorflut für das Sandaufbereitungswasser und wird somit auch als Durchflussspeicher für das zurück gepumpte Wasser genutzt. Die nördlich der Gewinnungsseen gelegenen Seen Vogelvennteich und Dülmener See stellen Stauanlagen dar und werden zu Fischereizwecken mit gelegentlicher vollständiger Entleerung betrieben. Ihre Entstehung steht nicht im Zusammenhang mit der Sandgewinnung. Östlich des Sees Haltern Ost befindet

sich die Wassergewinnungsanlage Hausdülmen der Stadtwerke Dülmen GmbH, deren ausgewiesene Trinkwasserschutz zonen II (grün) und III (gelb) in Abbildung 1 eingetragen sind.

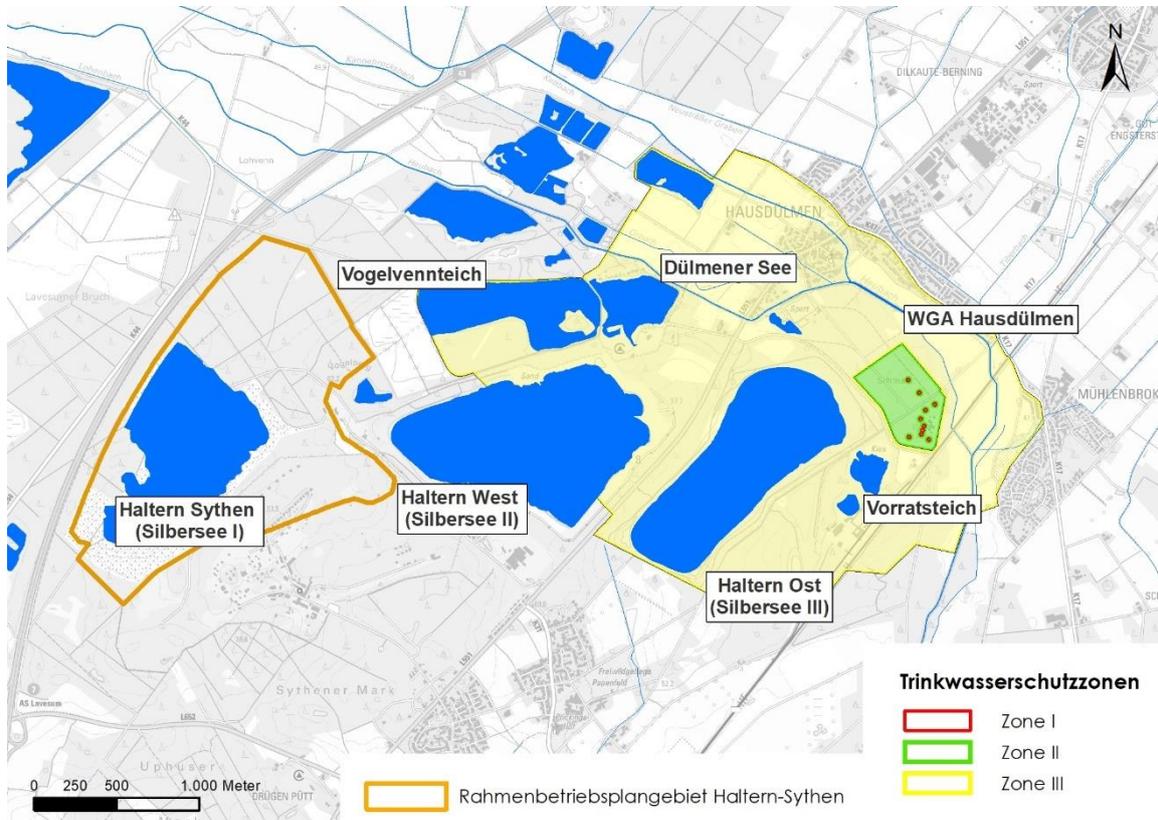


Abbildung 1: Lage des Gewinnungssees Haltern-Sythen der Quarzwerke GmbH mit Rahmenbetriebsplangebiet

### 3.2 Hydrogeologische Verhältnisse

#### 3.2.1 Geologie und Grundwasserleiter

Unter nur örtlich auftretenden quartären Ablagerungen wird der Untergrund im näheren Umfeld des Rahmenbetriebsplangebiets durch die Halterner Sande und liegenden Recklinghausener Sandmergel aufgebaut. Hierbei handelt es sich um marine Ablagerungen der oberen Kreide (Obersanton bis Untercampan). Die Abbildung 2 zeigt das anstehende Verbreitungsgebiet der Halterner Sande und der Recklinghausener Sandmergel. Die Lage des hier in Rede stehenden Sandgewinnungsgebietes ist durch einen roten Punkt gekennzeichnet.

In den zentralen Bereichen der Beckenstruktur können die Halterner Sande bis über 300 m Mächtigkeit erreichen. Im östlichen Bereich des Gewinnungsgebietes Haltern der Quarzwerke GmbH nimmt sie auf rund 100 m ab. Die Halterner Sande bilden einen sehr ergiebigen und daher wasserwirtschaftlich bedeutenden Grundwasserleiter.

Unter den Halterner Sanden folgen mit der Emscher-Formation zunächst ältere Schichten der Oberkreide, die im Vergleich zu den Halterner Sanden für das Grundwasser stauende Eigenschaften aufweisen. Unter noch tieferen Oberkreideschichten mit dem Aquifersystem des Cenoman/Turon folgt schließlich das Steinkohlengebirge.

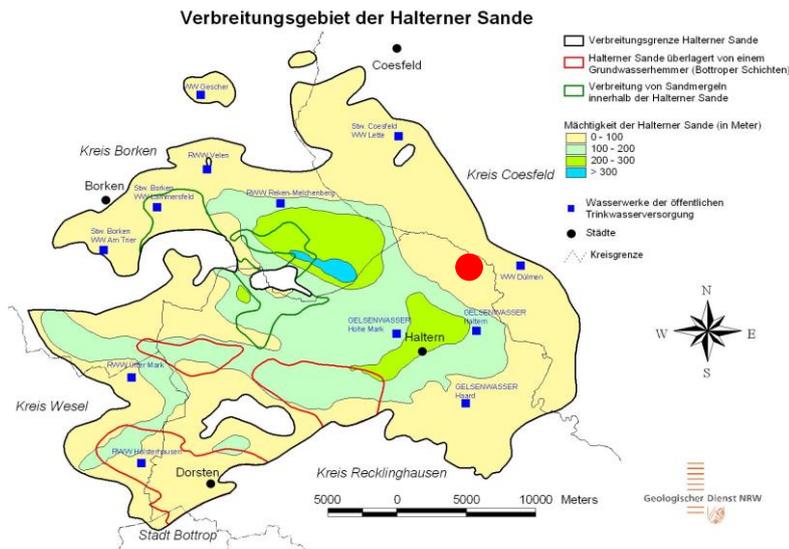


Abbildung 2: Verbreitungsgebiet der Halterner Sande, Quelle: Arbeitskreis Wasserwerke Halterner Sande, [www.awhs.de](http://www.awhs.de)

### 3.2.2 Grundwasserströmung

Der Höhenzug der Hohen Mark bildet westlich des Abbauggebietes ein ausgeprägtes Grundwasserneubildungsgebiet. Das Grundwasser strömt von diesem zentralen Gebiet allseitig ab und wird durch die Vorfluter Heubach, im weiteren Verlauf den Halterner Mühlenbach, durch die Lippe und den Midlicher Mühlenbach jeweils mit ihren zugehörigen Nebengewässern abgeführt (Abbildung 3). Die Aussandungsseen des Werks Haltern befinden sich im Übergang zum Grundwasserausflussgebiet der Talauve des Heubachs bzw. des Halterner Mühlenbachs.

Aufgrund der großen Mächtigkeit des Grundwasserleiters bildet sich im Grundwasser ein dreidimensionales Strömungsfeld aus, das Abbildung 4 in einem verallgemeinernden schematischen Profilschnitt anhand von Strom- und Potentiallinien wiedergegeben ist.

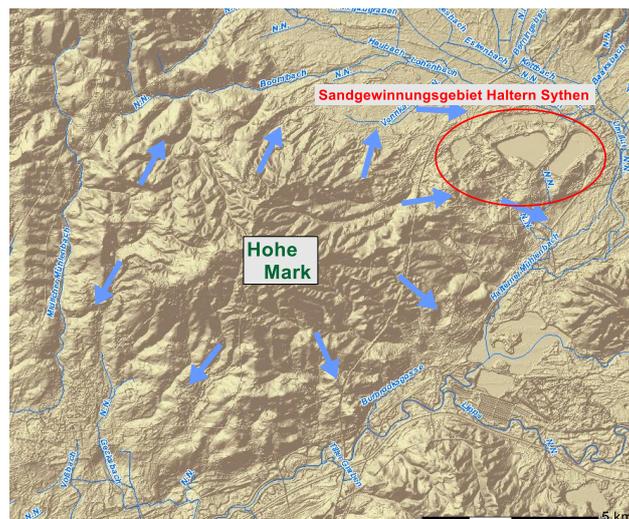


Abbildung 3: Regionale Grundwasserströmungsrichtungen (blaue Pfeile) im Bereich der Hohen Mark, Datenquelle der Grundlagendaten: Elektronisches Wasserinformationssystem ELWAS des MULNV

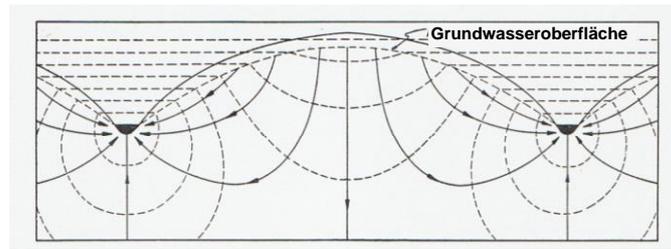


Abbildung 4: Strom- und Potentiallinien im dreidimensionalen Grundwasserströmungsfeld, nach HUBBERT, 1940

Im Bereich des Abbaugbietes selbst herrscht aufgrund des Verlaufs des Heubachs eine Nordost über Ost bis Südost gerichtete Grundwasserströmung, die durch den Einfluss der Aussandungsseen und der gestauten Seen Vogelvennteich und Dülmener See lokal modifiziert wird.

Mit der Offenlegung der Grundwasseroberfläche im Zuge der Anlage eines Aussandungssees ergeben sich im Umfeld charakteristische Veränderungen der lokalen Grundwasserströmung. Es entsteht eine horizontale Seewasseroberfläche, welche die mehr oder weniger stark geneigte Grundwasseroberfläche anschneidet. Dies führt auf der Anstromseite zur Absenkung und auf der Abstromseite zur Aufhöhung der Grundwasseroberfläche. Auf der Anstromseite tritt Grundwasser in den See über, auf der Abstromseite dringt Seewasser in den Grundwasserleiter ein. Der Neutralbereich zwischen diesen Zonen wird durch die sogenannte "Kippungslinie" gekennzeichnet, die bei gut durchströmten Seen etwa in der Mitte des Sees angeordnet ist. Bleiben unterhalb einer solchen Abgrabung Teile des Grundwasserleiters erhalten, wirkt sich die Anlage des Sees auch bis in größere Tiefen auf die Grundwasserhydraulik aus. Die Abbildung 5 und Abbildung 6 verdeutlichen schematisch die beschriebenen Verhältnisse.

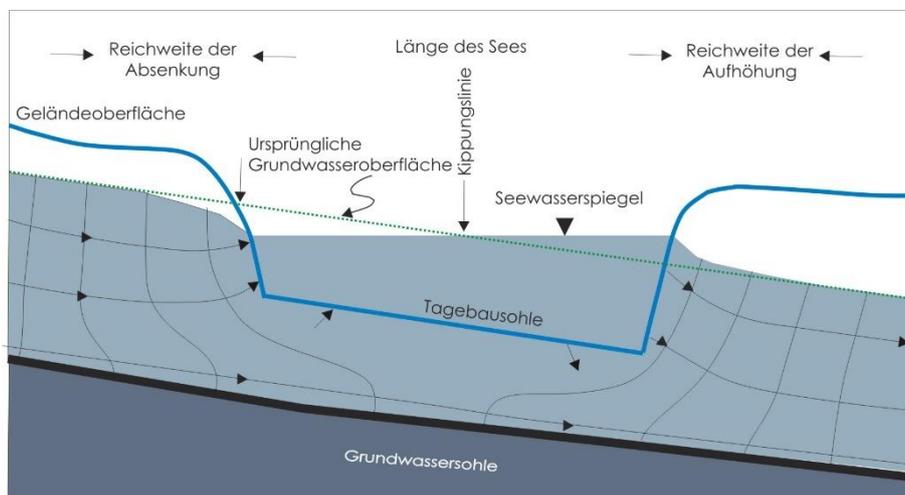


Abbildung 5: Einfluss eines Baggersees auf die Grundwasserströmung bei partieller Entfernung des Grundwasserleiters durch eine Abgrabung

Exakte analytische Methoden zur Berechnung der Reichweite der beschriebenen Auswirkungen auf das Grundwasser sind nicht verfügbar. Die gewöhnlich herangezogenen Berechnungsansätze sind rein empirischer Natur. Liegen mehrere Aussandungsseen in engerer Nachbarschaft, kommt es zu entsprechenden Überlagerungseffekten, die das resultierende Strömungsbild im Grundwasser komplex verformen.

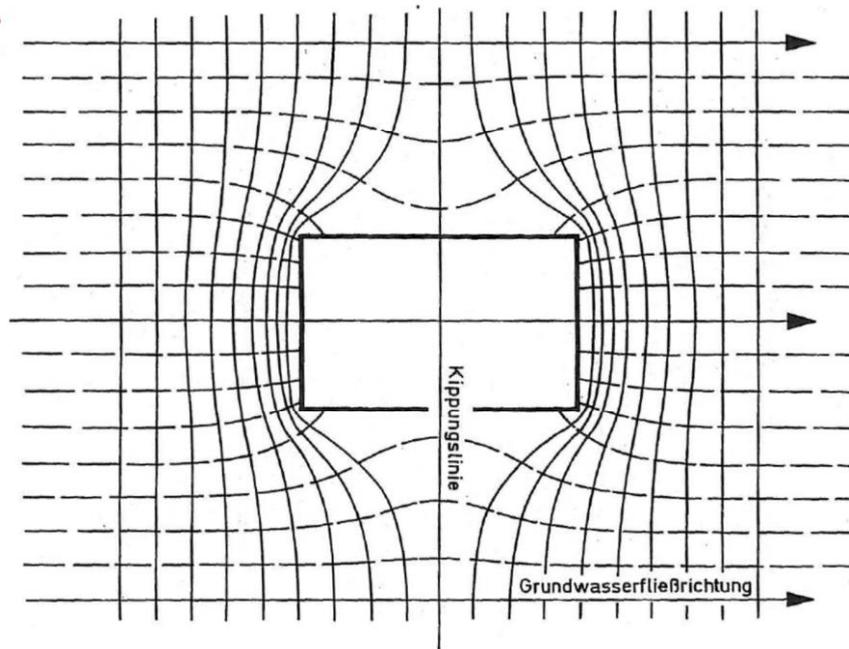


Abbildung 6: Einfluss eines Baggersees auf die Grundwasserströmung in der Aufsicht, WROBEL 1980

### 3.2.3 Entwicklung der Grundwasserstände

Die nachfolgende Abbildung 7 stammt aus dem Erläuterungsbericht zum Antrag der Quarzwerke GmbH auf wasserrechtliche Erlaubnis aus dem Jahr 2012. Anhand der Gangliniendiagramme ist zu erkennen, dass sich in der Hohen Mark (Grundwassermessstelle HS\_43) bereits ab den späten 1960er Jahren ein fallender Trend der Grundwasserstände entwickelt hat, der auch im Plangebiet zum Rahmenbetriebsplan in sehr ähnlicher Ausbildung festzustellen ist. In den Bereichen der Niederungen ist ein entsprechender Trend bisher nur deutlich schwächer ausgebildet zu erkennen.



Abbildung 7: Charakteristische Grundwasserstandsganglinien im Umfeld der Nassaussandung in Haltern Sythen, Datenquellen: Elektronisches Wasserinformationssystem ELWAS des MULNV, Quarzwerke GmbH

Im Rahmen der bereits erwähnten hydrogeologischen Systemanalyse wurden zahlreiche Zeitreihen von Grundwasserständen aus dem Untersuchungsgebiet einer linearen Trendanalyse unterzogen und die Ergebnisse regionalisiert. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in

Abbildung 8 in Form von Isolinien gleichen Trendbetrages (cm/Jahr) dargestellt. Anhand der Karte ist erkennbar, dass praktisch flächendeckend im betrachteten Gebiet zwischen Heubach, Lippe und Wienbach fallende Grundwasserstände im oberen Stockwerk zu verzeichnen sind, deren größtes Ausmaß bestimmten Schwerpunkten insbesondere in einem etwa 2 km breiten Streifen längs der Lippe sowie im äußeren Nordwesten des Gebiets zugeordnet werden kann.

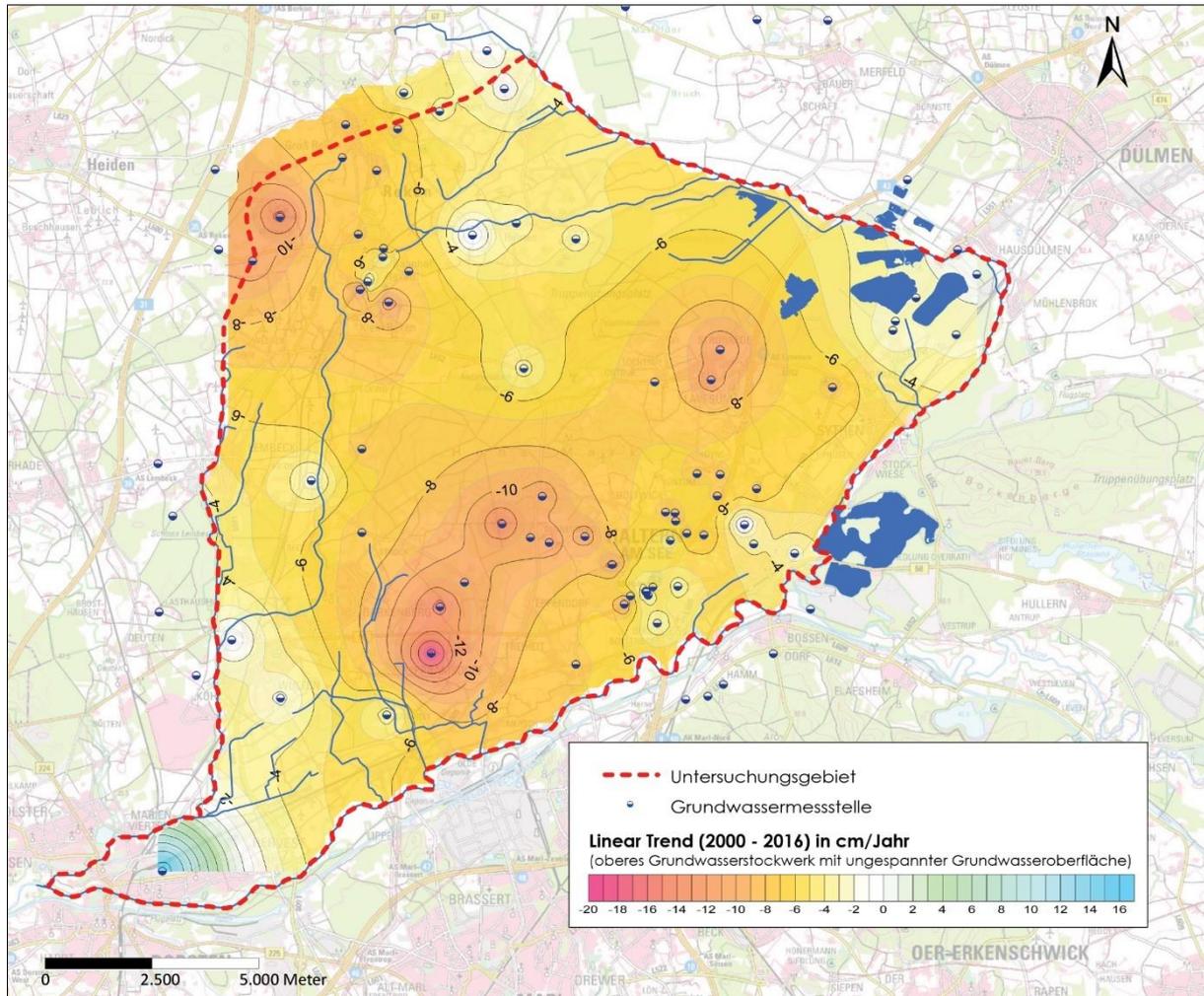


Abbildung 8: Ergebnisse der Trendregionalisierung von Zeitreihen der Grundwasserstände aus dem Zeitraum 2000 – 2016

## 4 Grundwasserströmungsmodell

### 4.1 Aufgabenstellung

Unter dem Eindruck seit mehreren Jahrzehnten fallender Grundwasserstände soll das Grundwassermodell die

durch Messungen dokumentierte dynamische Entwicklung der Grundwasserstände im engeren und weiteren Umfeld des Rahmenbetriebsplangebietes abbilden. Dazu ist ein numerisches Grundwasserströmungsmodell aufzubauen und instationär mit einer für die Fragestellungen des Rahmenbetriebsplanverfahrens Haltern-Sythen hinreichender Genauigkeit zu kalibrieren.

Mit dem auf diese Weise kalibrierten Modell soll der künftige Planzustand des bergbaulichen Rahmenbetriebsplans Haltern-Sythen und sein Einfluss auf das Grundwasser simuliert werden. Referenzzustand für die Modellprognose ist die maximale Ausdehnung des Tagebausees Haltern-Sythen nach dem bereits bestehenden Rahmenbetriebsplan.

Es wird also eine Prognosesimulation zum bereits genehmigten Planzustand durchgeführt, sowie eine weitere mit dem aktuell beantragten Zustand. Beide Prognosesimulationen werden miteinander verglichen und die resultierenden Auswirkungen bzw. Änderungen dokumentiert. Hierbei handelt es sich insbesondere um die voraussichtlich absolute Höhenlage der Grund- und Seewasserstände im Umfeld einschließlich der resultierenden Grundwasserflurabstände, sowie die Reichweite der Absenkung bzw. Aufhöhung der Grundwasseroberfläche, sowie die allgemeine Grundwasserströmungssituation.

Für die numerische Modellierung sind ein geeigneter Modellraum und ein historischer Modellzeitraum festzulegen.

Im Rahmen der im Vorfeld durchgeführten hydrogeologischen Systemanalyse hatte sich herausgestellt, dass die regional fallenden Grundwasserstände aus der Summationswirkung vielfältiger Grundwassernutzungen mit einem Schwerpunkt im Bereich zwischen Haltern und Schermbeck etwa längs der Lippe resultieren, die in ihrer Fernwirkung bis auf das in Rede stehende Rahmenbetriebsplangebiet Haltern-Sythen der Quarzwerke GmbH ausstrahlen. Aus diesem Grund ist der Aufbau eines kleinräumigen Modells nicht zweckmäßig, da auf diese Weise die Fernwirkung relevanter Grundwasserentnahmen nicht befriedigend berücksichtigt werden kann.

Vielmehr muss der Modellraum so gewählt werden, dass die maßgeblichen Einflüsse auf das Grundwassergehehen abgebildet werden können.

## **4.2 Mathematische Grundlagen**

Bezüglich der physikalischen und mathematischen Grundlagen der Grundwasserströmung und der numerischen Lösung der Differentialgleichungen der Grundwasserströmung wird auf den Anhang 1 verwiesen.

Für die numerische Lösung der Differentialgleichung der Grundwasserströmung sind die Vorgabe von Anfangsbedingungen und die Definition von Randbedingungen erforderlich. Analytische Lösungen existieren nur für eine Reihe von Strömungssituationen mit sehr einfach angeordneten Randbedingungen und ausgeprägten Generalisierungen. Mit diesen Vereinfachungen und Generalisierungen wird man den natürlichen Verhältnissen bei der regionalen Betrachtung der Grundwasserströmung nicht gerecht, so dass man zur numerischen Lösung der Strömungsgleichung greift.

Bei der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung nach der Methode der Finiten-Differenzen wird das Modellgebiet in Rechteckelemente aufgeteilt (diskretisiert) und mit den Daten zur Geometrie und Hydraulik versehen. Nach der Vorgabe einer gemessenen Piezometerhöhenverteilung als Anfangsbedingung wird die Strömungsgleichung implizit für jedes Element in Verbindung mit seinen Nachbarelementen aufgestellt. Dabei entsteht ein lineares Gleichungssystem mit  $n$  Gleichungen bei  $n$  Rechteckelementen, welches u. a. durch iterative

Verfahren gelöst werden kann. Im vorliegenden Modell wird zur Lösung des Gleichungssystems ein PCG-Verfahren (präkonditionierte konjugierte Gradienten Verfahren) mit Optimierung für nichtlineare Bedingungen angewendet. Die Konvergenzkriterien wurden so gewählt, dass ein Bilanzfehler von 0,5 % in keinem Zeitschritt überschritten wird.

Als Ergebnis der iterativen Berechnung erhält man die unbekannte Piezometerhöhenverteilung  $h(x, y, z)$  nach dem gewählten Zeitschritt  $t + \Delta t$ .

Welche Veränderung der Piezometerhöhenverteilung in den Elementen nach den gewählten Zeitschritten eintritt, hängt neben den hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters im Wesentlichen von der Wahl der Randbedingungen ab. Als Randbedingungen werden unterschieden:

Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ): Festpotentialknoten, in dem die Lösung der Strömungsgleichung vorgegeben ist. Die vorgegebene Piezometerhöhe bleibt während des Zeitschritts konstant. Vorgabe: Grundwasserstand. Beispiel: Offene Wasserfläche mit konstantem Wasserspiegel und direkter hydraulischer Anbindung an den Grundwasserleiter.

Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ): Konstanter Randzufluss. Das Element enthält über einen konstanten Gradienten ( $\partial h / \partial x, y$ ) senkrecht auf den Modellrand einen über den Zeitschritt konstanten Volumenstrom. Vorgabe: Volumenstrom. Beispiel: Randzufluss am Talrand. Sonderfall: Undurchlässiger Rand mit Randzufluss = 0.

Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ): Kombination aus 1 und 2. So genannte Leakageknoten. Dienen zur Modellierung halbdurchlässiger Ränder. Vorgabe: Wasserstand und hydraulischer Widerstand. Beispiel: Fluss-, Bachsohle mit hydraulischem Widerstand.

## 4.3 Modellaufbau

### 4.3.1 Lage

Die Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Lage des Modellgebiets und des Rahmenbetriebsplangebiets in unterschiedlichem Maßstab. Das Modellgebiet befindet sich im zentralen nördlichen Bereich von Nordrhein-Westfalen. Die Modellgrenzen wurden entlang von natürlichen hydraulischen Randbedingungen, im Wesentlichen Vorflutern, festgelegt. Die südliche Grenze bildet der Gewässerabschnitt der Lippe zwischen Haltern am See und Dorsten. Im Westen wird das Gebiet vom Wienbach und Hammbach, sowie im Osten vom Heubach/Halterner Mühlenbach begrenzt. Die nördliche Grenze stellt der südliche Abschnitt des Heubachs (etwa ab Reken) dar. Im Nordwesten von der Quelle des Midlicher Mühlenbachs wurde in Richtung Nordosten die Modellgrenze entlang einer Linie gewählt, die einem Grundwasserstromfaden entspricht.

Das Gebiet umfasst als Homogenbereiche den Grundwasserkörper 278\_07 und randlich angrenzende Grundwasserkörper (278\_02, 278\_09). Als größere Ortschaften sind im Osten Haltern am See, im Nordwesten Reken und im Südwesten Dorsten zu nennen.

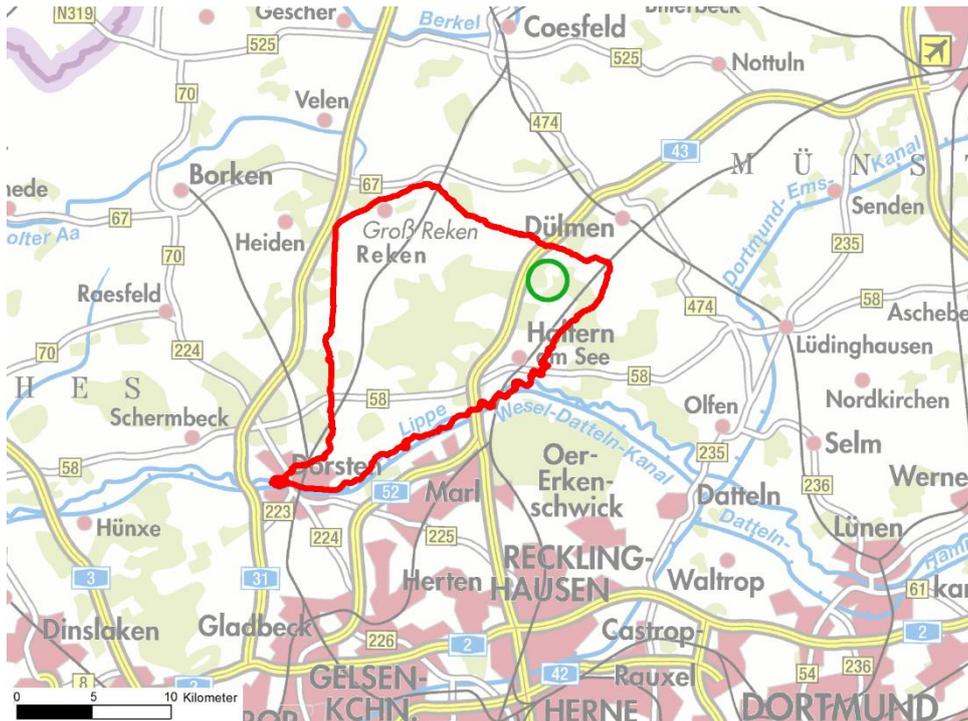


Abbildung 9: Übersichtskarte des Modellgebiets mit Kennzeichnung des Rahmenbetriebsplangebiets

#### 4.3.2 Räumliche Dimensionalität

Den Hauptgrundwasserleiter im Untersuchungsgebiet bilden die kreidezeitlichen Halterner Sande zusammen mit den hangenden geringmächtigen quartären Sanden und den liegenden Recklinghäuser Schichten. Im Südwesten des Untersuchungsgebiets wird das obere Grundwasserstockwerk in zwei Stockwerke aufgespalten. Dort ist über der Bottrop Formation als Grundwasserstauer innerhalb der quartären Ablagerungen ein weiteres Stockwerk ausgebildet, so dass die Halterner Sande dort das örtlich zweite Grundwasserstockwerk bilden. Die Emischer-Formation bildet die Basis des oberen Grundwasserleiters bzw. der oberen beiden Grundwasserstockwerke.

Dieser komplexe Schichtaufbau mit dem Zusammenspiel zweier Grundwasserleiter erfordert einen dreidimensionalen Modellaufbau.

#### 4.3.3 Zeitliche Dimensionalität (stationär/instationär)

Aufgrund des im Untersuchungsgebiet vorherrschenden fallenden Trends der Grundwasserstände ist ein stationärer Modellansatz nicht möglich. Aufgrund der zeitlichen Entwicklung der Piezometerhöhen erfolgt die Simulation instationär.

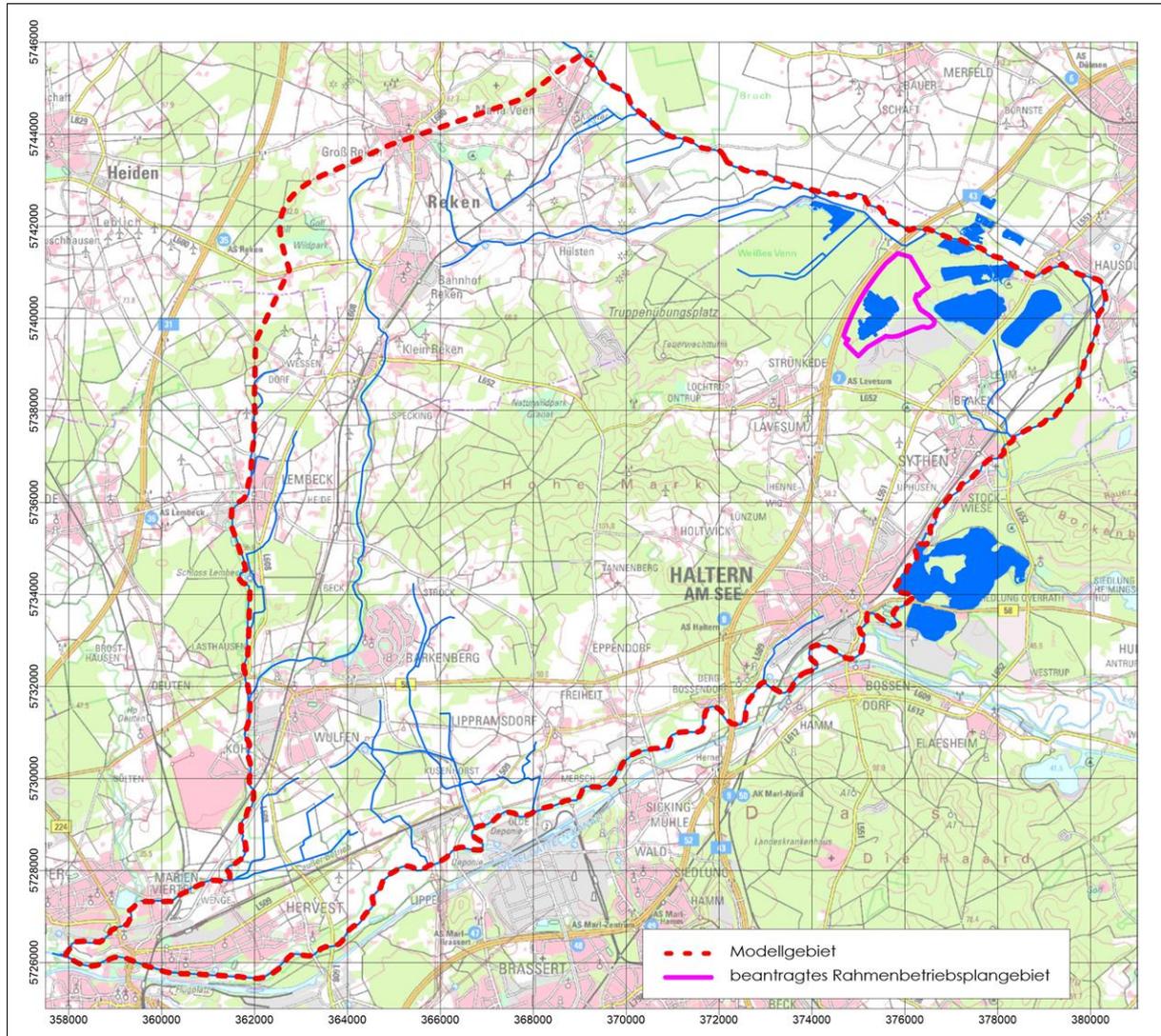


Abbildung 10: Modellgebiet mit Kennzeichnung des Rahmenbetriebsplangebiets

#### 4.3.4 Räumliche und zeitliche Auflösung

##### 4.3.4.1 Räumliche Auflösung

Die horizontale Auflösung bzw. die Gitterweite wurde auf 50 m festgelegt. Die Festlegung der Gitterweite eines Modells ist das Ergebnis eines Abwägungsprozesses und abhängig von der Aufgabenstellung und von der zur Verfügung stehenden Datengrundlage, im vorliegenden Fall insbesondere von der Seegeometrie und der Dichte des vorhandenen Messstellennetzes.

Die vertikale Auflösung erfolgte unter Berücksichtigung der hydrostratigraphischen Einheiten. Die quartären Ablagerungen stellen die Modellschicht 1 dar, die Bottrop Formation wird durch Modellschicht 2 abgebildet. Die Halterner Sande wurden aufgrund ihrer großen Mächtigkeit, der nicht vernachlässigbaren vertikalen Gradienten der Grundwasserströmung, aufgrund der verschiedenen Tiefenlagen der Grundwasserentnahmen und schließlich zur Einbindung der Tagebauseen in vier Modellschichten (Modellschichten 3 bis 6) unterteilt.

##### 4.3.4.2 Zeitliche Auflösung und Modellzeitraum

Unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung, der Dynamik der Grundwasserströmungsverhältnisse und der zur

Verfügung stehenden Datenlage ist eine zeitliche Diskretisierung des Modells auf Monatsbasis sinnvoll und ausreichend.

Um die Dynamik des Grundwassergeschehens hinreichend genau abbilden zu können, ist ein mehrjähriger Modellzeitraum erforderlich, andererseits sinkt die Datenverfügbarkeit deutlich, je weiter in die Vergangenheit zurückgegriffen werden soll. Es wurde schließlich ein Simulationszeitraum über vierzehn Jahre festgelegt. Er beginnt im Mai 2003 und endet im April 2017 nach 168 monatlichen Zeitschritten.

### **4.3.5 Modellgeometrie**

#### **4.3.5.1 Horizontaler Aufbau**

Im Rahmen der hydrogeologischen Systemanalyse konnten bereits hydraulisch sinnvolle Grenzen festgelegt werden:

- Die südliche Grenze des Untersuchungsgebiets stellt die Lippe als Hauptvorfluter dar.
- Östlich verläuft die Stever, welche in der Talsperre Hullern zu einem See (Hullerner Stausee) aufgestaut wird. Das dort abfließende Wasser wird mit dem Wasser des aus Norden zufließenden Mühlenbachs durch die Stevertalsperre Haltern zum Halterner Stausee aufgestaut. Die Stever mündet südlich von Haltern in die Lippe.
- Im Westen stellt der Wienbach, welcher südlich Groß Reken entspringt und nach der Vereinigung mit dem Midlicher Mühlenbach in Holsterhausen als Hammbach in die Lippe mündet, die Grenze dar.
- Im Norden stellt etwa ab Reken der Heubach die Modellgrenze dar. Ab Reken fließt er in ost-südöstliche Richtung, ändert im Bereich der Halterner Aussandungsseen der Quarzwerke seine Fließrichtung nach Süden und wird dort zum Mühlenbach. Im Nordwesten, nördlich der Quelle des Wienbachs, wurde in Richtung Nordosten die Modellgrenze entlang einer Linie gewählt, die dem Verlauf einer Grundwasserstromlinie entspricht.

Das Modellgebiet hat eine Fläche von 221,305 km<sup>2</sup>. Die Nord-Süd Erstreckung beträgt maximal 18,05 km, die Ost-West Erstreckung maximal 16,9 km.

#### **4.3.5.2 Vertikaler Aufbau**

Die Oberkante des Modells entspricht der tatsächlichen Geländeoberfläche und wurde aus dem digitalen Geländemodell DGM 10 jeweils als Mittelwert über einer Modellzelle generiert. Der vertikale Modellaufbau ist durch den geologischen Schichtenaufbau bestimmt. Die Informationen zur Höhenlage der geologischen Formationsgrenzen wurden vom Geologischen Dienst bereitgestellt. Die Unterkante der Haltern Formation (Halterner Sande) bzw. Oberkante der Emscher Formation stellt die Modellbasis dar. Die vertikale Diskretisierung umfasst insgesamt sechs Modellschichten.

Der quartäre Grundwasserleiter bildet die Modellschicht 1 mit Mächtigkeiten zwischen rund 1 und 35 m. Diese Schichten sind nicht flächendeckend bzw. nicht flächendeckend wassererfüllt im Modellgebiet vorhanden. Bei Nichtvorhandensein des Quartärs sind die entsprechenden Zellen der Modellschicht 1 im Modell inaktiv.

Modellschicht 2 stellt die Bottrop Formation dar, welche ebenfalls nicht flächendeckend im Modellgebiet vorhanden ist. Bei deren Vorhandensein entspricht die Mächtigkeit der Modellschicht 2 der Mächtigkeit der Bottrop Formation. In Bereichen, in denen die Bottrop Formation nicht vorhanden ist, die quartären Deckschichten aber wohl, wurde der Modellschicht 2 eine sehr geringe Mächtigkeit zugewiesen und die Bodeneigenschaften von Modellschicht 1 übernommen. Fehlen sowohl die quartären Deckschichten als auch die Bottrop Formation, sind die entsprechenden Zellen der Modellschicht 2 im Modell inaktiv.

Die Haltern Formation schließlich wird durch die Modellschichten 3 bis 6 repräsentiert. Die Unterteilung in vier Modellschichten erfolgte einerseits aufgrund der Anordnung bedeutender Grundwasserentnahmen in verschiedenen Tiefen (vgl. Kapitel 4.3.7.3). Ferner dient die Unterteilung dazu, die Vertikalkomponenten der Grundwasserströmung innerhalb dieser vergleichsweise mächtigen Schicht besser auflösen zu können, sowie ggf. vertikal unterschiedliche Eigenschaften berücksichtigen zu können. Aufgrund der Tiefe der Tagebauseen erlaubt die vorgenommene Unterteilung auch eine adäquate Anströmung der Seen im Modell. Im Bereich des westlich des Rahmenbetriebsplangebietes gelegenen FFH-Gebietes wurden zusätzlich Messungen im Gelände herangezogen. In Abbildung 11 ist der vertikale Modellaufbau neben einer Grundrisskarte beispielhaft in Form eines Profilschnitts entlang einer Linie, die etwa von Dorsten im Südwesten des Modellgebietes bis zum Tagebausee Haltern West verläuft, dargestellt.

#### **4.3.5.3 Lippe**

Die Sohlhöhen der Lippe wurden von der Bezirksregierung Arnsberg zur Verfügung gestellt. Im Bereich der Lippe stellt die Flussole die obere Begrenzung des Grundwasserleiters dar.

#### **4.3.5.4 Sonstige Fließgewässer**

Es liegen keine Datensätze zur Geometrie der sonstigen Fließgewässer im Modellgebiet vor. Diese Daten, insbesondere die Sohlhöhe und die Breite der Bäche, sind jedoch zur Berechnung des Abflusses und der Leakagewassermenge von Bedeutung und mussten dementsprechend in hinreichender Genauigkeit bestimmt werden. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Daten kurz erläutert.

##### **4.3.5.4.1 Sohlhöhen der Bäche**

Die Sohlhöhen der Bäche wurden aus dem Verschnitt der Karte der Gewässerstationierung mit dem digitalen Geländemodell (DGM 1) abgeleitet. Der auf diese Weise gewonnene Datensatz wurde anhand topographischer Merkmale überarbeitet, da die Werte des DGM 1 nur gelegentlich das Gewässer direkt treffen und nicht zwangsläufig immer die korrekte Sohlhöhe abbilden. Im Bereich des westlich des Rahmenbetriebsplangebietes gelegenen FFH-Gebietes wurden zusätzlich Messungen im Gelände herangezogen.

##### **4.3.5.4.2 Gewässerbreite**

Die Breite der Gewässer konnte für nahezu alle Abschnitte gut bis sehr gut abgeschätzt werden. Ausgewertet wurden das elektronische Wasserinformationssystem [www.elwasweb.nrw.de](http://www.elwasweb.nrw.de) des LANUV und die dort hinterlegten Luftbilder. Für den Midlicher Mühlenbach konnte zusätzlich das „Konzept zur naturnahen Entwicklung von Fließgewässern (KNEF), Wienbach und ausgewählte Nebenläufe, Anlagenband 3: Midlicher Mühlenbach und Nebenläufe“ (Umweltbüro Essen 2012) ausgewertet werden.

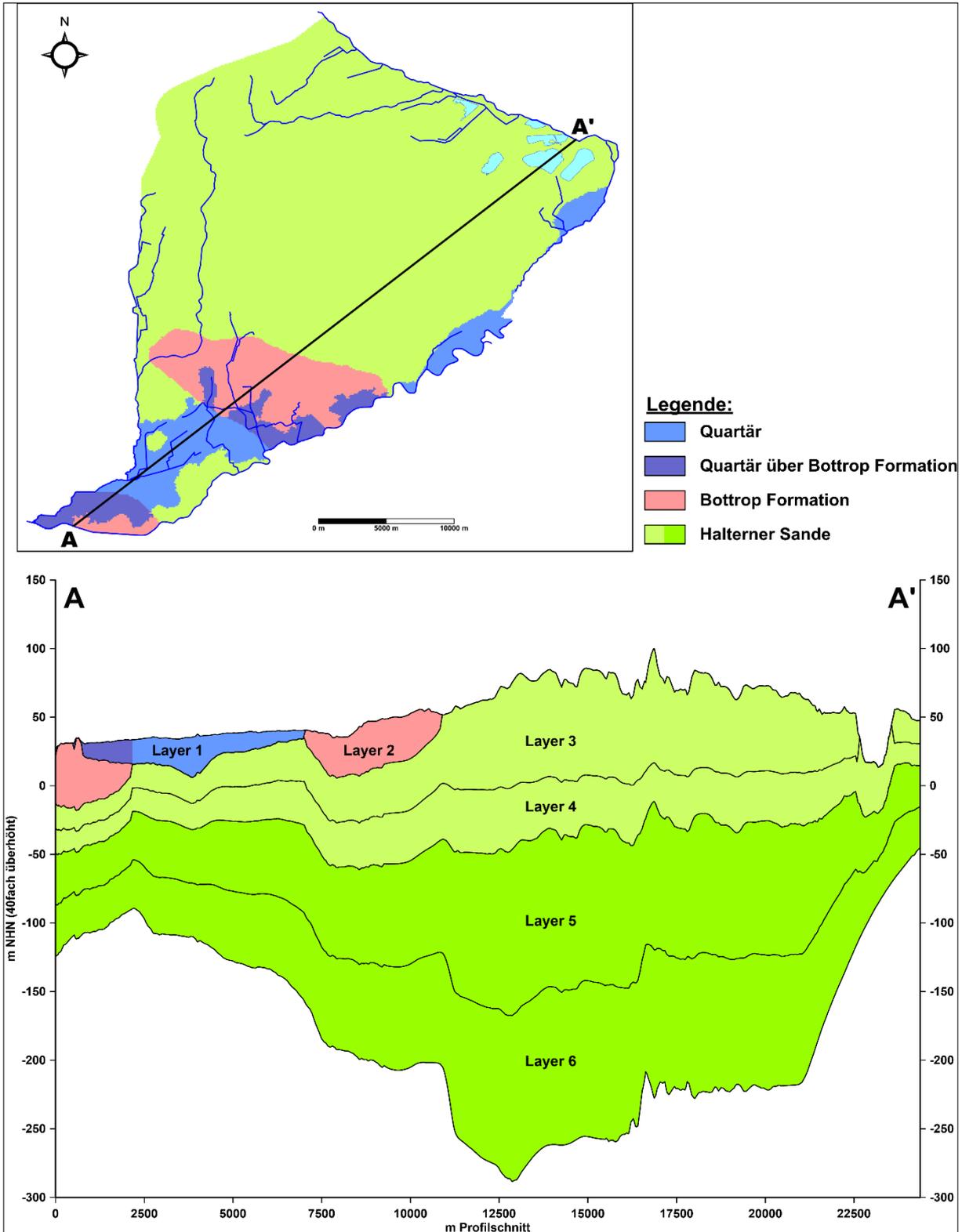


Abbildung 11: Modellschichten im Grundriss und Profilschnitt

### 4.3.6 Randbedingungen

In der nachfolgenden Abbildung 12 sind die im Grundwasserströmungsmodell angewendeten Randbedingungen gekennzeichnet. Sie werden in den nachfolgenden Abschnitten im Einzelnen erläutert.

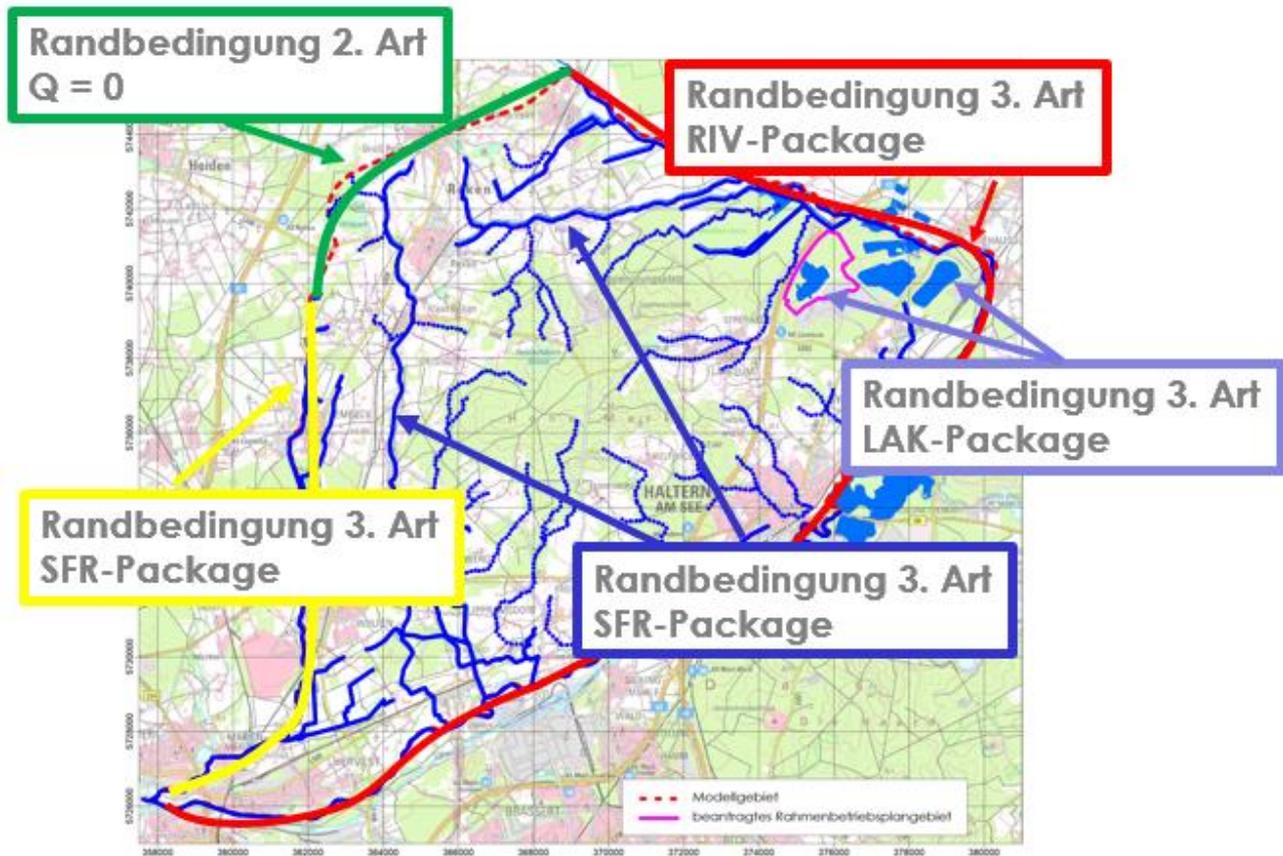


Abbildung 12: Randbedingungen des Grundwasserströmungsmodells

#### 4.3.6.1 Lippe

Die Lippe fungiert im Modell als Randbedingung der 3. Art mit vorgegebenem Wasserstand und hydraulischem Widerstand zum Grundwasser. Dies bedeutet, dass jedem Flusselement in jedem Zeitschritt genau ein Wasserstand zugeordnet werden muss.

In Abbildung 13 (Datenquelle: ELWAS.NRW.DE) sind die Zeitreihen der gemessenen Wasserstände der Pegel Haltern und Schermbeck 1 sowie die daraus ermittelten monatlichen Mittelwerte der Wasserstände, wie sie in das Modell eingegangen sind, dargestellt.

Mit den verfügbaren Daten der Pegel Haltern und Schermbeck 1 (Tageswerte, Wasserstand und Abfluss) wurden die Wasserstände der Lippe auf die Modellzellen interpoliert.

#### 4.3.6.2 Stevertalsperre

Die Stevertalsperre bzw. ihre westliche Grenze wurde analog zu Lippe und Stever als Randbedingung 3. Art mit vorgegebenem Wasserstand und hydraulischem Widerstand zum Grundwasser in das Strömungsmodell implementiert. Von der Gelsenwasser AG wurden Wasserstandsganglinien der Pegel am Walzenwehr (Ober- und Unterwasser) zur Verfügung gestellt.

Die Abbildung 14 zeigt Zeitreihen der gemessenen Wasserstände sowie der daraus ermittelten monatlichen Mittelwerte, wie sie in das Modell eingegangen sind.

### 4.3.6.3 Bäche

#### 4.3.6.3.1 Stever – Heubach – Halterner Mühlenbach

Die Bäche Stever, Heubach und Halterner Mühlenbach werden im Grundwasserströmungsmodell analog zur Lippe als Randbedingung der 3. Art mit vorgegebenem Wasserstand und hydraulischem Widerstand zum Grundwasser behandelt.

Die Wasserstände der Stever wurden durch Interpolation von Daten der Gelsenwasser AG (Tagesmittelwerte unterhalb des Walzenwehres der Talsperre) mit den Wasserstandshöhen der Lippe an der Stevermündung berechnet. Die Abbildung 15 zeigt Zeitreihen der gemessenen Wasserstände des Pegels unterhalb des Walzenwehres und des Pegels Haltern, sowie der daraus berechneten monatlichen Mittelwerte.

Am Heubach befindet sich der Pegel Merfeld und am Halterner Mühlenbach der Pegel Sythen 1. Die vom LANUV zur Verfügung gestellten Wasserstandszeitreihen sind nur bis zum 31.10.2005 vollständig, danach liegen nur ungeprüfte und zum Teil lückenhafte Rohdaten vor.

Zur Generierung durchgehender Wasserstandszeitreihen wurden zunächst die zur Verfügung gestellten Rohdaten anhand der Wasserstand-Abfluss-Beziehungen der früheren geprüften Pegelraten, sowie durch vergleichbare Abflussspendenwerte [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ] auf Plausibilität geprüft und gegebenenfalls korrigiert. Die Datenlücken der beiden Pegel differieren zeitlich, so dass ein Großteil der Lücken mit hinreichender Genauigkeit durch eine Korrelation aus dem jeweils anderen Pegelwert gefüllt werden konnte. Bei zeitlich gleichen Datenlücken beider Pegel wurde mit dem Wasserstand des Lippepegels Haltern korreliert. Auf diese Weise konnten für die Fragestellung hinreichend genaue, lückenlose Tagesmittelwerte erzeugt und zur Modelleingabe in Monatsmittelwerte umgerechnet werden.

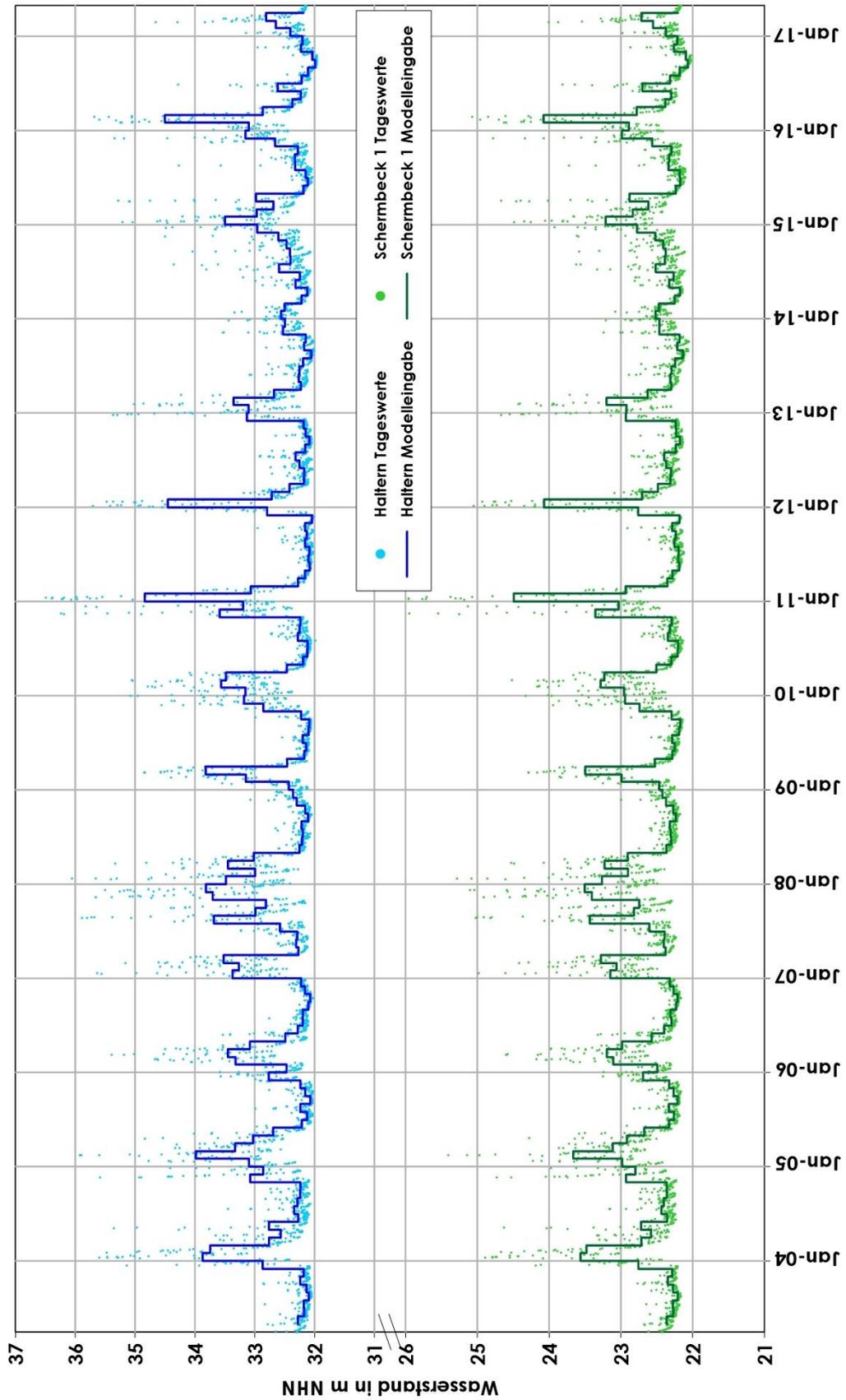


Abbildung 13: Zeitreihen der Wasserstände der Lippe Pegel Haltern und Schermbeck 1, gemessene Tageswerte (Punkte) und Modelleingabe (Balken, Monatsmittelwerte)

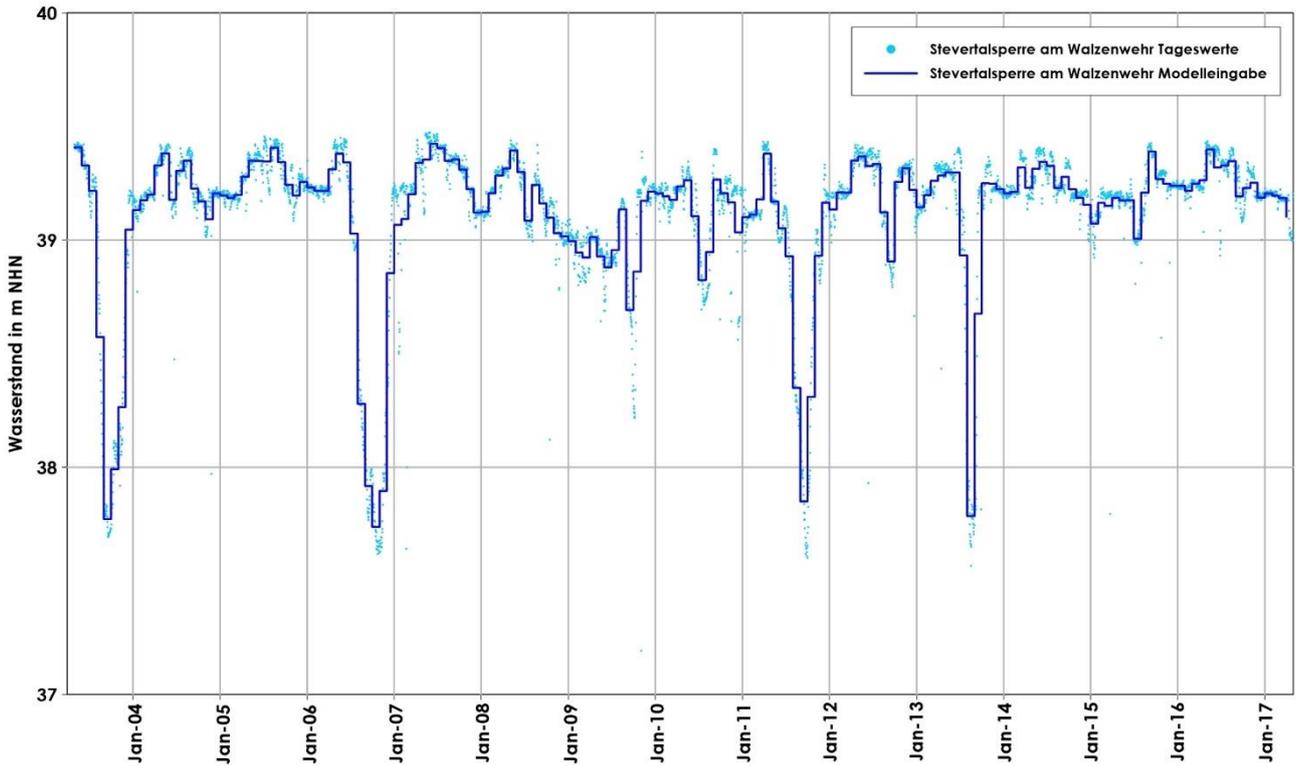


Abbildung 14: Zeitreihen der Wasserstände des Pegels am Walzenwehr der Stevertalsperre, gemessene Tageswerte (Punkte) und Modelleingabe (Balken, Monatsmittelwerte)

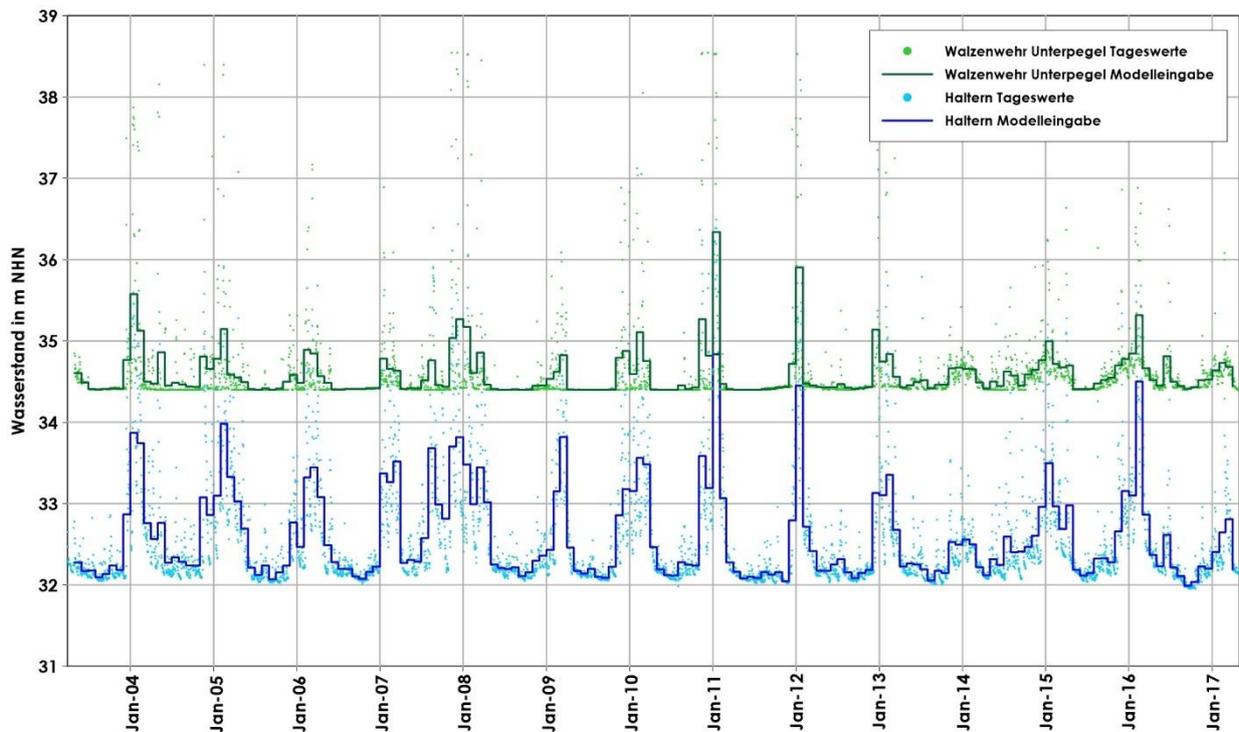


Abbildung 15: Zeitreihen der Wasserstände des Pegels unterhalb des Walzenwehrs und des Pegels Haltern, gemessene Tageswerte (Punkte) und Modelleingabe (Balken, Monatsmittelwerte)

In Abbildung 16 sind die Zeitreihen der zur Verfügung gestellten geprüften (Tageswerte) und ungeprüften (Rohdaten) Wasserstände der Pegel Merfeld und Sythen 1 sowie die daraus ermittelten monatlichen Mittelwerte der Wasserstände dargestellt.

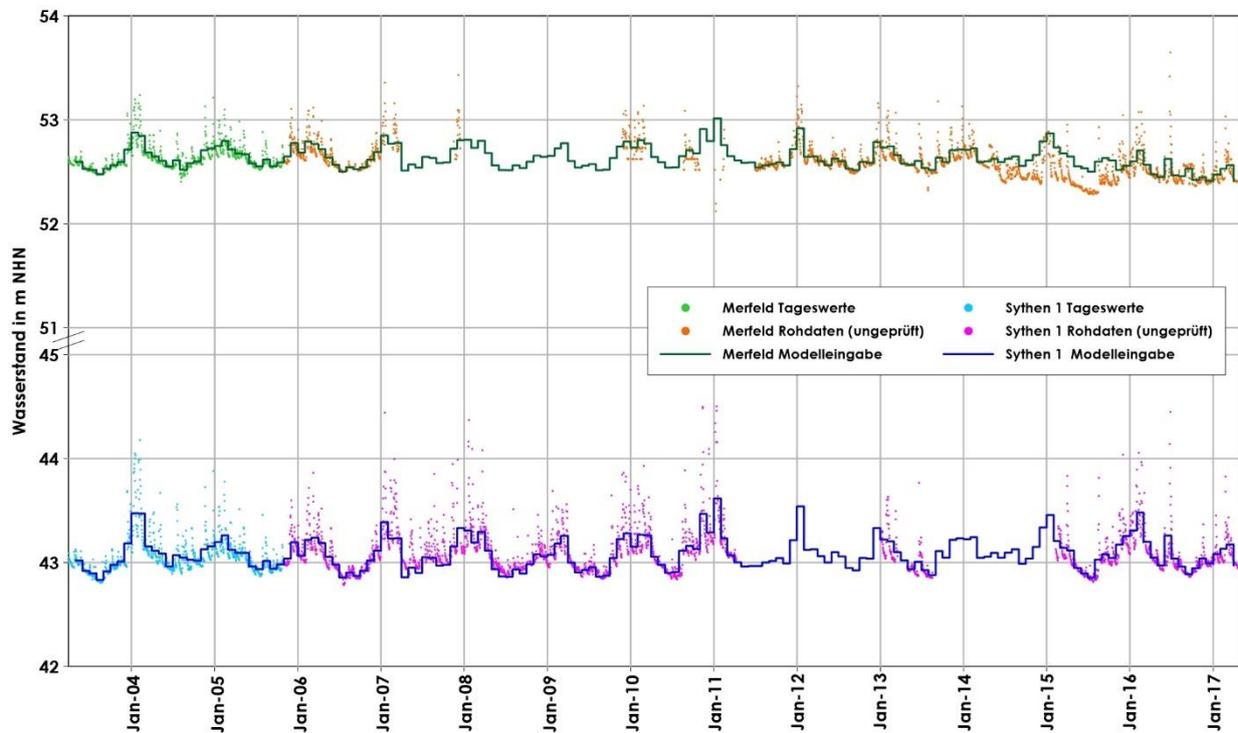


Abbildung 16: Zeitreihen der zur Verfügung gestellten geprüften (Tageswerte) und ungeprüften (Rohdaten) Wasserstände der Pegel Merfeld und Sythen 1, ermittelte monatliche Mittelwerte (Modelleingabe)

#### 4.3.6.3.2 Boombach – Wienbach – Hammbach – Midlicher Mühlenbach – Gecksbach und weitere namenlose Gewässer

An den meisten offenen Fließgewässern des Modellgebietes sind keine Pegel mit Abfluss- bzw. Wasserstandsaufzeichnungen vorhanden. Dementsprechend existieren praktisch keine Messdaten, die für das numerische Modell herangezogen werden können. Lediglich am Gecksbach existiert eine Pumpanlage des Lippeverbandes, wo bedingt durch Bergsenkungen in einer Geländesenke der Gewässerabfluss mit Mengenerfassung abgepumpt wird. Diese Daten können als Plausibilitätskontrolle für das Modell herangezogen werden.

Die Fließgewässer spielen im Grundwasserhaushalt des Modellgebietes eine wichtige Rolle. Sie fungieren einerseits als Vorflut für das Grundwasser und andererseits erfolgt in Gebieten mit hohen Flurabständen auch eine Wiederergänzung des Grundwassers durch versickernden Oberflächenabfluss. Es ist daher sinnvoll, die Interaktion zwischen den Oberflächengewässern und dem Grundwasser möglichst genau im Grundwasserströmungsmodell abzubilden.

#### Grundlagen

Es existieren verschiedene Methoden, die Interaktion zwischen einem Oberflächengewässer und dem Grundwasserleiter zu simulieren. Bei allen Methoden handelt es sich um unterschiedliche Anwendungen der Randbedingungen der 3. Art (Leakageknoten), sei es durch Vorgabe einer Wasserspiegellage und einer Gewässersohlhöhe in einem Oberflächengewässer kombiniert mit einem hydraulischen Widerstand (wie in diesem Modell z.B.

bei der Lippe), oder sei es entsprechend einer Drainagemodellierung, die dem System ab bestimmten Grundwasserständen nur Wasser entziehen kann. Nachteilig wirkt sich bei diesen beiden Methoden aus, dass der Abfluss im Gewässer selbst quantitativ nicht in die Wasserbilanz des Gewässers bzw. des Grundwassers einbezogen werden kann. Es ist mit diesen Methoden auch nicht möglich, ein vollständig versickerndes Gewässer zu simulieren.

Die offenen Fließgewässer werden hier im Modell mit einer speziellen Anwendung der Randbedingung der 3. Art realisiert, bei der die Leakagezellen des jeweiligen Gewässers in Abstromrichtung abschnittsweise sequentiell codiert sind.

Im Zuge der Simulation prüft das Modell in jedem Zeitschritt, ob das Grundwasser höher steht als Wasserstand im Gewässer. Trifft dies zu, herrschen effluente Verhältnisse, das Fließgewässer fungiert als Vorflut, Grundwasser tritt in das Gewässer über. Ist der Grundwasserstand niedriger als der Wasserstand im Gewässer, herrschen influente Verhältnisse, das Gewässer gibt Wasser an das Grundwasser ab.

Der Wasserstand im Gewässer wird berechnet nach einem vereinfachenden Ansatz nach MANNING/STRICKLER unter Annahme eines Kastenprofils.

Der Abfluss im Gewässer wird zum einen durch Übertritt von Grundwasser ins Gewässer als Vorflutfunktion und zum anderen durch abschnittsweise Vorgabe des wetterbedingten Oberflächenabflusses, d.h. des Niederschlagsanteils, welcher nicht versickert und nicht verdunstet, generiert.

Mit Hilfe des hier gewählten Ansatzes wird im Grundwassermodell zusätzlich eine vereinfachende 1-D Simulation des Oberflächengewässerabflusses (Energienliniengefälle = Sohlgefälle) umgesetzt, wobei über den Leakage-term der Randbedingung 3. Art die Interaktion mit dem Grundwasser erfolgt.

Die Abbildung 17 zeigt das im Modell implementierte Gewässernetz gemäß den vorherigen Erläuterungen. Die durchgezogenen blauen Linien kennzeichnen die offenen Fließgewässer gemäß Gewässerstationierungskarte, die gestrichelten Abschnitte folgen jeweils oberhalb der in den topographischen Karten enthaltenen perennierenden Bachabschnitte den morphologischen Rinnen, bei denen davon ausgegangen wird, dass sich in ihnen temporär Oberflächenabfluss sammelt und dort im Regelfall zur Versickerung kommt.

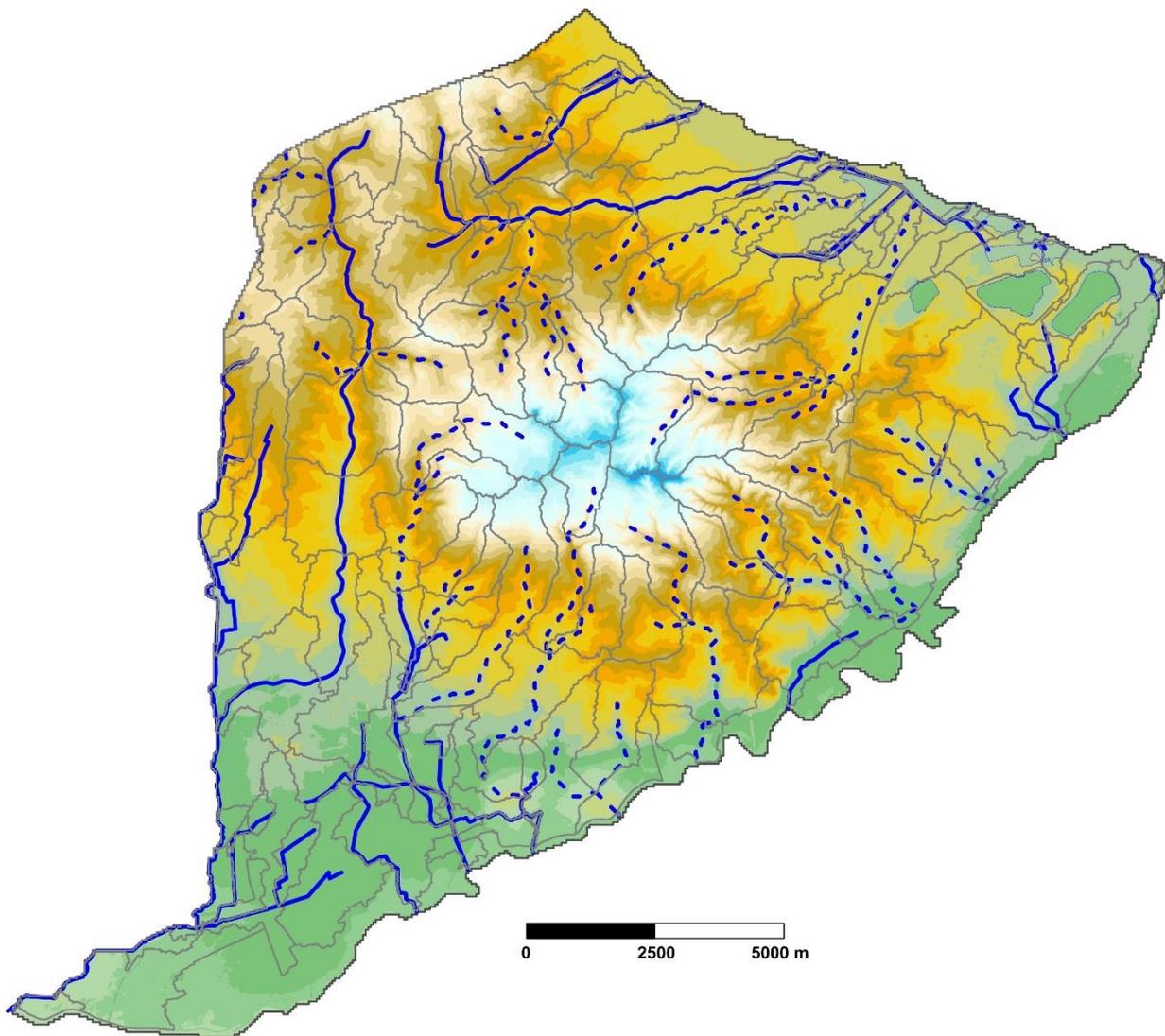


Abbildung 17: Im Modell berücksichtigtes Gewässernetz mit Grundwasserinteraktion

#### 4.3.6.4 Seen

Im Modellgebiet enthaltene Seen werden ebenfalls mit einer Variante der Randbedingung 3. Art berücksichtigt. Es handelt sich hierbei um die Tagebauseen der Quarzwerke GmbH sowie um Teiche in der Heubachniederung. Diese Teiche sind z.T. Teichwirtschaftsgewässer, bei denen Fließgewässer gestaut und über Gräben gespeist werden, die - ähnlich Gräben bei Wassermühlen - dem Heubach im Oberstrom Wasser entziehen, und im Abstrom über Gräben dem Heubach wieder zuführen. Allen Seen strömt analog den modellierten Fließgewässern ebenfalls Oberflächenabfluss aus dem morphologischen Einzugsgebiet zu.

Die Teiche Vogelvennteich und Dülmener See lässt man zum Fischfang meist einmal jährlich mehr oder weniger vollständig trockenfallen.

Der Torfvennteich im FFH-Gebiet Lavesum ist ebenfalls als Grundwassersee im Modell implementiert. Der Torfvennteich ist durch Austorfung entstanden. Heute führt die daraus entstandene Geländesenke in Abhängigkeit vom Grundwasserstand Wasser. Hierbei ändert sich die Gewässergröße dynamisch aufgrund der geringen Neigung der Flanken der Geländesenke.

Dieser Prozess wird im Modell bei allen Seen abgebildet durch Vorgabe der Gewässersohlhöhe aus dem digitalen Geländemodell bzw. aus Vermessungsdaten. Der modellinterne Algorithmus berechnet die Seespiegelhöhe aus der volumetrischen Bilanz von Zu- und Abflüssen und der Gewässersohlhöhe. Der Torfvennteich besitzt einen Überlauf, welcher den Lohenbach unterdükert und in den Heubach mündet.

Zur räumlich/zeitlichen Diskretisierung der Seen sind folgende Daten erforderlich:

- Gewässersohlhöhe
- Sohldurchlässigkeit
- Zu- und Abflüsse

Insbesondere die Tagebauseen greifen vergleichsweise tief in den Grundwasserleiter ein. Dieses ehemalige Aquifervolumen ist den Seen zugeordnet. Aufgrund der relativ steilen Flanken variieren die Größen der Tagebauseen infolge dynamischer Wasserstandsänderung im Modellzeitraum nicht. Die Tagebauseen stehen als Randbedingung dritter Art über Leakage mit dem Grundwasserleiter horizontal (Layer 3) und vertikal (Layer 4) in hydraulischem Kontakt.

Die Geometrie der Seen stellt innerhalb der verwendeten Software über den Simulationszeitraum eine Konstante dar. Um den aktuell wachsenden Tagebausee Haltern-Sythen bei der Kalibrierung hinreichend genau abbilden zu können, wurde die instationäre Simulation ab 2012 zweigeteilt und mit vergrößertem See weitergeführt.

Die Verdunstung über den Seen basiert auf der monatsweisen Berechnung der potentiellen Verdunstung nach HAUDE (s. Abschnitt 4.3.7.1.2), welche auf Grundlage relativ weniger Wetterdaten die realen Verhältnisse über offenen Wasserflächen näherungsweise gut abbildet. In Ermangelung konkreter meteorologischer Standortdaten konnte der komplexere Ansatz der Berechnung der potentiellen Verdunstung nach PENMAN nicht angewendet werden.

#### **4.3.6.5 Nordwestgrenze**

Die Modellgrenze im Nordwesten ist parallel der Grundwasserströmungsrichtung orientiert und als undurchlässiger Rand (=Randbedingung 2. Art, Randzufluss = 0) definiert. Berechnete Grundwasserhöhengleichen sind bei allen Simulationen senkrecht bzw. Grundwasserstromlinien immer parallel zu diesen Grenzen orientiert. Zeitlich variable Eingangsgrößen sind bei dieser Form der Randbedingung nicht erforderlich.

### **4.3.7 Quell- und Senkenterme, sonstige besondere Modellelemente**

#### **4.3.7.1 Grundwasserneubildung bzw. Sickerwasserrate**

##### 4.3.7.1.1 Vorbemerkungen

Der Berechnungsgang im Detail zur Ermittlung der zeitabhängigen und flächendifferenzierten Sickerwasserrate ist als Anhang 2 dem Fachbeitrag beigelegt.

##### 4.3.7.1.2 Potentielle Verdunstung über Grünland nach HAUDE

Für das gesamte Modellgebiet wurde die potentielle Verdunstung über Grünland nach HAUDE aus den Mittelwerten der 14-Uhr-Temperatur und 14-Uhr-Relative-Luftfeuchte unterschiedlicher Klimastationen des DWD berechnet. Da in keiner Station Daten über den ganzen Modellzeitraum (Mai 2003 bis April 2017) lückenlos

vorliegen, wurden für verschiedene Modellzeitabschnitte die Mittelwerte aus folgenden Stationen zusammengestellt:

- Zeitabschnitt: 2003-2004      Stationen: Bocholt und Münster bzw. Münster/Osnabrück
- Zeitabschnitt: 2004-2007      Stationen: Borken und Brochtrup
- Zeitabschnitt: 2007-2017      Stationen: Borken, Waltrop und Brochtrup

Die Temperatur- und Luftfeuchtedaten der weiter vom Modellgebiet entfernten Klimastationen können zur Ermittlung der potentiellen Verdunstung für das Modellgebiet herangezogen werden, da diese sich regional nur geringfügig unterscheiden.

4.3.7.1.3 Niederschlag

Die Niederschlagsrate unterscheidet sich dagegen im Modellgebiet lokal deutlich. Der DWD hat für Deutschland die räumliche Verteilung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags für den Zeitraum von 1981 bis 2010 ermittelt und in Form von Isohyeten dargestellt.

Die Abbildung 18 zeigt, dass in diesem Zeitraum im Modellgebiet die höchsten Niederschläge im Bereich der Hohen Mark mit langjährigen Mittelwerten von > 970 mm/Jahr auftraten (Steigungsregen). Die geringsten Niederschläge wurden im Bereich Dülmen mit langjährigen Mittelwerten von < 840 mm/Jahr gemessen. Im Bereich Dülmen ist die langjährige mittlere Niederschlagsrate also rund 15 % niedriger als in der Hohen Mark.

Aus der Abbildung geht die Lage der Niederschlagsstationen hervor, von denen im Modellgebiet bzw. in seiner unmittelbaren Umgebung über den kompletten Modellzeitraum Tagesniederschläge vorliegen. In der Tabelle 1 sind die mittleren Jahresniederschläge dieser Stationen bezogen auf den Modellzeitraum aufgelistet. Diese entsprechen annähernd den langjährigen Mittelwerten von 1981 bis 2010.

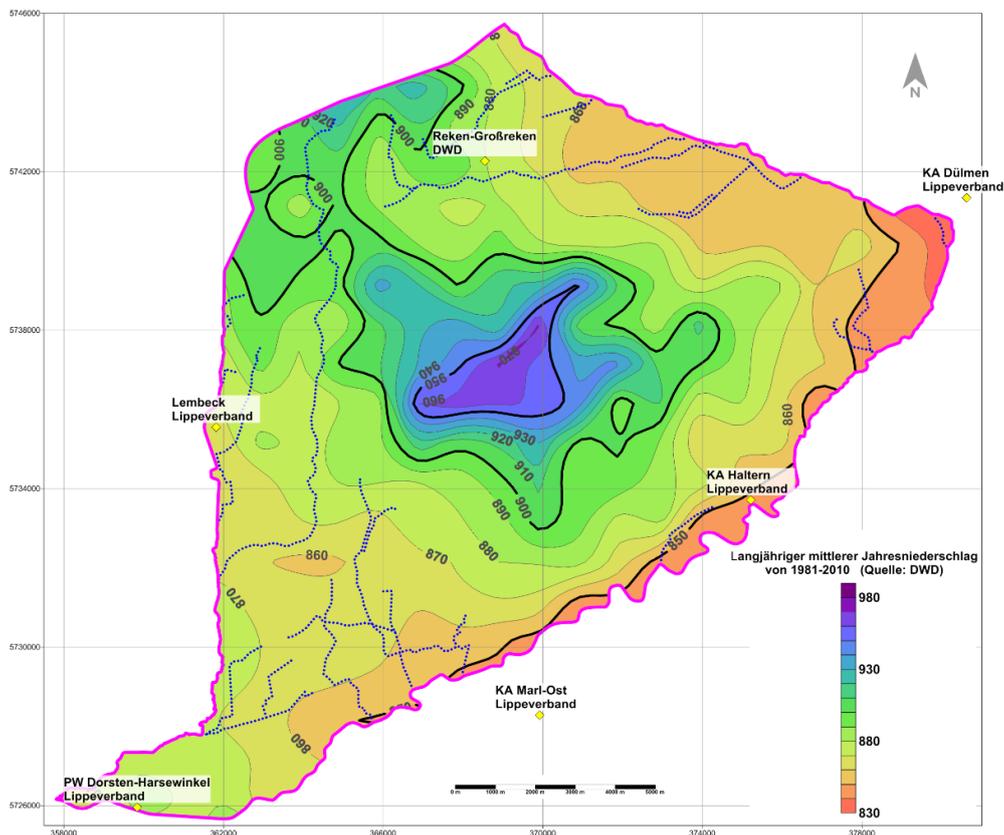


Abbildung 18: Langjähriger mittlerer Jahresniederschlag von 1981 bis 2010 (Quelle: DWD)

Tabelle 1: Niederschlagsstationen Modellgebiet

<b>Niederschlagsstation</b>	<b>Betreiber</b>	<b>mittlerer Jahresniederschlag über Modellzeitraum (05/2003-04/2017) [mm/Jahr]</b>
Reken Großreken	DWD	877
Lembeck	Lippeverband	878
PW Dosten-Harsewinkel	Lippeverband	848
KA Marl-Ost	Lippeverband	830
KA Haltern	Lippeverband	861
KA Dülmen	Lippeverband	795

Die Ganglinien im Diagramm der Abbildung 19 zeigen die monatlichen Niederschlagsraten der sechs Niederschlagsstationen im Modellgebiet. Hier wird die räumlich differenzierte Verteilung der Niederschläge im Modellgebiet auch im instationären Verlauf deutlich.

Um der räumlich unterschiedlichen Verteilung der Niederschläge Rechnung zu tragen, wurden die Niederschlagsraten über dem Modellgebiet differenziert. Das Modellgebiet wurde zum einen entsprechend der mittleren jährlichen Niederschlagsrate und zum anderen auf der Grundlage von Thiessen-Polygonen um die Niederschlagsstationen verschnitten und gemäß Abbildung 20 in sechzehn Niederschlagszonen unterteilt.

#### 4.3.7.1.4 Nutzung, Böden und Relief

Das Modellgebiet besitzt eine Fläche von 221,3 km<sup>2</sup>. Auf der Grundlage des Digitalen Basis-Landschaftsmodells NRW ([www.bezreg-koeln.nrw.de](http://www.bezreg-koeln.nrw.de), Geobasis NRW) wurde das Modellgebiet in sieben Nutzungsgruppen eingeteilt. Die Abbildung 21 gibt eine Übersicht zur räumlichen Verteilung der verschiedenen Nutzungen. Dem Kreisdiagramm in Abbildung 22 kann jeder Nutzungsgruppe der zugehörige Flächenanteil entnommen werden.

Die Bodenarten wurden im Modellgebiet auf Grundlage der IS BK 50 Bodenkarte von NRW 1:50.000 (Geologischer Dienst NRW, [www.gd.nrw.de](http://www.gd.nrw.de)) in fünf Gruppen eingeteilt. In Abbildung 23 ist die räumliche Verteilung der verschiedenen Bodenarten dargestellt. Dem Kreisdiagramm der Abbildung 24 kann jeder Bodenartgruppe der zugehörige Flächenanteil entnommen werden.

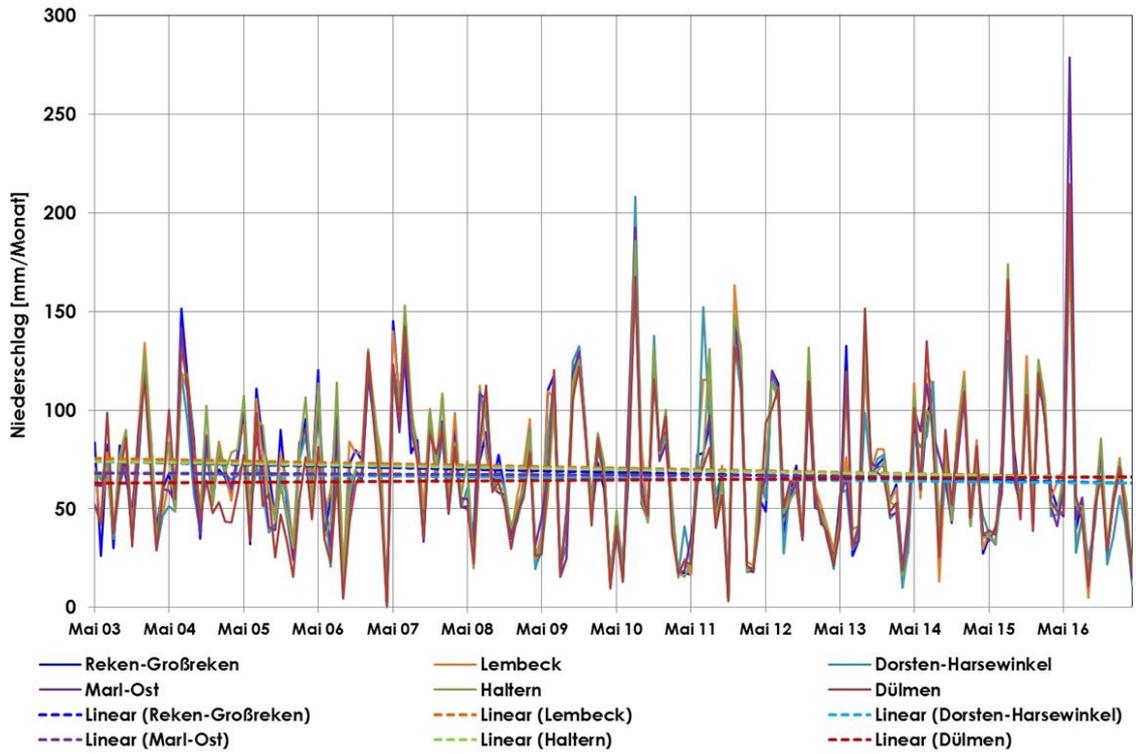


Abbildung 19: Monatsniederschlag der Niederschlagsstationen im Modellgebiet

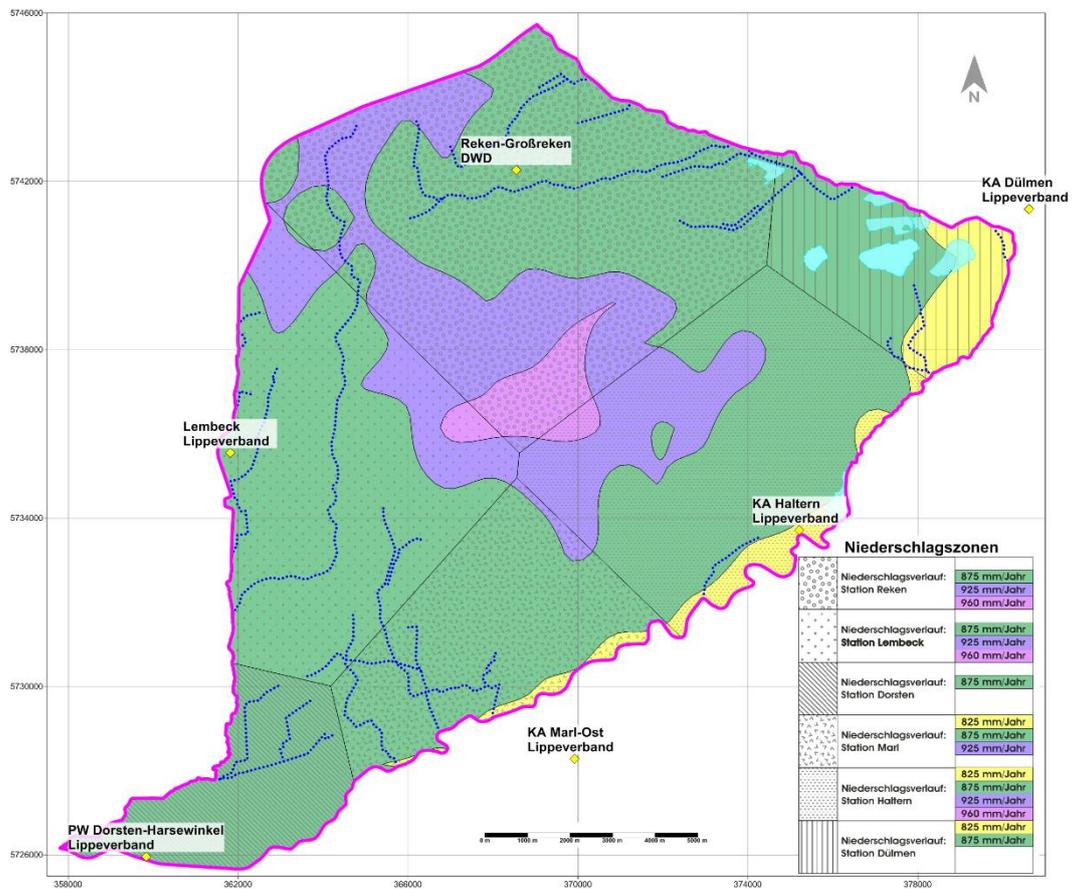


Abbildung 20: Niederschlagszonen im Modellgebiet

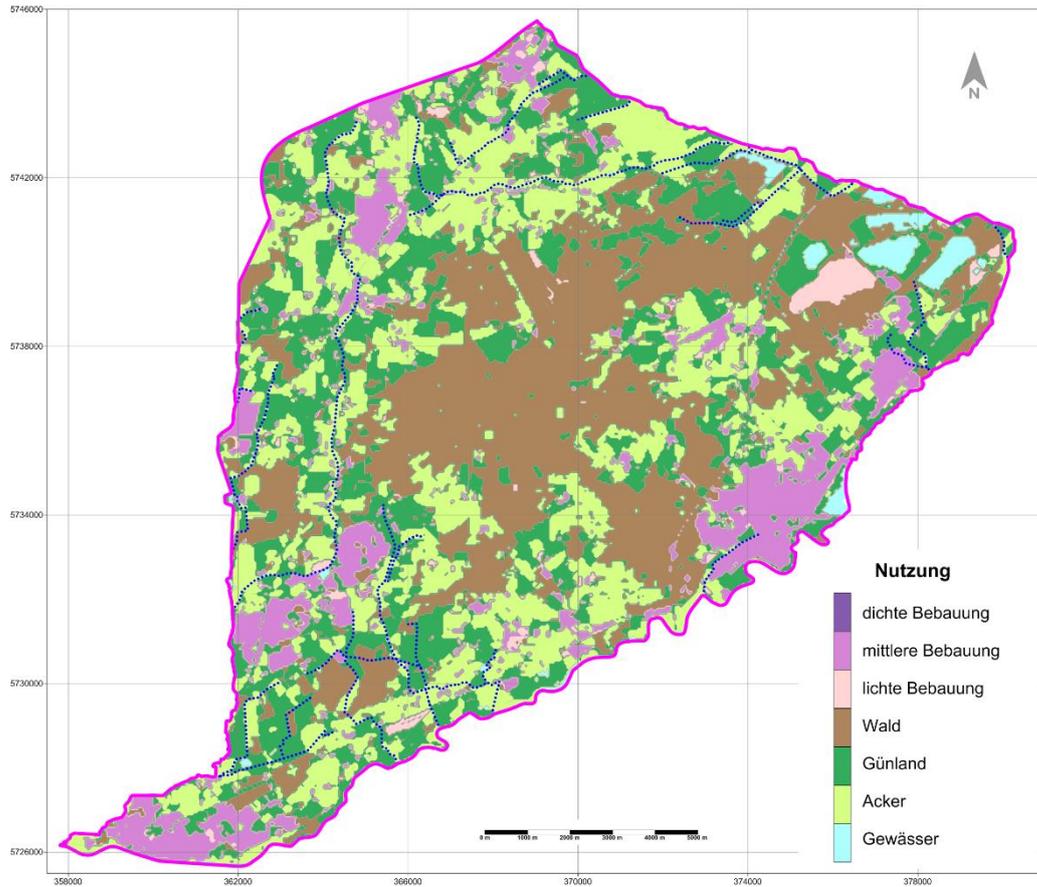


Abbildung 21: Nutzungsgruppen im Modellgebiet

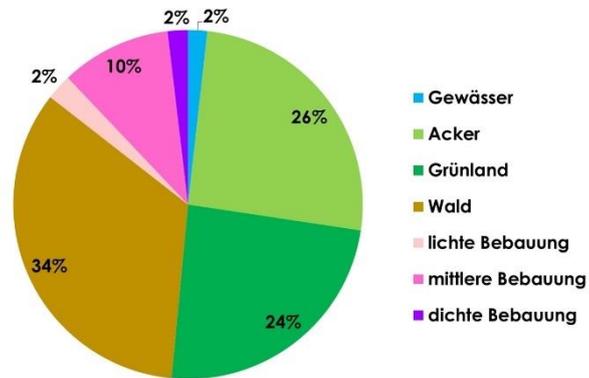


Abbildung 22: Flächenanteile der Nutzungsgruppen im Modellgebiet

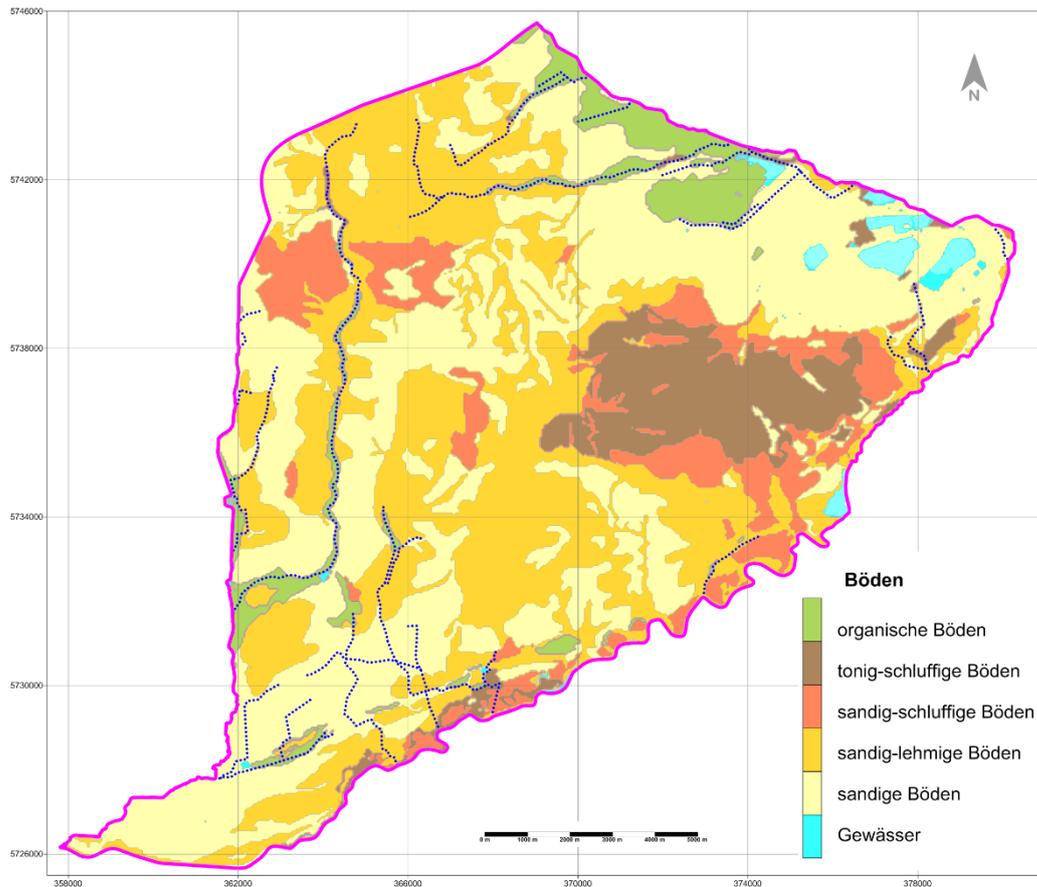


Abbildung 23: Bodenartgruppen im Modellgebiet

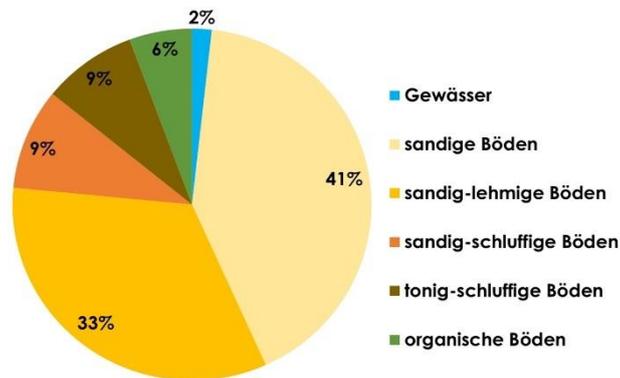


Abbildung 24: Flächenanteile der Bodenartgruppen im Modellgebiet

Ein weiterer Faktor bei der Ermittlung des unterirdischen Abflusses ist neben der Flächennutzung und der Bodenart die Reliefenergie.

Die Sickerwasserspende nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) wird um einen reliefabhängigen Anteil des Direktabflusses reduziert. Dieser Anteil wurde mit Hilfe des digitalen Geländemodells DGM 1 ([www.bezreg-koeln.nrw.de](http://www.bezreg-koeln.nrw.de), Landesvermessung NRW) ermittelt und im Grundwasserströmungsmodell durch verminderte Relief-Faktoren in Anlehnung an DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) implementiert. In Abbildung 25 ist die räumliche Verteilung der Relief-Faktoren im Modellgebiet dargestellt. Je höher die Reliefenergie ist (z.B. im Bereich der Hohen Mark), desto kleiner sind die Relief-Faktoren bzw. desto größer ist die Verringerung der lokalen Sickerwasserrate.

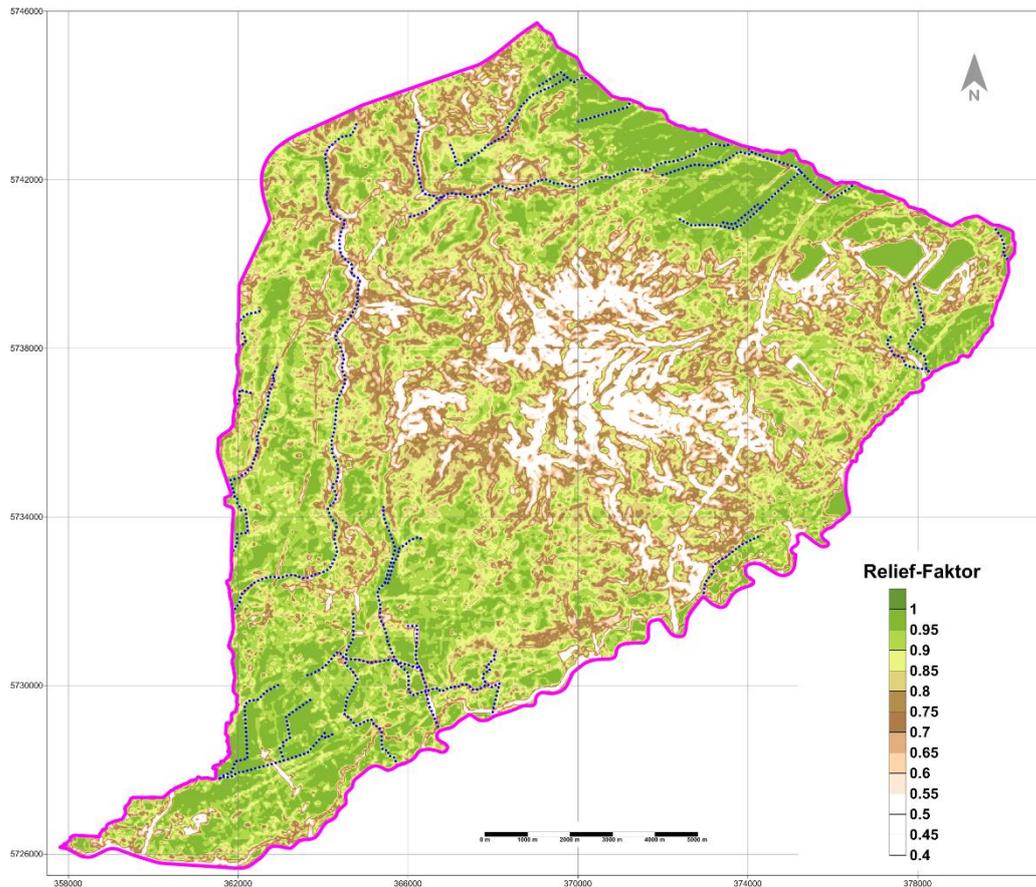


Abbildung 25: Relief-Faktor im Modellgebiet

#### 4.3.7.1.5 Sickerwasserrate

Durch Verschneiden der verschiedenen Informationen hinsichtlich Bodenart, Nutzung, Reliefenergie und der instationären Klimadaten wurde unter Berücksichtigung des momentanen Bodenwassergehaltes für jeden Modellzeitschritt die aktuelle Verdunstung und daraus die räumliche Verteilung der Sickerwasserrate ermittelt und als Sickerwasserbildung in das Modell implementiert. Der Berechnungsgang ist in Anhang 2 im Detail erläutert.

In Abbildung 26 ist zur beispielhaften Veranschaulichung die räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Sickerwasserrate des Zeitraums Mai 2003 bis April 2017 dargestellt. Mit Blautönen gekennzeichnete Bereiche weisen vergleichsweise höhere Sickerwasserraten auf. Grüntöne stellen Bereiche mit einer geringeren und Gelbtöne mit einer sehr geringen (z.B. hoher Versiegelungsgrad, hohe Reliefenergie) Sickerwasserrate dar. Das Spektrum liegt zwischen rund 10 und 410 mm/Jahr.

Die ermittelte mittlere jährliche Sickerwasserspende des Modellgebiets beträgt im Modellzeitraum ca. 195 mm/Jahr bzw.  $6,2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ . Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) gibt als Ergebnis aus mGROWA<sup>1</sup> mit etwa 203 mm/Jahr bzw.  $6,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  einen vergleichbaren langjährigen Mittelwert

<sup>1</sup> Rasterzellenbasiertes (100 x 100 m) Wasserhaushaltsmodell, welches als Eingangsdaten Klima, Landnutzung, Topographie, Bodenkarte sowie Geologische Karten verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik enthält HERRMANN ET AL. (2014): HERRMANN ET AL. 2014 - Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen, FZ Jülich

der Grundwasserneubildung für den Zeitraum von 1981 bis 2010 an. Es handelt sich hierbei jedoch um einen langjährigen Mittelwert, der ebenfalls flächendifferenziert und insgesamt mit einem vergleichbaren Verfahrensansatz ermittelt wurde. Er kann folglich zur Plausibilitätsprüfung herangezogen werden kann. Die aktuell vom FZ Jülich ermittelte Neuauflage des mGROWA Modells mit zeitabhängigen Sickerwasserraten steht für das Modellgebiet und den modellierten Zeitraum leider nicht zur Verfügung

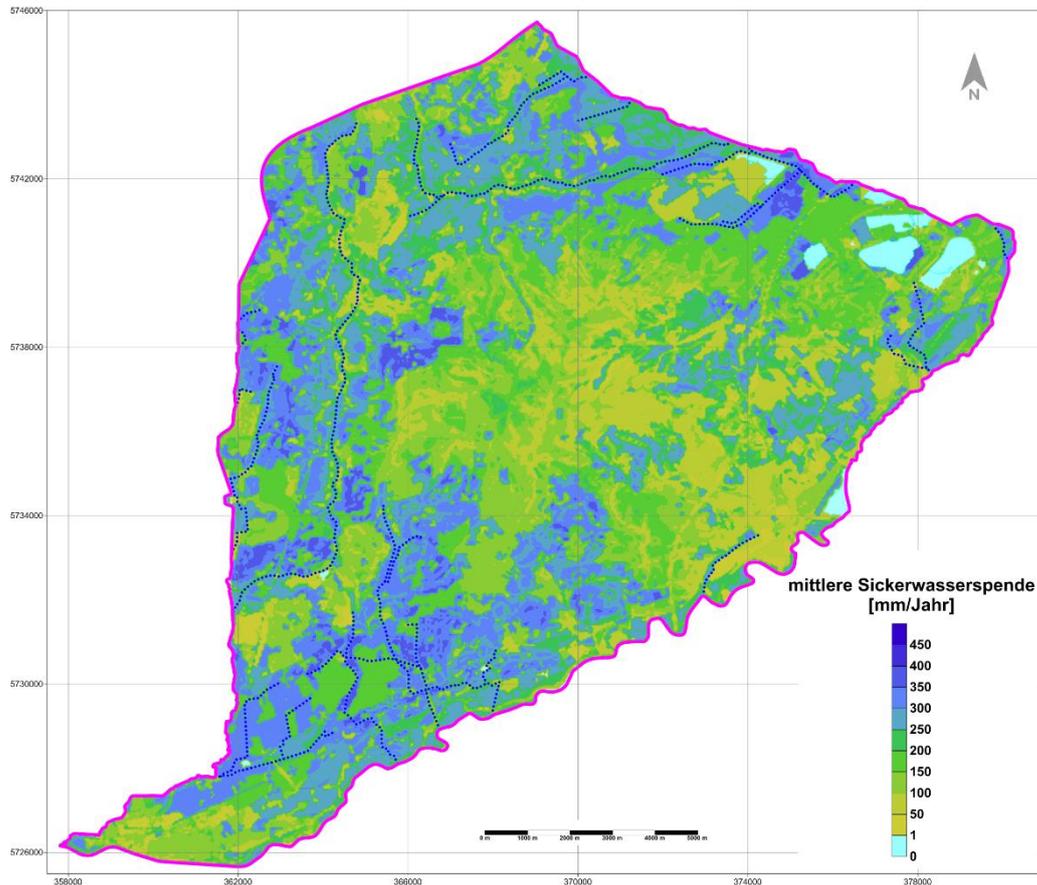


Abbildung 26: Mittlere Sickerwasserrate im Modellgebiet von Mai 2003 bis April 2017

In Abbildung 27 ist der zeitliche Verlauf der monatlichen Sickerwasserrate im Modellzeitraum dargestellt. Die vertikalen Gitternetzlinien markieren jeweils ein Jahr, beginnend am 1. Mai. In den Monaten der größten Neubildungsphase (etwa Oktober bis April) liegt die Sickerwasserrate zwischen etwa minimal 6 und maximal 79 mm/Monat. Die mittlere monatliche Sickerwasserrate beträgt 16,25 mm. Die Ganglinie der Sickerwasserrate weist keinen Trend auf.

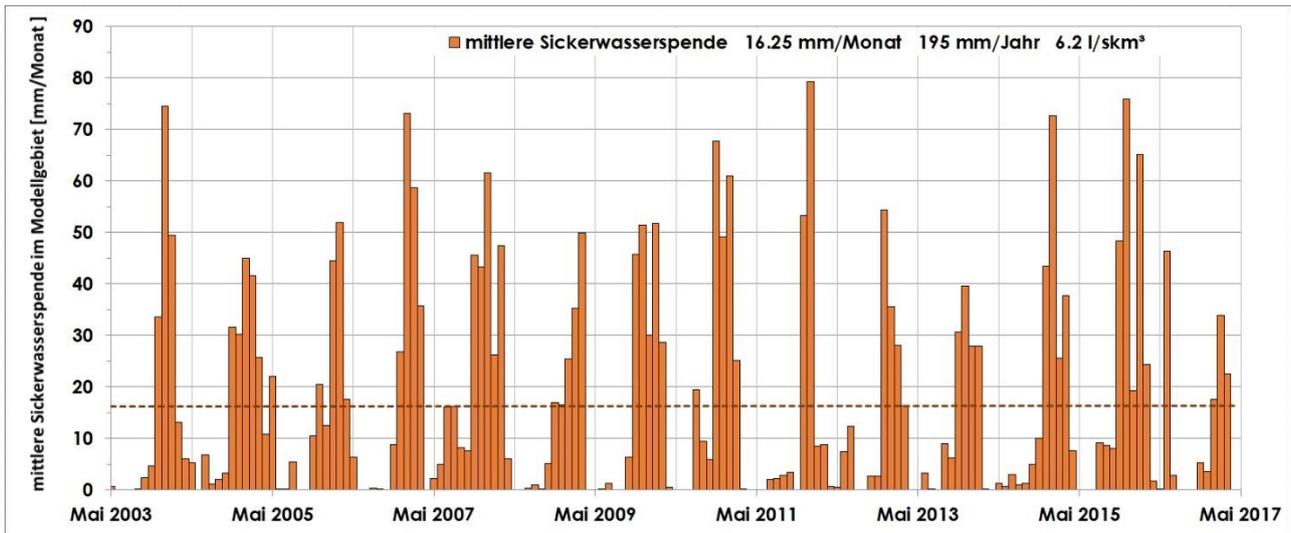


Abbildung 27: Mittlere monatliche Sickerwasserrate im gesamten Modellgebiet

#### 4.3.7.1.6 Zeitverzögerte Grundwasserneubildung bei großen Flurabständen

Das Modellgebiet ist gekennzeichnet durch große Unterschiede des Flurabstandes. Die Flurabstände variieren zwischen Werten ab 0 m in den Niederungen und bis nahezu 100 m in der Hohen Mark.

Dementsprechend unterscheiden sich die Ganglinien von Grundwassermessstellen mit flurnahem Grundwasser signifikant von solchen mit flurfernem. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 7 in Kapitel 3.2.3. Während bei flurnahem Grundwasser sich die jahreszeitlich differenzierte Grundwasserneubildungsrate im zyklischen Verlauf der Grundwasserstände widerspiegelt, ist dieser charakteristische Verlauf bei flurfernem Grundwasser oft nicht zu erkennen, in manchen Fällen nur mit gedämpfter und phasenverschobener Amplitude. Verursacht werden diese Unterschiede durch die unterschiedliche Mächtigkeit der ungesättigten Bodenzone, die das Sickerwasser unterhalb der von der Vegetation durchwurzelten Bodenzone der Schwerkraft folgend passieren muss, bevor es das Grundwasser als Grundwasserneubildung anreichert.

Im Grundwassermodell zum Rahmenbetriebsplan Haltern-Sythen werden diese Prozesse berücksichtigt. Grundlage des in der Software MODFLOW 2005 eingebetteten Prozesses ist die vereinfachende Annahme, dass der Sickerwassertransport ausschließlich in vertikaler Richtung stattfindet. Die Berechnung beruht auf einem kinematischen Wellenansatz, mit dem auch die dispersive Verlagerung von Sickerwasserfronten bzw. Trocknungsphasen beschrieben werden kann. Folgende Eingangsparameter der ungesättigten Bodenzone müssen geschätzt werden bzw. ergeben sich aus der Modellgeometrie und den berechneten Zwischenergebnissen:

- Höhe der Geländeoberfläche
- Zeitabhängige Sickerwasserrate unter der Durchwurzelungszone
- Höhenlage der Grundwasseroberfläche
- Vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert (hier = 1/10 des horizontalen Durchlässigkeitsbeiwertes)
- Anfangswassergehalt
- Wassergehalt bei Sättigung
- Restwassergehalt
- Nutzporosität
- Brooks-Corey-Exponent

Die Anwendung des Berechnungsalgorithmus zur Vertikalströmung in der ungesättigten Bodenzone erhöht die Anzahl der zu berücksichtigenden Modellvariablen deutlich. Insbesondere die Schätzung der Verteilung des Anfangswassergehaltes ist bei ausgeprägt sensitiver Wirkung schwierig, Ähnliches gilt für den Brooks-Corey Exponent, mit dem der relative Durchlässigkeitsbeiwert der ungesättigten Strömung in Abhängigkeit vom momentanen Wassergehalt angenähert wird.

**4.3.7.2 Flurabstandabhängige Evapotranspiration**

Zusätzliche Evapotranspiration infolge geringer Flurabstände wird im Grundwassermodell berücksichtigt. Innerhalb der Berechnung wird in jedem Zeitschritt geprüft, ob der berechnete Flurabstand innerhalb eines Wirkungsbereiches, der Durchwurzelungstiefe, liegt. Erreicht die Piezometerhöhe die Geländeoberkante, so wird dem Grundwasser Wasser entzogen, das zu 100 % der zeitvariant ermittelten potentiellen Verdunstung entspricht. Liegt die Piezometerhöhe unterhalb der Durchwurzelungstiefe (hier 0 – 3 m) findet keine zusätzliche Evapotranspiration statt. Dazwischen wird die Intensität der zusätzlichen Verdunstung linear interpoliert.

**4.3.7.3 Grundwasserentnahmen**

Für das Aussagegebiet sind derzeit ca. 270 Wasserrechte mit einer erlaubten bzw. bewilligten Gesamtentnahmerate von rund 24,5 Mio. m³/a dokumentiert (Quelle: BR Münster). 31 Wasserrechte der Industrie und der Trinkwassergewinnung umfassen dabei rund 85 % der erteilten Genehmigungen. Von diesen bedeutenden wasserrechtlichen Genehmigungen liegen die tatsächlichen Entnahmeraten in monatlicher Auflösung und die Lage der Entnahmeanlagen nur für die Trinkwassergewinnung der Gelsenwasser AG lückenlos vor. Datenlücken bestehen bezüglich der Wassergewinnungsanlage Hausdülmern und dreier großer industrieller Entnehmer.



Abbildung 28: Wasserrechte im Untersuchungsgebiet (Datenquelle: BR Münster), Summe 24,4 Mio. m³/a

Die große Mehrzahl der Genehmigungen umfasst vergleichsweise geringe Entnahmen, von denen für die aktuelle Fragestellung jede Einzelne in der Fläche nur eine untergeordnete Rolle einnimmt. Die tatsächlichen Entnahmedaten dieser kleineren Rechte können in der benötigten Detailliertheit nicht mit verhältnismäßigem Aufwand ermittelt werden. Erfahrungsgemäß werden die jährlich genehmigten Grundwasserentnahmemengen (überwiegend Landwirtschaft) nicht ausgeschöpft. Im Grundwassermodell wurde im Mittel von einer 90 % Ausschöpfung dieser kleineren Wasserrechte ausgegangen. Hinsichtlich der jährlichen Verteilung wurde versucht, den Zweck der Entnahme zu ermitteln (z.B. industrielles Brauchwasser, landwirtschaftlicher Beregnungsbrunnen etc.) und die monatliche Verteilung dementsprechend geschätzt.

Die im Wasserbuch der BR Münster angegebene Lage dieser kleinen Wasserrechte entspricht nicht zwingend

der Lage der Entnahme selbst, sondern ggf. dem Wohnort des Rechteinhabers. Da die tatsächliche Lage in diesen Fällen nur schwer zu ermitteln ist, wurde die im Wasserbuch angegebene Lage verwendet. Befinden sich mehrere Grundwasserentnahmen in einer Modellzelle, wurden diese zusammengefasst.

Die Abbildung 30 zeigt eine Karte der Verteilung der Wasserrechte innerhalb des Modellgebiets. Deutlich ist zu erkennen, dass die Schwerpunkte der Grundwasserförderung (Abbildung 29) mit den Schwerpunkten der größten Trends hinsichtlich fallender Grundwasserstände (Abbildung 8, Seite 10) korrelieren.

Die Filterstrecken aller bedeutenden Grundwasserentnahmen sind in den Halterner Sanden angeordnet, welche im Modell vertikal in vier Modellschichten (Modellschichten 3 bis 6) unterteilt sind. Die kleineren Wasserrechte fördern i.d.R. bei geringen Flurabständen aus vergleichsweise geringen Tiefen und sind in Modellschicht 3 angeordnet. Die großen Wassergewinnungsanlagen (z.B. die Trinkwasserförderung der Gelsenwasser AG) fördern vornehmlich in Tiefen zwischen rund -40 und -98 m NHN und sind dementsprechend in Modellschicht 5 angeordnet. Der Brunnen 9 der Gelsenwasser AG fördert auf einem Niveau von etwa -20 m NHN und ist in Modellschicht 4 angeordnet.

Die Abbildung 29 zeigt den Verlauf der im Modell angesetzten Förderraten als Zeitreihe der summierten Grundwasserentnahmen. Unterschieden wird im Diagramm nach unterschiedlichen Gruppen:

- Über die Zeit gemittelt dargestellt kleinere Grundwasserentnahmen aus Gewerbe und Landwirtschaft (Anzahl: 244, Summe ca. 0,4 Mio. m³/mon bzw. 3,6 Mio. m³/a).
- Grundwasserentnahmen der Industrie, Bereich Lippe (ca. 0,6 Mio. m³/mon bzw. 7,2 Mio. m³/a)
- Grundwasserentnahmen der Industrie, Bereich NW (ca. 0,08 Mio. m³/mon bzw. 1,0 Mio. m³/a)
- Trinkwasser Gelsenwasser AG (ca. 0,4 Mio. m³/mon bzw. 3,6 Mio. m³/a)
- Trinkwasser Stadtwerke Dülmen (ca. 0,15 Mio. m³/mon bzw. 1,8 Mio. m³/a)

Zeiträume mit Datenlücken (s. Kapitel 4.3.7.3.1) sind in der Abbildung durch blässere Farbgebung gekennzeichnet.

Insgesamt zeigt der Verlauf der Summe der Grundwasserentnahmen im Modellzeitraum einen nur schwach fallenden Trend mit einer mittleren Entnahmerate 18 Mio. m³/a.

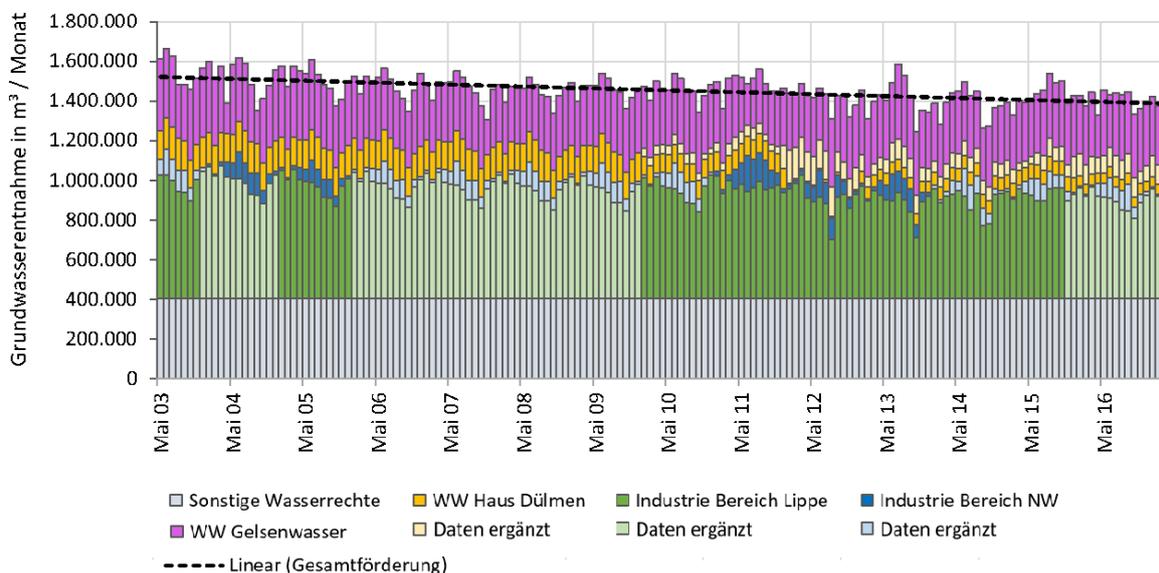


Abbildung 29: Zeitreihen Grundwasserentnahmen

4.3.7.3.1 Vorgehensweise bei Datenlücken

Um Datenlücken zu füllen, wurde für die jeweilige Entnahme zunächst ein Trend der monatlichen Entnahmen anhand der vorhandenen Daten ermittelt. Fehlende Jahressummen wurden nach Möglichkeit zwischen vorhandenen Jahressummen linear interpoliert und anhand des festgelegten monatlichen Trends auf die Entnahmen verteilt. Für die Jahre, für die mit dieser Vorgehensweise keine plausiblen Daten generiert werden konnten, wurden die Werte der nächsten bzw. vorherigen bekannten Jahressummen angesetzt.

Die Wassergewinnungsanlage Hausdülmen fördert Grundwasser aus sieben Brunnen im näheren Umfeld des Rahmenbetriebsplangebietes. Die zur Verfügung gestellten Daten sind jedoch nicht ganz vollständig.

- Ab 2010 liegen Monatswerte von vier Brunnen vor, deren Lagezuordnung jedoch unsicher ist.
- Über den gesamten Zeitraum liegen nicht differenzierte Jahreswerte aller Brunnen ohne Brauchwasserförderung vor.
- Aus früheren Projekten liegen Jahreswerte bis 2012 inkl. Brauchwasser vor.

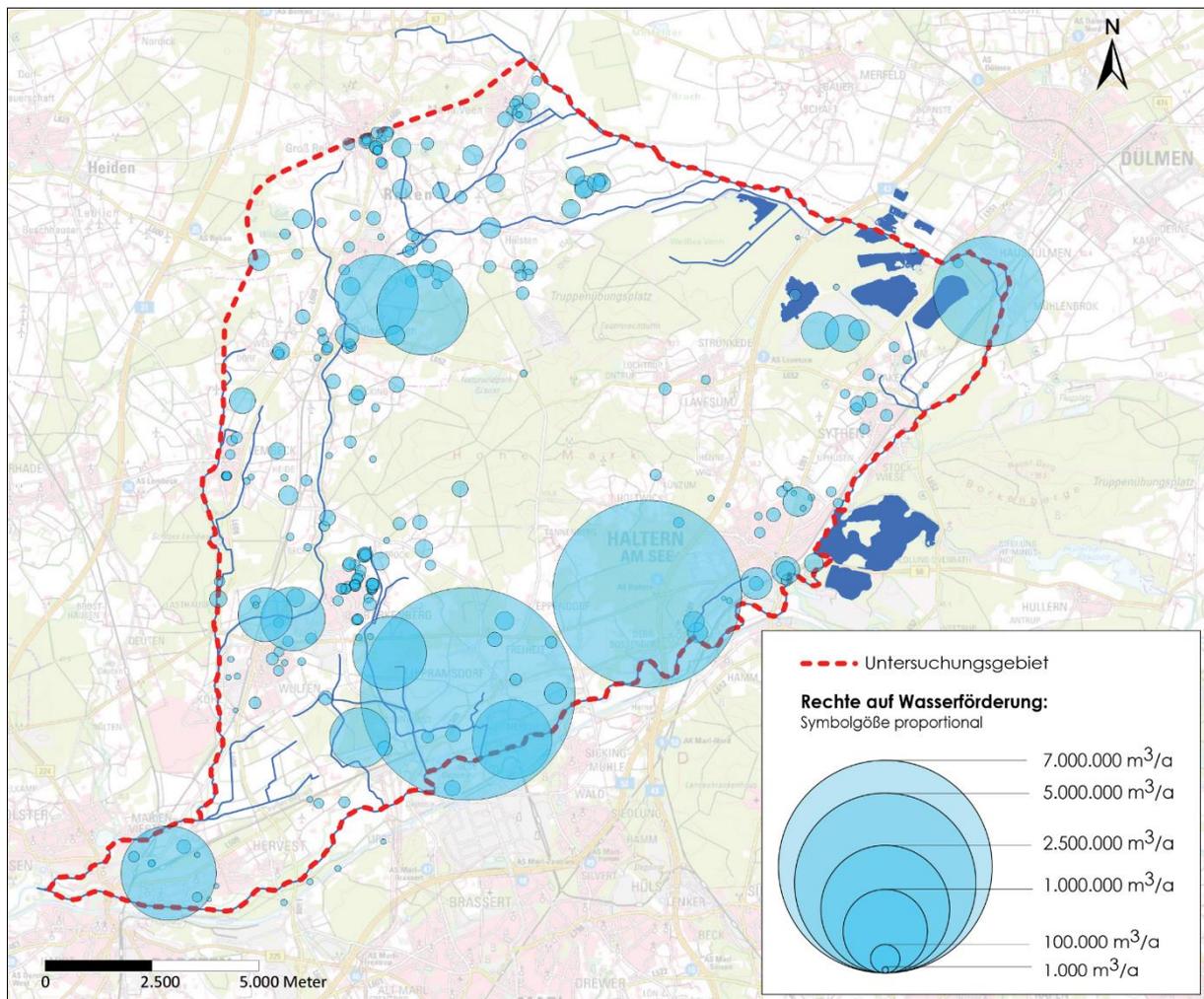


Abbildung 30: Karte der Wasserrechte

Mit den zur Verfügung gestellten Jahreswerten wurden die für vier Brunnen ab 2010 vorhandenen Monatswerte ergänzt und auf die sieben vorhandenen Brunnen aufgeteilt. Aus den Jahreswerten von früheren Projekten wurde der Brauchwasseranteil zu ca. 5 % ermittelt und ebenfalls ergänzt. Die ergänzten Werte der vier

bekannten Brunnen wurden dann gemittelt, und die Jahreswerte inkl. Brauchwasser für den Zeitraum vor 2010 entsprechend anteilig auf sieben Brunnen verteilt.

**4.3.7.4 Tagebauseen**

Der Wasserkreislauf der Quarzwerke GmbH zum Transport des geförderten Sandes zur Aufbereitungsanlage verläuft auf Grundlage der Betriebsdaten weitgehend synchron und wurde daher vereinfachend als ausgeglichen angenommen.

Bei den in Abbau befindlichen Tagbauseen Haltern-West (bis 2012) und aktuell ausschließlich Haltern-Sythen ist zu beachten, dass durch den Abbauprozess dem Grundwasserleiter fortlaufend Feststoffvolumen entzogen wird, welcher durch Grundwasser ersetzt wird. Dieser Prozess wird im Modell durch eine zusätzliche, dem Sandvolumen äquivalente Entnahme von Wasser aus den jeweiligen Seen nachgebildet, welches durch den Grundwasserzustrom ausgeglichen wird. Im Mittel handelt es sich dabei um 1,1 Mio. m³ Grundwasser jährlich.

Bei den Prognosesimulationen hinsichtlich des zu erwartenden Endzustandes nach Beendigung der Bergbautätigkeit im Rahmenbetriebsplangebiet Haltern-Sythen ist die dem geförderten Sand entsprechende Äquivalententnahme an Grundwasser deaktiviert.

**4.3.7.5 Pumpwerke**

Im Süden des Untersuchungsgebiets existieren mehrere Pumpwerke des Lippeverbands. Gemäß gesetzlichem Auftrag reguliert der Lippeverband in seinem Verbandsgebiet die durch den Steinkohlenbergbau hervorgerufenen Einflüsse auf den Abfluss der Fließgewässer und des Grundwassers durch Bergsenkungen. Im Modellgebiet handelt es sich im Wesentlichen um Vorflutpumpanlagen im Bereich von Bergsenkungsgebieten nördlich der Lippe gelegener Grubenfelder der Schachtanlage Auguste Victoria. Im äußersten Westen am Wienbach befindet sich noch die Brunnenanlage Dorsten-Marienviertel zur Flurabstandsregulierung.

Vom Lippeverband wurden sämtliche Daten – soweit vorliegend – zur Verfügung gestellt. In der Abbildung 31 sind die Förderraten in m³ seit 1995 in monatlicher Auflösung in Form eines gestapelten Balkendiagramms dargestellt.

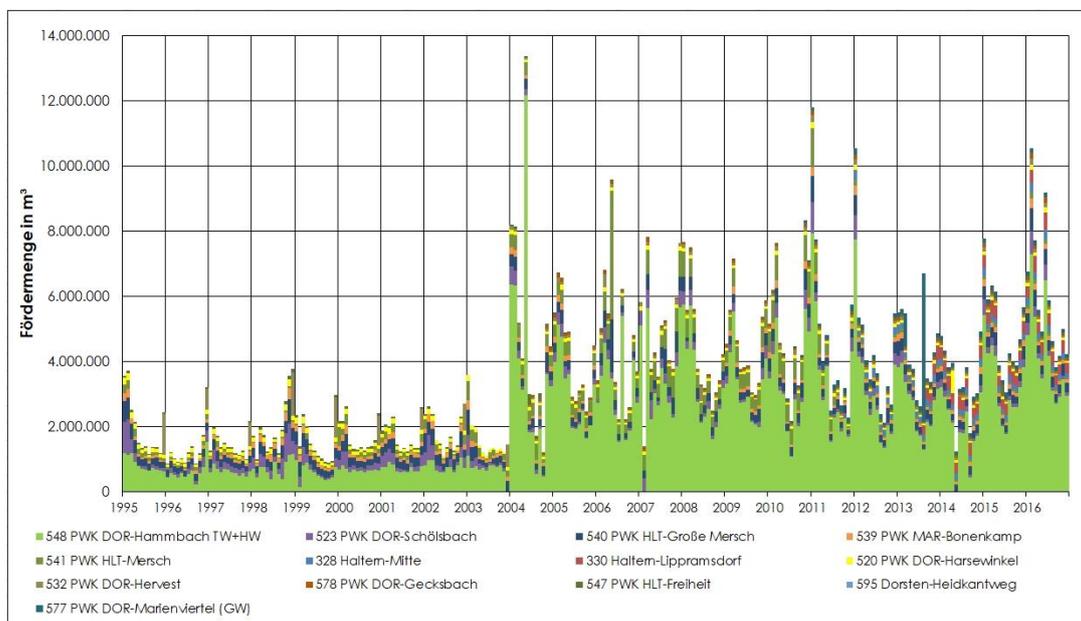


Abbildung 31: Zeitliche Entwicklung der Pumpraten der Pumpwerke des Lippeverbands (GW: Grundwasserpumpwerk, Datenquelle: Lippeverband)

Durch das Abpumpen des Oberflächenwassers eines Fließgewässers in Geländesenken infolge von Bergsenkungen zur Aufrechterhaltung des Gewässerabflusses und zur Verhinderung einer Überflutung der Geländesenke wird zwangsläufig auch Grundwasser mit gefördert, da dieses der durch das Pumpwerk erzeugten Potentialsenke zuströmt. Eine Differenzierung der Mengenanteile Oberflächenwasser und Grundwasser ist technisch schwer umzusetzen und erfolgt durch den Lippeverband daher nicht.

Die Pumpwerke des Lippeverbands sind naturgemäß verknüpft mit dem Verlauf der Oberflächengewässer, die im Grundwassermodell integriert sind. An den Lokationen der Pumpwerke (Bereiche Lippramsdorf und Haltern Mersch) laufen die betroffenen Gewässerabschnitte in Senken zusammen. Der dort anfallende Gewässerabfluss als Summe aus Oberflächenabfluss und örtlich in das Gewässer übertretendem Grundwasser wird entweder aus dem Modell entfernt oder gelangt in ein entferntes Gewässer mit intaktem Fließgefälle. Die im Modell generierten Abflüsse in den Senken können ausgelesen und im Rahmen der Kalibrierung zur Plausibilitätskontrolle mit den Daten des Lippeverbands verglichen werden.

Im Grundwasserströmungsmodell ist das Pumpwerk Marienviertel mit seinen Brunnen als eine Gruppe von Drainagezellen implementiert. Es handelt sich hierbei auch um eine Randbedingung 3. Art. An der Stelle des Pumpwerks wird im Grundwasserströmungsmodell, kombiniert mit einem hydraulischen Widerstand, eine bestimmte Grundwasserhöhe definiert. Steigt der Grundwasserstand über diesen Wert, wird dem System Wasser entzogen. Diese Werte können mit den tatsächlichen Entnahmen verglichen werden.

#### **4.3.7.6 Oberflächenabfluss in den Fließgewässern**

Um den Gesamtabfluss, der in Vorflutern aus der Summe aus grundwasserbürtigem Basisabfluss und oberirdischem Abfluss besteht, in den Fließgewässern im Modell realitätsnah abbilden zu können, wird im Modell als zusätzlicher Quellterm für die in Kapitel 4.3.5.4 erläuterten Fließgewässer ein zeitvarianter Oberflächenabfluss generiert und den einzelnen Gewässersegmenten zugeordnet. Würde dies nicht erfolgen, würde im Modell über die integrierten Fließgewässer ausschließlich grundwasserbürtiger Abfluss abströmen.

Zur Erläuterung der Vorgehensweise wird nochmals auf die Abbildung 17 in Kapitel 4.3.6.3.2 verwiesen. Zusätzlich zum Gewässernetz sind in dieser 183 Teileinzugsgebiete von Gewässerabschnitten gekennzeichnet, die entsprechend der Morphologie als oberirdisches Einzugsgebiet aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet wurden. Der diesen Teileinzugsgebieten zuzuordnende Oberflächenabfluss wurde in Ermangelung eines kalibrierten Niederschlag-Abflussmodells für das hier behandelte Modellgebiet näherungsweise aus dem Pegel Sythen 1 am Heubach abgeleitet.

Dazu wurde aus den in Abbildung 16 in Kapitel 4.3.6.3.1 dargestellten Tagessmittelwerten des Abflusses neben dem mittleren monatlichen Abfluss (MoMQ nach WUNDT) auch der monatliche Niedrigwasserabfluss (MoNQ) am Pegel Sythen 1 ermittelt. Der MoNQ kann mit dem grundwasserbürtigen Abfluss am Pegel in guter Näherung gleichgesetzt werden, während der MoMQ neben dem Grundwasserabfluss auch den Oberflächenabfluss des Einzugsgebietes enthält. Die Differenz zwischen beiden Werten ist ein geeignetes Maß für die Abschätzung der monatlichen Oberflächenabflussrate in  $\text{m}^3/\text{s}$  am Pegel. Mit der bekannten Einzugsgebietsgröße des Pegels Sythen 1 ( $236,42 \text{ km}^2$ ) kann die errechnete Abflussrate des Oberflächenabflusses in der Dimension  $\text{m}^3/\text{s}$  in die flächenspezifische Abflussspende mit der Dimension  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  umgerechnet werden. Die Zeitreihe dieser Werte (s. Abbildung 32) wird mit den Größen der Teileinzugsgebiete der Bachsegmente multipliziert und als spezifischer Oberflächenabfluss in diesen in der Dimension  $\text{m}^3/\text{s}$  je Modellschritt zugeordnet.

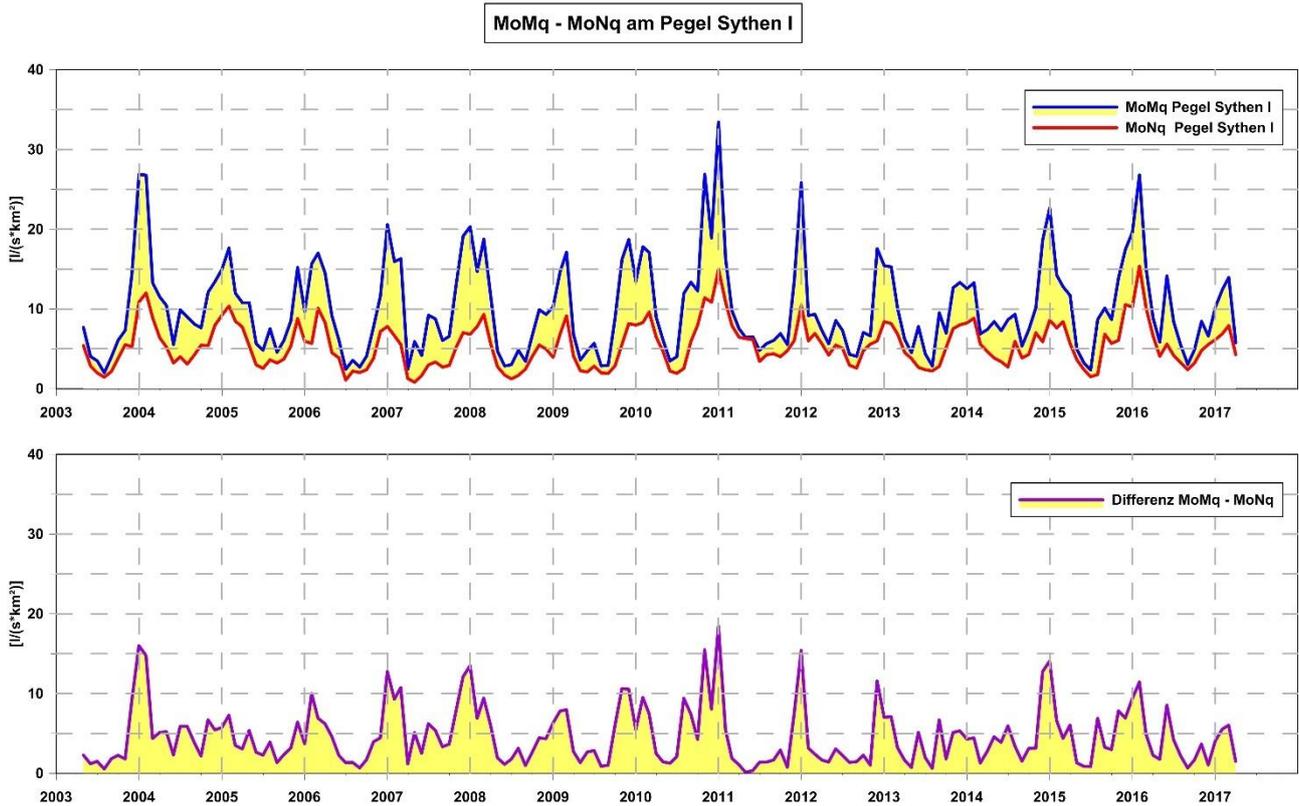


Abbildung 32: Differenz MoMq - MoNq am Pegel Sythen 1 als Grundlage zur Bestimmung des Oberflächenabflusses der oberirdischen Teileinzugsgebiete des Modellgebiets

### 4.3.8 Anfangsbedingungen

#### 4.3.8.1 Grundwasserstände

Für eine instationäre Grundwasserströmungsmodellierung ist die Vorgabe einer Anfangsbedingung erforderlich. Bei langen Modellierungszeiträumen ist es meist ausreichend, einen näherungsweise ermittelten Potentialplan als Anfangsbedingung vorzugeben, da sich das Modell nach einer gewissen Zeit den Randbedingungen entsprechend einpendelt.

Im vorliegenden Modell wurde als Anfangsbedingung ein Grundwasserhöhengleichenplan des oberen Stockwerks aus vorliegenden Grundwasserstandsdaten interpoliert. Dieser Grundwasserhöhengleichenplan ist mit leichten Unschärfen behaftet, da im Modellgebiet nicht flächendeckend Grundwasserstände zu einem Stichtag zur Verfügung stehen. Diese Unschärfe wird jedoch durch das vorgenannte „Einpendeln“ relativ schnell ausgeglichen.

#### 4.3.8.2 Anfangswassergehalt der ungesättigten Bodenzone

Der für die Simulation der Vertikalströmung in der ungesättigten Bodenzone erforderliche Anfangswassergehalt wurde pauschal mit 10 Vol. % geschätzt und im Zuge der Modellkalibrierung angepasst.

## 4.4 Modellparametrisierung

### 4.4.1 Aquiferkennwerte

Die Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der Aquiferkennwerte einschließlich der ungesättigten Bodenzone als Ergebnis der Modellkalibrierung.

Tabelle 2 Aquiferkennwerte

		Quartär		Bottroper Mergel		Halterner Sande	
		von	bis	von	bis	von	bis
<b>Durchlässigkeitsbeiwert</b>	[m <sup>2</sup> /s]	5.0E-05	4.0E-04	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	2.2E-04
<b>spezifischer Speicherkoeffizient</b>	[1/m]	5.0E-04	5.0E-04	1.0E-08	1.0E-08	8.0E-05	7.0E-03
<b>speichernutzbare Porosität</b>	[%]	20%		5%		15%	20%
<b>Gesamtporosität</b>	[%]	30%		30%		30%	
<b>Startwassergehalt ungesättigte Bodenzone</b>	[%]	10%	30%	8%	30%	5%	30%
<b>Brooks-Corey-Exponent</b>	[-]	2	3	2	3.5	2	4

Praktisch alle Aquiferkennwerte mit Ausnahme der Gesamtporosität und der vertikalen Anisotropie wurden im Zuge der Modellkalibrierung verändert und lokal differenziert.

Die als Grundwasserleiter fungierenden Bereiche des Quartärs in den Tallagen zeigen erwartungsgemäß vergleichsweise hohe Durchlässigkeitsbeiwerte und hohes Speichervermögen.

Die Gesteine der Bottrop Formation fungieren im System als stockwerkstrennende Schicht und zeigen daher geringe Durchlässigkeitsbeiwerte.

Die Halterner Sande haben ein hohes Speichervermögen bei gleichzeitig nur mäßig guter Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeitsbeiwerte liegen häufig unter 0,0001 m/s. Ihre große Bedeutung als Reservoir resultiert insbesondere auch aus ihrer großen Mächtigkeit, was zu hoher Transmissivität führt (Produkt aus Durchlässigkeitsbeiwert und Mächtigkeit).

Um die hohen Grundwasserstände in der Hohen Mark und nach Nordwesten fortgesetzt im Modell abbilden zu können, wurde der tiefere Teil der Halterner Sande systematisch geringer durchlässig angesetzt als die oberen zwei Drittel. Die Hohe Mark selbst erweist sich als Region etwas herabgesetzter Gebirgsdurchlässigkeit, was sich auch augenscheinlich in der Morphologie widerspiegelt. Das System von Oberflächengewässern strömt dabei radial von dieser als Härtling interpretierten morphologisch höheren Region ab.

### 4.4.2 Leakagekoeffizienten

Im Modell kommen an zahlreichen Stellen Randbedingungen 3. Art zur Anwendung. Allen gemein ist die notwendige Definition des zugehörigen Leakagekoeffizienten.

Der Leakagekoeffizient ist auf Grundlage des DARCY-Gesetzes definiert als der Quotient aus Durchlässigkeitsbeiwert und Mächtigkeit der als hydraulischer Widerstand fungierenden Schicht in der Dimension 1/s. Vielfach wird dieser Quotient mit der zugrundeliegenden Fläche multipliziert, z.B. der Flächengröße der Gewässersohle innerhalb der betreffenden Modellzelle, also m<sup>2</sup>/s.

In der Regel sind die Schichtmächtigkeiten des hydraulischen Widerstands nicht bekannt, so dass zur Vereinfachung dieser Wert gleich 1 gesetzt werden kann. Die jeweiligen Flächengrößen werden im Zuge der Datenverarbeitung durch das Verschneiden der häufig linienhaften Objekte und bestimmter Breite mit dem Modellgitter individuell berechnet, während z.B. in Seezellen die gesamte Modellzellenfläche eingeht.

Folglich beschränkt sich die Festlegung des Leakagekoeffizienten auf die Annahme und Kalibrierung des Durchlässigkeitsbeiwertes des hydraulischen Widerstands.

Für die verschiedenen Arten der Anwendung der Randbedingung 3. Art kamen Durchlässigkeitsbeiwerte der Sohlschichten gemäß nachfolgender Tabelle 3 zur Anwendung.

Tabelle 3: Wertebereich der Durchlässigkeitsbeiwerte m/s der Leakagekoeffizienten

		Gewässerrand Ost und Süd		Seen		Sonstige offene Fließgewässer	
		von	bis	von	bis	von	bis
<b>Durchlässigkeitsbeiwert</b>	[m/s]	1.0E-07	2.0E-05	1.0E-08	1.0E-04	1.0E-06	7.5E-05

## 4.5 Modellkalibrierung

### 4.5.1 Allgemeines

Bevor ein Grundwasserströmungsmodell zu Prognosezwecken herangezogen werden kann, muss es anhand tatsächlich gemessener Zustände kalibriert werden. Nach erfolgter Kalibrierung muss der ermittelte Parametersatz der Modelleigenschaften auf andere gemessene Zustände übertragen werden. Wird unter anderen Randbedingungen ebenfalls eine befriedigende Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Grundwasserständen festgestellt, kann das Modell als prognosetauglich bezeichnet werden.

Mit der hier durchgeführten instationären Modellkalibrierung über einen sehr langen Zeitraum von vierzehn Jahren mit unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen werden aufeinanderfolgend verschiedene gemessene Zustände berücksichtigt. Ein Grundwasserströmungsmodell kann als prognosetauglich bezeichnet werden, wenn gemessene Grundwasserstände ohne Variation der zeitunabhängigen Modellparameter hinreichend genau reproduziert werden können. Die zeitunabhängigen räumlich variablen Modellparameter sind dabei die Aquiferparameter des Grundwasserleiters (Durchlässigkeitsbeiwert bzw. Transmissivität, das speicher nutzbare Hohlraumvolumen bzw. der Speicherkoeffizient).

Jedes Grundwasserströmungsmodell darf stets nur als eine Annäherung an die Realität verstanden werden. Eine exakte Nachbildung der natürlichen Verhältnisse kann in der Praxis nicht erreicht werden.

Jedes Grundwasserströmungsmodell birgt grundsätzlich die Gefahr der Mehrdeutigkeit in sich. Es reicht nicht alleine aus, durch Anpassung der Aquiferparameter Grundwasserstände zu reproduzieren, wenn nicht gleichzeitig die im Modell zirkulierenden Wasserflüsse beachtet werden. Diese Problematik wird im Allgemeinen

zusammenfassend als das "inverse Problem der Grundwasserströmungsmodellierung" bezeichnet. Dahinter verbirgt sich die Unmöglichkeit der Kalibrierung der Aquiferparameter ohne Kenntnis der Zugaben und Entnahmen im Modellgebiet. Dieses Problem kann nur minimiert werden, wenn die Flüsse im Modell möglichst exakt erfasst werden. Daher wurde der Ermittlung und räumlich/zeitlichen Diskretisierung der beschriebenen Zugaben und Entnahmen größtmögliche Aufmerksamkeit gewidmet.

In diesem Zusammenhang sind folgende Einflussfaktoren hervorzuheben:

- Grundwasserentnahmen
- Grundwasserneubildung
- Abflüsse in Gewässern

Die Grundwasserentnahmen durch Brunnen sind dabei als extrem wichtige Datengrundlage für die Modellkalibrierung hervorzuheben. Grundwasserentnahmen prägen dem Grundwasserleiter charakteristische Absenkungstrichter in der Grundwasser Oberfläche auf, die bei der Kalibrierung sehr hilfreich sind. Zu den Brunnenentnahmen liegt eine insgesamt recht gute Datenbasis vor, allerdings gibt es Unsicherheiten bezüglich der Vielzahl der verteilten kleineren Wasserrechte, die sich zu rund 4,8 Mio m<sup>3</sup>/a summieren, aber deren tatsächlichen Entnahmen nicht bekannt sind, und im Modell zu 90 % Ausschöpfung angenommen wurden.

Die Grundwasserneubildung über versickernde Niederschläge ist ebenfalls eine herausragende Kenngröße, deren direkte Messung nur punktuell mit aufwändigen Messeinrichtungen (Lysimeter) erfolgen kann und daher indirekt ermittelt werden muss. Hierzu wurde ein auf dem aktuellen Stand der Technik beruhendes und mit dem System mGROWA des Landes vergleichbares Verfahren eines Bodenwasserbilanzmodells systematisch angewandt und während des Kalibrierprozesses nicht verändert.

Schließlich ist als weiterer Wasserlieferant für den modellierten Grundwasserleiter der Oberflächenabfluss in morphologischen Rinnen, insbesondere in Bereichen größeren Flurabstands zu nennen, der dort weitestgehend zur Versickerung kommt. Der hier gewählte Ansatz auf Basis von Pegeldaten ist realistisch und mit vergleichsweise geringer Unsicherheit behaftet.

Erst im Bereich der perennierenden Gewässerverläufe fungieren die Fließgewässer meist als Vorflut für das Grundwasser. Leider existieren keine Pegel an den kleineren Gewässern im Modellgebiet, jedoch können die über die Gewässer abgeführten Grundwasserzuströme mit den Gebietswerten der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflusspenden im Umfeld verglichen werden. Auch die Pumpdaten des Lippeverbandes im Bereich Lippramsdorf bzw. Mersch können als Plausibilitätskontrollen herangezogen werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass aufgrund der im Modellgebiet vorliegenden beträchtlichen Grundwasserentnahmen und einer möglichst genauen Abschätzung des Wasserdargebotes die zirkulierenden Wassermengen so bestimmt bzw. angenähert wurden, dass der aus dem inversen Problem resultierende Fehler bei der Modellkalibrierung als gering einzuordnen ist.

#### **4.5.2 Verlauf der gemessenen und berechneten Grundwasserstände**

Anlage 1 zeigt anhand dreizehn beispielhaft ausgewählter Grundwassermessstellen, verteilt auf das Modellgebiet, den Verlauf gemessener und berechneter Grundwasserstände. Der Anhang 3 enthält neben den in der Karte dargestellten Ganglinien zusätzlich weitere 48 für die Modellkalibrierung herangezogene Messstellen.

Um einen Eindruck von der erzielten Güte der Kalibrierung zu geben, werden zusätzlich im Anhang 3 die gemessenen Grundwasserstände den berechneten Werten in Streudiagrammen gegenübergestellt. Im idealen Fall entsprechen die berechneten Werte exakt den gemessenen, so dass im Diagramm eine Punktverteilung exakt auf der Diagonalen entsteht (s. Abbildung 33).

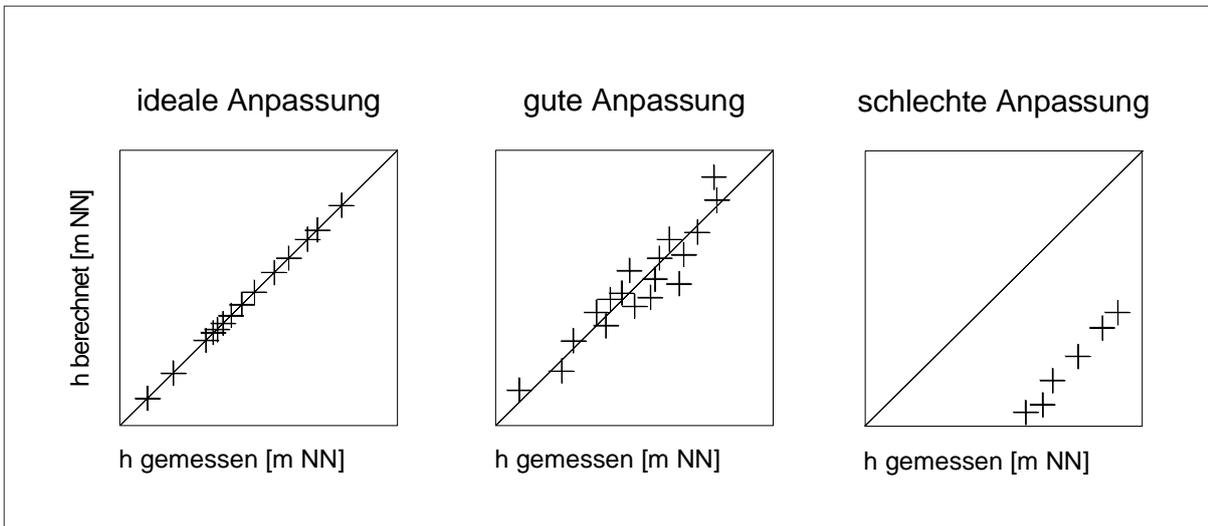


Abbildung 33: Vergleich gemessener und berechneter Grundwasserstände

Eine ideale Anpassung an die gemessenen Werte ist praktisch nicht erreichbar. Das Erreichen einer möglichst engen Punktwolke längs der Ideallinie ist das Ziel der Kalibrierung.

Als relatives Gütekriterium kann die mittlere quadratische Abweichung (Varianz) herangezogen werden. Varianzen  $< 0,3$  (entsprechend einer Genauigkeit von etwa  $\pm 0,5$  m) können bei gleichzeitig etwa symmetrischer Abweichung um die Ideallinie als sehr zufriedenstellend bezeichnet werden, wenn die räumlichen und zeitlichen Schwankungsbreiten der Grundwasserstände berücksichtigt werden:

Die mittlere quadratische Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen der in Anhang 3 dokumentierten Grundwassermessstellen beträgt im Grundwassermodell  $0,054 \text{ m}^2$ . Die Quadratwurzel ergibt die mittlere Abweichung bzw. Standardabweichung vom Zielwert, d.h. in diesem Fall  $\pm 0,23 \text{ m}$ .

Die Grundwasserstände im Modellgebiet liegen im Nordwesten bei fast 70 m NHN. An der Lippe im Süden liegen sie zwischen etwa 44 m NHN im Osten und 30 m NHN im äußeren Südwesten, im Mittel also etwa 37 m NHN. Damit beträgt die Höhendifferenz im Modellgebiet etwa 33 m. Bezogen auf diese Höhendifferenz beträgt die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Werten von  $0,23 \text{ m} < 1\%$ , was als sehr zufriedenstellend eingeordnet werden kann.

Die natürliche jährliche Schwankungsbreite der Grundwasserstände ist im Süden am größten und erreicht bis zu ca. 1 m. In Bereichen mit hohen Flurabständen dagegen gehen die jährlichen Schwankungen gegen Null. Diese natürlichen Verhältnisse werden durch das Grundwassermodell befriedigend reproduziert.

Innerhalb des Modellgebiets ist im Simulationszeitraum in unterschiedlicher lokaler Ausprägung ein fallender Trend der Grundwasserstände zu verzeichnen. Auch dieses Merkmal wird vom Grundwassermodell sehr gut nachgezeichnet.

Insgesamt lassen die Ergebnisse der Modellkalibrierung die Schlussfolgerung zu, dass das Grundwassermodell zu Prognosezwecken herangezogen werden kann.

Die Anlagen 2.1 und 2.2 zeigen exemplarisch Grundwasserhöhengleichenpläne als Ergebnis der Simulation zu einem noch relativ hohen Grundwasserstand aus der Anfangsphase des Kalibrierzeitraumes und einen aus der Spätphase der Simulation mit infolge fortlaufender Speicherentleerung niedrigeren Grundwasserständen.

### 4.5.3 Wasserbilanz des Grundwassermodells

Abbildung 34 zeigt die über den Gesamtzeitraum gemittelte Wasserbilanz des Grundwassermodells über den gesamten Modellzeitraum mit einem Bilanzfehler von 0,01 %. In der linken Säule sind die Zuflüsse in das Modell aufgetragen (positive Bilanzposten = Q in), in der rechten die Abflüsse aus dem Modell (negative Bilanzposten = Q out). Der Abfluss in den Oberflächengewässern ist nicht Bestandteil dieser Bilanz.

Die Summe der Abflüsse aus dem Modell ist größer als die Summe der Zuflüsse, woraus sich eine Speicherentleerung ergibt, die für den fallenden Trend der Grundwasserstände im Modellzeitraum verantwortlich zeichnet.

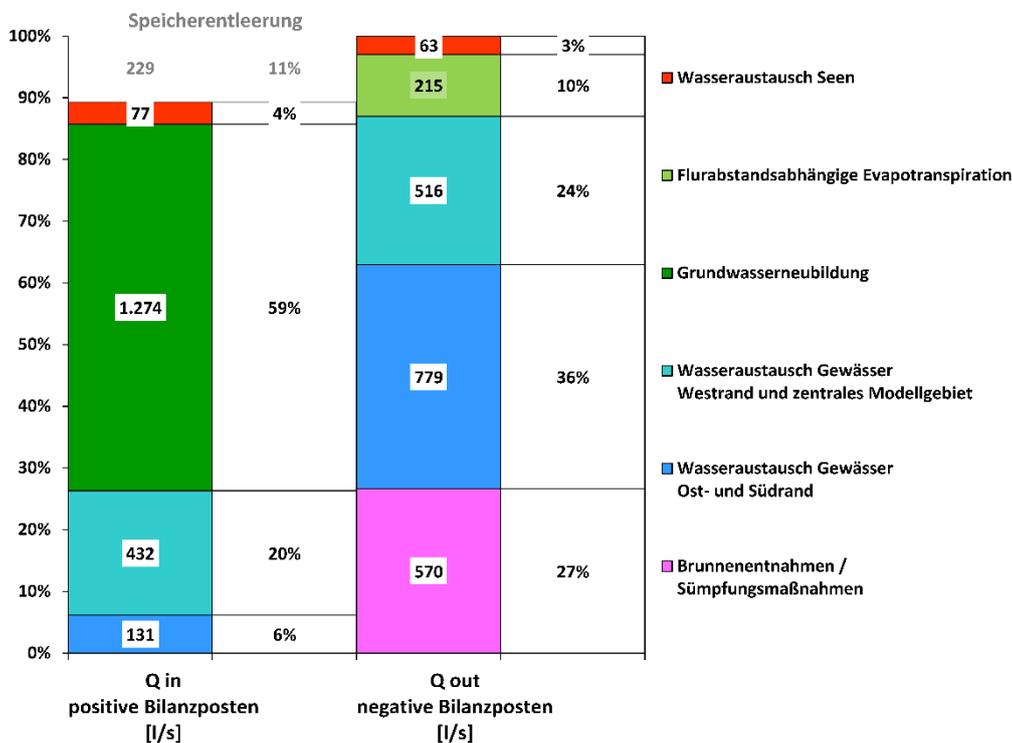


Abbildung 34: Wasserbilanz des Grundwassermodells

Die Wiedergängung des Grundwasserleiters erfolgt erwartungsgemäß im Wesentlichen über die flächenhafte Grundwasserneubildung infolge versickernder Niederschläge, aber auch der in morphologischen Rinnen versickernde Oberflächenabfluss spielt nach den Ergebnissen der Modellierung eine nicht zu vernachlässigende Rolle, auch wenn der Entzug über die Vorflutfunktion der größtenteils innerhalb des Modell liegenden Fließgewässer eine ähnliche Größenordnung aufweist. Die Wiedergängung über Aussickerung aus den Gewässern am Ost- und Südrand (Heubach, Halterner Mühlenbach, Stever und Lippe) enthält auch die Anteile des diese Gewässer unterströmenden Grundwassers, welche in diesem Modell quantitativ nicht spezifiziert werden können.

Die Bilanzposten der Seen (Tagebaugebiet, Teiche der Heubachniederung, Torfvennteich) enthalten auch

oberirdische Zu- und Abflüsse aus den Teichgräben, Zuflüsse aus dem flächenhaften Oberflächenabfluss sowie im Falle der Tagebauseen auch das Volumenäquivalent der Sandentnahme.

**4.5.4 Plausibilitätskontrolle Oberflächenabfluss**

Aus den Modellergebnissen wurde beispielhaft für den Boombach und den Oberlauf des Midlicher Mühlenbachs Ganglinien des in die Gewässer übertretenden Grundwassers generiert und mit dem unterirdischen Einzugsgebiet in Beziehung gesetzt. Es ergeben sich realistische grundwasserbürtige Abflusspenden im Mittel um ca. 6 – 8,5 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> mit abnehmender Tendenz infolge der fortschreitenden Speicherentleerung.

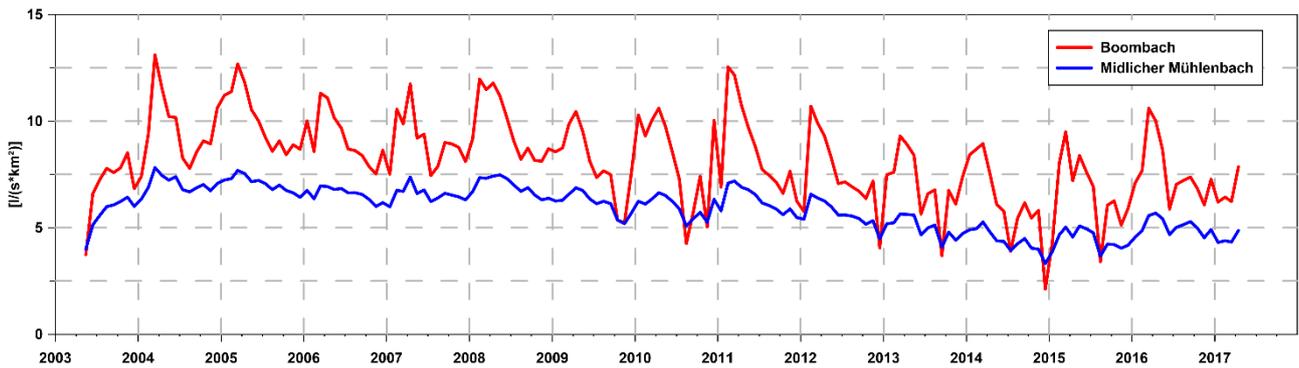


Abbildung 35: Grundwasserbürtige Abflusspende im Boombach und Midlicher Mühlenbach

Als weitere Plausibilitätskontrolle wurden die Pumpraten der Vorflutpumpanlage Pwk Dorsten Gecksbach des Lippeverbands mit den im Modellgebiet im Einzugsgebiet des Pumpwerks generierten zusammengesetzten Abflüssen aus Oberflächenabfluss und grundwasserbürtigem Abfluss verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 36 dargestellt. Die im Modell generierten Spitzenabflüsse sind anhand der Daten nicht erkennbar, jedoch wird in Trockenzeiten eine sehr gute Übereinstimmung erzielt, so dass die Plausibilitätskontrolle hinsichtlich des Grundwasserabflusses als sehr zufriedenstellend zu bewerten ist.

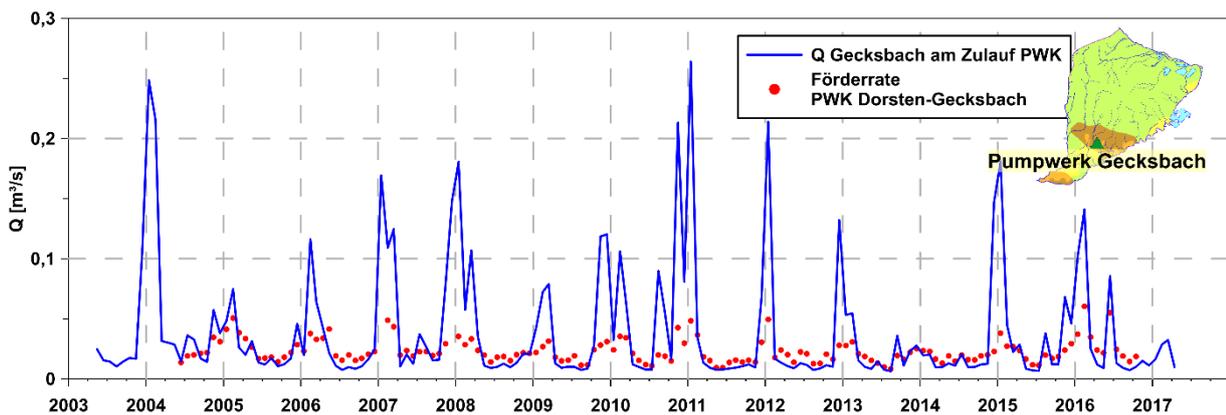


Abbildung 36: Raten des Pumpwerks Dorsten Gecksbach des Lippeverbands und modellierte Zuflüsse

**4.5.5 Modellunsicherheit**

Grundsätzlich birgt wie jedes andere Modell auch jedes numerische Grundwasserströmungsmodell Unsicherheiten. Es ist ein Wesensmerkmal von Modellen, die Realität zu vereinfachen und sich auf die wesentlichen Merkmale und Prozesse zu fokussieren.

Bei numerischen Grundwasserströmungsmodellen besteht in erster Linie die Gefahr, die hydrogeologischen Verhältnisse hinsichtlich der relevanten hydraulischen Randbedingungen falsch zu interpretieren. Diese Gefahr wird bei der hier durchgeführten Modellierung aufgrund der durchgeführten detaillierten Systemanalyse als sehr gering eingeschätzt.

Die vereinfachende räumliche Diskretisierung des naturgemäß komplexen und nur eingeschränkt auflösbaren geologischen Aufbaus des Untergrundes birgt eine weitere Quelle der Unsicherheit. Die hieraus resultierenden Modellunsicherheiten werden aufgrund der fundierten Daten des Geologischen Dienstes als vergleichsweise gering eingeordnet.

Bei der Ermittlung der zeitlich variablen und flächendifferenzierten Sickerwasserraten bzw. der Grundwasserneubildungsraten wurde größtmögliche Sorgfalt und ein Verfahren nach aktuellem Stand der Technik angewendet. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den verfügbaren Vergleichsdaten des FZ Jülich (mGROWA). Auch die diesem Komplex innewohnende Unsicherheit wird ebenfalls als vergleichsweise gering eingeordnet.

Eine im Grundsatz hohe Unsicherheit des hier aufgebauten Modells liegt in der räumlich differenzierten Parametrisierung des Untergrundes hinsichtlich seiner Wasserdurchlässigkeit und seiner Speichereigenschaften. Durch die im Gebiet vorhandenen und quantifizierten großen Grundwasserentnahmen relativiert sich diese Unsicherheit jedoch beträchtlich, da die resultierenden charakteristischen Auswirkungen auf das Grundwasser realitätsnah abgebildet werden konnten.

Die Daten zu den kleinen Wasserrechten sind dagegen vergleichsweise unsicher, da lediglich Informationen zur Höhe der Wasserrechte genutzt werden konnten, Daten zu den tatsächlichen Entnahmen standen leider nicht zur Verfügung.

Der Vergleich gemessener und berechneter Grundwasserstände zeigt im Gebiet eine insgesamt sehr gute Anpassung des Modells, jedoch sind im Detail Unsicherheiten vorhanden. In Einzelfällen konnten gemessene Grundwasserstände nicht befriedigend nachvollzogen werden, in weiteren Fällen waren vorliegende Messungen definitiv nicht plausibel und in anderen Fällen ist die vorhandene Messstellendichte, die zur Modellkalibrierung herangezogen werden konnte, vergleichsweise gering.

Zusammenfassend wird die Modellunsicherheit hinsichtlich des Modellaufbaus als gering eingestuft, hinsichtlich der lokalen Detailtreue sind jedoch grundsätzlich immer Unsicherheiten gegeben.

## **4.6 Prognosesimulationen**

### **4.6.1 Methodik**

Im Rahmen des hydrogeologischen Fachbeitrags sollen Aussagen getroffen werden, welche zusätzlichen Auswirkungen sich durch die beantragte Rahmenbetriebsplanerweiterung gegenüber dem genehmigten Zustand für das Grundwasser nach Ende der Bergbautätigkeit voraussichtlich ergeben werden. Der Zeithorizont bis zum Eintreten dieses Zustands beträgt mehr als 30 Jahre.

Vor diesem Zeithorizont und dem festgestellten Trend regional fallender Grundwasserstände in den Halterner Sanden ist daher zunächst die Frage zu betrachten, ob künftig mit weiter fallenden Grundwasserständen zu rechnen ist.

Die Ermittlung der flächendifferenzierten Sickerwasserrate im Modellgebiet hatte zu dem Ergebnis geführt, dass

diese im Zeitraum 2003 bis 2017 nicht trendbehaftet war. Ob die Grundwasserneubildungsrate sich im Zuge des Klimawandels generell künftig verändern wird, ist aktuell Gegenstand der Forschung. Gesicherte Erkenntnisse liegen dazu nach bisherigem Informationsstand nicht vor. Daher wurde vereinfachend von konstanten Verhältnissen ausgegangen.

Es wurde zunächst eine instationäre Prognosesimulation 1 durchgeführt unter folgenden Annahmen und Voraussetzungen:

- Es wird der gleiche Simulationszeitraum über vierzehn Jahre wie bei der Modellkalibrierung verwendet:
  - Die Wetterverhältnisse wiederholen sich.
  - Der zeitliche Verlauf der Grundwasserentnahmen bleibt identisch.
  - Der zeitliche Verlauf Wasserstände in den Fließgewässern am Ost- und Südrand bleibt identisch.
- Als Anfangsbedingung der Simulation dient nicht die Verteilung der Grundwasserstände vom Frühjahr 2003, vielmehr wird der simulierte Endzustand vom Frühjahr 2017 als Anfangsbedingung für die hypothetische Prognosesimulation für den Ist-Zustand herangezogen.
- Der Tagebausee Haltern Sythen erhält als Anfangsbedingung die aktuelle Ausdehnung (Stand 2016).
- Die künftige Sandentnahme wird simuliert durch die Fortdauer der Sandentnahme volumetrisch äquivalenten Grundwasserentnahmerate einschließlich der Transportwasservolumenströme.

Es wurde erwartet, dass sich im Modell in dieser Prognosesimulation insgesamt quasistationäre Verhältnisse einstellen in einem ggf. niedrigeren Niveau als aktuell (= 2017). In diesem Fall tritt über das ganze Modellgebiet betrachtet aus dem Grundwasserleiter weniger Wasser in die Vorfluter über, und gleichzeitig nimmt die Aussickerung aus Fließgewässern bzw. deren Unterströmung an der östlichen und südlichen Modellaußengrenze zu, so dass die im Kalibrierungszeitraum modellierte Speicherentleerung ausgeglichen wird. In Kapitel 4.6.2 wird gezeigt, dass sich unter den o.g. Randbedingungen im Modellgebiet tatsächlich weitgehend quasistationäre Verhältnisse eingestellt haben.

Mit einem instationären Modell, welches unter Berücksichtigung des Jahresgangs der Grundwasserneubildung über einen längeren Zeitraum quasistationäre Zustände abbildet, ist es möglich, auch ferner in der Zukunft liegende Zustände zu simulieren, sofern die grundlegenden Annahmen auch weiterhin zutreffen:

- Die mittlere Grundwasserneubildungsrate bleibt konstant.
- Es wird künftig aus dem Modellgebiet und seinem Umfeld nicht mehr Grundwasser entnommen.
- Die Wasserstände in den Fließgewässern am Ost- und Südrand und deren Leakageverhalten verändern sich künftig nicht.
- Andere, bisher nicht bekannte Ursachen, die zu einem Defizit des Grundwasservorrates führen können, werden künftig nicht wirksam.

Es wurden auf dieser Grundlage zwei weitere instationäre Prognosesimulationen durchgeführt unter den in Kapitel 4.6.1 anfangs genannten Randbedingungen, jedoch mit folgenden Änderungen:

- Der Tagebausee Haltern Sythen erhält als Anfangsbedingungen:
  - Prognosesimulation 2: Ausdehnung gemäß genehmigter Rahmenbetriebspläne
  - Prognosesimulation 3: Ausdehnung gemäß beantragter Rahmenbetriebsplanerweiterung
- Die der Sandentnahme volumetrisch äquivalente Grundwasserentnahmerate ist in diesen beiden Prognosesimulationen deaktiviert.

Im nachfolgenden Kapiteln 4.6.2 und 4.6.3 werden die Ergebnisse der Prognosesimulationen erläutert. Die Erläuterungen zur Auswertung der Prognosesimulationen bezüglich der zu erwartenden Auswirkungen der geplanten Bergbautätigkeit erfolgt in Kapitel 5.1.

#### **4.6.2 Prognosesimulation 1, Ist-Zustand mit Bergbautätigkeit**

Anhand der in Abbildung 37 dargestellten repräsentativen Auswahl von Grundwasserstandsganglinien aus dem Modellgebiet ist zu erkennen, dass im Prognosezeitraum (jeweils rechter Teil der Diagramme) der fallende Trend der Grundwasserstände aus dem Kalibrierzeitraum (linker Teil der Diagrammes) allmählich abgelöst wird und weitgehend in einen quasistationären Zustand übergeht, der im Wesentlichen nur noch Schwankungen infolge unterschiedlicher Intensität der Grundwasserneubildungsrate unterliegt.

Abbildung 38 zeigt die Wasserbilanz der Prognosesimulation 1, Fortdauer des Ist-Zustands. Wesentliche Unterschiede zum Kalibrierzeitraum bestehen zum einen in der Verringerung des Abflusses von Grundwasser über die Vorfluter aufgrund des in dieser Prognosesimulation 1 generell etwas niedrigeren Grundwasserstandsniveaus gegenüber dem Kalibrierzeitraum, und zum anderen in der deutlich verminderten Speicherentleerung. Demnach ist eine nur annähernd vollkommen ausgeglichene Bilanz der Zu- und Abflüsse in der Prognosesimulation zu verzeichnen. In der Hohen Mark ist noch ein schwach fallender Trend der Grundwasserstände zu verzeichnen, während im Sandgewinnungsgebiet des beantragten Rahmenbetriebsplangebiets stationäre Verhältnisse herrschen.

#### **4.6.3 Prognosesimulationen 2 und 3**

Die Prognosesimulation 2 - bisher genehmigte Rahmenbetriebspläne nach Ende der Bergbautätigkeit – bildet den Referenzzustand, mit welcher die Prognosesimulation 3 - beantragte Rahmenbetriebsplanerweiterung nach Ende der Bergbautätigkeit – zu vergleichen ist.

Beide Simulationen enthalten die jeweils zugehörige Seegeometrie gemäß Abbildung 39. Die dem entnommenen Sandvolumen äquivalente Grundwasserentnahme ist in diesen beiden Simulationen deaktiviert, da beiden den Endzustand nach Beendigung der bergbaulichen Aktivität darstellen.

Die beiden Vergleichszustände unterscheiden sich zum einen durch die geplante Norderweiterung und durch den Sachverhalt, dass die beiden bereits genehmigten, ursprünglich getrennten Tagebaue im Zuge des aktuell beantragten Rahmenbetriebsplanes verschmelzen und einen gemeinsamen Sandgewinnungssee bilden sollen. Dadurch wandert der Schwerpunkt des Tagebausees im geplanten Endzustand nach Osten und die resultierende Kippungslinie (s. Abbildung 6) entsprechend.

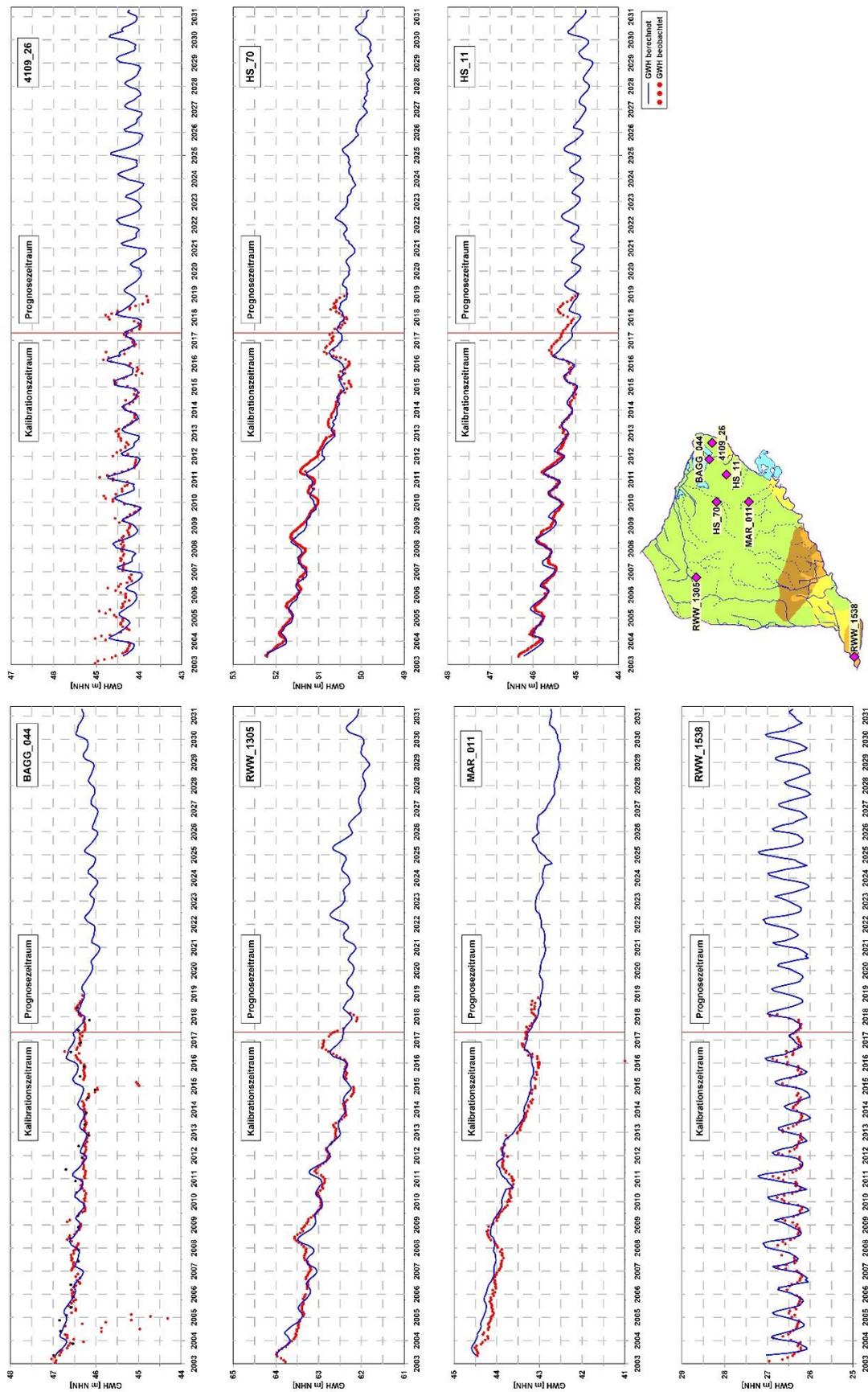


Abbildung 37: Simulierte Grundwasserstandsganglinien im Modellgebiet gemäß Prognosesimulation 1, Fortdauer des Ist-Zustands

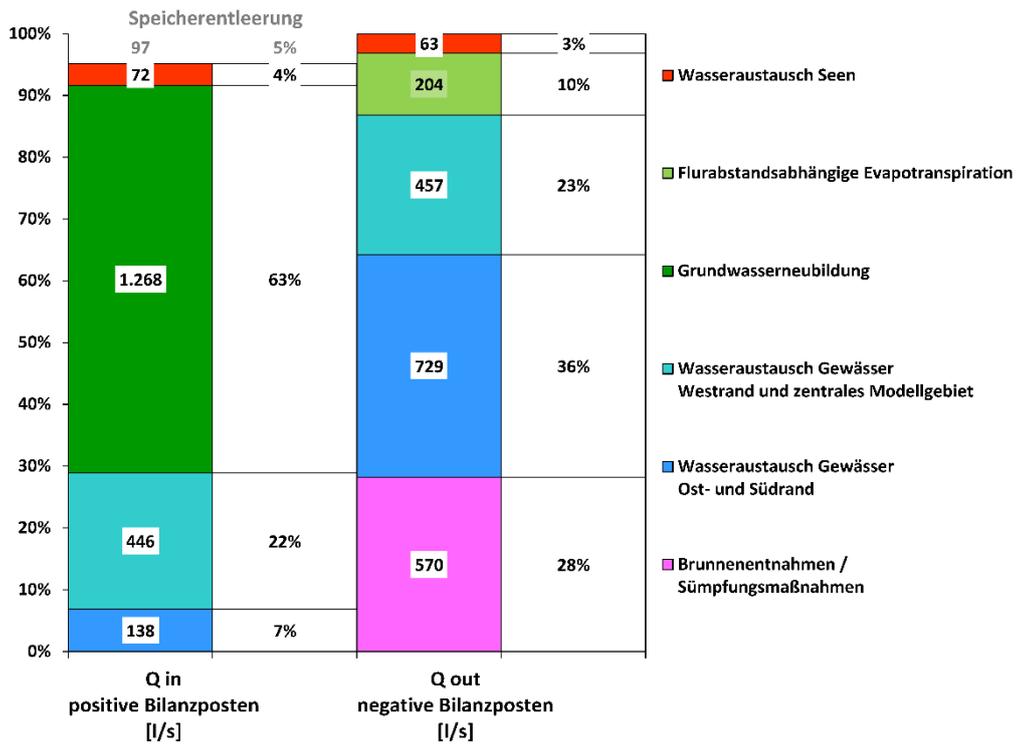


Abbildung 38: Wasserbilanz des Grundwassermodells, Prognosesimulation 1, Fortdauer des Ist-Zustands



Abbildung 39: Seegeometrien Haltern-Sythen nach aktueller Genehmigungslage (orange) und gemäß aktuell beantragter Rahmenbetriebsplanerweiterung (blau)

Die Anlagen 3.1 – 3.4 zeigen für beide Prognosesimulationen in exemplarischer Form jeweils berechnete Grundwasserhöhengleichenpläne der ungespannten Grundwasseroberfläche zu einem relativ hohen bzw. relativ niedrigen Grundwasserstand, die Anlagen 4.1 und 4.2 die zugehörigen Differenzenpläne (ungespannte Grundwasseroberflächen m NHN Prognose 3 minus Prognose 2) sowie die Anlagen 5.1 und 5.2 die resultierenden Flurabstandspläne des Planzustandes jeweils entsprechend für einen relativ hohen bzw. niedrigen Grundwasserstand.

## **5 Auswirkungen der geplanten Rahmenbetriebsplanerweiterung**

### **5.1 Prognostizierte grundwasserhydraulische Veränderungen**

#### **5.1.1 Grundwasserstände und Aufhöhung/Absenkung des Grundwassers im Zu- und Abstrom des erweiterten Tagebausees**

Die Abbildung 40 enthält hypothetische Grundwasserstandsganglinien der Prognosesimulationen 2 und 3 im nahen Umfeld des Tagebaus Haltern-Sythen. Die GWM 11 wurde neu errichtet und befindet sich im zentralen Zustrom des Tagebaus jenseits der Autobahn A43. Die Messstelle D45 befindet sich auf der Abstromseite des Tagebaus Haltern-Sythen bzw. im Grundwasserzustrom an der Nordwest-Ecke des rekultivierten Sees Haltern-West. Die Messstelle 164f liegt ebenfalls im Abstrom des Tagebaus Haltern-Sythen bzw. im Grundwasserparallelstrom des Sees Haltern-West.

Die Ganglinien zeichnen den Jahresgang der als repräsentativ angenommenen Grundwasserneubildungsraten des Kalibrierungszeitraumes nach. Wie auch in der Prognosesimulation 1 zum Ist-Zustand stellt sich im Verlauf der beiden Prognosesimulationen ebenfalls eine quasistationäre Entwicklung ein.

Erwartungsgemäß zeigen die Grundwasserstände auf der Zustromseite im Planzustand (= Prognosesimulation 3) niedrigere Grundwasserstände als im genehmigten Referenzzustand (= Prognosesimulation 2). Umgekehrt stellen sich im Planzustand auf der Abstromseite des Tagebaus höhere Grundwasserstände ein als im Referenzzustand. Ursache für diese Entwicklung ist zum einen die generell vergrößerte Seefläche des Planzustandes, und zum anderen, dass sich der See mit seinem Schwerpunkt insgesamt nach Osten verlagert. Folglich wandert seine Kippungslinie auch nach Osten mit den entsprechenden Effekten auf das Grundwasser. Dies kann gut anhand der Anlagen 3.1 – 3.4 nachvollzogen werden.

Im unteren Diagramm der Abbildung 40 wurde für die ausgewählten Messstellen die Differenz der Grundwasserstände der beiden Prognoseläufe gebildet (Planzustand minus genehmigter Referenzzustand). Es wird deutlich, dass die jeweilige Differenz trotz schwankender Grundwasserstände im Verlauf der Simulationen einem praktisch konstanten Wert zustrebt, mithin also stationär bzw. zeitunabhängig wird.

Die Abbildung 41 enthält prognostizierte Ganglinien der Wasserstände der Tagebauseen. Im Mittel ist im Planzustand von einem Seewasserspiegel des Tagebausees Haltern-Sythen von 49,6 m NHN auszugehen mit einer Schwankungsbreite von etwa 0,5 m. Der Seewasserspiegel wird im Mittel voraussichtlich etwa 0,75 m niedriger liegen als im bisher genehmigten Zustand. Aufgrund des deutlich größeren Seevolumens im Planzustand sind die zu erwartenden Wasserspiegelschwankungen vergleichsweise geringer als im Referenzzustand.

Im See Haltern-West werden sich mit im Mittel 47,75 m NHN deutlich höhere Seewasserstände einstellen als im Vergleichszustand infolge des steileren Zustromgradienten im Grundwasser. Die Schwankungsbreite ist bei beiden Simulation mit 0,4 m ähnlich.

Der See Haltern-Ost wird aufgrund der bergbaulichen Vornutzung zur Aufnahme des Transportwassers, welches aus dem Vorratsteich i.d.R. noch mit Schwebstoffen aus der Lagerstätte in den See strömt, genutzt und im Vergleich zu den anderen Tagebauseen infolge der Sedimentation von Trübstoffen Anzeichen von Kolmation aufweist. Der See wird gegenüber dem bisher genehmigten Zustand einen unwesentlich höheren mittleren Seewasserspiegel von etwa 45,9 m NHN aufweisen mit einer Schwankungsbreite von etwa 0,5 m.

Im Bereich der Trinkwassergewinnungsanlage Hausdülmen werden sich die Grundwasserstände im Planzustand

nur geringfügig höher einstellen als im bisher genehmigten Zustand.

### 5.1.2 Reichweite der Auswirkung auf das Grundwasser

Die Reichweite und das Ausmaß der beantragten Rahmenbetriebsplanerweiterung gegenüber dem genehmigten Referenzzustand lässt sich anhand von Differenzplänen treffend beschreiben. Dazu werden die simulierten Potentialverteilungen der ungespannten Grundwasseroberflächen voneinander subtrahiert (Prognosesimulation 3 minus Prognosesimulation 2 = Planzustand minus Referenzzustand).

Die Anlagen 4.1 und 4.2 zeigen die Differenzpläne zu den ausgewählten Zeitpunkten der Grundwasserhöhengleichenpläne der Anlagen 3.1 – 3.4, also zu einem relativ hohen und einem relativ niedrigen Grundwasserstand. In die Differenzpläne wurden zur Orientierung die Grenze des FFH-Gebietes "Weißes Venn/Geisheide" und die darin kartierten Lebensraumtypen mit aufgenommen.

Es wird deutlich, dass gemäß dem unteren Differenzdiagramm in Abbildung 40 die beiden Differenzpläne sich im Grundriss nur marginal unterscheiden, sie sind von der absoluten Höhe des Grundwasserstands im quasi-stationären Zustand mit nur jahreszeitlichen Schwankungen des Grundwasserstands praktisch unbeeinflusst.

Erkennbar wird auf der Zustromseite des Tagebausees Haltern-Sythen die Absenkungszone mit Änderungsbeträgen des Grundwasserstands gegenüber dem Referenzzustand bis etwa -0,6 m im Bereich der Norderweiterung. Auf der Abstromseite des Sees ist die entsprechende Aufhöhungszone mit Änderungsbeträgen bis etwa +0,5 m zu erkennen.

In den Plänen dargestellt sind Isolinien des berechneten Änderungsbetrages bis  $\pm 0,1$  m. Die Linie der -0,1 m Absenkung reicht auf der Zustromseite etwa 1.250 m nach Westen. Auf der Abstromseite reicht die Linie der +0,1 m Aufhöhung des Grundwasserstandes in östliche Richtung bis in etwa 1.500 m Entfernung.

Die Niederung der Heubachau liegt im Neutralbereich zwischen resultierender Absenkung und Aufhöhung. Im Westen tangiert die -0,2 m Differenzlinie die Grenze des FFH Gebietes. Die kartierten Lebensraumtypen liegen im Bereich einer prognostizierten Grundwasserabsenkung  $< -0,1$  m.

### 5.1.3 Richtung der Grundwasserströmung

Anhand der Grundwasserhöhengleichenpläne in den Anlagen 3.1 bis 3.4 ist zu erkennen, dass sich im Planzustand gegenüber dem Referenzzustand im weiteren Umfeld des Tagebausees keine signifikanten Änderungen der Grundwasserströmungssituation ergeben. Geringfügige Änderungen ergeben sich dagegen erwartungsgemäß in der unmittelbaren Umgebung des Tagebausees, wobei die Wirkung der Ost-Erweiterung (Integration des genehmigten RBP WASAG-Sythengrund) am besten erkennbar ist. Diese östliche Ausbuchtung des Tagebausees bewirkt eine etwas weiter südöstlich orientierte Strömungsrichtung des Grundwassers in diesem Bereich.

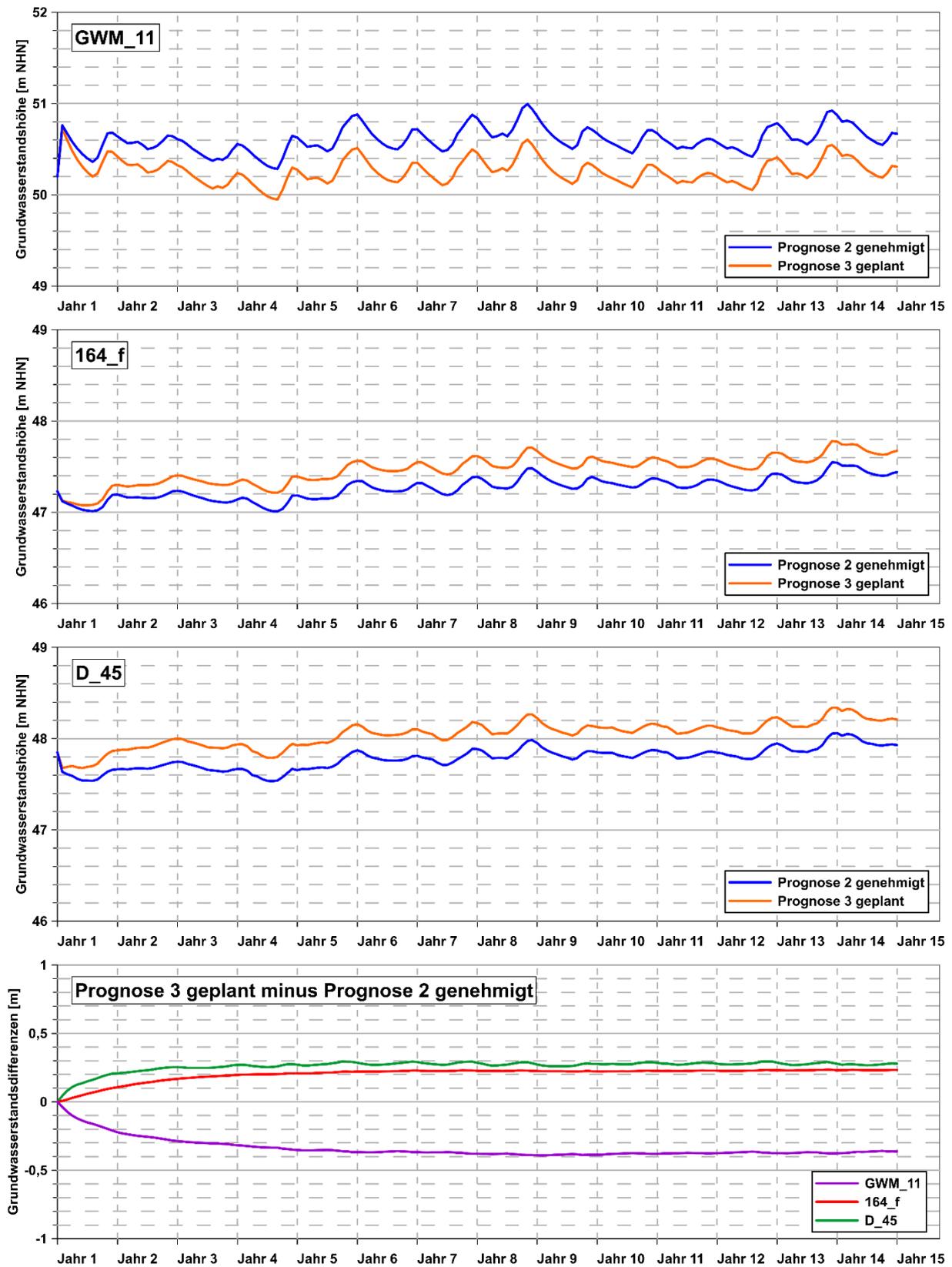


Abbildung 40: Prognostizierte Grundwasserstandsganglinien im nahen Umfeld des Tagebaus Haltern Sythen nach Beendigung der Bergbautätigkeit

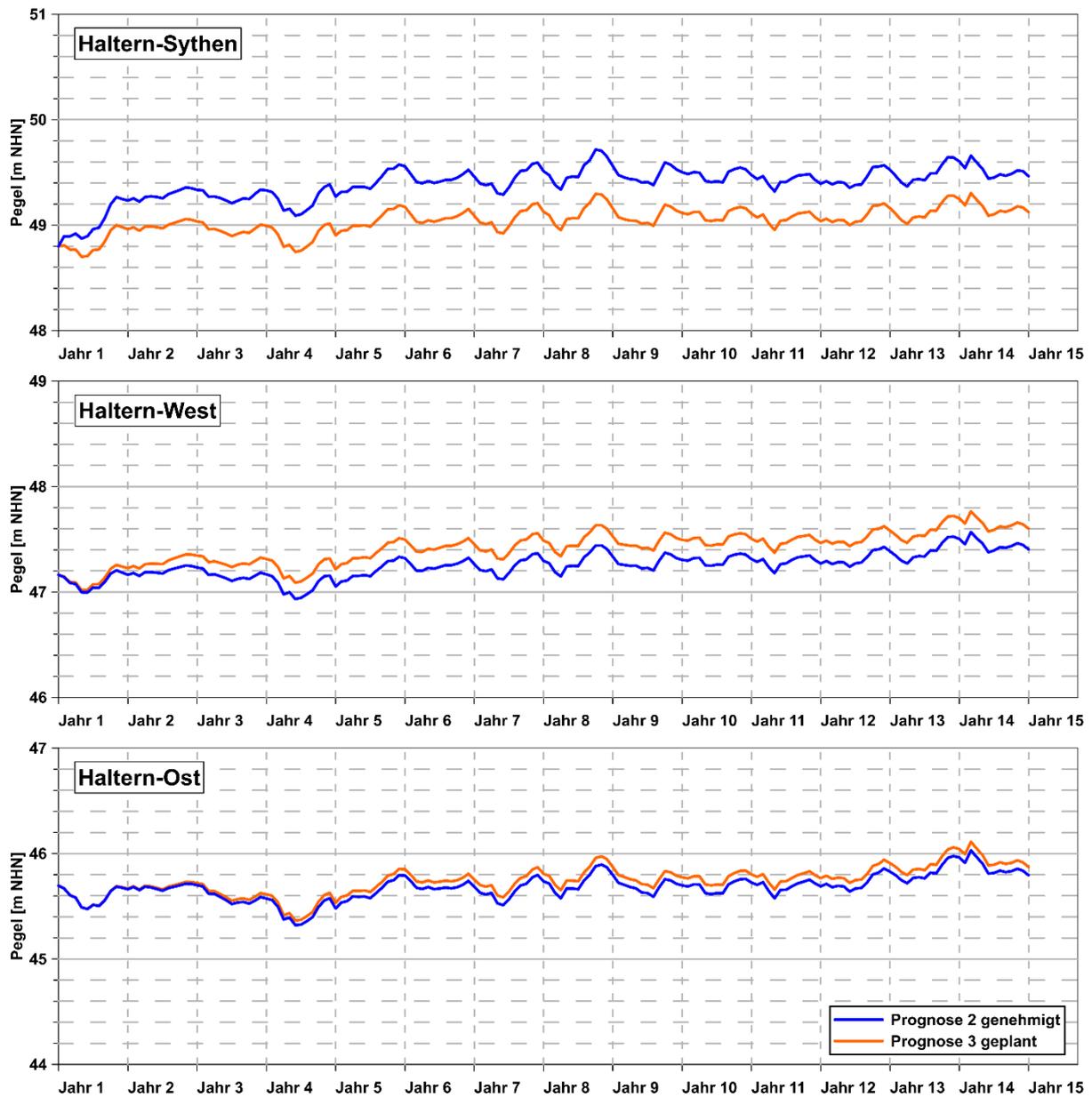


Abbildung 41: Prognostizierter Verlauf der Seewasserstände der Tagebauseen im Abbaufeld Haltern nach Beendigung der Bergbautätigkeit

### 5.1.4 Flurabstandspläne

Zur Beurteilung der voraussichtlichen Auswirkungen auf bestehende grundwasserabhängige Land-Ökosysteme wurden Flurabstandspläne durch Differenzbildung aus dem digitalen Geländemodell DGM 10 und den simulierten Grundwasserhöhengleichenplänen mit Gitterabstand 10 m erzeugt.

Die Anlagen 5.1 Und 5.2 enthalten Flurabstandspläne jeweils zu einem relativ hohen bzw. niedrigen Grundwasserstand des voraussichtlich quasistationären, und lediglich durch unterschiedlich intensive jahreszeitliche Schwankungen der Grundwasserneubildungsrate geprägten Prognosezeitraums.

Zur besseren Orientierung wurden in die Pläne die zugehörigen Isolinien der Differenzenpläne der Anlagen 4.1 und 4.2 aufgenommen wie auch die Grenze des FFH Gebietes "Weißes Venn" und die innerhalb dessen kartierten Lebensraumtypen.

Es wird deutlich, dass die größten Auswirkungen hinsichtlich der voraussichtlichen Absenkung der Grundwasseroberfläche nicht mit Bereichen flurnahen Grundwassers zusammenfallen.

Die Beurteilung der zu erwartenden Verhältnisse erfolgt im Rahmen des Fachbeitrags zum Artenschutz.

## **5.2 Überwachung und Vermeidungsstrategie**

Die Quarzwerke GmbH beabsichtigt die Durchführung eines differenzierten Überwachungsprogramms während des künftigen Abbaus. Das Programm dient zum einen der optimierten Steuerung der Seewasserstände in der Phase des Sandabbaus und zum anderen der Überwachung der hydrologischen Verhältnisse in dem sensiblen FFH-Gebiet "Weißes Venn" auf der Zustromseite.

Sollte sich im Zuge des fortlaufenden Monitorings herausstellen, dass sich entgegen den Erwartungen negative Auswirkungen auf das FFH-Gebiet andeuten, wurde eine Vermeidungsstrategie entwickelt, um einer solchen Entwicklung entgegenzuwirken.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die vorgesehenen Monitoringmaßnahmen und die resultierende Vermeidungsstrategie im Einzelnen erläutert.

### **5.2.1 Monitoring**

Das vorgesehene Monitoring wird inhaltlich in drei ineinander übergreifende Aspekte unterteilt.

- Grundwassermonitoring im Abbauggebiet
- Erfassen der Sollwerte zur Steuerung der Seewasserstände
- Hydrologisches Monitoring im FFH Gebiet "Weißes Venn"

#### **5.2.1.1 Grundwassermonitoring im Abbauggebiet**

Das in den bisherigen Nebenbestimmungen zur wasserrechtlichen Erlaubnis festgelegte Monitoring der Grundwasserstände im Umfeld des aktiven Tagebausees Haltern Sythen sowie der rekultivierten Seen Haltern-Ost und Haltern-West soll fortgesetzt und erweitert werden.

Im Anstrom des aktuellen Rahmenbetriebsplangebietes westlich der Autobahn A43 wurden zwei weitere Grundwassermeßstellen eingerichtet und mit automatisch aufzeichnenden Geräten zur Messung des Grundwasserstands (Messfrequenz 1/h) ausgerüstet.

Künftig werden in allen aktiven und rekultivierten Tagebauseen die Seewasserstände automatisch mit einer Messfrequenz 1/h aufgezeichnet.

#### **5.2.1.2 Erfassen der Zielwerte zur Steuerung der Seewasserstände**

Im südlichen Grundwasserparallelstrom zu den drei Tagebauseen (Sythen, Ost, West) werden jeweils etwa in

Höhe der Kippungslinie in geeigneter Entfernung (> 1 km) drei Grundwassermessstellen eingerichtet bzw. auf vorhandene zurückgegriffen, in denen automatisch aufzeichnende Geräte zur Messung des Grundwasserstands (Messfrequenz 1/h) installiert werden.

Die in den Grundwassermessstellen erfassten Messwerte werden künftig per Datenfernübertragung an die Warte der Quarzwerke GmbH übermittelt und dort nach automatisierter Auswertung als Wasserstandszielwerte für die Steuerung der Pumpschiffe Dülmen I und II herangezogen.

Diese Überwachungsmaßnahme dient der Optimierung der Rückpumpvolumina des im See Ost auflaufenden Wassers des Förderstroms. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass der Wasserstand im Tagebausee des aktuellen Rahmenbetriebsplanverfahrens soweit der natürlichen und jahreszeitlich schwankenden Höhenlage der ungespannten Grundwasseroberfläche im südwestlichen parallel Strom entspricht, dass kurzzeitige Wasserstandsschwankungen im Gewinnungssee sich sicher nicht auf die Grundwasserverhältnisse im nördlich gelegenen FFH-Gebiet auswirken können.

### 5.2.1.3 Hydrologisches Monitoring im FFH Gebiet "Weißes Venn"

Ziel des hydrologischen Monitorings im FFH Gebiet "Weißes Venn" ist die Überwachung dessen Wasserhaushalts durch Messung hydrologischer Elemente an ausgewählten Standorten:

- Fortlaufende Dokumentation der hydrologischen Verhältnisse im FFH-Gebiet
  - Klima bzw. Wetter
  - Grundwasserstände
  - Wasserstände und Abflüsse in Oberflächengewässern
  - Grundwasserleiter/Oberflächengewässer Interaktion.

Die Ergebnisse des Monitorings bilden die Grundlagen

- für das Erkennen potenziell möglicher negativer Einflüsse durch die Erweiterung des Tagebaus Haltern-Sythen
- zur Entwicklung eines geeigneten Alarmsystems
- zur Entwicklung möglicher Vermeidungsmaßnahmen zur Kompensation ggf. auftretender negativer Einflüsse durch die Tagebauerweiterung bzw. zur generellen Verbesserung des Wasserhaushalts im FFH Gebiet,
- zur modelltechnischen Umsetzung der hydrologischen Verhältnisse im FFH Gebiet in das Grundwassermodell Haltern.

Methodik:

- Fortlaufende Messung und Erzeugung von Zeitreihen von Grundwasserständen im FFH-Gebiet, im Sandabbaugebiet sowie in unbeeinflussten Referenzmessstellen.
- Fortlaufende Messung und Erzeugung von Zeitreihen von Wasserständen in Oberflächengewässern.

- Aufstellen von Abfluss-Wasserstandsbeziehungen durch wiederholte Abflussmessungen in Oberflächengewässern zur Erzeugung von Zeitreihen des Abflusses.
- Einzelmessungen des Wasseraustauschs zwischen Grund- und Oberflächengewässern mit Hilfe von Leakagemetern.
- Einrichtung einer ortsnahen Wetterstation zur fortlaufenden Messung und Aufzeichnung des lokalen Niederschlags sowie der wasserhaushaltsrelevanten Klimaelemente.
- Entwicklung eines Überwachungskonzeptes und Alarmsystems auf der Basis des Wiener Mehrkanalfilter Verfahrens durch Vergleich der Zeitreihen von Grundwasserständen von durch die geplante Maßnahme unbeeinflussten Grundwassermessstellen und den vorgesehenen Überwachungsmessstellen.

Hinsichtlich der Vermeidung negativer Auswirkungen des Abbauvorhabens auf das FFH-Gebiet ist geplant, neben den vorgesehenen Grundwassermessstellen im engeren Moorbereich auch weitere zwischen der Autobahn A43 und dem zentralen FFH-Gebiet in mehreren Messriegeln anzuordnen, um auf diese Weise frühzeitig negative Veränderungen feststellen zu können.

Das hydrologische Monitoring wird im Detail mit der Biologischen Station Recklinghausen abgestimmt. Des Weiteren sind Gespräche mit dem Grundstückseigentümer erforderlich, um entsprechende Messstellen einrichten zu können. Aus diesem Grund liegt z.Zt. noch keine Planunterlage für den hier vorliegenden Fachbeitrag vor.

## **5.2.2 Vermeidungsstrategie**

Negative Auswirkungen auf das flurabstandsabhängige FFH-Gebiet "Weißes Venn" durch das Abbauvorhaben sind unbedingt zu vermeiden.

Die Aussagegenauigkeit und die Prognosefähigkeit des aufgebauten numerischen Grundwasserströmungsmodells sind relativ hoch einzuordnen, dennoch bestehen grundsätzlich immer Unsicherheiten bei jeder Art von Modellen (s. Abschnitt 4.5.5).

Im Falle des FFH-Gebietes "Weißes Venn" ist das zur Modellkalibrierung zur Verfügung stehende Messstellennetz vergleichsweise weitständig, und erst die im Jahr 2017 durch die Quarzwerke GmbH eingerichteten Messstellen um das FFH Gebiet herum lieferten Daten, die zu wichtigen Erkenntnissen hinsichtlich der dort herrschenden hydrogeologischen Verhältnisse geführt haben. So wurde z.B. erkannt, dass der künstliche Entwässerungsgraben Vennkanal in seinem Unterlauf als Vorflut für das Grundwasser wirkt und dort zu einer unnatürlichen Grundwasserabsenkung führt.

Zur Vermeidung negativer Auswirkungen des Abbauvorhabens auf das FFH-Gebiet sollen im Falle des Erkennens solcher Prozesse abgestuft zunächst Maßnahmen zur Stützung des Wasserhaushalts im FFH-Gebiet vorgenommen werden. In einem ggf. erforderlichen zweiten Schritt ist eine wirksame Verkleinerung der Abbaufäche vorgesehen. Beide Schritte werden nachfolgend näher erläutert.

### **5.2.2.1 Verbesserung des Wasserhaushalts im FFH Gebiet "Weißes Venn"**

Durch das im Abschnitt 5.2.1.3 erläuterte Monitoring sollen die hydrologischen Verhältnisse im FFH-Gebiet nicht

nur dokumentiert werden, sondern die gewonnenen Daten sollen zur Vertiefung der Kenntnisse des hydrologischen Systems herangezogen werden, um auf diese Weise das Grundwasserströmungsmodell in diesem Bereich zu verbessern.

In der Folge sollen mit der Biologischen Station Recklinghausen mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserhaushalts erörtert werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist noch offen, ob geeignete Maßnahmen von der Quarzwerke GmbH auch unabhängig von den Ergebnissen der Überwachung hinsichtlich ggf. eintretender negativer Effekte vorgenommen werden.

#### **5.2.2.2 Verkleinerung der Tagebaugröße**

Für den unwahrscheinlichen Fall, dass sich die im vorherigen Abschnitt erläuterten Maßnahmen nicht realisieren lassen, ist als finaler Schritt die Begrenzung des Tagebausees nach Osten bzw. Südosten vorgesehen.

Mit der Begrenzung des Abbaus nach Osten wird ein weiteres Auswandern der Kippungslinie nach Osten und die damit einhergehende Absenkung des mittleren Seewasserspiegels begrenzt.

Die Anlagen 6.1 und 6.2 zeigen das Ergebnis einer weiteren Prognosesimulation in Form von Differenzenplänen. In diesen Simulationen wurde die keilförmige Spitze des geplanten Abbaus nach Südosten herausgenommen und das Ergebnis mit der bereits genehmigten Situation (Prognose 2) verglichen.

Es zeigt sich, dass sich durch diese Verkleinerung kein zusätzlicher Absenkungsbereich gegenüber der bereits genehmigten Situation im Bereich des FFH-Gebiets einstellen wird.

### **5.3 Grundwassernutzungen im Umfeld**

Als Grundwassernutzung im Umfeld des Tagebaus ist in erster Linie die Trinkwassergewinnungsanlage Hausdümen zu nennen, welche in den 1950er Jahren eingerichtet wurde, als die Sandgewinnung im Abbauggebiet bereits stattfand. Dementsprechend berücksichtigt das ausgewiesene Schutzgebiet in seinem Grenzverlauf die Situation der Tagebauseen und der Seen in der Heubachniederung.

Negative Einflüsse auf die Trinkwassergewinnung aufgrund der veränderten grundwasserhydraulischen Situation im Planzustand sind nicht erkennbar.

Ggf. ist zu prüfen, ob die auf dem ehemaligen WASAG Gelände eingerichteten Sanierungsbrunnen (s. Kapitel 5.4), durch die veränderte Strömungssituation betroffen sind.

### **5.4 Gefährdungspotentiale im Umfeld des Planvorhabens**

Als mögliche Gefährdungspotentiale sind südlich des beantragten Rahmenbetriebsplangebietes schädliche Bodenveränderungen und Grundwasserverunreinigungen durch sprengstofftypische Verbindungen (STV) auf dem ehemaligen Gelände der WASAG zu nennen. Dort werden seit längerem auch aktive Grundwassersanierungsmaßnahmen vorgenommen.

Aufgrund dieses Gefährdungspotentials wurden auf dem möglicherweise betroffenen Areal des bereits genehmigten Teilgebietes (RBP WASAG-Sythengrund) des Rahmenbetriebsplans, welcher mit der aktuell beantragten

Erweiterung verschmolzen ist, nach Übernahme durch die Quarzwerke GmbH umfangreiche und räumlich engständige Bodenuntersuchungen auf STV durchgeführt. Positive Befunde waren in keinem Fall festzustellen, so dass die Schlussfolgerung erlaubt ist, dass das Gefährdungspotential durch STV in diesem Teil des Rahmenbetriebsplangebietes als sehr gering einzuordnen ist.

Wie bereits erläutert, verändert sich die grundwasserhydraulische Situation südlich des geplanten Sees durch das geplante Auffahren eines gemeinsamen Sees der verschmolzenen Rahmenbetriebspläne und wird zu einer noch weiter südöstlich orientierten Grundwasserströmung führen, so dass die Gefahr eines Übertritts von gelösten Schadstoffen in einen der drei Tagebauseen verringert wird.

## 5.5 Angaben zur Grund- und Seewasserbeschaffenheit, Prognose zur Entwicklung

Im Rahmen einer gesonderten Untersuchung wurde im Auftrag der Quarzwerke GmbH eine zusammenfassende Bewertung der seit 1982 in regelmäßigem Zeitabstand von zwei Jahren durchgeführten Seewasseruntersuchungen hinsichtlich ihrer physiko-chemischen Beschaffenheit einschließlich Einordnung ihrer Trophieklassen im gesamten Abbaufeld vorgenommen. Eine Beschreibung dieser Untersuchungsergebnisse ist dem Anhang 4 zu entnehmen.

In der Schlussfolgerung zu dieser Bewertung heißt es:

*Über mehr als 25 Jahre zeigen die Untersuchungsberichte des Instituts für Wasserwirtschaft, dass in den Tagebauseen Tiefenverteilungen der physikalisch/chemischen Leitparameter in der Phase der Sommertagnation vorliegen, die darauf schließen lassen, dass ganzjährig eine hinreichende Sauerstoffversorgung auch im Hypolimnion der Seen gegeben ist. Lediglich im See Haltern West waren in den 1980er Jahren temporär Anzeichen auf anaerobe Verhältnisse am Seeboden festgestellt worden, die aber ab den 1990er Jahren nicht mehr festzustellen waren.*

*Die zusätzlichen Messungen zur Frühjahrszirkulation im See Haltern-West, die ab 2008 wegen der dort geplanten Tieferaussandung durchgeführt wurden, belegen die sehr gute Durchmischung des Sees über das gesamte Profil hinweg trotz der vergrößerten Seetiefe bis 40 Meter im zentralen Teil. Aufgrund vergleichbarer Geometrien erscheint es berechtigt, eine entsprechend ausgeprägte Zirkulation auch in den Seen Haltern Ost und Haltern Sythen anzunehmen.*

*Über die grundwasserhydraulischen Verhältnisse und anhand der regionalen Beschaffenheit des Grundwassers in den Halterner Sanden konnte im Rahmen der vorliegenden Zusammenfassung gezeigt werden, dass die Tagebauseen aufgrund ihrer Größe im Grundwasser eine ausgeprägte Tiefenwirkung entfalten, so dass die Eigenschaften des lokalen oberflächennahen und für die Lagerstätte typischen Grundwassers in den Seen durch aufsteigendes tiefes Grundwasser überprägt werden. Diese Überprägung führt zu einer Anhebung des pH-Wertes in den Seen - ggf. noch gefördert durch biogene Entkalkungsprozesse - in den neutralen bis schwach basischen Bereich. Das aufsteigende Grundwasser führt auch zu einer Erhöhung der Pufferkapazität.*

*Bei der Seepassage führen Denitrifikationsprozesse zu einer Abnahme der Nitratkonzentrationen, so dass im Grundwasserabstrom deutlich geringere Nitratkonzentrationen als im Grundwasseranstrom festzustellen sind.*

*Die Beschaffenheit der Sedimentproben aus den Seen zeigt, dass eine Akkumulation organischer*

Substanz am Grund der Seen nicht stattfindet. Das Fehlen solcher organischen Schlämme kann neben den gemessenen Tiefenprofilen als weiterer Beleg für eine ausreichende Sauerstoffversorgung an den Seeböden genannt werden. Abgestorbenes organisches Material wird dort augenscheinlich vollständig abgebaut.

Mit einem aeroben Milieu am Grunde der Seen ist gleichzeitig die Voraussetzung geschaffen, dass Phosphor aus abgestorbener Zellsubstanz über dreiwertiges Eisen chemisch fixiert werden kann.

Die vom Institut für Wasserwirtschaft regelmäßig vorgenommenen Trophieklassifikationen auf Basis der mit einer Frequenz von zwei Jahren durchgeführten Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass in allen Seen stabile mesotrophe Zustände herrschen und sich keine Hinweise auf negativ zu bewertende Eutrophierungsprozesse ergeben.

Unter dieser Voraussetzung sind die Auswirkungen der hydrochemischen Veränderungen, die sich für den Grundwasserabstrom der Seen ergeben, vor dem Hintergrund der Trinkwassergewinnung in der WGA Hausdülmen als positiv einzuordnen. Als positive Auswirkungen sind zu nennen:

- pH-Wert Anhebung
- Erhöhung der Pufferkapazität
- Nitratreduktion
- Phosphatfixierung
- Fixierung von geogenem Aluminium und Arsen (hier nicht im Detail erörtert)
- Aerobisierung

Bei der Bewertung der Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung ist zu beachten, dass die Ursprünge der Rohstoffgewinnung wie auch der Teichwirtschaft zu Fischereizwecken am Standort bereits in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts zurückreichen. Nach vorliegenden Informationen wurde die Wassergewinnung Haus-Dülmen in den 1950er Jahren aufgenommen. Demnach sollte zum Zeitpunkt der Einrichtung bzw. des Ausbaus der Wassergewinnung die Möglichkeit der Beeinflussung des Grundwassers durch die Rohstoffgewinnung im Grundsatz bekannt gewesen sein.

Die Rohstoffgewinnung der Quarzwerke GmbH wird sich am Standort nach derzeitiger Genehmigungslage noch über einen Zeitraum von voraussichtlich mehreren Jahrzehnten erstrecken. Eine prinzipielle Änderung der Gewinnungstechnik mit Transport des gewonnenen Sandes mithilfe von Seewasser und Rückführung des Förderwassers über die zwischenzeitlich stillgelegten Tagebauseen ist nicht zu erwarten. Demnach ist damit zu rechnen, dass sich die aktuellen und bereits über einen Zeitraum von > 25 Jahren stabilisierten hydrochemischen und biologischen Verhältnisse in den Seen und ihrem Abstromgebiet nicht ändern werden. Insbesondere ist mit raschen Änderungen nicht zu rechnen.

Im Besonderen ist wegen der nachgewiesenen Sauerstoffversorgung der Seen, ihrer Größe und nicht zuletzt aufgrund der fortlaufenden Kreislaufführung des Wassers im Zuge der Rohstoffgewinnung nicht damit zu rechnen, dass sich in den Tagebauseen im Bereich der Hypolimnia zu vermeidende anaerobe Verhältnisse einstellen werden.

Der Unterzeichner kommt zu der abschließenden Beurteilung, dass auf Grundlage der vorliegenden Daten und Bewertungen eine Reduktion der Untersuchungsfrequenz der Tagebauseen z.B. auf einmal pro fünf Jahre gerechtfertigt erscheint.

Hervorzuheben ist neben der aus den Erfahrungswerten zur bisherigen Entwicklung der Tagebauseen am Standort Haltern abzuleitenden allgemein günstigen Prognose zu den zu erwartenden limnologischen Verhältnissen, dass durch die Größe der Seen eine Tiefenwirkung der Grundwasseranströmung erreicht wird. Diese ist dazu geeignet, durch den Zustrom von pufferndem Hydrogencarbonat aus der Tiefe, Einflüsse auf die Seewasserbeschaffenheit aus oberflächennahen sauren Grundwässern infolge Huminsäureeintrag insbesondere aus dem nördlichen Teil des Abbaugebietes zu neutralisieren.

## 5.6 Hydromorphologische Aspekte zur Tagebaugestaltung

Der Sandabbau im Zuge der Herstellung bzw. der Erweiterung des Sees und der späteren Rekultivierung sollte folgenden Prinzipien folgen:

Tiefenvariation:

- Möglichst ebene Abbausohle unter Vermeidung lokaler Senken

Struktur der Uferzone

- Vermeidung von Buchten bzw. stark gegliederter Uferlinie
- Böschung 1:2 zwischen ungestörtem Gelände und abgeflachtem Seeufer
- Böschung 1:5 bis 1:10 ( $\pm 1$  m mittlerem Seepegel)
- 2-5 m breiter, möglichst licht bewachsener Uferstreifen
- Unterwasserböschung bis Tagebausohle -40 m unter mittlerem Seepegel, Böschungsneigung  $\approx 1:3$

Die Gestaltungsprinzipien dienen dazu, einen langfristig gut durchlüfteten See zu gewährleisten, der aufgrund begrenzter Flachwasserzonen das Vordringen von Makrophyten mit der dort unvermeidlichen Akkumulation von Biomasse limitiert. Die Uferstreifen sollen daher langfristig möglichst freigehalten werden, um ein Vordringen von Wald bzw. Niederwald bis an die Wasserfläche so weit wie möglich zu begrenzen, um auch auf diese Weise den Eintrag von Biomasse in Form von Laub in das Gewässer zu begrenzen. Durch eine möglichst ebene Abbausohle sollen lokale Senken vermieden werden, um dort eine Akkumulation von organischem Detritus infolge Tiefenzirkulation zu minimieren. Dadurch soll der Bildung lokal anaerober Zonen am Seegrund mit den typischen unerwünschten Begleiterscheinungen entgegengewirkt werden.

Eine signifikante Akkumulation von Biomasse in Form von Schlämmen, welche reich an organischem Kohlenstoff (TOC) sind, wurde im Rahmen des langjährigen Monitorings in den vorhandenen Tagebauseen bisher nicht festgestellt. Die TOC Gehalte von Sedimentproben lagen bisher praktisch ausnahmslos bei  $< 1$  ppm. Mit wenigen Ausnahmen dominierten bei der Probenansprache gelbe bis braune Sedimentfarben des mineralischen Substrats, was auf oxidierende Verhältnisse am Seeboden schließen lässt. Das Erreichen solch positiver Befunde kann durch die zuvor formulierten Gestaltungsprinzipien des Tagebausees langfristig auch für die geplante Seeerweiterung Haltern-Sythen unterstützt werden.

Aachen, Juli 2019

gez. Dipl.-Geol. M. Himml

## Physikalische und mathematische Grundlagen der Grundwasserströmungsmodellierung

In den nachfolgenden Kapiteln zu den Grundlagen der Grundwasserströmung werden physikalische Größen in neutraler Dimension bezeichnet mit

L	=	Länge
M	=	Masse
T	=	Zeit.

Wegen der erforderlichen Beschränkung auf die wesentlichen theoretischen Grundlagen wird an dieser Stelle auf vertiefende Literatur hingewiesen, in der z.T. auch numerische Lösungsmethoden behandelt werden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien an dieser Stelle genannt: Bear, J. (1979), Domenico, P.A. & Schwartz, F.W. (1998), Langguth, H.R. & Voigt, R.(2003), Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005), Kinzelbach, W. (1992), Rausch, R., Schäfer, W., Therrien, R., Wagner, C. (2005).

### 1. Grundwasserströmung

#### 1.1 Hubbert-Potenzial

Das Grundwasser als Teilkomponente des Wasserkreislaufs ist ständig in Bewegung. Diese wird hervorgerufen durch die Schwerkraft und die durch diese hervorgerufenen Druckkräfte. M.K. Hubbert veröffentlichte 1940 (Hubbert, 1940) eine geschlossene auf physikalischen Gesetzen beruhende Theorie zur Grundwasserbewegung.

Die gesamte mechanische Energiehöhe  $h_{ges}$  eines nicht kompressiblen Wasserteilchens konstanter Dichte lässt sich demnach mit der Gleichung von Bernoulli beschreiben. Sie ist die Summe aus Druckenergie, Lageenergie und kinetischer Energie:

$$h_{ges} = \frac{p}{\rho \cdot g} + z + \frac{v^2}{2g}$$

Gleichung A1-1

mit:	$h_{ges}$	=	Energiehöhe	L
	$p$	=	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
	$\rho$	=	Dichte des Wassers	$ML^{-3}$
	$g$	=	Erdbeschleunigung	$LT^{-2}$
	$z$	=	Ortshöhe über Bezugsniveau	L
	$v$	=	Geschwindigkeit	$LT^{-1}$

Im Grundwasser ist die Fließgeschwindigkeit so gering, dass der Term der kinetischen Energie (im Gegensatz zur Strömung in Oberflächengewässern), in den die Fließgeschwindigkeit quadratisch eingeht, ignoriert werden kann. Damit reduziert sich die gesamte Energiehöhe zum Hubbert-Potenzial bzw. zur Piezometerhöhe  $h$ .

Die Piezometerhöhe  $h$  an einem Messpunkt im Grundwasserleiter mit der Ortshöhe  $z$  ist eine der entscheidenden Größen zur Beschreibung der Grundwasserbewegung. Sie vereinigt den hydrostatischen Druck und die Lage relativ zum Bezugsniveau:

$$h = \frac{p}{\gamma} + z = \frac{p}{\rho \cdot g} + z$$

Gleichung A1-2

mit:	$h$	=	Piezometerhöhe	L
	$p$	=	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
	$\gamma$	=	Wichte des Wassers	$ML^{-2}T^{-2}$
	$\rho$	=	Dichte des Wassers	$ML^{-3}$
	$g$	=	Erdbeschleunigung	$LT^{-2}$
	$z$	=	Ortshöhe über Bezugsniveau	L

Unterschiede in der Piezometerhöhenverteilung sind die Auslöser einer Grundwasserbewegung, die stets bestrebt ist, einen Zustand minimaler Energiehöhe zu erreichen. Zwischen zwei Messpunkten entlang einer Fließlinie kann der Gradient (s.u.) definiert werden.

Die Grundwasserbewegung erzeugt im Untergrund ein dreidimensionales Strömungsfeld, das physikalisch und mathematisch Analogien zum Wärmefluss durch feste Körper und dem Fließen elektrischen Stroms aufweist.

Die das dreidimensionale Strömungsfeld beschreibende Bewegungsgleichung lässt sich aus dem Darcy - Gesetz und der Kontinuitätsbedingung ableiten.

**1.2 Darcy –Gesetz**

Das Darcy Gesetz besagt, dass die Durchflussrate durch eine mit wassergesättigtem Bodenmaterial gefüllte Röhre proportional ist zum Produkt aus hydraulischem Gradient und Querschnittsfläche. Die Proportionalitätskonstante ist dabei der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  mit der Dimension einer Geschwindigkeit (LT<sup>-1</sup>). Der Durchlässigkeitsbeiwert ist die Kenngröße für den hydraulischen Widerstand, den der Boden dem Durchfluss entgegensetzt. Die Analogie des Darcy-Gesetzes zum Ohm'schen Gesetz und des Durchlässigkeitsbeiwertes zum elektrischen Widerstand ist augenfällig.

Das Darcy-Gesetz kann mathematisch in unterschiedlicher Weise formuliert werden. Eine verbreitete Formulierung lautet:

$$Q = k_f \cdot i \cdot F = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot F \tag{Gleichung A1-3}$$

mit:

Q	=	Durchflussrate	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
$k_f$	=	Durchlässigkeitsbeiwert	LT <sup>-1</sup>
$k_f$	=	K in internationaler Schreibweise	LT <sup>-1</sup>
i	=	hydraulischer Gradient $\Delta h/\Delta l$	1
F	=	Durchflussquerschnitt	L <sup>2</sup>

Diese Formulierung geht unmittelbar unter Berücksichtigung von Gleichung A1-2 auf das Darcy Experiment (siehe Abbildung 1) zurück. Eine mit wassergesättigtem Bodenmaterial gefüllte Röhre mit der Querschnittsfläche F wird kontinuierlich von Wasser mit der Durchflussrate Q durchströmt. An den Enden der Röhre befinden sich im Abstand  $\Delta l$  Manometerröhrchen, in denen sich unterschiedliche Piezometerhöhen  $h_1$  und  $h_2$  einstellen. Aus der Piezometerhöhendifferenz und dem Abstand  $\Delta l$  zwischen den Piezometern errechnet sich der hydraulische Gradient zwischen zwei Punkten entlang des Fließweges:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} = \frac{\Delta h}{\Delta l} \tag{Gleichung A1-4}$$

Durch den Übergang zur infinitesimal kleinen Fließstrecke ergibt sich die differentielle Schreibweise:

$$i = \frac{dh}{dl} \tag{Gleichung A1-5}$$

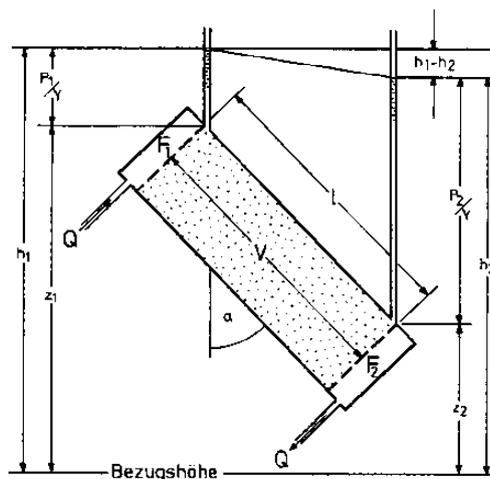


Abbildung 1: Prinzipskizze zum Darcy-Experiment (aus Langguth, H.R. & Voigt, R., 2003)

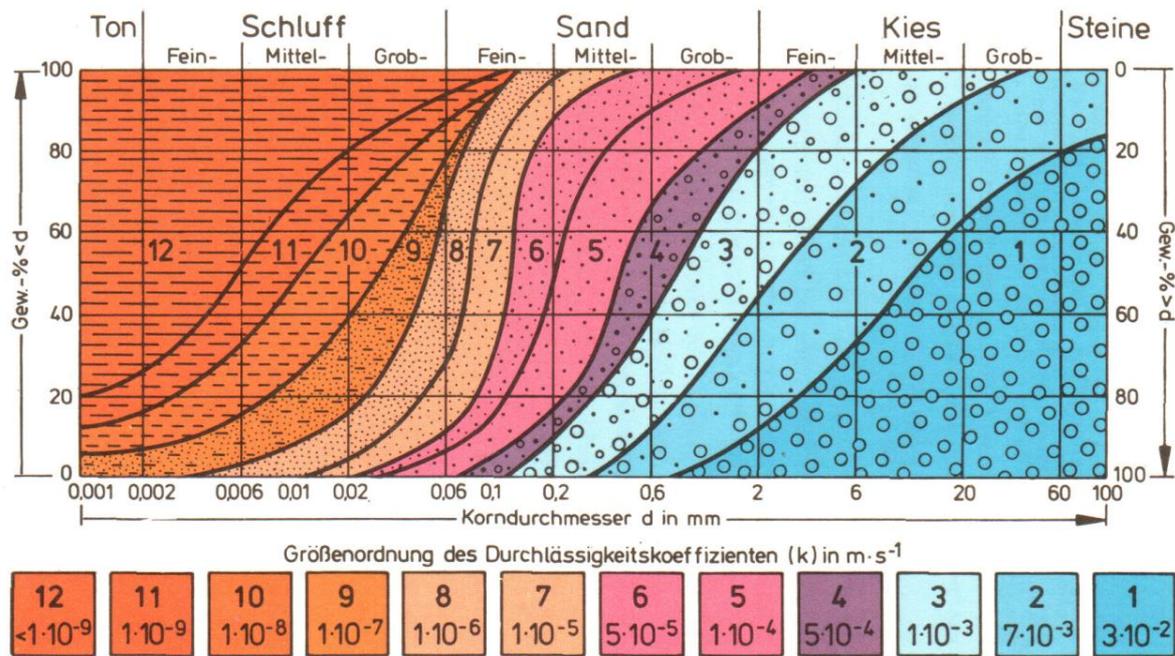


Abbildung 2: Durchlässigkeitsbeiwerte und Korngrößenklassen nach Breddin (aus Stork, W., 1980)

Die Abbildung 2 veranschaulicht die Größenordnung des Durchlässigkeitsbeiwertes in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung des Grundwasserleiters.

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist nicht nur eine Eigenschaft des Bodens, sondern auch des durchströmenden Fluids, dessen wesentliche physikalische Kenngrößen seine Viskosität und Dichte sind. Über diese Eigenschaften kann der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  in die vom Fluid unabhängige Permeabilität  $k$  als reine Bodeneigenschaft mit der Dimension  $L^2$  umgerechnet werden.

$$k = k_f \cdot \frac{\eta}{\gamma} \tag{Gleichung A1-6}$$

- mit:
- $k$  = spezifische Permeabilität  $L^2$
  - $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert des Fluids  $LT^{-1}$
  - $\eta$  = dynamische Viskosität des Fluids  $ML^{-1}T^{-1}$
  - $\gamma$  = Wichte des Fluids  $ML^{-2}T^{-2}$

Durch Umstellung der Gleichung A1-3 ergeben sich die Kenngrößen des spezifischen Durchflusses  $q$  bzw. der Filtergeschwindigkeit  $v$ :

$$\frac{Q}{F} = q = v = k_f \cdot \frac{dh}{dl} \tag{Gleichung A1-7}$$

- mit:
- $Q$  = Durchfluss  $L^3T^{-1}$
  - $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $LT^{-1}$
  - $dh/dl$  = hydraulischer Gradient 1
  - $F$  = Durchflussquerschnitt  $L^2$
  - $q$  = spezifischer Durchfluss  $LT^{-1}$
  - $v$  = Filtergeschwindigkeit  $LT^{-1}$

Für eine Berechnung der Grundwasserströmung ist die Filtergeschwindigkeit neben dem Gradienten die entscheidende Größe. Bei Fragestellungen des Stofftransportes müssen zusätzliche Überlegungen angestellt werden.

Die Filtergeschwindigkeit stellt keine reale Geschwindigkeit eines Wasserteilchens dar. Sie beschreibt lediglich die querschnittsbezogene Durchflussrate. Dagegen beschreibt die mittlere Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  des Grundwassers den Zeitbedarf für die Fließdauer zwischen zwei an die Erdoberfläche projizierten Punk-

ten entlang der Grundwasserfließrichtung. Sie ergibt sich durch Division der Filtergeschwindigkeit mit der durchflusswirksamen bzw. transportwirksamen effektive Porosität  $n_e$  (Dimension 1), da nur dieser Anteil eines Durchflussquerschnitts für die Wasserbewegung zur Verfügung steht:

$$v_a = \frac{v}{n_e} = \frac{k_f \frac{dh}{dl}}{n_e} \quad \text{LT-1} \quad \text{Gleichung A1-8}$$

Bei der effektiven Porosität handelt es sich um eine nicht leicht bestimmbare Größe. Die effektive Porosität ist zu unterscheiden von der speicherwirksamen Porosität. Hierbei handelt es sich um den durch Schwerkraft entwässerbaren Hohlraumanteil des Grundwasserleiters.

Effektive Porosität und Speicherwirksame Porosität können gleiche Zahlenwerte aufweisen, müssen es aber nicht. Beide Parameter beschreiben unterschiedliche Eigenschaften des Grundwasserleiters und sind formal auseinanderzuhalten.

Typische Werte für die leichter bestimmbare speicherwirksame Porosität eines Lockergesteins können der Abbildung 3 entnommen werden. Die speicherwirksame Porosität kann aus der Gesamtporosität über die Korndichte und die Rohdichte von Gesteinsproben näherungsweise abgeschätzt werden.

Die Speicherwirksame Porosität entspricht nicht der Gesamtporosität, da ein Porenanteil dem auf elektrostatischen Anziehungskräften zwischen Wasser und Feststoffmatrix beruhenden Haftwasseranteil zuzuordnen ist und daher durch die Schwerkraft alleine nicht entwässert werden kann. Die speicherwirksame Porosität kann in ungespannten Grundwasserleitern durch Pumpversuche oder durch Laborversuche an ungestörten Proben bestimmt werden. Die Begriffe nutzbare Porosität, speichernutzbare Porosität und speicherwirksame Porosität werden oft synonym verwendet, wobei die Porosität oft auch als Hohlraumvolumen bzw. Porenvolumen bezeichnet wird. Angaben zur dimensionslosen Porosität im Allgemeinen erfolgen entweder in Prozent oder in Volumenanteilen zwischen 0 und 1.

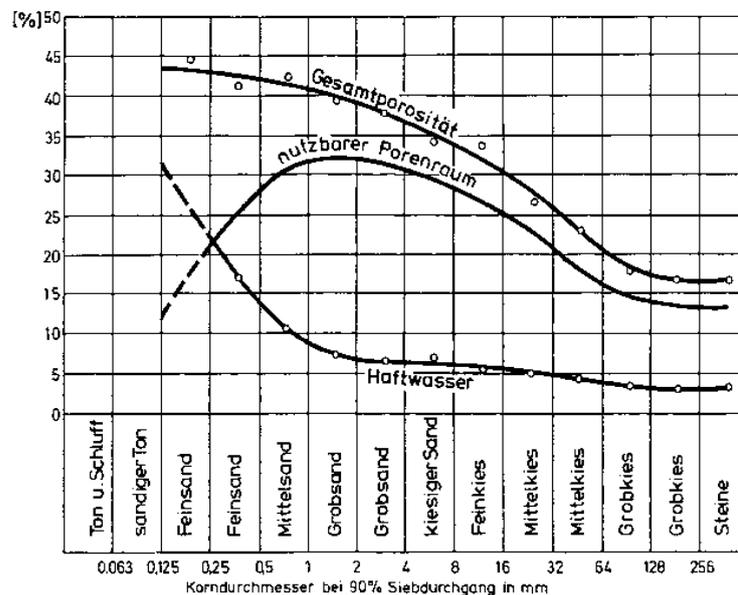


Abbildung 3: Gesamtporenraum und nutzbare Porosität (aus Langguth, H.R. & Voigt, R., 2004)

Die tatsächliche Fließgeschwindigkeit, die sogenannte Bahngeschwindigkeit des Wassers im Porenkanal, weicht in der Realität von der mittleren Abstandsgeschwindigkeit ab, da bei mikroskopischer bis makroskopischer Betrachtung Wasserteilchen unterschiedlich lange Wege zurücklegen.

Die Filtergeschwindigkeit ist eine vektorielle Größe, da sie neben einem Betrag auch eine Richtung im Strömungsfeld aufweist. In der Mathematik ist der Gradient im kartesischen Koordinatensystem  $x, y, z$  gemäß Definition stets aufwärts, d.h. in Richtung des höheren Potenzials, orientiert. Das Grundwasser fließt der

Schwerkraft folgend jedoch immer vom höheren zum niedrigeren Potenzial. Der Gradient erhält damit bei vektorieller Schreibweise des Darcy-Gesetzes ein negatives Vorzeichen.

$$\vec{v} = -kf \cdot \frac{dh}{dl} \quad \text{Gleichung A1-9}$$

mit:  $\vec{v}$  = Vektor der Filtergeschwindigkeit  $LT^{-1}$   
 $kf$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $LT^{-1}$   
 $dh/dl$  = hydraulischer Gradient 1

Die vorstehende Formulierung des Darcy-Gesetzes bezieht sich bezüglich des Gradienten immer noch auf das eindimensionale Experiment aus Abbildung 1. Erweitert auf den dreidimensionalen Raum im kartesischen Koordinatensystem und bezogen auf ein infinitesimales Kontrollvolumen, ergeben sich folgende Schreibweisen des Darcy-Gesetzes, die ebenfalls häufig in der Literatur verwendet werden:

$$\vec{v} = -k_f \cdot \nabla h = -k_f \cdot \text{grad } h \quad \text{Gleichung A1-10}$$

mit:  $\vec{v}$  = Vektor der Filtergeschwindigkeit  $LT^{-1}$   
 $kf$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $LT^{-1}$   
 $h$  = Piezometerhöhe L  
 $\nabla$  =  $\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$   $L^{-1}$   
 $\text{grad}$  = Gradient  $\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$   $L^{-1}$

Im isotropen Fall handelt es sich bei dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  um eine skalare Größe, die im anisotropen Fall durch den Durchlässigkeitstensor  $K$  zu ersetzen ist.

$$\vec{v} = -K \nabla h = - \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \nabla h \quad \text{Gleichung A1-11}$$

**1.3 Kontinuitätsbedingung**

Die Abbildung 4 zeigt die Zu- und Abflüsse an einem Kontrollvolumen  $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  mit den Kantenlängen  $\Delta x, \Delta y$  und  $\Delta z$ . Die Zuflüsse über die Seiten besitzen die Größen  $q_x, q_y$  und  $q_z$ . Die Abflüsse über die gegenüberliegenden Seiten sind jeweils um einen Betrag  $\partial q_x/\partial x \cdot \Delta x, \partial q_y/\partial y \cdot \Delta y$  bzw.  $\partial q_z/\partial z \cdot \Delta z$  abweichend von den Zuflüssen. Über alle Seiten des Kontrollvolumens kann eine Massenbilanz gebildet werden.

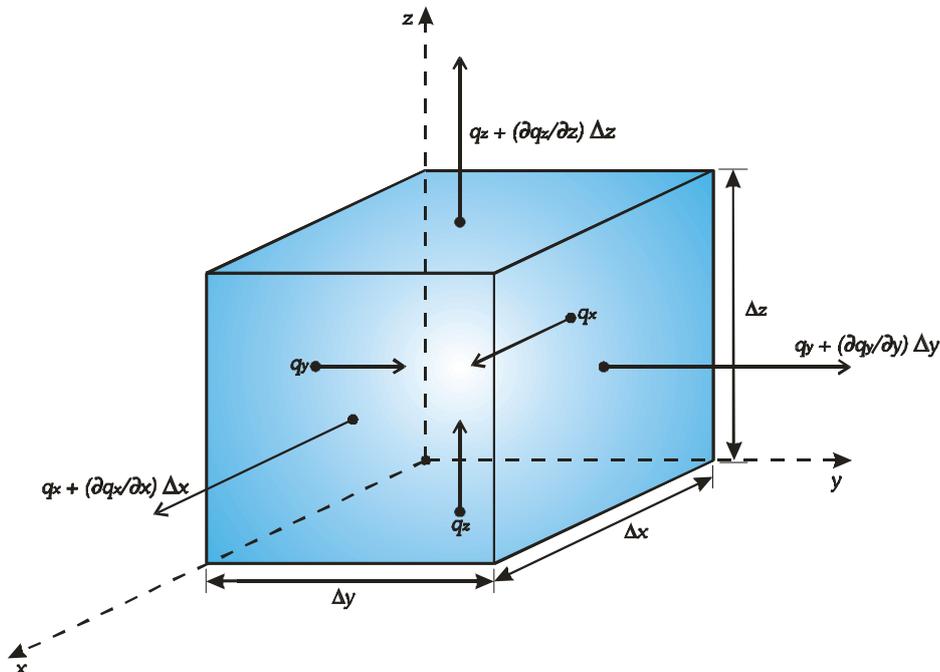


Abbildung 4: Zu- und Abflüsse an einem Kontrollvolumen (nach Wang, H.F. & Anderson, M. P. 1982)

Die Kontinuitätsbedingung besagt, dass bei der Strömung von Wasser konstanter Dichte durch ein Kontrollvolumen die Summe der Zu- und Abflüsse gleich der Summe des im Kontrollvolumen gespeicherten Wasservolumens plus der Zu- und Abflüsse externer Quellen und Senken ist. Vereinfachend sagt die Kontinuitätsbedingung, dass kein Wasser verloren geht: Was hineinfließt, muss auch wieder hinausfließen, oder es wird zwischengespeichert und später wieder abgegeben.

In einem stationären dreidimensionalen quellen- und senkenfreien Strömungsfeld bedeutet die Kontinuitätsbedingung, dass sich in einem infinitesimalen Kontrollvolumen die flächenspezifischen Flüsse  $q$  über die Seiten zu Null addieren. Dies kann durch folgende Differentialgleichung ausgedrückt werden:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

Gleichung A1-12

Besitzt das stationäre Strömungsfeld eine Quelle  $R$  - wie z.B. die Grundwasserneubildung - ergibt sich:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = R$$

Gleichung A1-13

da in diesem Fall der Volumenstrom über die Seiten des Kontrollelements gleich dem Volumenstrom aus der Quelle sein muss.

Für den allgemeinen instationären Fall muss noch ein weiterer Term hinzugefügt werden, der das im Zeitintervall  $\Delta t$  im Kontrollvolumen zusätzlich eingespeicherte bzw. aus dem Speichervorrat freigegebene Wasservolumen berücksichtigt. Der Term enthält daher den spezifischen Speicherkoeffizienten  $S_{sp}$ , den neben dem Durchlässigkeitsbeiwert zweiten wichtigen Kennwert eines Grundwasserleiters.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = R - S_{sp} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Gleichung A1-14

### 1.4 Bewegungsgleichung des Grundwassers

Kombiniert man nun diese Kontinuitätsbedingung mit dem Darcy-Gesetz

$$q = \vec{v} = -K \cdot \frac{dh}{dl}$$

Gleichung A1-15

erhält man schließlich die allgemeine Bewegungsgleichung der gesättigten Strömung des Grundwassers in drei Dimensionen:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = R - S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Gleichung A1-16

bzw. ausmultipliziert:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} K_{xx} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} K_{yy} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} K_{zz} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R$$

Gleichung A1-17

Häufig kann die Vertikalkomponente der Grundwasserströmung vernachlässigt werden. Dies gilt z.B., wenn die Mächtigkeit eines Grundwasserleiters gering ist im Vergleich zu seiner horizontalen Erstreckung und ein Aufbau aus mehreren Schichten nicht vorliegt. Auf diese Weise kann das Strömungsproblem auf zwei Dimensionen reduziert werden. In diesem Fall muss anstelle der z-Komponente noch die wassererfüllte Mächtigkeit  $m$  berücksichtigt werden. Für den Fall isotropen gespannten Grundwassers gilt:

$$T = k_f \cdot m$$

Gleichung A1-18

mit:

T	=	Transmissivität	$L^2 T^{-1}$
kf	=	Durchlässigkeitsbeiwert	$LT^{-1}$
m	=	Mächtigkeit	L

Für die Strömungsgleichung ergibt sich dann im zweidimensionalen isotropen gespannten Fall:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{T} \left( S \frac{\partial h}{\partial t} - R \right) \quad \text{Gleichung A1-19}$$

Im Fall des Grundwasserleiters mit freier Oberfläche ist die Transmissivität keine Konstante mehr, sondern hängt von der Piezometerhöhe ab.

$$m = h - b \quad \text{Gleichung A1-20}$$

mit:

m	=	Mächtigkeit	L
h	=	Piezometerhöhe	L
b	=	Höhenlage Aquiferbasis	L

Für die Strömungsgleichung ergibt sich somit im zweidimensionalen isotropen Grundwasserleiter mit freier Oberfläche:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{(h - b)k_f} \left( n_0 \frac{\partial h}{\partial t} - R \right) \quad \text{Gleichung A1-21}$$

Bei der Bewegungsgleichung der Grundwasserströmung handelt es sich um eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung.

Zu beachten ist, dass im Fall der freien Grundwasseroberfläche der Speicherkoeffizient S durch das nutzbare Porenvolumen n<sub>0</sub> zu ersetzen ist. Während im gespannten Fall der Grundwasserleiter stets wassergesättigt ist, und somit die Speicherung lediglich auf die Elastizität des Korngerüstes und die extrem geringe Kompressibilität des Wassers zurückzuführen ist, ist die Speicherung beim Grundwasserleiter mit freier Oberfläche mit einer Auffüllung bzw. Entleerung des Porenvolumens verbunden.

Gespannte und ungespannte (= freie) Grundwasserleiter unterscheiden sich bezüglich ihres Speicherkoeffizienten daher sehr deutlich. Während bei einem ungespannten Aquifer der Speicherkoeffizient der oben erläuterten speicherwirksamen Porosität entspricht, ist er bei gespannten Aquiferen um Größenordnungen kleiner. Wird die freie Grundwasseroberfläche abgesenkt, so gibt der Boden entsprechend seinem Hohlraumanteil Wasser frei. Wird dagegen bei einem gespannten Grundwasserleiter der Druckspiegel gesenkt, so stammt dabei frei werdendes Wasser lediglich aus einer geringen Elastizität des Korngerüstes und der extrem geringen Kompressibilität des Wassers. In einen gespannten Grundwasserleiter, dessen Hohlraumvolumen ja bereits gefüllt ist, passt nur noch extrem wenig zusätzliches Wasser hinein. Der dimensionslose Speicherkoeffizient kann pro Meter wassererfüllter Mächtigkeit angegeben werden als spezifischer Speicherkoeffizient mit der Dimension 1/L und besitzt eine Größenordnung von etwa 1-10 · 10<sup>-6</sup> m<sup>-1</sup> für wenig elastische Aquifere. Schwach konsolidierte gespannte Aquifere können auch noch deutlich höhere Werte (Wertebereich ca. 5-500 · 10<sup>-6</sup> m<sup>-1</sup>) aufweisen, die aber immer noch um Größenordnungen kleiner sind als das speicherwirksame entwässerbare Porenvolumen bei ungespannten Aquiferen. Daten zum Speicherkoeffizienten liefern Pumpversuche.

### 1.5 Randbedingungen

Zur Lösung von Differentialgleichungen ist stets die Formulierung von Randbedingungen erforderlich. Diese definieren das Verhalten der Strömung an den Rändern des betrachteten Strömungsfeldes. Es werden drei verschiedene Typen von Randbedingungen unterschieden:

Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ)

Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ)

Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ)

Für die Bewegungsgleichung der Grundwasserströmung existieren nur für sehr einfach gelagerte Randbedingungen analytische Lösungen wie z.B. zur Berechnung der Grabenanströmung oder zur Berechnung der Absenkung in der Umgebung eines Brunnens. Allgemeine analytische Lösungen partieller Differentialgleichungen 2. Ordnung sind Gegenstand der mathematischen Forschung. Zur Lösung des Strömungsproblems greift man daher auf numerische Methoden zurück. Näheres dazu folgt im Kapitel 2.0.

## 2. Numerische Lösung der Strömungs- und Transportgleichung

### 2.1 Einführung

In Kapitel 1.0 wurde erläutert, dass die Grundwasserströmung durch eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung beschrieben werden kann. Für diese Differentialgleichung wurden bisher nur für sehr stark vereinfachende Annahmen analytische Lösungen entwickelt. Um beliebige Geometrien von Grundwasserleitern, Vorflutern, Brunnen und auch den Einfluss von Heterogenitäten berechnen zu können, bedient man sich daher besser numerischer Verfahren.

Bei den numerischen Verfahren wird die räumlich kontinuierliche Lösung der partiellen Differentialgleichung der Grundwasserströmung - die Piezometerhöhenverteilung - durch eine nach unterschiedlichen Verfahren bestimmte Lösung an einer endlichen Anzahl von Gitterpunkten angenähert.

Als Lösungsmethoden haben sich das Finite Differenzen Verfahren ("FD") und die Methode der Finiten Elemente ("FE") durchgesetzt. Eine geringere Verbreitung hat die Methode der Finiten Volumen gefunden. Daher wird auf diese Methode nachfolgend nicht weiter eingegangen.

Dem FD- und FE-Verfahren ist gemeinsam, dass das zu betrachtende Gebiet in eine endliche Zahl von Teilflächen diskretisiert, d.h. aufgegliedert wird. Auffälligster Unterschied zwischen den beiden Methoden ist die Art der Diskretisierung. Während beim FD-Verfahren der Modellraum im Grundriss betrachtet in rechteckige, oft quadratische Zellen aufgeteilt wird, kann das FE-Modellnetz aus einem unregelmäßigen Netz von Elementen praktisch beliebiger Form (Dreiecke, Vierecke u.a., auch in gemischter Form) bestehen. Bei dreidimensionaler Betrachtung handelt es sich beim FD-Verfahren um würfel- oder quaderförmige Zellen, bei der FE-Methode um vielfältige Formen wie z.B. Tetraeder, Prismen, Dreiecks- oder Viereckspyramiden und andere.

Das FD-Verfahren liefert als Ergebnis eine mittlere Piezometerhöhe der einzelnen Modellzelle, wohingegen das FE-Verfahren die Piezometerhöhe an den Eckpunkten der Elemente berechnet. Zum Beispiel würde die Piezometerhöhenverteilung einer freien Grundwasseroberfläche nach dem FD-Verfahren eine treppenförmige Gestalt annehmen. Das Ergebnis des FE-Verfahrens kann z.B. bei der Verwendung von Dreieckselementen mit einer aus vielen einzelnen Ebenen (den Elementen) aufgespannten facettierten Oberfläche beschrieben werden.

Beide Verfahren nähern die exakte Lösung der Differentialgleichung auf unterschiedliche Art und Weise an. Bei bekannter Parameterverteilung und vergleichbarer Diskretisierung sind die Ergebnisse beider Methoden gleichwertig (Dvgw, 2004). Die Genauigkeit der Ergebnisse beider numerischer Lösungsverfahren ist letztlich nur eine Frage der Feinheit der Diskretisierung.

Oft wird die Frage in den Raum gestellt, welche Lösungsmethode zu bevorzugen ist. Eine definitive Antwort auf diese Frage gibt es nicht. Beide Lösungsmethoden haben eine weite Verbreitung gefunden und keiner Methode ist es bisher gelungen, die andere zu verdrängen.

Ein Vorteil der FE-Methode ist ihre größere Flexibilität beim Aufbau des Modellgitters. Da die Elemente in Form und Größe variabel sein können, kann das Modellgitter sehr gut an die natürlichen Verhältnisse angepasst werden. Bereiche von besonderem Interesse bzw. Bereiche mit höherer Erkundungsdichte können praktisch beliebig verdichtet werden, während Bereiche mit geringerer Informationsdichte weitständiger diskretisiert werden können. Das FD-Modellgitter ist dagegen normalerweise rechtwinklig aufgebaut und von daher nicht so flexibel wie das FE-Modellgitter. Aufgrund des FD-Prinzips von maximal vier (2D) bzw. sechs Nachbarzellen im 3D-Modell sind Verdichtungen des Modellgitters zwar möglich, diese ziehen sich dann aber durch das ganze Modell hindurch (siehe Abbildung 5). Die Hauptachsen eines möglichen Anisotropietensors sind beim FD-Netz stets parallel den Gitterachsen orientiert. Ändert sich im Feld die Richtung eines solchen Tensors, kann dies im klassischen FD-Netz nicht abgebildet werden. Manche FD-Modelle können die genannten Nachteile durch die Anwendung curvilinearere Gitter in gewissem Maß kompensieren.

Generell kann man sagen, dass eine Hervorhebung der Nachteile des FD-Verfahrens gegenüber dem FE-Verfahren vielfach eher historisch begründet ist und aus einer Zeit stammt, in der mit Speicher- und Rechenzeit noch besonders sparsam umgegangen werden musste. Mit der heutigen Rechnergeneration können relativ problemlos Modelle mit mehreren Hunderttausend bis Millionen Zellen bzw. Knoten verarbeitet werden (siehe Abbildung 6), so dass sehr feine räumliche Diskretisierungen auch mit dem FD-Verfahren realisiert werden können.

Bei Zellabständen von wenigen Zehnermetern bis hinunter in den Meterbereich kann das FD-Verfahren meist allen Erfordernissen der Praxis gerecht werden. Die Entscheidung für die eine oder andere Methode ist eine Frage des Einzelfalls und nicht ausschließlich von fachlichen Erfordernissen geprägt.

Eine ausführliche mathematische Herleitung der FD- und FE-Methode ist nicht Ziel dieser Arbeitshilfe und würde auch deren Rahmen sprengen. Zur Theorie numerischer Modelle gibt es eine Reihe sehr guter Lehrbücher. Insbesondere zur Anwendung numerischer Verfahren im Themenfeld Grundwasser sei auf die Arbeiten von Kinzelbach (1986), Kinzelbach & Rausch (1995), Istok (1989) und Wang & Anderson (1982) hingewiesen. In den folgenden Kapiteln werden nur die Grundzüge der Verfahrensweisen skizziert.

**2.2 Finite Differenzen Verfahren**

Beim FD-Verfahren wird die kontinuierliche Lösung der Differentialgleichung durch die Bildung von Differenzenquotienten angenähert.

Dazu wird das Modellgebiet räumlich in eine endliche Anzahl von rechteckigen Zellen bzw. Blöcken diskretisiert. Man unterscheidet flächenzentrierte und knotenzentrierte Modellgitter. Bei den flächenzentrierten Diskretisierungsverfahren liegen die Berechnungspunkte im Mittelpunkt der durch das Modellgitter bestimmten Zellen oder Blöcke. Beim knotenzentrierten Verfahren liegen die Berechnungspunkte dagegen auf den Kreuzungspunkten des Gitters. Die zugehörigen Zellen ergeben sich dann aus den Mittelsenkrechten der Verbindungslinien zwischen den Knoten. Beide Verfahren sind mathematisch identisch. Weit verbreitete Anwendung haben die flächenzentrierten Gitter gefunden.

Die FD-Methode lässt sich anhand der Wasserbilanz einer 2-D Modellzelle für den gespannten Aquifer erläutern. Gesucht ist die unbekannte Piezometerhöhenverteilung an n Modellzellen am Ende eines bestimmten Zeitintervalls.

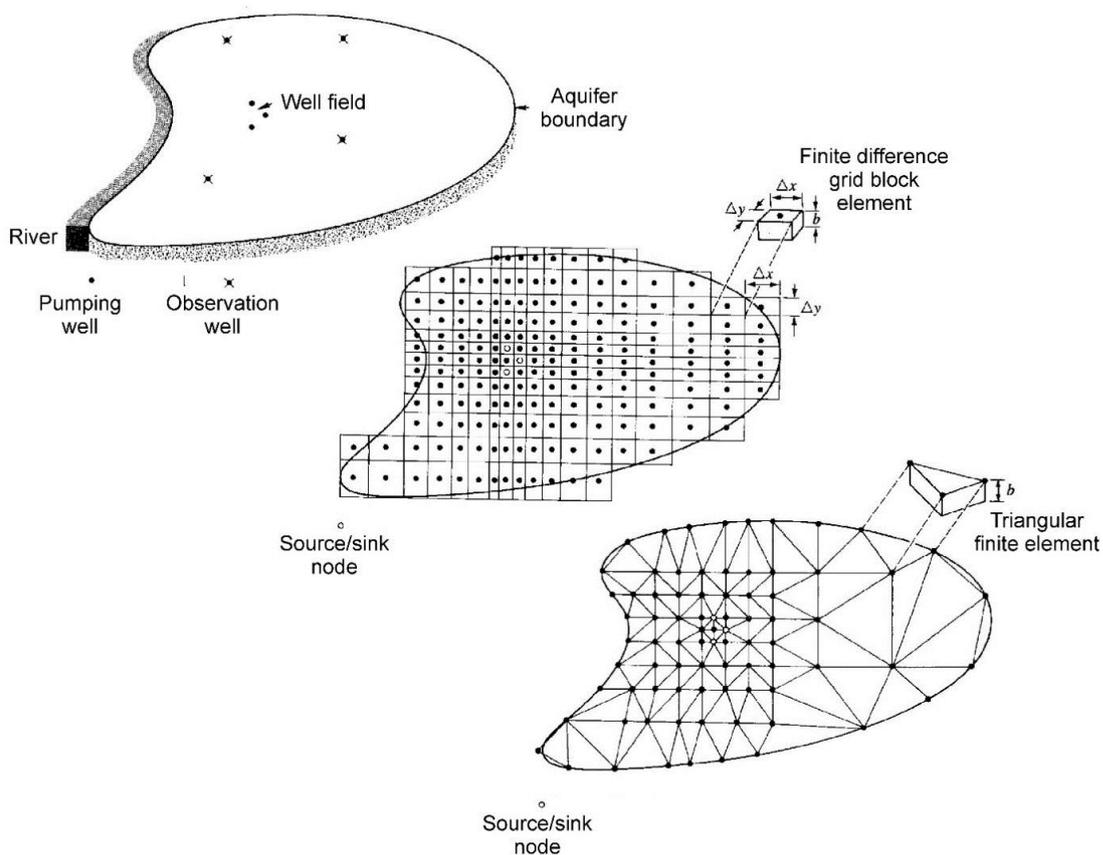
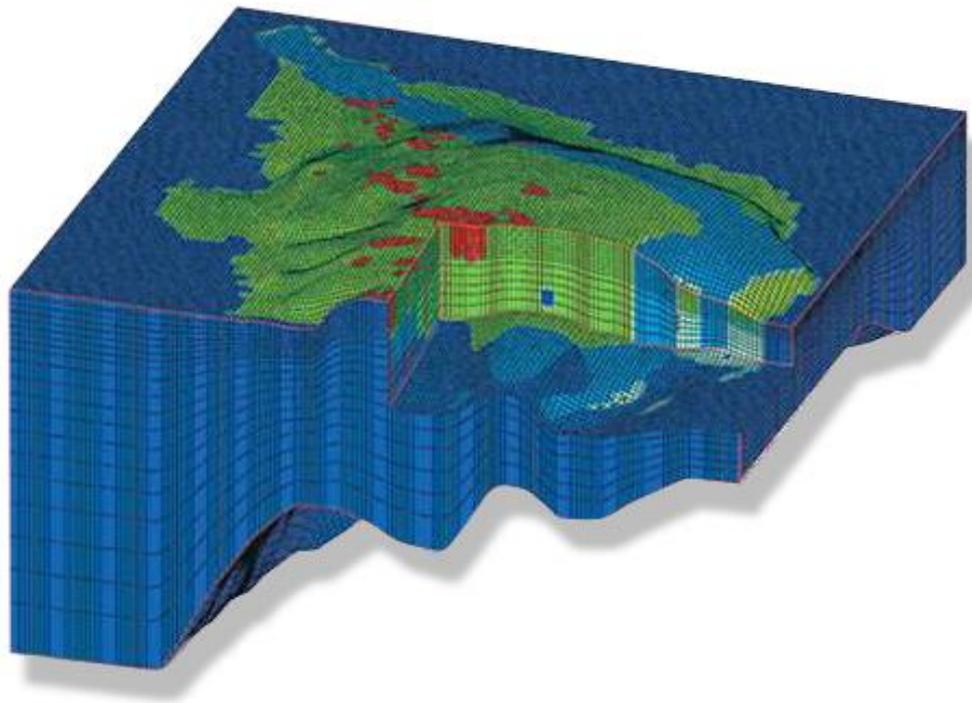
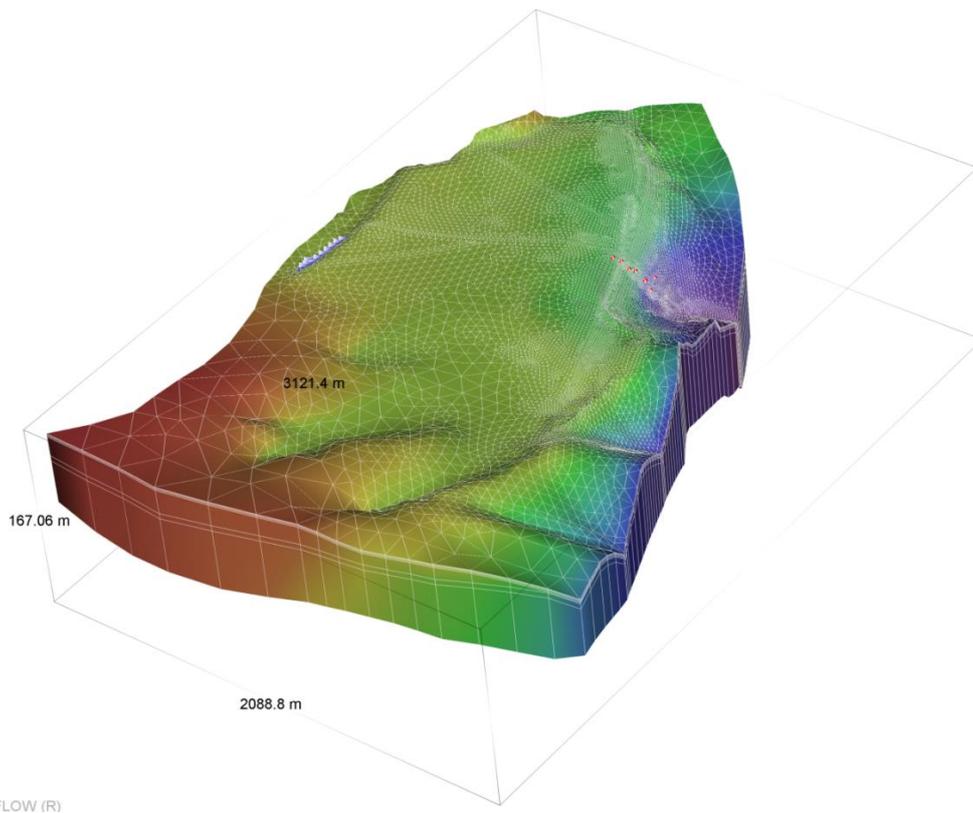


Abbildung 5: Diskretisierungsprinzipien: Modellgebiet (links), Finite Differenzen Gitter (mitte), Finite Elemente Gitter (rechts) (verändert nach Wang, H.F. & Anderson, M. P. 1982)



Quelle: HydroGeoLogic Inc.



Quelle: DHI-WASY GmbH

Abbildung 6: Komplexe 3D Modellgitter: Finite Differenzen (oben), Finite Elemente (unten)

Eine Modellzelle des FD-Verfahrens besitzt im 2D-Fall vier benachbarte Zellen, über die ein Wasseraustausch erfolgen kann. Zusätzlich kann über die Dachfläche ein Quell- bzw. Senkenterm berücksichtigt werden. Aus Gründen der Kontinuität ist in einem Zeitintervall die Summe der Wasserflüsse über die Seiten und Dachfläche einer Modellzelle gleich dem Volumen des Wassers, das in diesem Zeitintervall in der Modellzelle gespeichert oder aus dem Speichervorrat abgegeben wurde. Im stationären Fall ist die Summe der Wasserflüsse gleich Null.

Die Wasserflüsse über die Seiten der Modellzelle können mit Hilfe des Darcy-Gesetzes über den Gradienten und die Transmissivität zwischen benachbarten Zellen zu einem noch festzulegenden Zeitpunkt während des Zeitintervalls angenähert werden. Ersetzt man in der Kontinuitätsgleichung die Wasserflüsse durch die äquivalenten Terme des Darcy-Gesetzes, erhält man nach einigen algebraischen Umformungen die Knotengleichung für die betrachtete Modellzelle, in der als Unbekannte beim impliziten Lösungsschema nur noch die Piezometerhöhen der betrachteten Zelle und seiner vier Nachbarn zum Ende des Zeitintervalls enthalten sind.

In einem FD-Modell können die einzelnen Modellzellen abweichende hydraulische Eigenschaften besitzen. Haben benachbarte Zellen eine unterschiedliche Transmissivität, so muss zwischen diesen Modellzellen eine geeignete mittlere Transmissivität bestimmt werden. Dazu wird in der Regel das entsprechend der Zelldimensionen gewichtete harmonische Mittel der beiden Transmissivitäten verwendet.

Wird die zuvor beschriebene Knotengleichung für  $n$  Modellzellen aufgestellt, erhält man im Fall des gespannten Grundwasserleiters ein lineares Gleichungssystem bestehend aus  $n$  Gleichungen mit  $n$  unbekanntem Piezometerhöhen. Auf der linken Seite der einzelnen Gleichungen stehen die unbekanntem Piezometerhöhen der jeweils fünf beteiligten Modellzellen mit ihren Koeffizienten, die die einzelnen Zellabstände und hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Zellen berücksichtigen. Die rechte Seite der Gleichung besteht aus einem Quell- bzw. Senkenterm sowie dem im Zeitschritt gespeicherten/entleerten Wasservolumen.

Ein solches Gleichungssystem kann mit verschiedenen Verfahren entweder direkt oder iterativ gelöst werden.

Die Übertragung des FD-Verfahrens auf andere Aquifertypen (Mehrschichtaquifere, freie Grundwasseroberfläche u.a.) ist möglich.

Im 3D Fall besitzt jede Modellzelle sechs Nachbarzellen. Die Berechnung des vertikalen Wasseraustauschs erfolgt in diesem Fall analog über die vertikale Durchlässigkeit der einzelnen Modellzellen und den aus der Zellgeometrie abgeleiteten harmonischen Mittelwerten der Transmissivität.

Bei Aquiferen mit freier Grundwasseroberfläche ist die Transmissivität keine konstante Größe, sondern hängt unmittelbar von der Piezometerhöhe ab. Dadurch wird das entstehende Gleichungssystem nichtlinear und kann ausschließlich mit iterativen Verfahren gelöst werden.

### 2.3 Finite Elemente Verfahren

Die mathematische Herleitung der FE-Methode ist gegenüber der des FD-Verfahrens deutlich komplizierter. Das FE-Verfahren kann nach der weit verbreiteten Galerkin Methode (Methode der gewichteten Residuen) kurz umrissen wie folgt erläutert werden.

Das Modellgebiet wird in eine endliche Anzahl unregelmäßig gefomter Elemente diskretisiert. Die Eckpunkte der Elemente bilden die Modellknoten, für die die Piezometerhöhen berechnet werden. Innerhalb der Elemente sind die hydraulischen Eigenschaften konstant. Von Element zu Element können sie dagegen unterschiedlich sein.

Gesucht ist wieder die unbekanntem Piezometerhöhenverteilung an  $n$  Modellknoten am Ende eines bestimmten Zeitintervalls. Im Gegensatz zur FD-Methode ist die Piezometerhöhe nicht nur an den Modellknoten, sondern auch innerhalb der Elemente definiert. Im einfachen Fall ist die unbekanntem Piezometerhöhe an einem beliebigen Punkt z.B. innerhalb eines Dreieckelementes durch eine lineare Interpolation zwischen den Modellknoten definiert. Diese Interpolationsfunktion spielt beim Galerkin Verfahren eine entscheidende Rolle.

Beim Verfahren der gewichteten Residuen nach Galerkin wird für die zu lösende Differentialgleichung zunächst eine Näherungslösung definiert bestehend aus Werten für die Piezometerhöhe an den Modellknoten und einer zugehörigen Ansatz- bzw. Gewichtungsfunktion. Wird diese Näherungslösung in die Differentialgleichung eingesetzt, ist diese nicht mehr exakt erfüllt. Es verbleibt ein Residuum. Das Residuum ist ein Maß für die Ungenauigkeit der Näherungslösung.

Ziel des Galerkin Verfahrens ist es, an  $n$  Modellknoten die Summe der gewichteten Residuen Null werden zu lassen. Dazu werden die Produkte aus Residuen und zugehöriger Gewichtungsfunktion integriert und Null gesetzt. Beim Galerkin Verfahren werden für diese Gewichtung die bereits erwähnten Interpolationsfunktionen herangezogen. Wird in das Integral anstelle des Residuums die Näherungslösung für die Differentialgleichung eingesetzt, so entsteht nach partieller Integration und Einsetzen der Interpolationsfunktion beim gespannten Grundwasserleiter ein System von  $n$  linearen Gleichungen mit  $n$  unbekanntem Piezometerhöhen.

Das Gleichungssystem kann in Matrixform überführt werden. Die Gleichung enthält dann eine Spaltenmatrix der Piezometerhöhen zum Ende des Zeitintervalls. In die quadratische Koeffizientenmatrix der Piezometerhöhen geht neben der Geometrie der einzelnen Elemente auch deren hydraulische Leitfähigkeit ein. Sie wird daher als "globale Durchlässigkeitsmatrix" bezeichnet. Eine weitere Spaltenmatrix enthält die zeitlichen Ableitungen der Piezometerhöhen, und deren ebenfalls quadratische Koeffizientenmatrix berücksichtigt die Speicherung in den einzelnen Elementen. Auf der rechten Seite der Gleichung befinden sich zwei Spaltenmatrizen der Randzuflüsse und sonstiger Quellen bzw. Senken.

Ganz ähnlich wie beim FD-Verfahren sind die Koeffizientenmatrizen des FE-Verfahrens nur sehr dünn besetzt, da nur die Eigenschaften der an einen Modellknoten angrenzenden Elemente ("Patch") zu dessen Piezometerhöhe beitragen. Die Koeffizienten der nicht zum Patch des Modellknotens gehörenden Elemente sind jeweils gleich Null.

Das Gleichungssystem kann mit verschiedenen Verfahren entweder direkt oder iterativ gelöst werden.

Die Anwendung des FE-Verfahrens ist bei allen denkbaren Aquifertypen möglich.

## 2.4 Lösung der Gleichungssysteme und zeitliche Diskretisierung

Der Simulationszeitraum eines instationären Modells wird sowohl beim FD- als auch beim FE-Verfahren in einzelne Phasen zeitlich aufgeteilt, d.h. zeitlich diskretisiert. Innerhalb der einzelnen Phasen bleiben die System bestimmenden Randbedingungen konstant. Von Phase zu Phase können sich die Randbedingungen dagegen ändern. Jede Phase kann in weitere Zeitintervalle unterteilt werden, um eine höhere zeitliche Auflösung zu erhalten. Das erste Zeitintervall einer instationären Simulation bedarf der Definition einer Anfangsbedingung. Jeweils das Ergebnis des vorangegangenen Zeitintervalls bildet die Anfangsbedingung des folgenden Intervalls.

Die Vorgehensweisen zur Berechnung des instationären Flusses sind beim FD- und FE-Verfahren sehr ähnlich und werden daher an dieser Stelle gemeinsam erläutert. In beiden Verfahren werden hinsichtlich des zeitlichen Aspekts Differenzenverfahren eingesetzt.

Bei der Beschreibung des FD- und FE-Verfahrens wurde in beiden Fällen ein Zeitintervall genannt, zu dessen Ende jeweils die unbekanntem Piezometerhöhen an den Modellknoten bzw. den Modellzellen berechnet werden.

Ausgehend von einer stets zu definierenden Anfangsbedingung zu Beginn des Zeitintervalls ist das Ziel, eine neue Piezometerhöhenverteilung am Ende des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  zu berechnen. Hierzu muss festgelegt werden, zu welchem Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls die Piezometerhöhengradienten angenähert werden sollen. Man unterscheidet hierbei explizite und implizite Verfahren.

Beim expliziten Lösungsschema wird dieser Zeitpunkt  $t'$  innerhalb des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  mit den bekannten Piezometerhöhen zum Zeitpunkt  $t$ , d.h. zu Beginn des Zeitintervalls, festgelegt. Man benutzt also die Ergebnisse des vorangegangenen Zeitschritts. Auf diese Weise können die gesuchten unbekanntem Piezometerhöhen "explizit" für jede Zelle bzw. Knoten berechnet werden ohne die neuen Werte der Nachbarknoten berücksichtigen zu müssen. Der Nachteil dieses einfachen Verfahrens liegt in der erforderlichen sehr kleinen Zeitschrittweite, da sonst die Lösung instabil wird. Es müssen beim expliziten Verfahren strenge Stabilitätskriterien eingehalten werden. Bei langen Simulationszeiträumen ergeben sich neben erheblichen Rechenzeiten zudem häufig nicht zu vernachlässigende Rundungsfehler. In der Praxis finden explizite Lösungsverfahren nur selten Anwendung.

Bei impliziten Verfahren wird für den Zeitpunkt  $t'$  ein beliebiger Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  herangezogen. In diesem Fall sind die unbekanntem Piezometerhöhen "implizit" in den zuvor beschriebenen Gleichungssystemen enthalten. Wird der Zeitpunkt zum Ende des Zeitintervalls verwendet, spricht man vom "vollständig impliziten" Schema. Wird das Verfahren mit dem Zeitpunkt zur Hälfte des Zeitintervalls angewandt, entspricht dies dem Crank-Nicholson-Schema.

Die Anwendung impliziter Schemata führt zu Gleichungssystemen, die mit direkten und iterativen Verfahren gelöst werden können.

Direkte Gleichungslöser (z.B. Gauss-Jordan-Verfahren) lösen das Gleichungssystem in einem Schritt. Nachteil der direkten Verfahren ist der sehr große Speicherbedarf. Üblicherweise werden heute iterative Gleichungslöser (Iadi-, Gauss-Seidel-, Pcg-, Multi-Grid-Verfahren u.a.) verwendet, die nach unterschiedlichen Verfahrensweisen arbeiten.

Gemeinsam ist allen iterativen Verfahren, dass sie mit "gerateten" Anfangswerten arbeiten, das Ergebnis wieder einsetzen und sich auf diese Weise dem tatsächlichen Ergebnis annähern. Je besser die geratene Lösung ist, desto schneller wird das Berechnungsergebnis erzielt.

Um zu entscheiden, wann ein Berechnungsergebnis hinreichend "richtig" ist, müssen bei den iterativen Verfahren sogenannte "Konvergenzkriterien" definiert werden. Diese werden während der Berechnung als Abbruchkriterium eingesetzt. Wenn die Änderung des Ergebnisses zwischen zwei Iterationen das Konvergenzkriterium unterschreitet, wird die Iteration abgebrochen und zum nächsten Zeitschritt übergegangen. Je nach Verfahren sind die Kriterien zur Prüfung der Konvergenz unterschiedlich definiert. Es können keine absoluten Regeln zur Festlegung der Größe der Konvergenzkriterien angegeben werden. Sie sind vom Einzelfall abhängig und sollten begründet werden. Zu schwache Konvergenzkriterien führen zu einem verfrühten Abbruch der Iteration und einem falschen Ergebnis. Zu strenge Kriterien verlängern die Rechenzeit unnötig ohne zu einer qualitativen Verbesserung des Ergebnisses zu führen. Im ungünstigen Fall kommt es zur Oszillation der Ergebnisse und es wird keine Konvergenz erreicht.

Die beste Methode zur Optimierung der Konvergenzkriterien ist die Kontrolle des Ergebnisses über die Wasserbilanz des Gesamtmodells: Das Verhältnis zwischen den Summen aller Zu- und Abflüsse sollte möglichst nahe an Eins liegen. Der Unterschied (d.h. der Fehler) sollte in der Regel Bruchteile eines Prozentes der Wasserflüsse nicht überschreiten. Im Zweifel eignet sich ein Vergleich von Ergebnissen mit unterschiedlichen Konvergenzkriterien zu deren Beurteilung. Die Wahl fallbezogener Konvergenzkriterien ist ein wichtiger Schritt zur wirtschaftlichen Optimierung von Simulationen.

## 2.5 Anfangsbedingungen

Für numerische Lösungen der Grundwasserströmung ist grundsätzlich die Definition von Anfangsbedingungen erforderlich. Die Anfangsbedingung beschreibt den Zustand des Systems zu Beginn des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  am Beginn der Simulation. Als Anfangsbedingungen können für instationäre Simulationen gemessene Piezometerhöhenverteilungen herangezogen werden.

Können diese z.B. aufgrund des vorhandenen Messstellennetzes nur mit geringer Güte entwickelt werden, bedarf das Modell bei instationären Simulationen einer Anpassungsphase an die Randbedingungen des Systems. Es muss daher beachtet werden, dass in der Anfangsphase instationäre Modelle nur in Ausnahmefällen Messergebnisse gut nachvollziehen können.

Für stationäre Berechnungen sind Anfangsbedingungen vom Grundsatz her eigentlich nicht erforderlich, da die Lösung mit dem Erreichen der Stationarität ausschließlich von den Randbedingungen gesteuert und damit unabhängig von den Anfangsbedingungen wird. Stationäre Simulationen können nur über iterative Verfahren erfolgen. Iterative Verfahren benötigen jedoch einen geratenen Startwert. Insofern kann die Anfangsbedingung bei stationären Simulationen eine willkürlich festgelegte sein. Je näher sie der stationären Lösung entspricht, desto kürzer ist jedoch die Rechenzeit bis zur Konvergenz.

## 2.6 Randbedingungen der Grundwasserströmung

Für die Lösung partieller Differentialgleichungen 2. Ordnung mit numerischen Verfahren ist neben den Anfangsbedingungen auch die Definition von Randbedingungen erforderlich, mit denen das Strömungsverhalten an den Rändern aber ggf. auch innerhalb des Modells vorgegeben wird. Die Randbedingungen sind die prägenden Bestandteile eines Modells und müssen sorgfältig erarbeitet werden.

Es sind als mögliche Randbedingungen zu nennen:

- Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ): Festpotenzial, d.h. vorgegebene Piezometerhöhe.
- Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ): konstanter Gradient senkrecht zum Rand, entspricht konstantem Randzufluss.
- Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ): Linearkombination aus 1. und 2. Art, Leakage-Randbedingung, Festpotenzial mit hydraulischem Widerstand.

Randbedingungen werden in numerischen Modellen nach der FE- bzw. FD-Methode prinzipiell ähnlich behandelt. Bei Festpotenzialen ist die Knoten- oder Zellgleichung unabhängig vom Geschehen an den Nachbarknoten explizit ohne weitere Berechnung gelöst. Randzuflüsse sind in den Gleichungssystemen der FE- bzw. FD-Methode jeweils auf der rechten Seite der Gleichungen enthalten. Erhält die betreffende Modellzelle bzw. das betreffende Element des Patches keinen Randzufluss, ist der entsprechende Term der Gleichung gleich Null. Flüsse über Leakgeknoten werden analog den Randzuflüssen behandelt.

Die mathematische Behandlung der Festpotenziale zeigt die Gefahr bei deren Anwendung. Die Festpotenzialhöhe bleibt bei der Simulation konstant unabhängig von den Bedingungen an den Nachbarknoten. Wird in einem Nachbarknoten stark abgesenkt, z.B. durch eine Grundwasserentnahme, ändert sich die Piezometerhöhe am Festpotenzialknoten nicht. Auf diese Weise kann im Modell beliebig viel Wasser erzeugt werden. Festpotenziale als Randdefinition sollten daher in der Regel tatsächlich auch nur da angewendet werden, wo der Untergrund entsprechend "unendlich" viel Wasser zu Verfügung stellen kann. In allen anderen Fällen ist bei der Anwendung von Festpotenzialen große Vorsicht geboten.

Unterschiede zwischen der FE- bzw. FD-Methode bestehen bezüglich der Behandlung von Quellen und Senken. Während bei der FD-Methode alle Arten von Quellen und Senken (Grundwasserneubildung, Randzuflüsse, Brunnen etc.) gleich behandelt werden, kann bei der FE-Methode zwischen flächenhaften (z.B. Grundwasserneubildung), linienhaften (z.B. Fließgewässer) und punktförmigen Quellen und Senken (z.B. Brunnen) unterschieden werden.

Bei vergleichsweise grober Diskretisierung ist die FE-Methode diesbezüglich der FD-Methode im Vorteil. Bei feiner Diskretisierung wird dieser Vorteil wieder überdeckt von den in der Regel mangelnden Kenntnissen der geometrischen und hydraulischen Eigenschaften im Detail, so dass beide Verfahren dann wieder gleichwertig sind.

## Berechnungsgang flächendifferenzierte und zeitabhängige Sickerwasserrate

### 1 Einleitung

Die Grundwasserneubildung hat einen entscheidenden Einfluss auf die hydraulischen sowie auf die hydrochemischen Verhältnisse in einem Aquifer. Insbesondere wird der Stoffeintrag aus der ungesättigten Bodenzone ins Grundwasser durch die Grundwasserneubildungs- bzw. durch die Sickerwasserspende beeinflusst.

### 2 Grundwasserneubildung

Der Begriff der Grundwasserneubildung wird durch den Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasserleiter definiert (DIN 4049 Teil 5), wobei die Infiltration durch Niederschlag, Beregnung, Überstau, oberirdische Gewässer oder durch Zusickerung aus anderen Grundwasserleitern erfolgt. Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag kann messtechnisch durch Abflussmessungen oder Lysimeter erfasst werden. Die zugehörigen Messdaten sind relativ aufwendig in der Erfassung und daher nicht immer verfügbar, außerdem beziehen sich die Ergebnisse auf kleine, homogene Beobachtungsräume. Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wird daher für große Gebiete vorwiegend durch empirisch entwickelte Berechnungsverfahren mit geringerem Aufwand geschätzt. Die Zusickerung oder die Aussickerung aus bzw. in andere Grundwasserleiter kann durch Pumpversuche und Grundwasserdifferenzpläne, die Veränderungen von Influenz und Effluenz entlang von Oberflächengewässern durch Abflussmessungen bestimmt werden. Bei ausreichendem Kenntnisstand über die hydrogeologische Situation im Einzugsgebiet kann auch eine indirekte Ermittlung durch ein hydraulisches Grundwassermodell oder durch eine Grundwasserbilanz erfolgen.

### 3 Grundwasserneubildung / Sickerwasserspende aus Niederschlag

Größtenteils wird bei der Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag die Sickerwassermenge ermittelt, d. h. der Niederschlagsanteil, der durch den Bereich der effektiven Wurzeleinheit in die Sickerzone eindringt und schließlich in das Grundwasser gelangt. Grundwasserneubildung und Sickerwasserspende unterscheiden sich hinsichtlich ihres zeitlichen Verlaufs. Das in den Sickerraum infiltrierte Wasser kann in Abhängigkeit des Flurabstands und der hydraulischen Kennwerte erst nach einer zeitlichen Verzögerung als Grundwasserneubildung wirksam werden. Für kurze Betrachtungszeiträume können daher gewichtige Abweichungen auftreten, die mit zunehmend länger werdenden Berechnungsperioden gegen Null gehen. Hinsichtlich der zeitlichen Auflösung ist zu bemerken, dass mit Berechnungsverfahren wie der klimatischen Bodenwasserbilanz grundsätzlich zwar in Tagesschritten gerechnet wird, die Methode jedoch nur für Monats-, Jahreswerte oder langjährige Mittel ausreichend genaue Werte liefert.

Neben Einschicht-Speichermodellen kann die Sickerwasserspende auch anhand komplexer physikalisch-deterministischer Modelle ermittelt werden, in denen der Boden als Potentialfeld der ungesättigten Strömung aufgefasst wird und die Sickerwasserspenden für einzelne Bodenabschnitte berechnet werden. Aufgrund der übersichtlicheren Handhabung wird die klimatische Wasserbilanz nach dem Prinzip eines Speichermodells ermittelt. Für die Bilanzgrößen Niederschlag, Evapotranspiration, Wasservorrat und -verbrauch sowie Sickerwasserabfluss wird üblicherweise die Einheit mm bezogen auf eine bestimmte Zeit verwendet. Tatsächlich handelt es sich um ein Volumen pro Flächeneinheit und Zeit.

### 4 Klimatische Bodenwasserbilanz

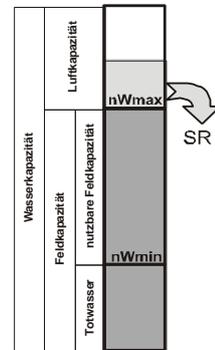
In die Modellrechnung geht als aktuelle Verdunstung die proportional zum Füllungsgrad des Bodenspeichers reduzierte potentielle Evapotranspiration ein. Die Differenz zwischen Niederschlag und aktueller Evapotranspiration lässt den Feuchtezustand des Bodenspeichers zu- oder abnehmen. Abnehmen kann der Bodenspeicher nur bis zu seiner Untergrenze, dem permanenten Welkepunkt. In diesem Falle ist die aktuelle Evapotranspiration, falls kein Niederschlag fällt, gleich Null. Die Obergrenze für den maximalen Bodenwassergehalt ist mit der Feldkapazität des Bodens erreicht. Der Überschuss an Bodenwasser wird als Perkulationswasser bezeichnet, das den Wurzelraum verlässt und in voller Höhe dem Grundwasser zusickert.

$$B_t = WG_{t-1} + N - I - ET_a$$

Bodenwasserbilanz<sup>1</sup>

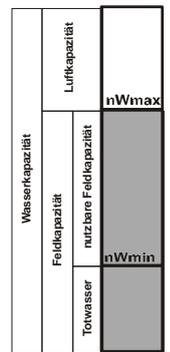
wenn  $B_t > nW_{max}$   
dann  $SR_t > 0$   
und  $WG_t = nW_{max}$

Sickerwasserspende →



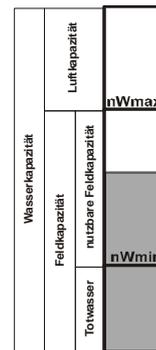
wenn  $B_t = nW_{max}$   
dann  $SR_t = 0$   
und  $WG_t = nW_{max}$

keine Sickerwasserspende →



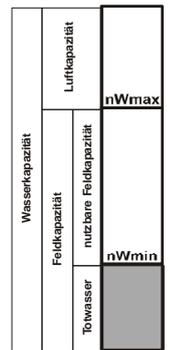
wenn  $B_t < nW_{max}$  und  $B_t > nW_{min}$   
dann  $SR_{te} = 0$   
und  $WG_t = B_t$

keine Sickerwasserspende →



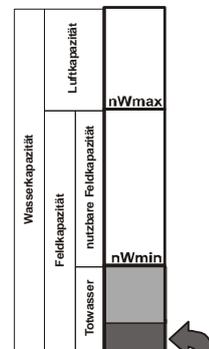
wenn  $B_t = nW_{min}$   
dann  $SR_t = 0$   
und  $WG_t = nW_{min}$

keine Sickerwasserspende →



wenn  $B_t < nW_{min}$   
dann  $SR_t < 0 = KR$   
und  $WG_t = nW_{min}$

kapillarer Aufstieg (KR) →



<sup>1</sup> Abkürzungsverzeichnis

B	Bodenwasserbilanz
N	Niederschlag
I	Interzeption
ET <sub>pHAUDE</sub>	potentielle Referenz-Evapotranspiration
ET <sub>p</sub>	potentielle Evapotranspiration
ET <sub>a</sub>	aktuelle Evapotranspiration

SR	Sickerwasser
KR	kapillarer Aufstieg
WG <sub>t</sub>	Bodenwassergehalt des Tages
WG <sub>t-1</sub>	Bodenwassergehalt des Vortages

KR

### 4.1 Potentielle Verdunstung über Gras nach HAUDE

Die potentielle Evapotranspiration ist die maximale mögliche Verdunstung bei gegebenen klimatischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Bodenwasser. Die Berechnung der möglichen Verdunstung ist eine Funktion aus zeitlich variablen Daten wie Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte und Nutzung. Die potentielle Verdunstung über Gras nach HAUDE wird als potentielle Referenz-Evapotranspiration festgelegt, die mit entsprechenden Faktoren für andere Nutzungen umgerechnet werden kann.

Als Eingangsdaten werden die um 14.00 Uhr gemessenen Tageswerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte genutzt. Mit Hilfe dieser Daten kann nach dem empirischen Haude-Verfahren näherungsweise die potentielle Evapotranspiration  $ETp_{Haude}$  berechnet werden (Formel 1), wobei der monatliche Haude-Faktor (Tabelle 1) dem Faktor für niedrige Grasvegetation entspricht. Der Monatswert der potentiellen Evapotranspiration ergibt sich aus der Summe der Tageswerte eines Monats.

$$ETp_{Haude} = f_{Haude} \cdot (e_s(T_{14.00\text{ Uhr}}) - e) \quad \text{Formel 1}$$

mit:  $f_{Haude}$  Haude-Faktor für den jeweiligen Monat in hPa/mm  
 $e$  relative Luftfeuchte um 14.00 Uhr  
 $e_s(T_{14.00\text{ Uhr}})$  Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T des befeuchteten Thermometers in hPa

Tabelle 1: Monatliche Haude-Faktoren  $f_{Haude}$

Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0,22	0,22	0,22	0,29	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22

### 4.2 Abhängigkeit der potentiellen Evapotranspiration von der Nutzung

Als Referenz-Evapotranspiration wird die potentielle Evapotranspiration über Gras eingesetzt, die mittels entsprechender Faktoren in die spezifische Evapotranspiration für andere Nutzungsarten bzw. Nutzungstypen umgerechnet wird.

Tabelle 2: Beispiele für monatsbezogene Koeffizienten für die Umrechnung der Referenz-Evapotranspiration über Grünland in Werte für andere Pflanzen bzw. Kulturen (nach DVWK, 1996 [1]; nach DOMMERMUTH & TRAMPF, 1991 [2])

Kultur\Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Quelle
Grünland	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Mähweide	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.10	1.10	1.05	1.05	1.00	1.00	1.00	[1]
Winterweizen	0.65	0.65	0.80	0.85	1.15	1.45	1.40	1.00	0.80	0.70	0.65	0.65	[1]
Winterroggen	0.65	0.65	0.85	0.90	1.20	1.30	1.25	0.95	0.80	0.70	0.65	0.65	[1]
Laubwald	0.05	0.01	0.19	0.34	0.79	1.01	1.22	1.05	0.73	0.46	0.05	0.00	[2]
Nadelwald	0.40	0.20	0.67	1.20	1.33	1.23	1.18	1.01	0.86	0.60	0.35	0.25	[2]

Die Nutzungsart wird durch eine Pflanze (z. B. Weizen) oder einen Vegetationstyp (z. B. Grünland) festgelegt. Im einfachsten Fall entspricht ein Nutzungstyp genau einer Nutzungsart (z. B. Grünland). Andere Nutzungstypen werden dagegen aus mehreren Nutzungsarten zusammengefügt (z. B. Mischwald aus 50 % Laubwald und 50 % Nadelwald).

Faktoren zur Umrechnung der Referenz-Evapotranspiration über Grünland in die Evapotranspiration über Laubwald und Nadelwald sowie verschiedene landwirtschaftliche Kulturen (diverse Winter- und Sommergetreide, Futterpflanzen und Hackfrüchte) sind in DVWK (1996), DIN 19685 (1997) und DOMMERMUTH & TRAMPF (1991) dokumentiert. In der Tabelle 2 sind einige Umrechnungsfaktoren für die Referenz-Evapotranspiration über Grünland zusammengestellt, wobei zur Vereinfachung ein großer Teil der

Ackerkulturen zu den zwei Nutzungstypen Winter- und Sommerkulturen zusammengefasst wurde. Die Werte für Winterkulturen werden durch Mittelung aus Winterweizen, -gerste, -raps sowie -roggen und für Sommerkulturen aus Sommergerste, Mais, Hafer, Zuckerrübe sowie Kartoffel gebildet.

### 4.3 Interzeption

Von den Blättern, Nadeln, Stielen und Zweigen der Pflanzen wird ein Teil des Niederschlages aufgefangen und direkt durch Interzeption wieder in die Atmosphäre abgegeben. Bei den Angaben (Tabelle 3) zur Interzeption von Laub- und Nadelwald handelt es sich um Orientierungswerte nach SCHROEDER (1989), die sich als prozentualer Anteil auf den gemessenen Freilandniederschlag beziehen. Für Grünland und Ackerkulturen ist die Interzeption bereits bei den pflanzenspezifischen Haude-Faktoren berücksichtigt.

Tabelle 3: Orientierungswerte der Interzeption (% N) für Waldbestände (SCHROEDER, 1989 aus DVWK, 1996)

Waldbestand	Sommer (% N)	Winter (% N)
Eichen und Buchen	17	11
Weymouthskiefern	34	37

### 4.4 Abschätzung der realen Evapotranspiration

#### 4.4.1 Vorbemerkung

Im Gegensatz zu der potentiellen Evapotranspiration ist die reelle Verdunstung zusätzlich vom aktuellen Bodenwassergehalt abhängig. Die wichtigsten Kenngrößen des Wassergehaltes der unterschiedlichen Bodenarten bzw. Bodenartengruppen sind Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und der effektive Wurzelraum.

Bodenarten sind durch die mineralische Korngrößenzusammensetzung gekennzeichnet, wobei diese je nach vorherrschender Kornfraktion zu Bodenartengruppen zusammengefasst werden können. Hinzu kommen die Bodenartengruppen Lehme und Torfe.

Eine umfassende Zusammenstellung der spezifischen Kennwerte ist für verschiedene Bodenarten in der Bodenkundlichen Kartieranleitung der AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (1994) aufgeführt.

#### 4.4.2 Aktuelle Evapotranspiration

Die aktuelle bzw. reelle Evapotranspiration hängt vom verfügbaren Wasservorrat im Boden ab. Beim Austrocknen des Bodens ist es notwendig die aktuelle Bodenfeuchte als Maß für eine Reduktion der potentiellen Evapotranspiration in die Berechnung mit einzubeziehen, damit der tatsächliche Wert der Verdunstung ermittelt werden kann. Denn mit sinkenden Wassergehalten nimmt die Intensität des Verdunstungsprozesses ab, bis sie beim Erreichen des permanenten Welkepunktes gegen Null geht. Die Reduktion der Evapotranspiration in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens erfolgt nach dem Ansatz von RENGER et al. (1974).

Nachdem der Wassergehalt des Bodens um den Anteil des Totwassers verringert worden ist, liegt der Schwellenwassergehalt, ab dem die potentielle Evapotranspiration reduziert wird, bei 70 % des maximal nutzbaren Wasservorrats (DIN 19687, 1998). Zwischen einem Schwellenwassergehalt von 70 % und 0 % wird die Evapotranspiration potentiell reduziert (Formel 2).

$$\begin{aligned} \text{wenn } WG - TOT \leq 0,7 \text{ nFK,} & \quad \text{dann } ET_a = ET_p \cdot (0,2 + 2 \cdot nW_a - 1,2 \cdot nW_a^2) & \quad \text{Formel 2} \\ \text{wenn } WG - TOT > 0,7 \text{ nFK,} & \quad \text{dann } ET_a = ET_p \end{aligned}$$

### 4.5 Aktuelle Evapotranspiration von nicht bewachsenen Böden

Neben Nutzungsarten, die sich mit der Zeit kaum verändern, z. B. Grünland, Wald und Bebauung, variiert insbesondere im Ackerbau mit der Fruchtfolge die Bodenbedeckung. Durch diesen Wechsel ergeben sich im Jahr Zwischenzeiten, in denen die Flächen völlig unbewachsen sind. Zum Zeitpunkt der Brache ist die Transpiration eingeschränkt oder gleich null, so dass für die Wintermonate überschlägig 65 % der potentiellen Verdunstung über Gras angesetzt worden ist (Tabelle 2). Da diese Abschätzung zu ungenau ist, sollte die Reduzierung der potentiellen Verdunstung sich neben der Bedeckungssituation auch nach dem Wasserdargebot des Bodens richten. Nach BEESE et al. (1977) wird die reelle Verdunstung für Brachflächen entsprechend der Formel 3 berechnet).

$$ETa = (-0,577 \cdot \log \psi + 1,78) \cdot ETp_{\text{Haude}} \tag{Formel 3}$$

mit:  $\psi$  als Wasserspannung im Boden der Schicht von 5 bis 10 cm Tiefe in hPa

$$\text{geschätztes Matrixpotential } \psi = -2230 \cdot (WG + (N / nFK)) + 2299$$

mit: wenn  $(WG + (N / nFK)) > 100$  dann  $(WG + (N / nFK)) = 100$

#### 4.6 Direktabfluss

Der Direktabfluss ist die Summe aus Oberflächenabfluss und Interflow (in der durchwurzelten Bodenzone und etwas darunter, aber über der gesättigten Zone). Der Direktabfluss hängt vom Relief, der Bodenart, der Flächennutzung, dem aktuellen Wassergehalt des Bodens sowie von Niederschlagshöhe und -intensität ab.

Der Direktabfluss über die Reliefenergie wird nach dem Verfahren von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) ermittelt.

Bei dem Verfahren von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) werden Teilflächen je nach der Reliefenergie in unterschiedliche A/Au-Stufen gegliedert, wobei eine lineare Abhängigkeit zwischen Relief bzw. A/Au-Stufen und Sickerwasserspende festgelegt worden ist. Der Ansatz ist generell für Deutschland und für Reliefenergien bis 160 m·km<sup>2</sup> gültig. In der klimatischen Wasserbilanz wird, wie bei der Versiegelung, die Sickerwasserspende zunächst unabhängig von der Reliefenergie berechnet und im Anschluss um den Anteil des Direktabflusses (Tabelle 5) reduziert.

Tabelle 5: Anteil des Direktabflusses am langjährigen Mittel des Sickerwasserabflusses in Abhängigkeit von der Reliefenergie (DÖRHÖFER & JOSOPAIT, 1980)

Reliefenergie [m/km <sup>2</sup> ]	A/Au-Stufe	Anteil des Direktabflusses (% SR)*
<5	1	0
5 - 10	2	25
11 - 50	3	40
51 - 100	4	50
101 - 160	5	55

\* aus Abb. 12 (DÖRHÖFER & JOSOPAIT, 1980) ermittelt

#### 4.7 Versiegelung

In urbanen Gebieten befinden sich hauptsächlich versiegelte oder teilversiegelte Flächen, wobei der Grad der Versiegelung gemäß den verschiedenen Bebauungstypen festzulegen ist. Entsprechend abgrenzender Teilflächen können auf der Basis exemplarischer Untersuchungen (SCHOSS 1977) Versiegelungsfaktoren zugeordnet werden. Die Bebauungstypen werden mittels Flächennutzungsplänen oder topographischer Karten abgeleitet.

In der Wasserbilanz wird in Anlehnung an das Verfahren nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) die Sickerwasser- bzw. die Grundwasserneubildungsspende zunächst unabhängig von der Bebauung berechnet und anschließend wird der dem Prozentsatz der versiegelten Fläche zugehörige Anteil abgezogen.

Tabelle 4: Effektive Versiegelung für verschiedene Bebauungsarten

<b>Bebauungsart \ Autor</b>	<b>SCHOSS (1977)</b>	<b>DÖRHÖFER &amp; JOSOPAIT (1980)</b>
dichte Blockbebauung, Stadtkern	81 - 98	>90
offene Blockbebauung, städtische Wohngebiete	41 - 79	-
dichte Bebauung	-	80
offene Bebauung, Stadtrand	20 - 50	-
normale Bebauung	-	50
gelockertes Wohngebiet	-	20

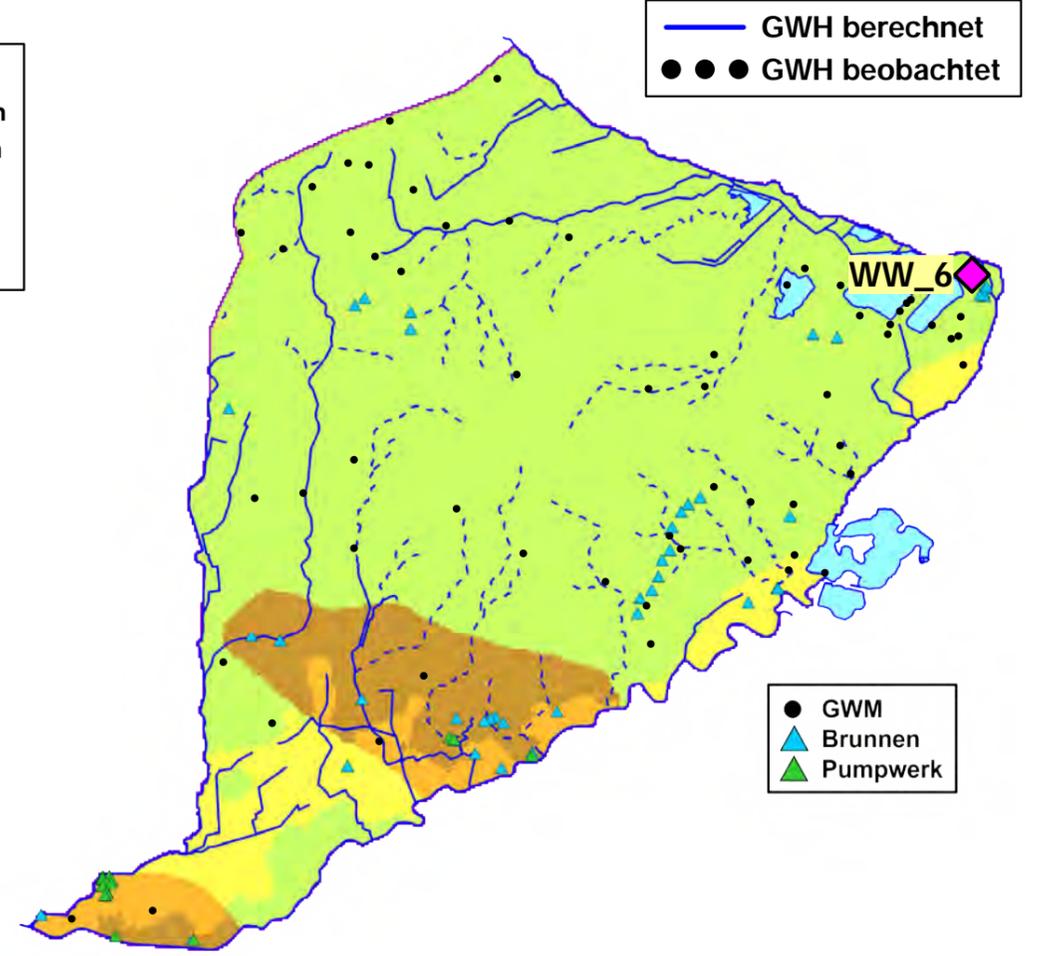
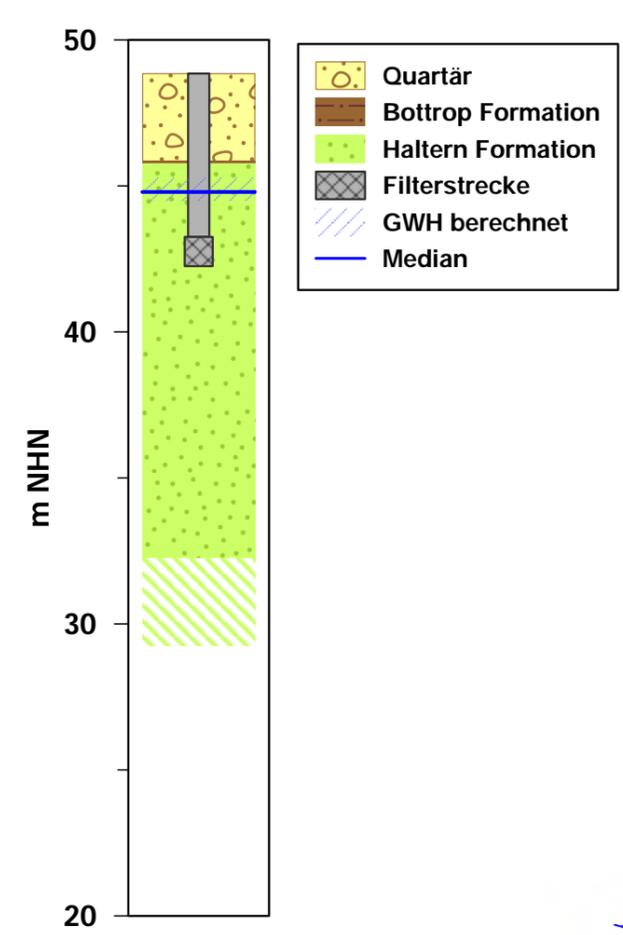
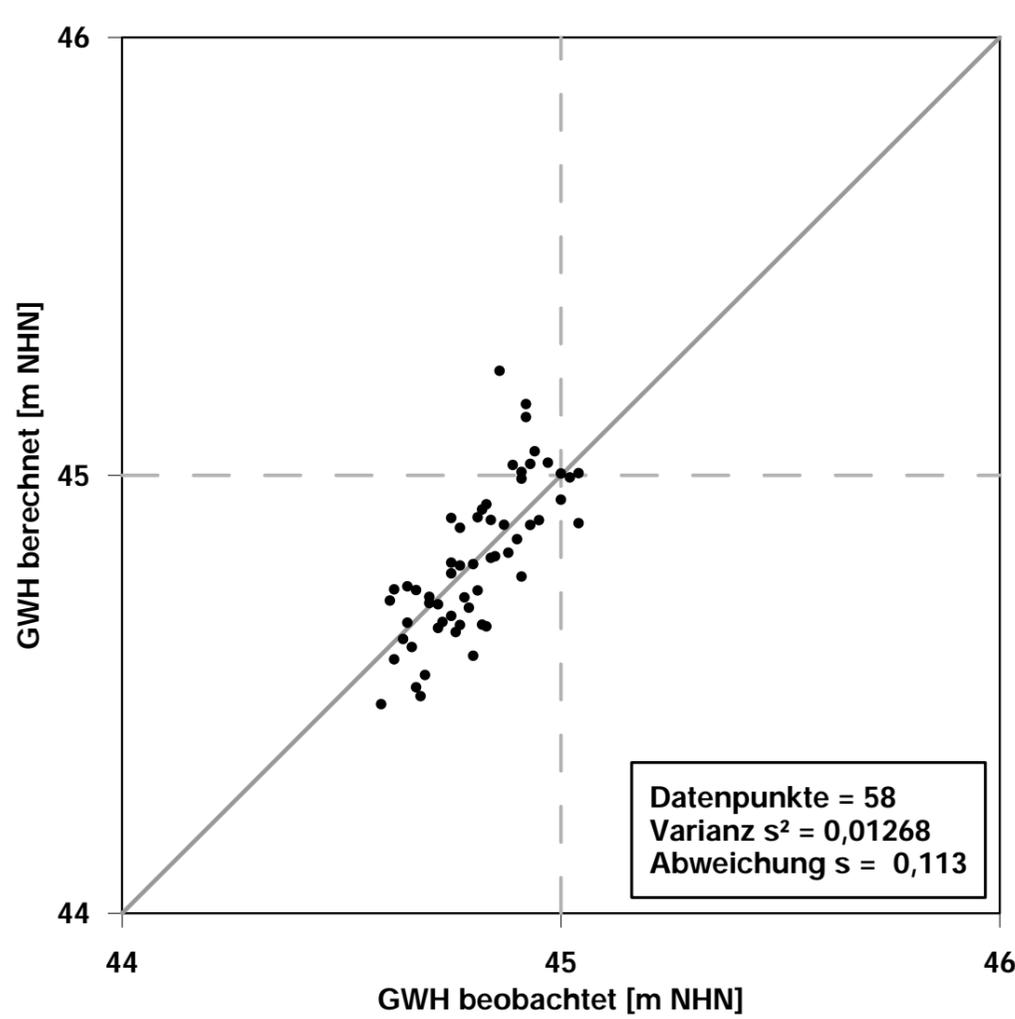
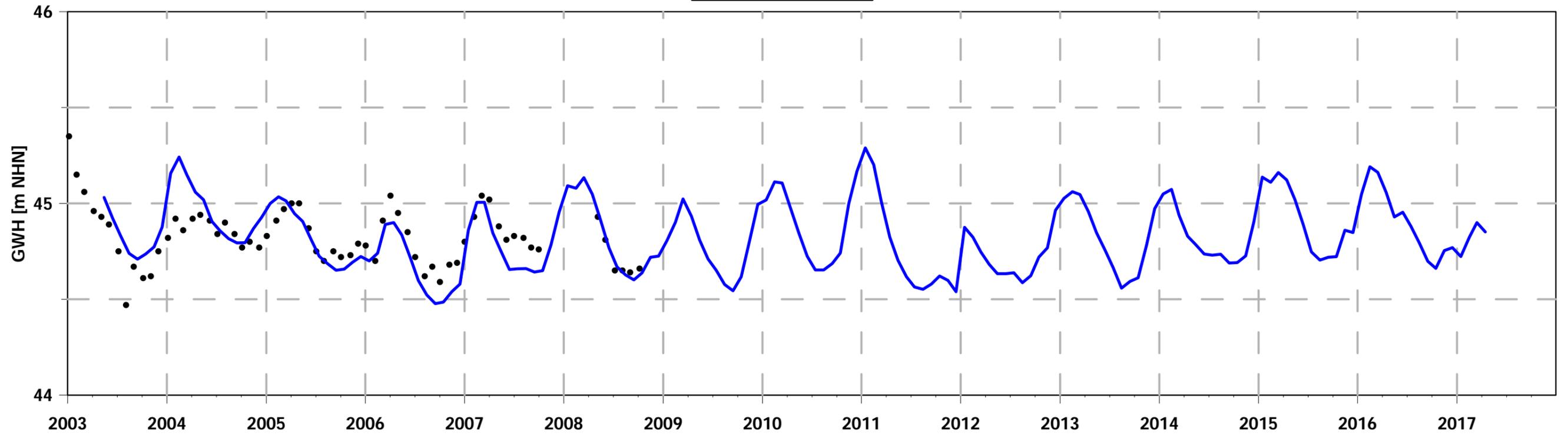
#### **4.8 Kapillarer Aufstieg**

Beim kapillaren Aufstieg handelt es sich um Wasser, das aus dem Grundwasser oder aus Stauwasserkörpern aufwärts in die durchwuzelte Bodenzone strömt. Durch kapillaren Aufstieg werden mögliche Defizite zwischen Niederschlag und Evapotranspiration ganz oder teilweise ausgeglichen. Durch kapillaren Aufstieg kann dem Grundwasservorrat Wasser entzogen werden, d. h. es kann eine negative Grundwasserneubildung in der Summe vorliegen. Die kapillare Aufstiegsrate wird durch den schwankenden Abstand des Grundwasserspiegels bzw. Stauwasserkörpers zur Untergrenze des effektiven Wurzelraumes und durch die Bodenart bestimmt.

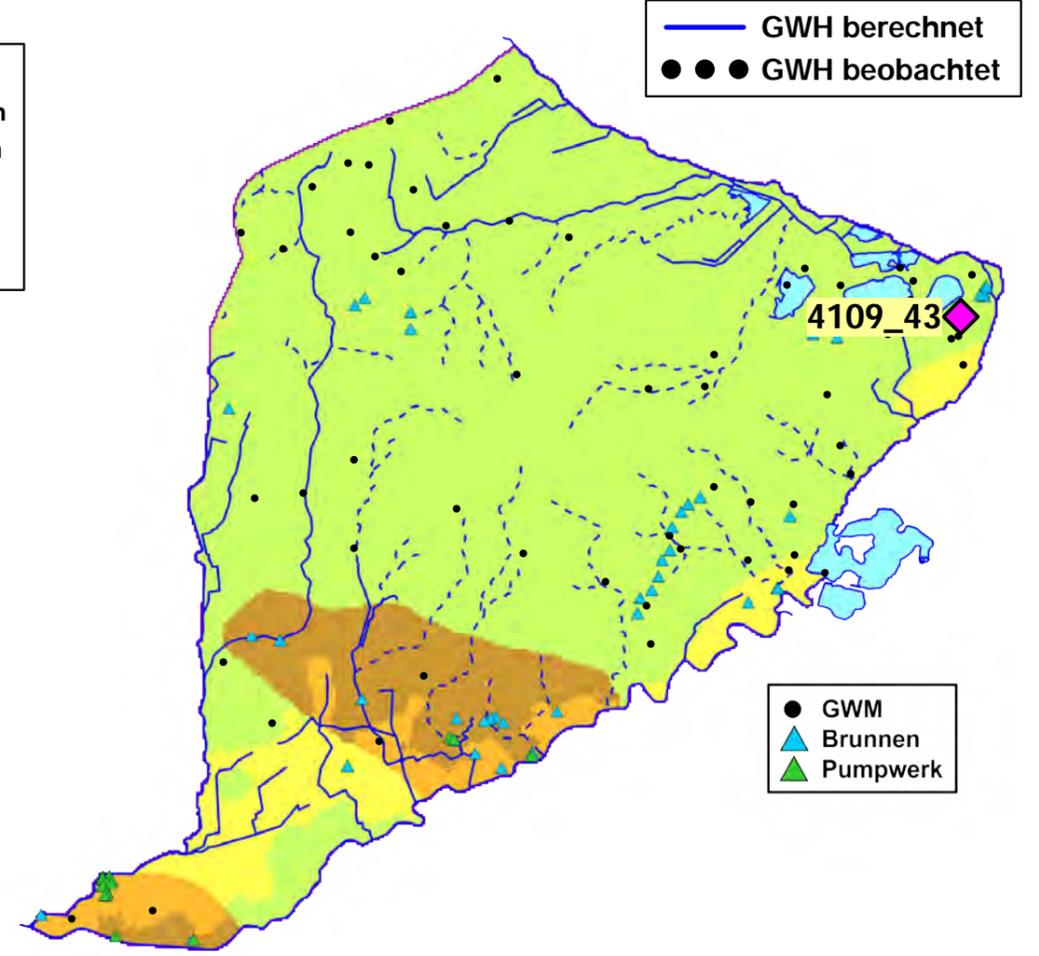
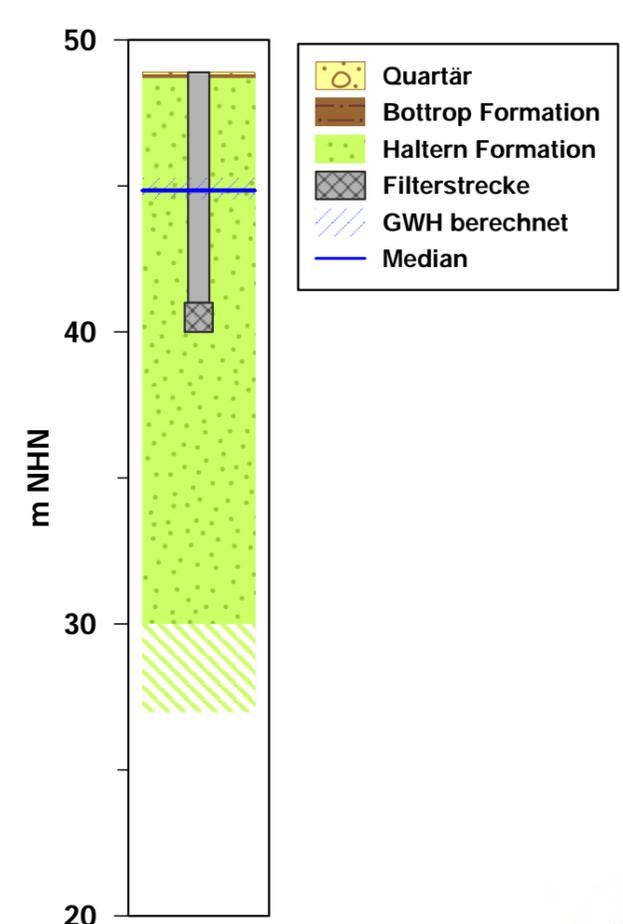
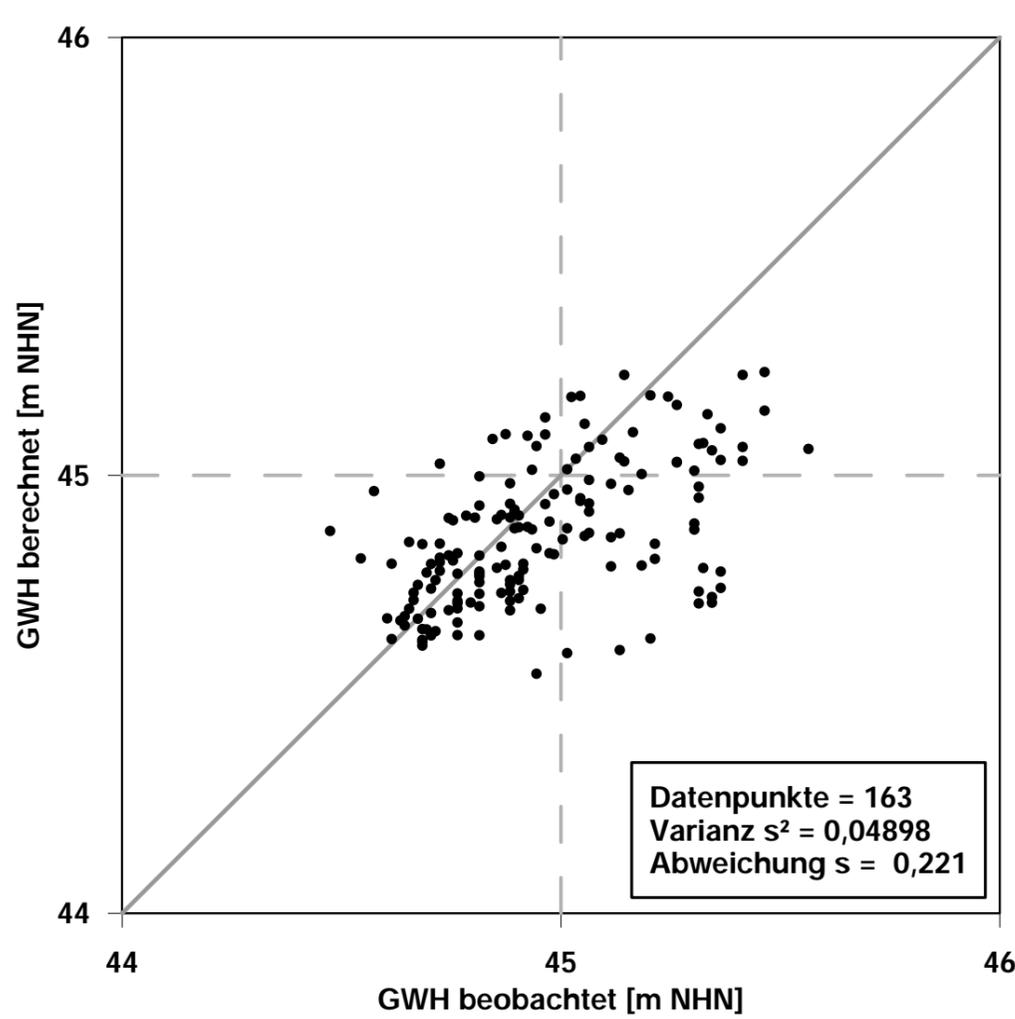
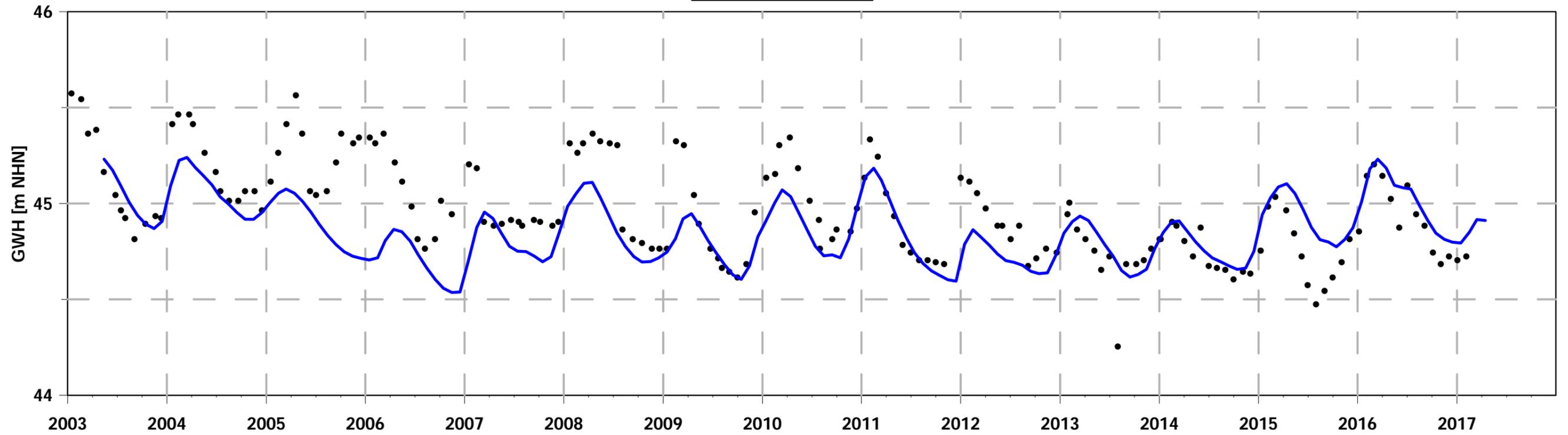
Eine flächendeckende Abgrenzung von Gebieten mit maximalem oder mit eingeschränkt kapillarem Aufstieg kann auf der Basis von geologischen und bodenkundlichen Karten und einer Analyse der hydrologischen Verhältnisse erfolgen. Bei einem einfachen Vorgehen werden geologische Einheiten wie Klei, Moor und Torf und Talsedimente als grundwasser-nahe Böden eingestuft. Eine umfassende Zusammenstellung für den kapillaren Aufstieg findet sich für alle Bodenarten in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 1994).

In der klimatischen Wasserbilanz bleibt der kapillare Aufstieg unberücksichtigt, da dieser mit dem Strömungsmodell "modflow 2005" berechnet wird.

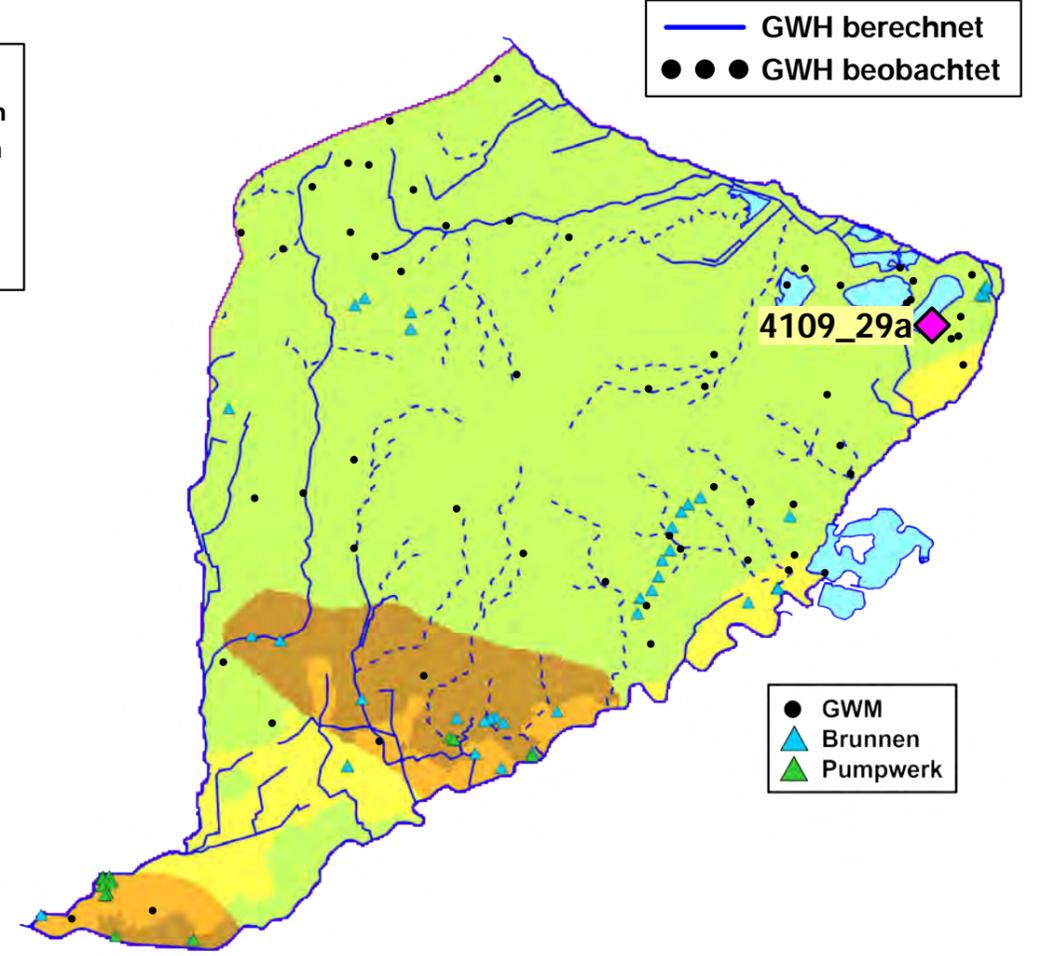
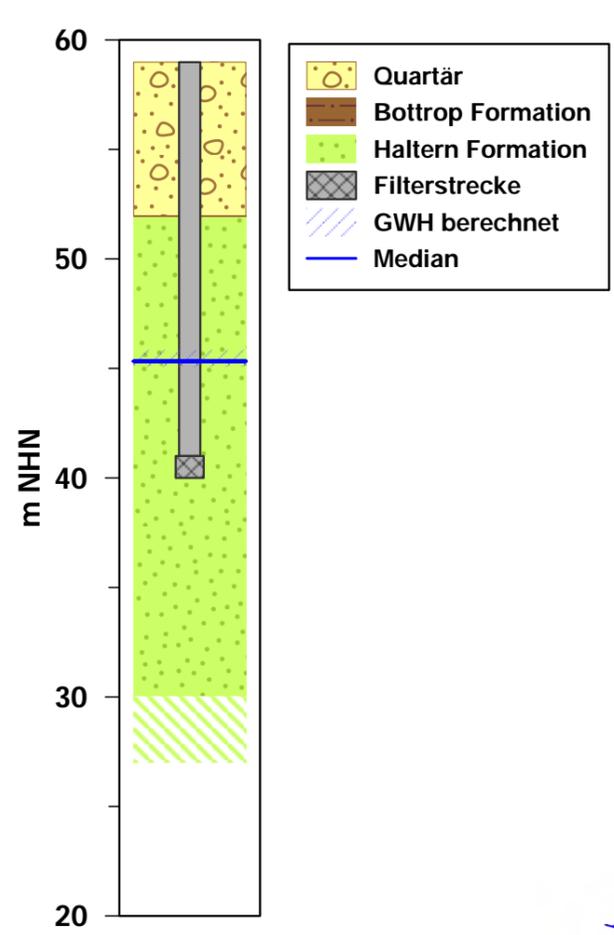
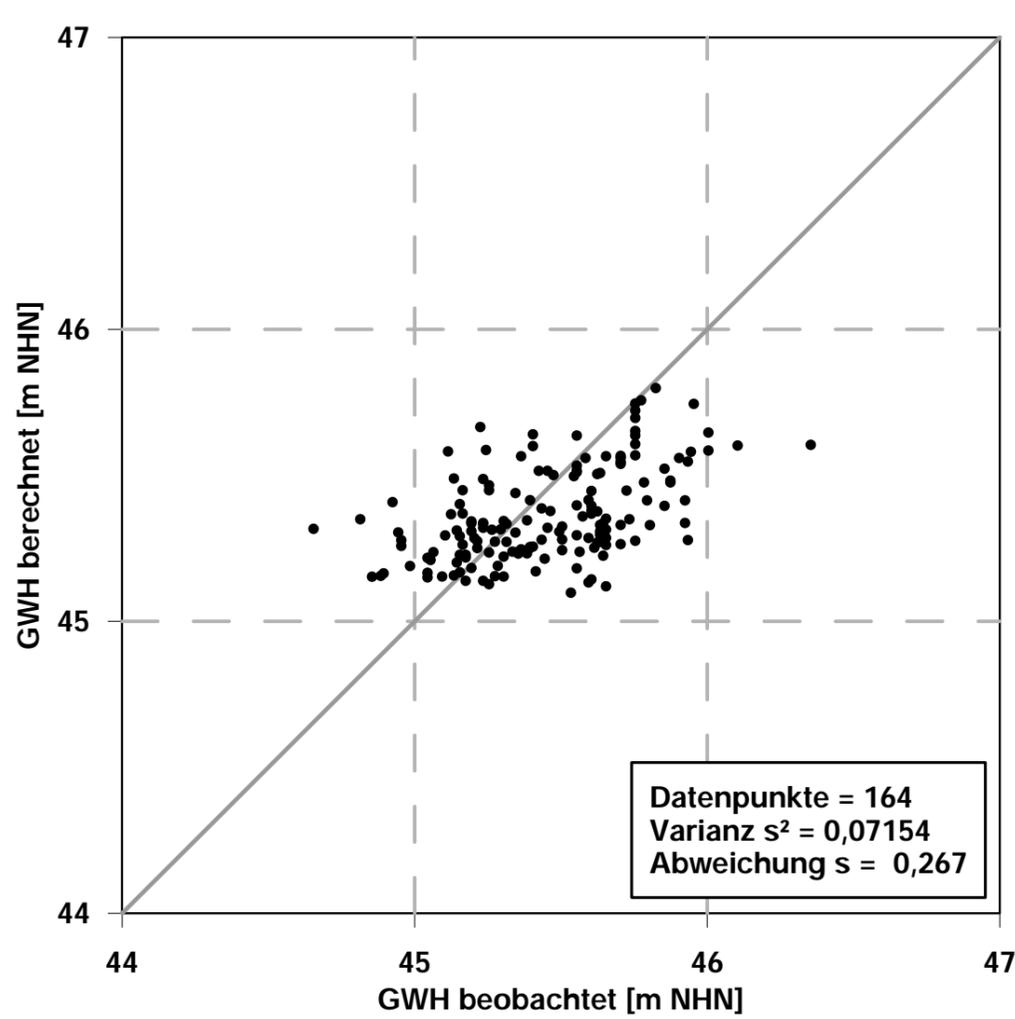
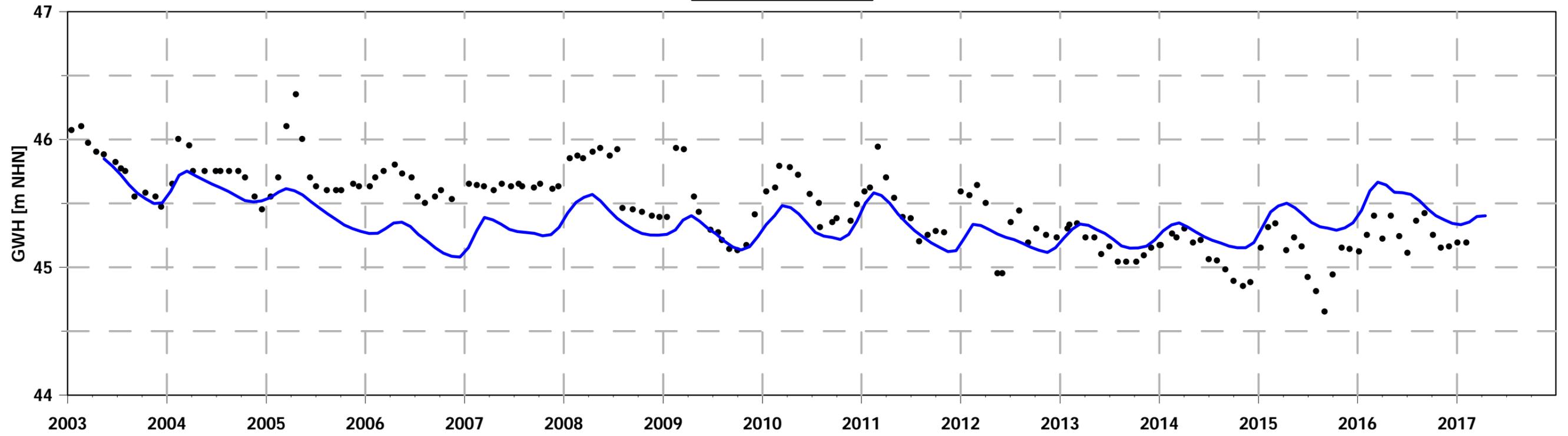
WW\_6



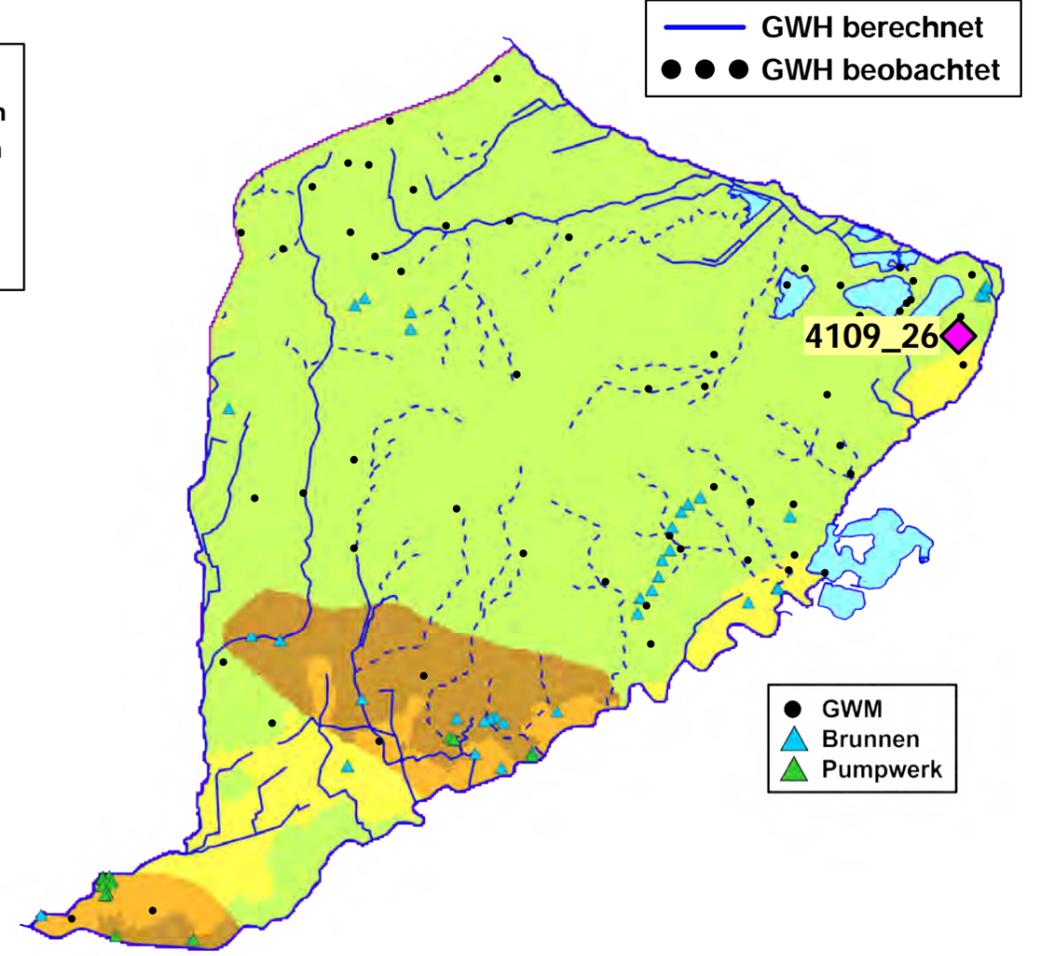
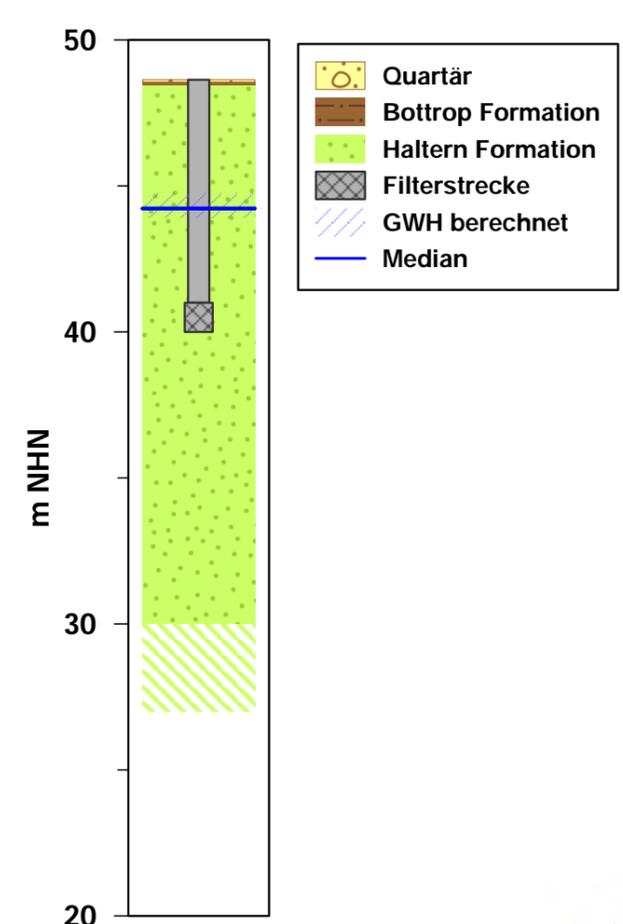
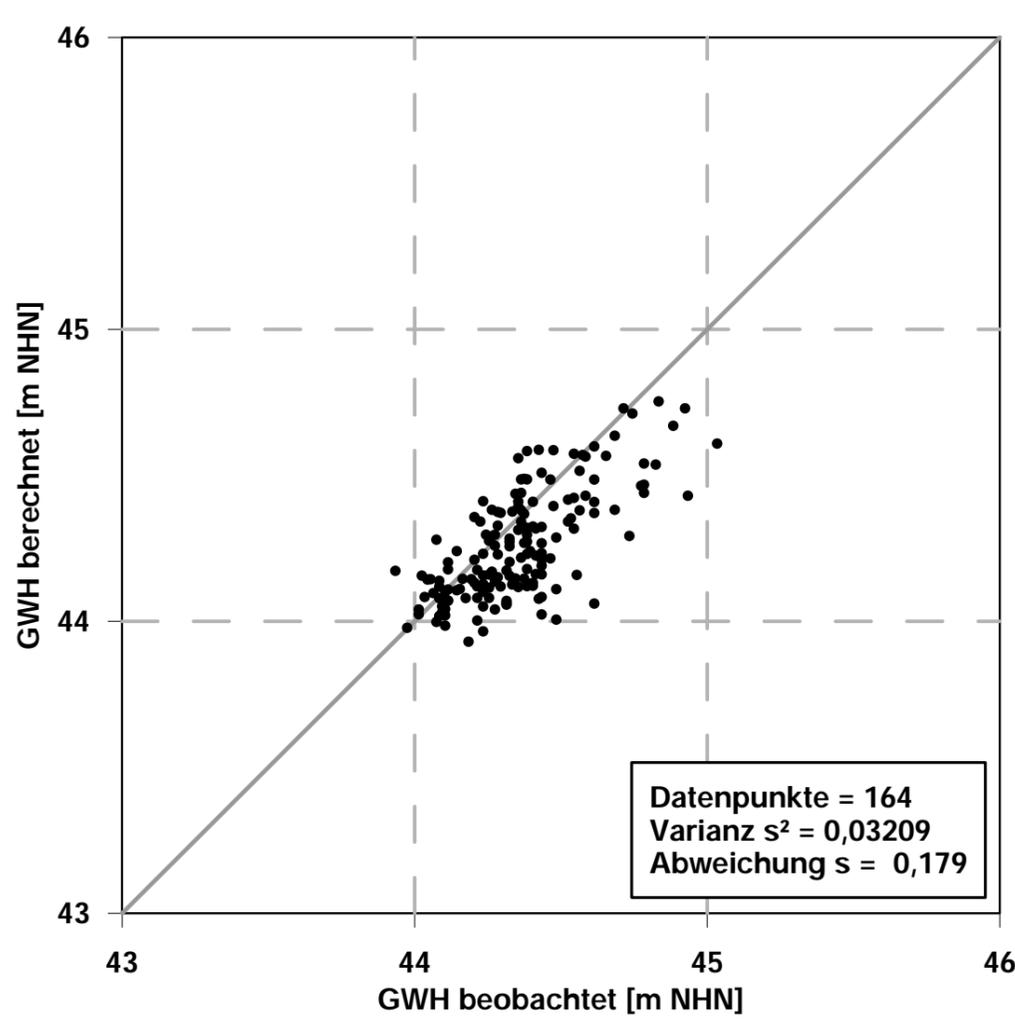
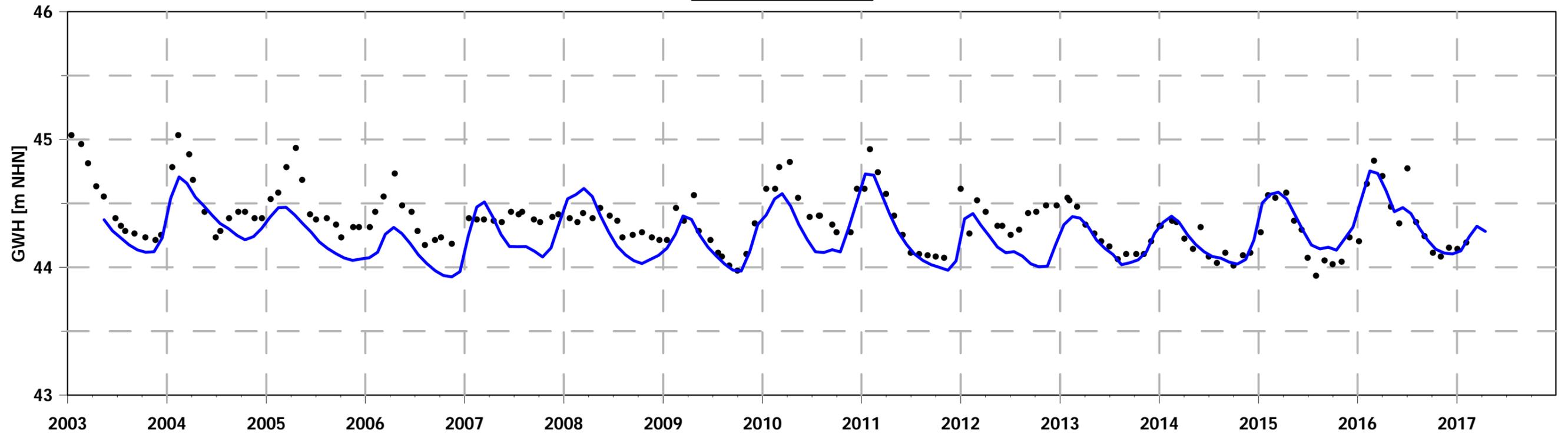
4109\_43



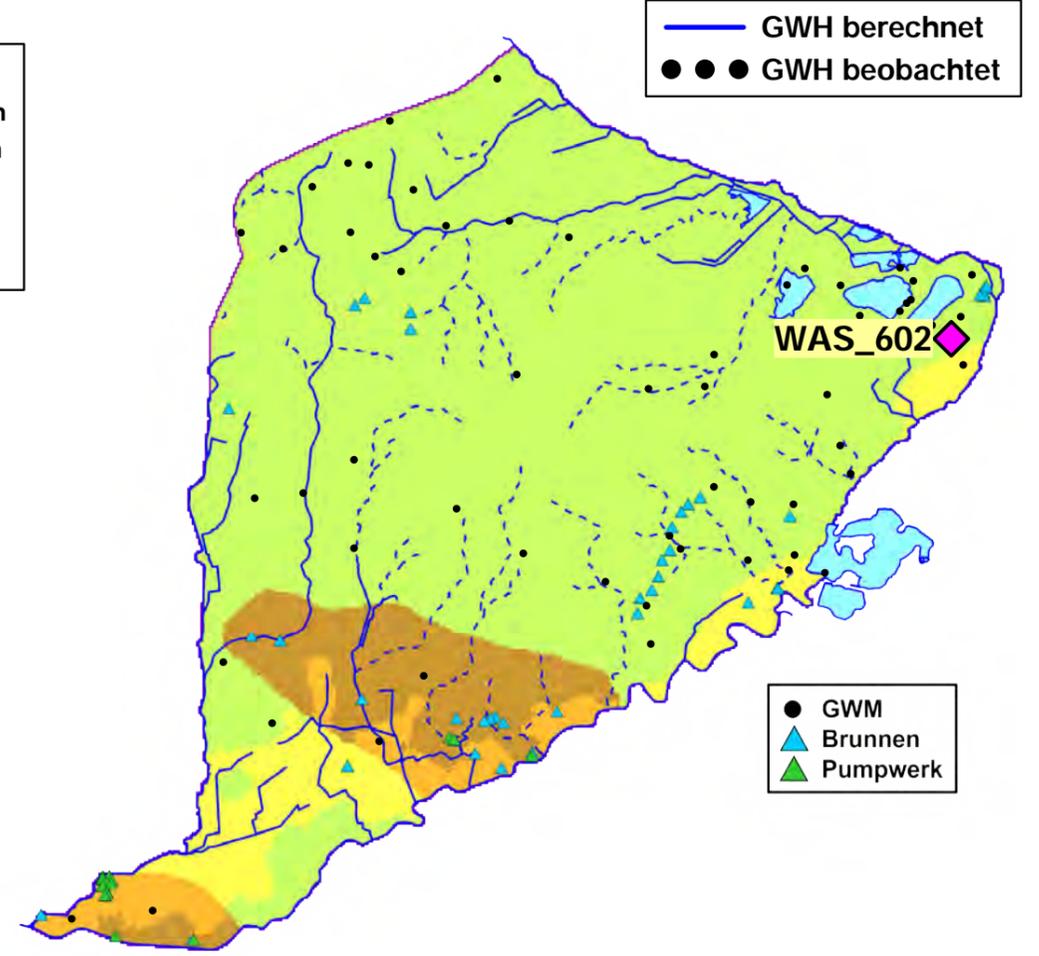
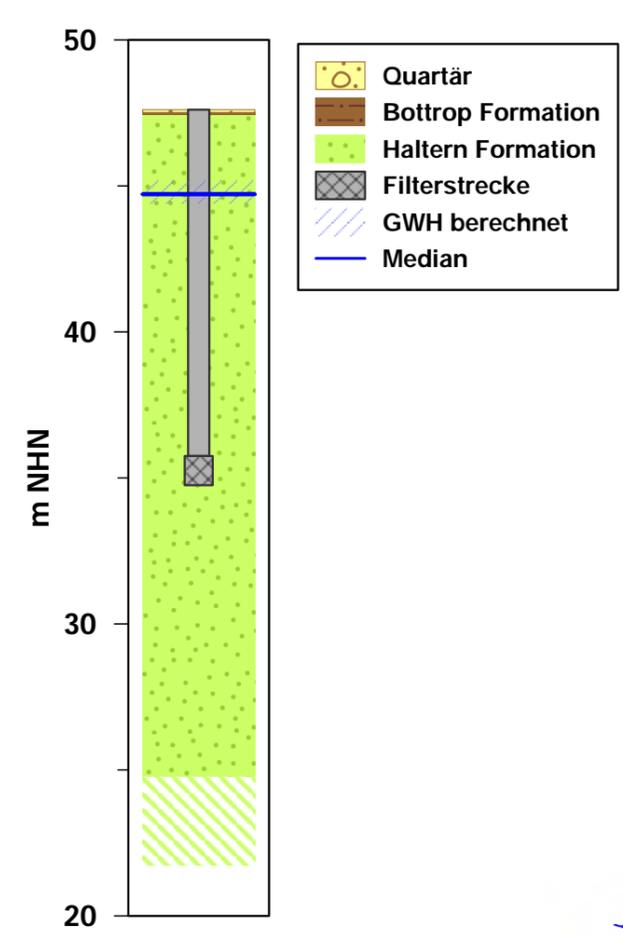
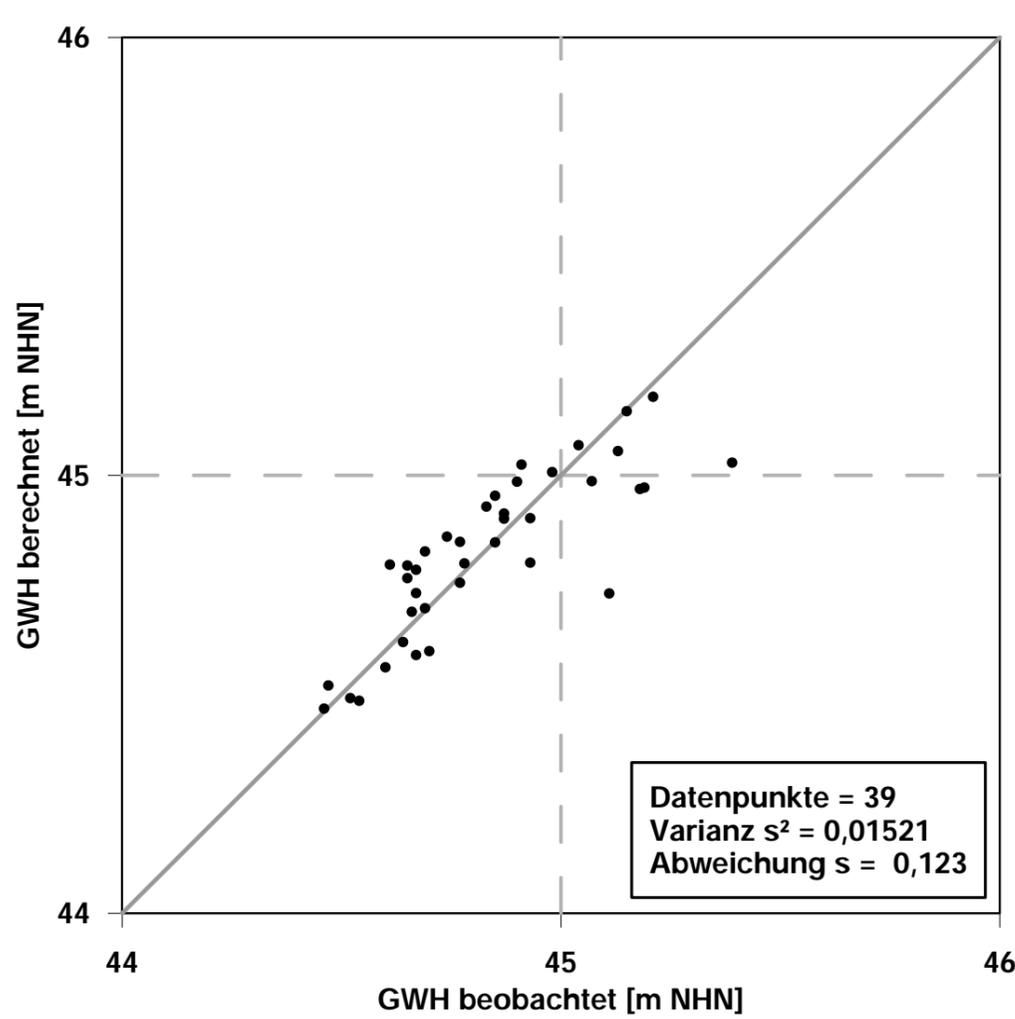
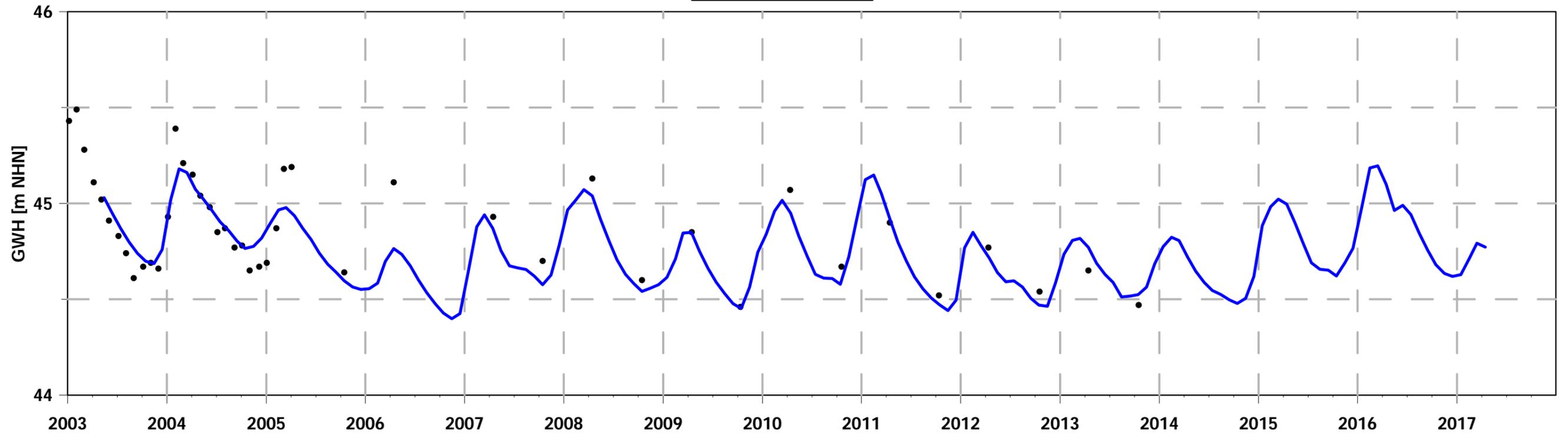
4109\_29a



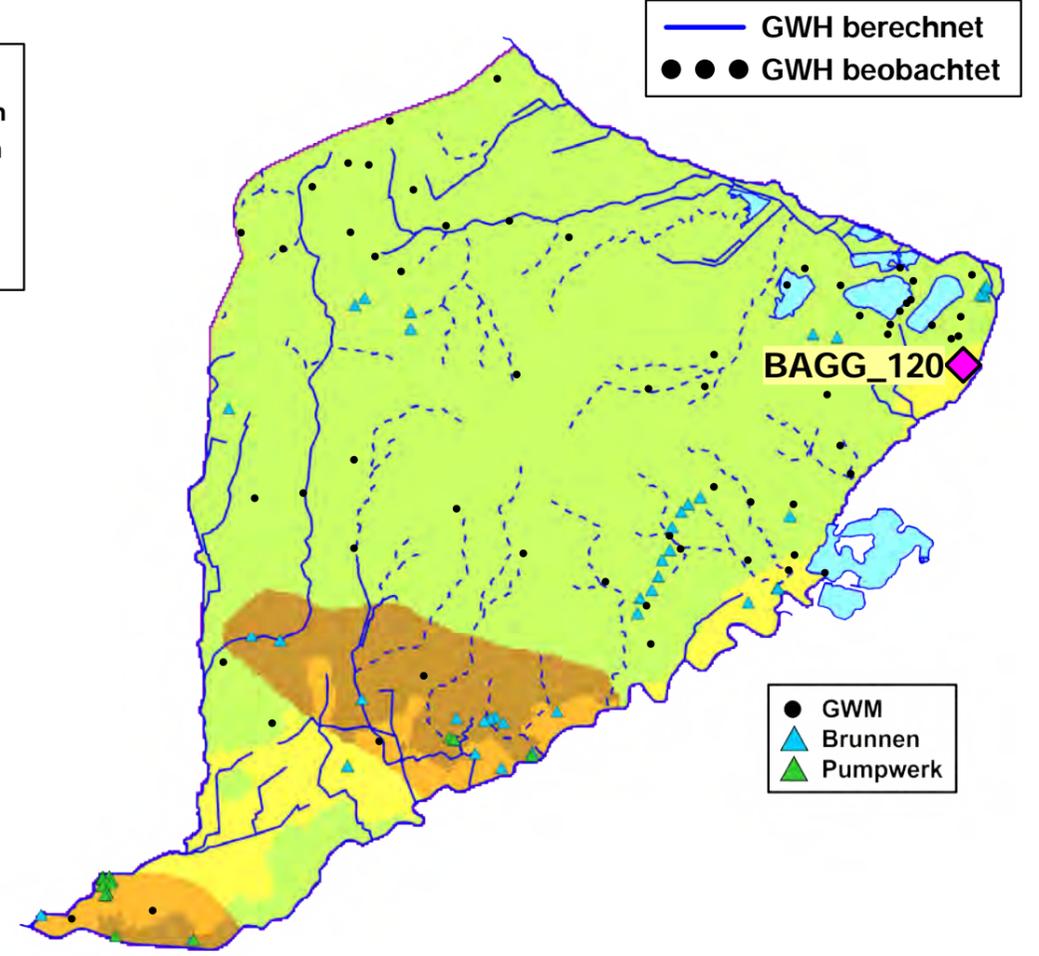
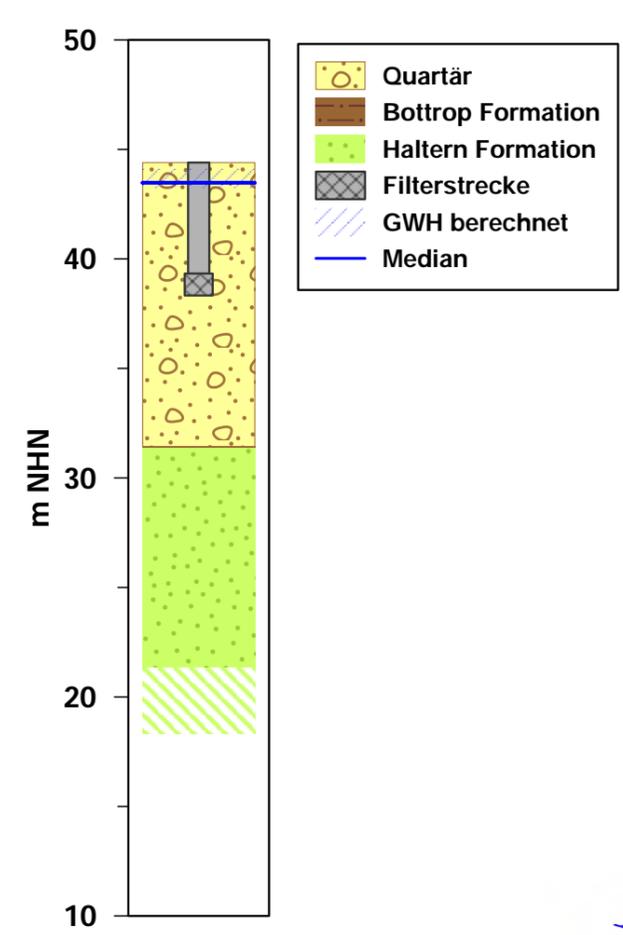
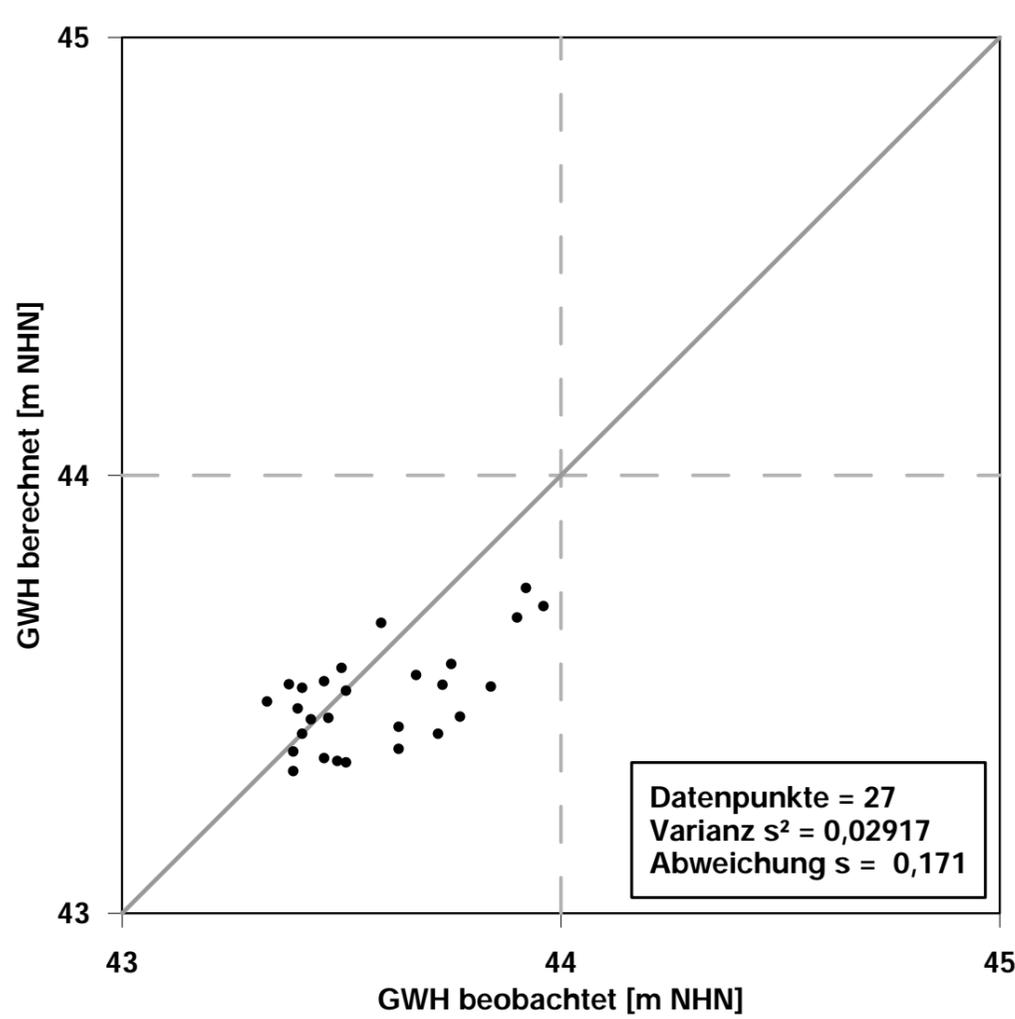
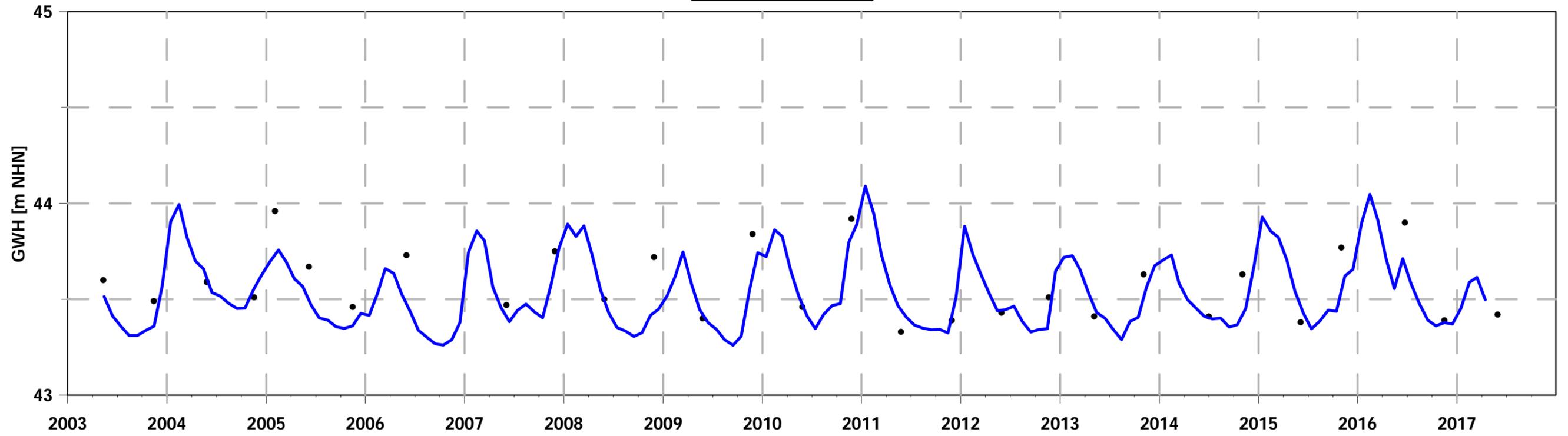
4109\_26



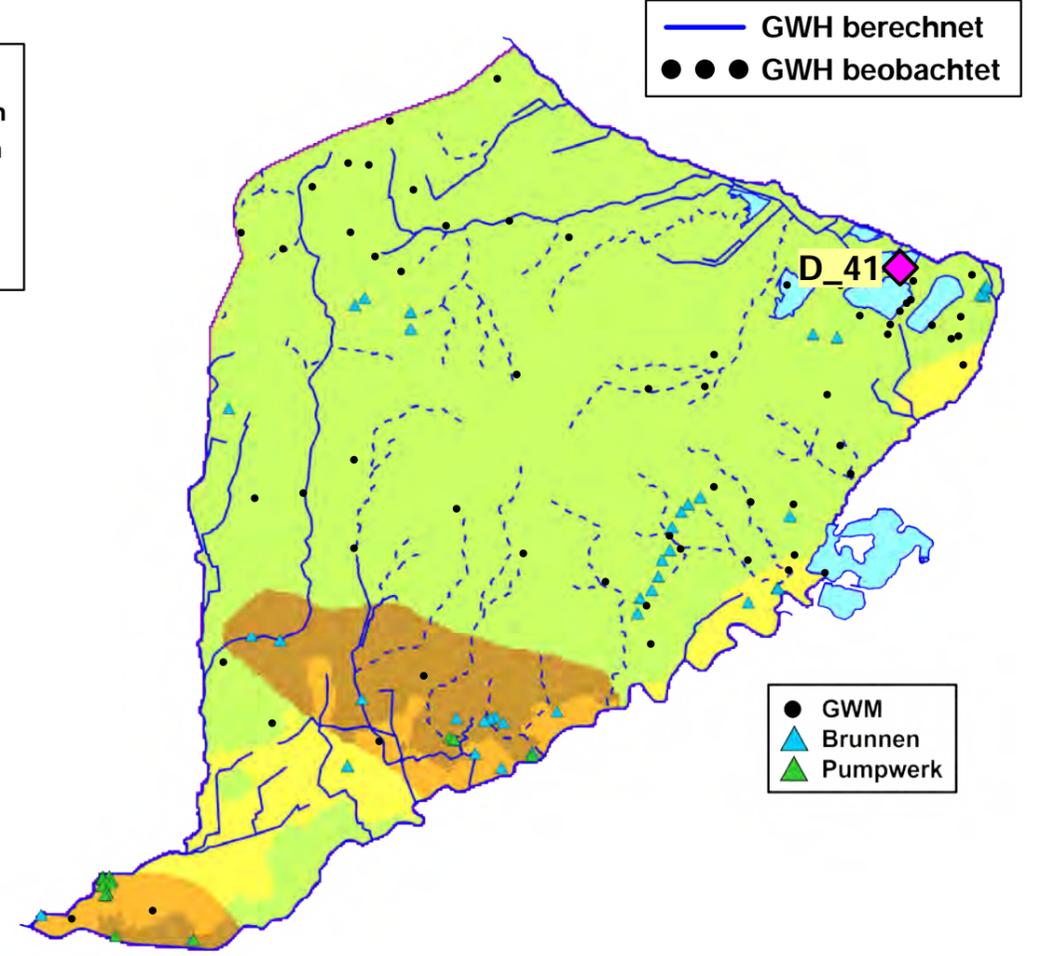
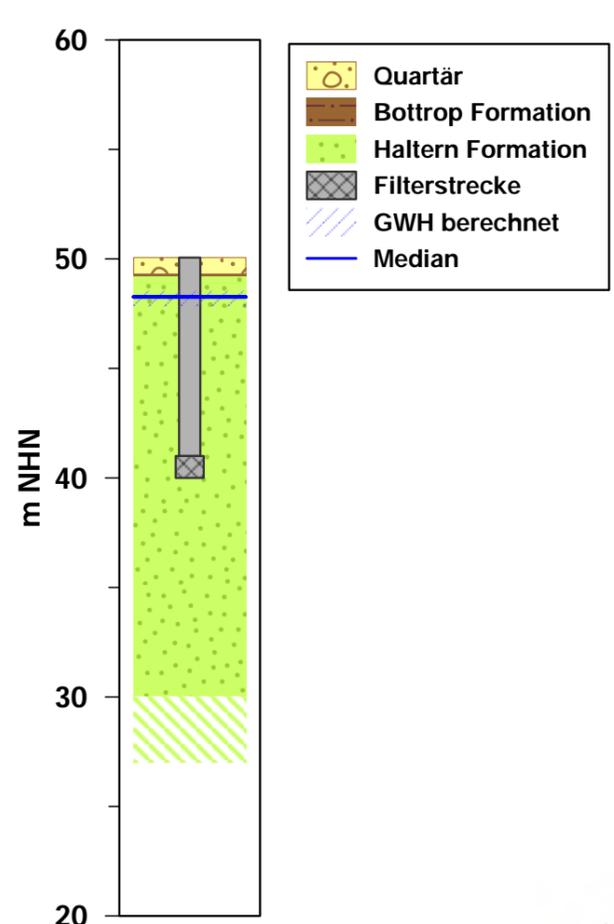
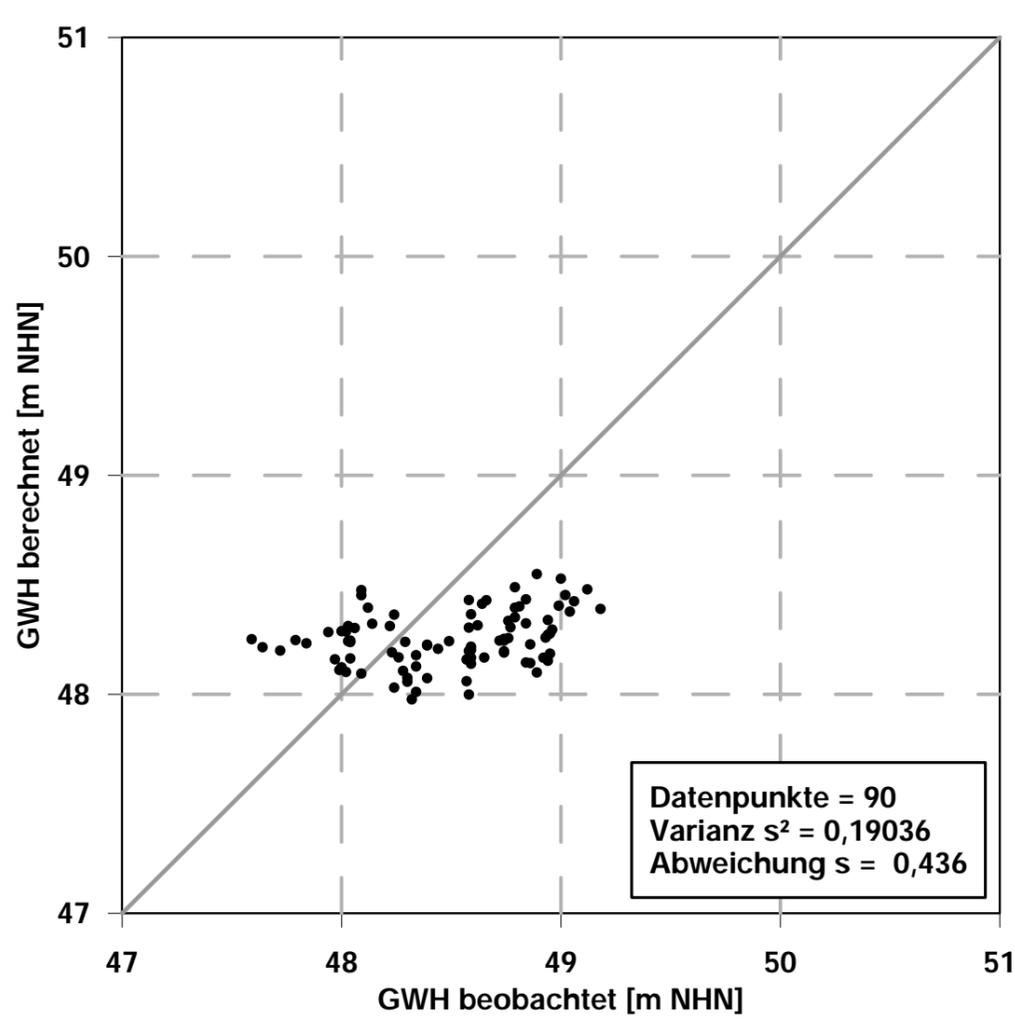
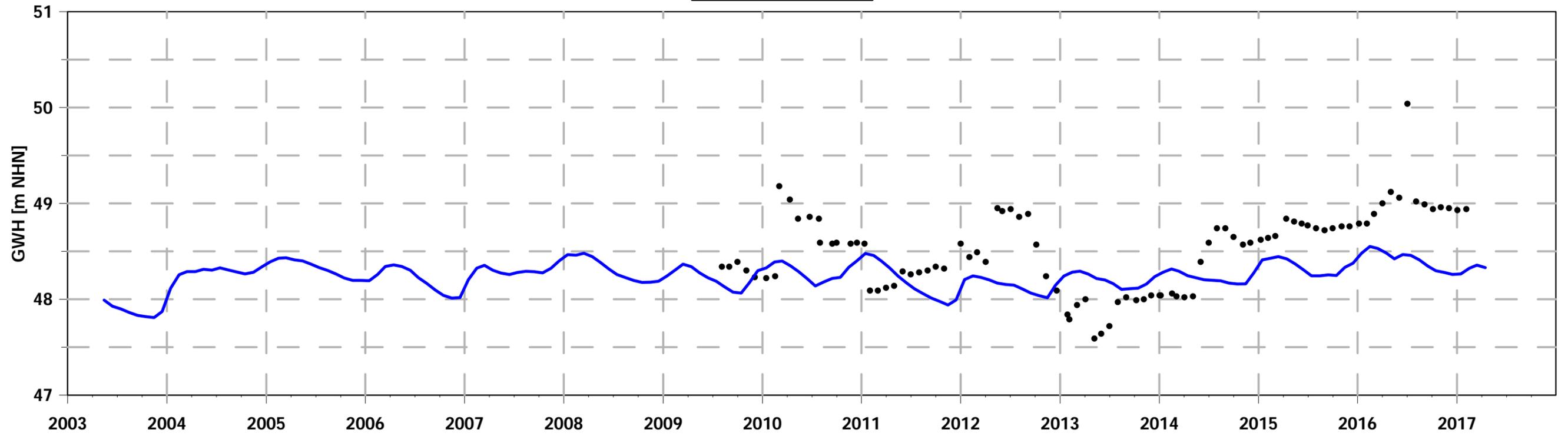
WAS\_602



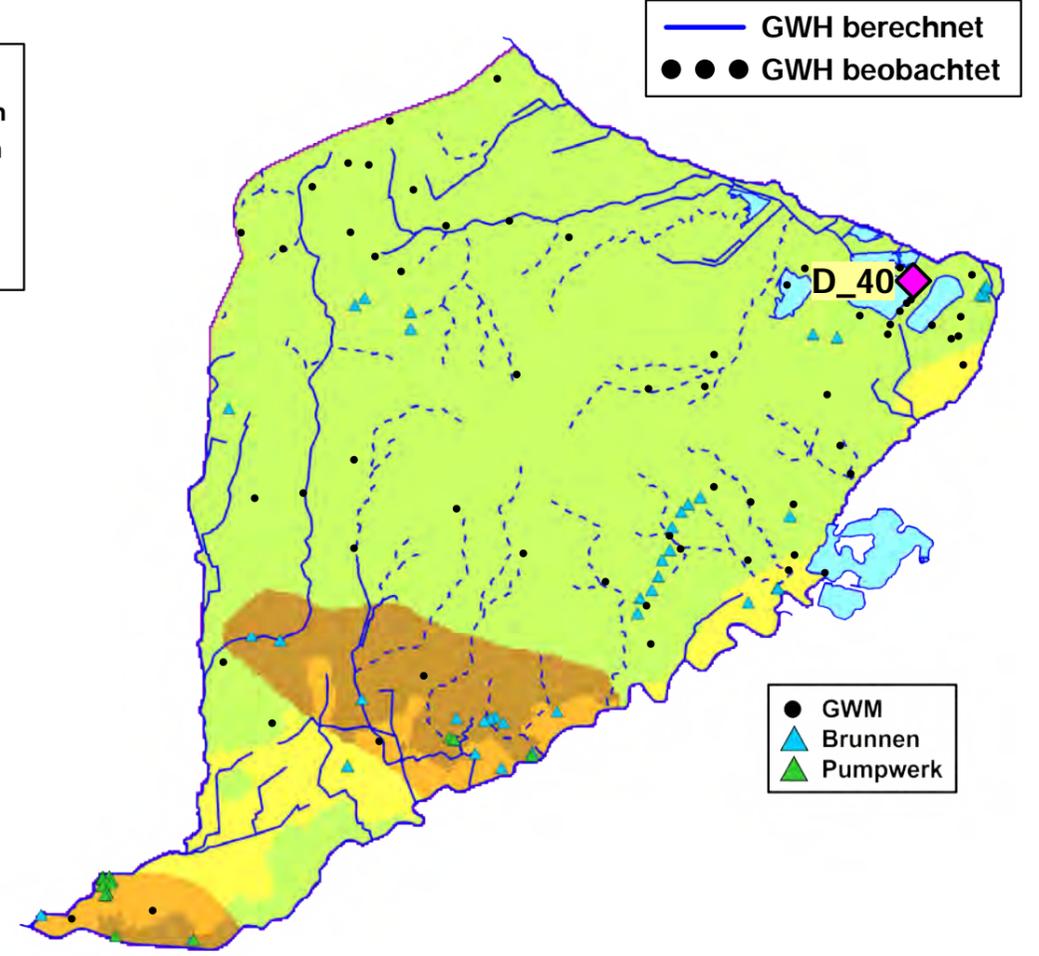
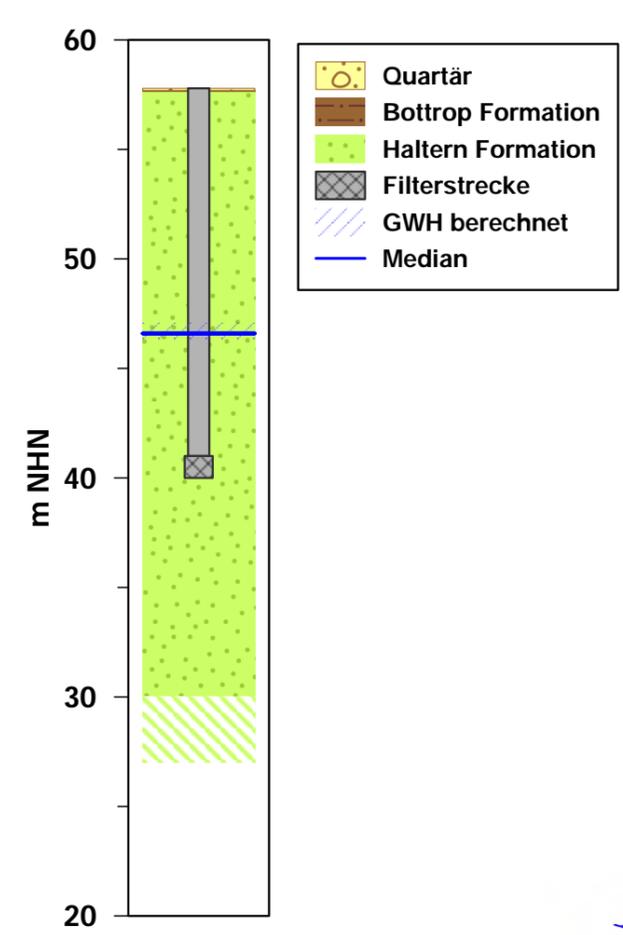
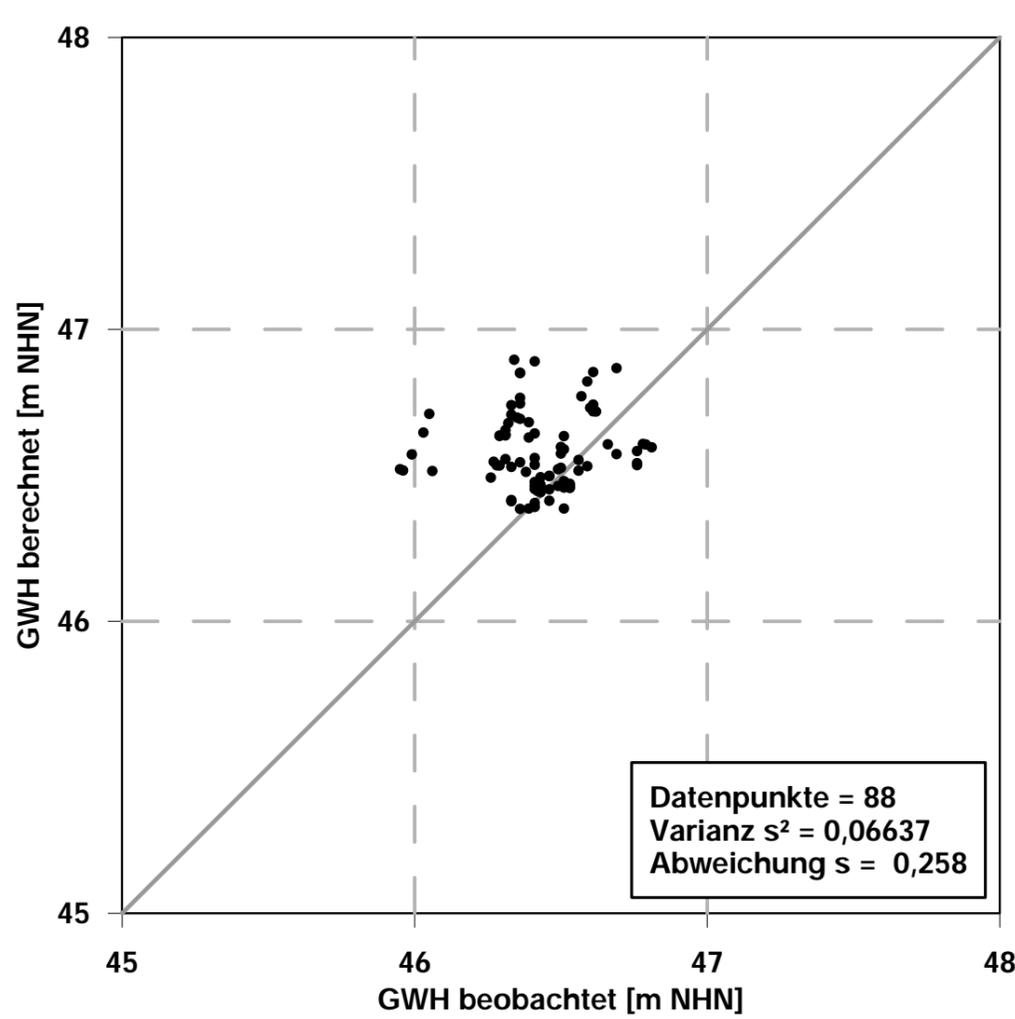
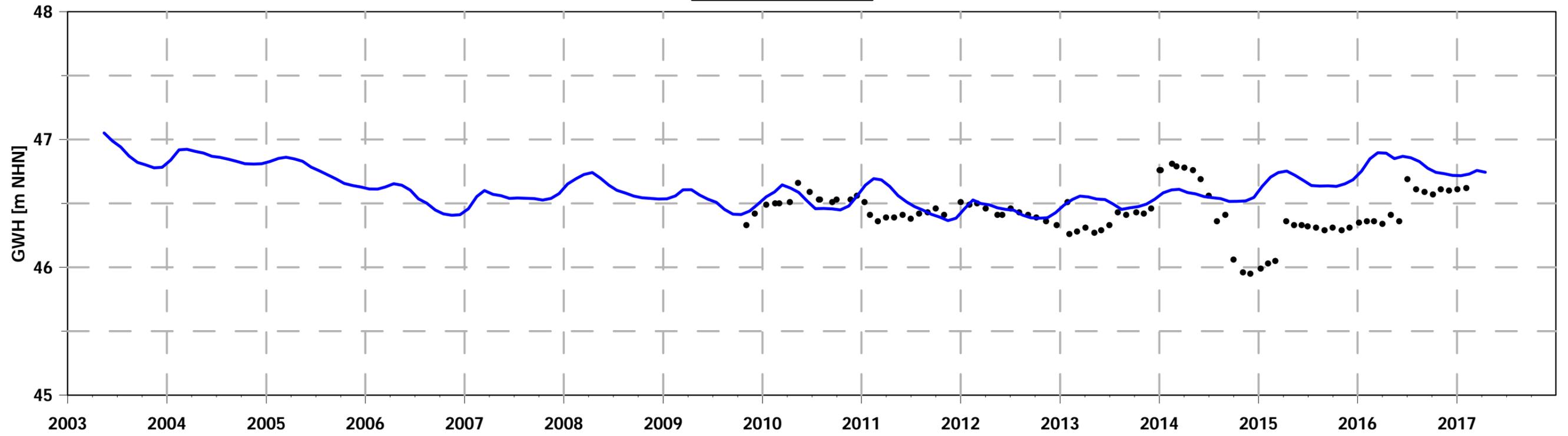
BAGG\_120



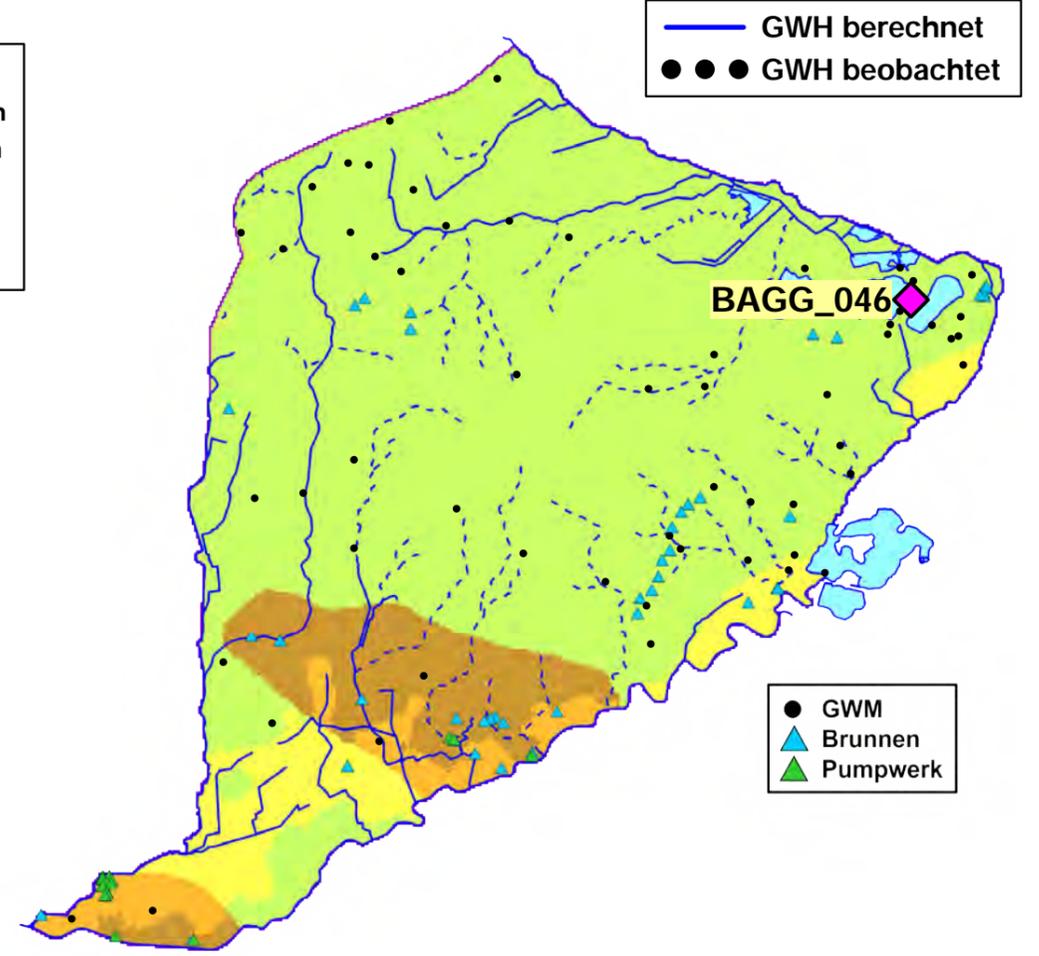
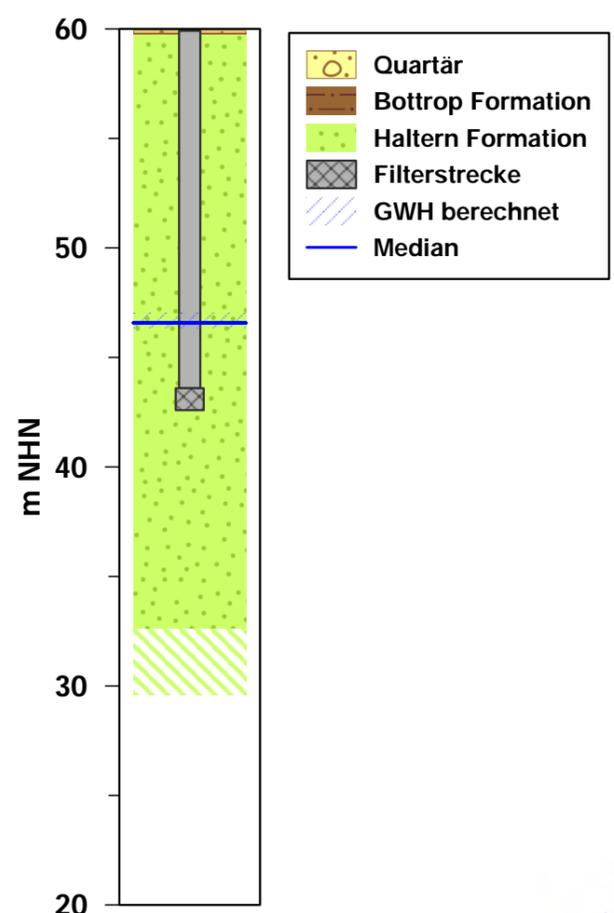
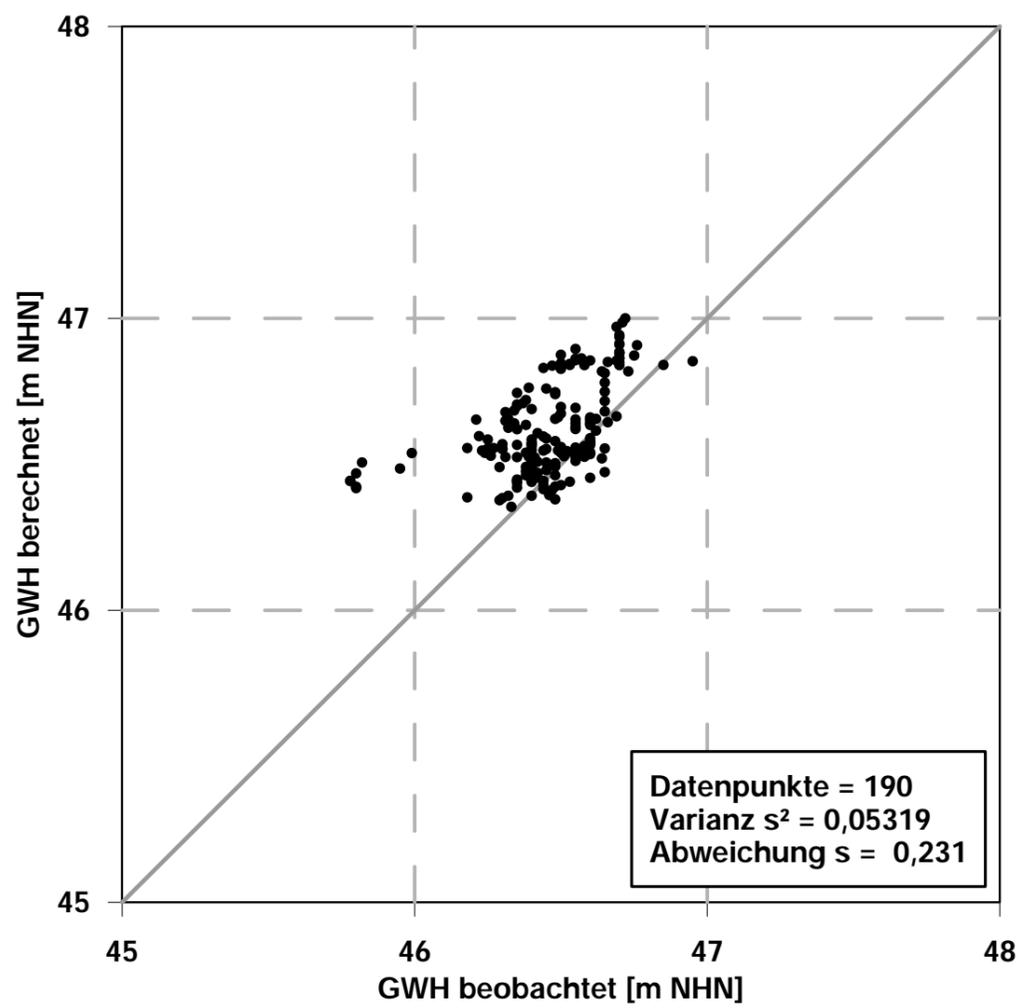
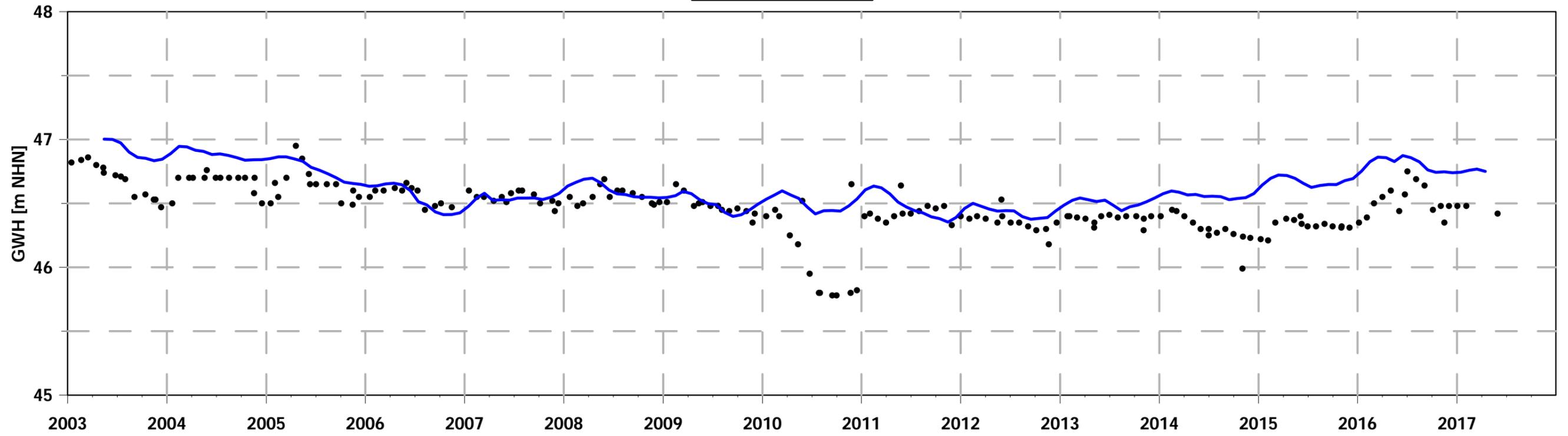
D\_41



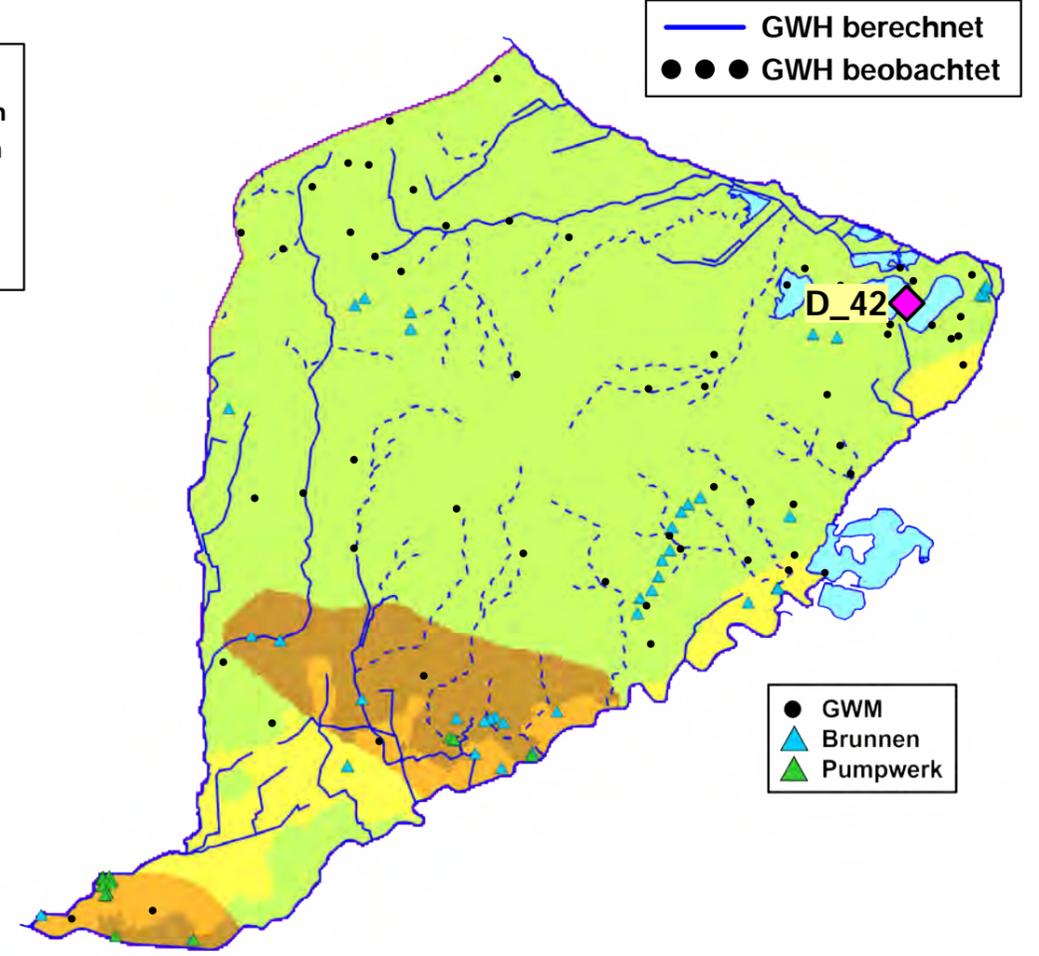
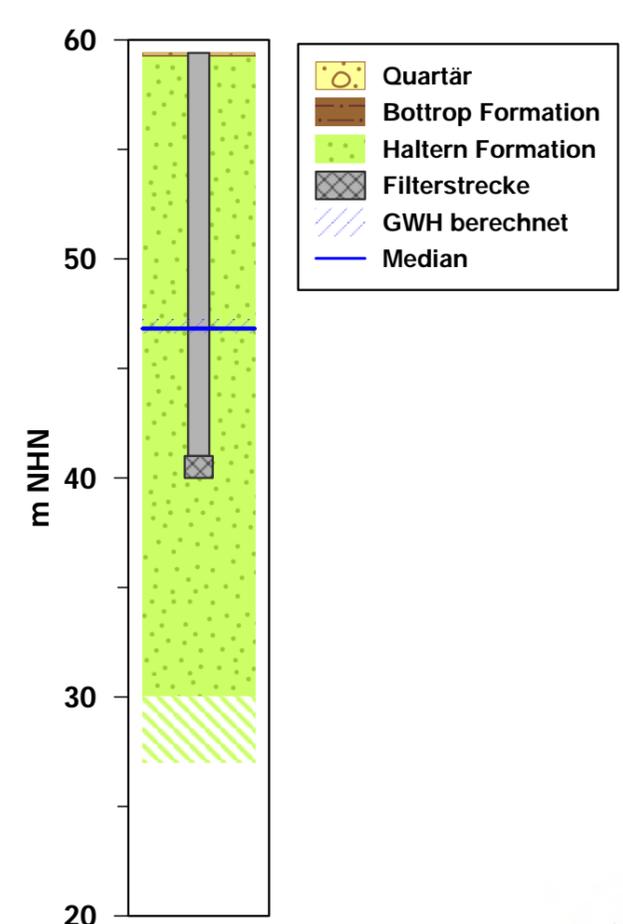
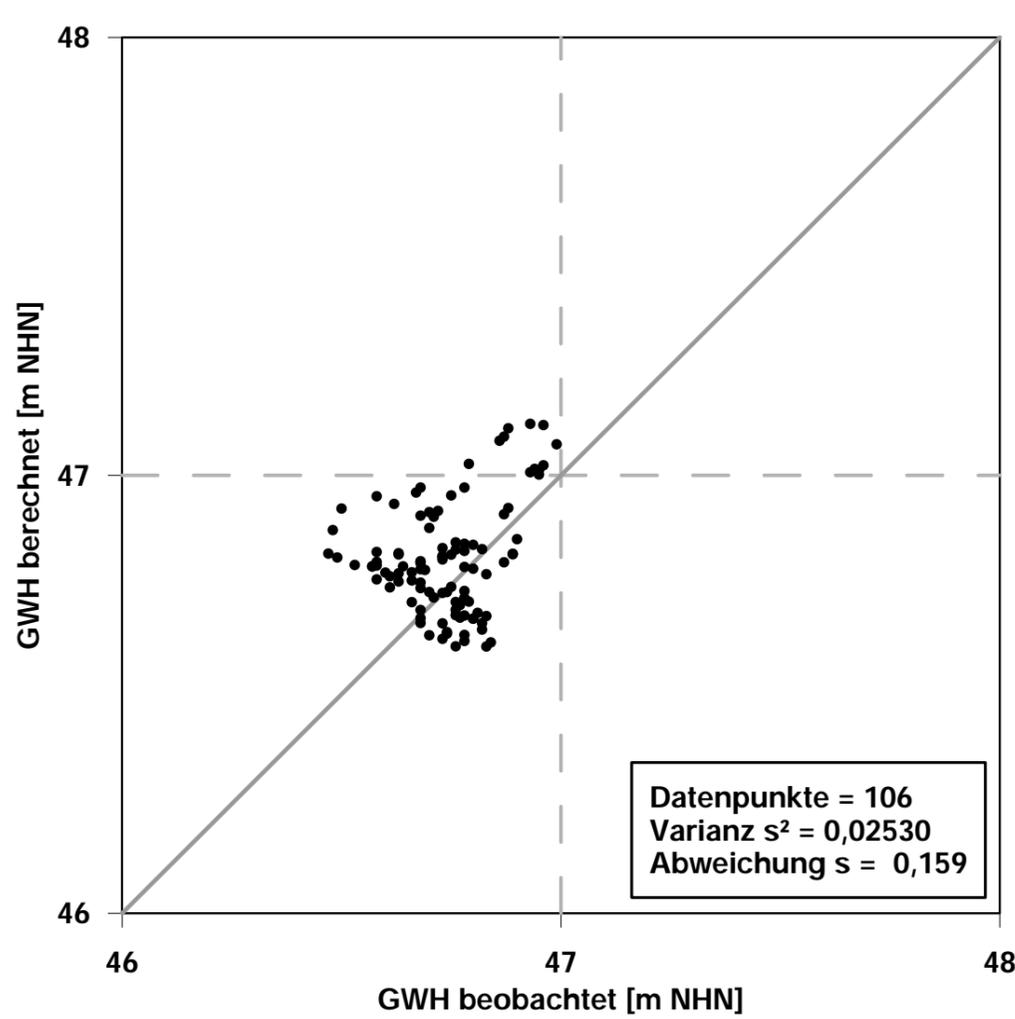
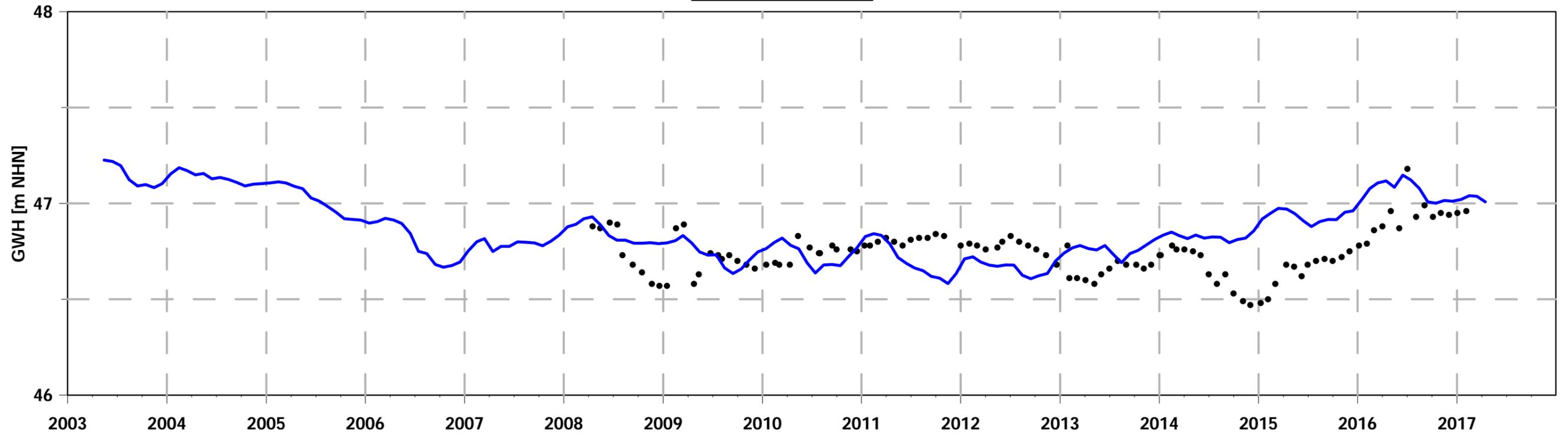
D\_40



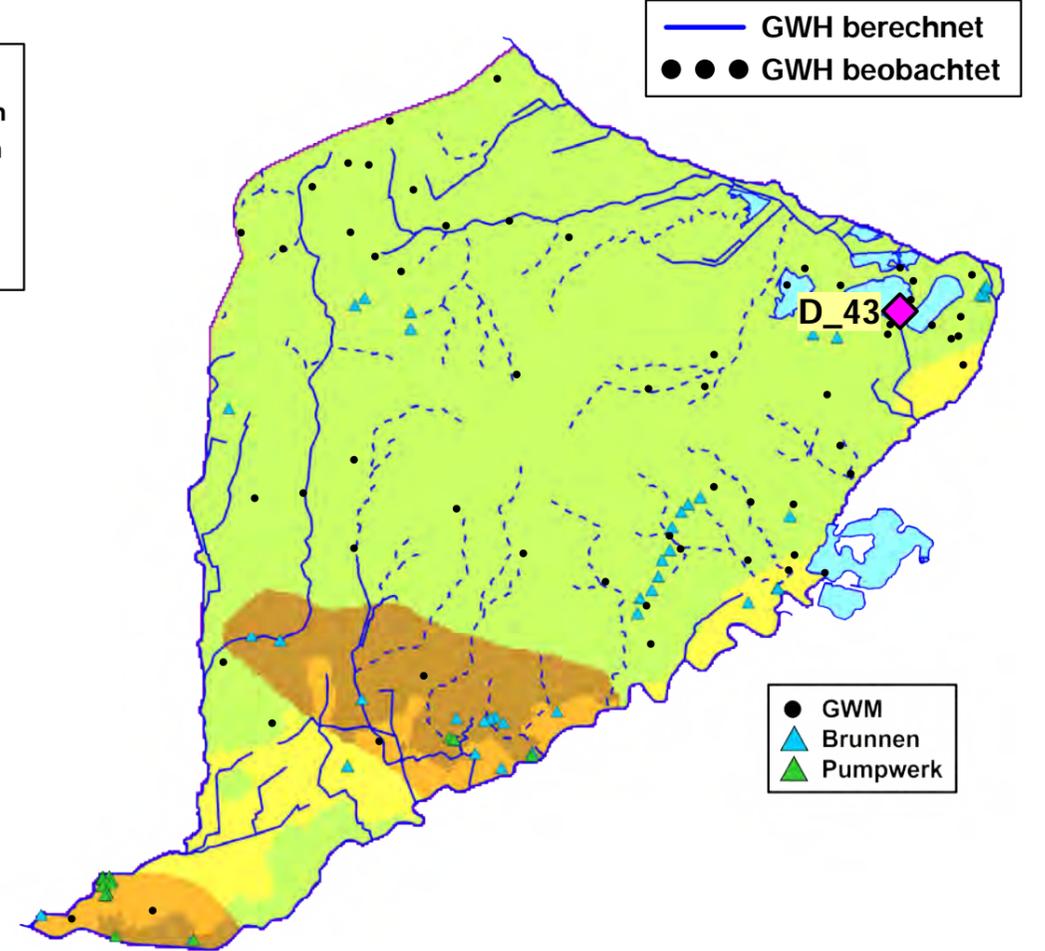
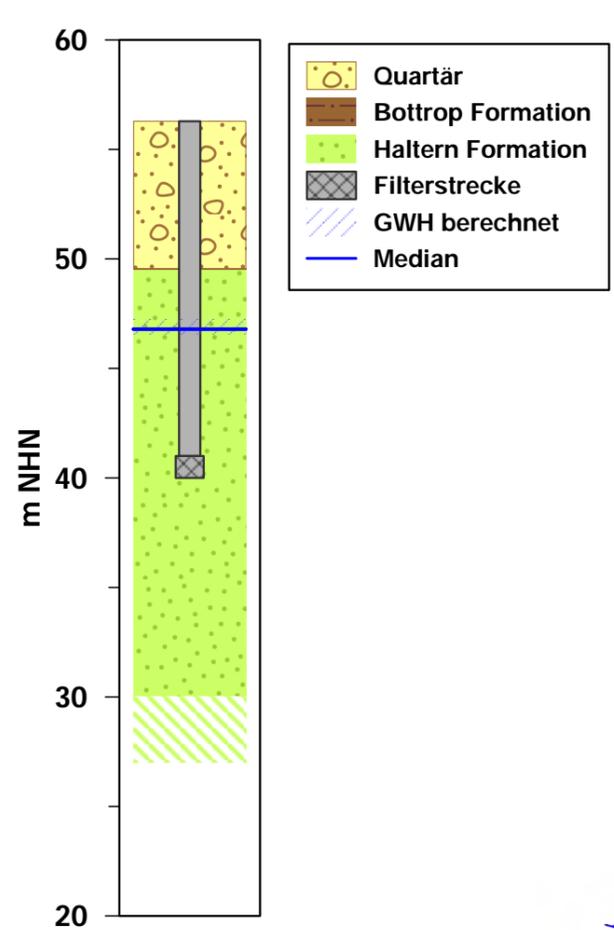
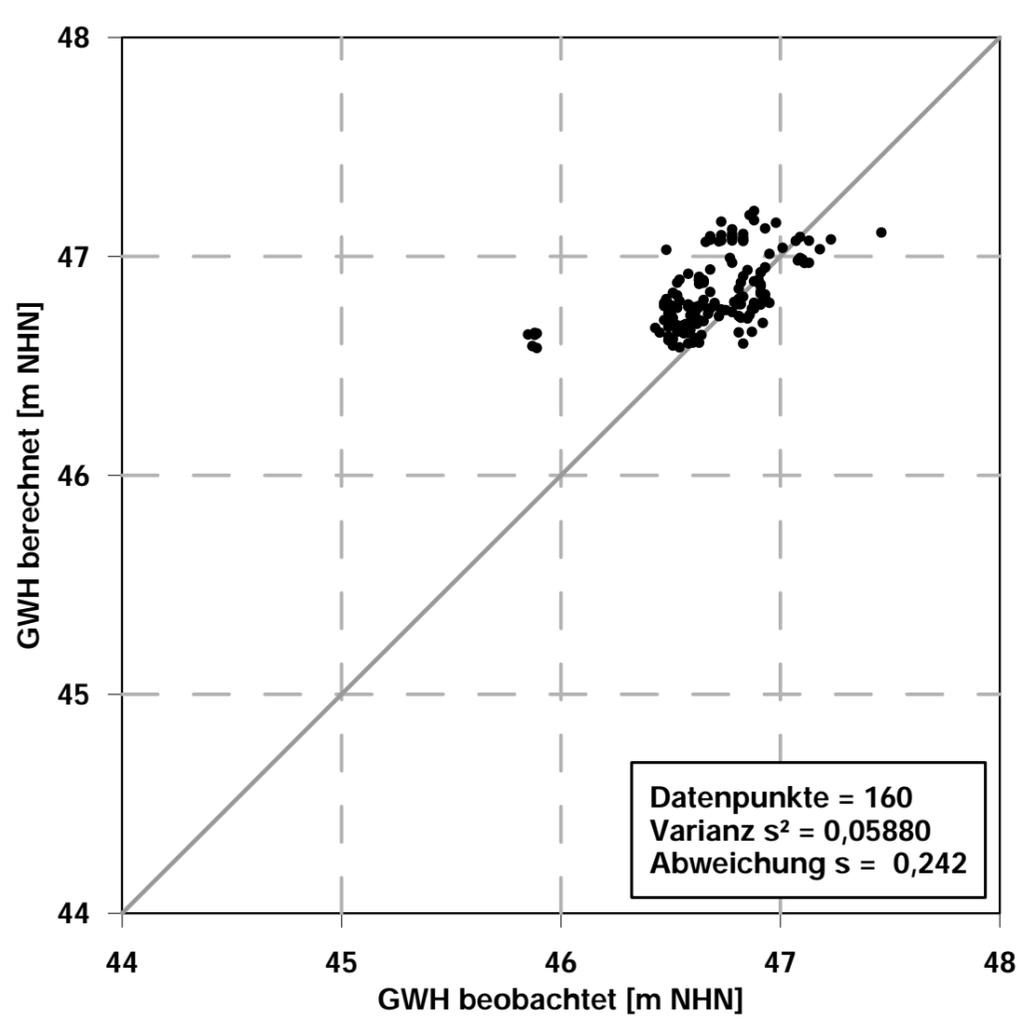
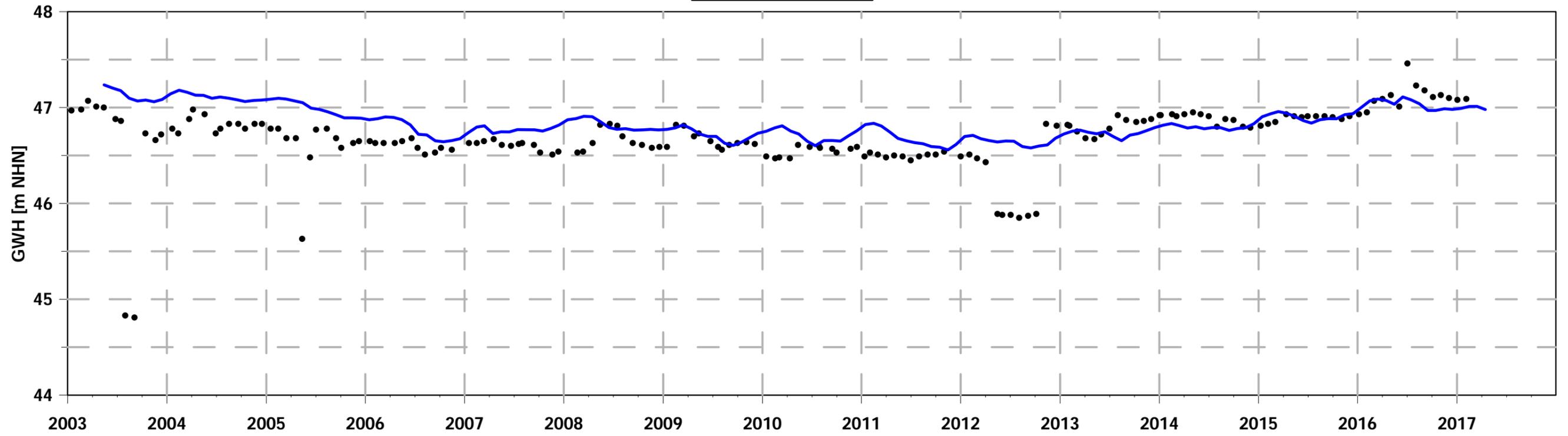
BAGG\_046



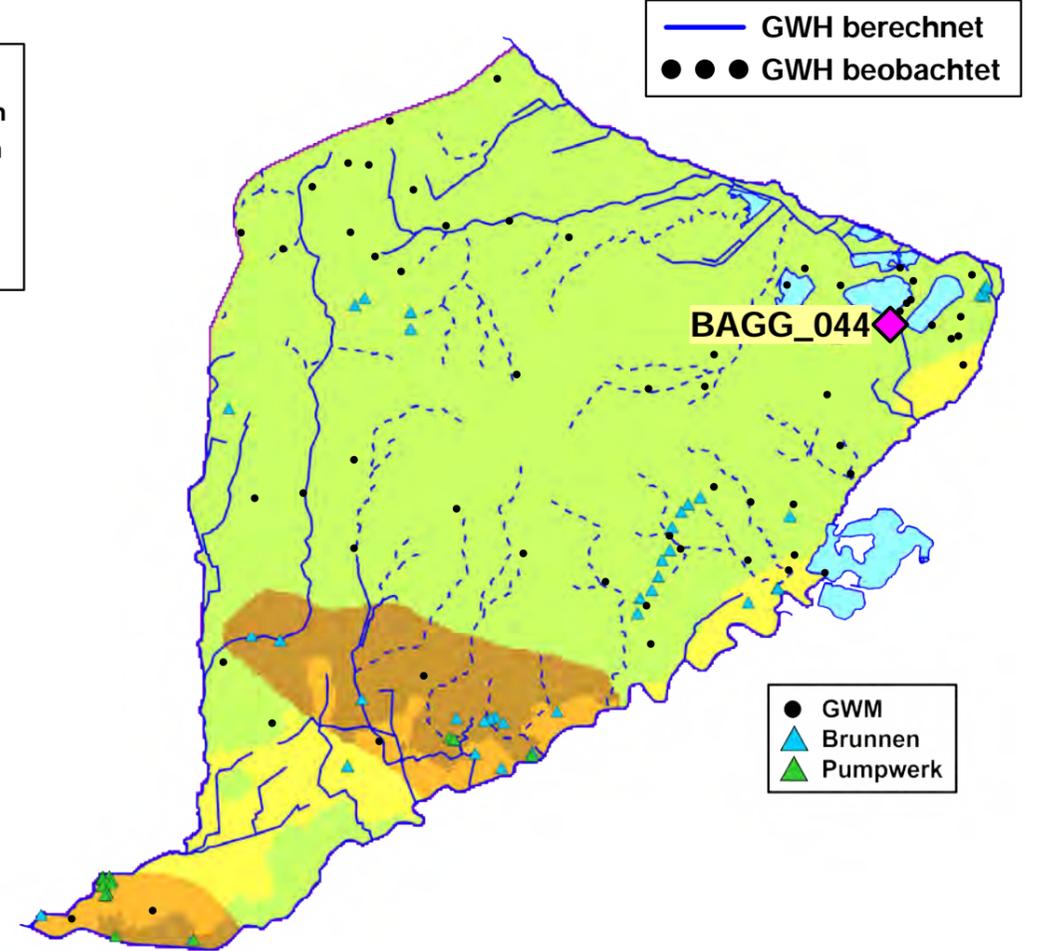
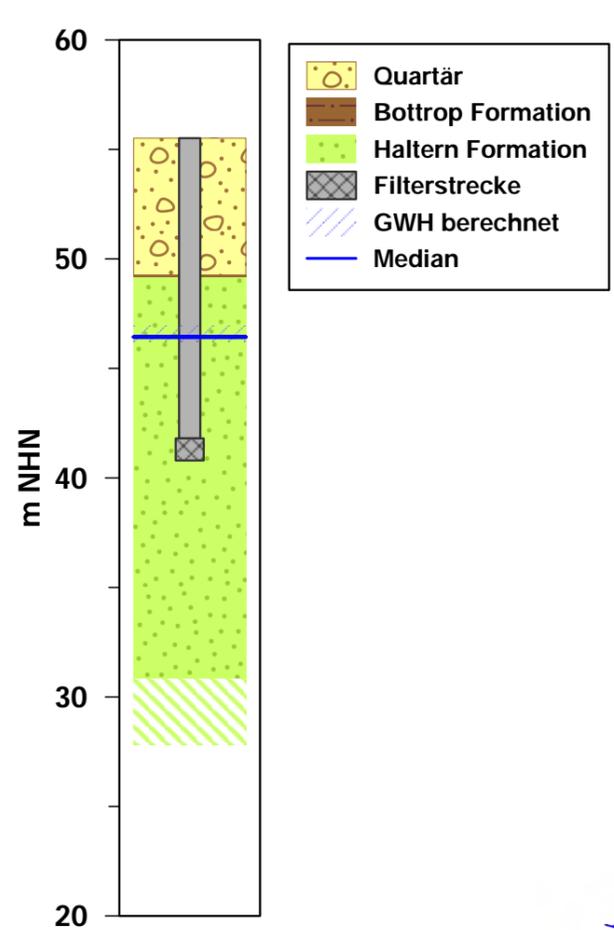
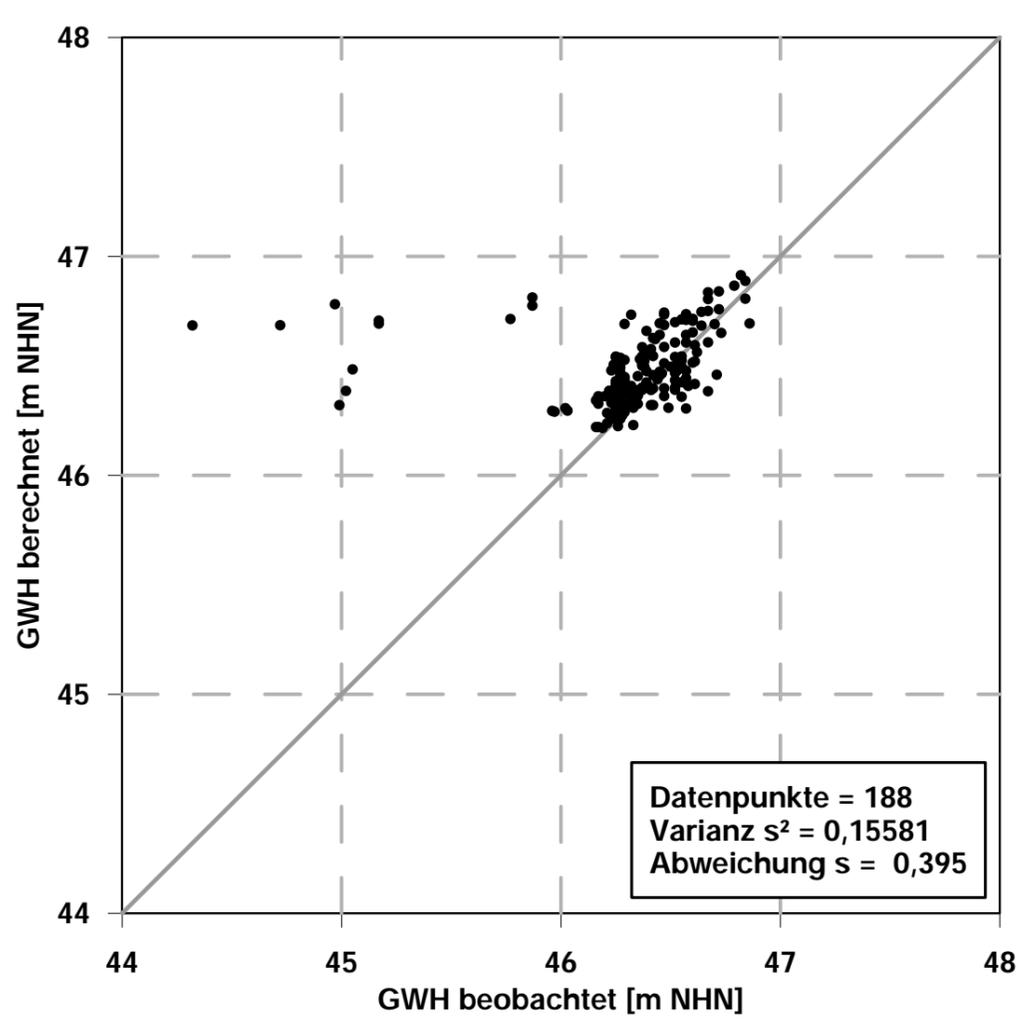
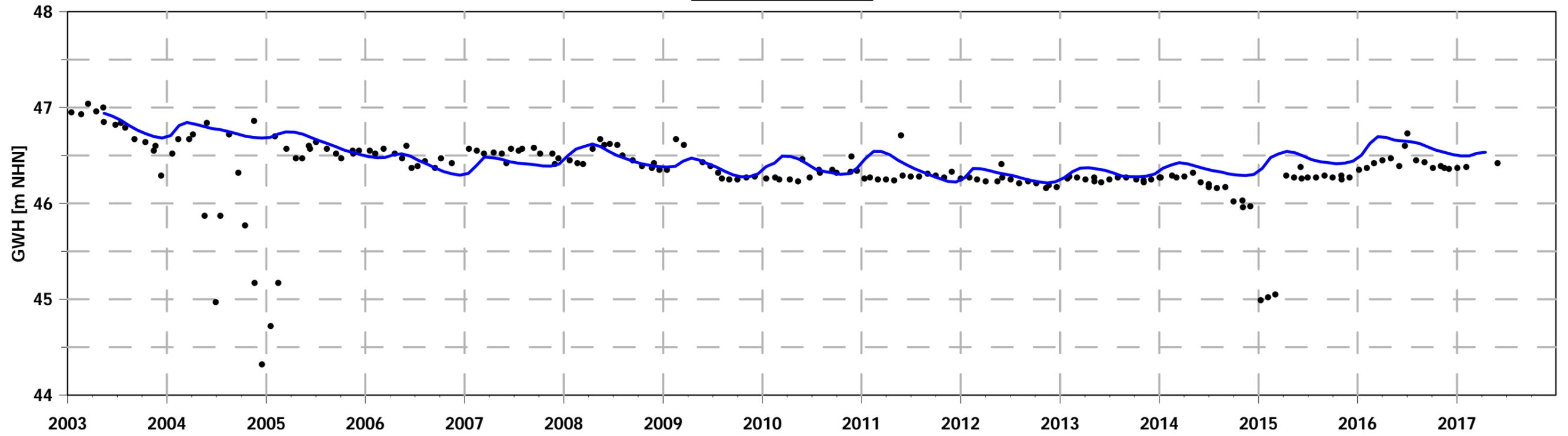
D\_42



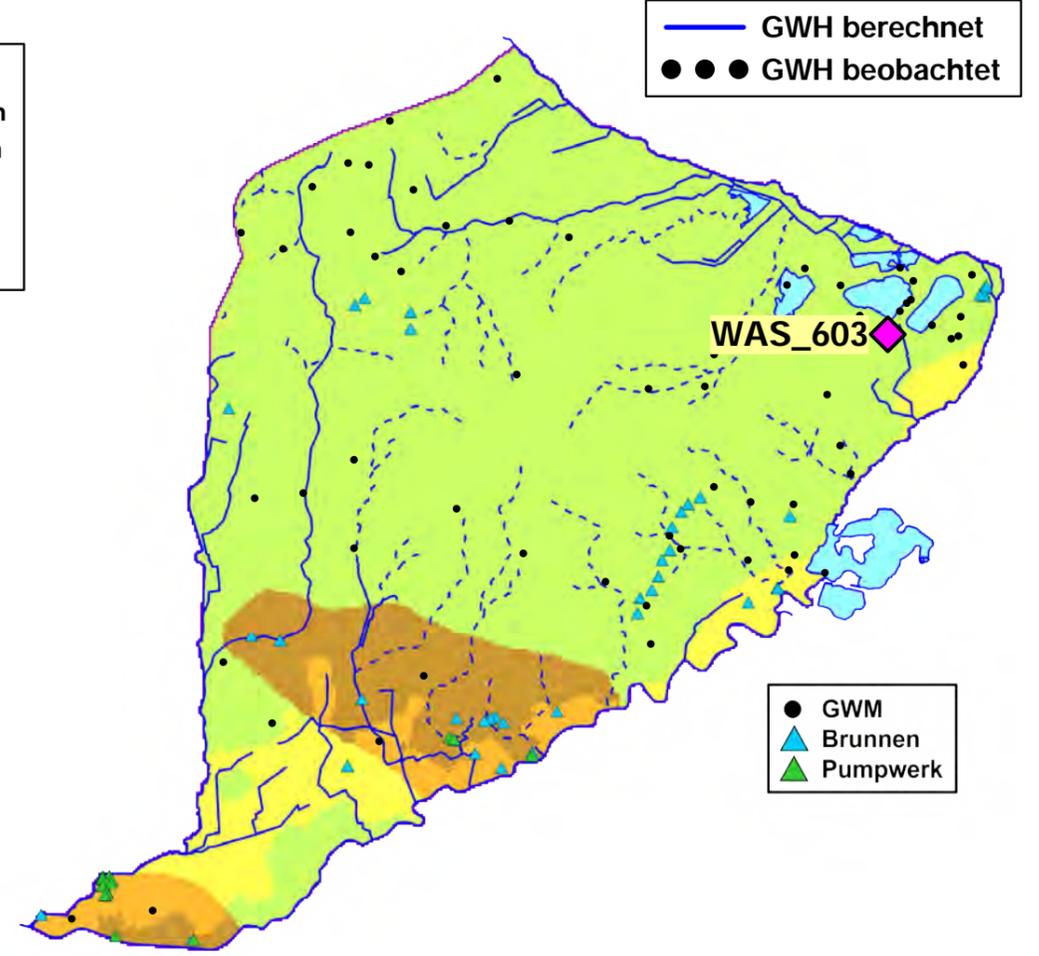
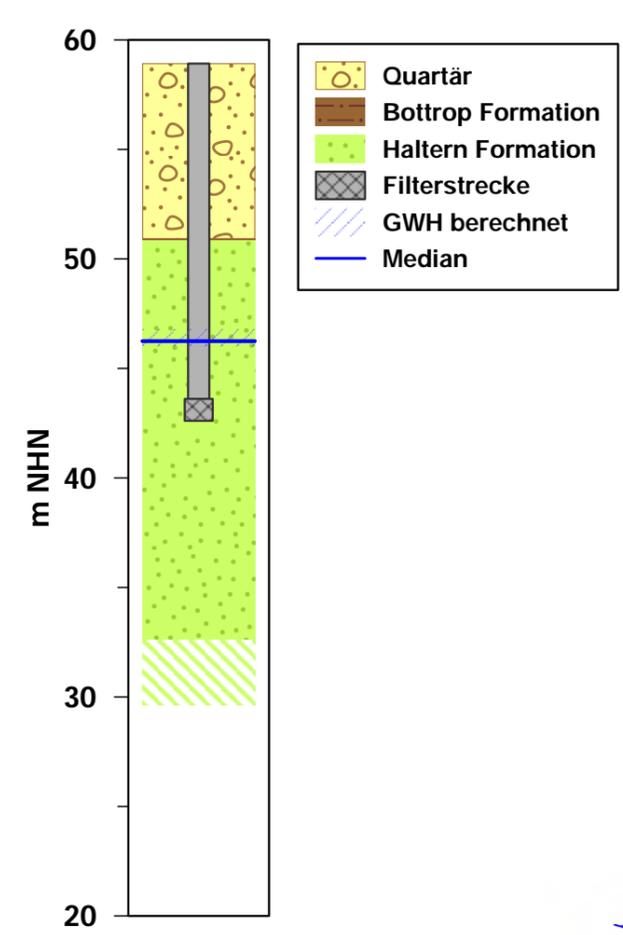
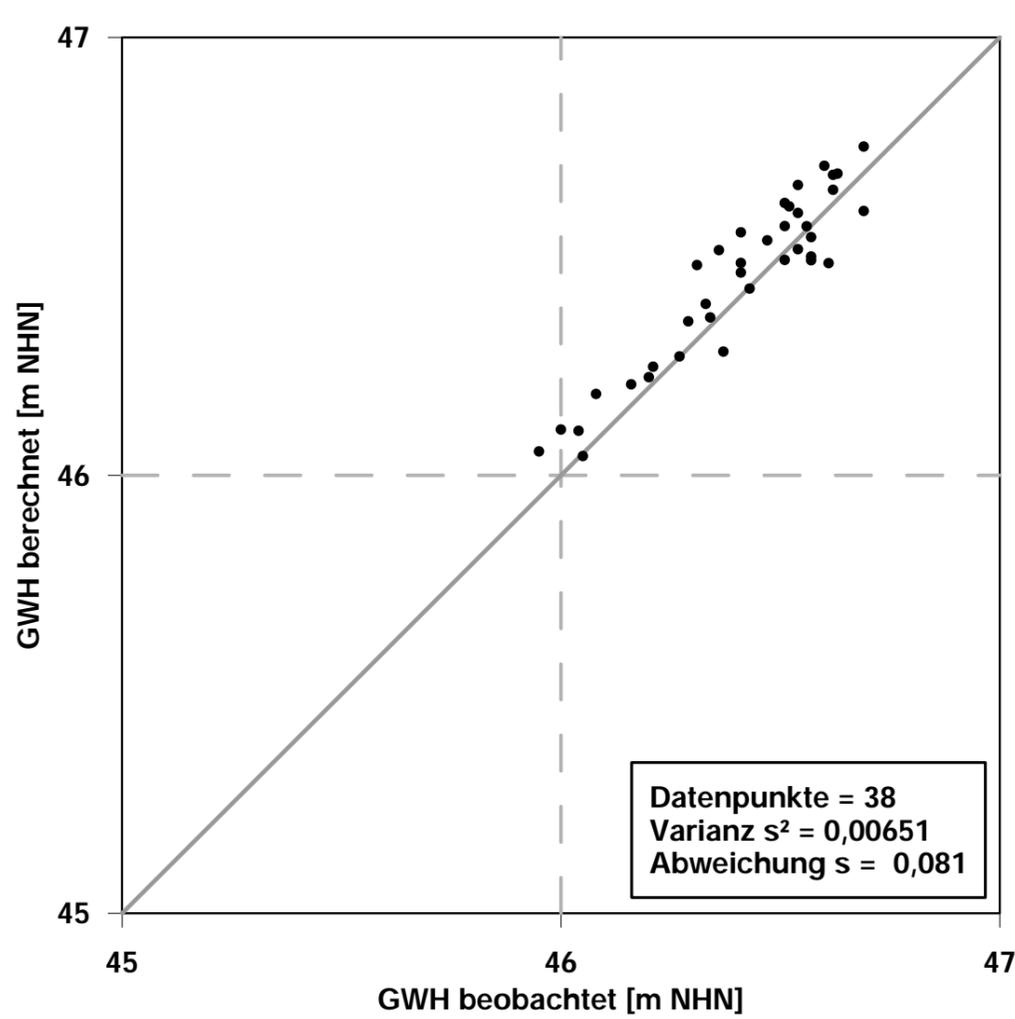
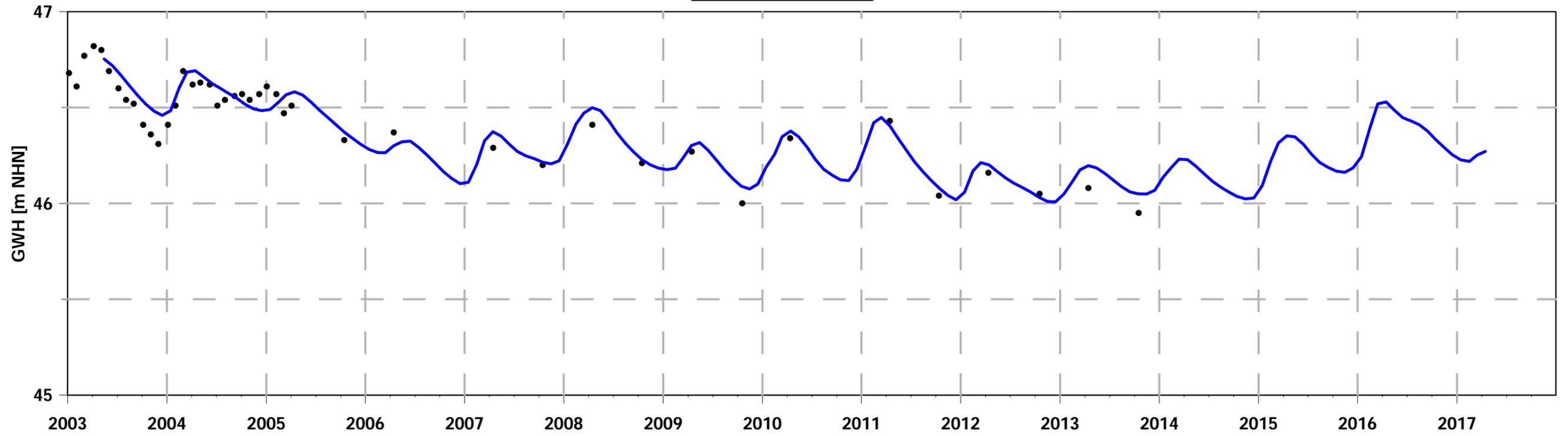
D\_43



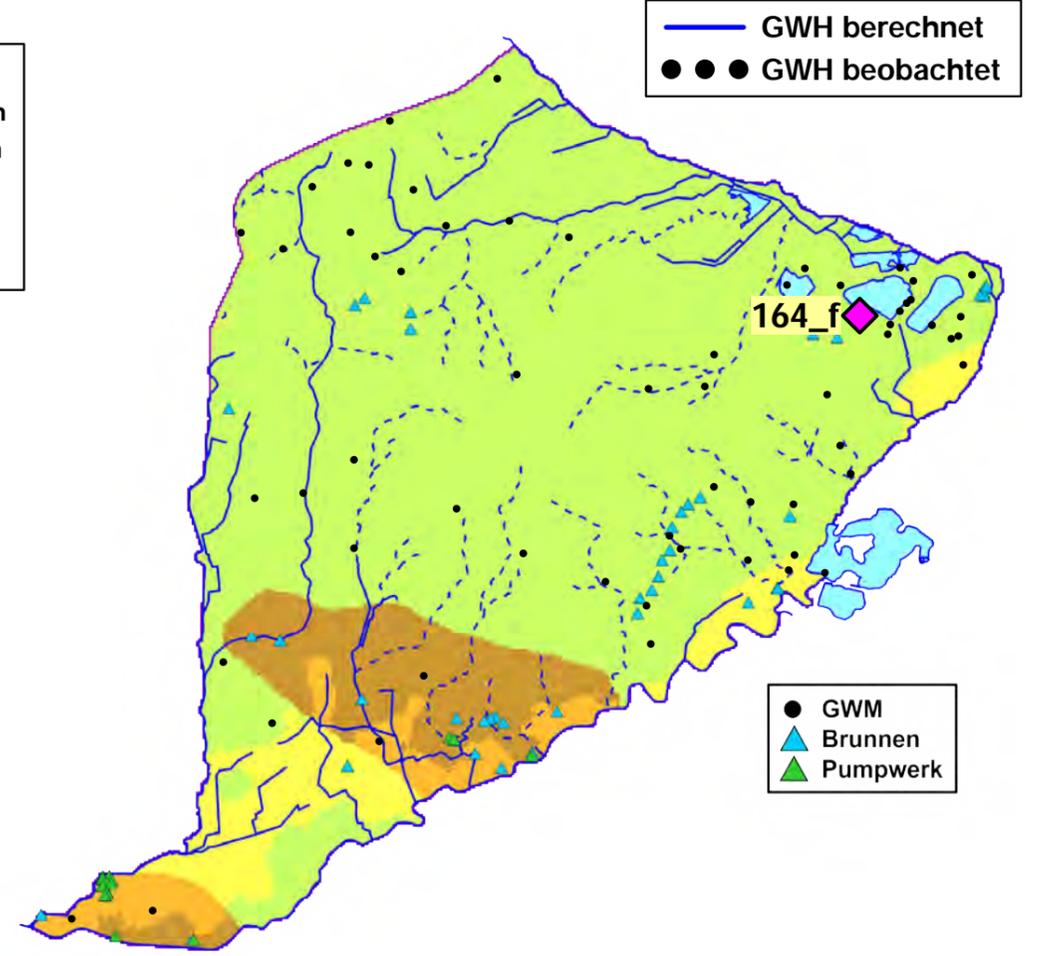
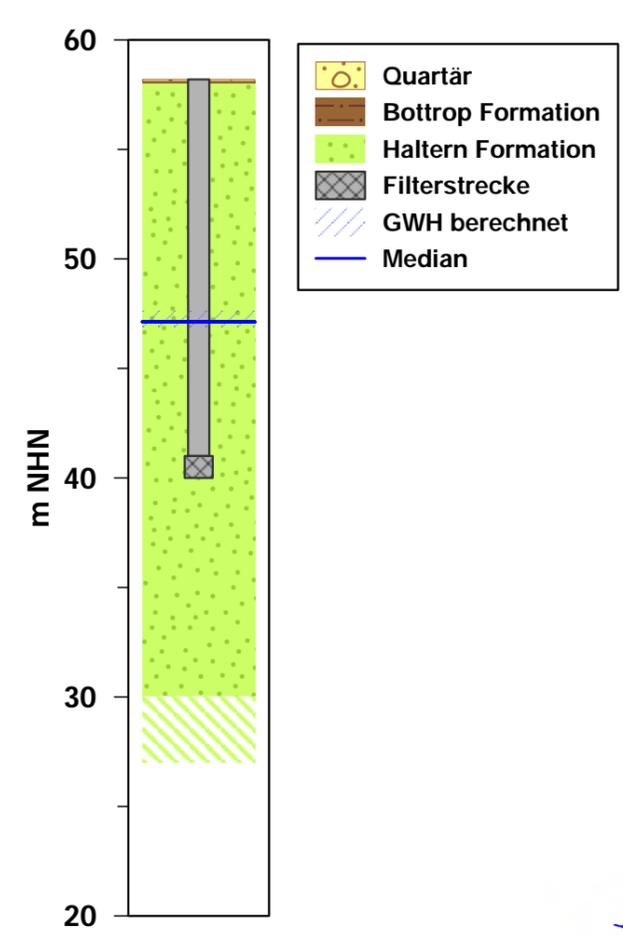
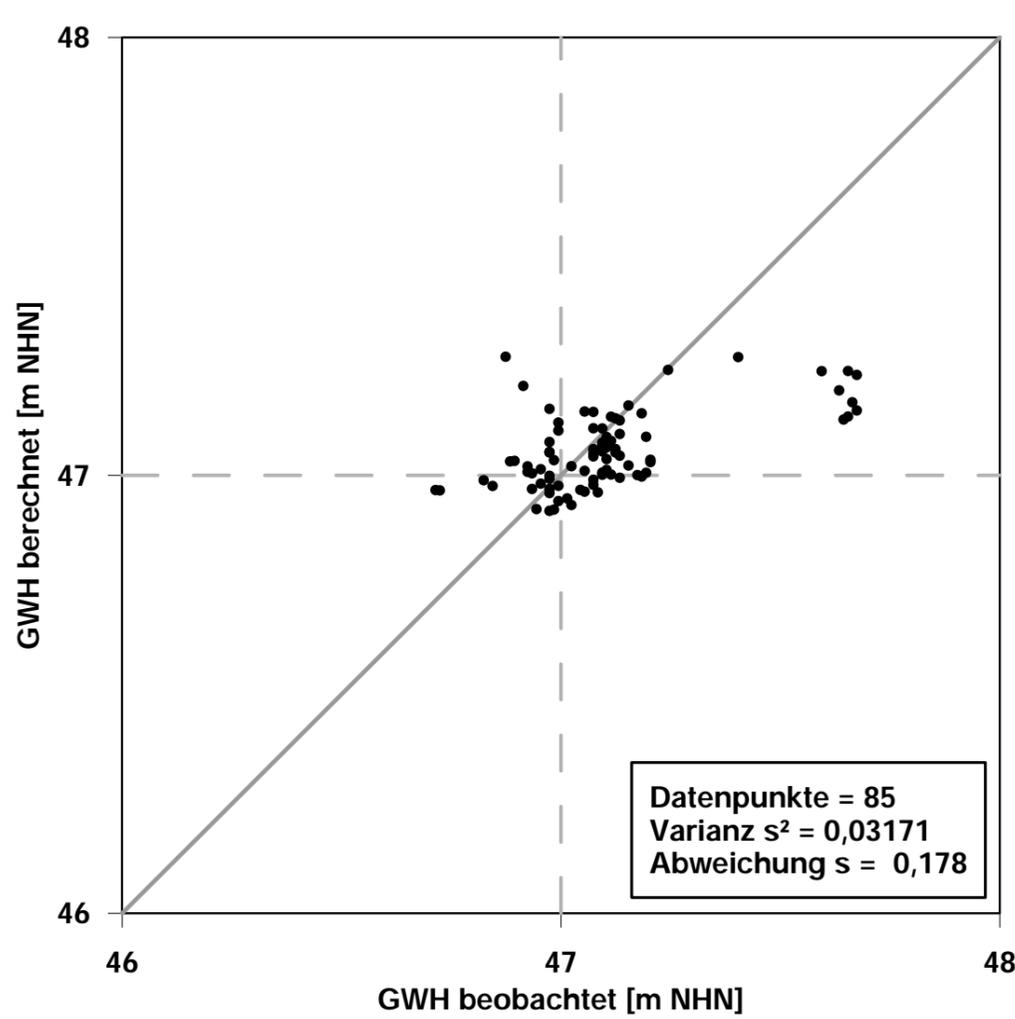
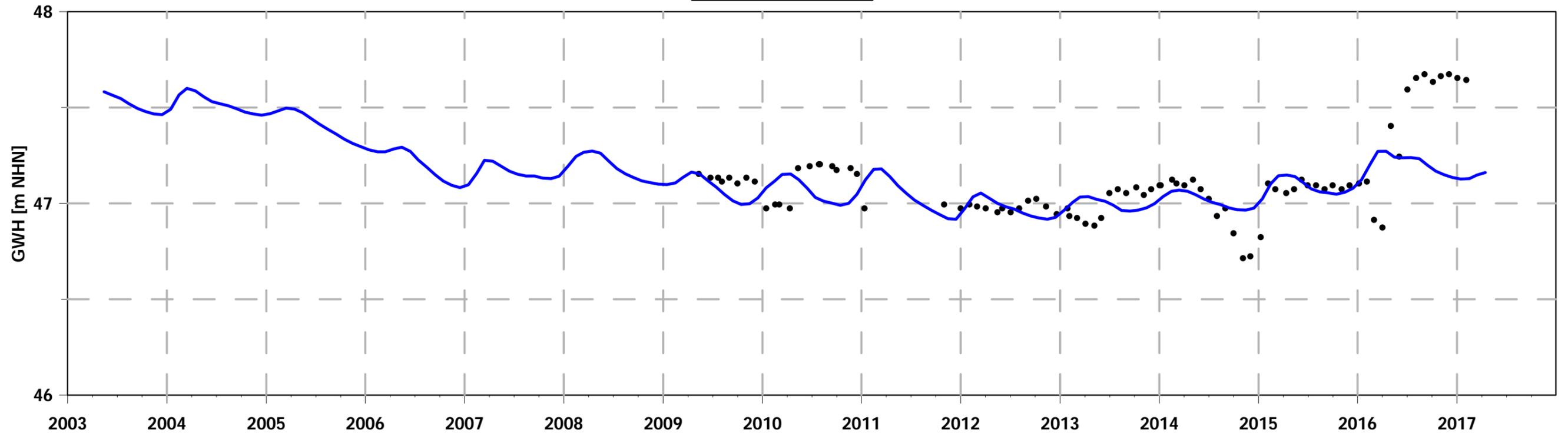
BAGG\_044



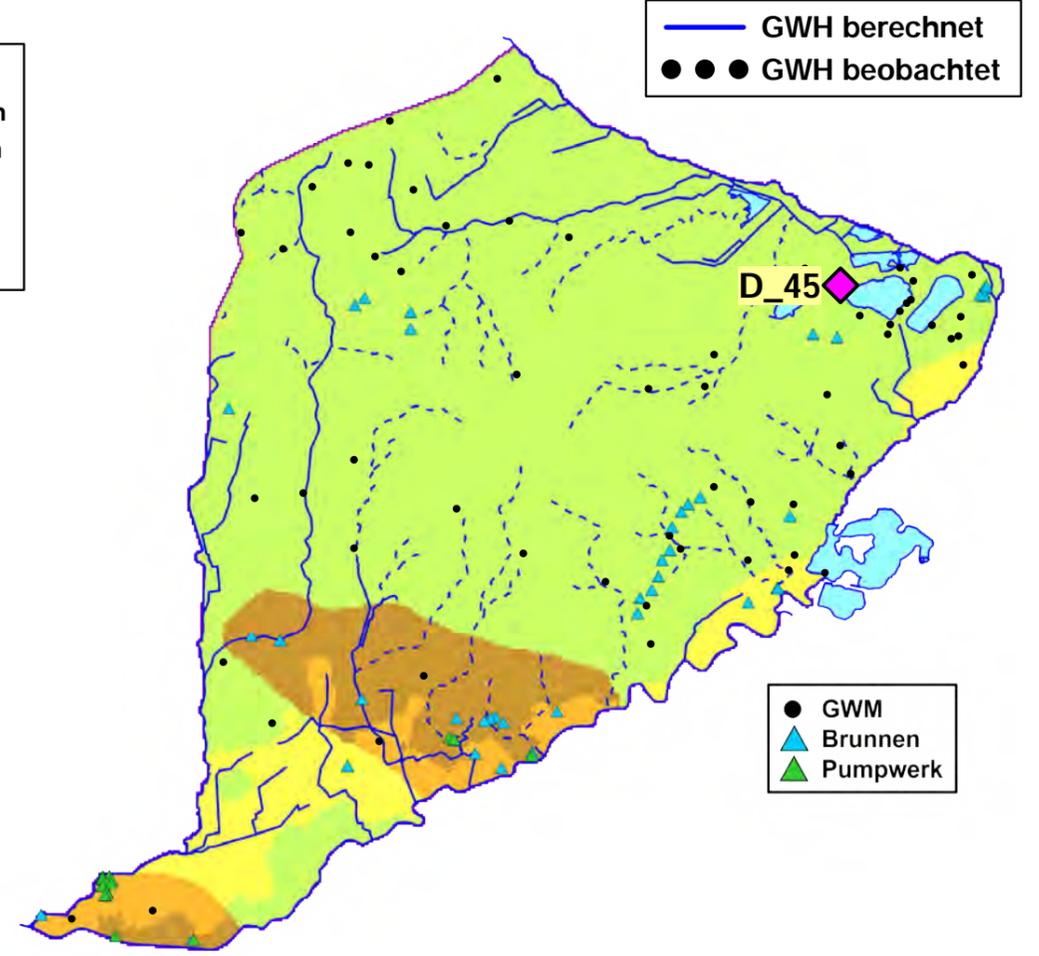
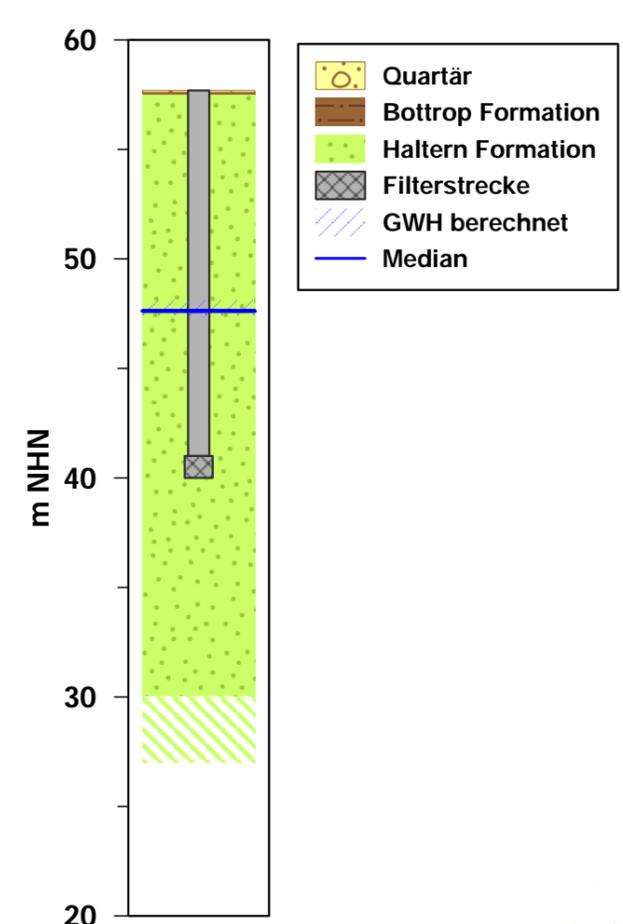
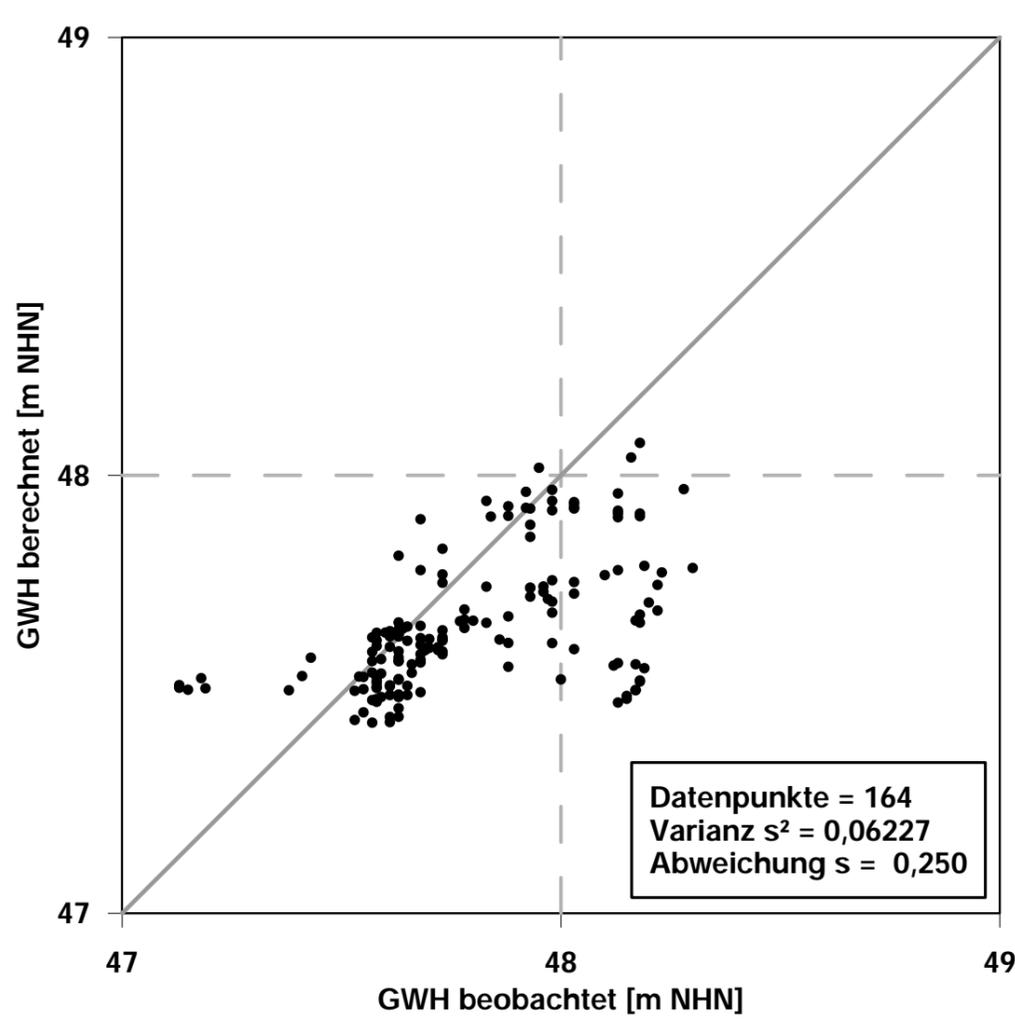
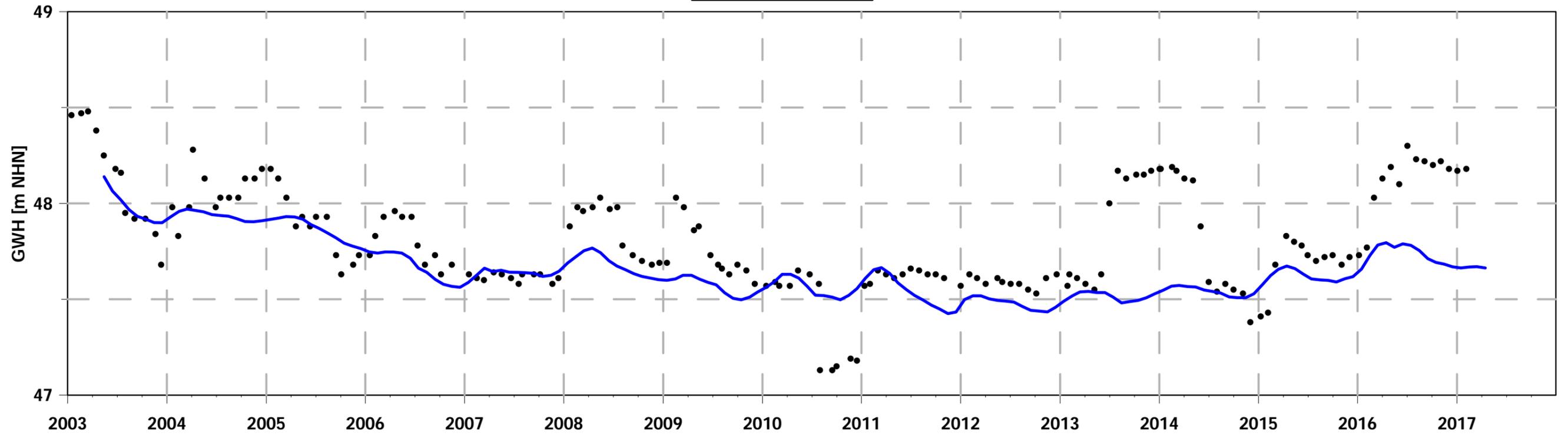
WAS\_603



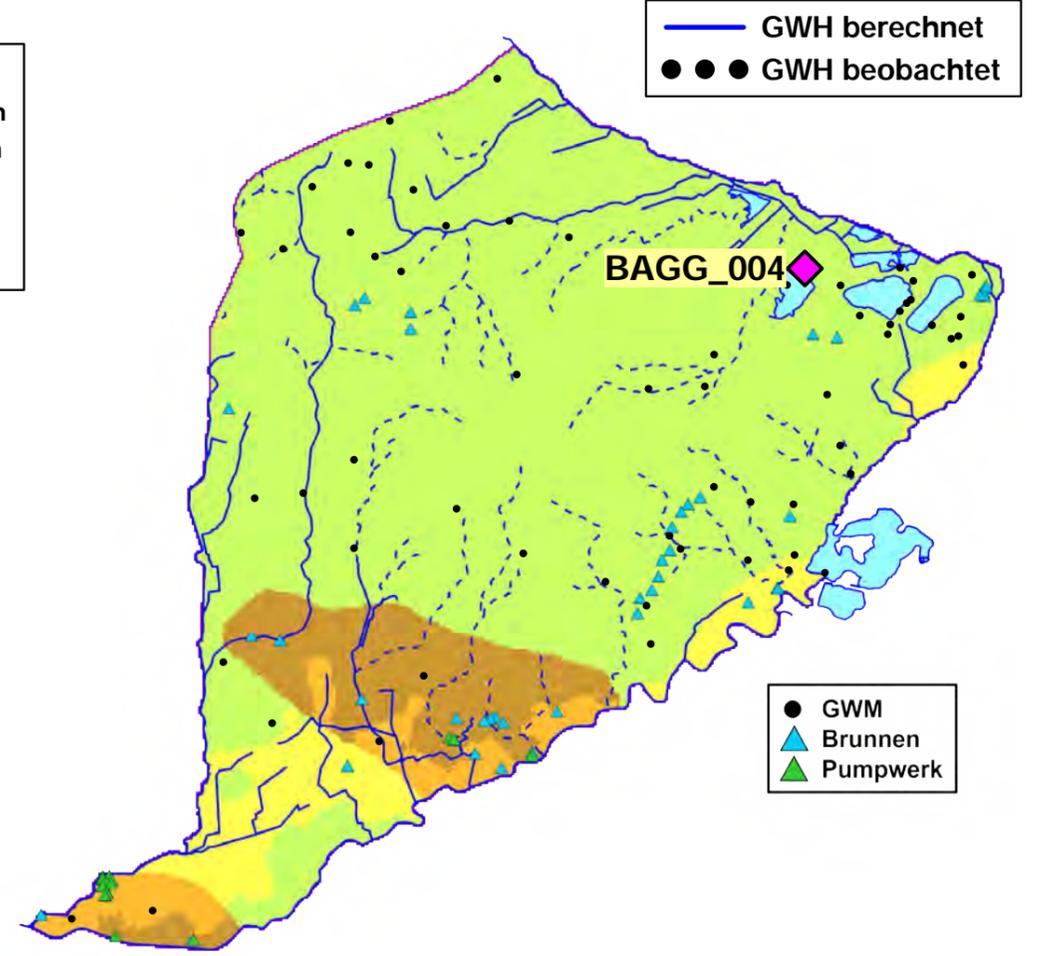
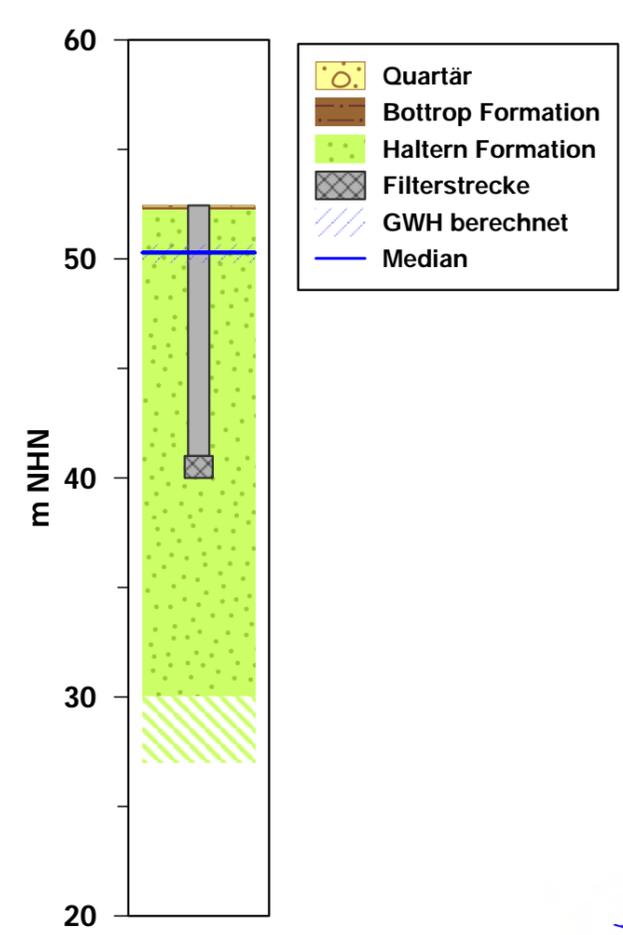
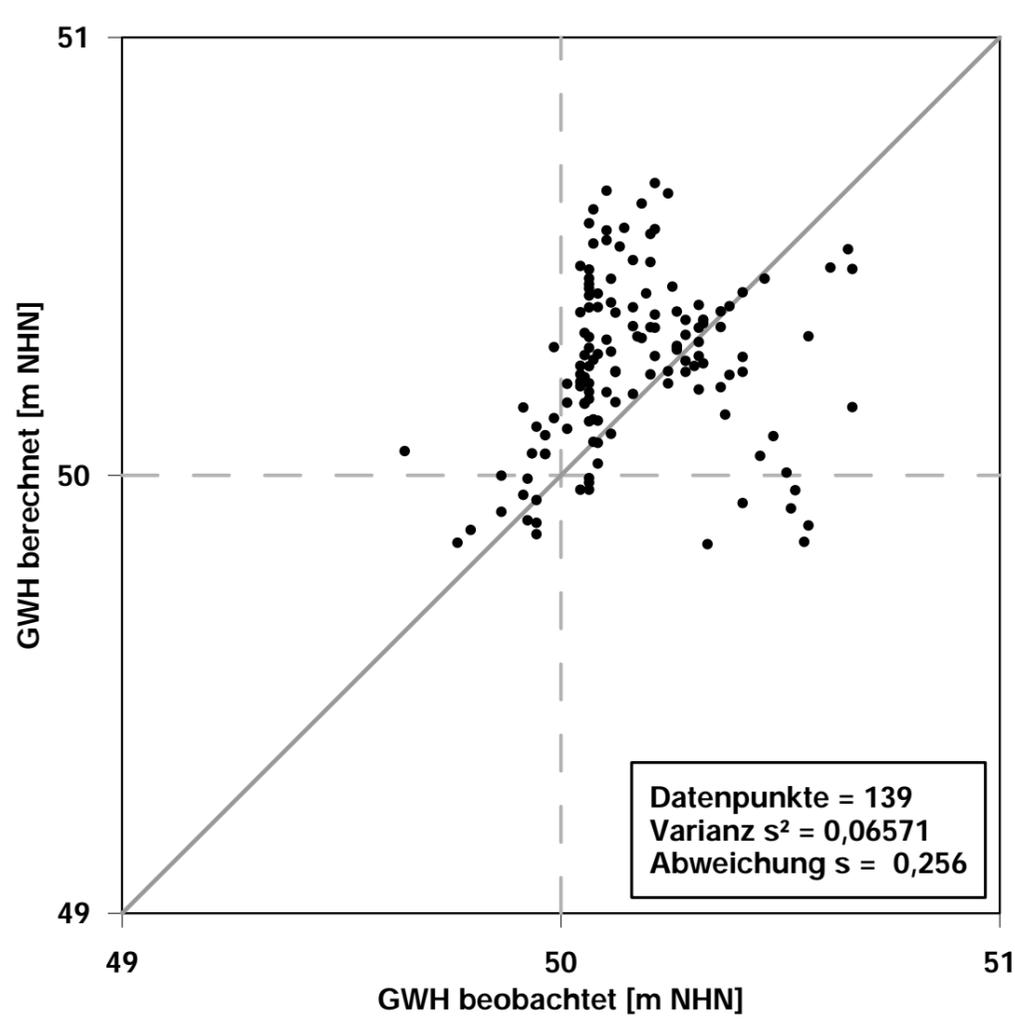
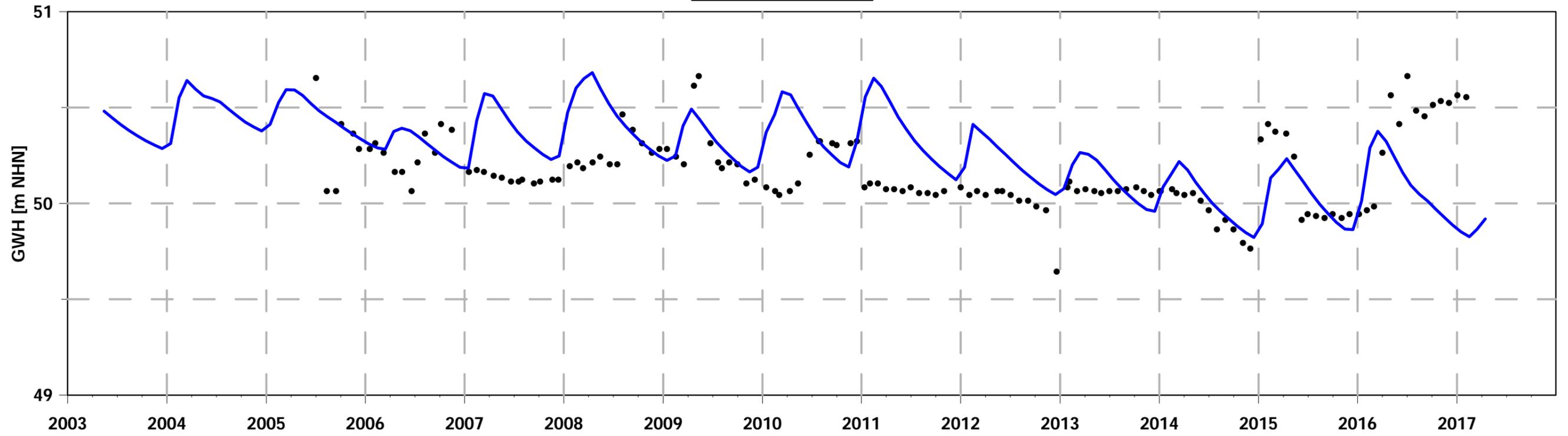
164\_f



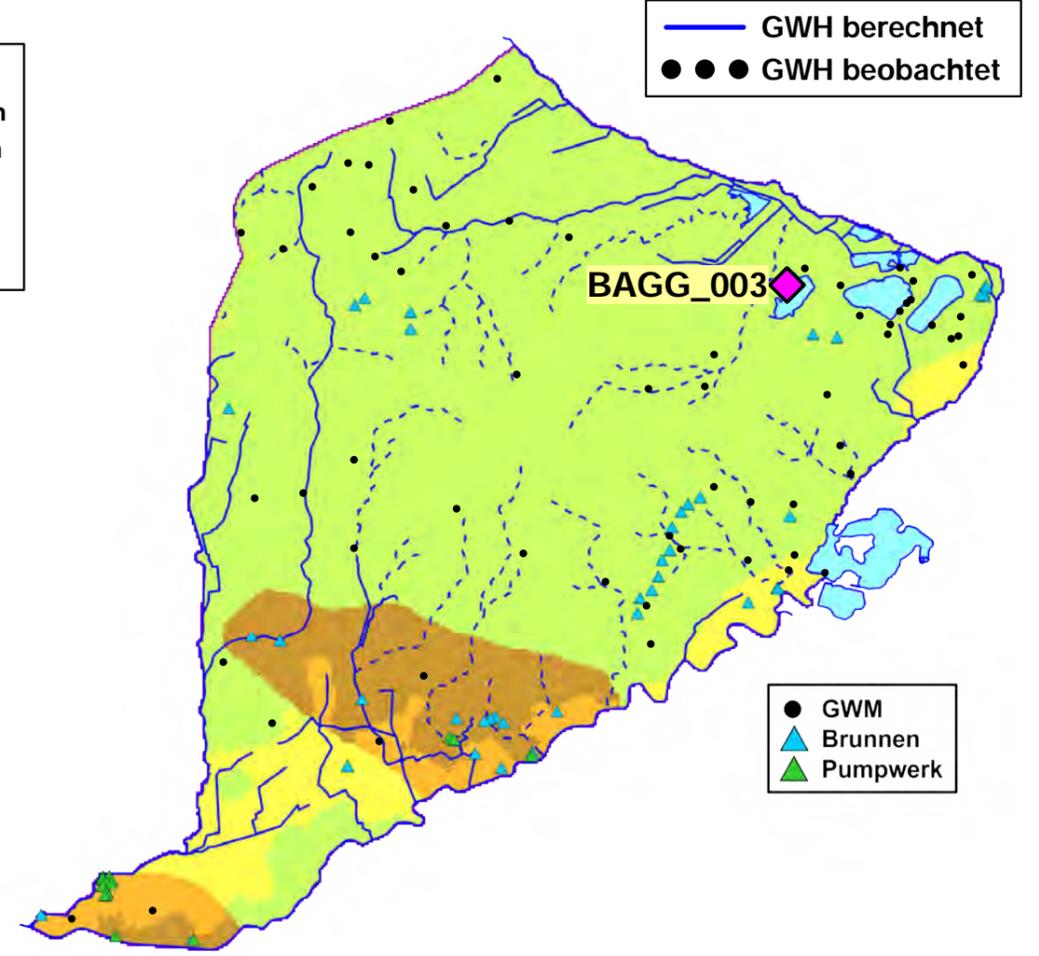
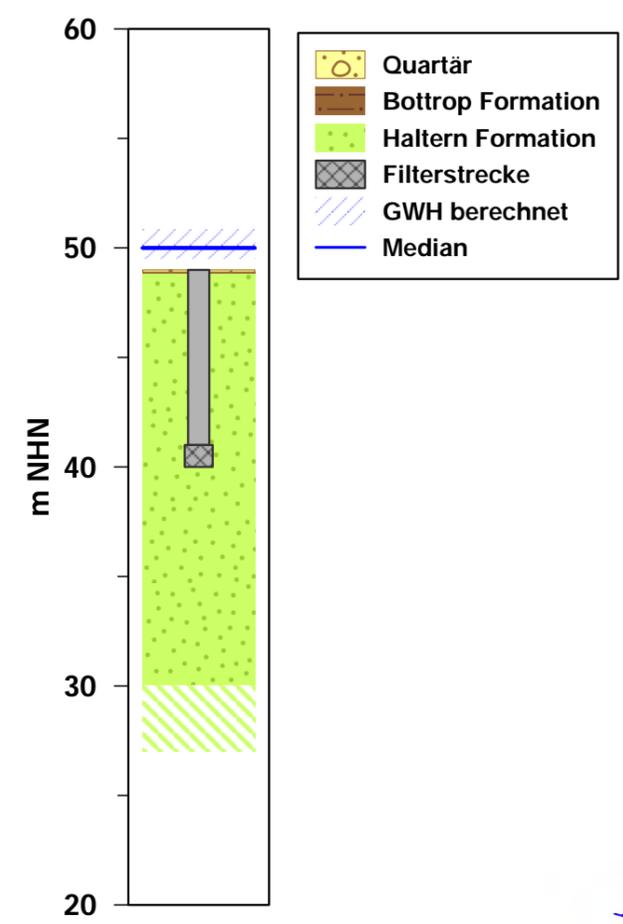
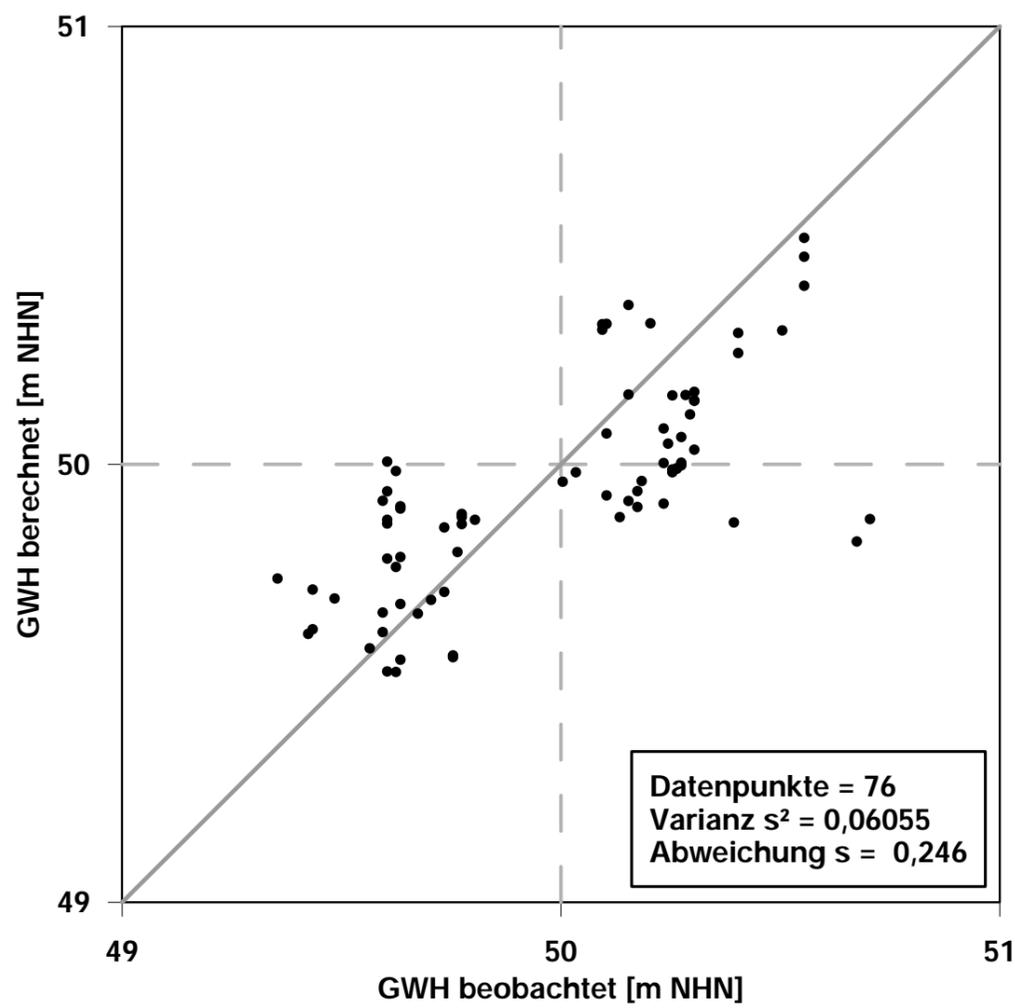
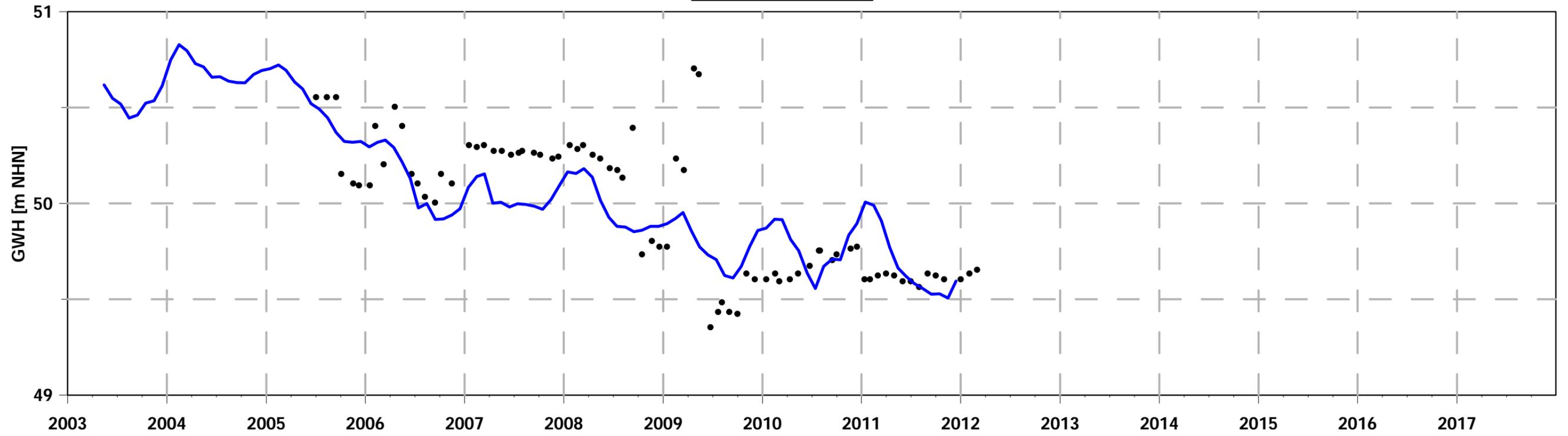
D\_45



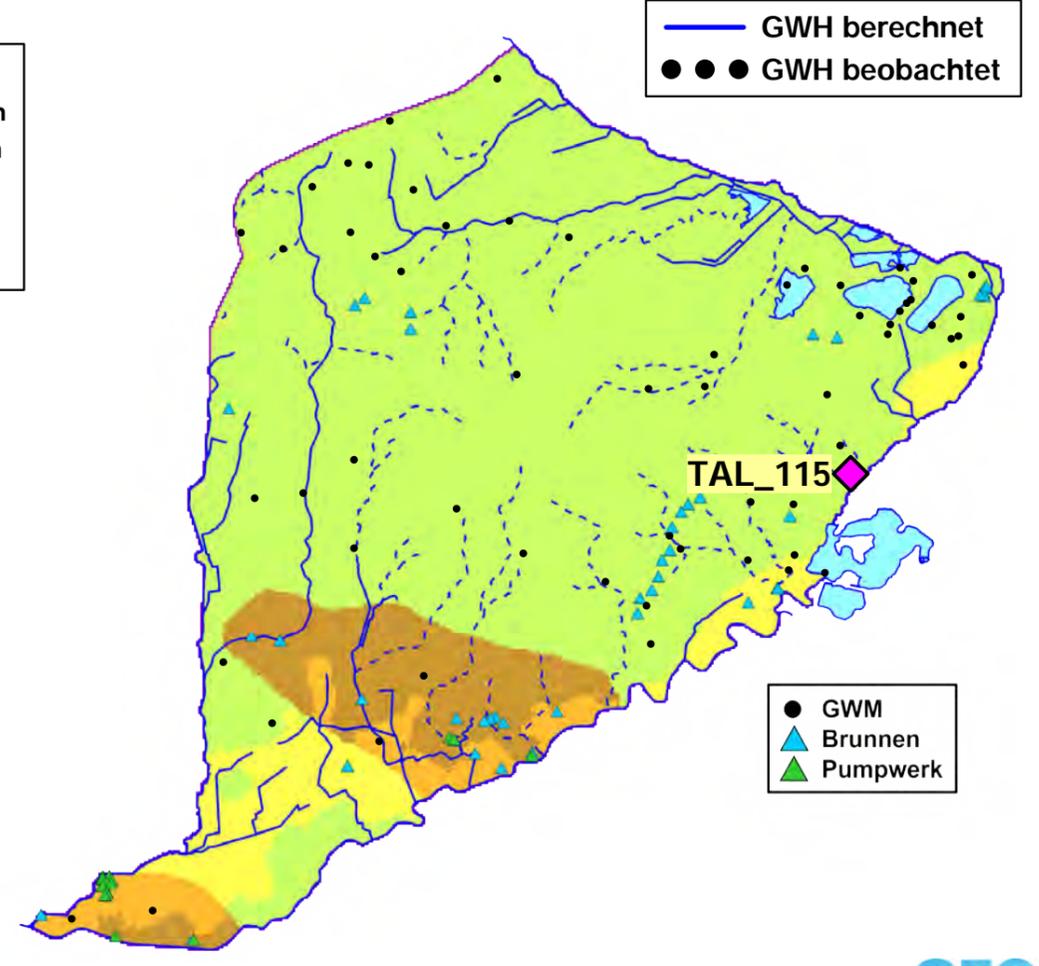
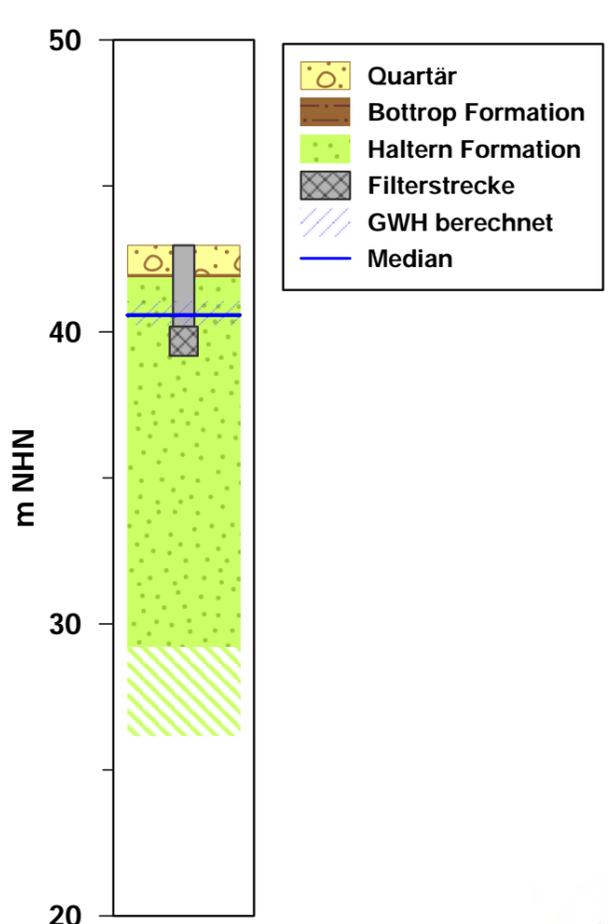
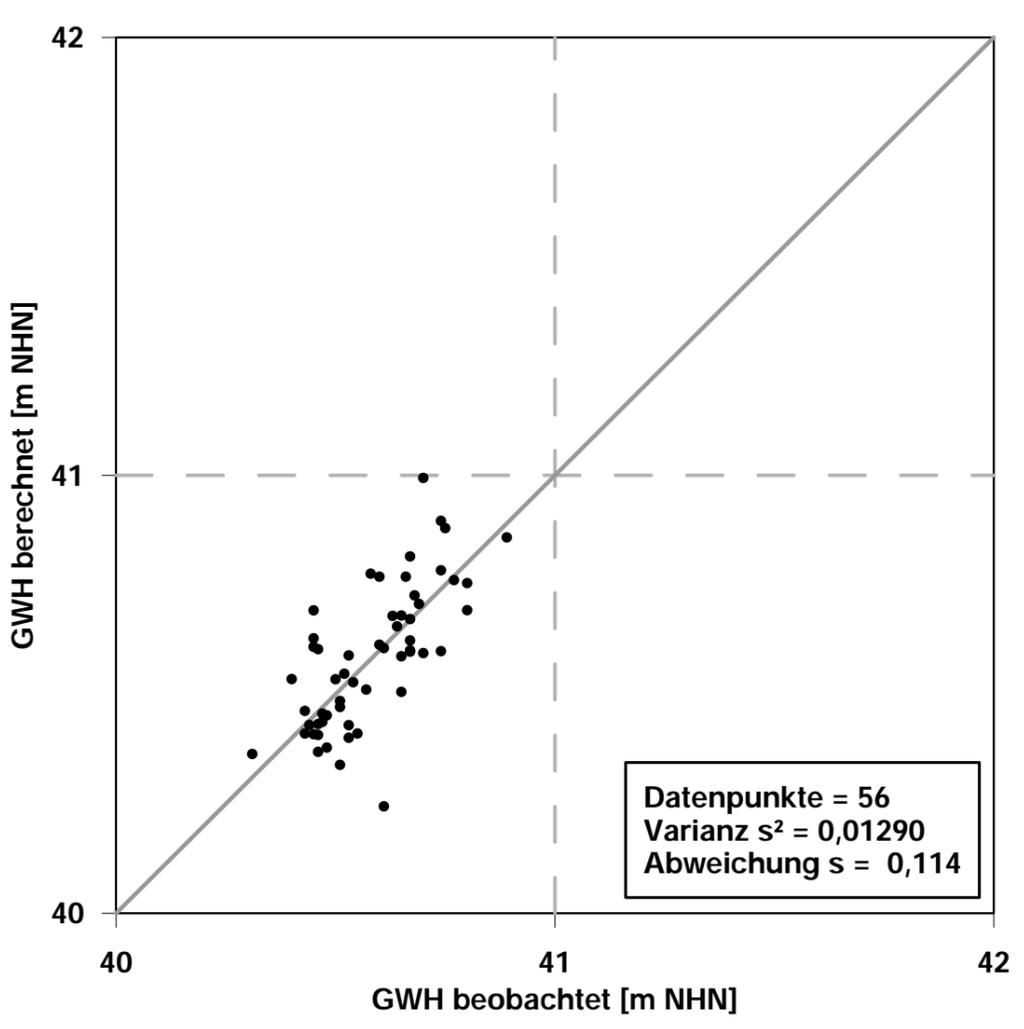
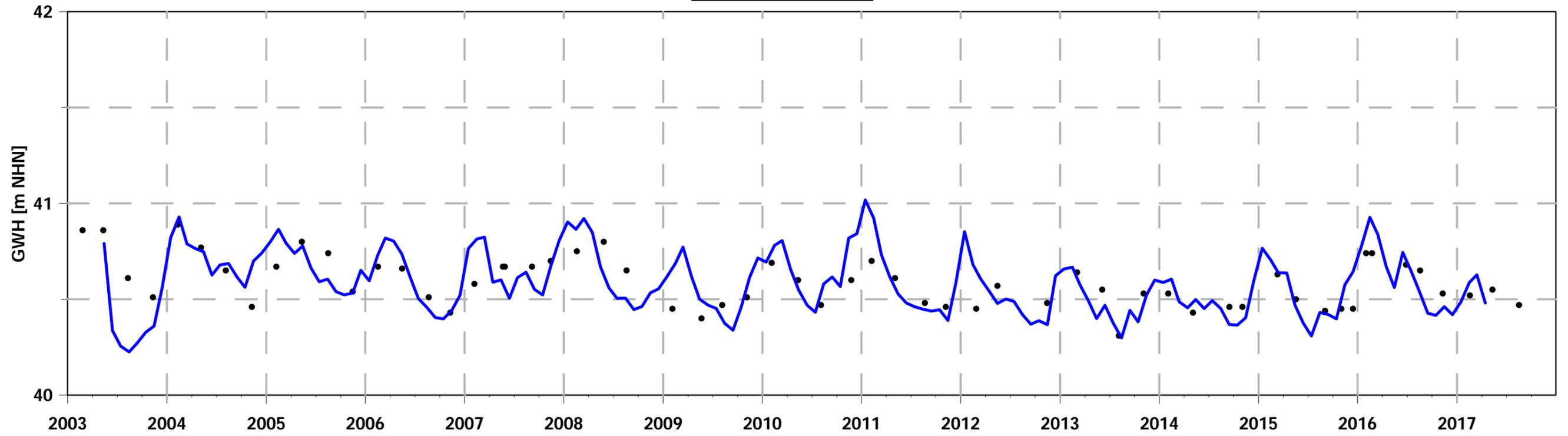
BAGG\_004



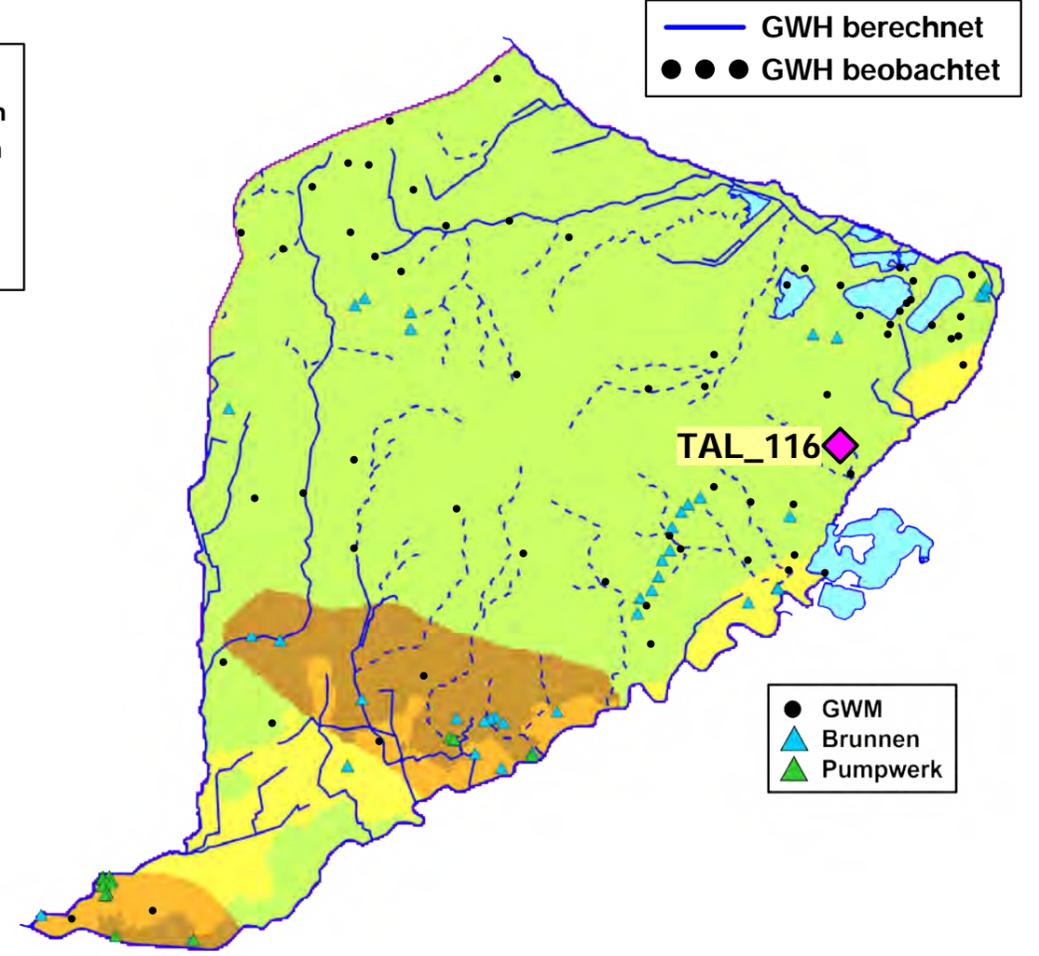
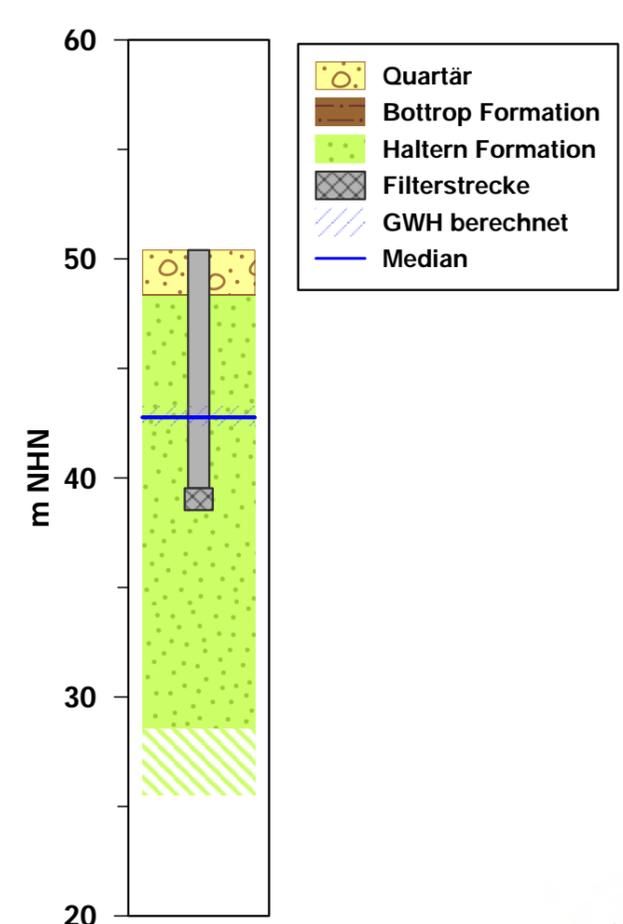
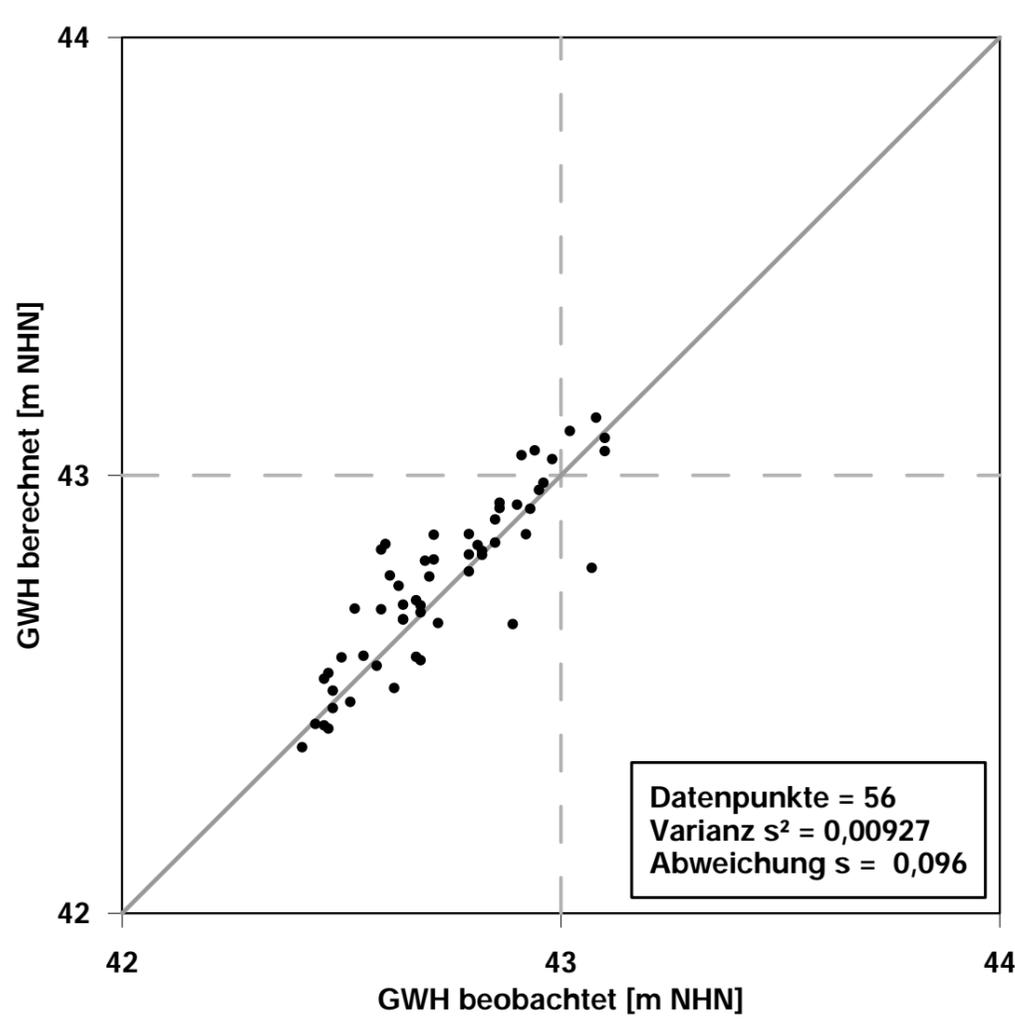
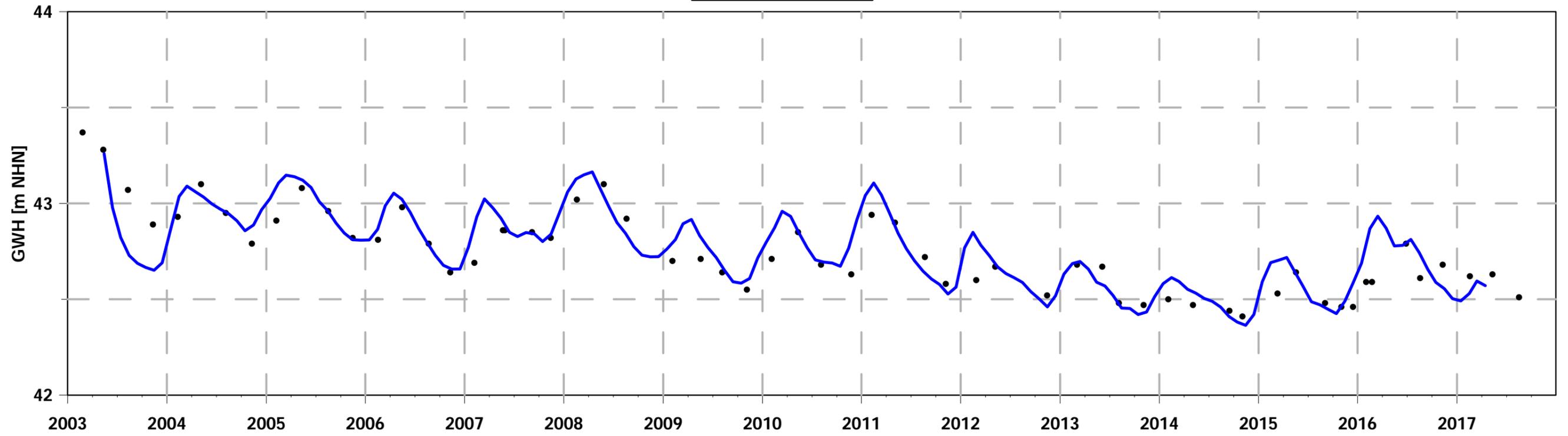
BAGG\_003



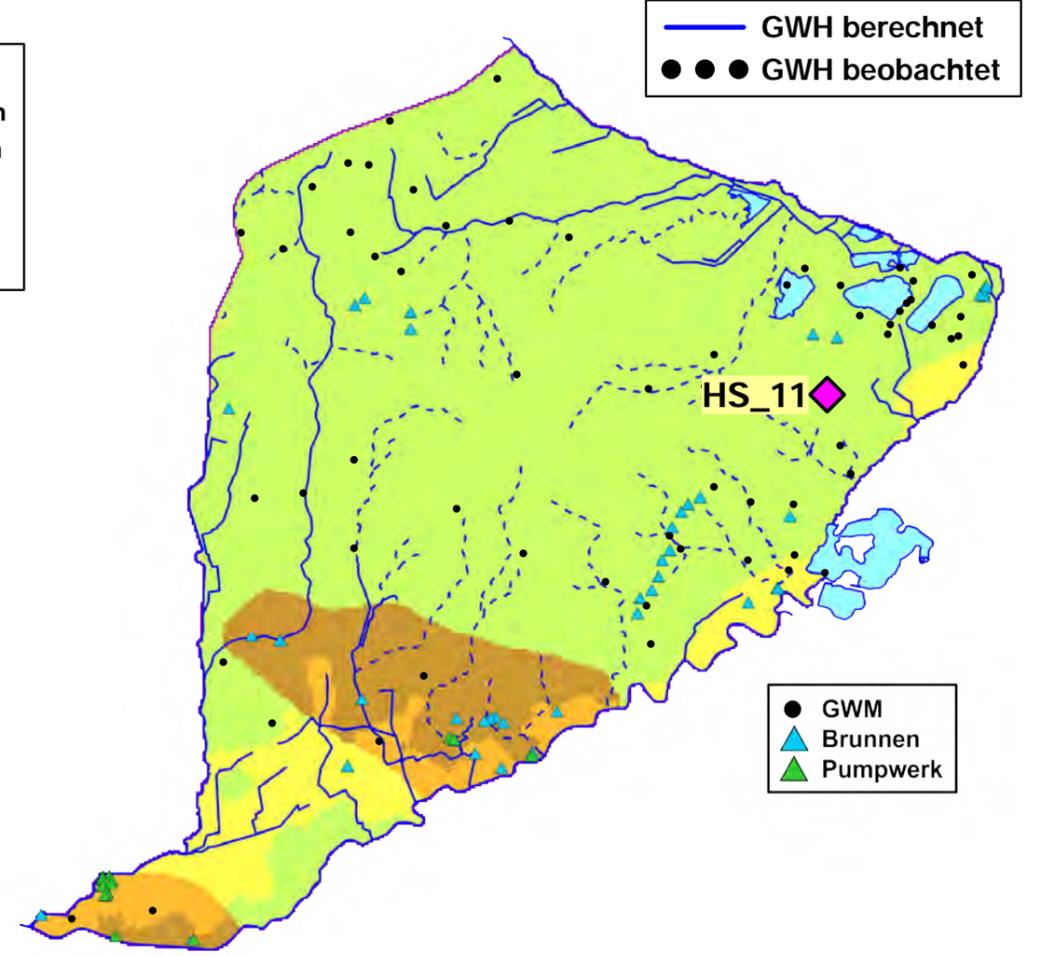
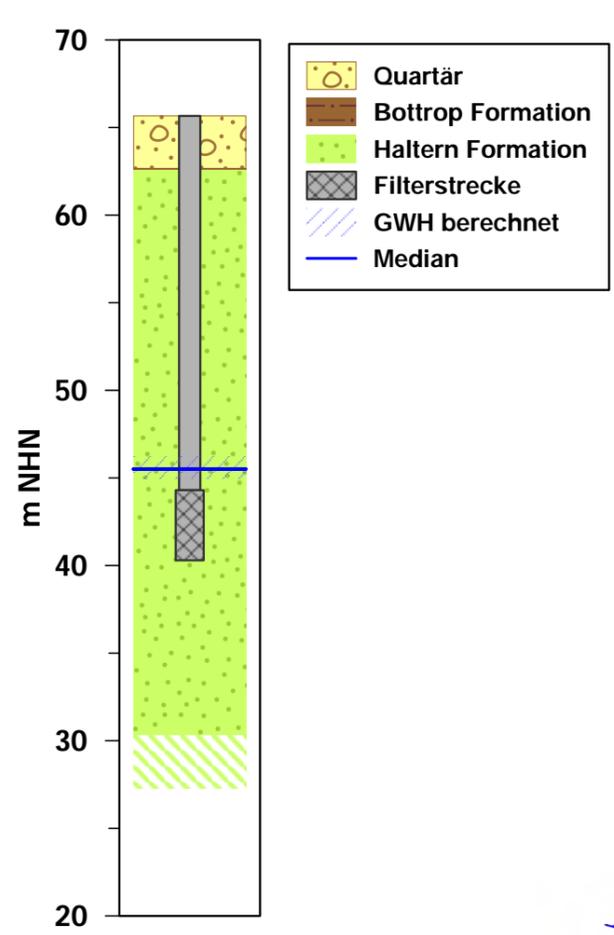
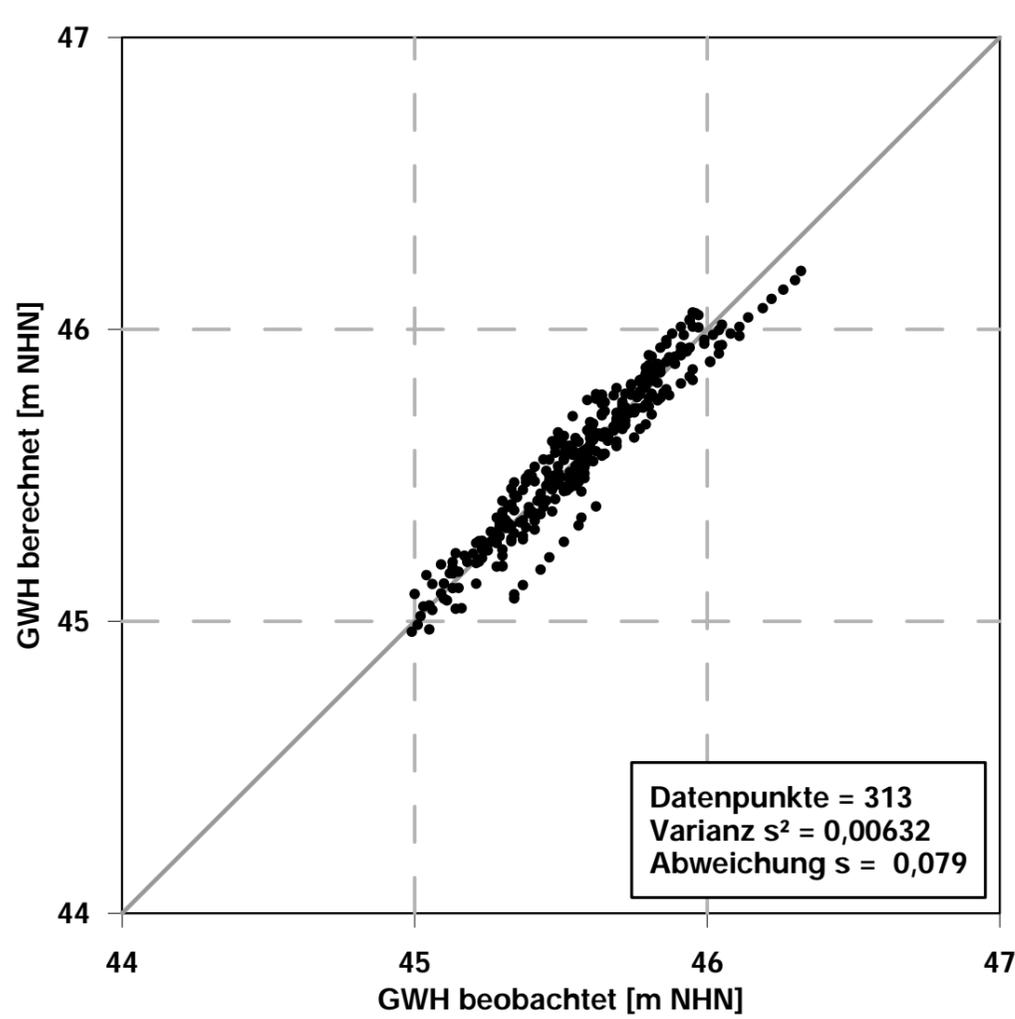
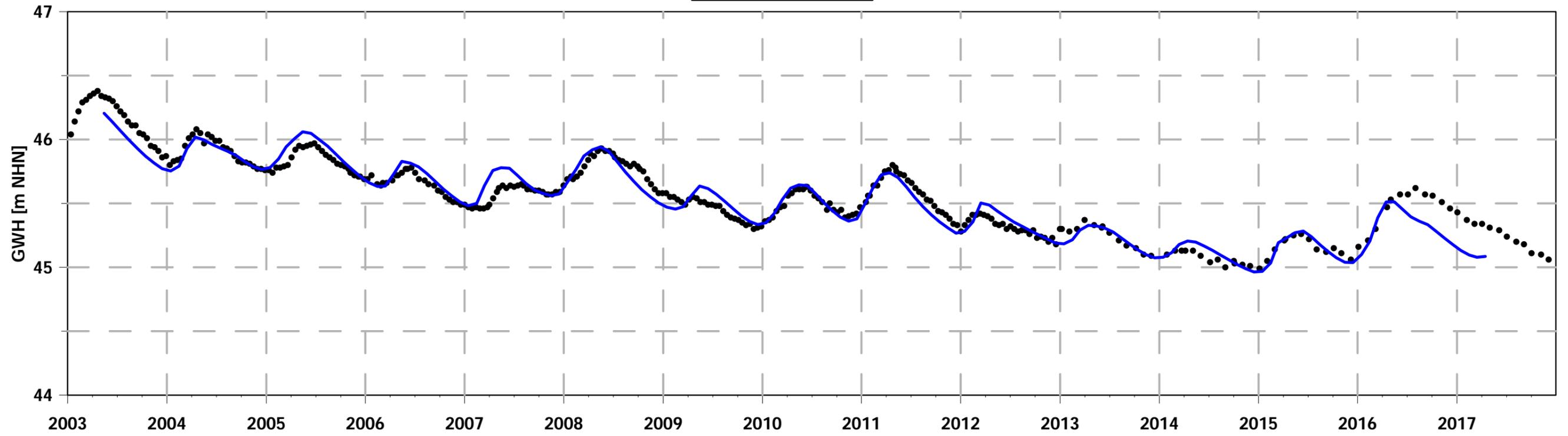
TAL\_115



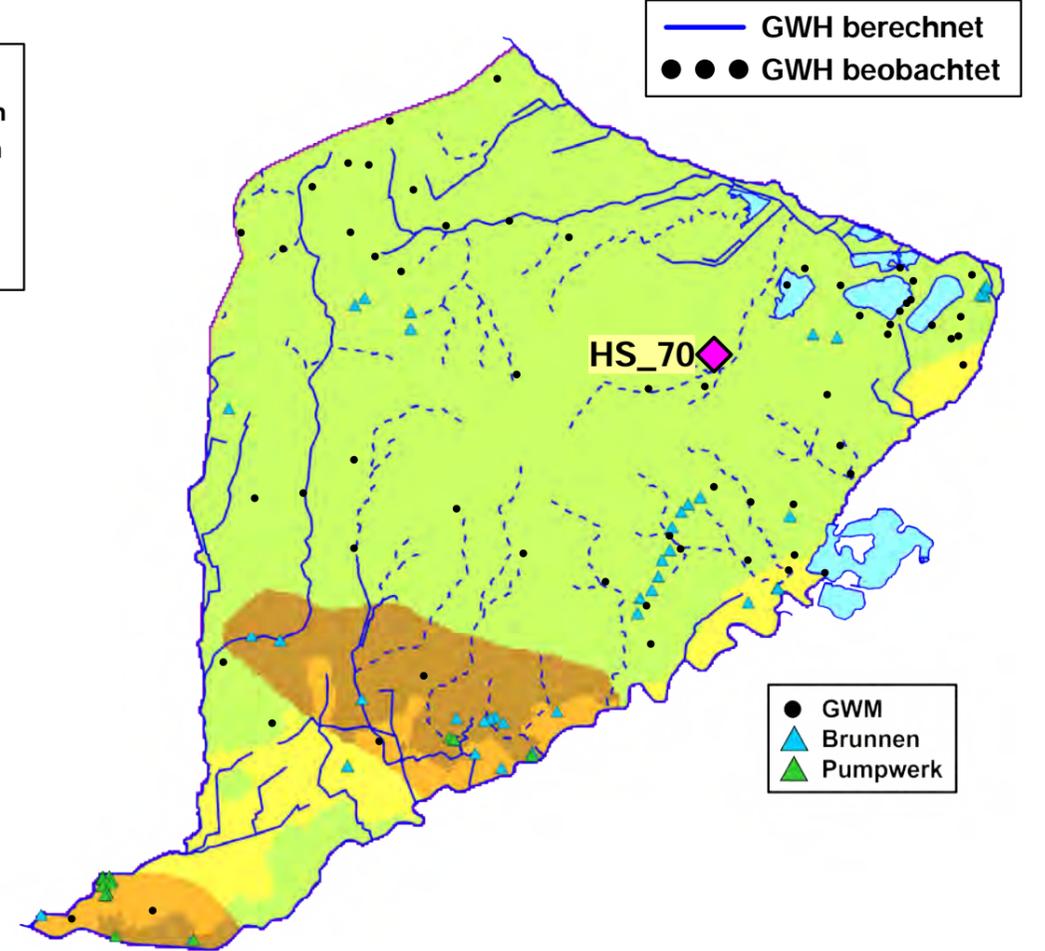
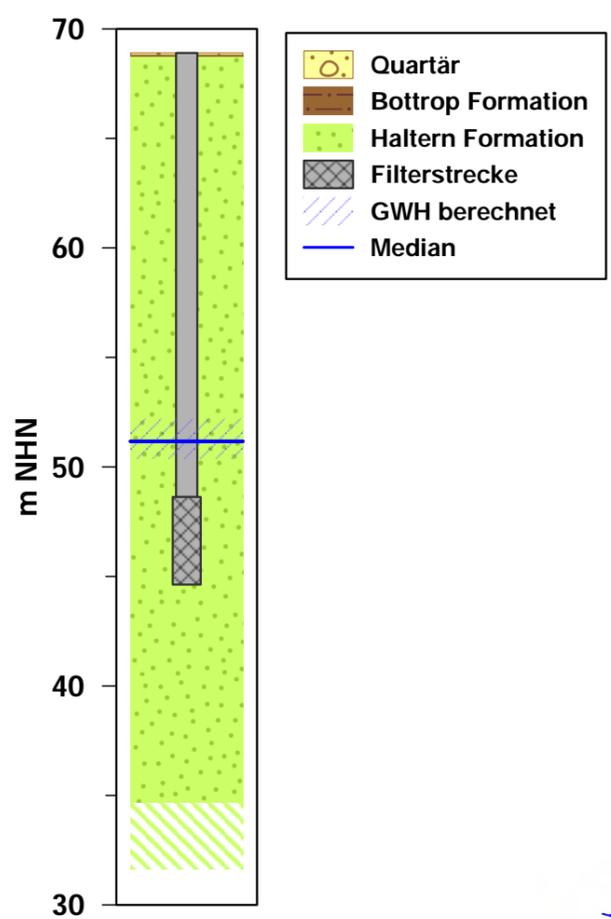
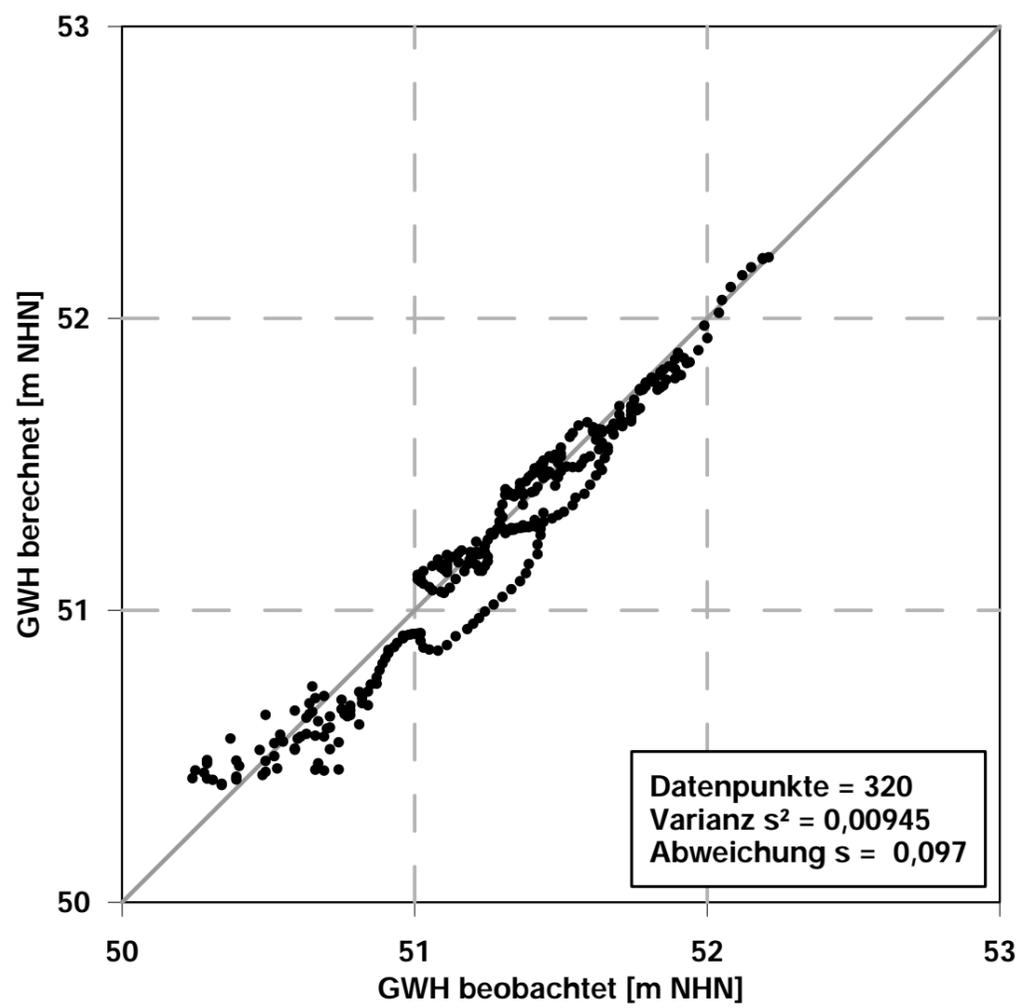
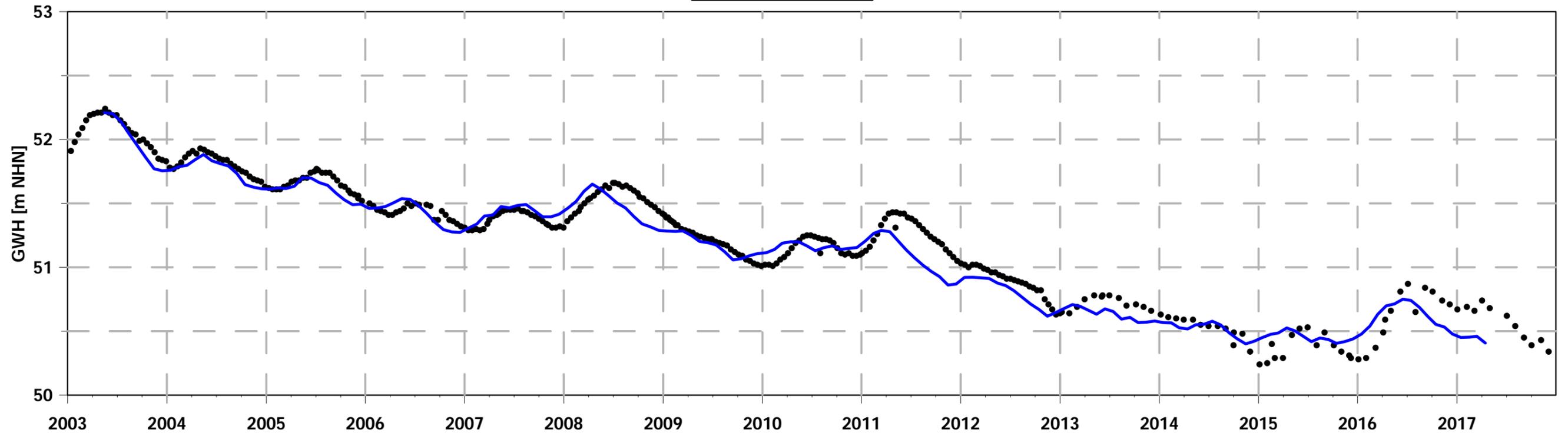
TAL\_116



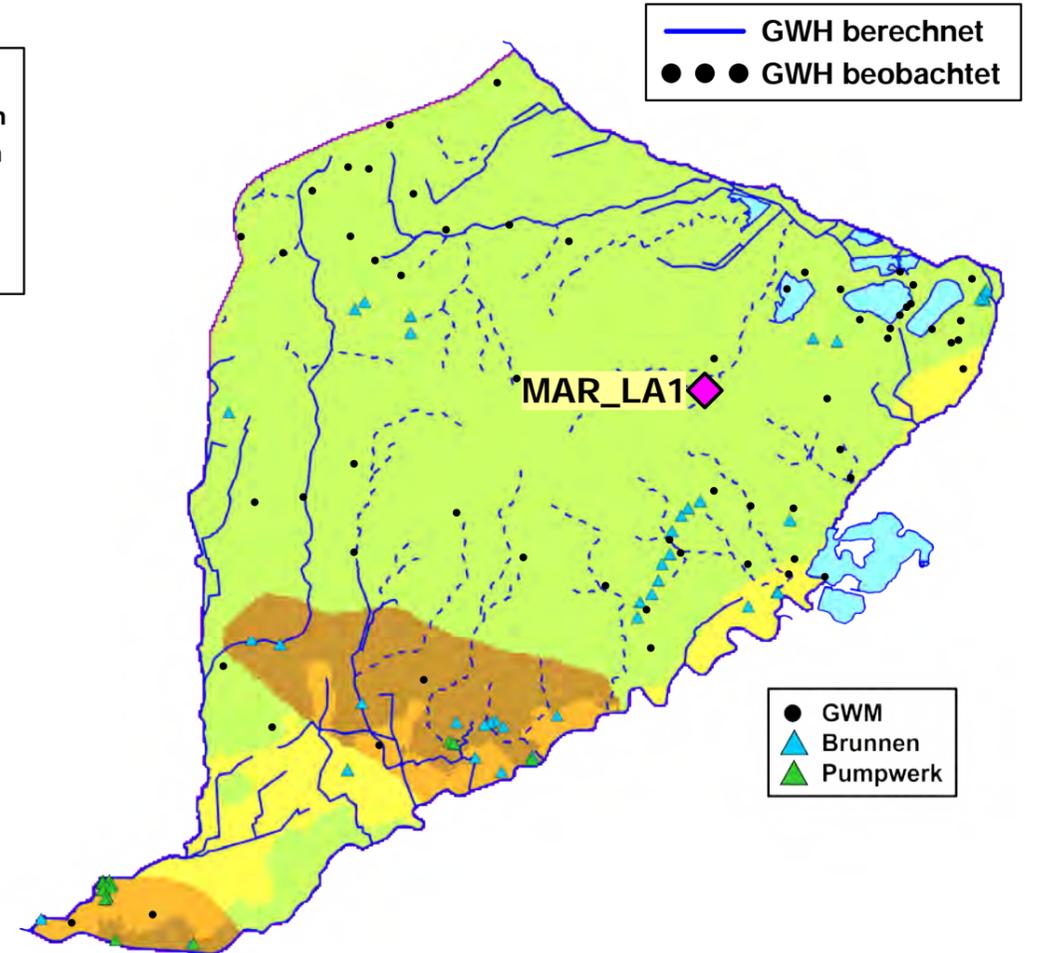
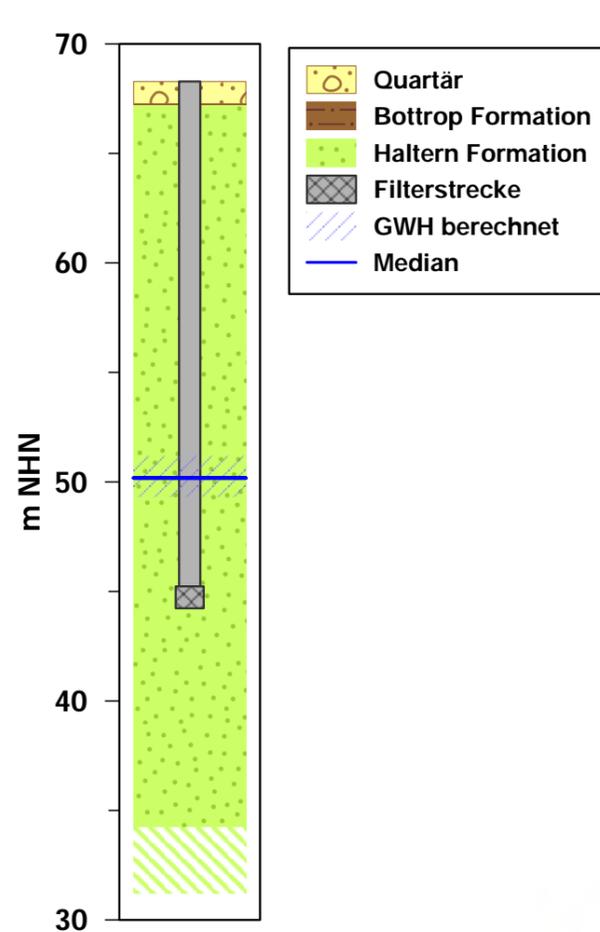
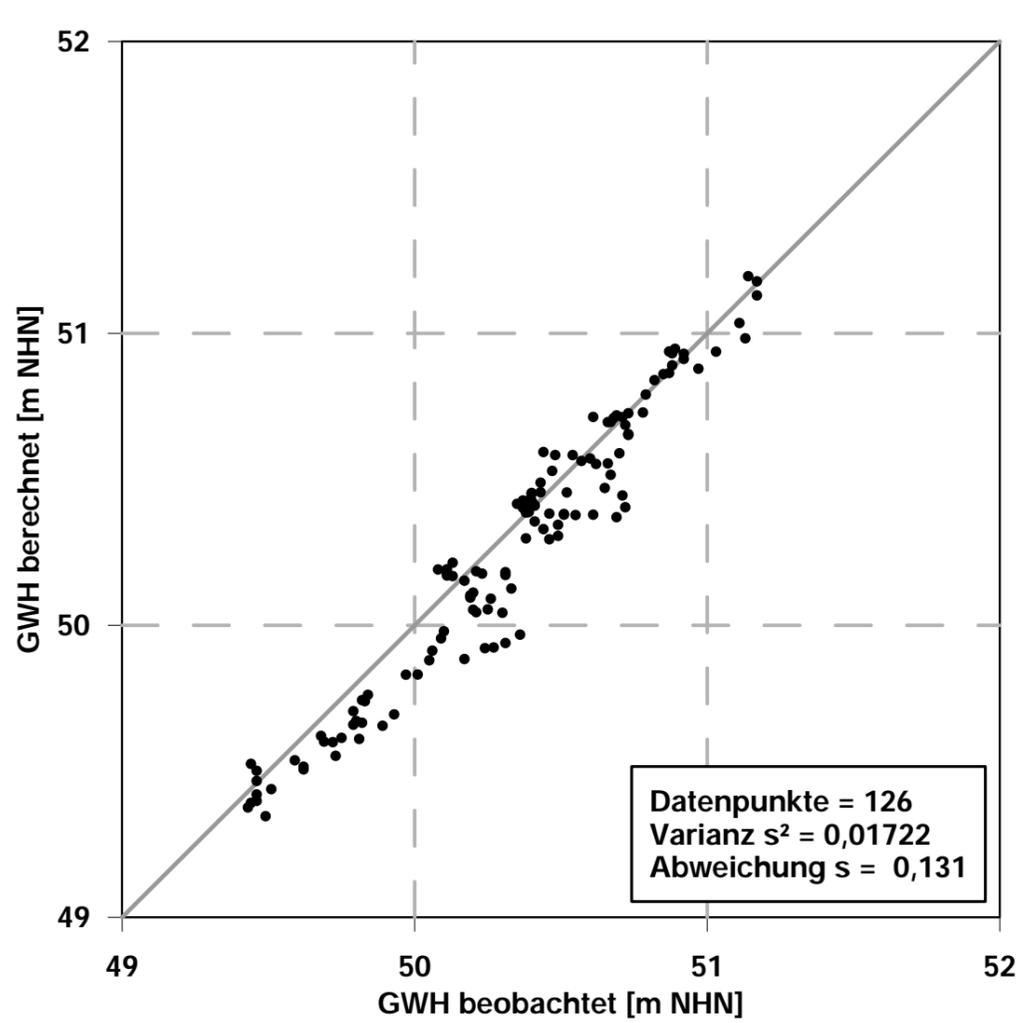
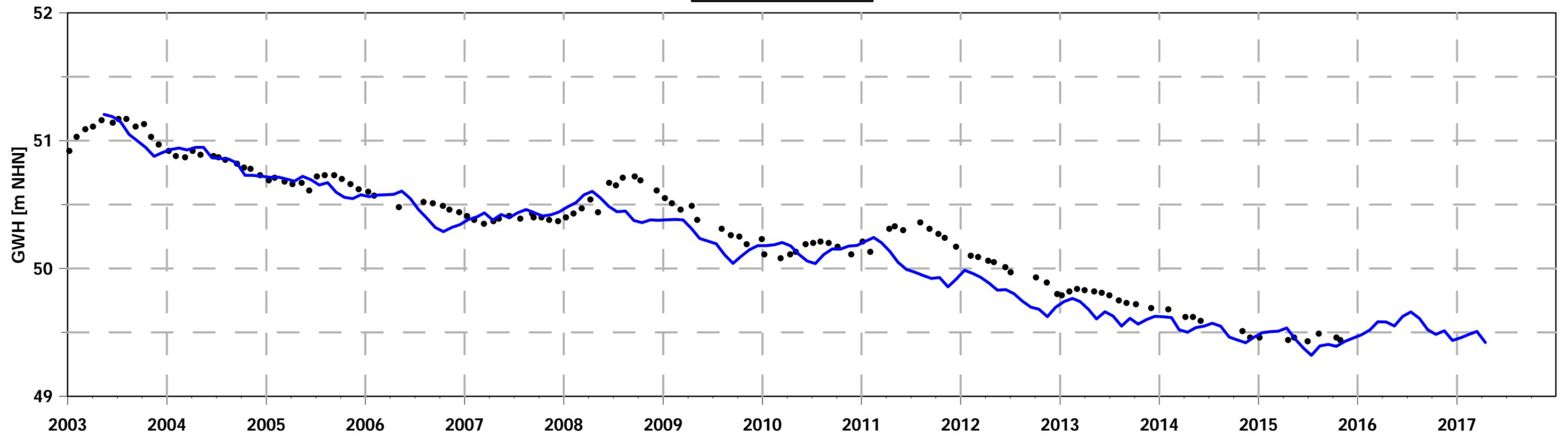
HS\_11



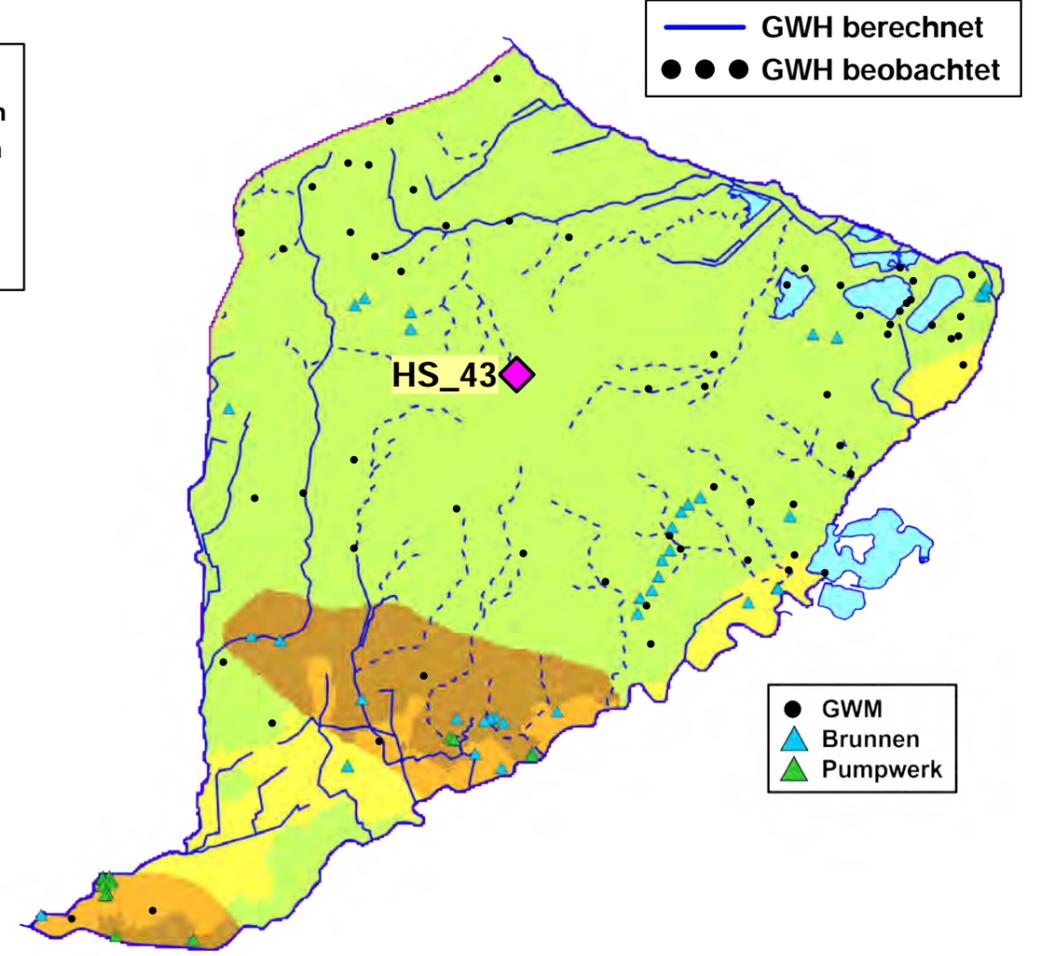
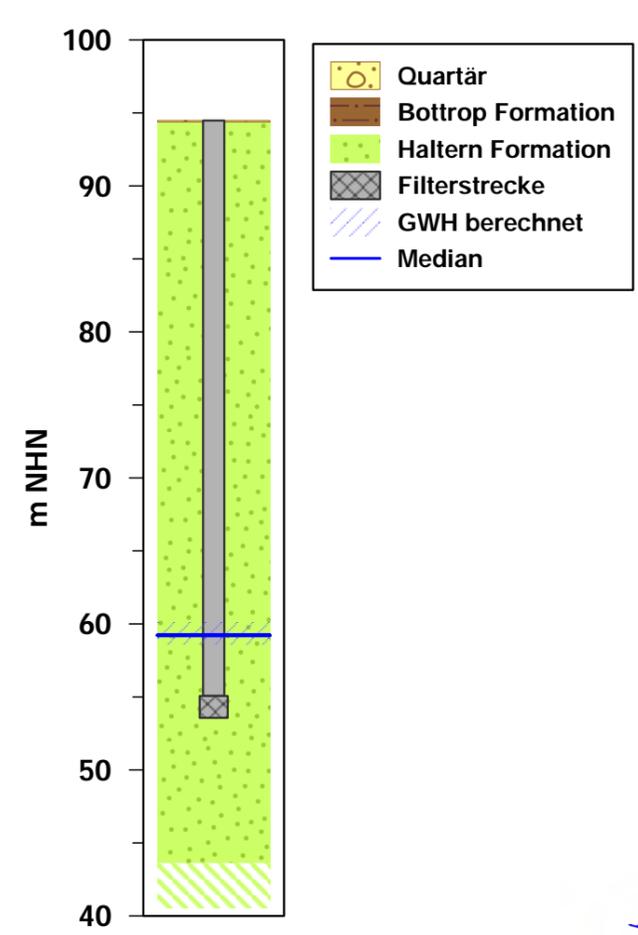
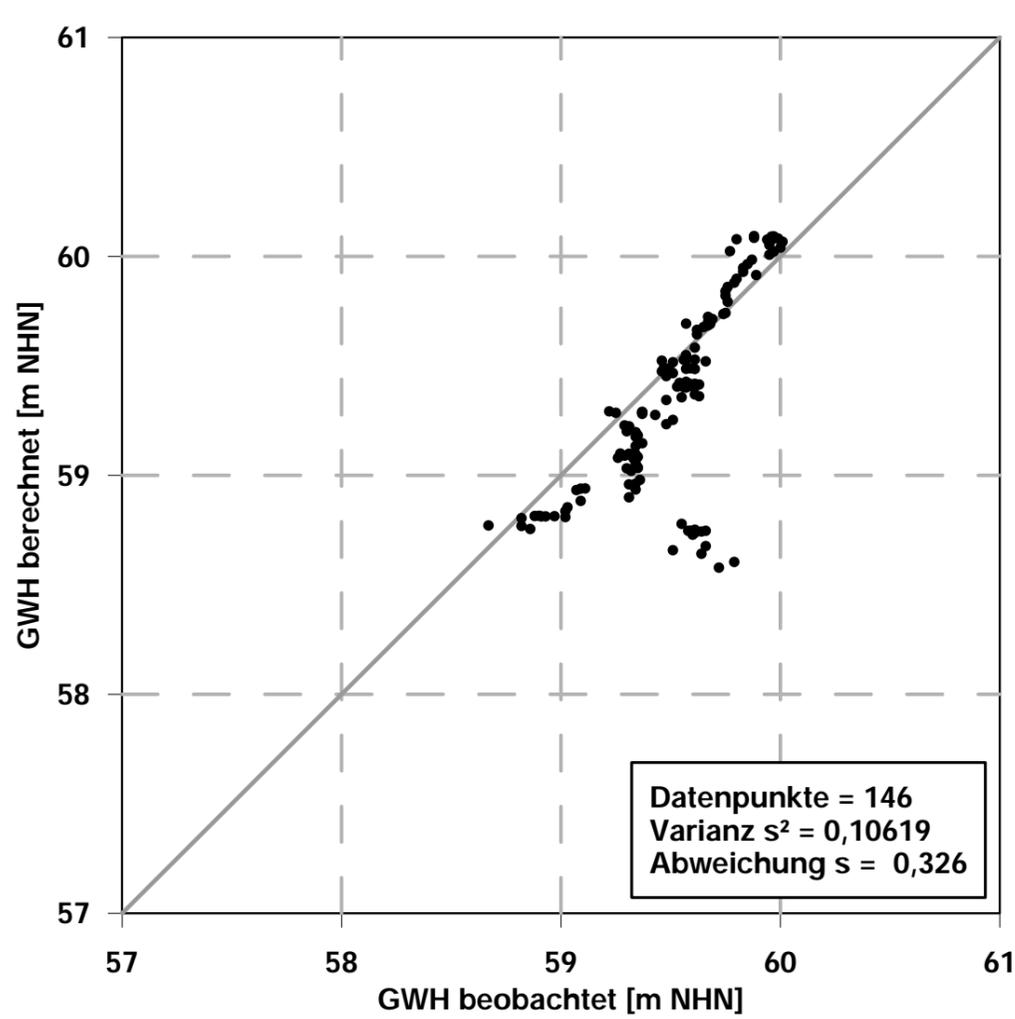
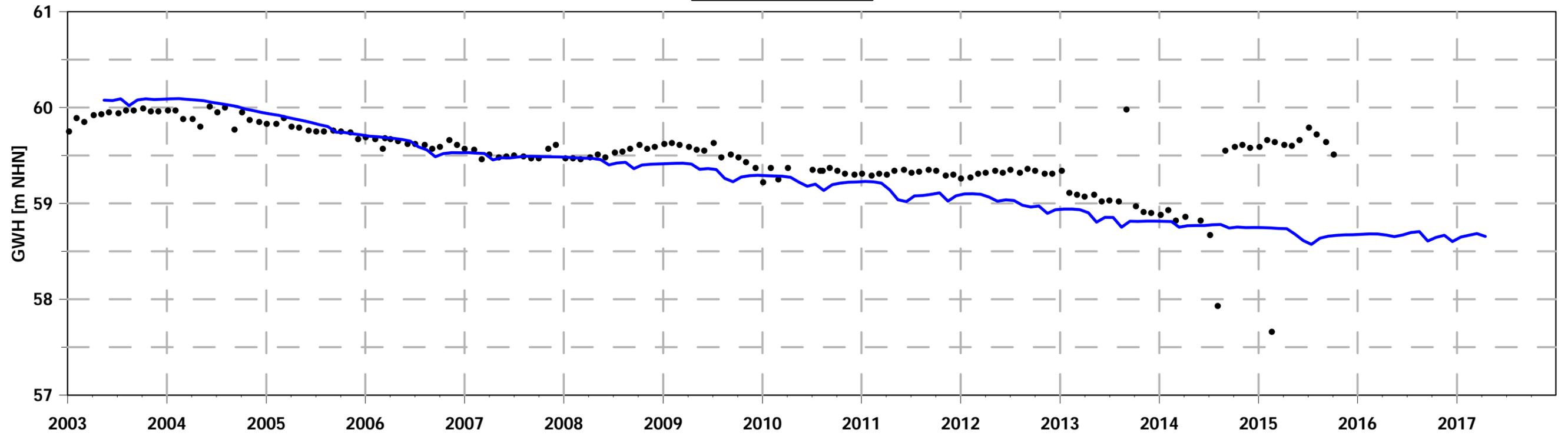
HS\_70



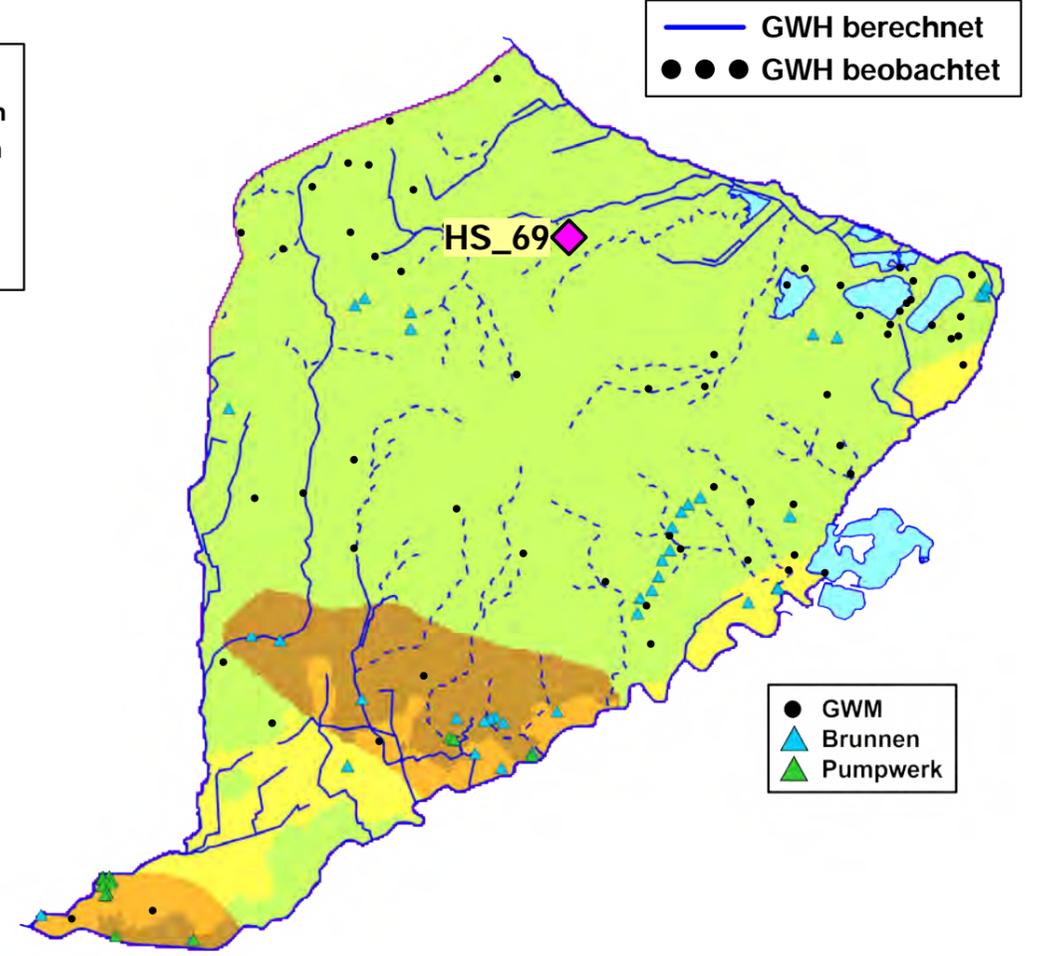
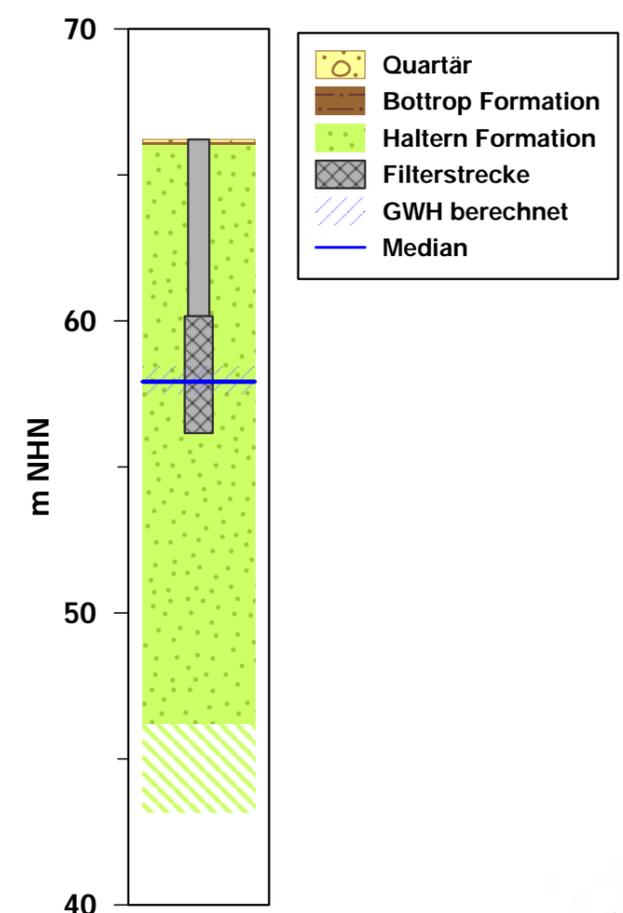
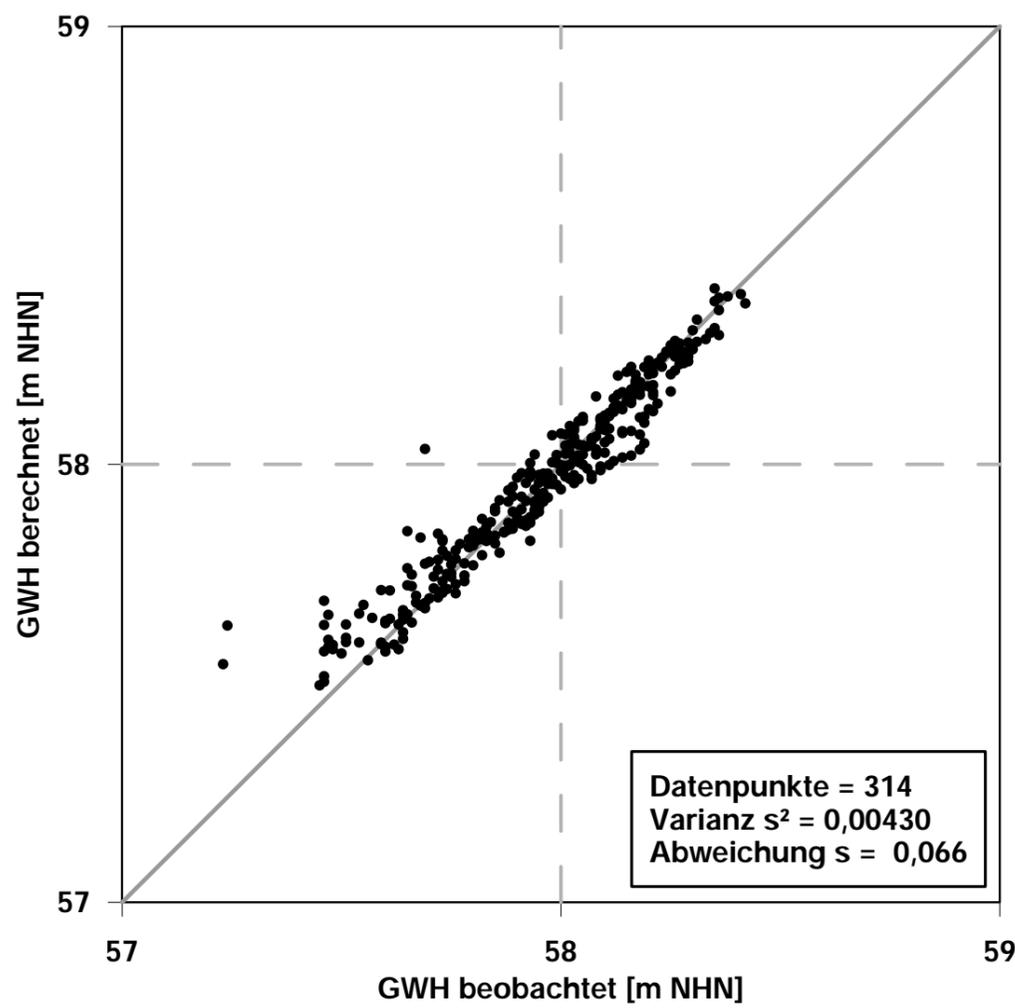
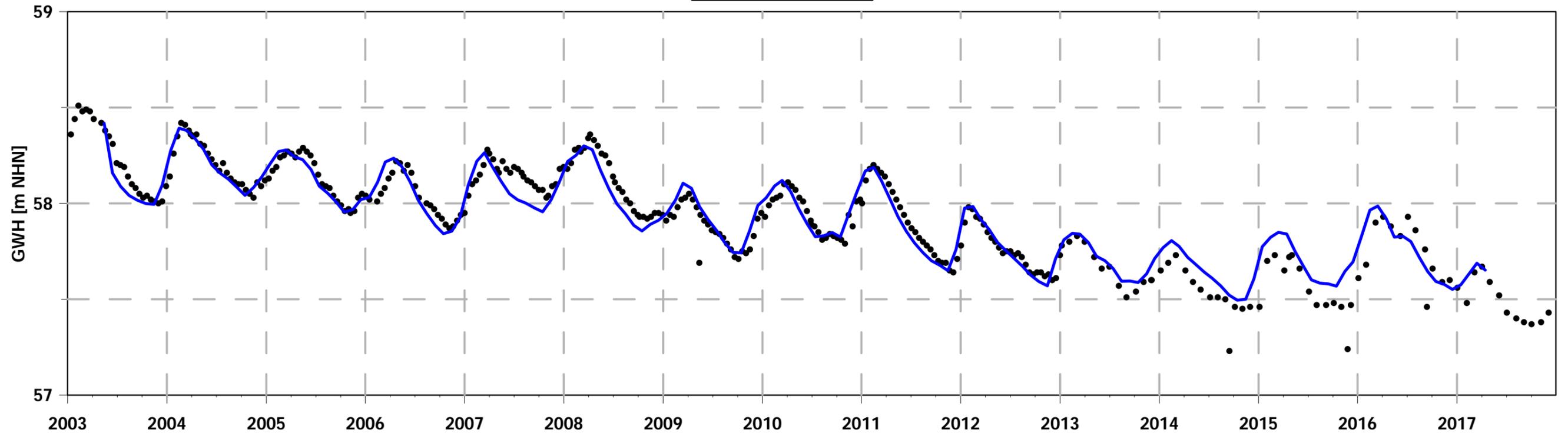
MAR\_LA1



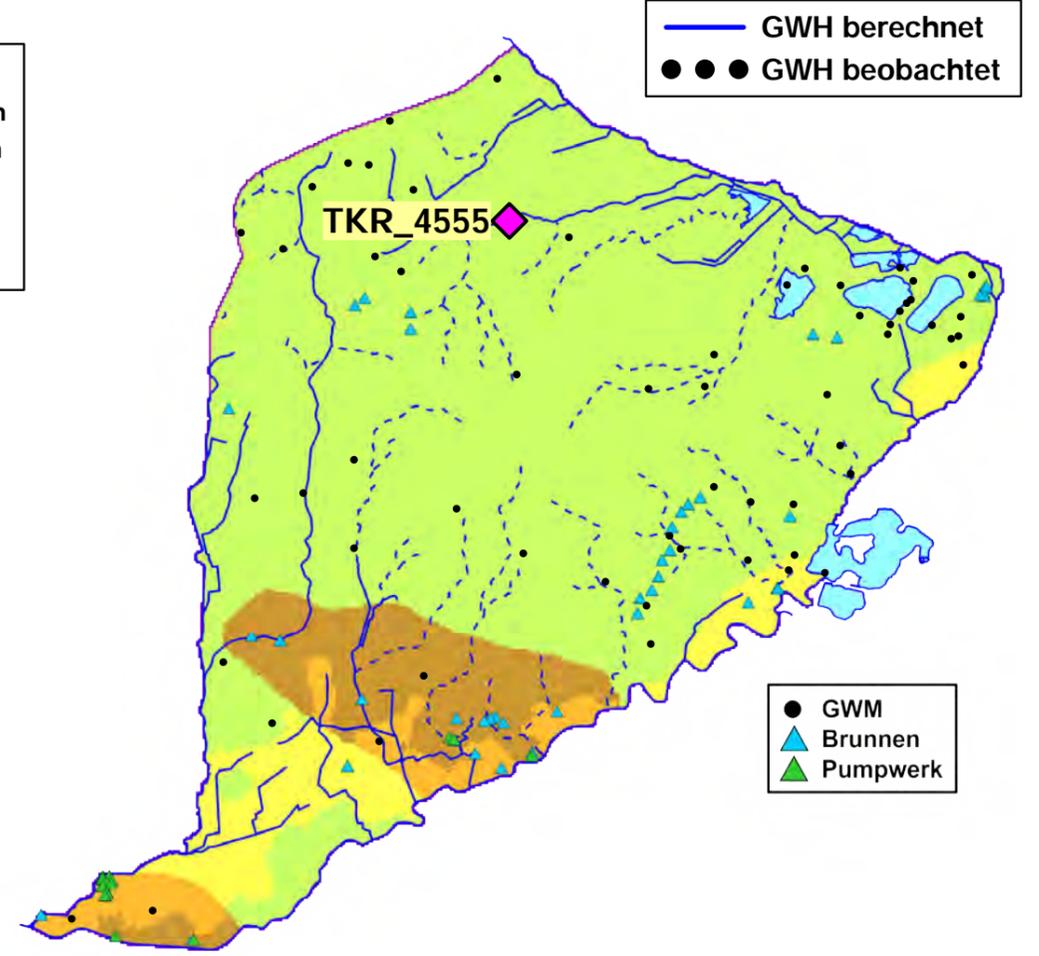
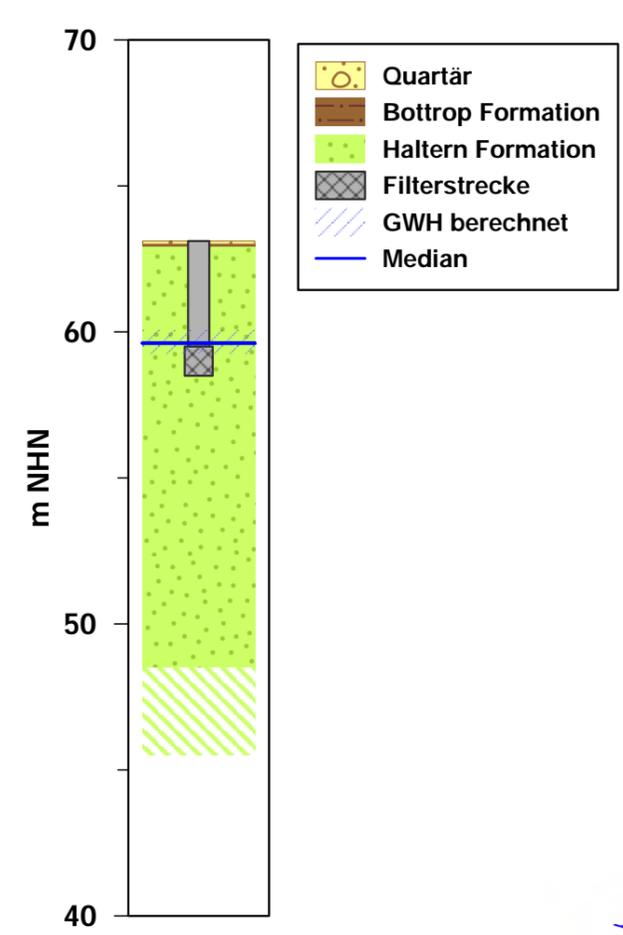
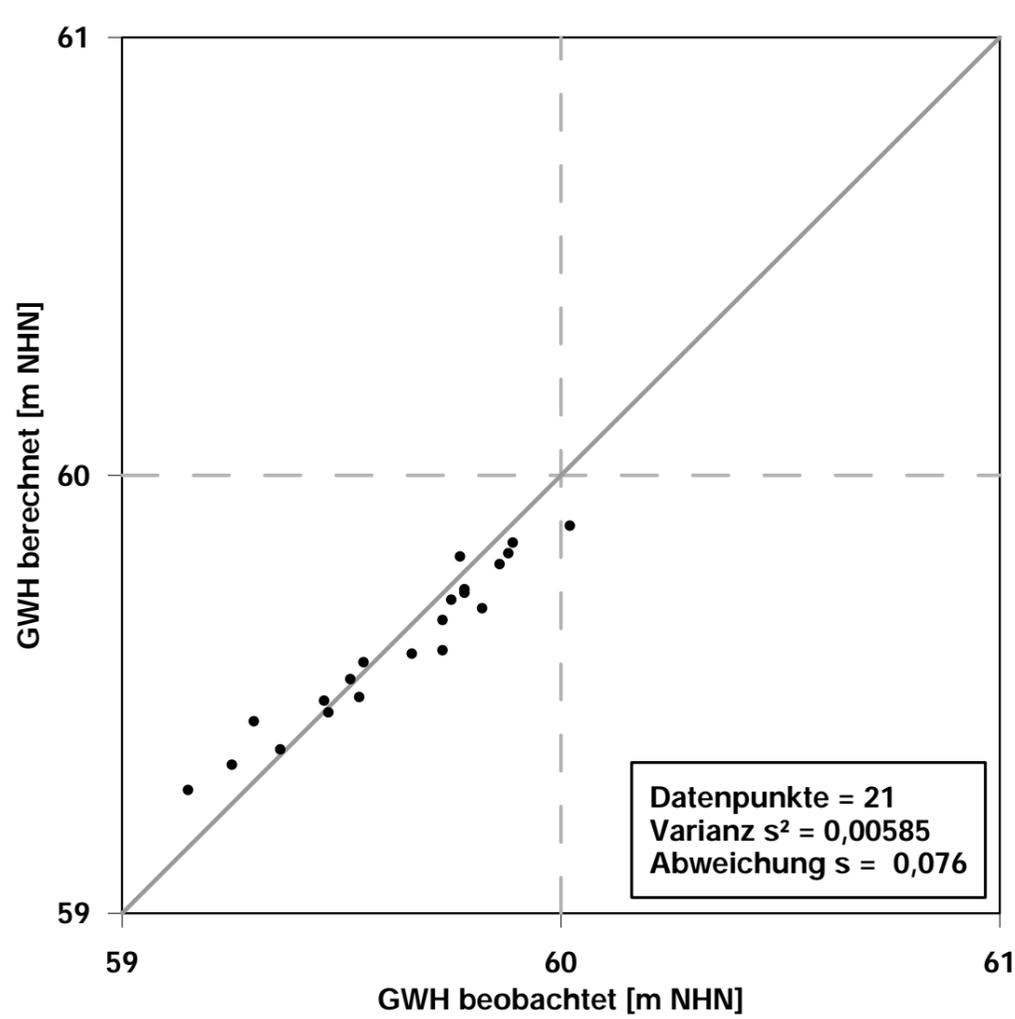
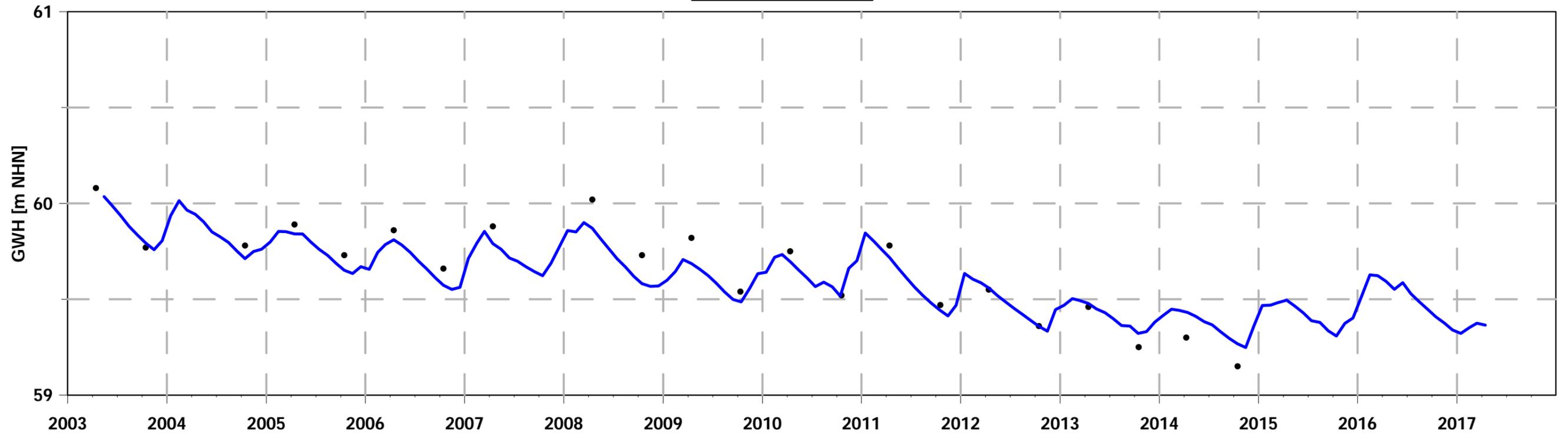
HS\_43



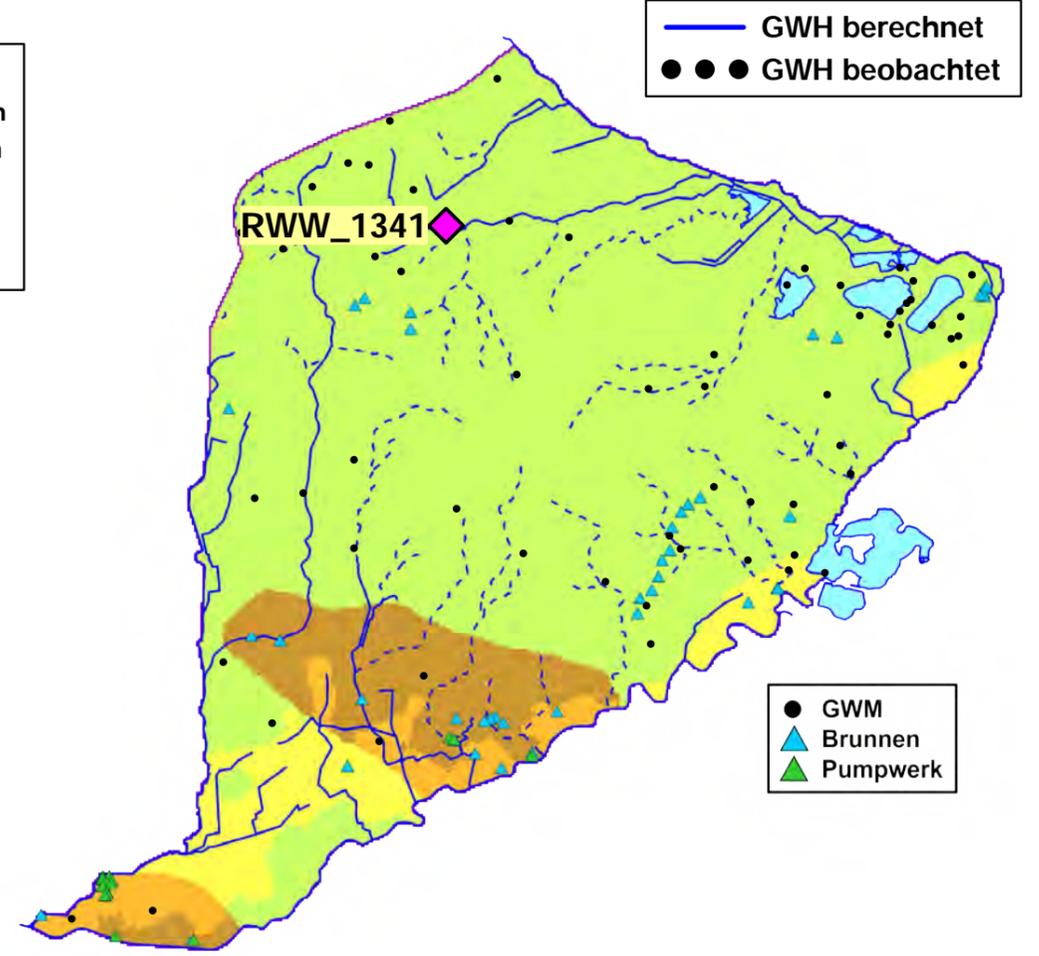
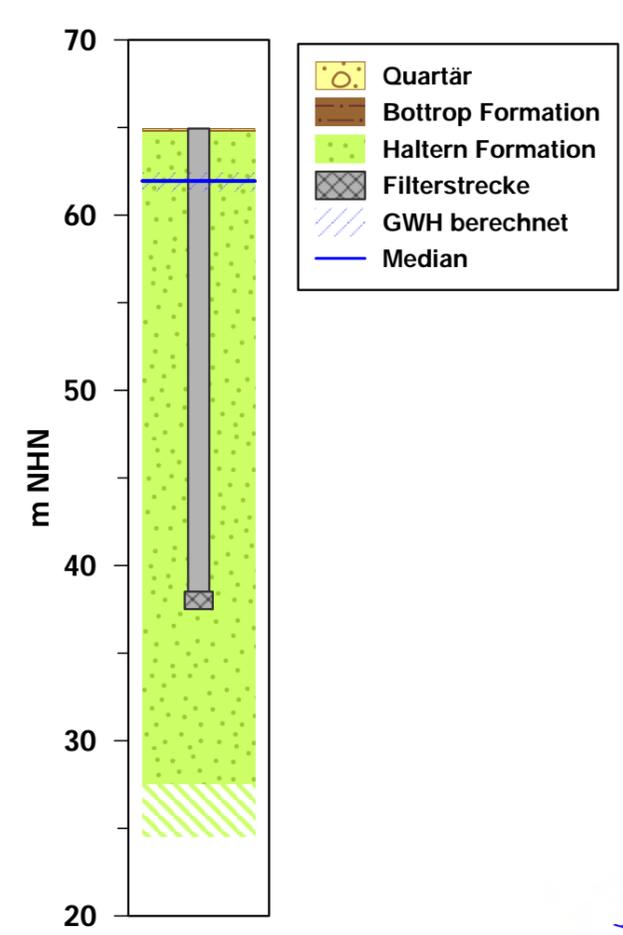
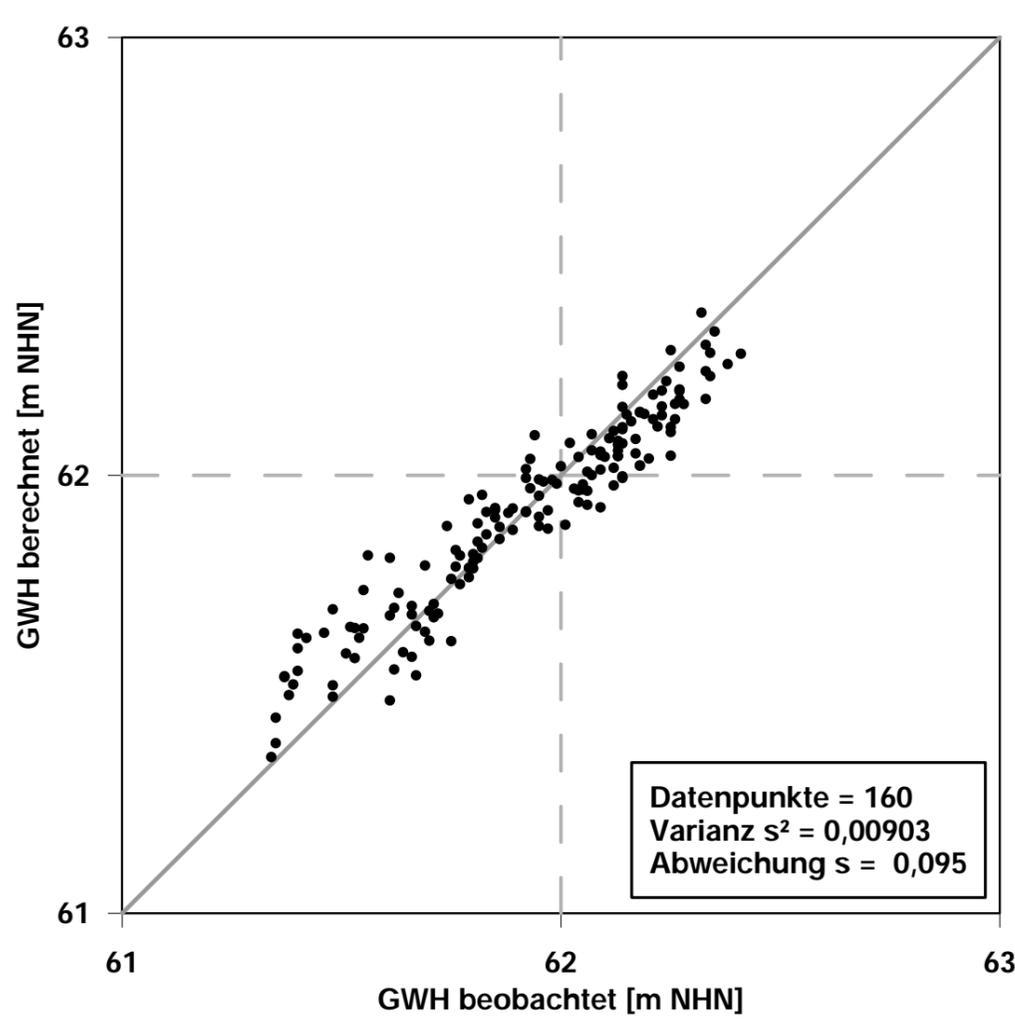
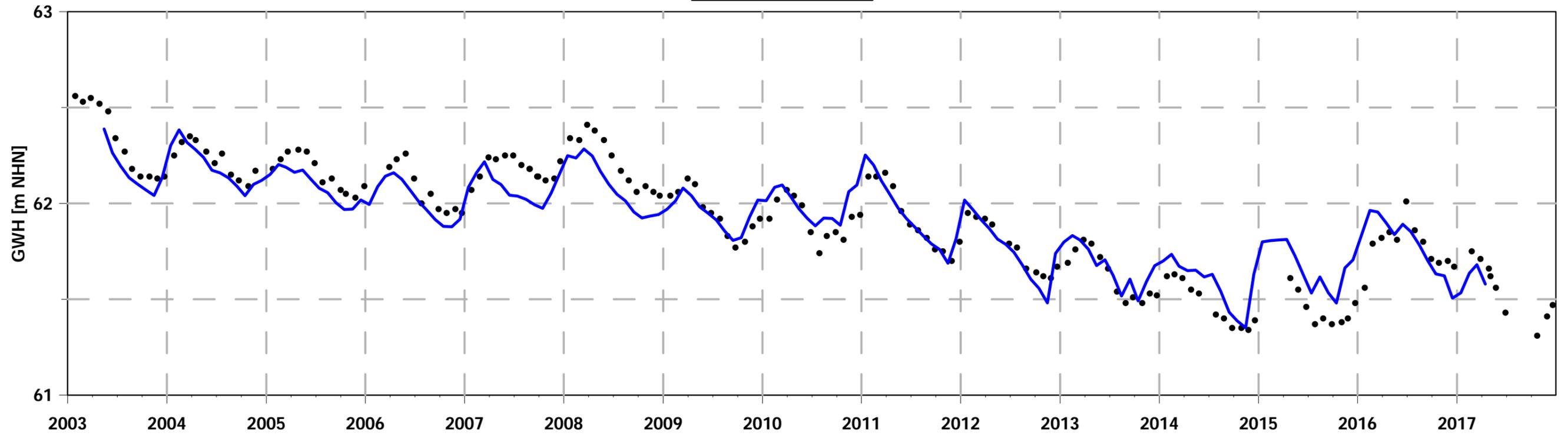
HS\_69



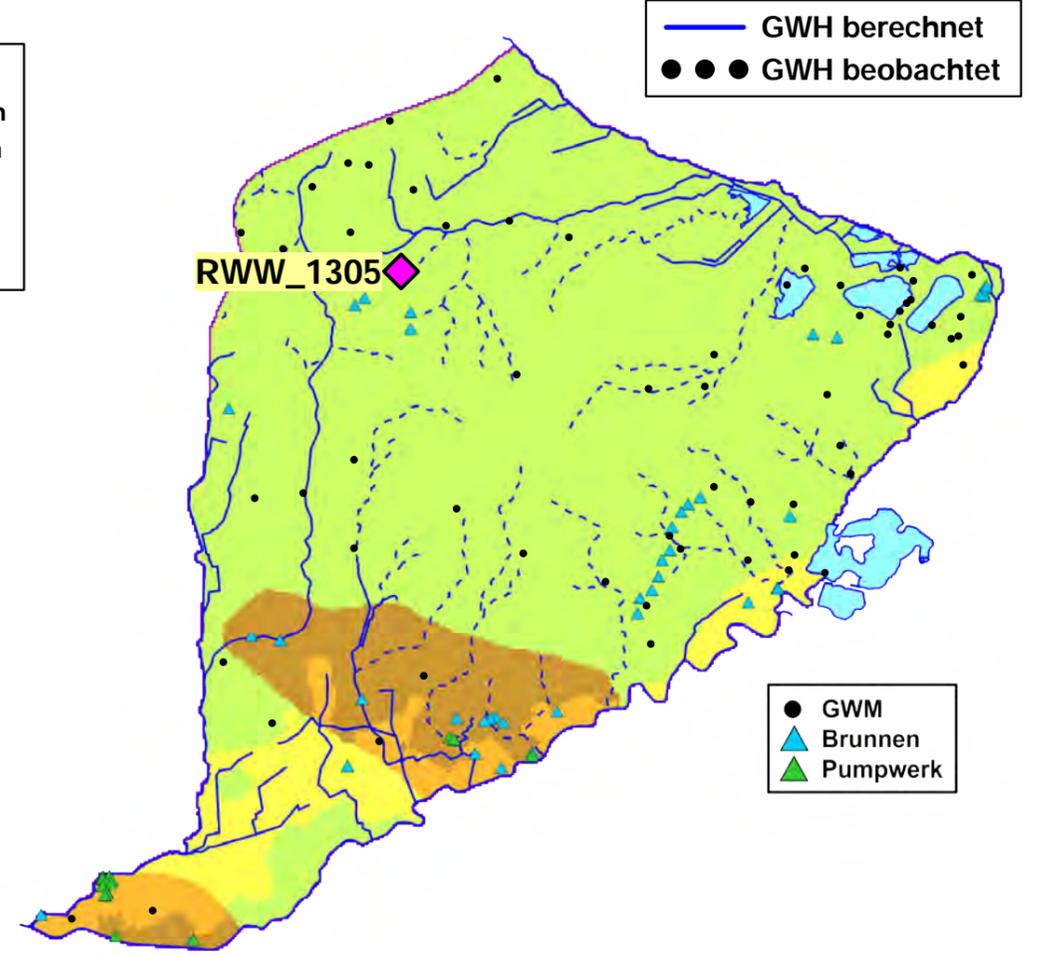
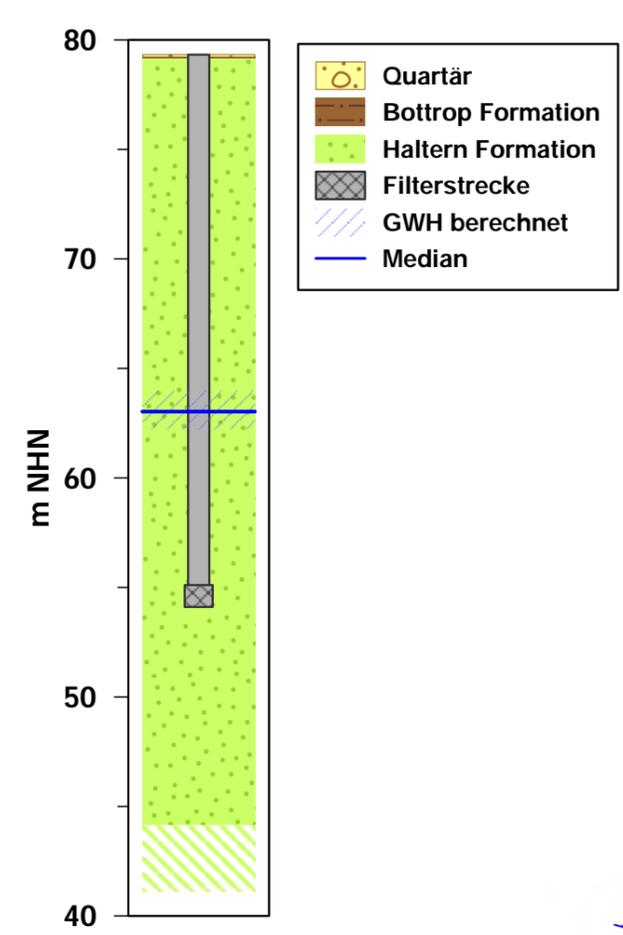
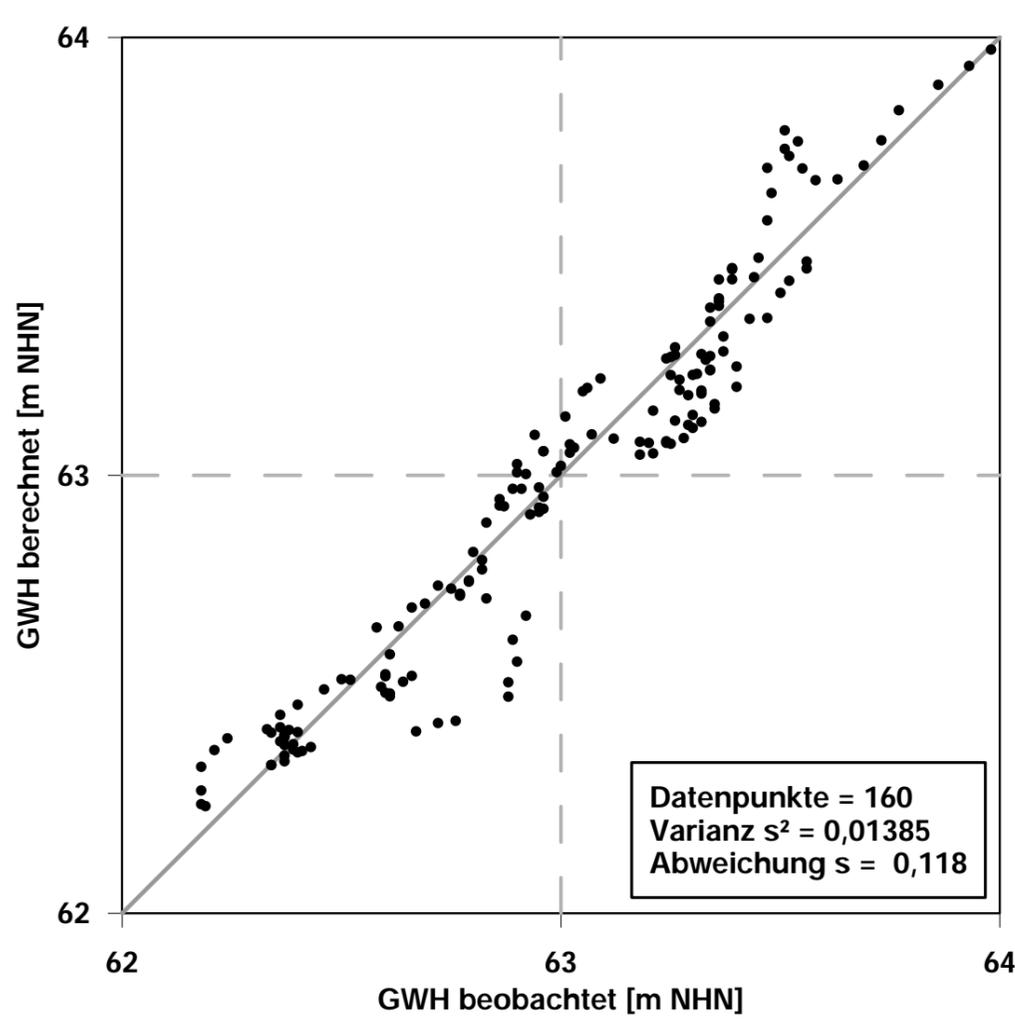
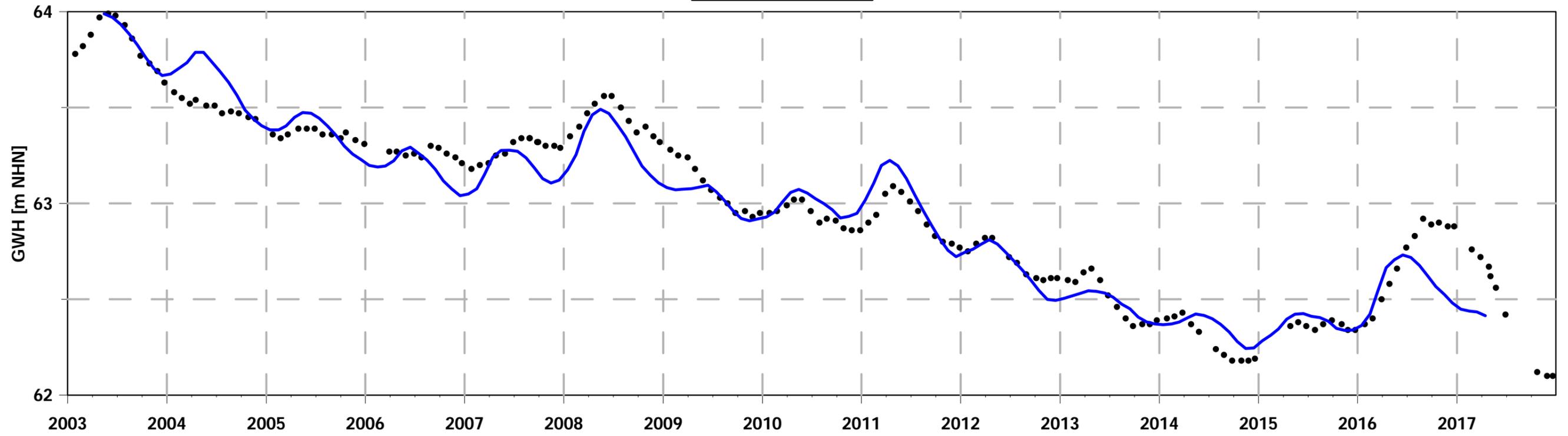
TKR\_4555



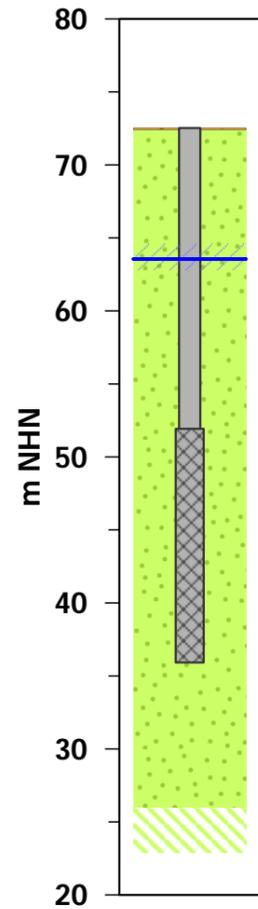
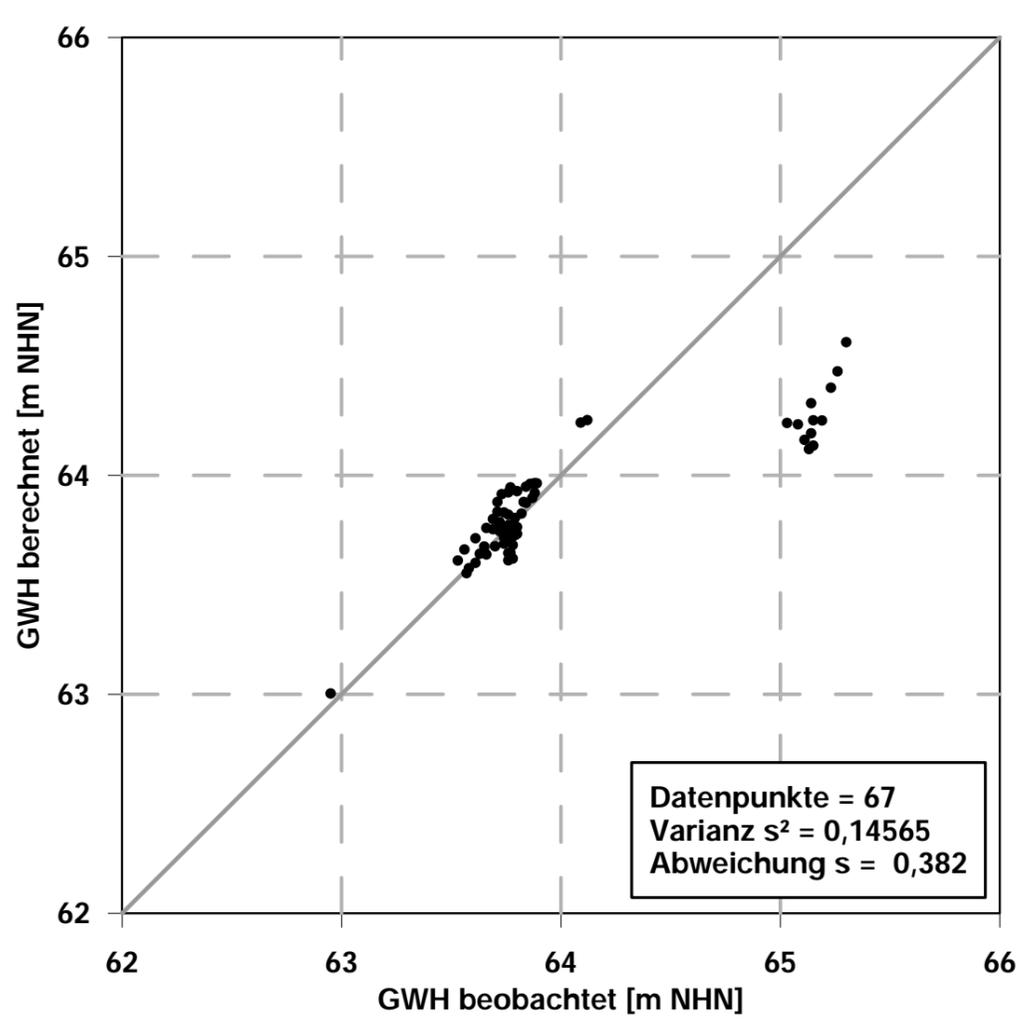
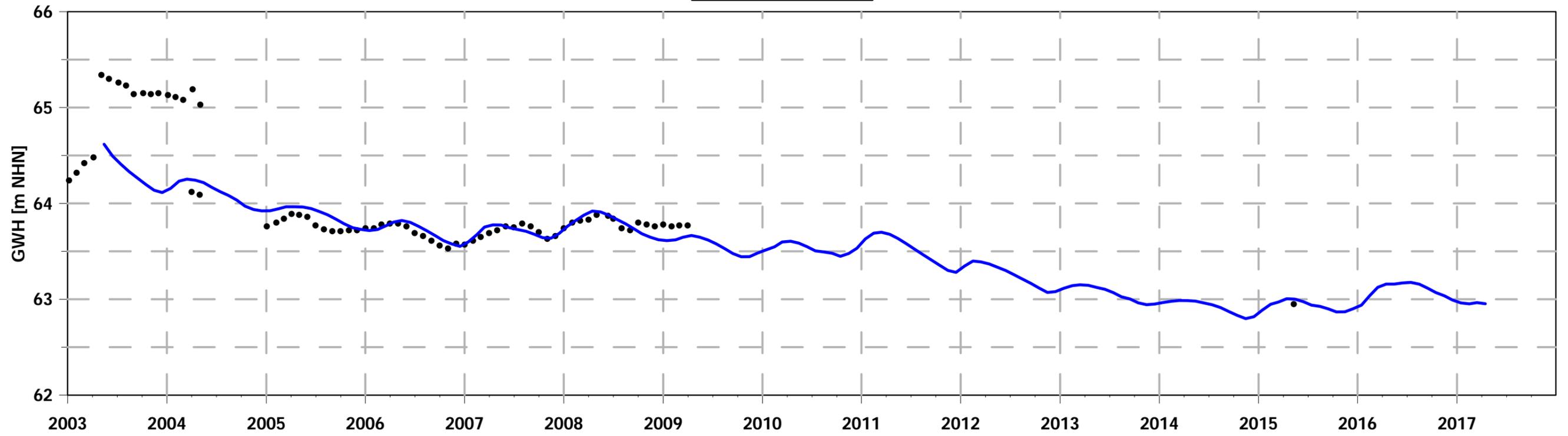
RWW\_1341



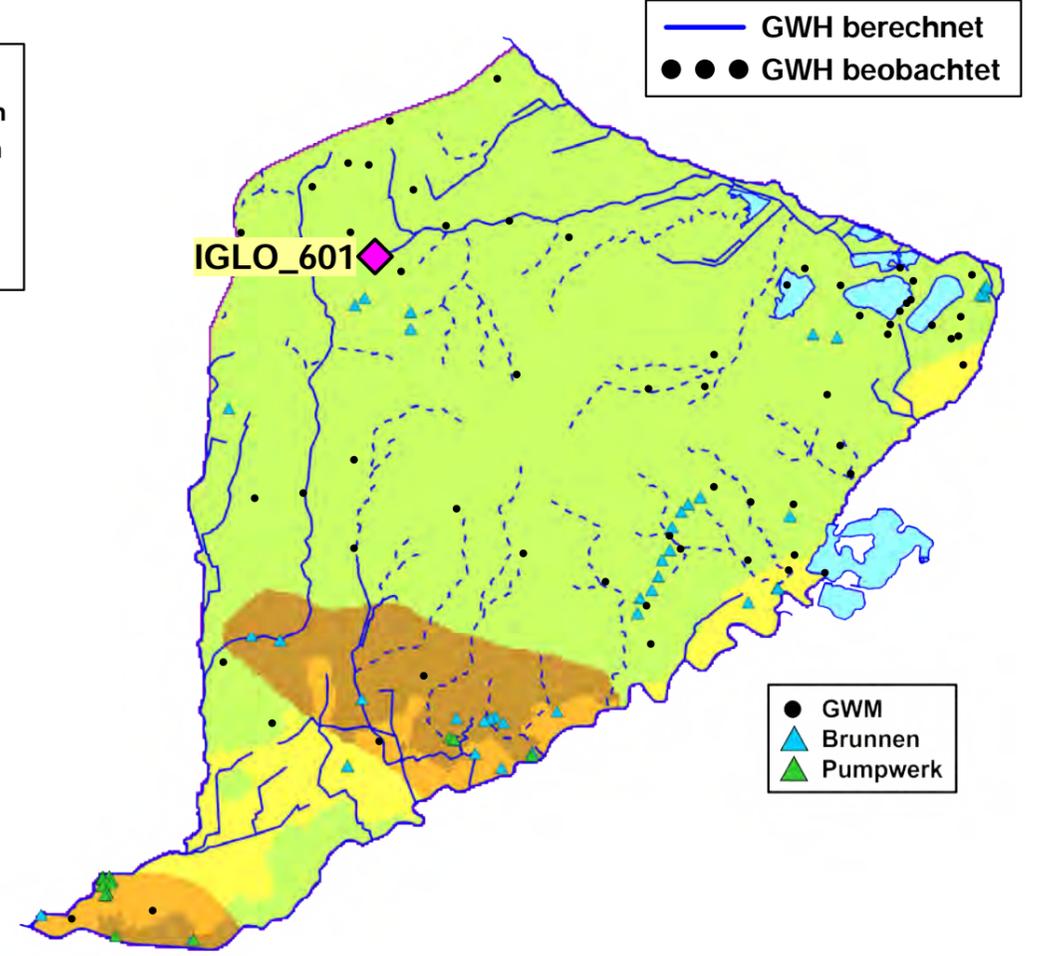
RWW\_1305



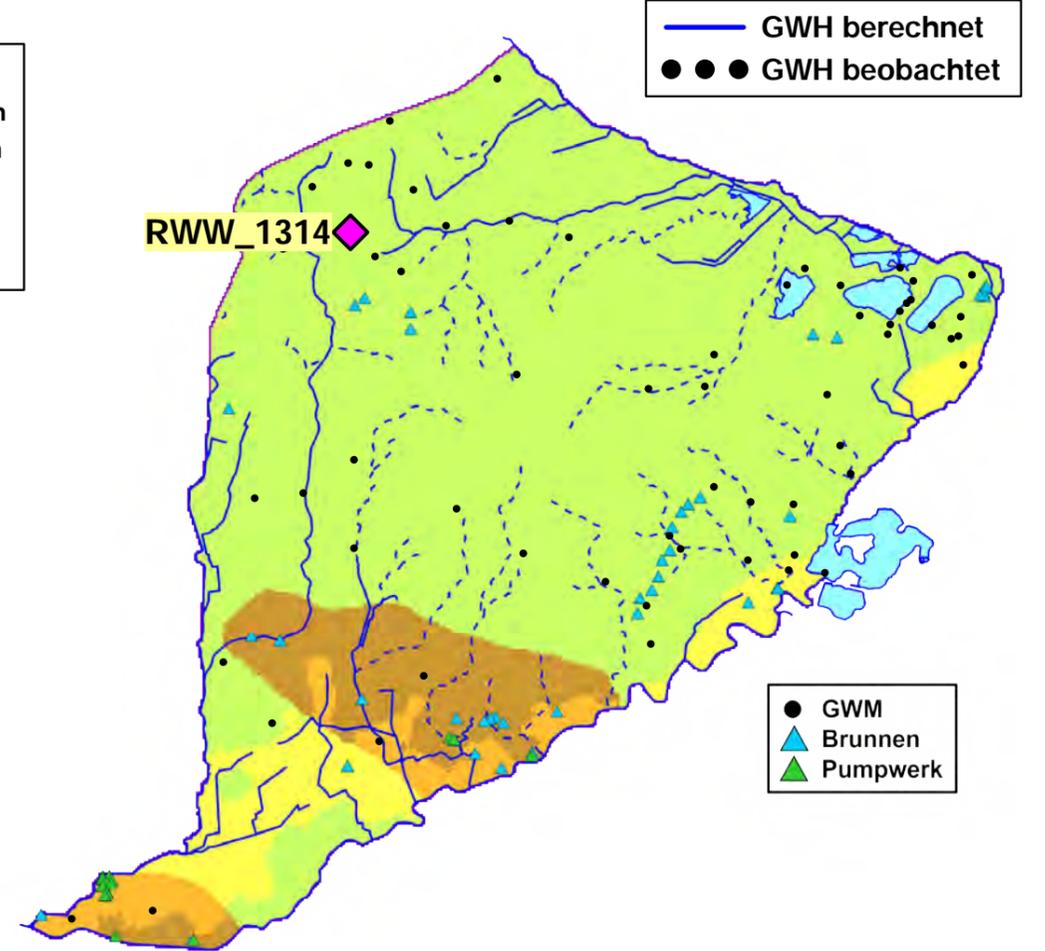
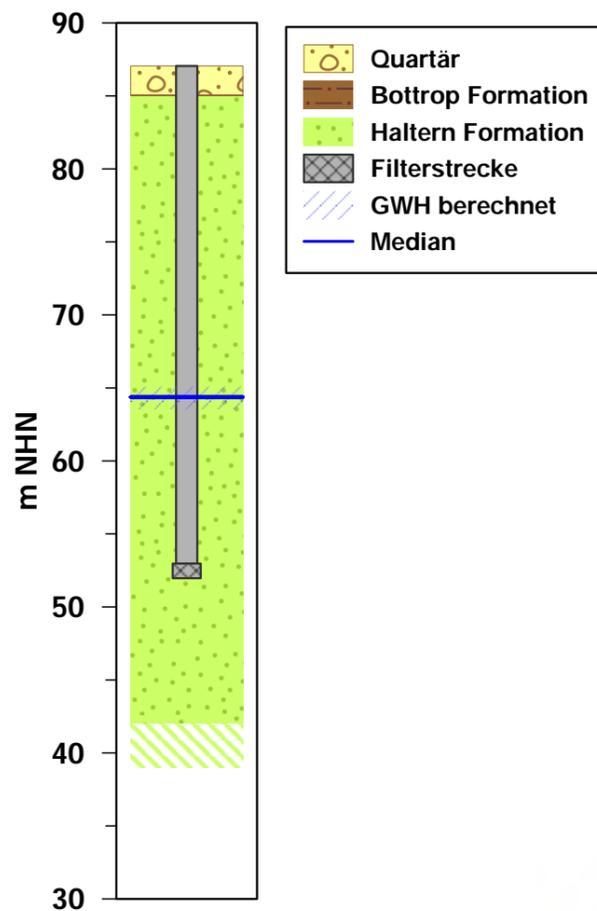
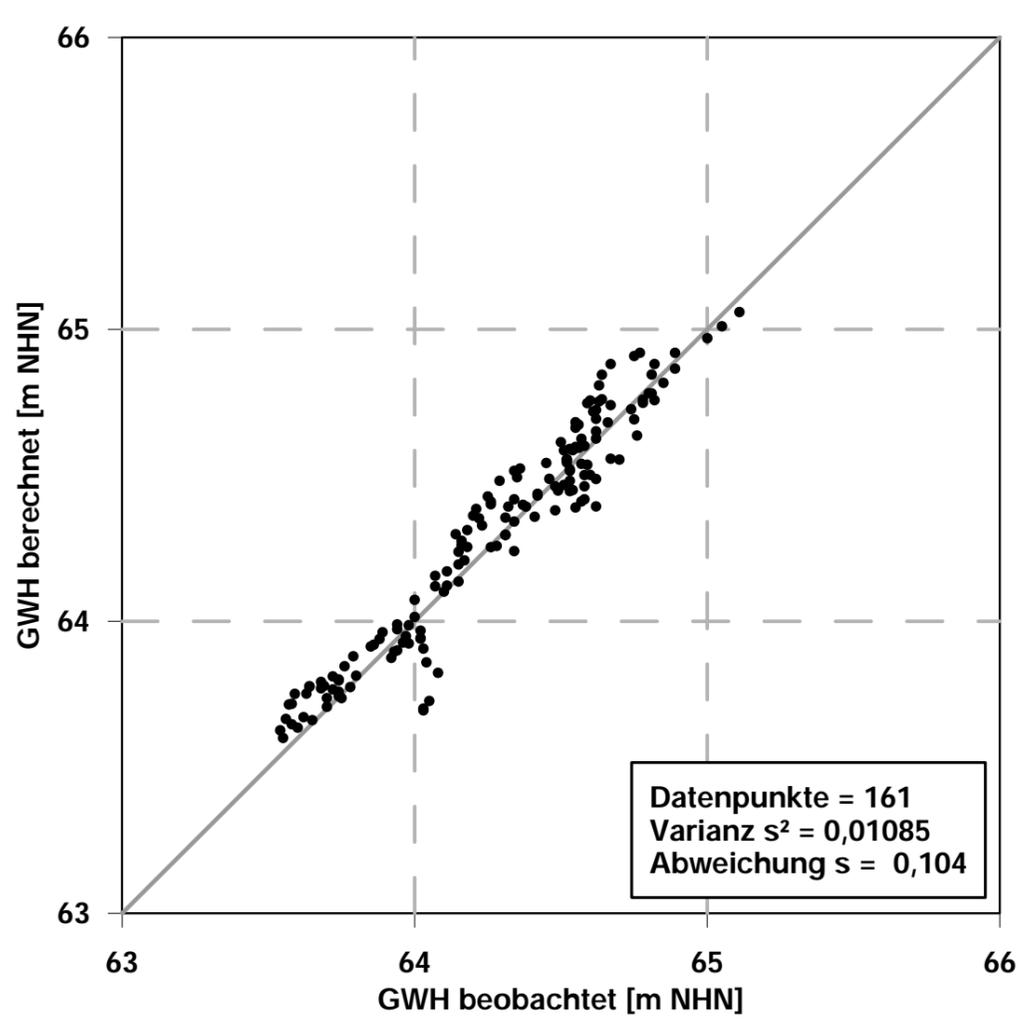
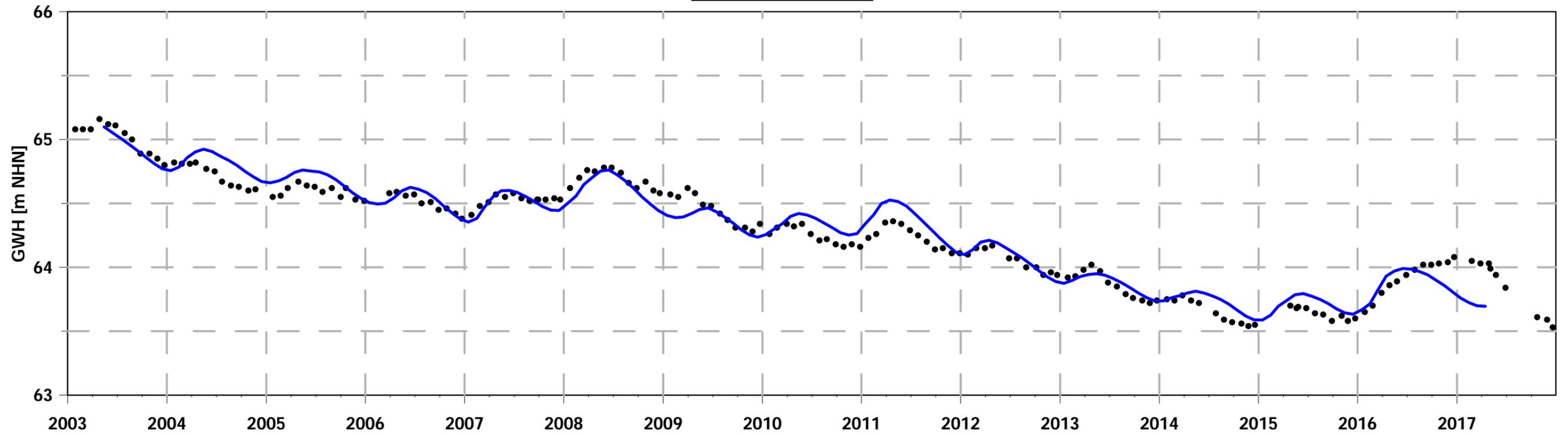
IGLO\_601



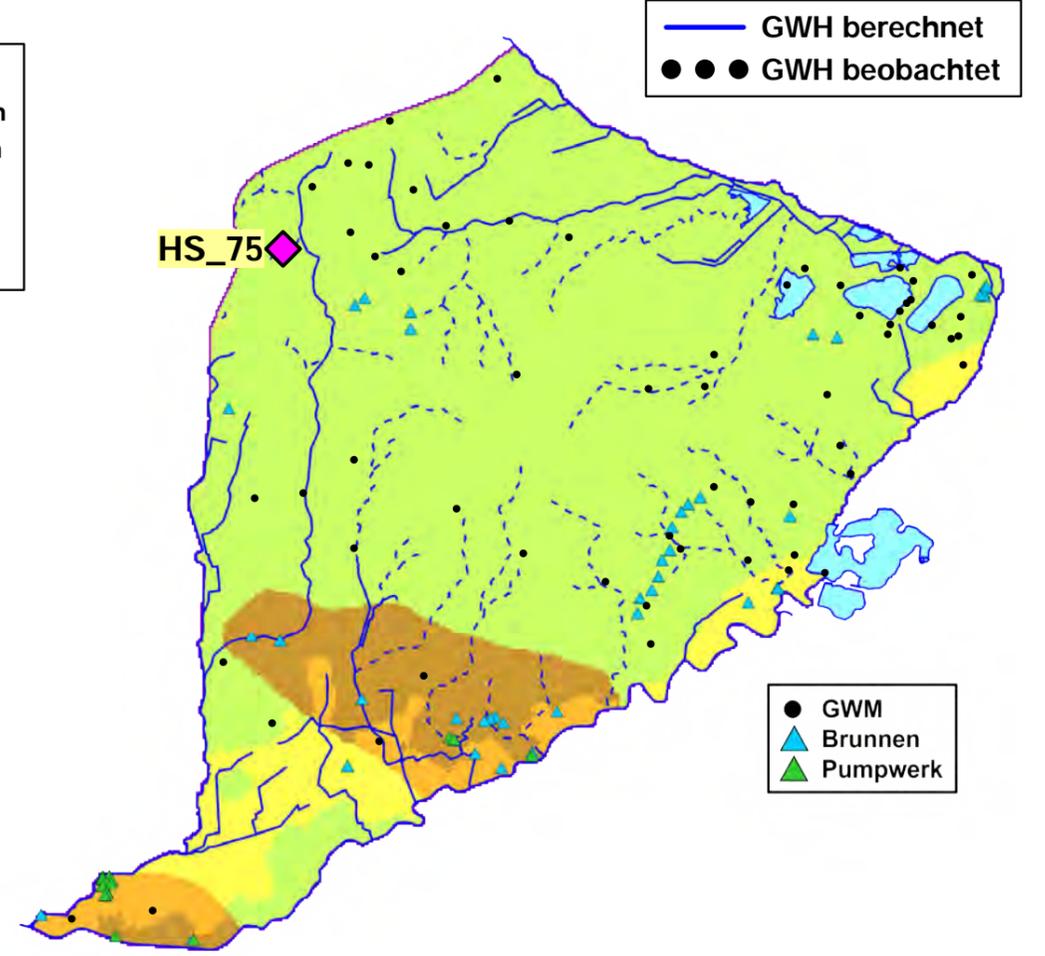
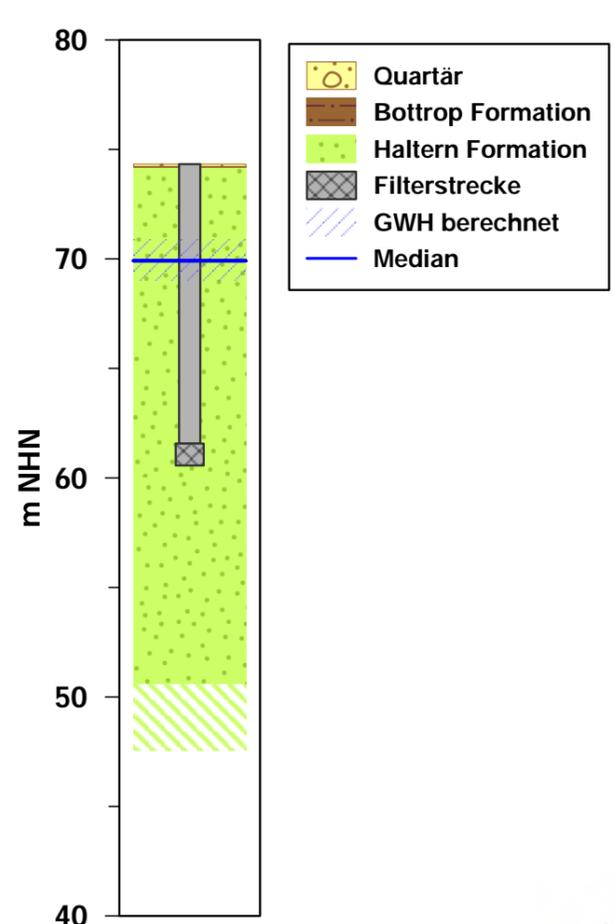
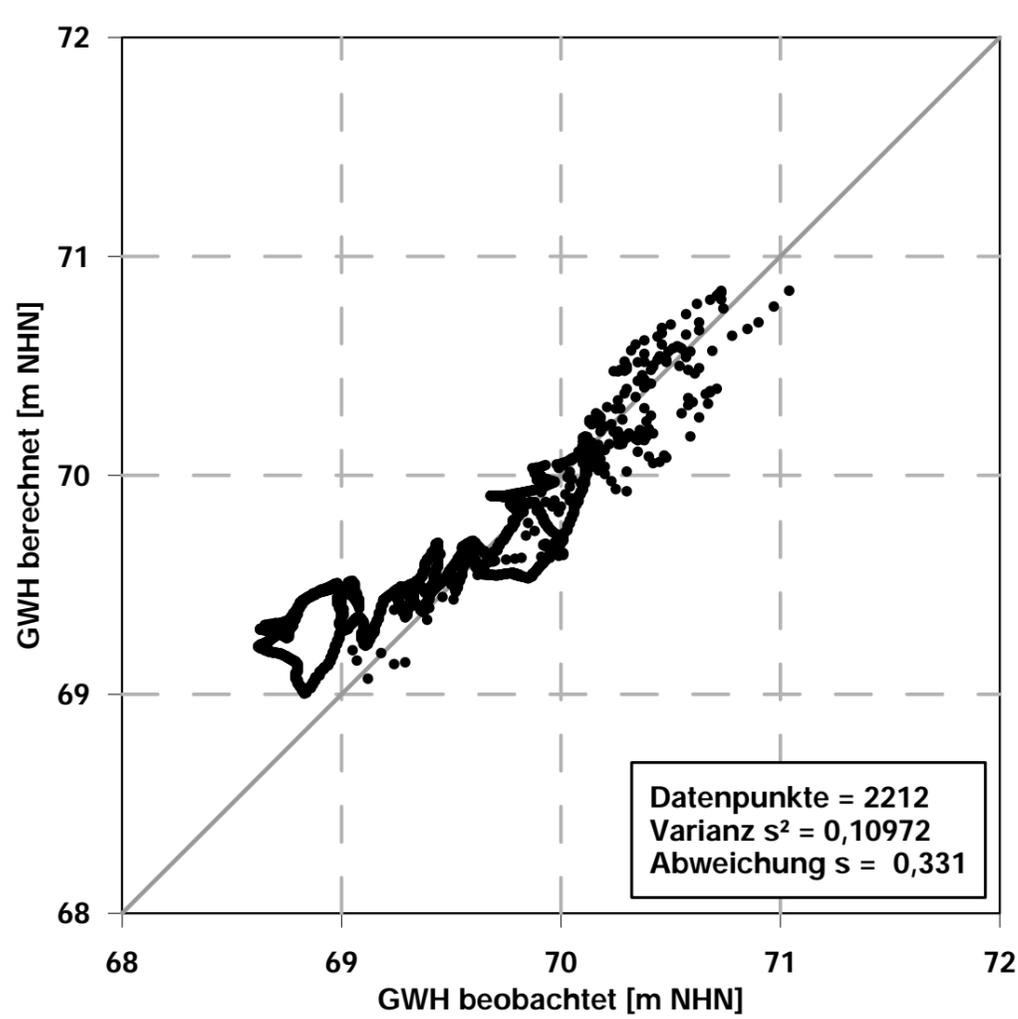
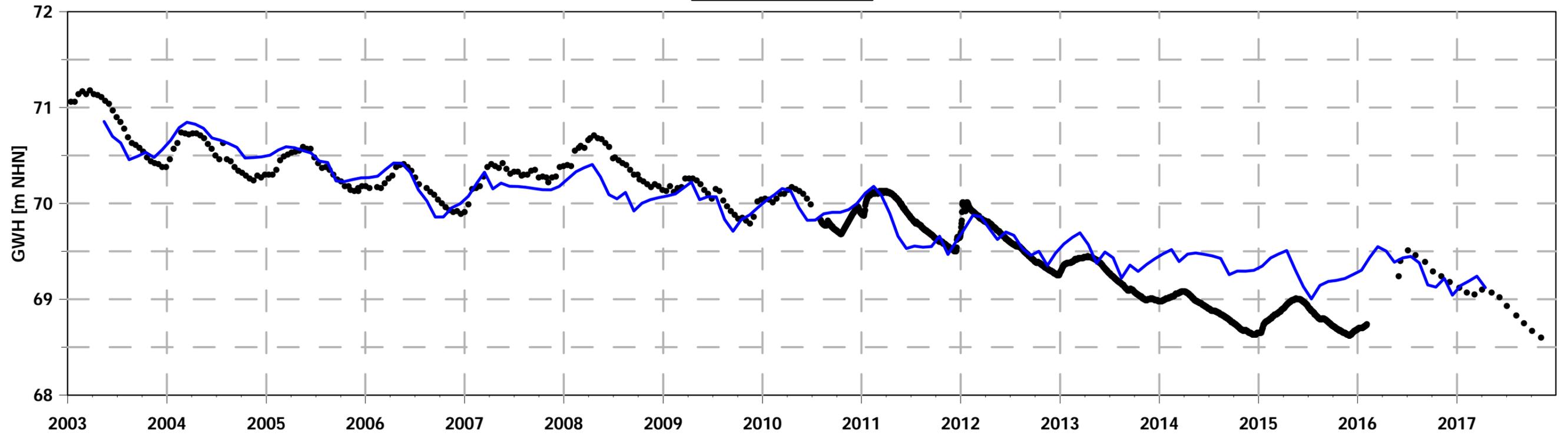
- Quartär
- Bottrop Formation
- Haltern Formation
- Filterstrecke
- GWH berechnet
- Median



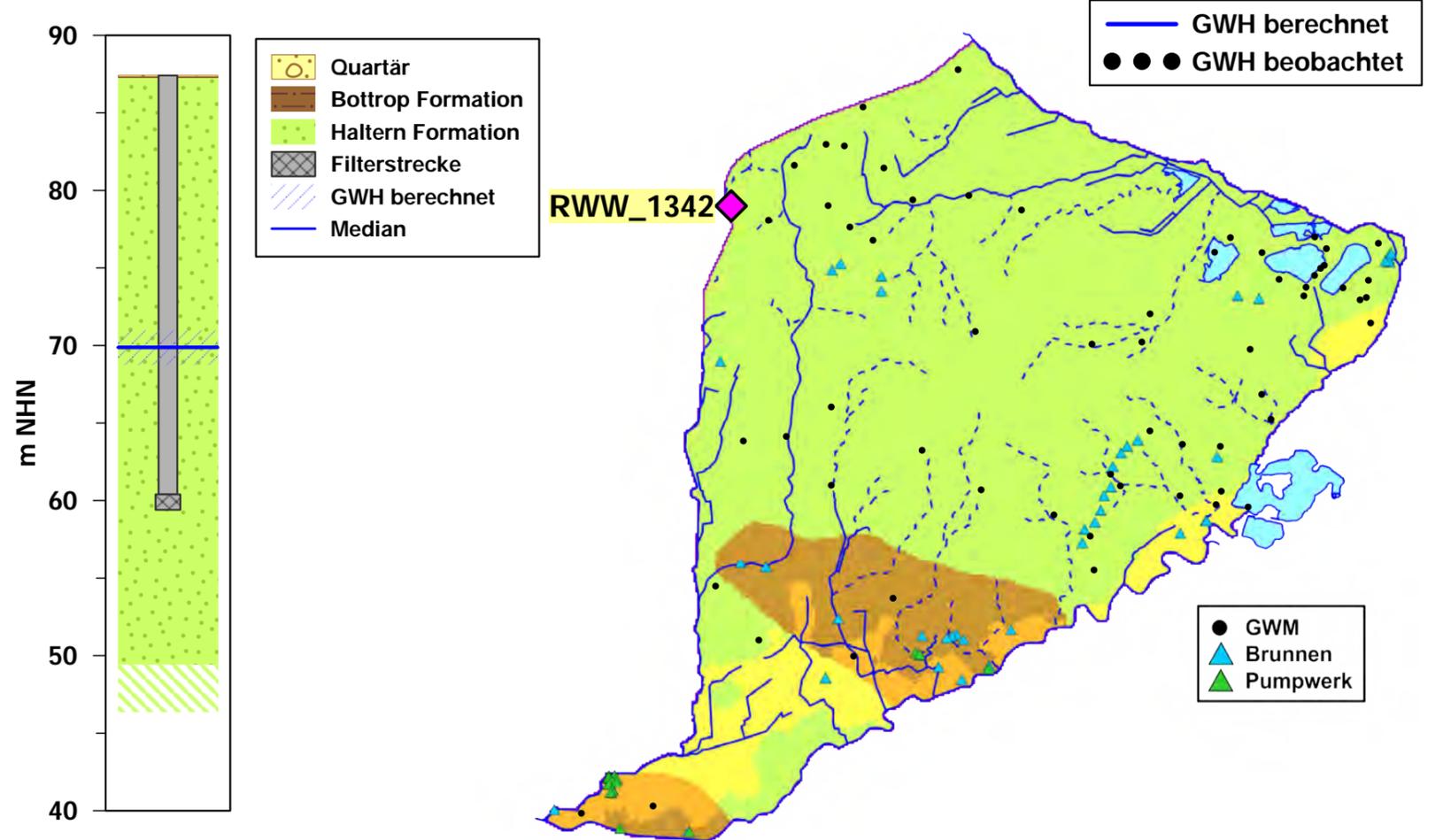
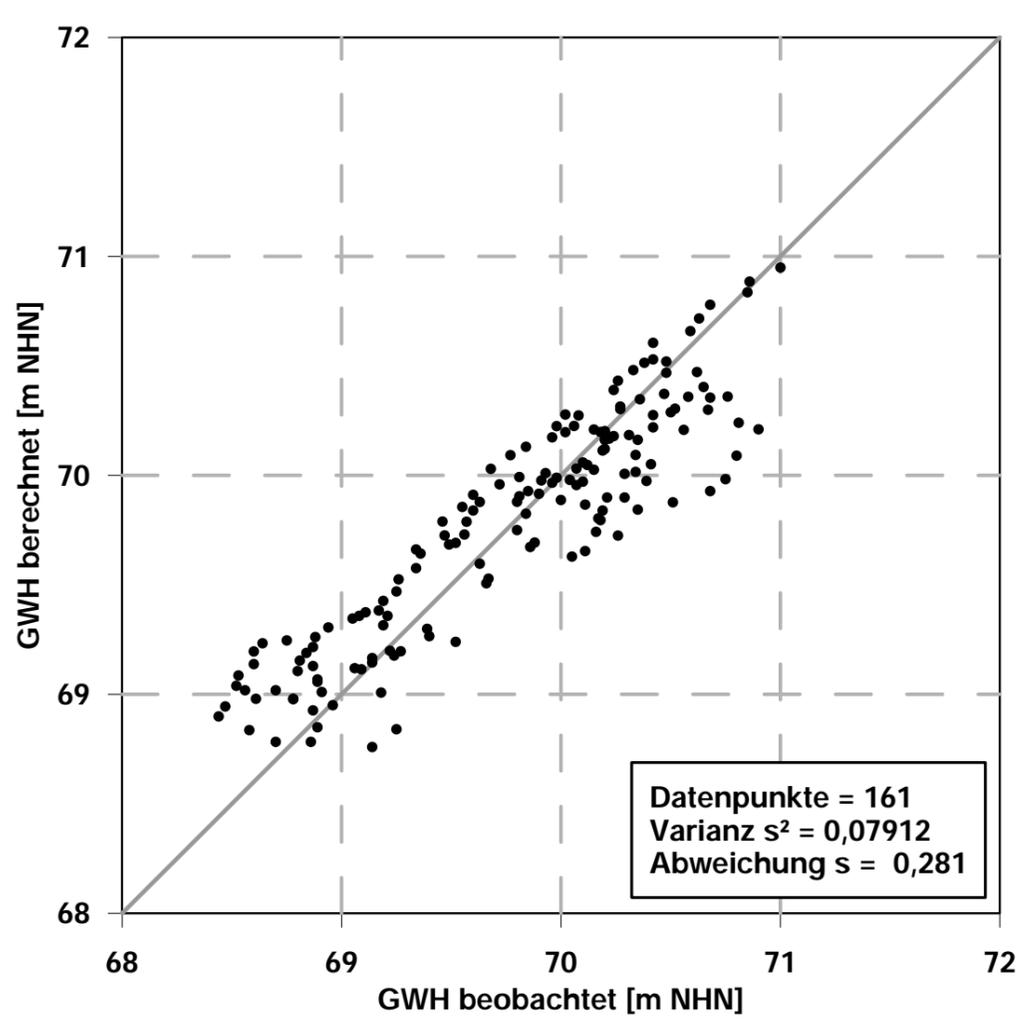
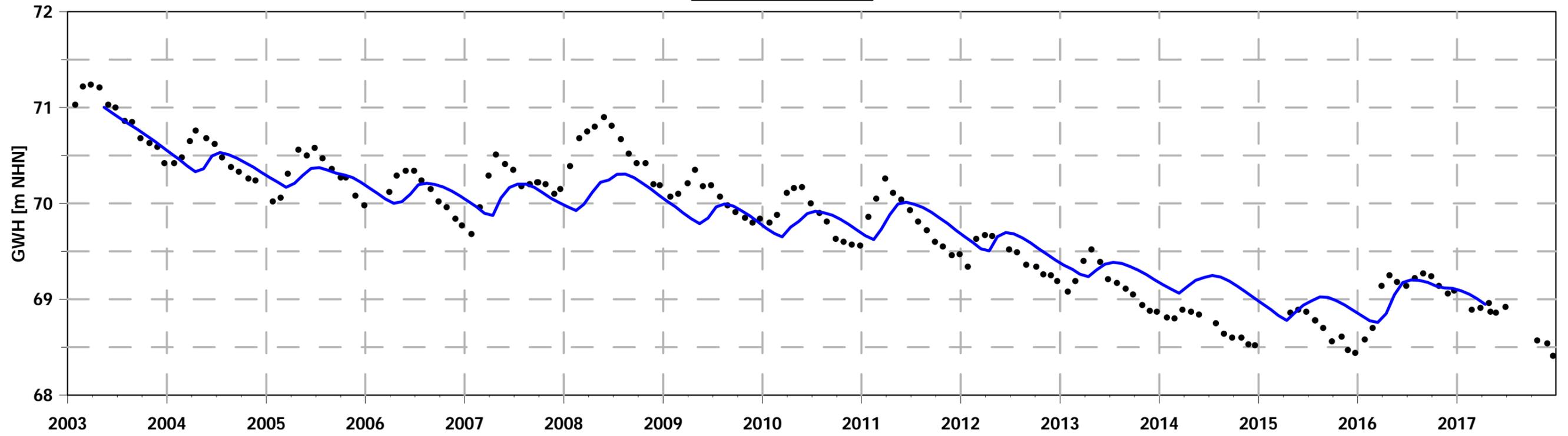
RWW\_1314



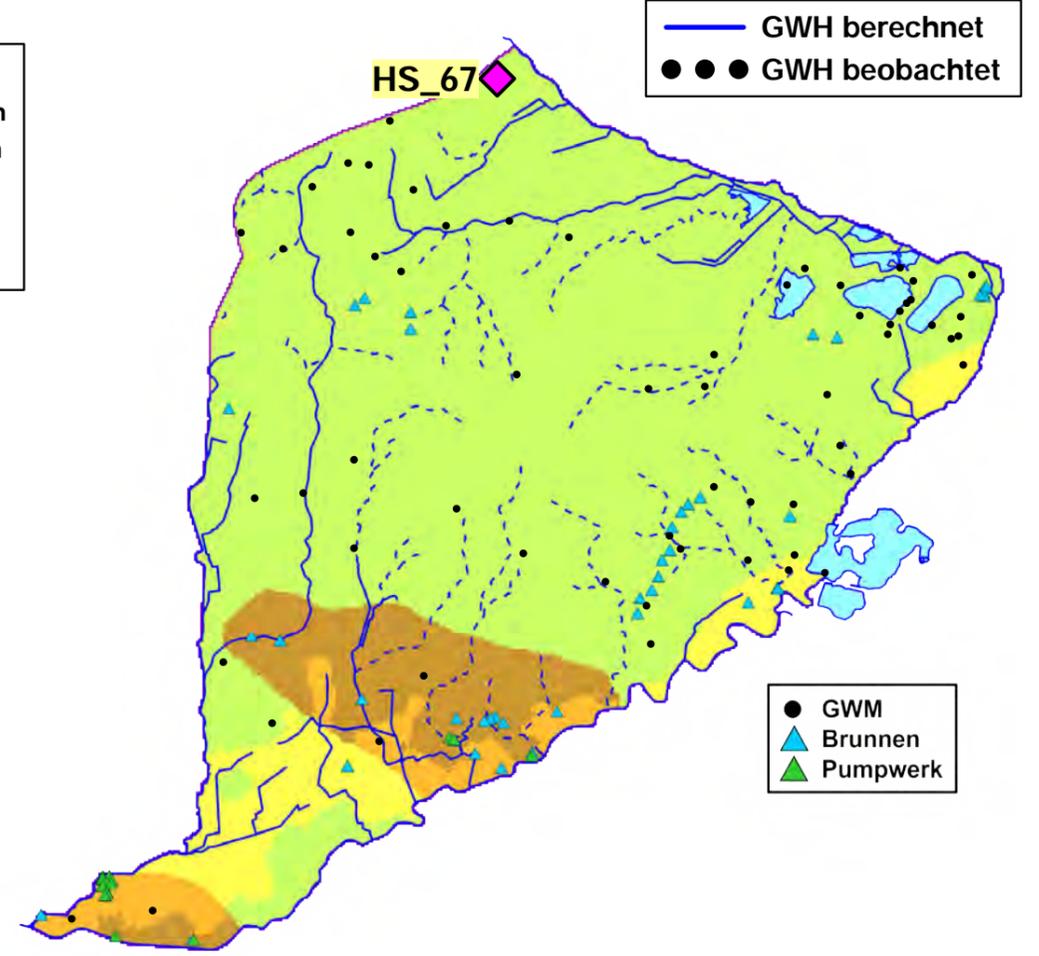
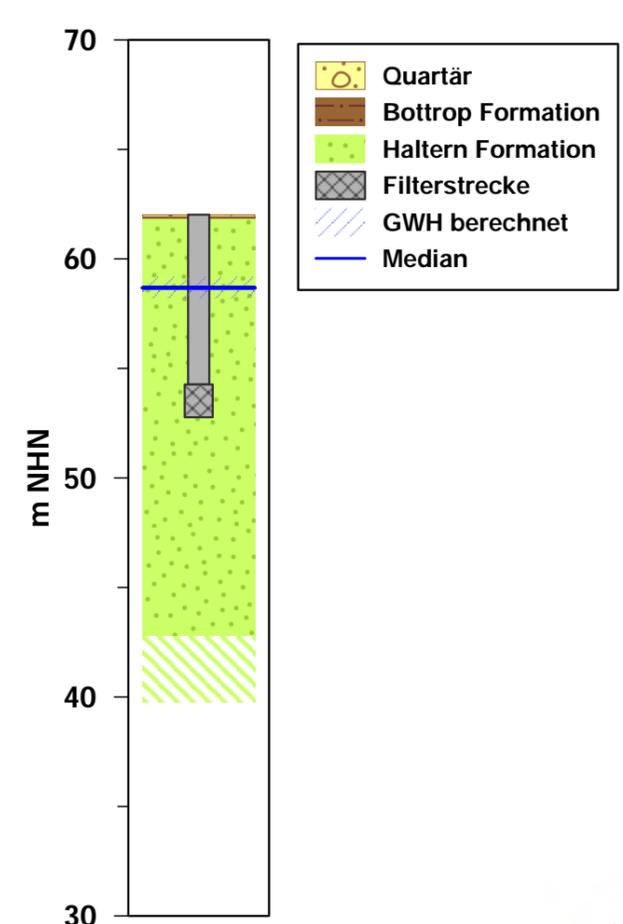
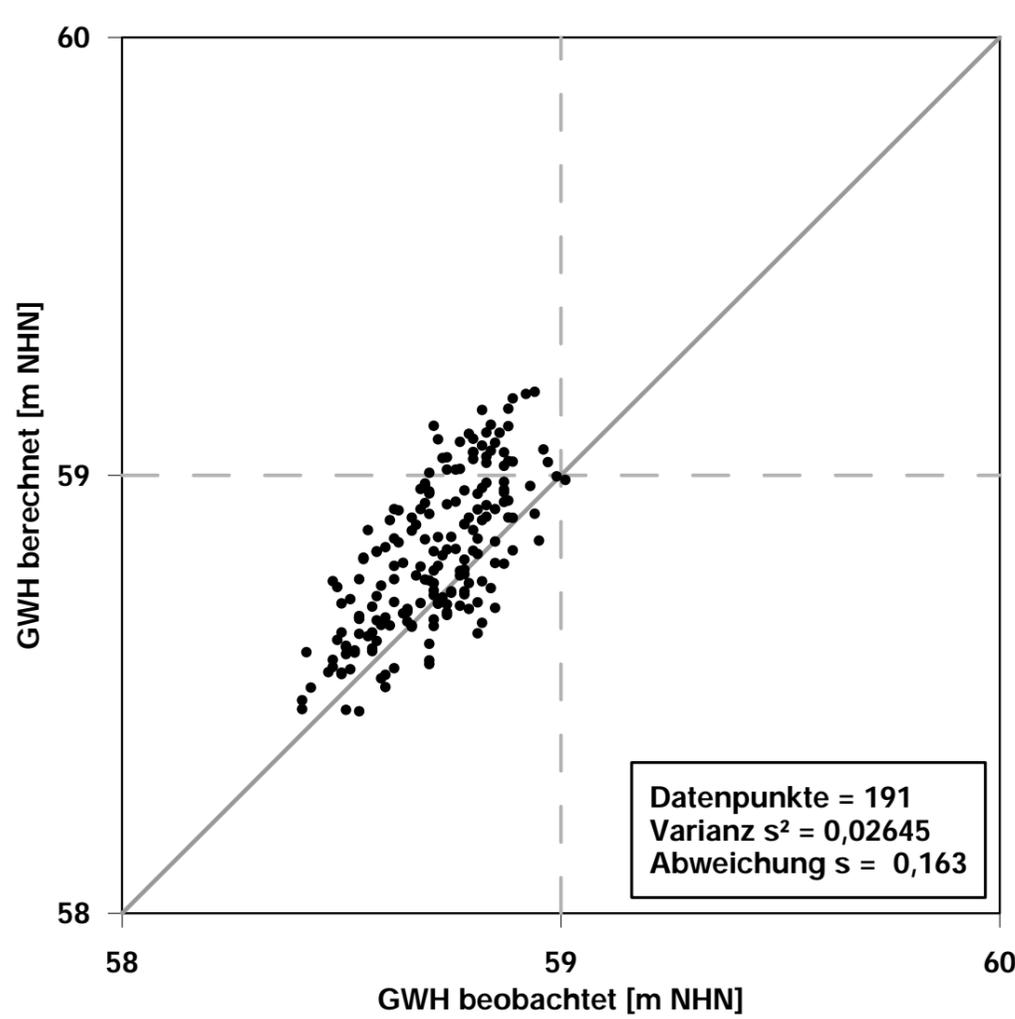
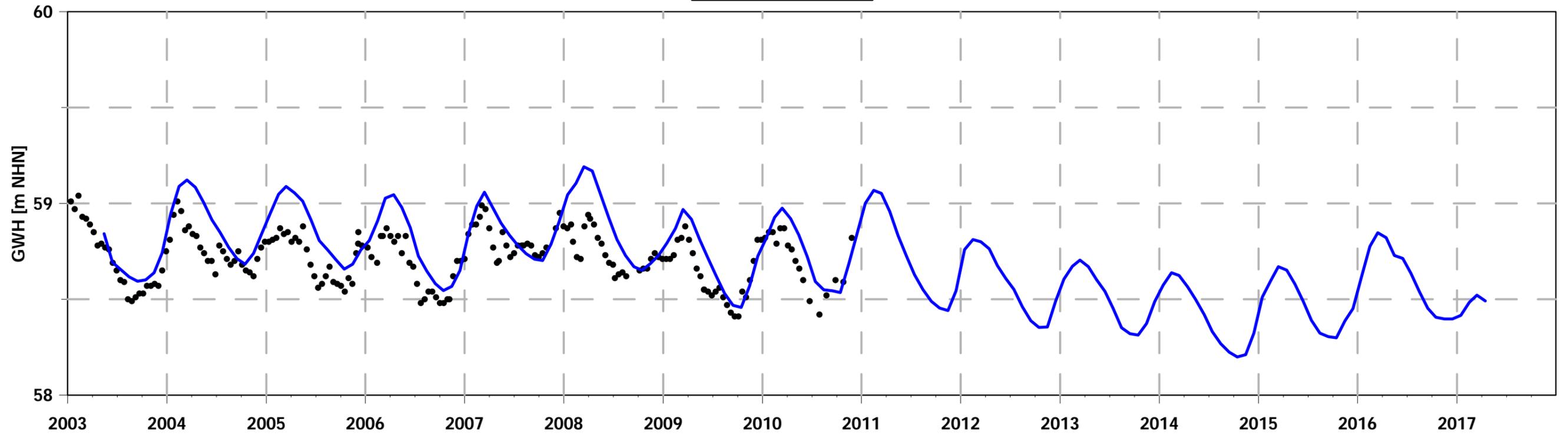
HS\_75



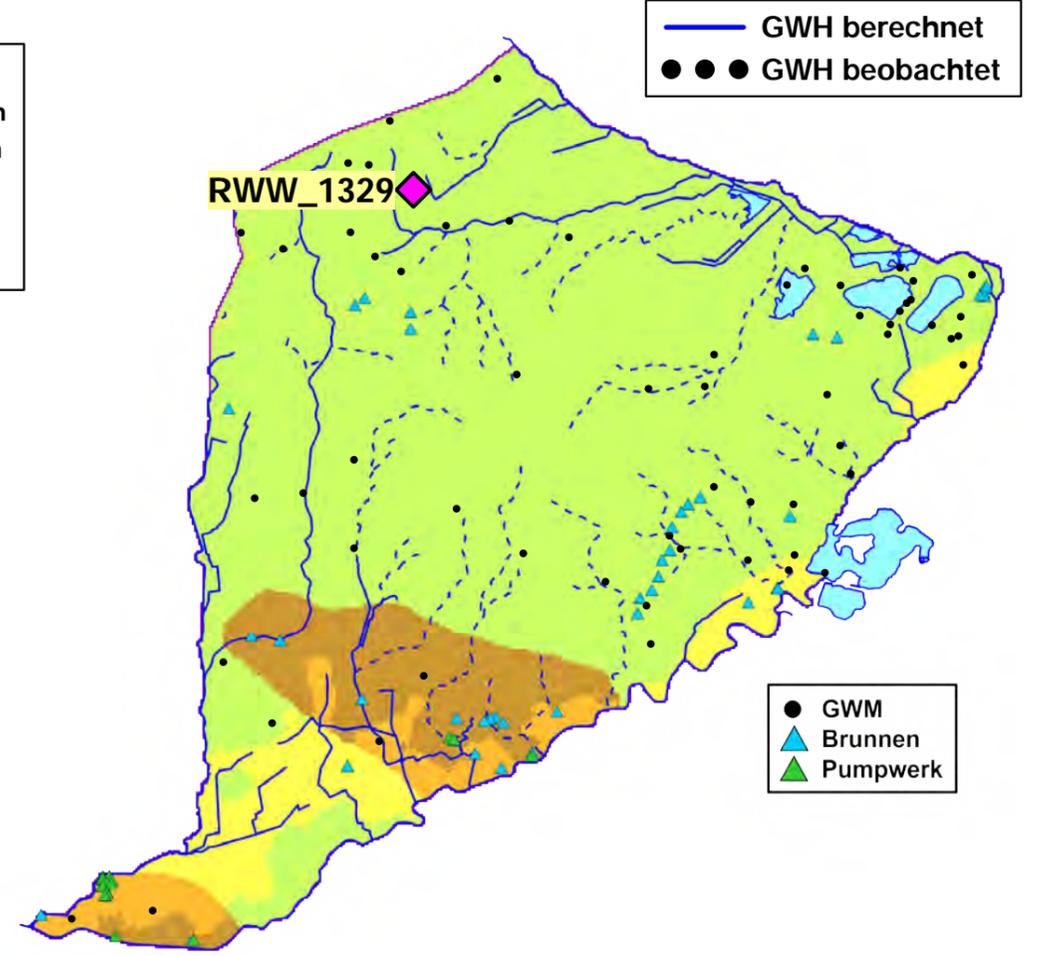
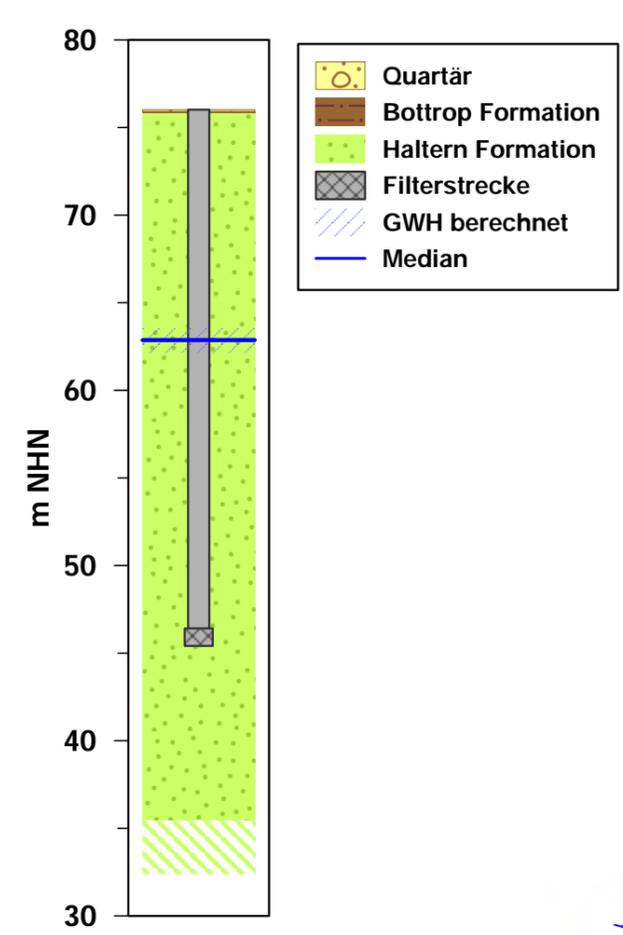
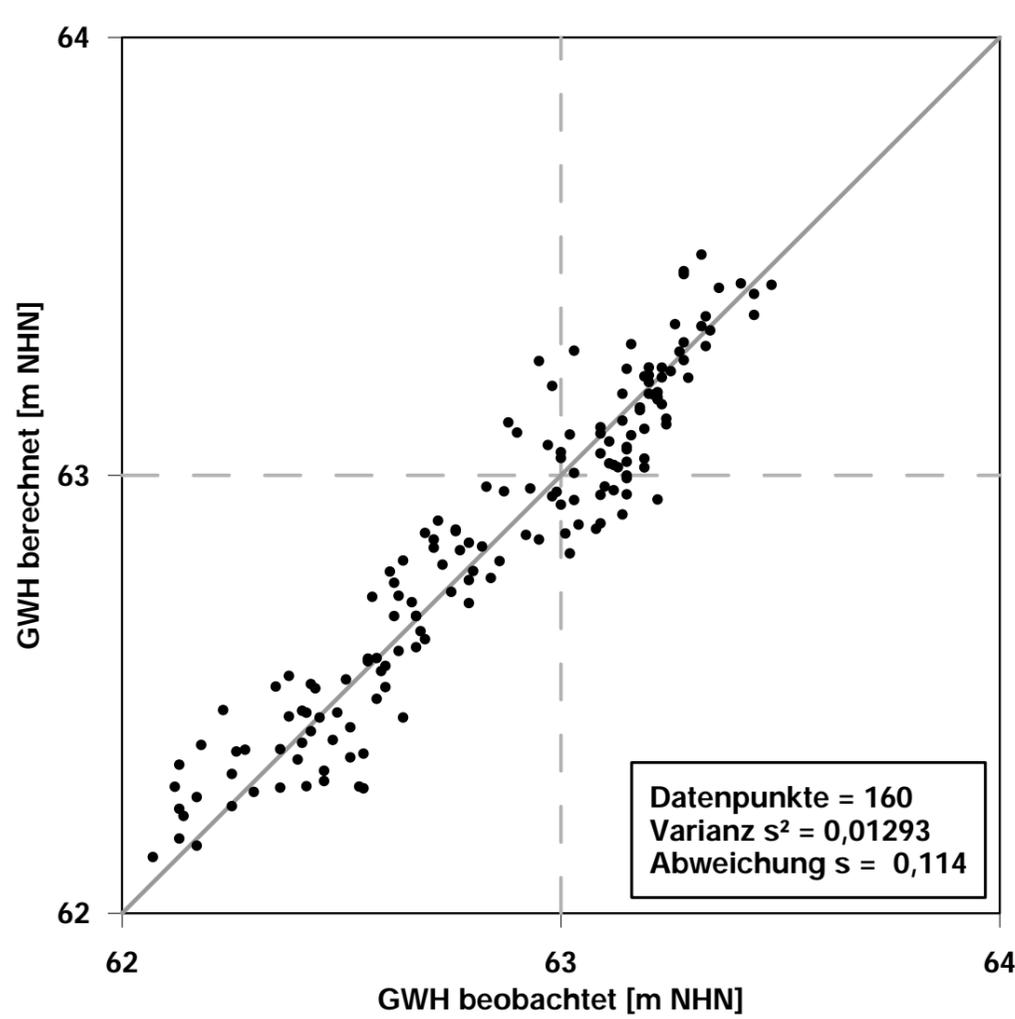
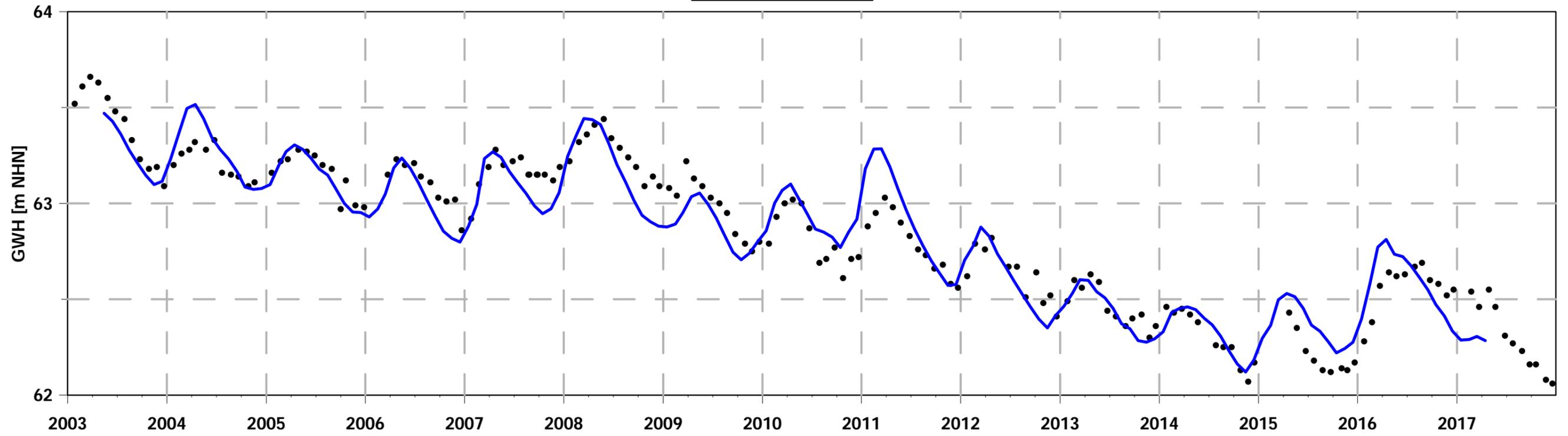
RWW\_1342



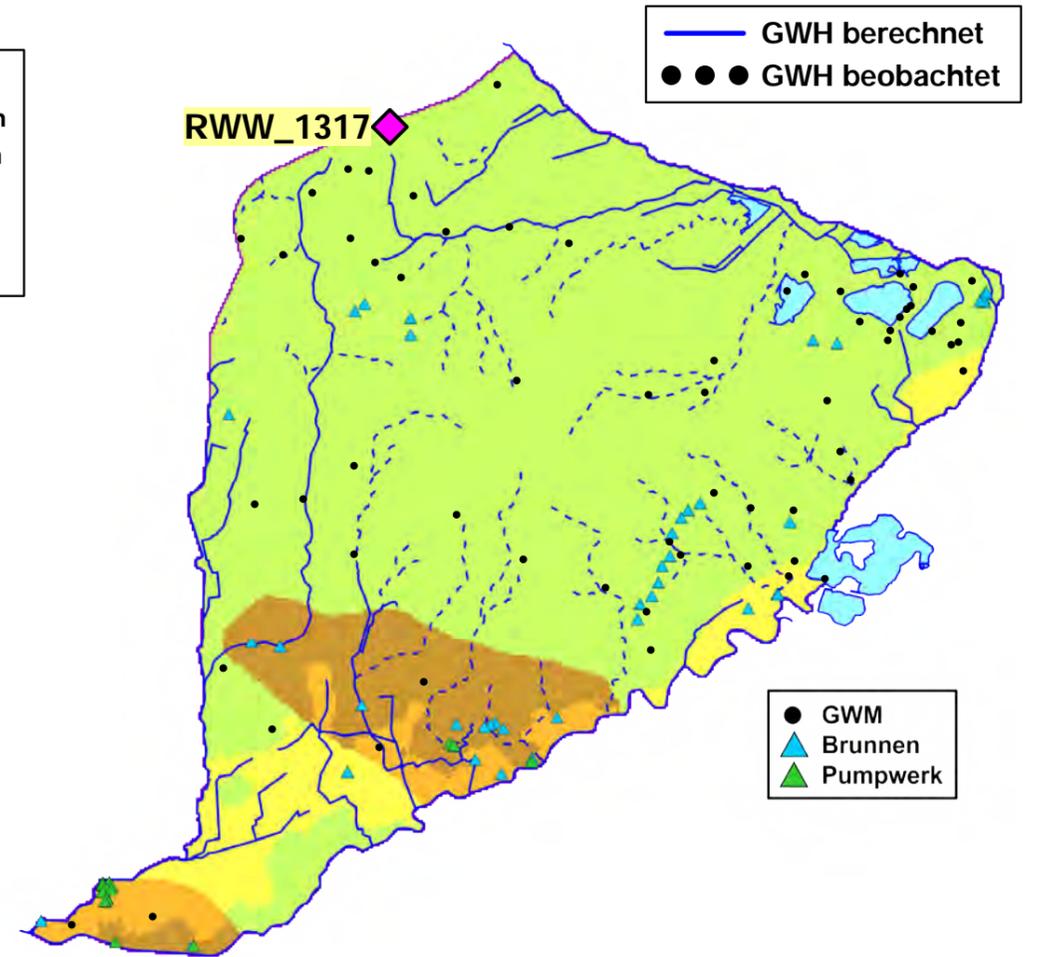
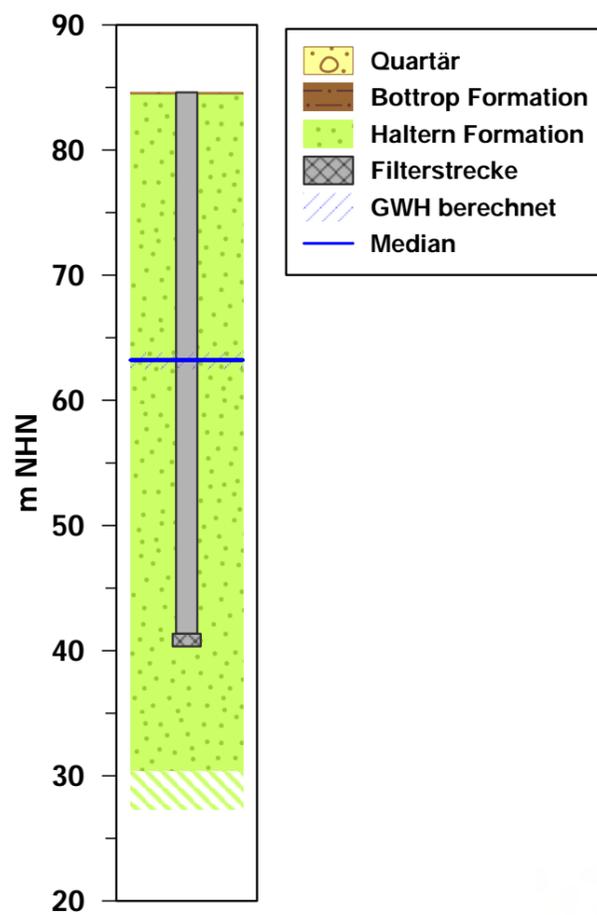
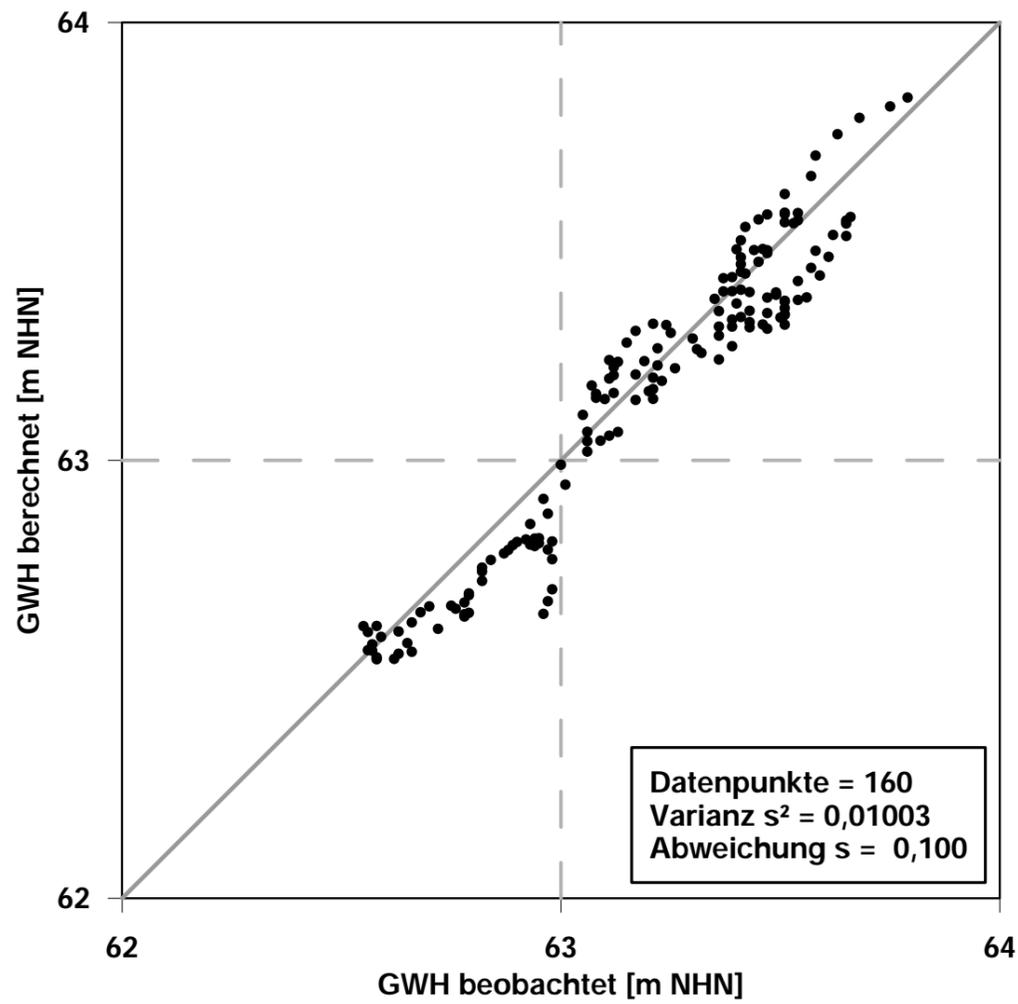
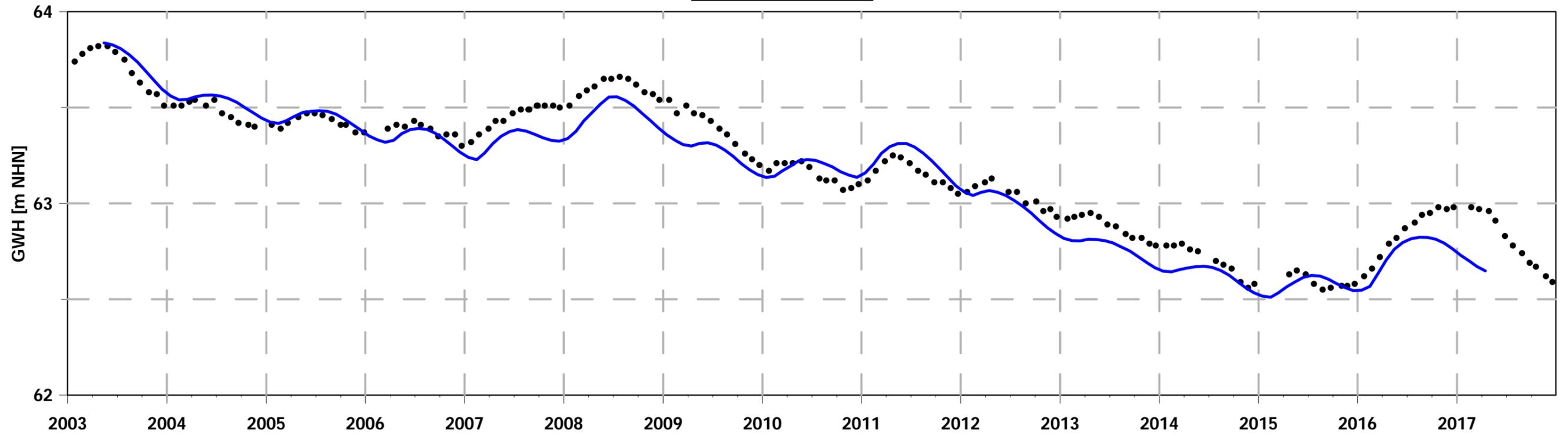
HS\_67



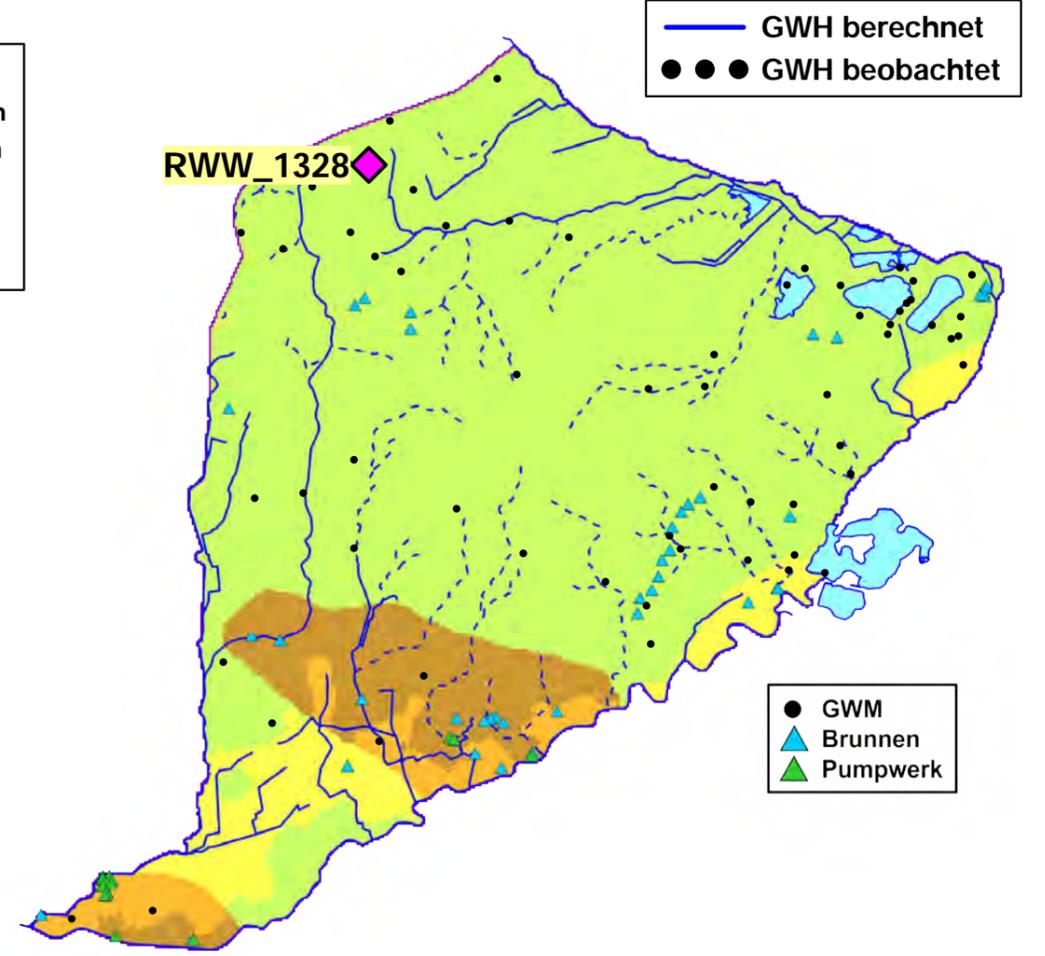
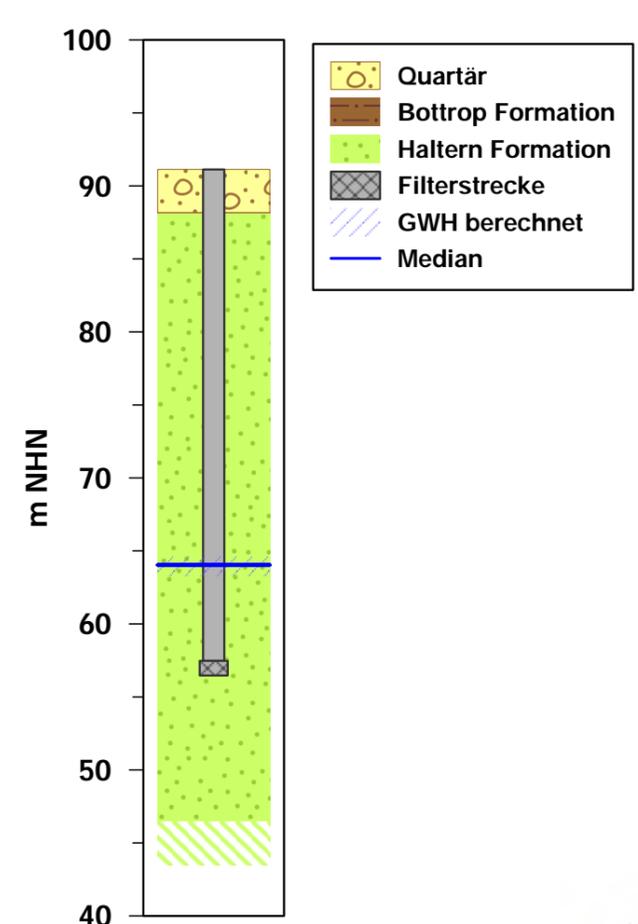
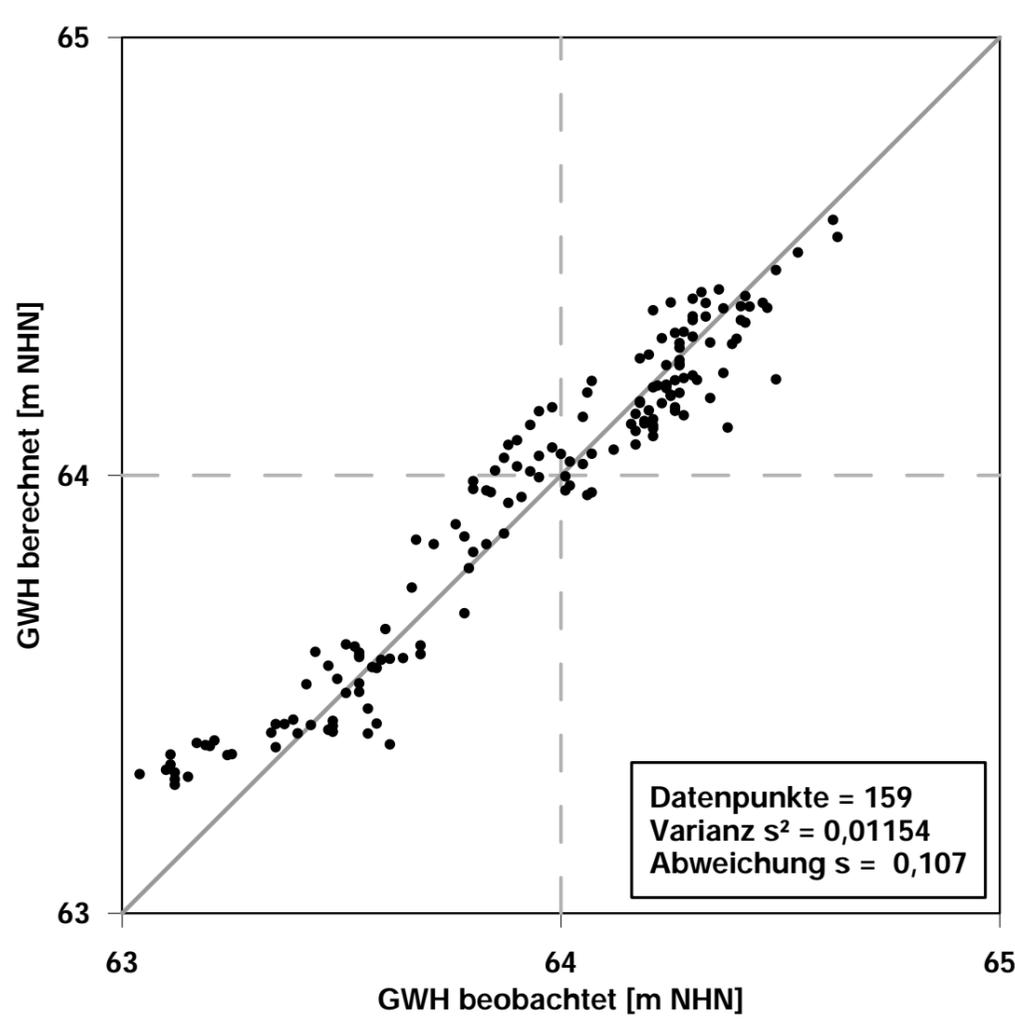
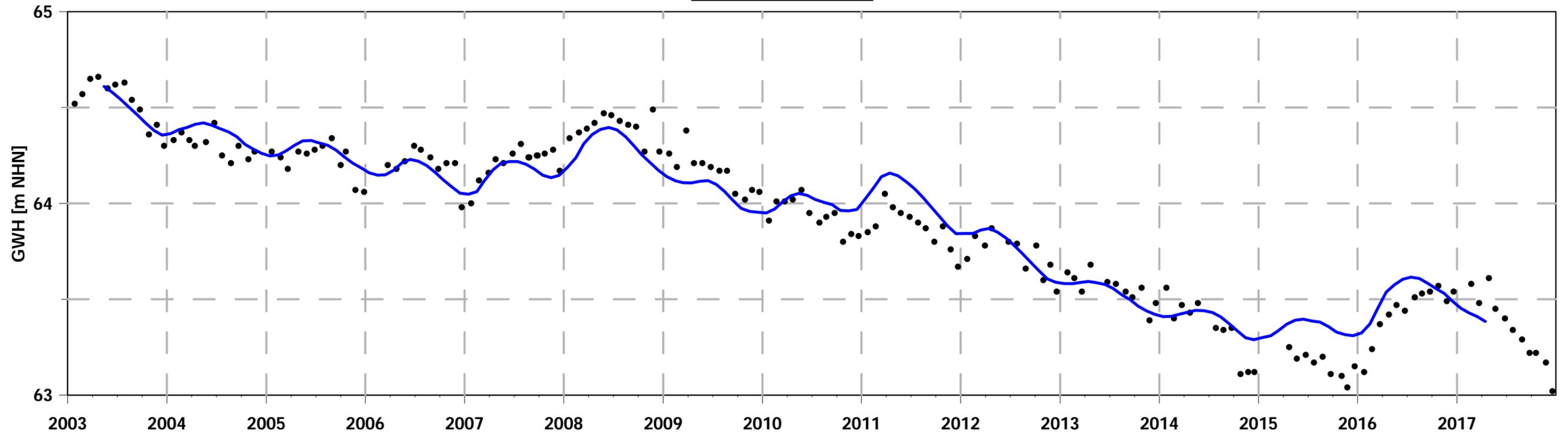
RWW\_1329



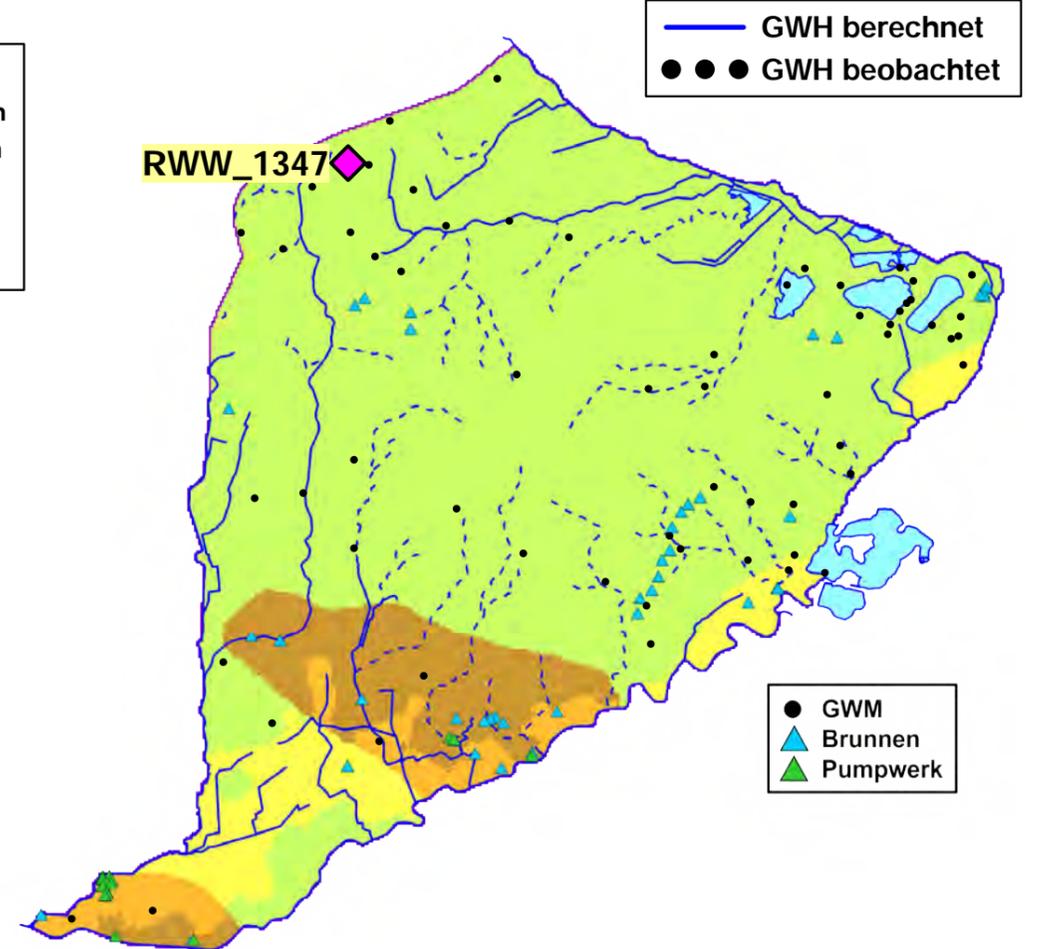
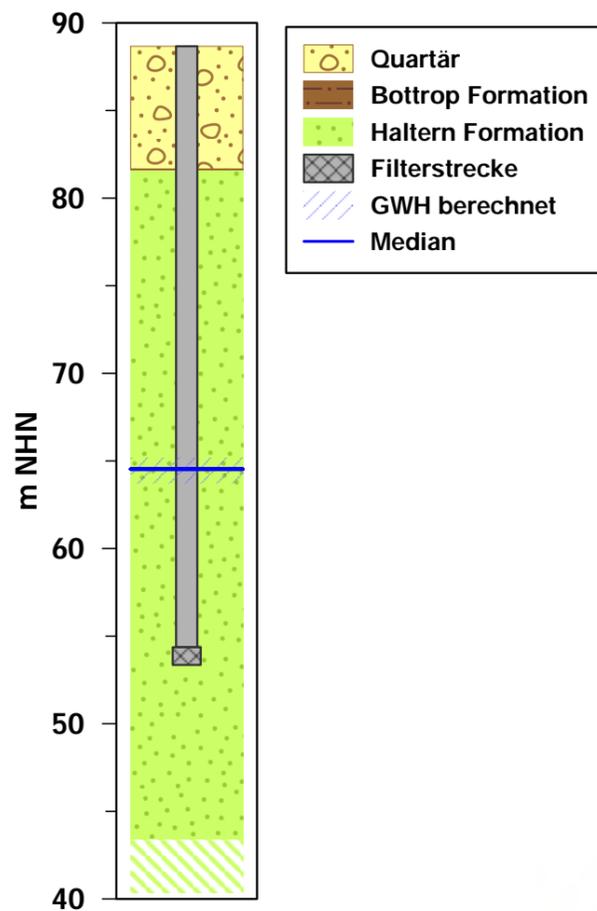
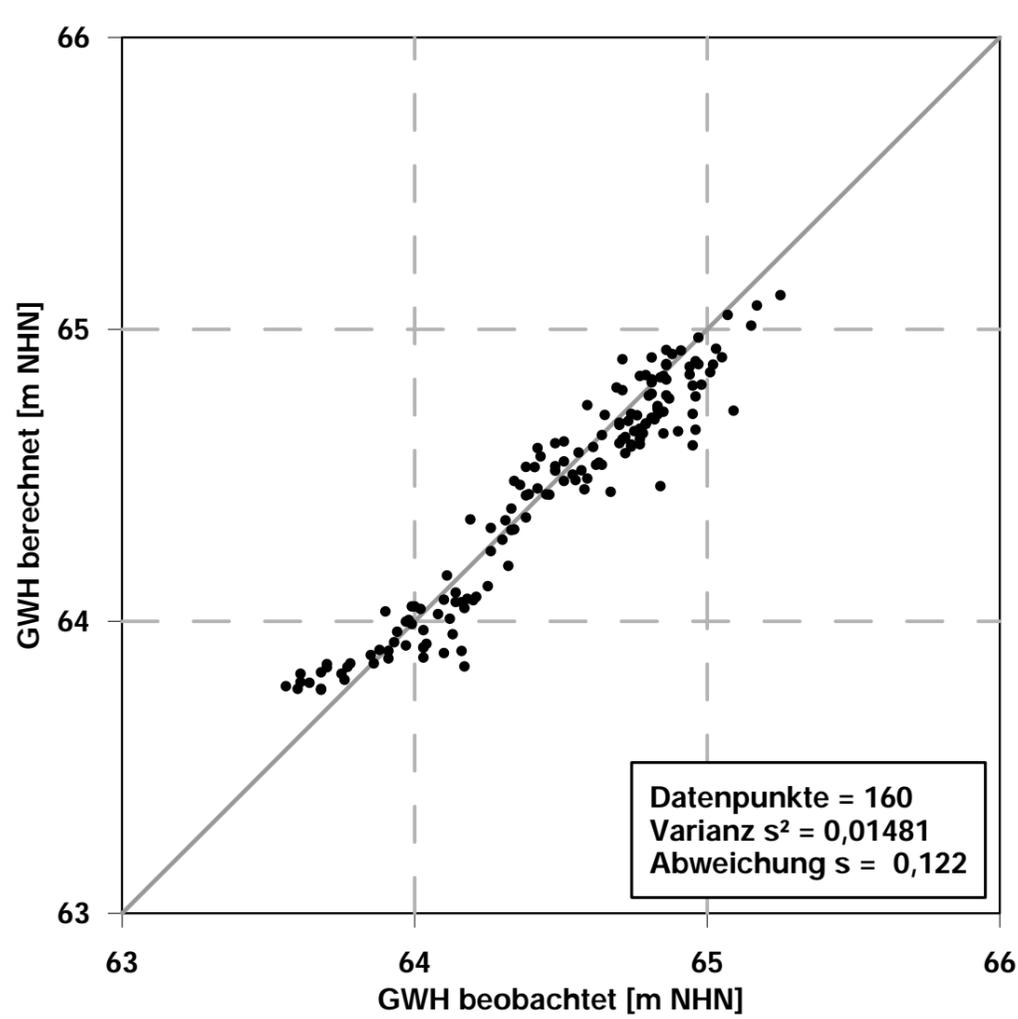
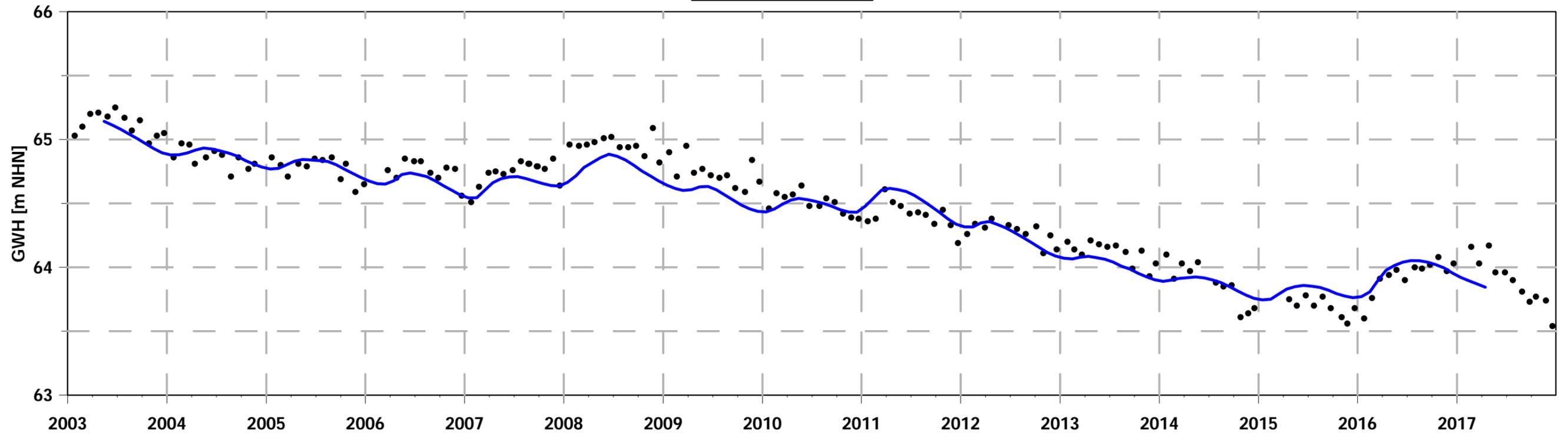
RWW\_1317



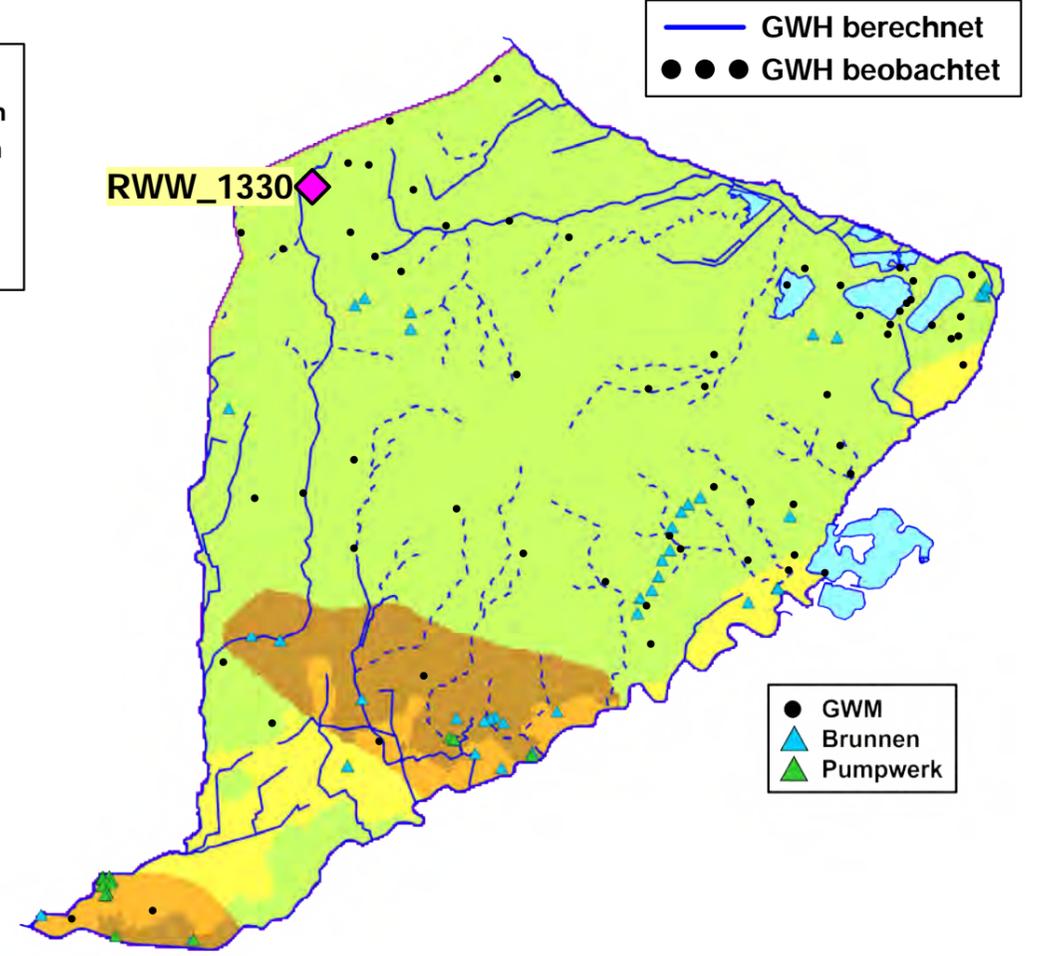
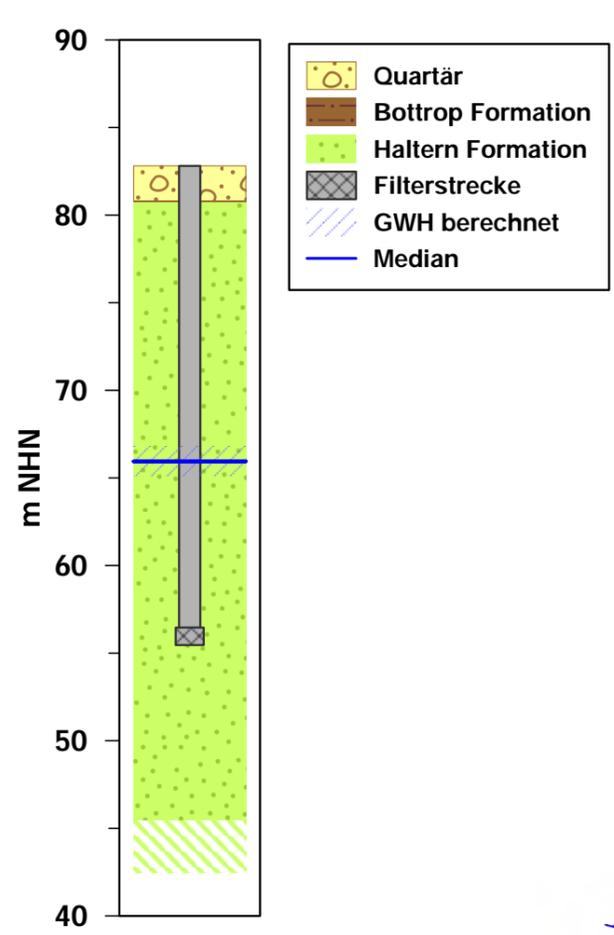
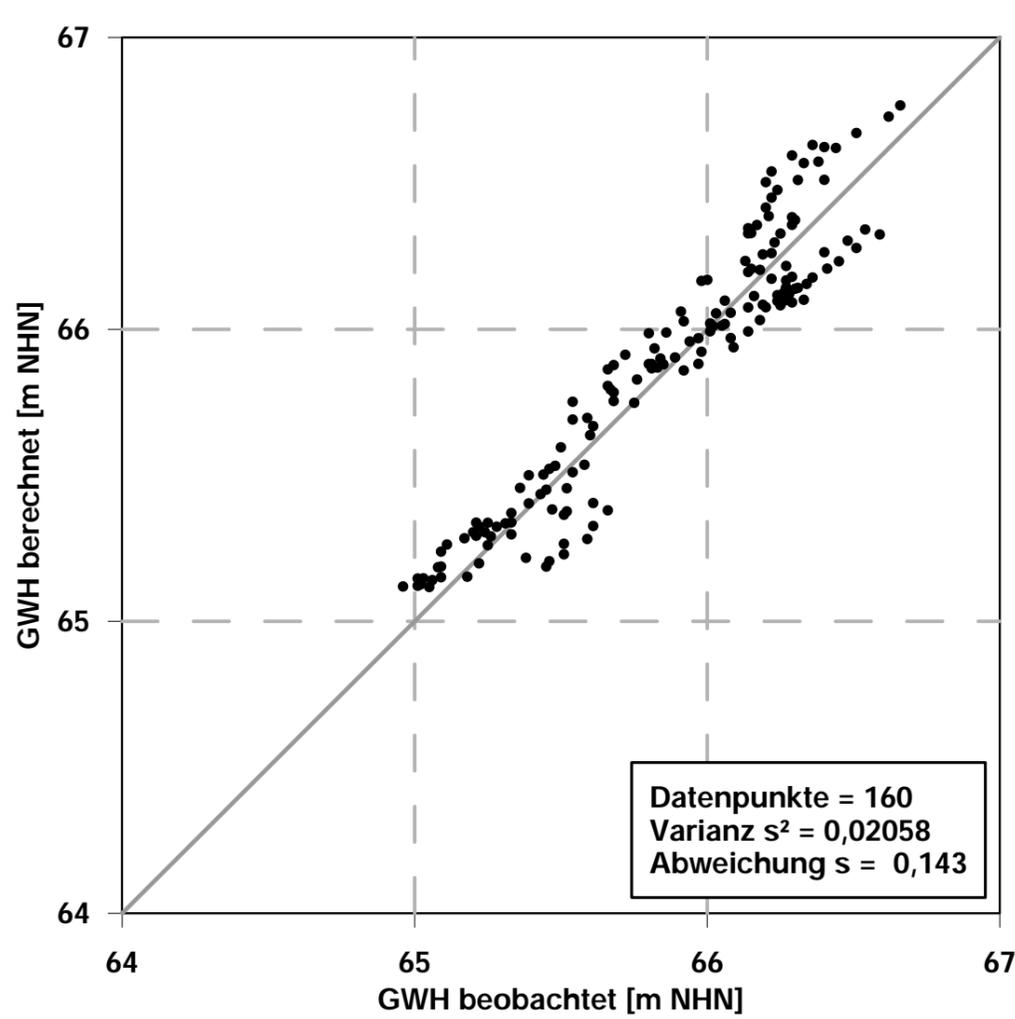
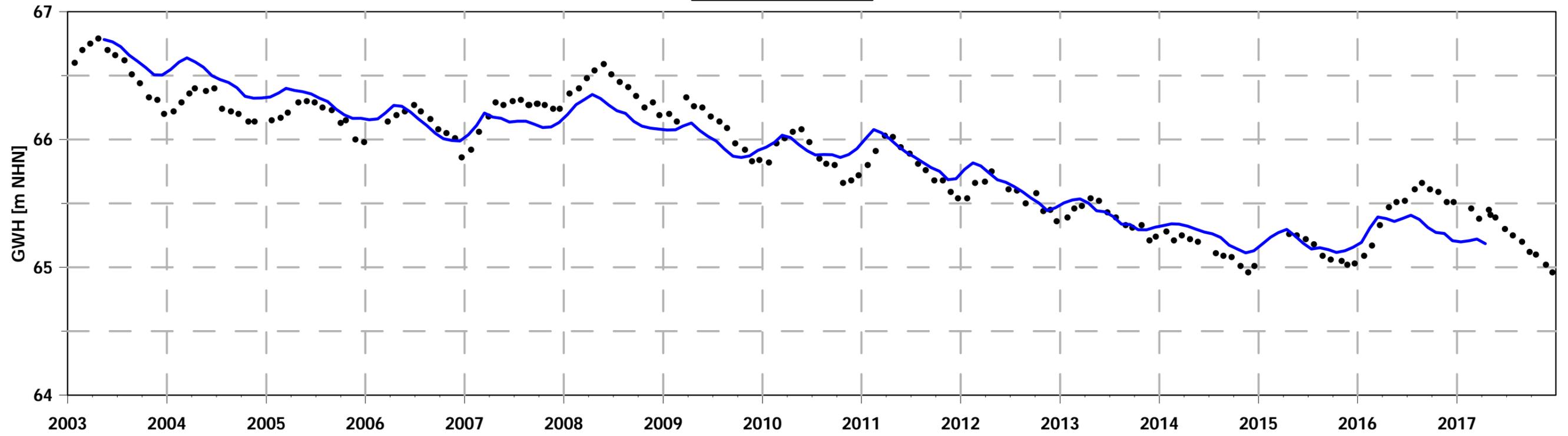
RWW\_1328



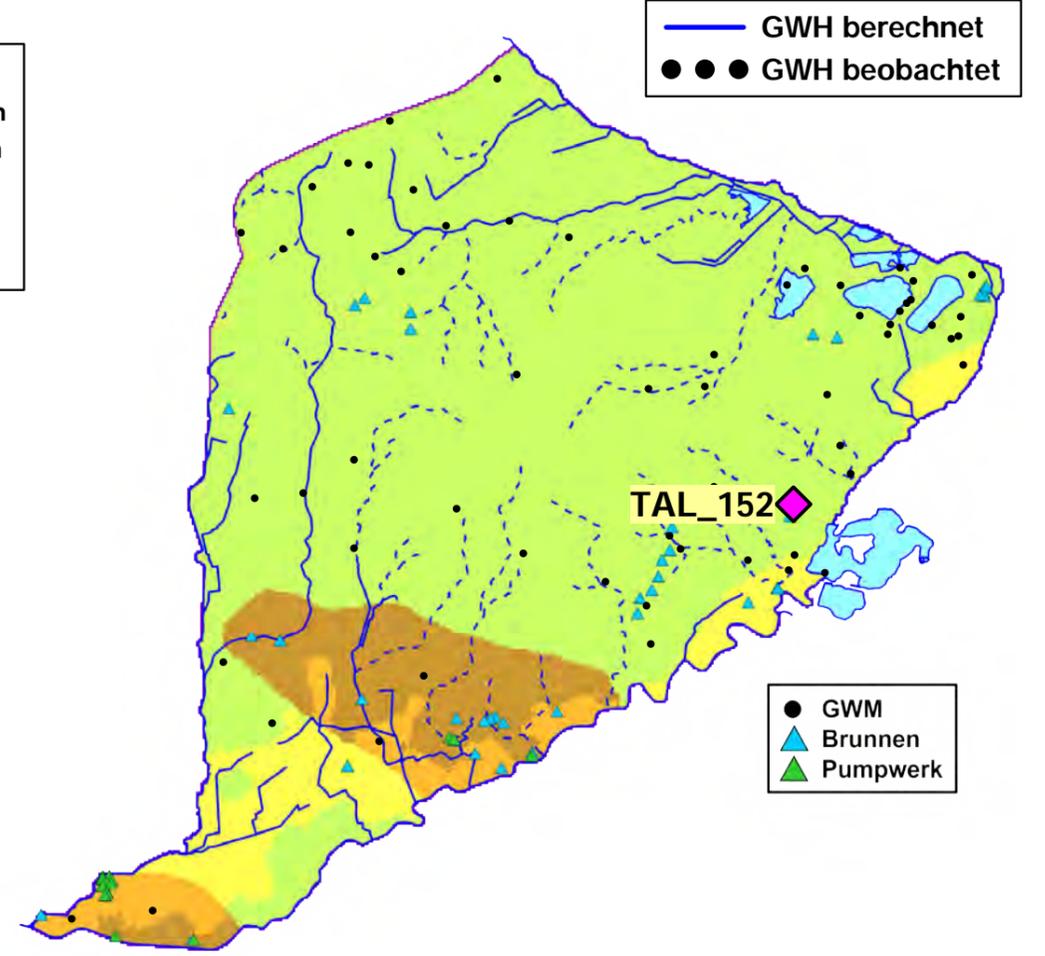
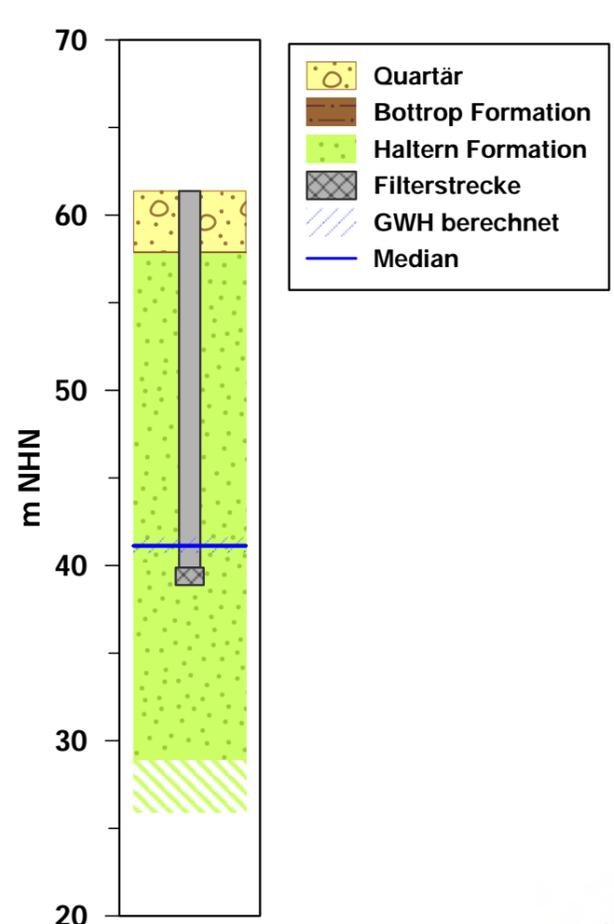
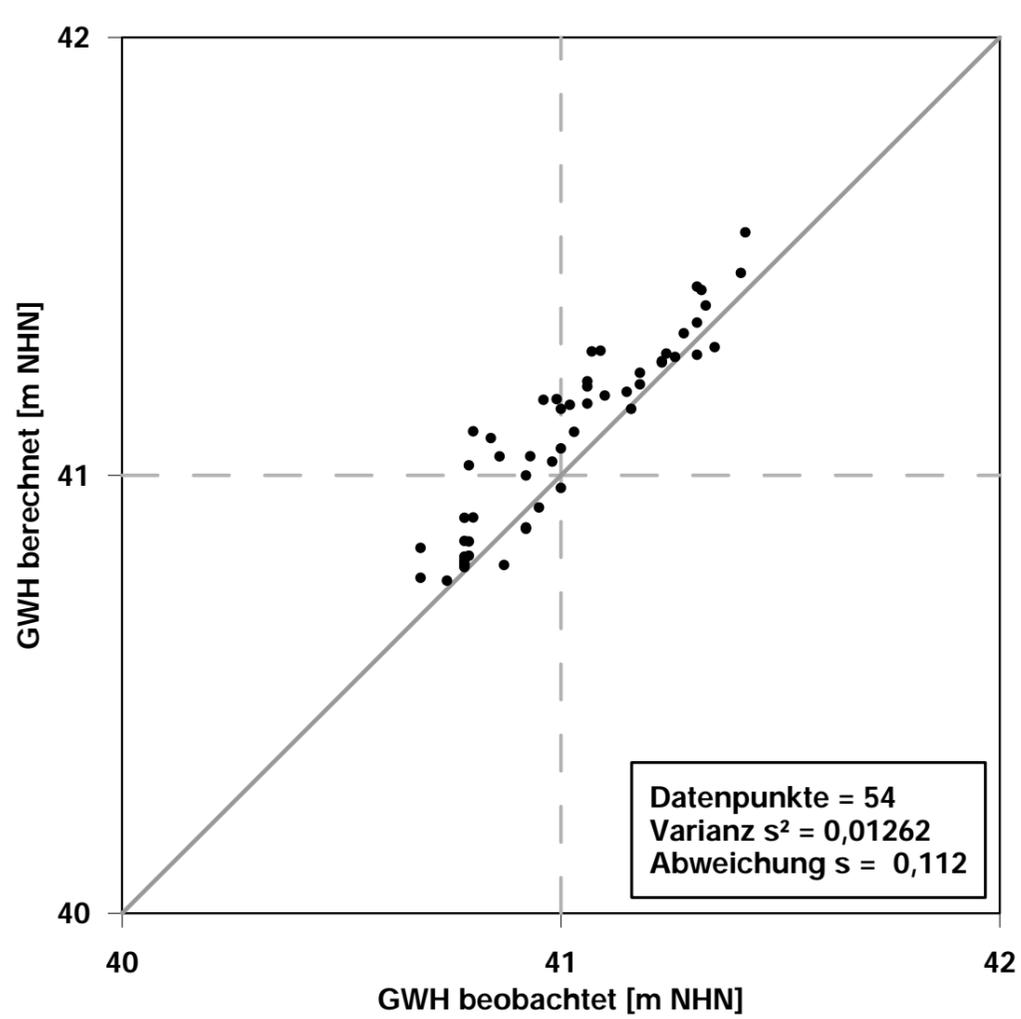
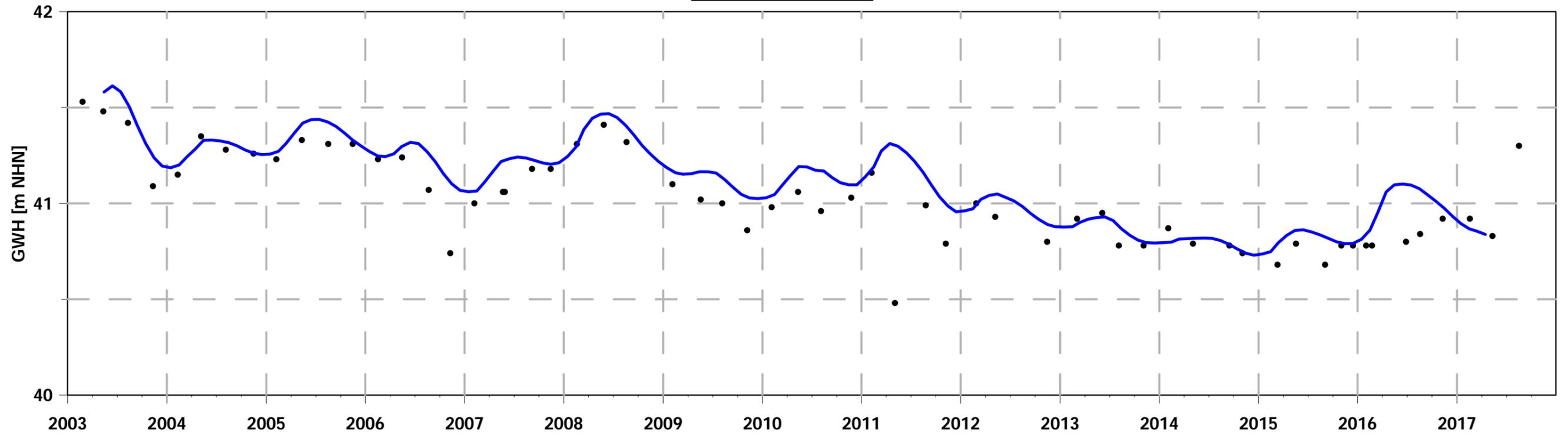
RWW\_1347



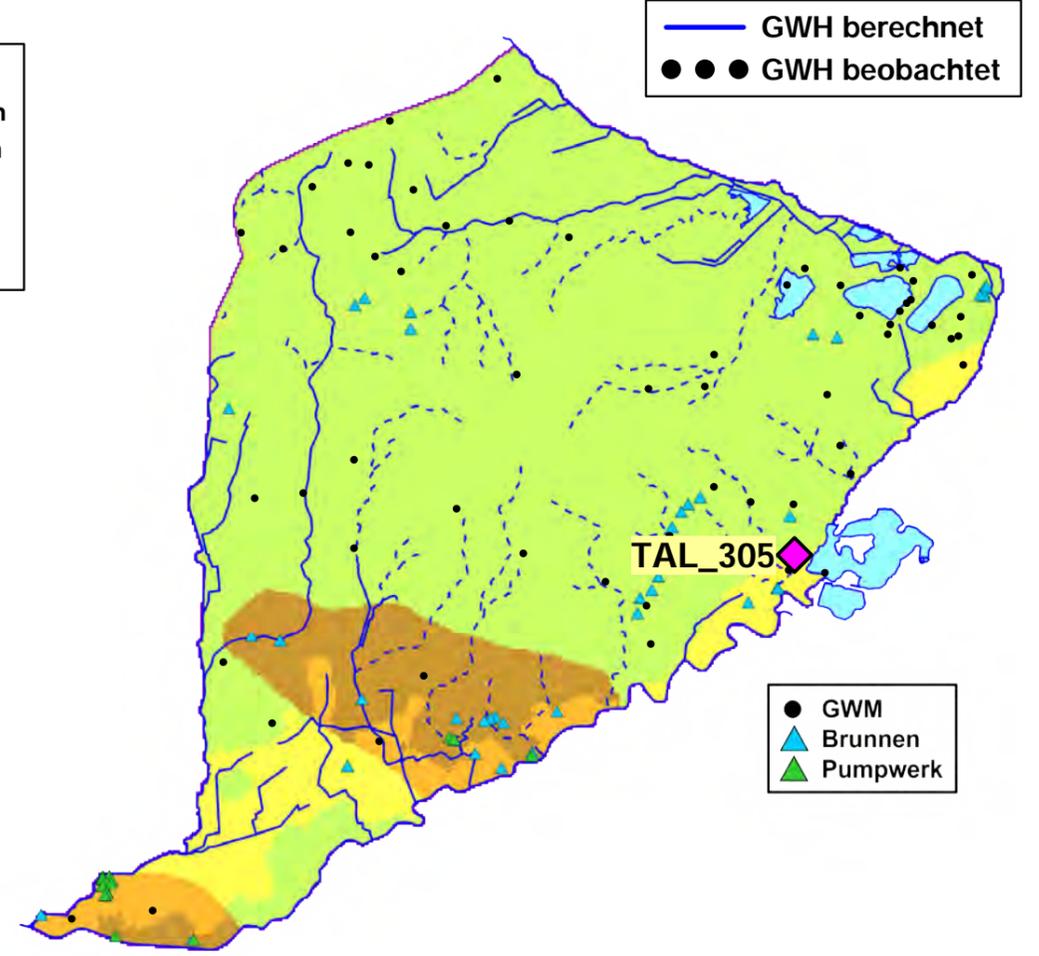
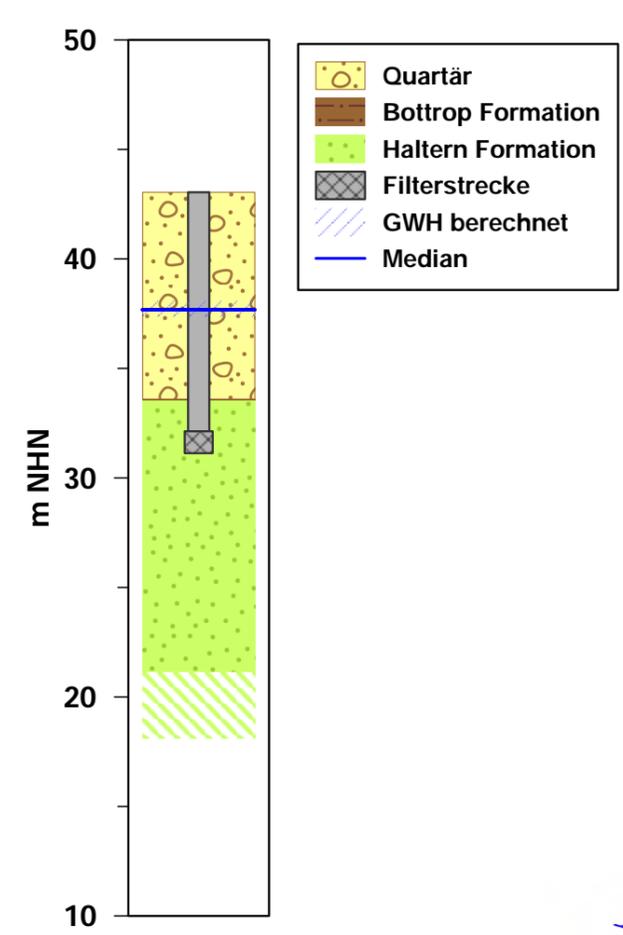
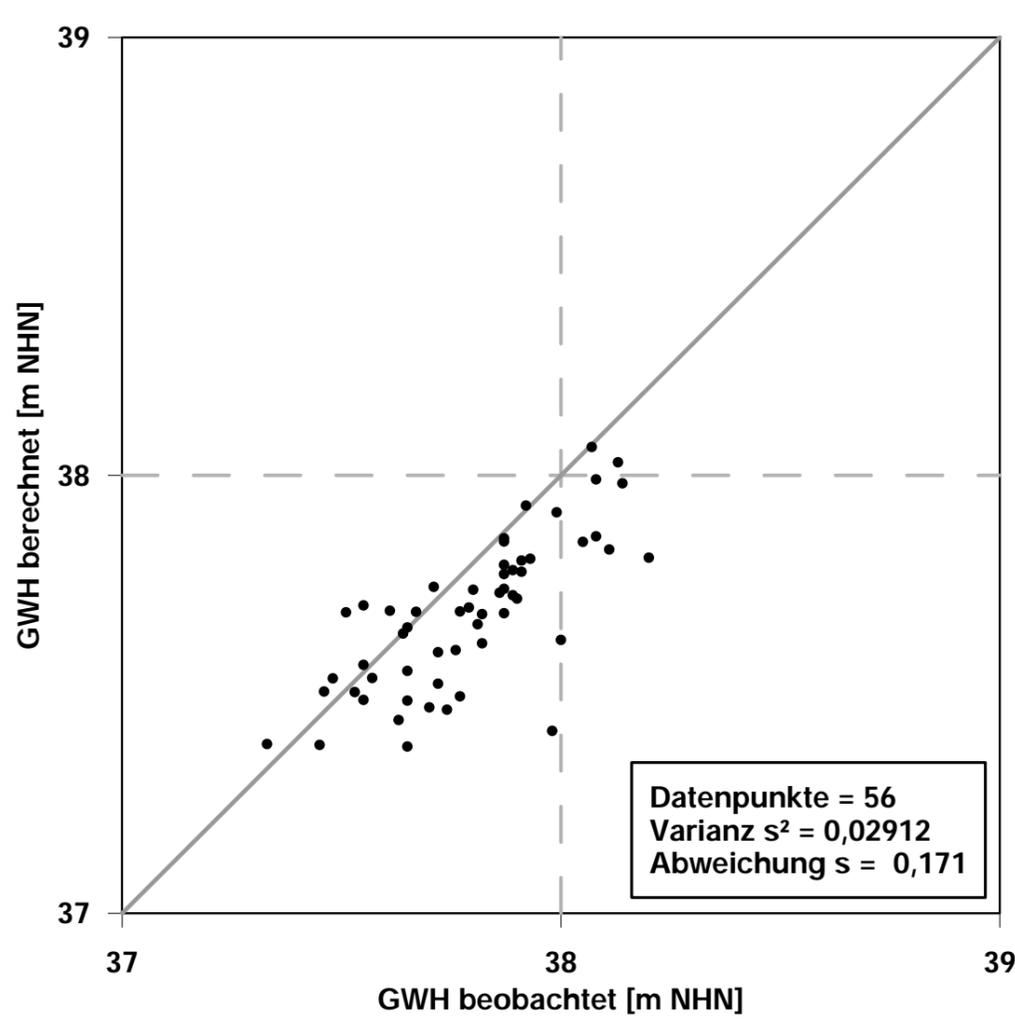
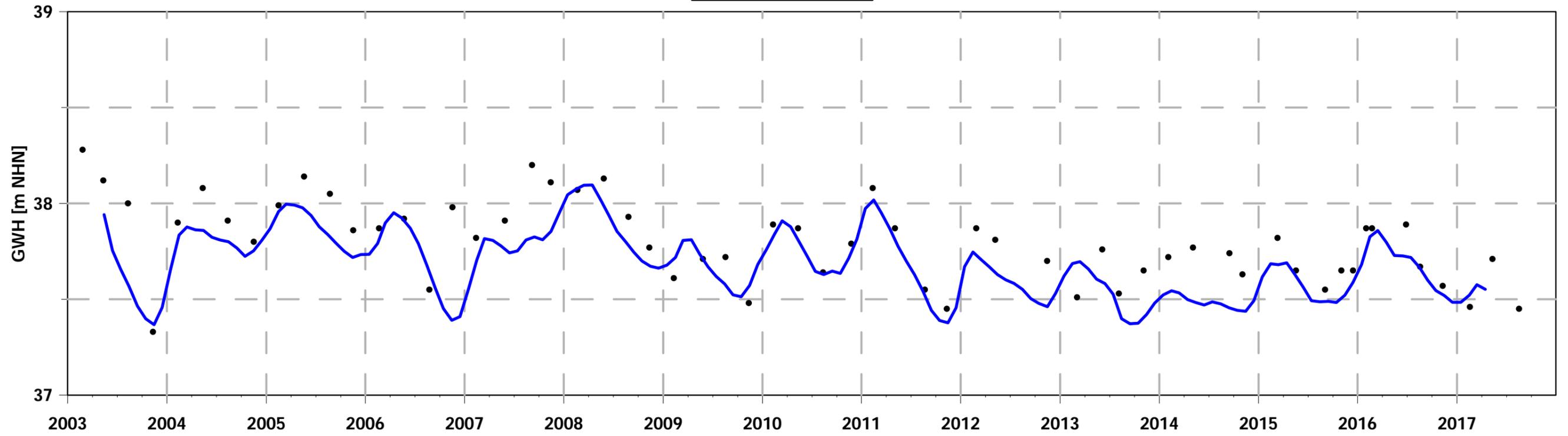
RWW\_1330



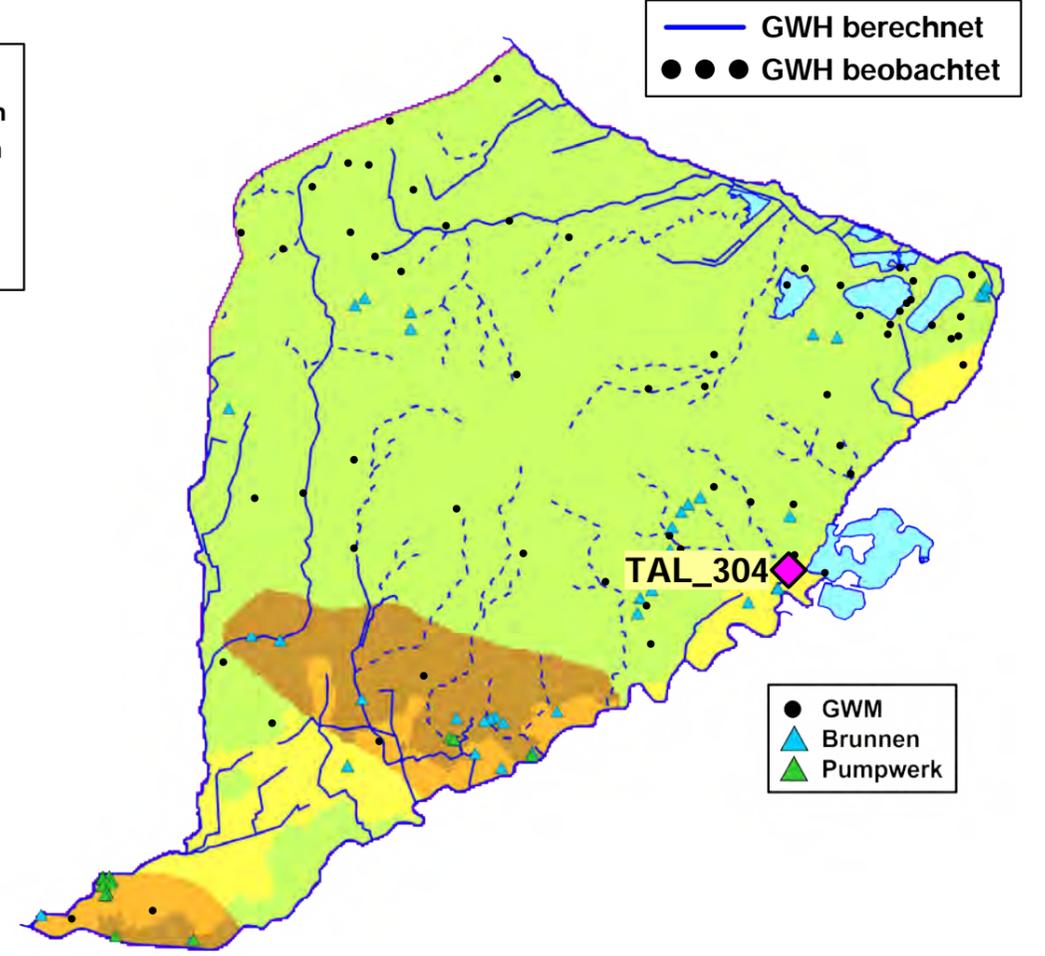
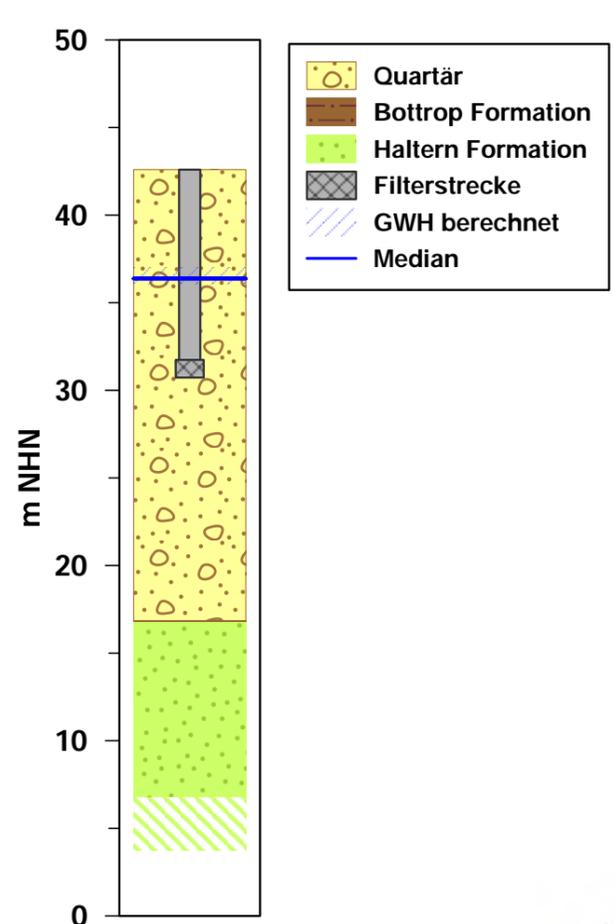
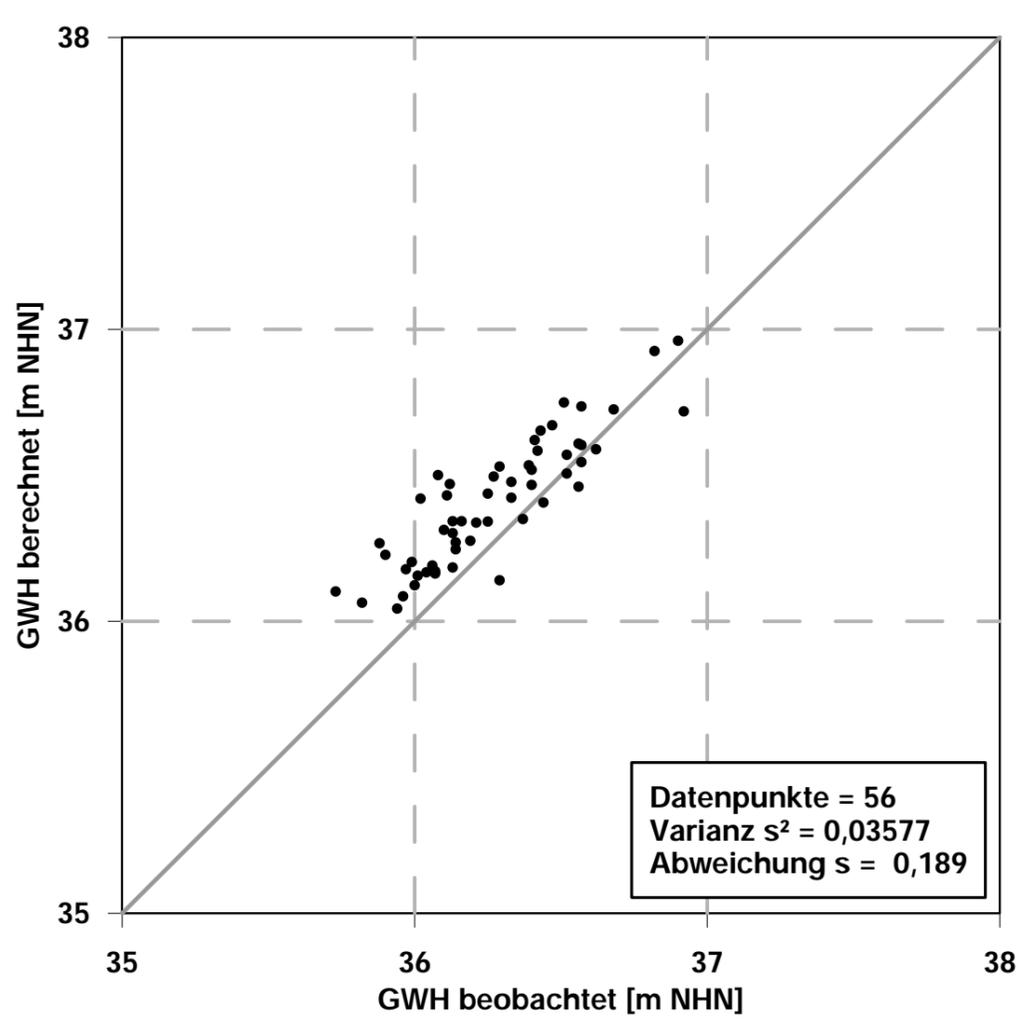
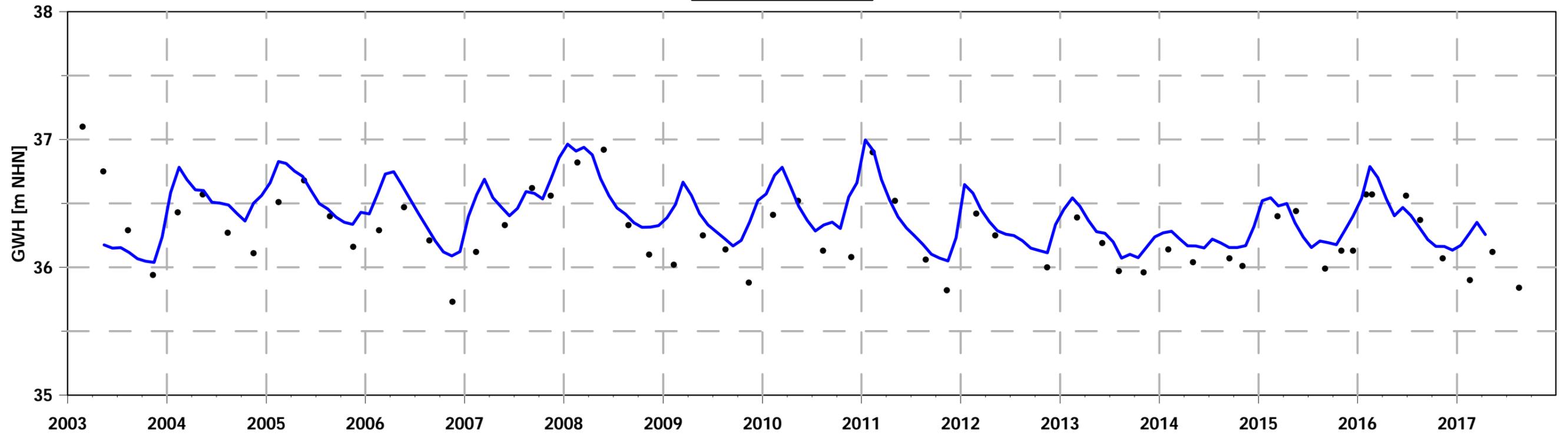
TAL\_152



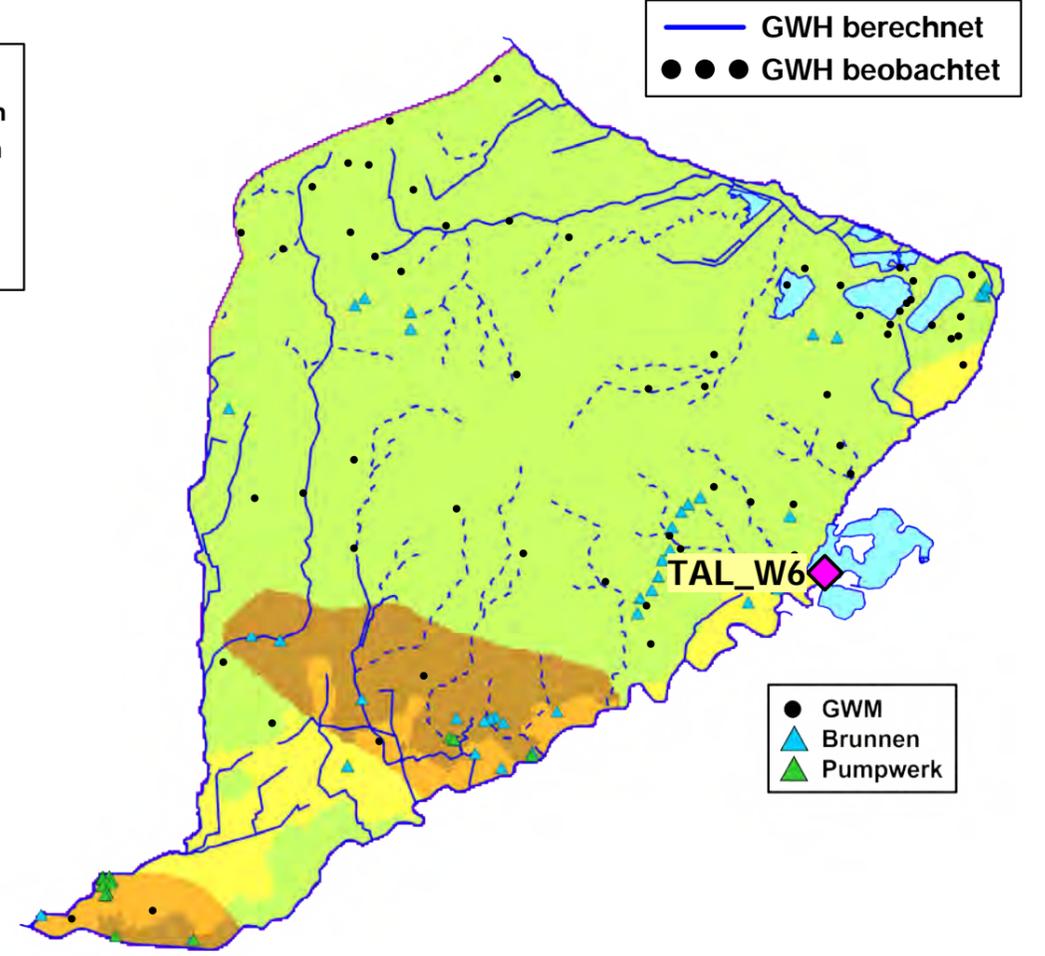
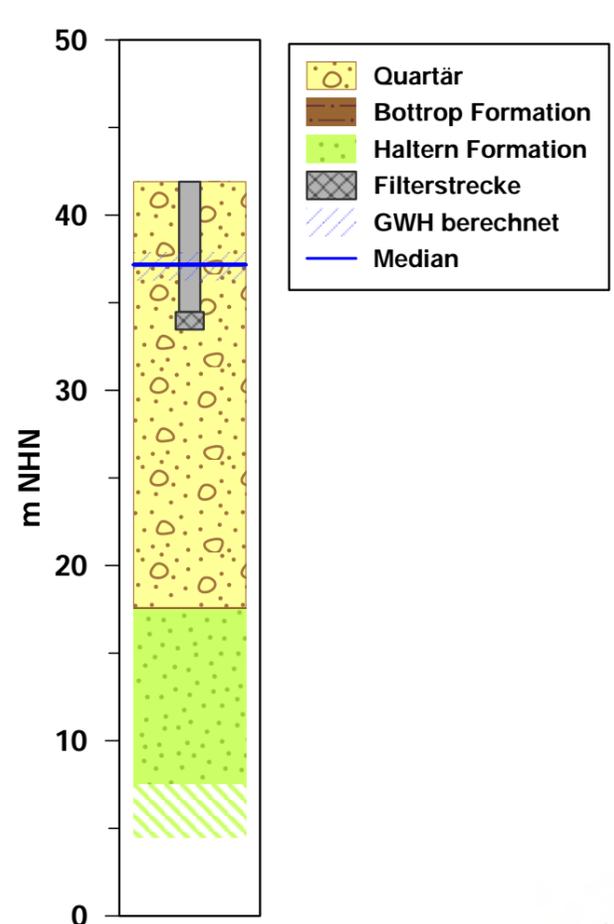
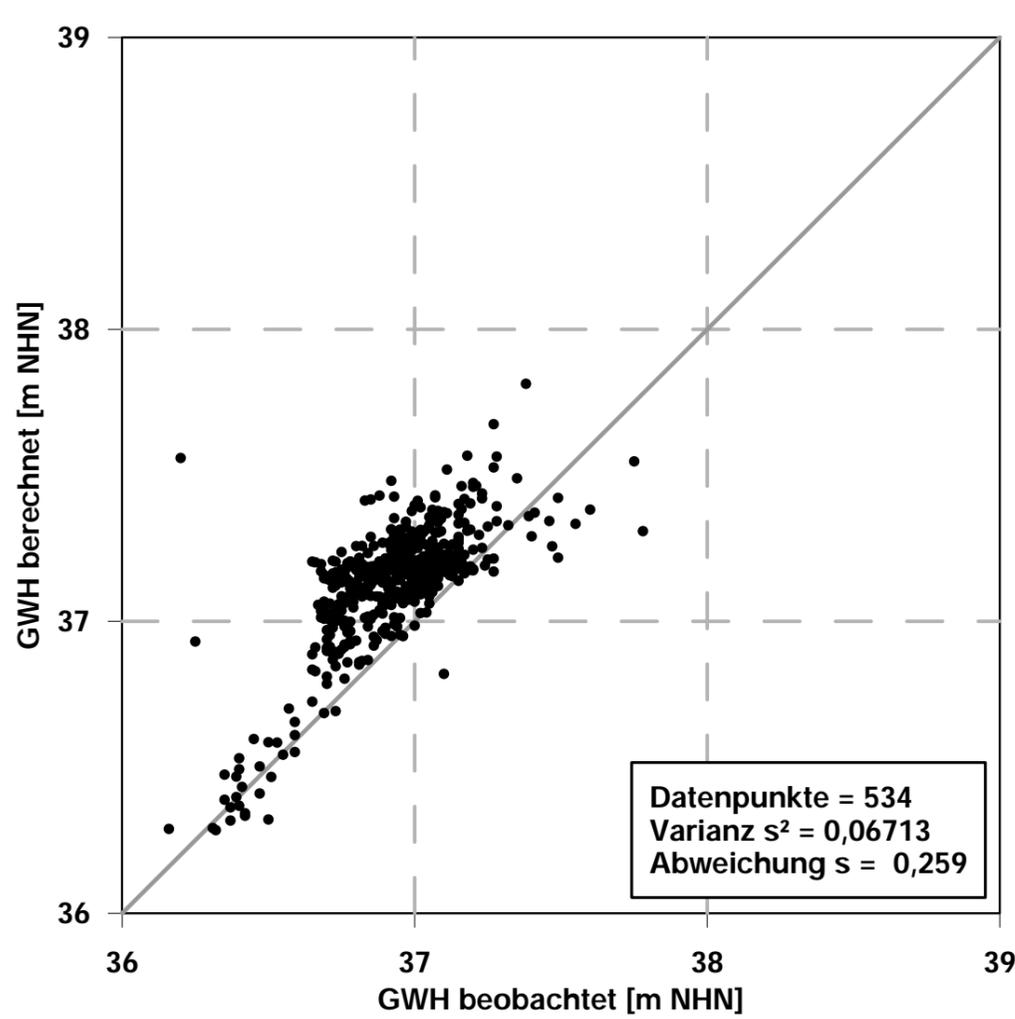
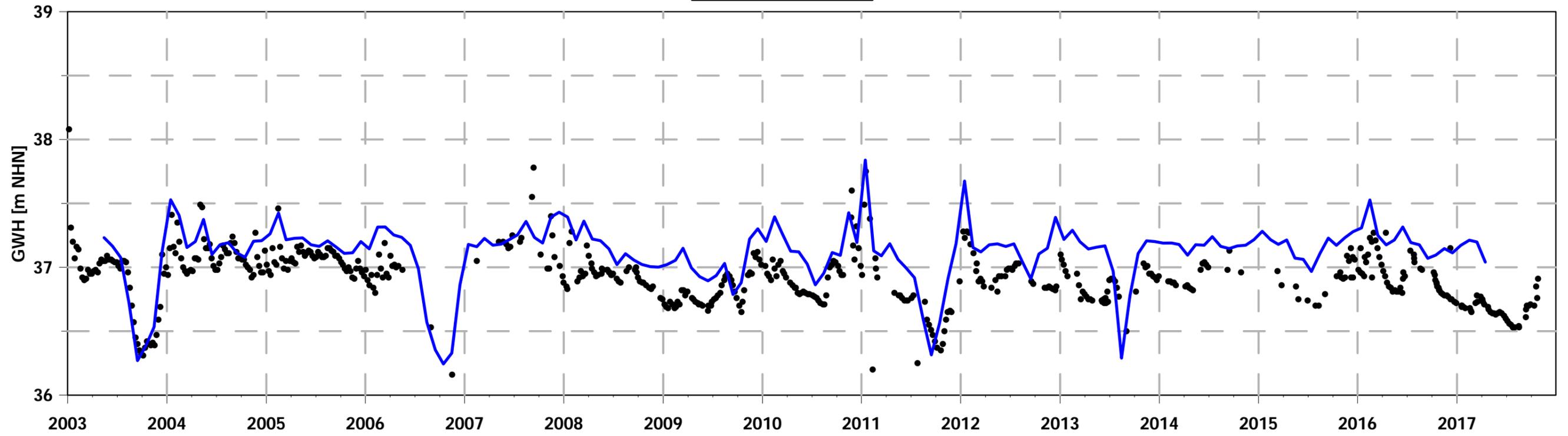
TAL\_305



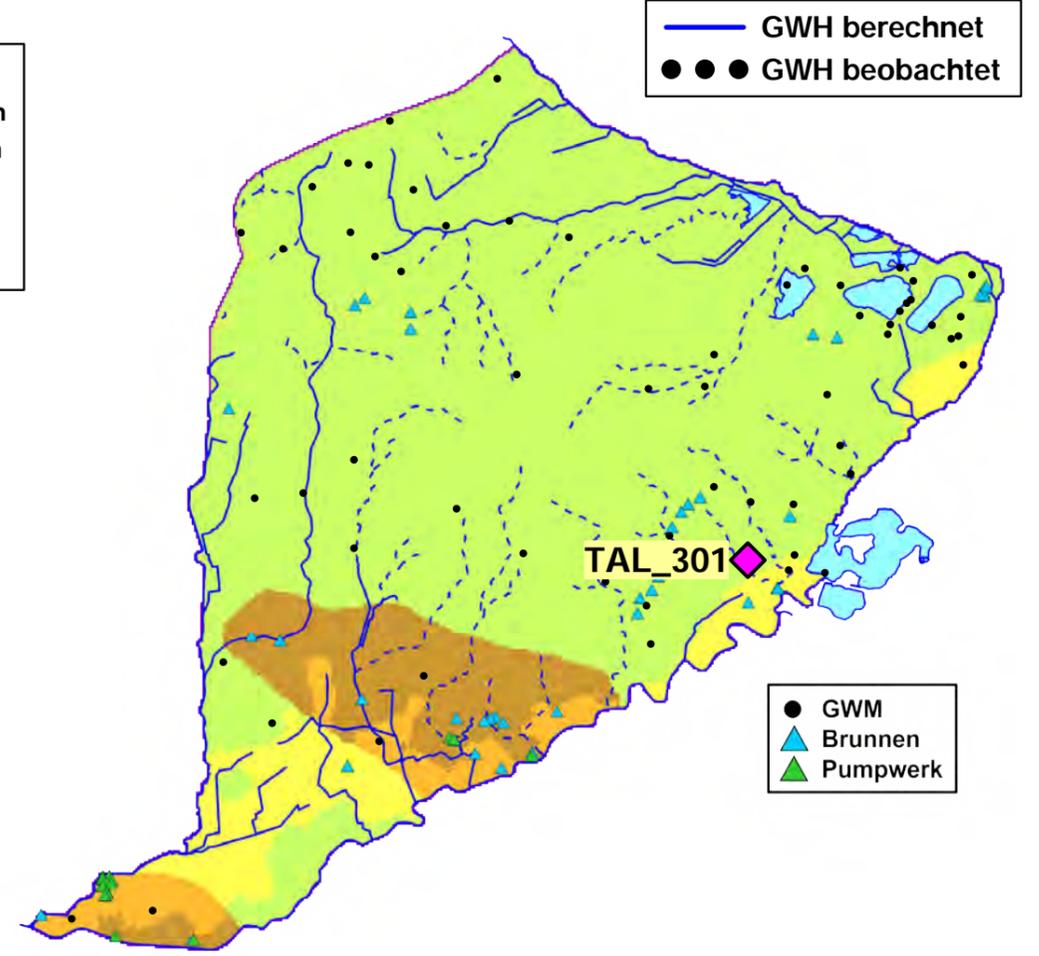
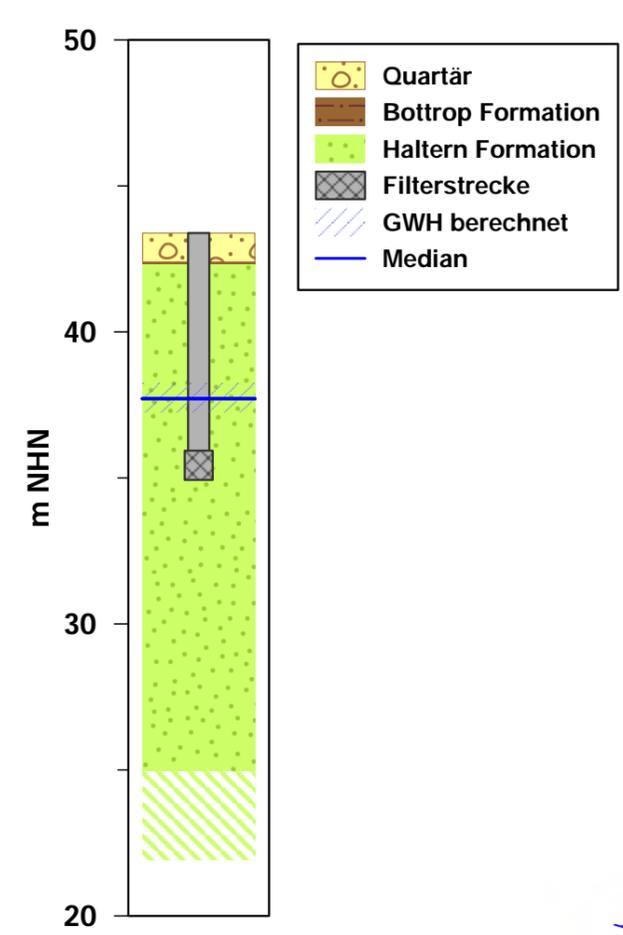
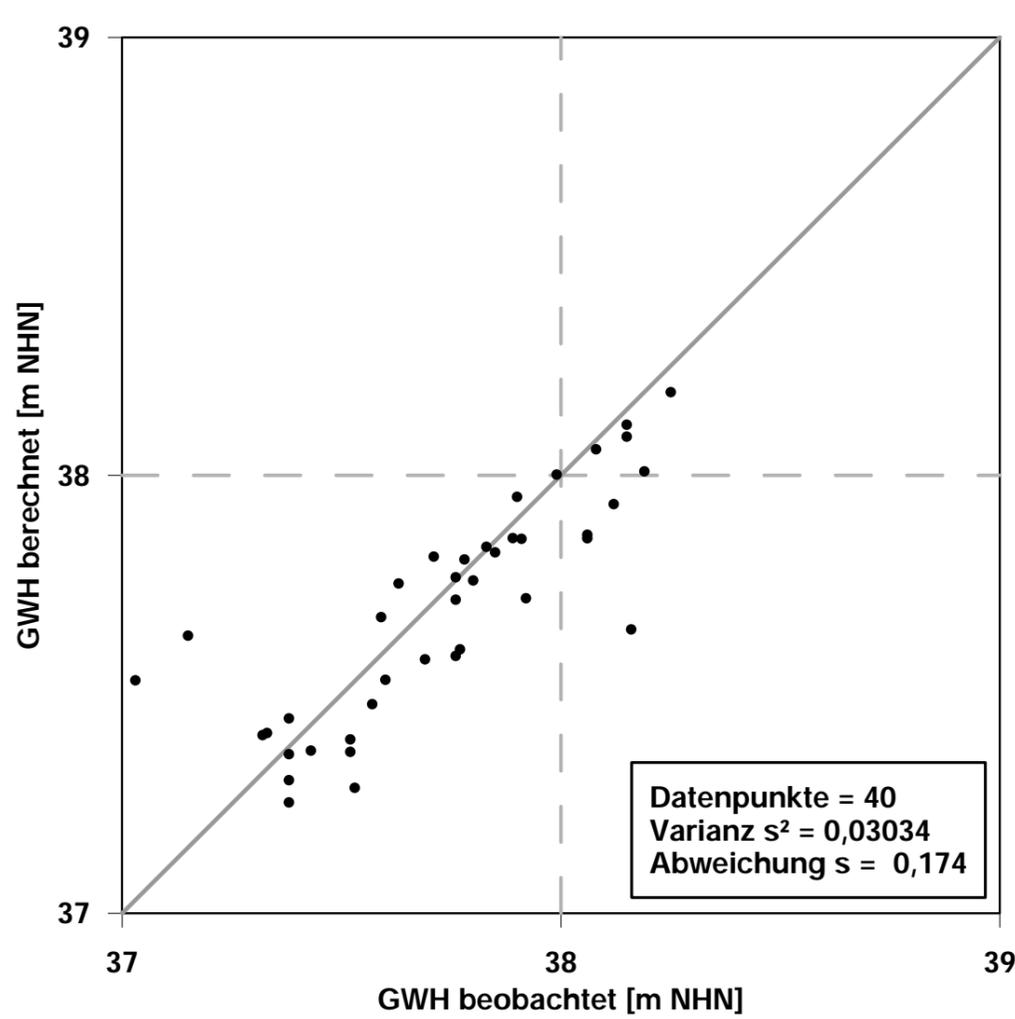
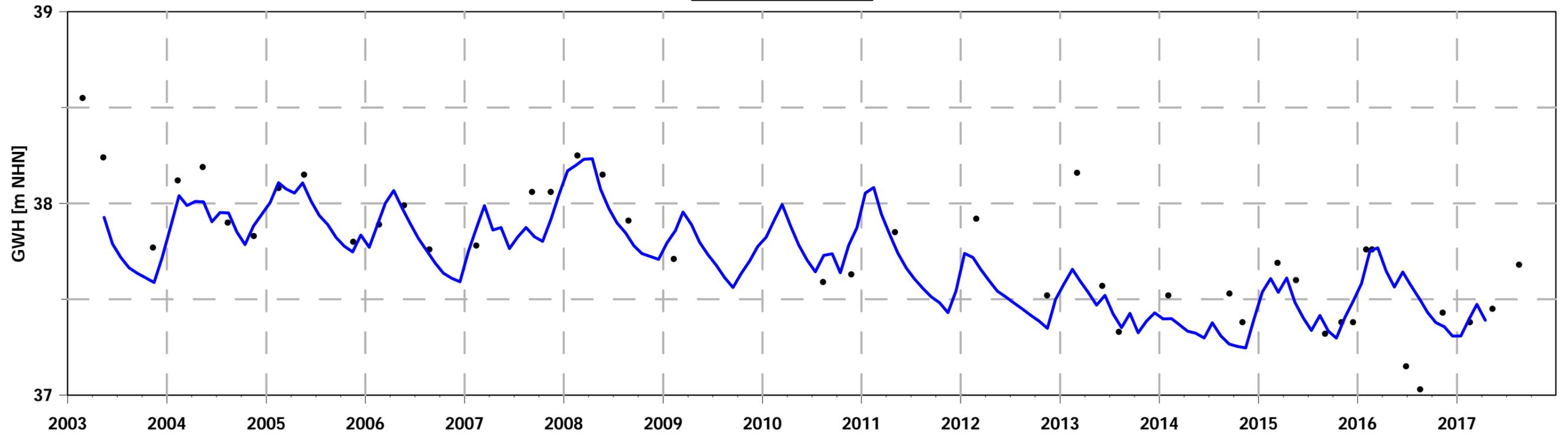
TAL\_304



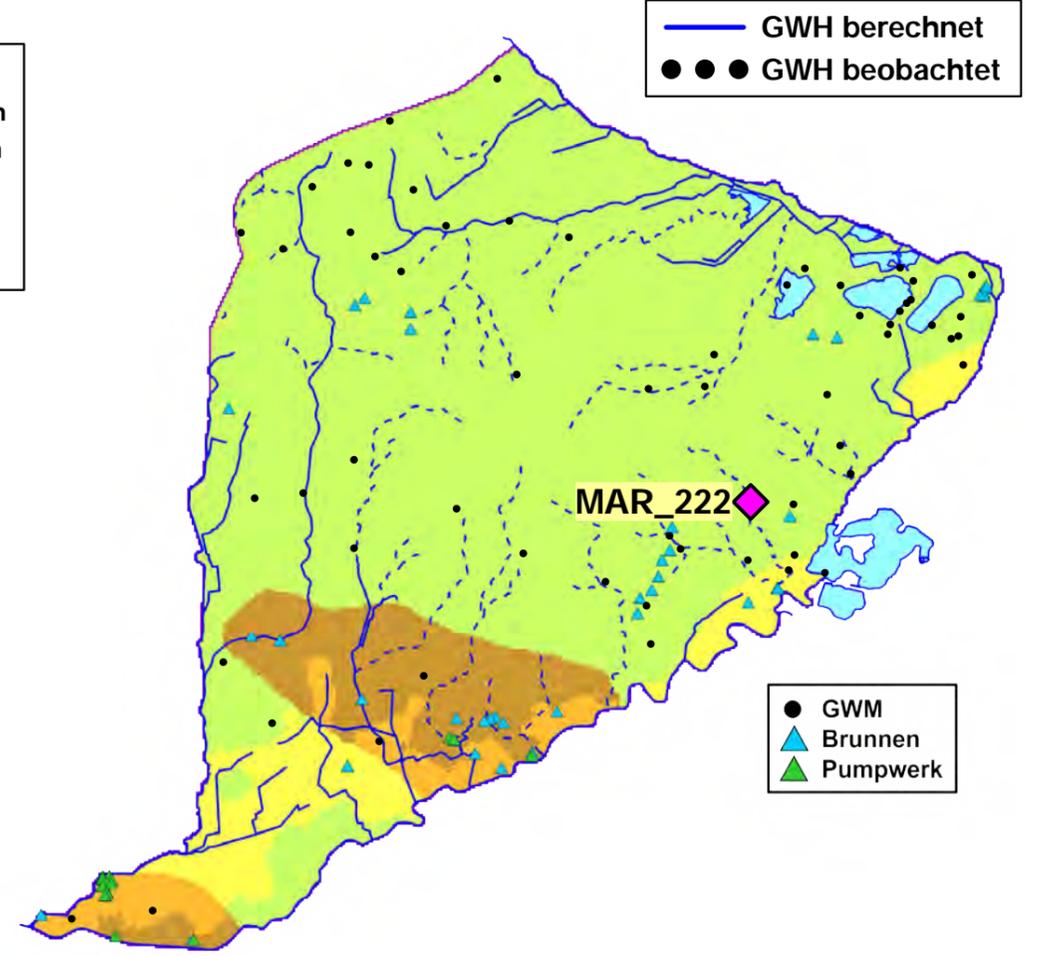
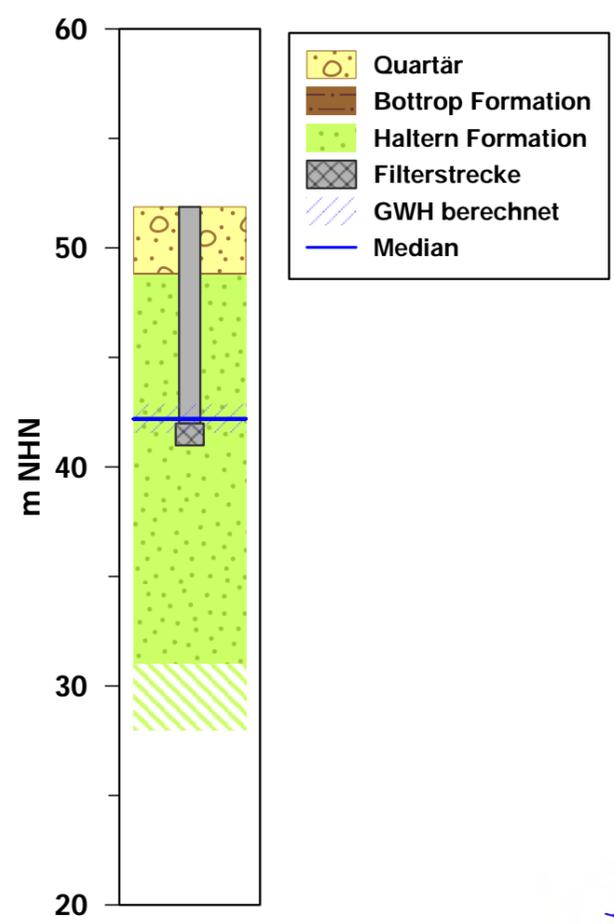
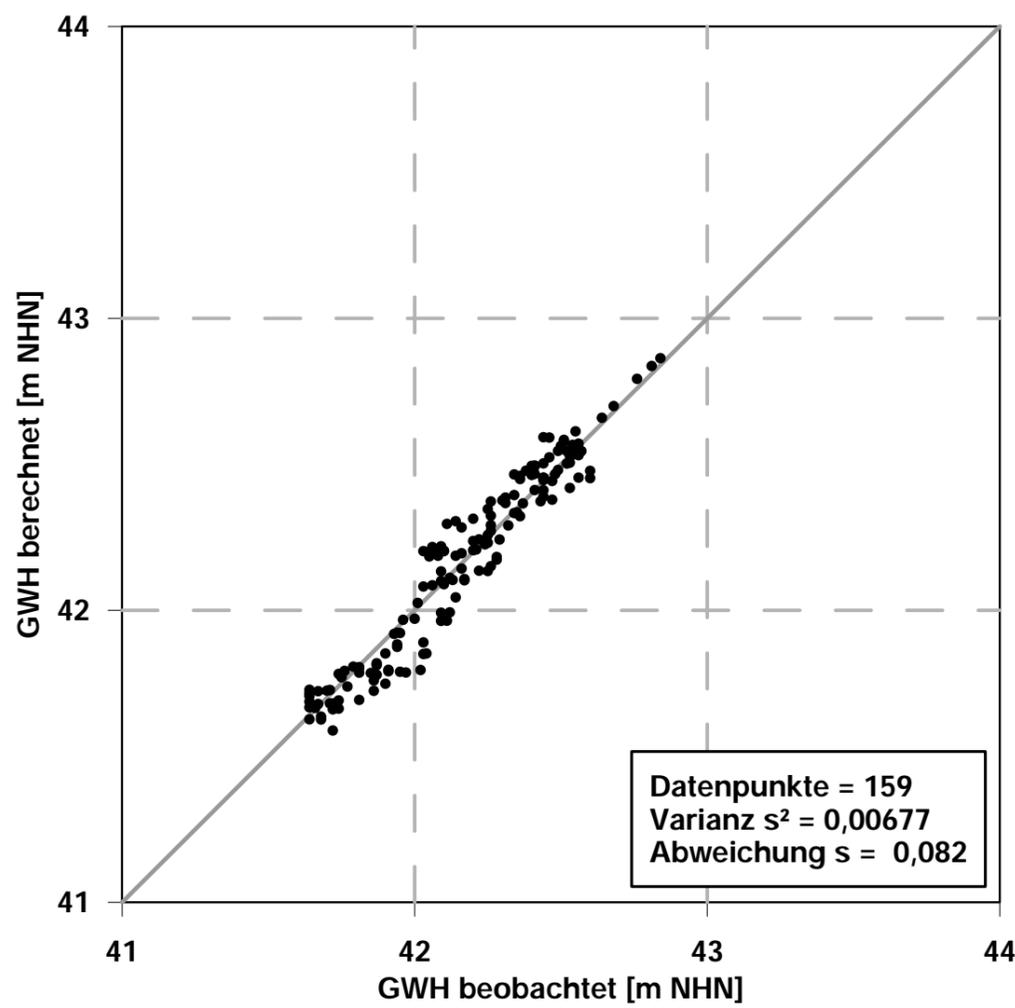
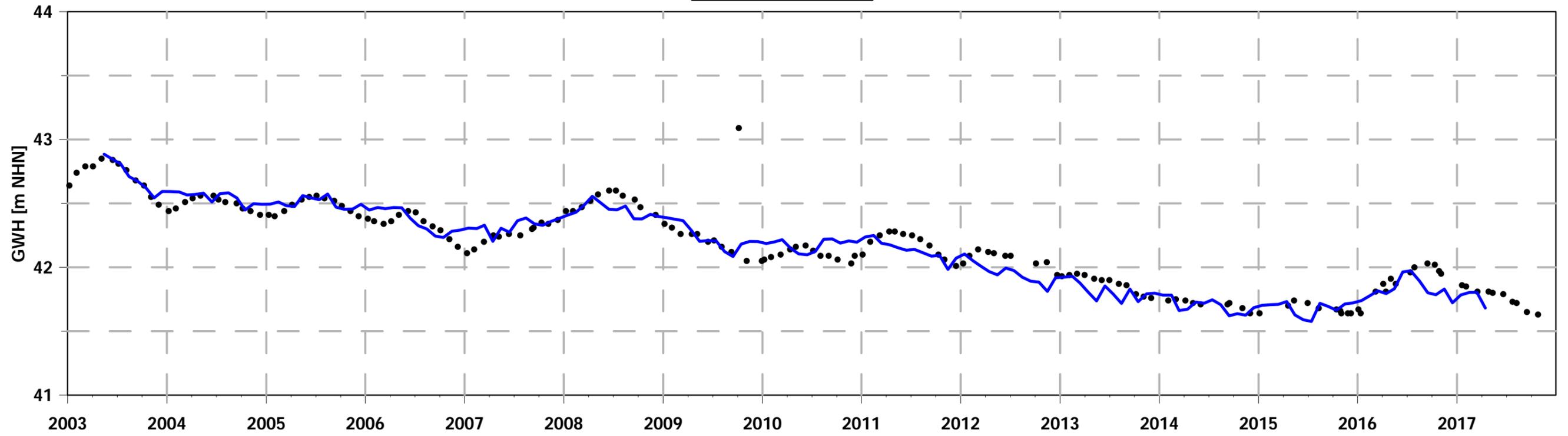
TAL\_W6



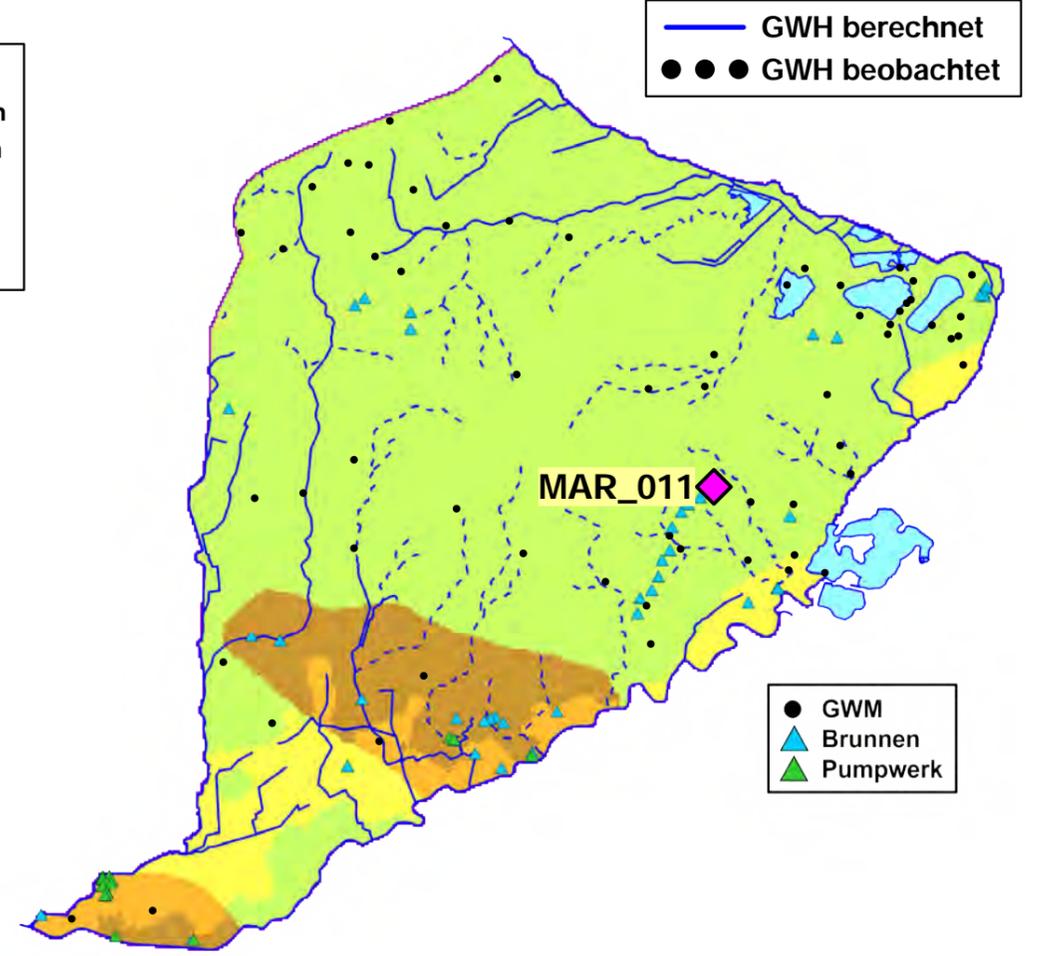
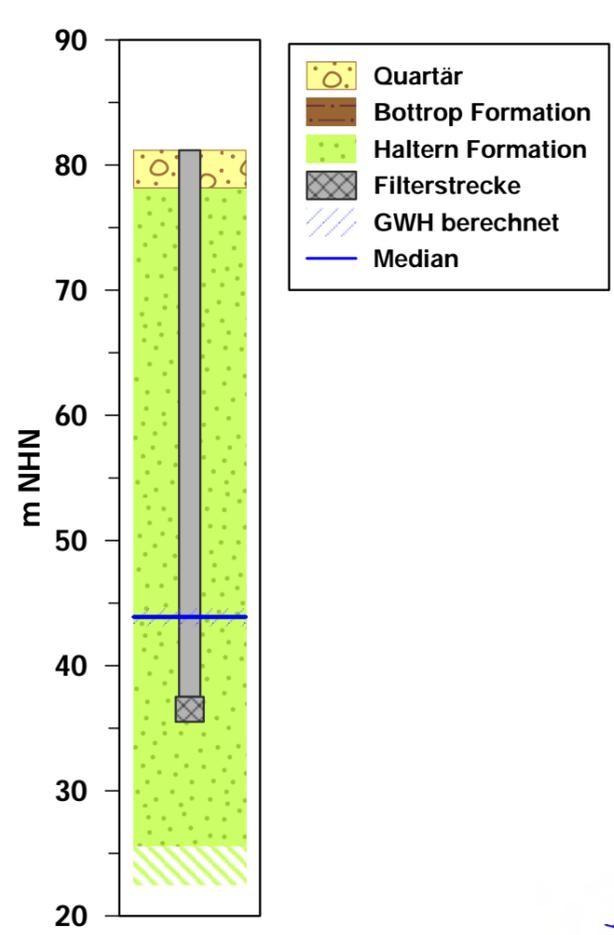
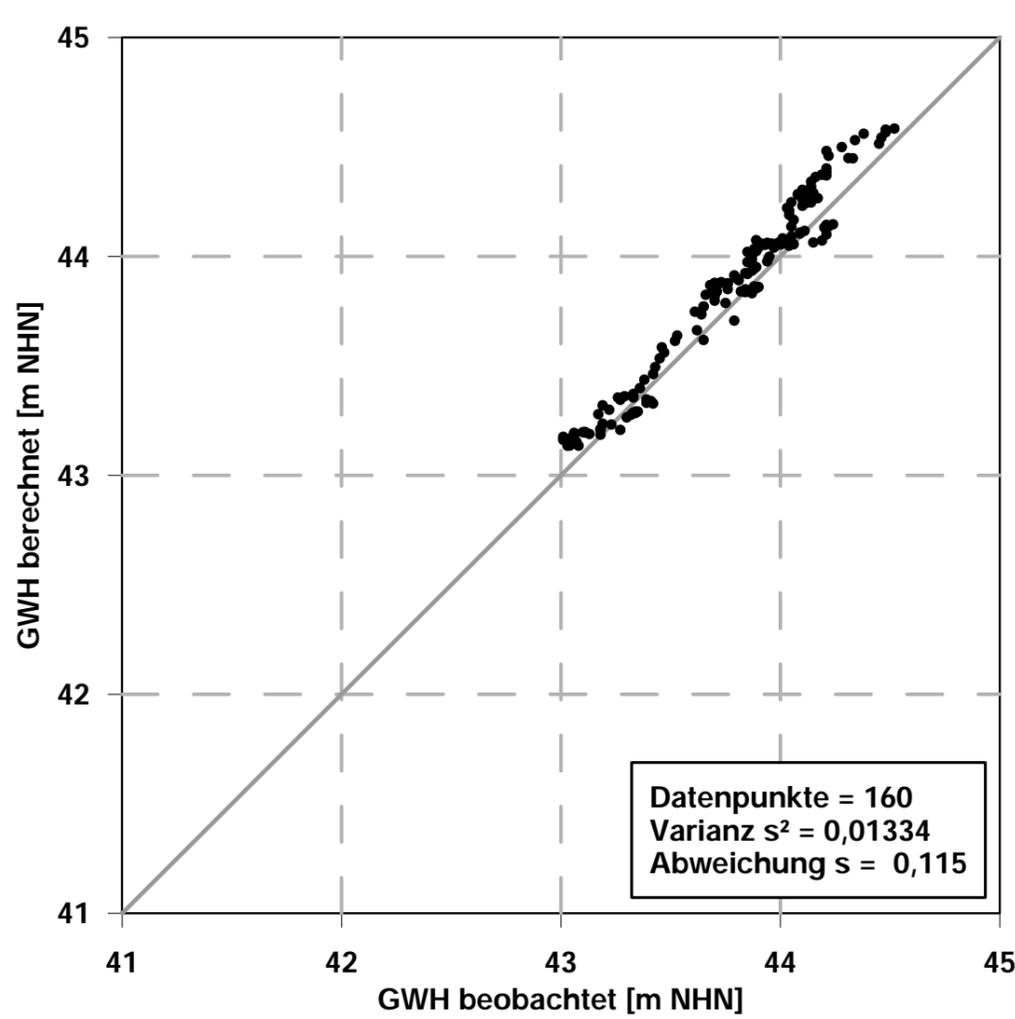
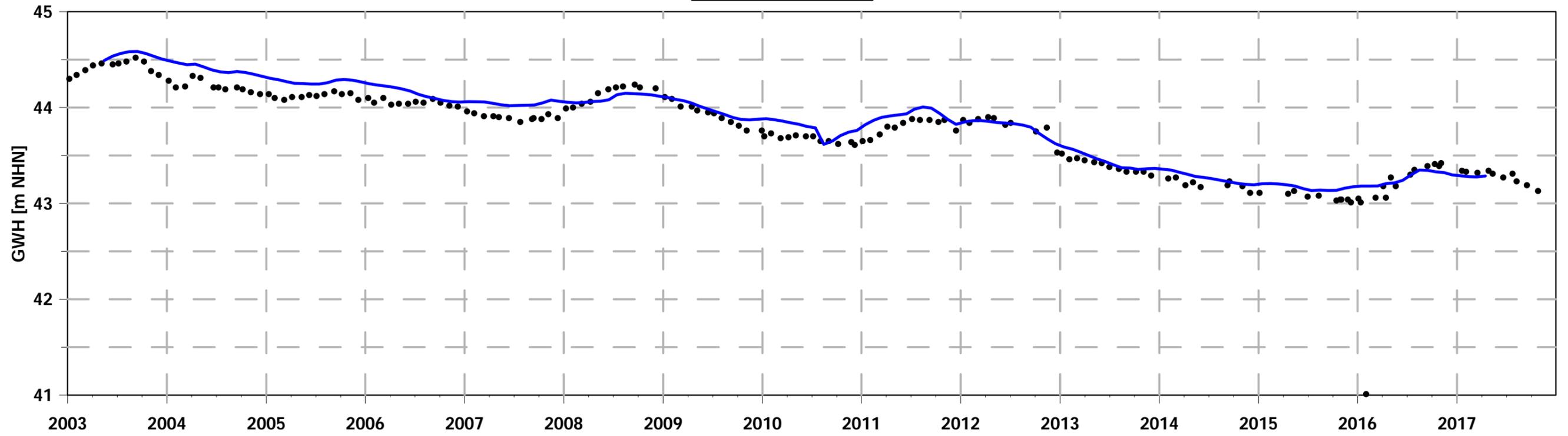
TAL\_301



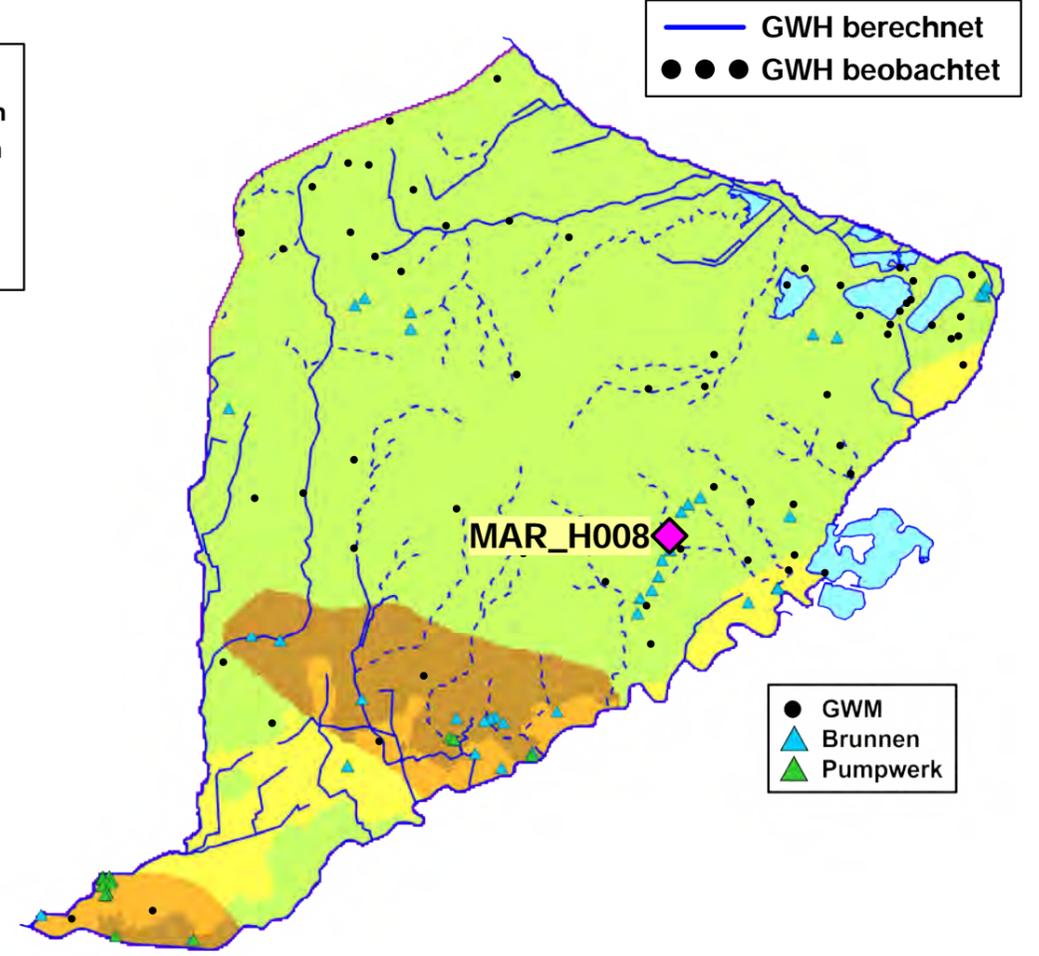
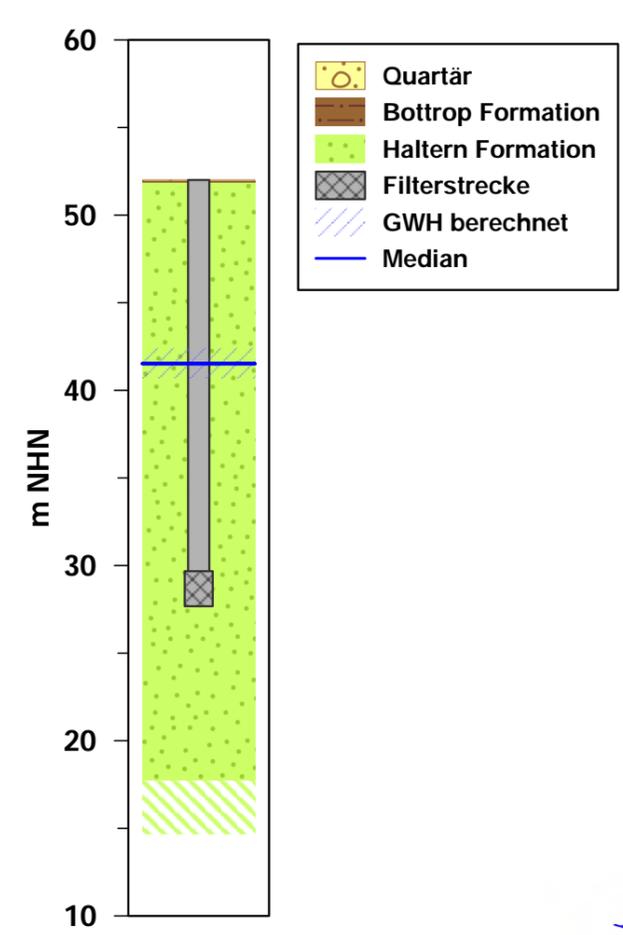
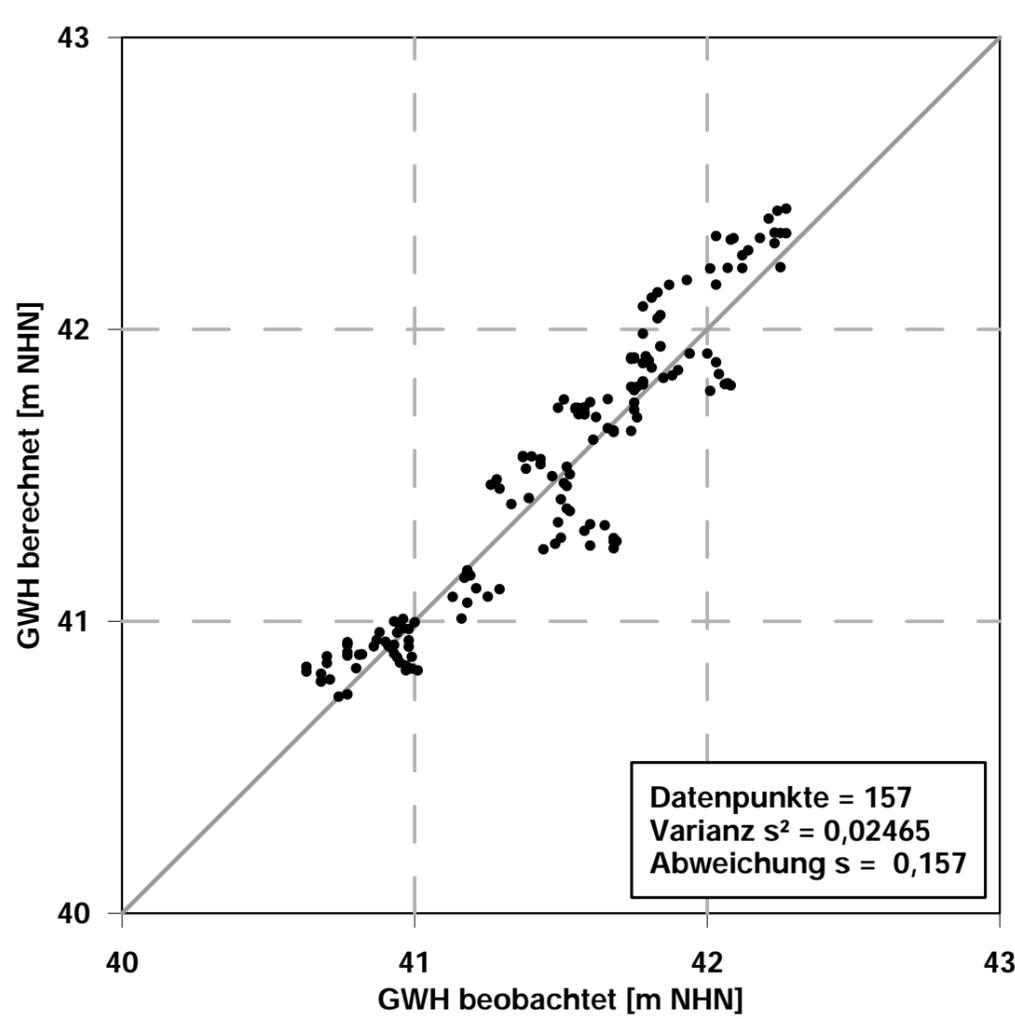
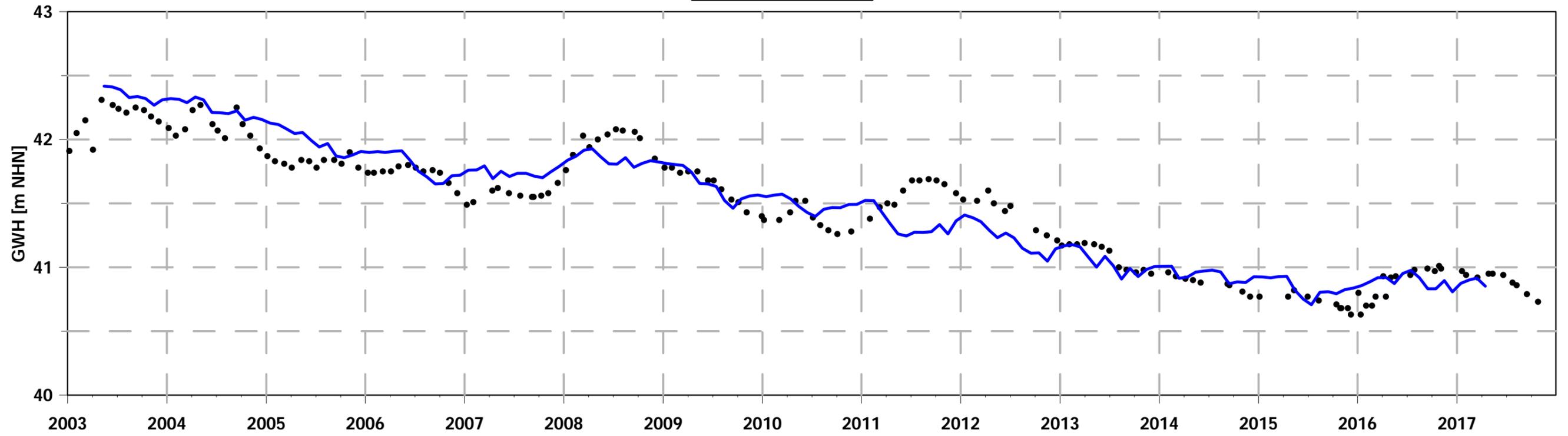
MAR\_222



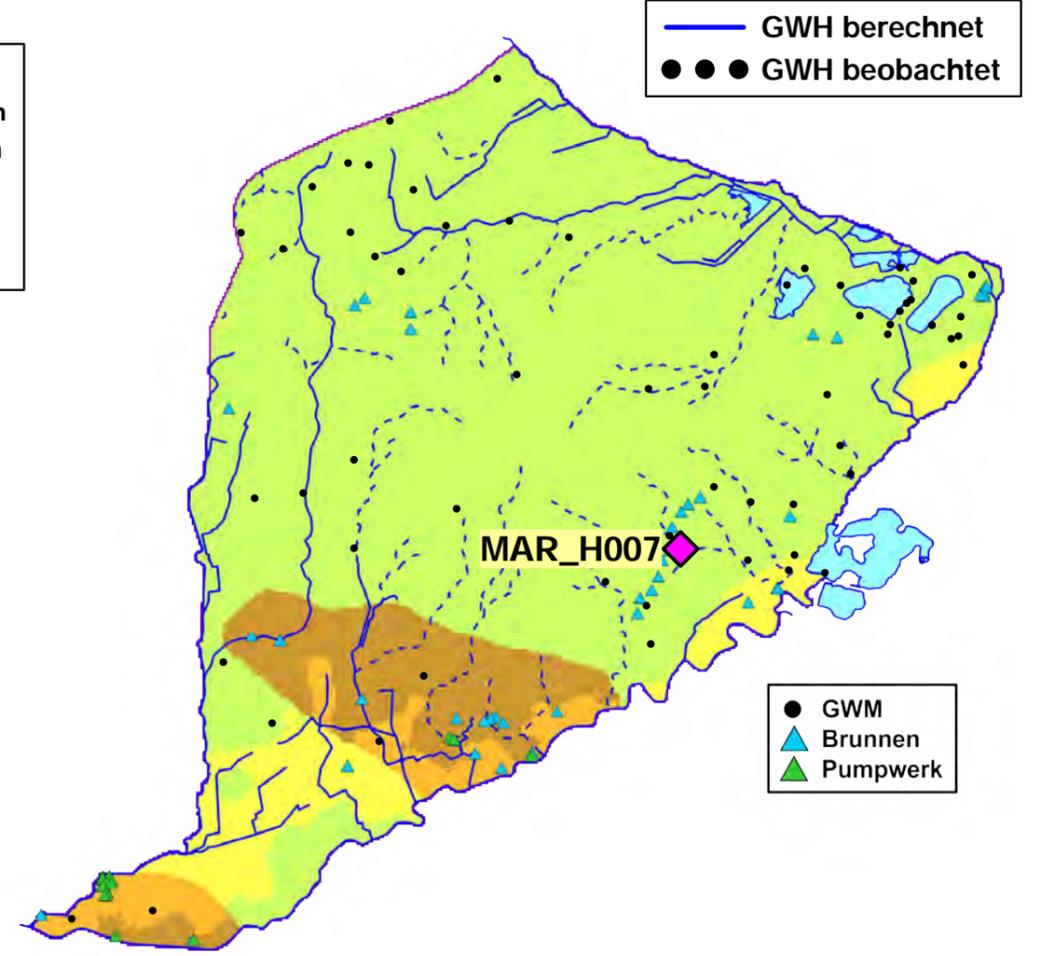
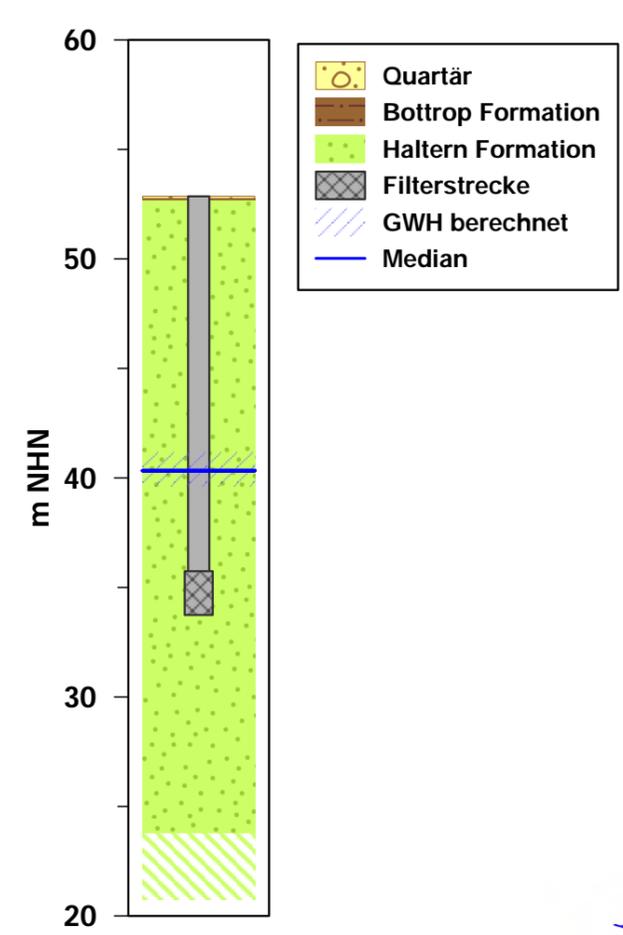
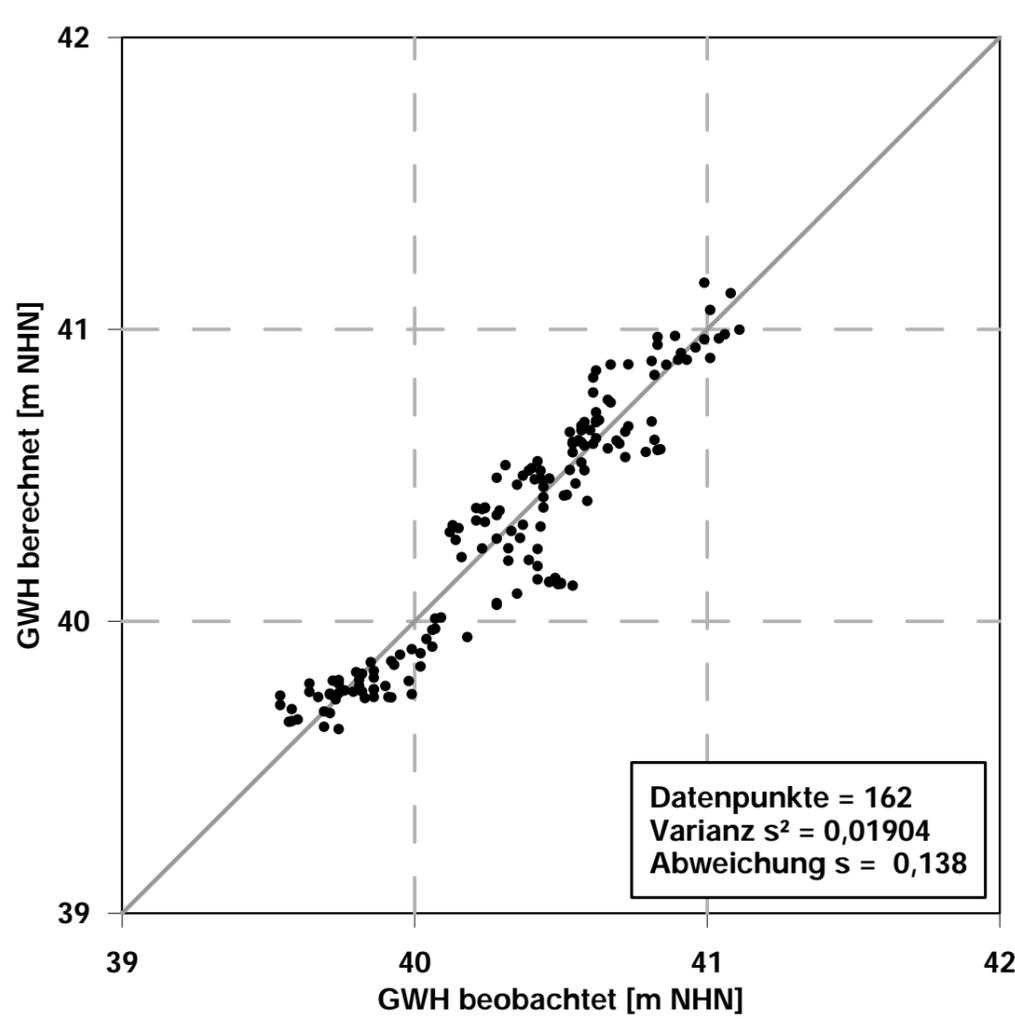
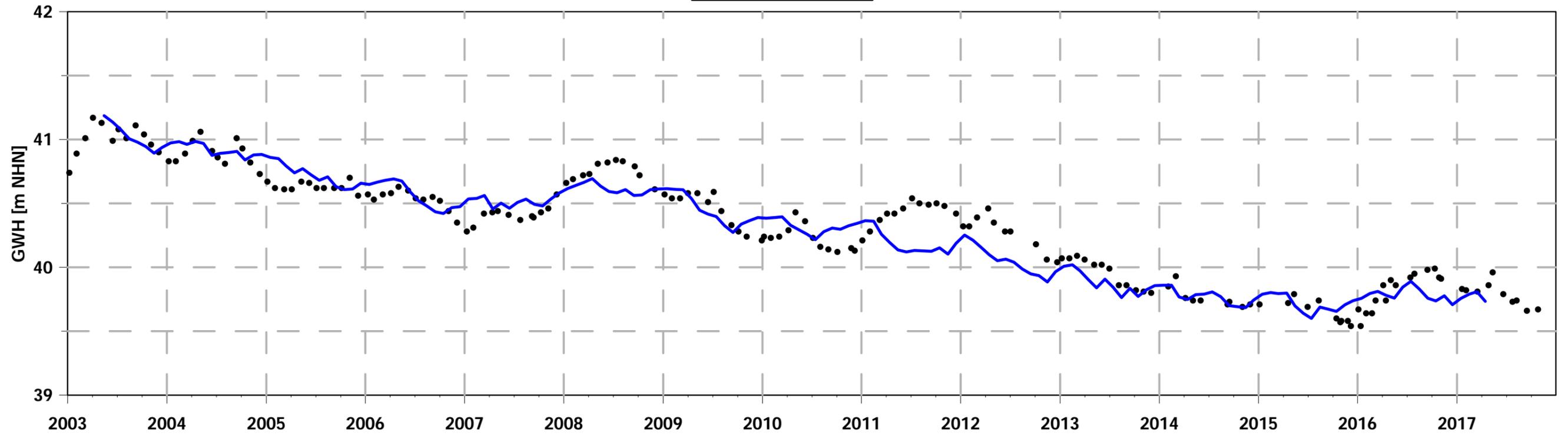
MAR\_011



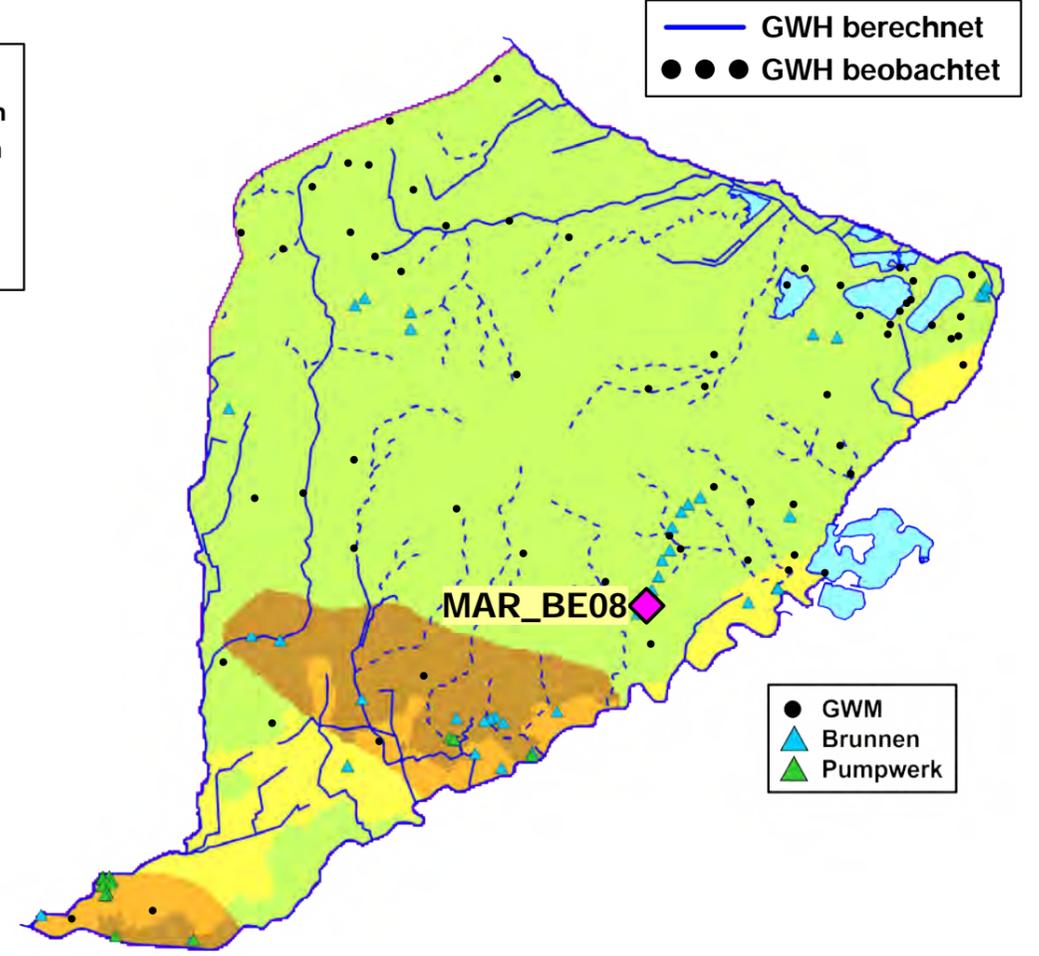
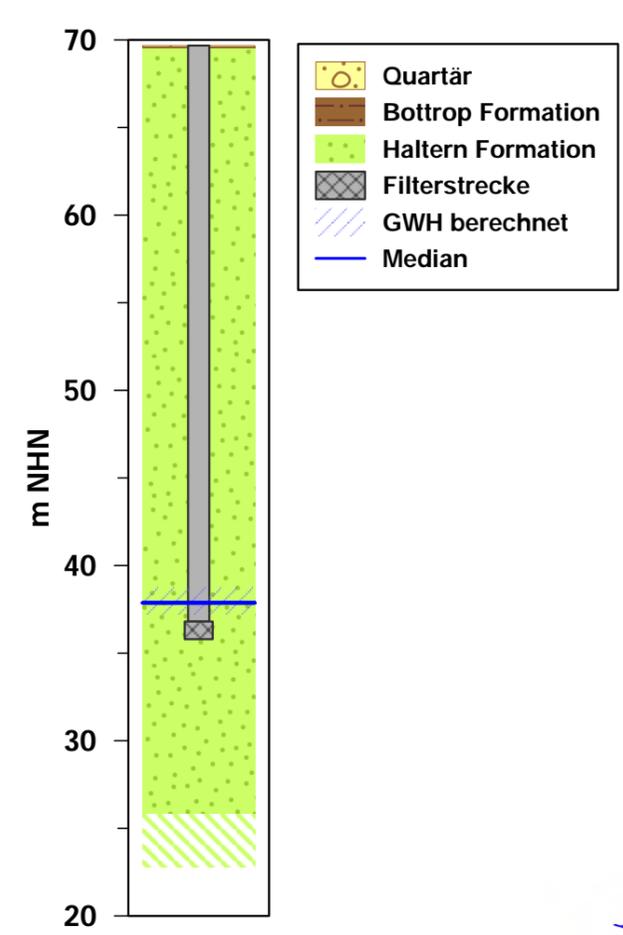
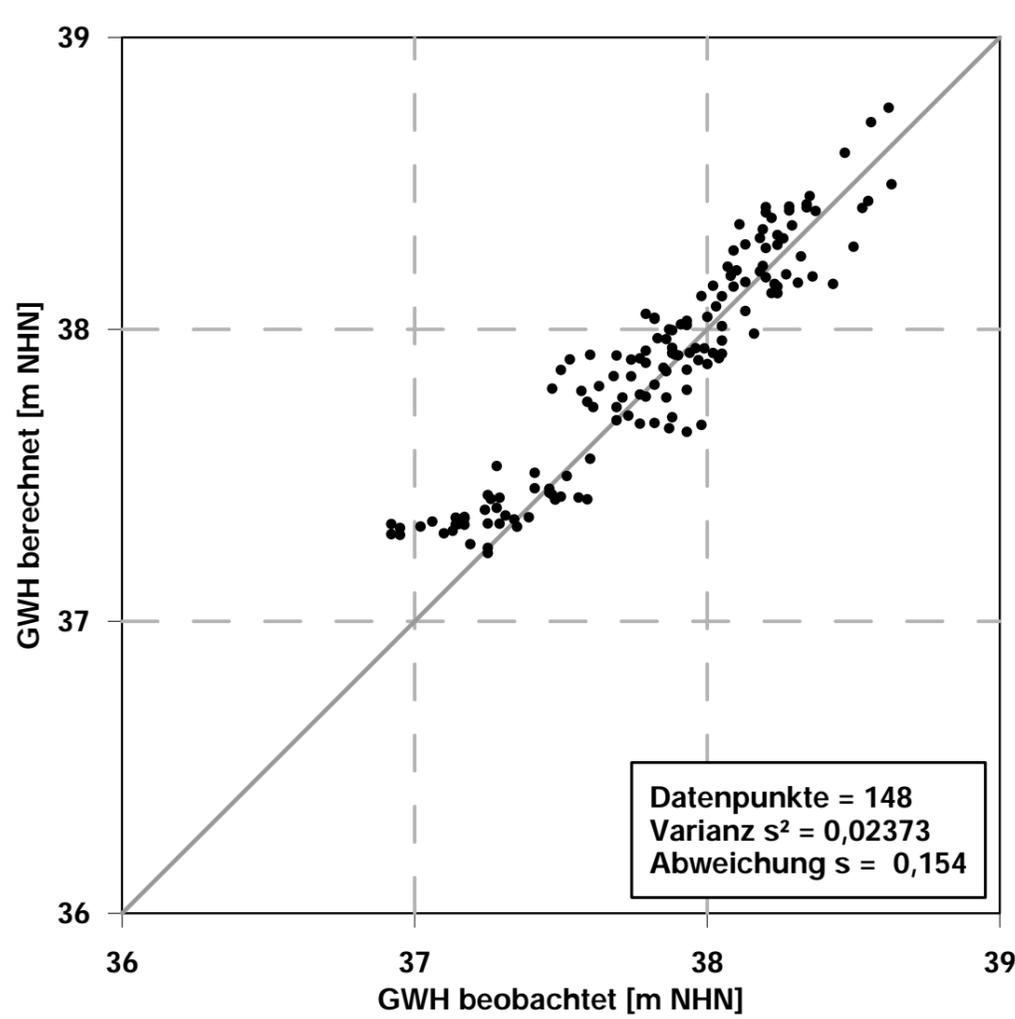
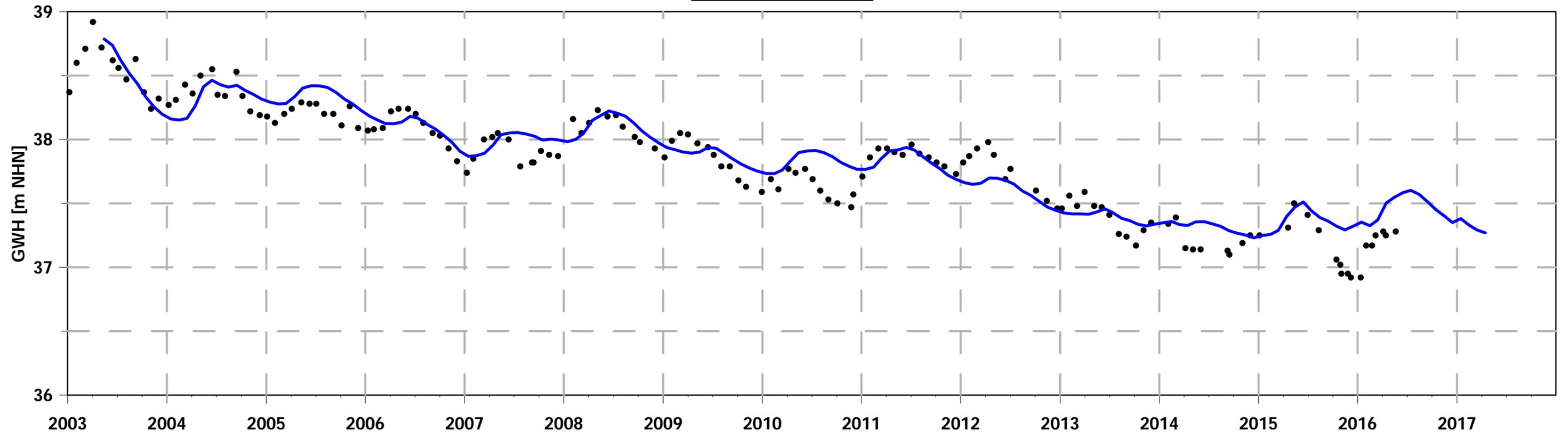
MAR\_H008



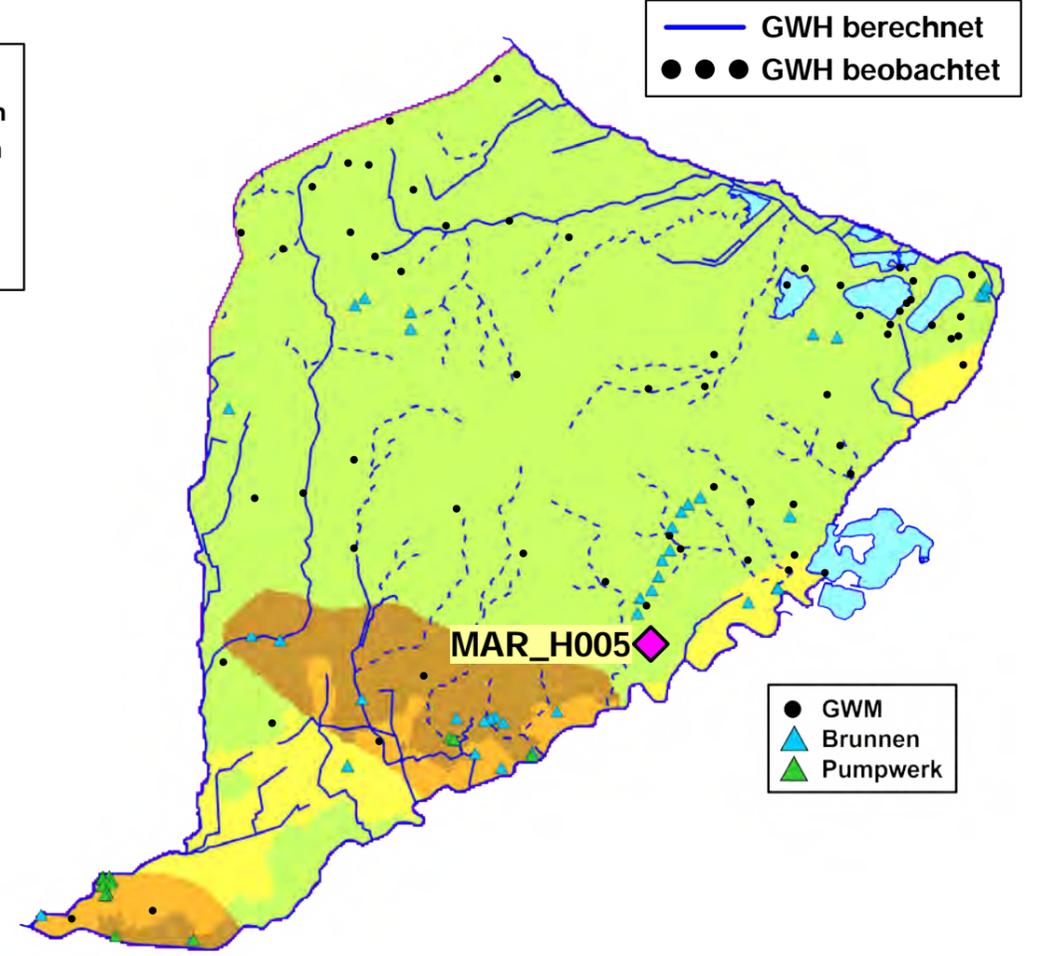
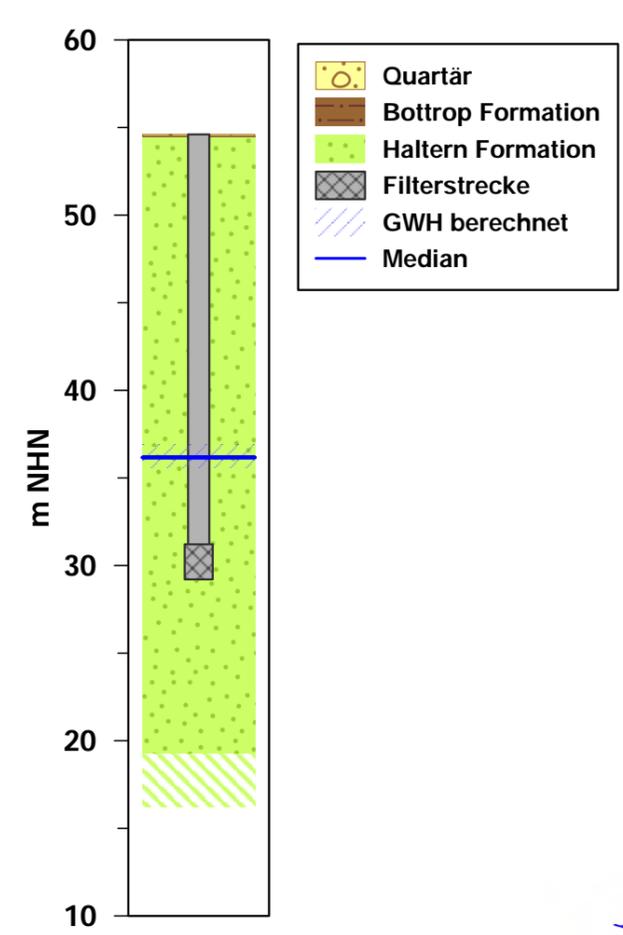
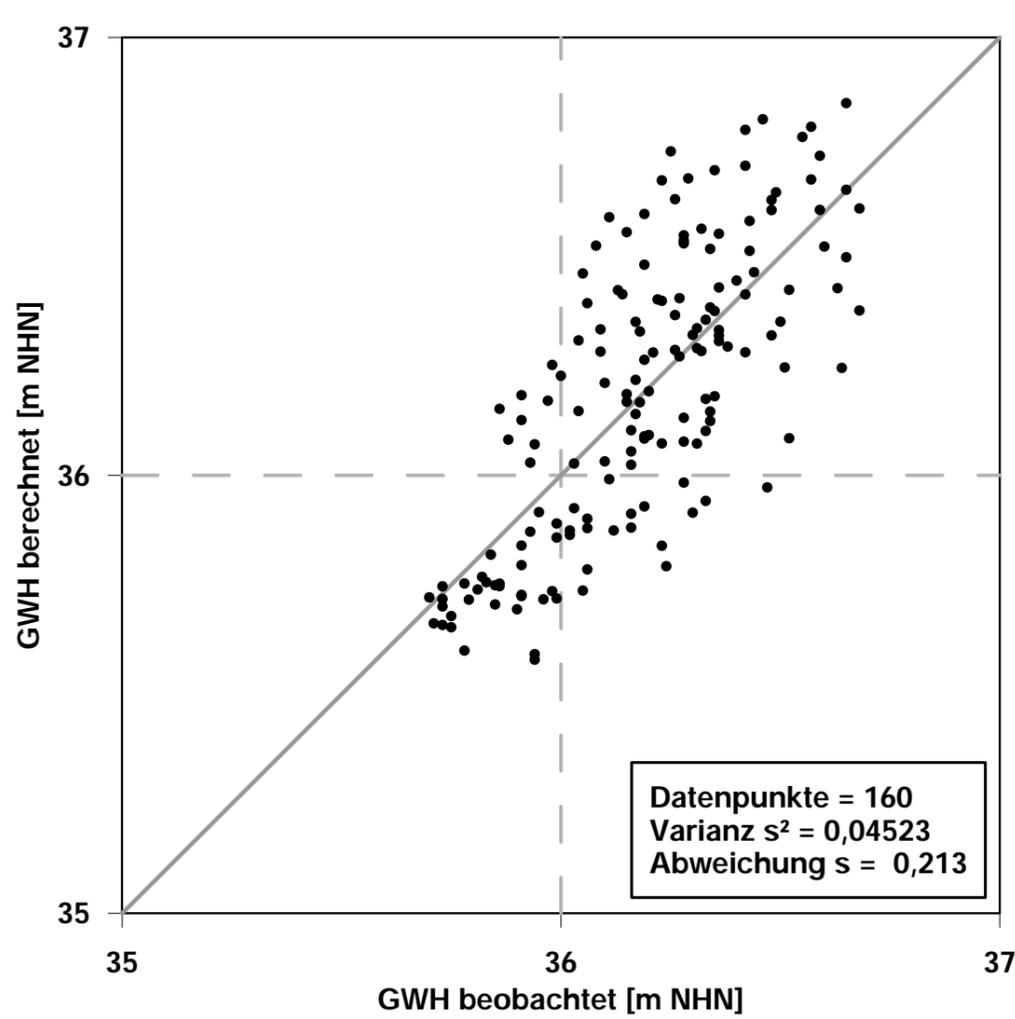
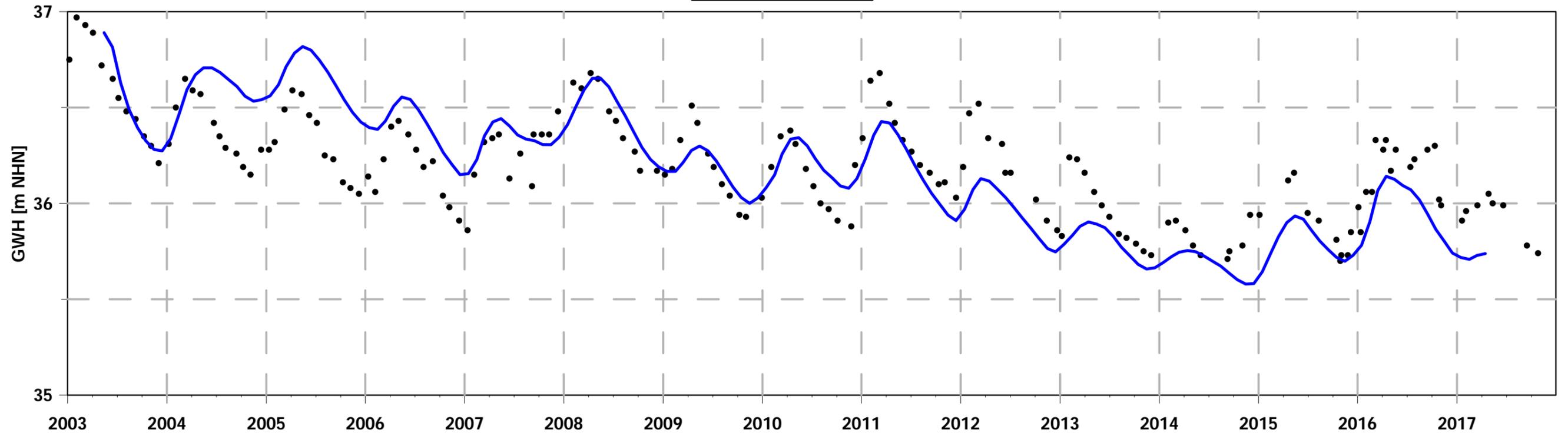
MAR\_H007



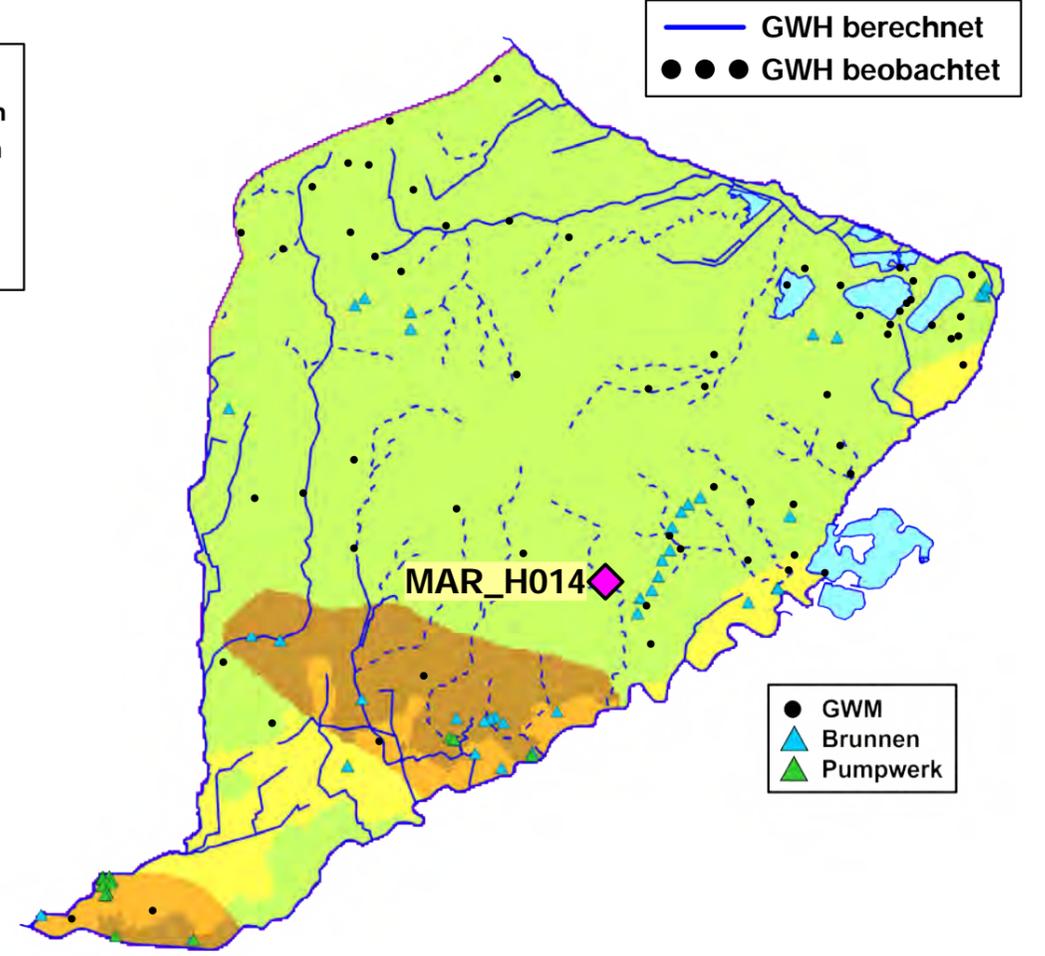
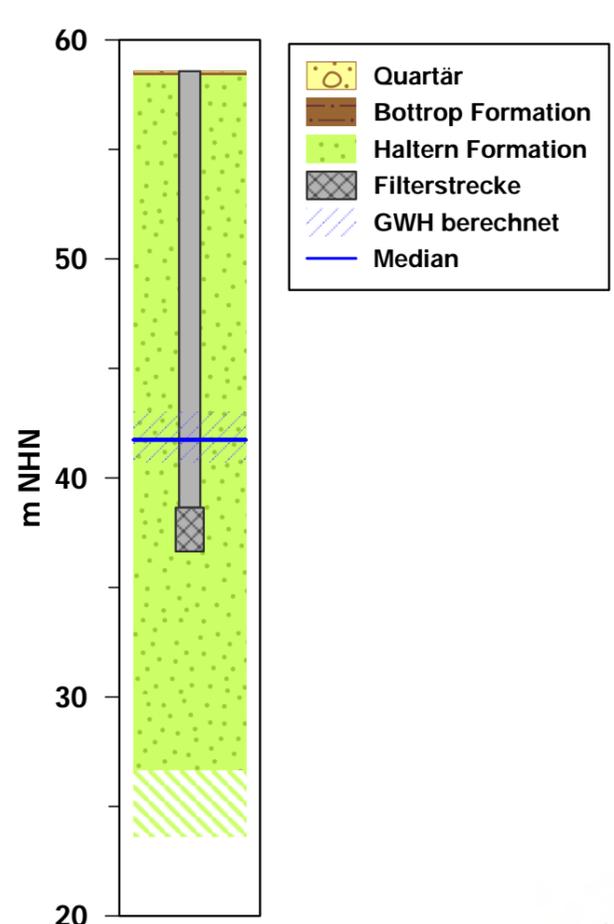
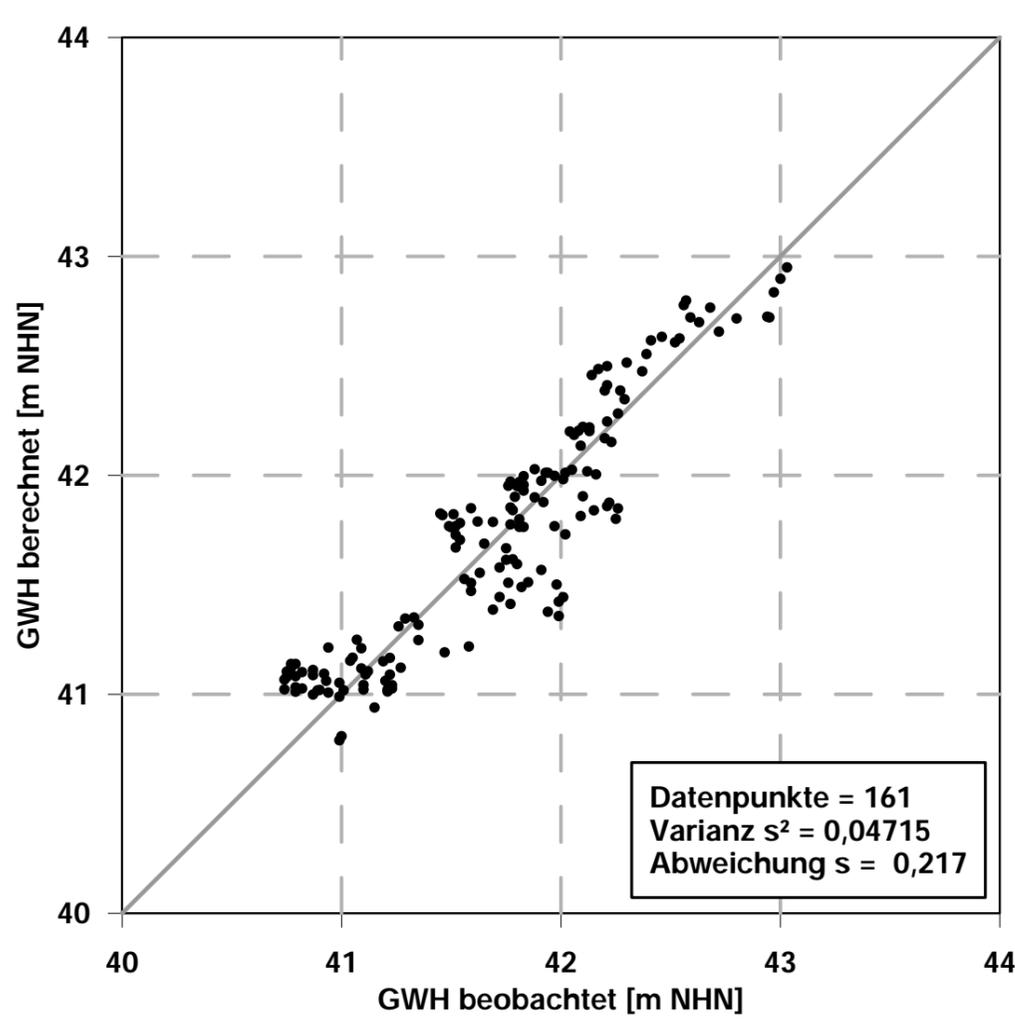
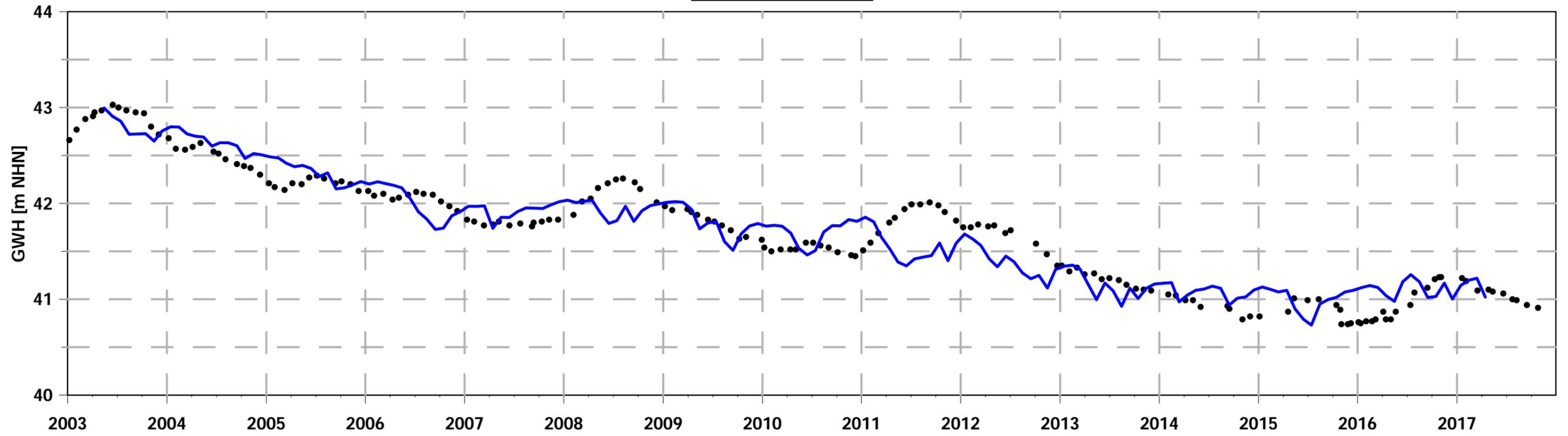
MAR\_BE08



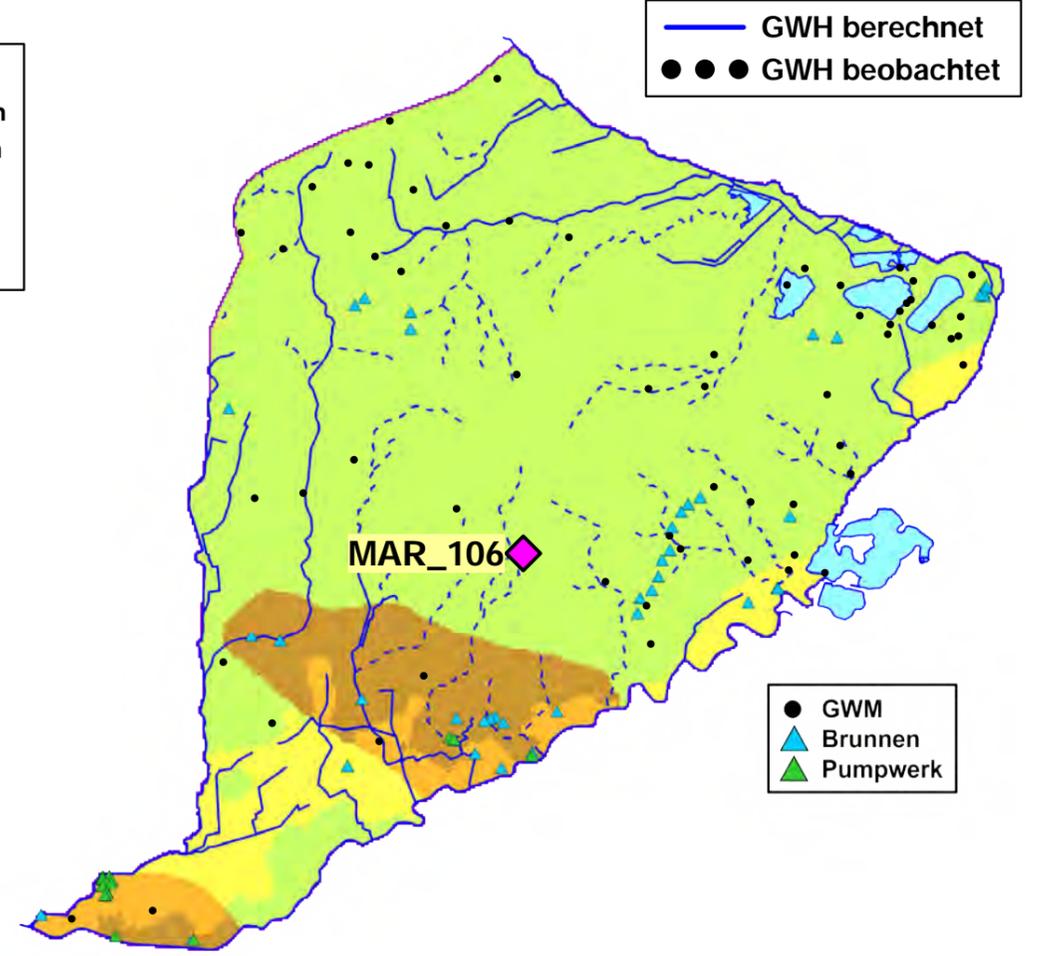
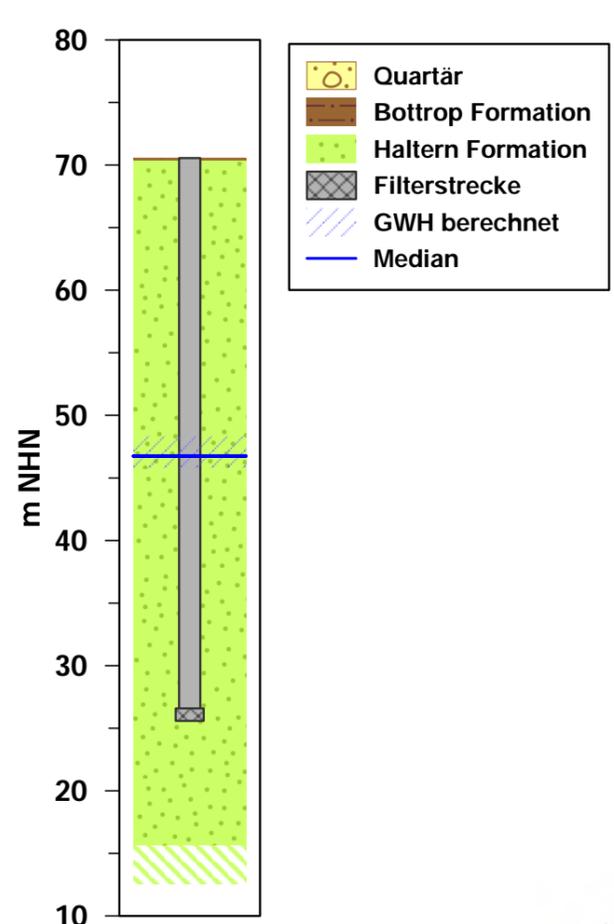
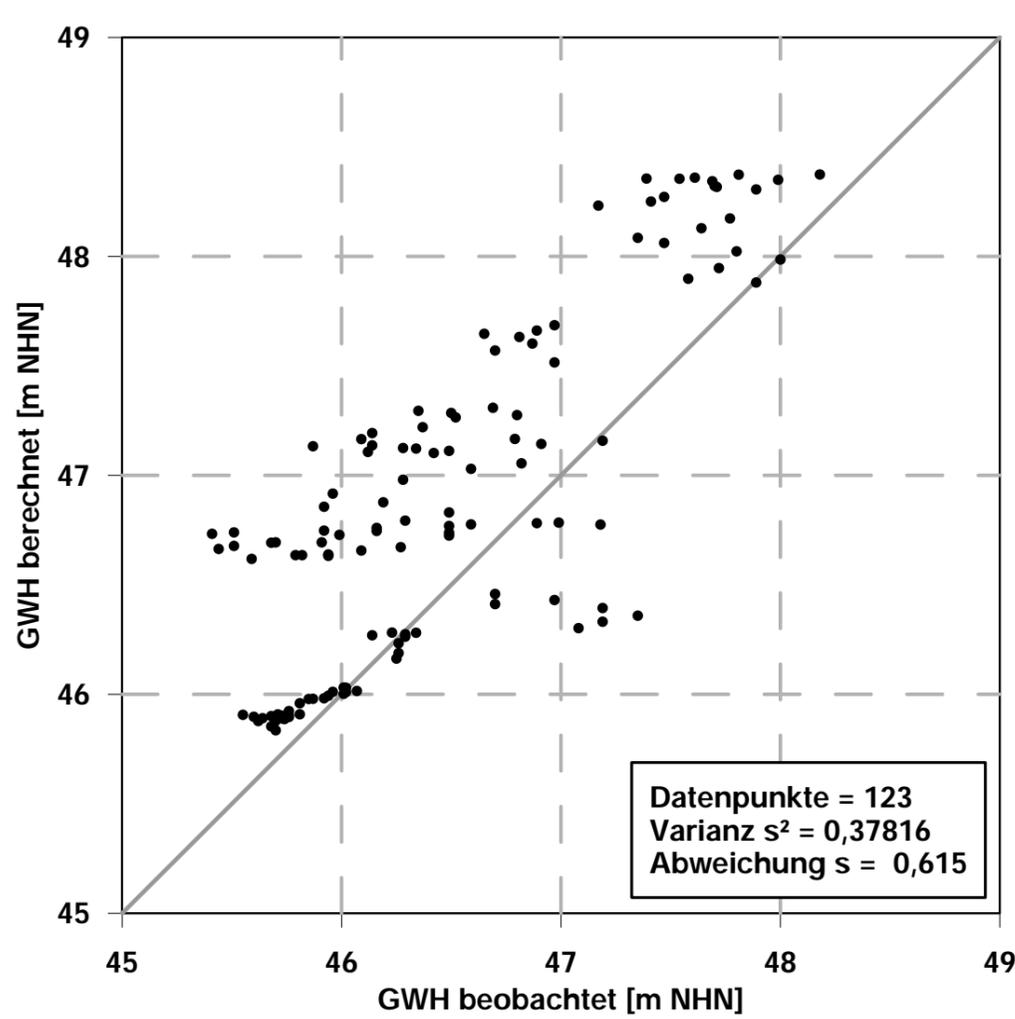
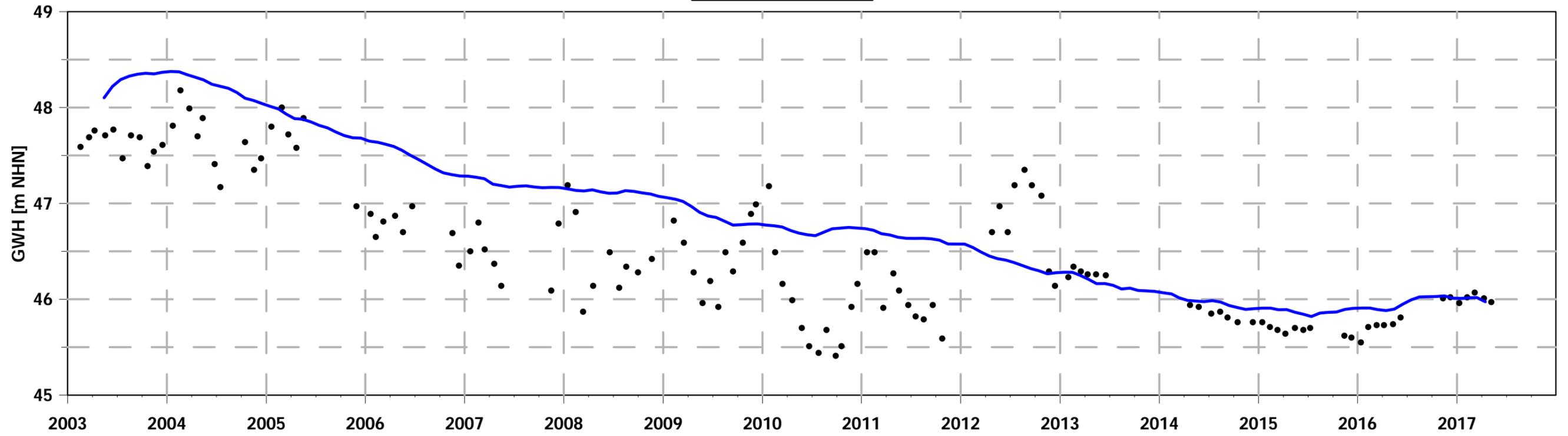
MAR\_H005



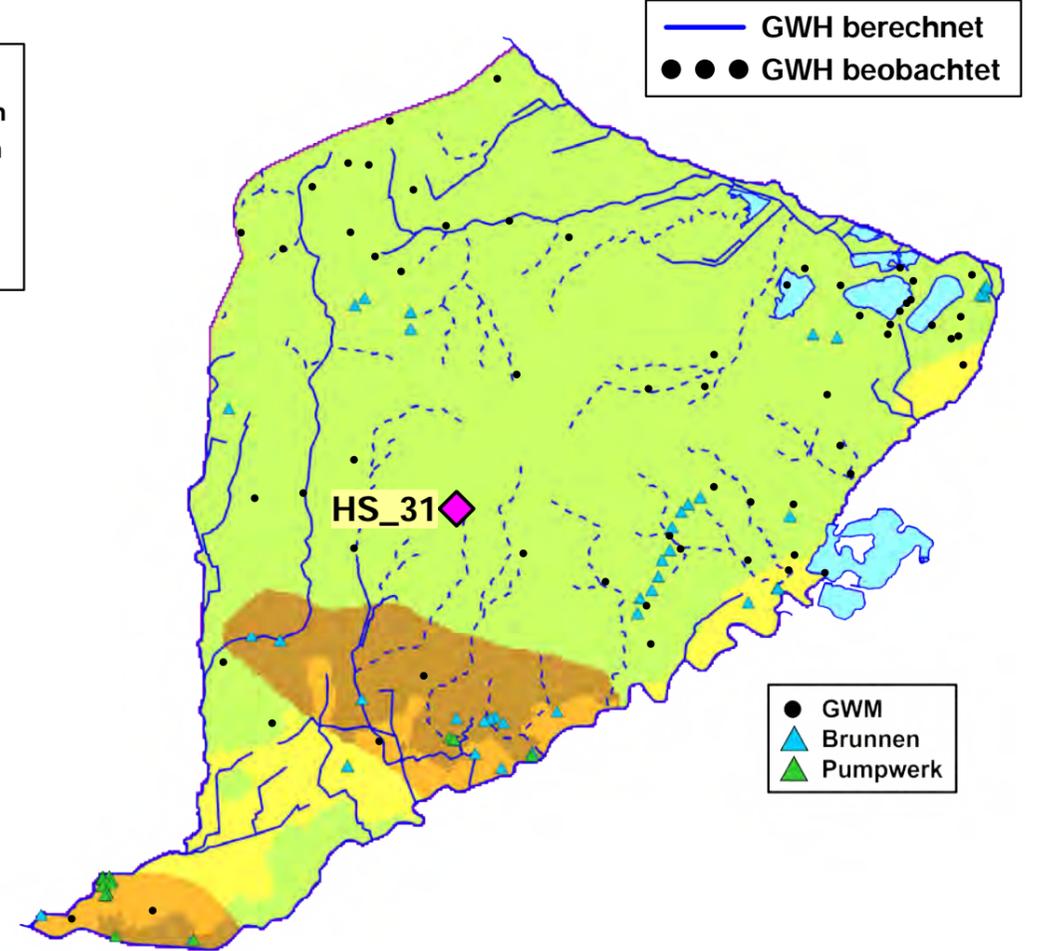
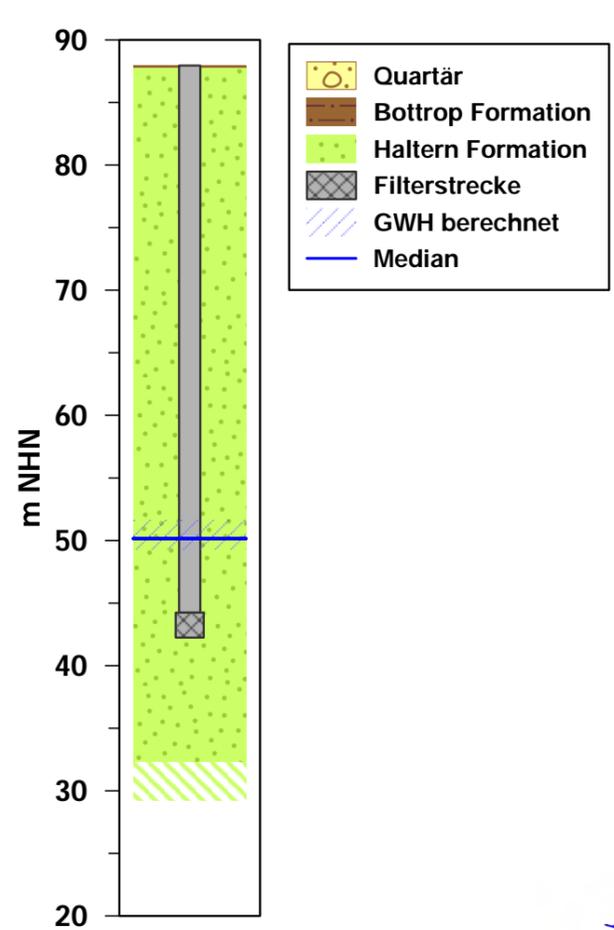
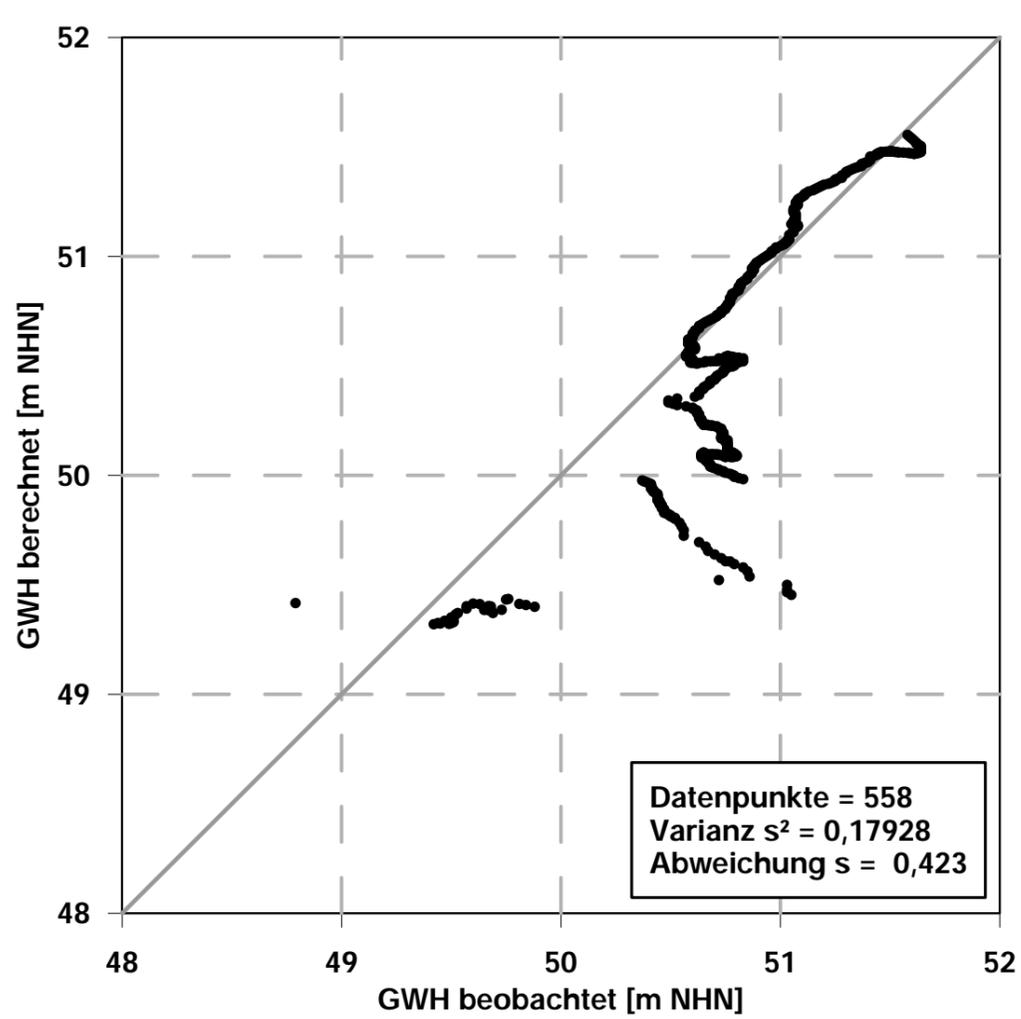
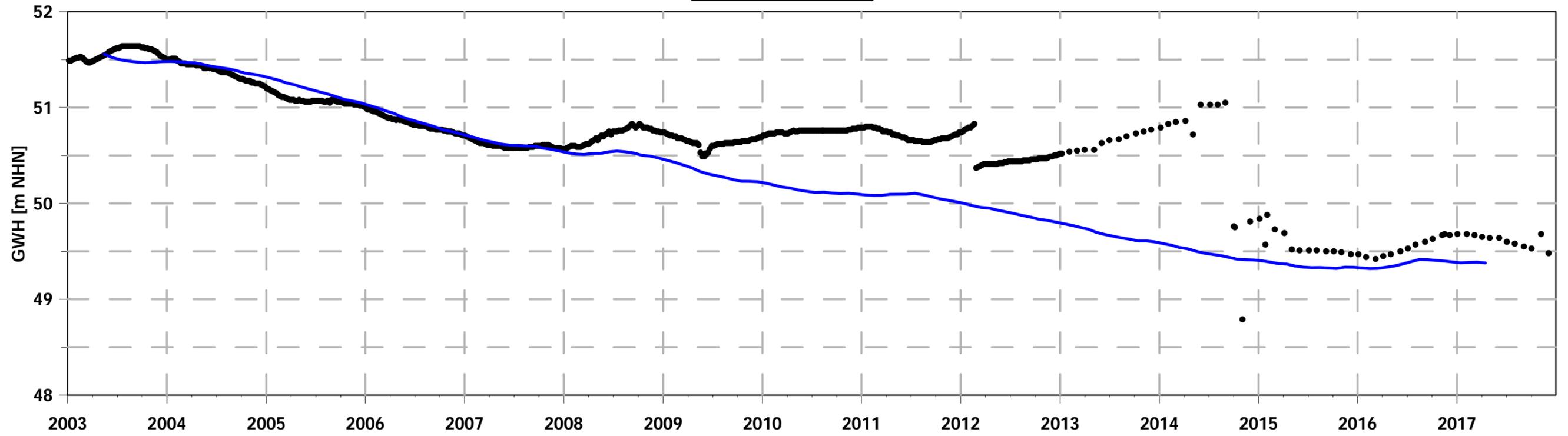
MAR\_H014



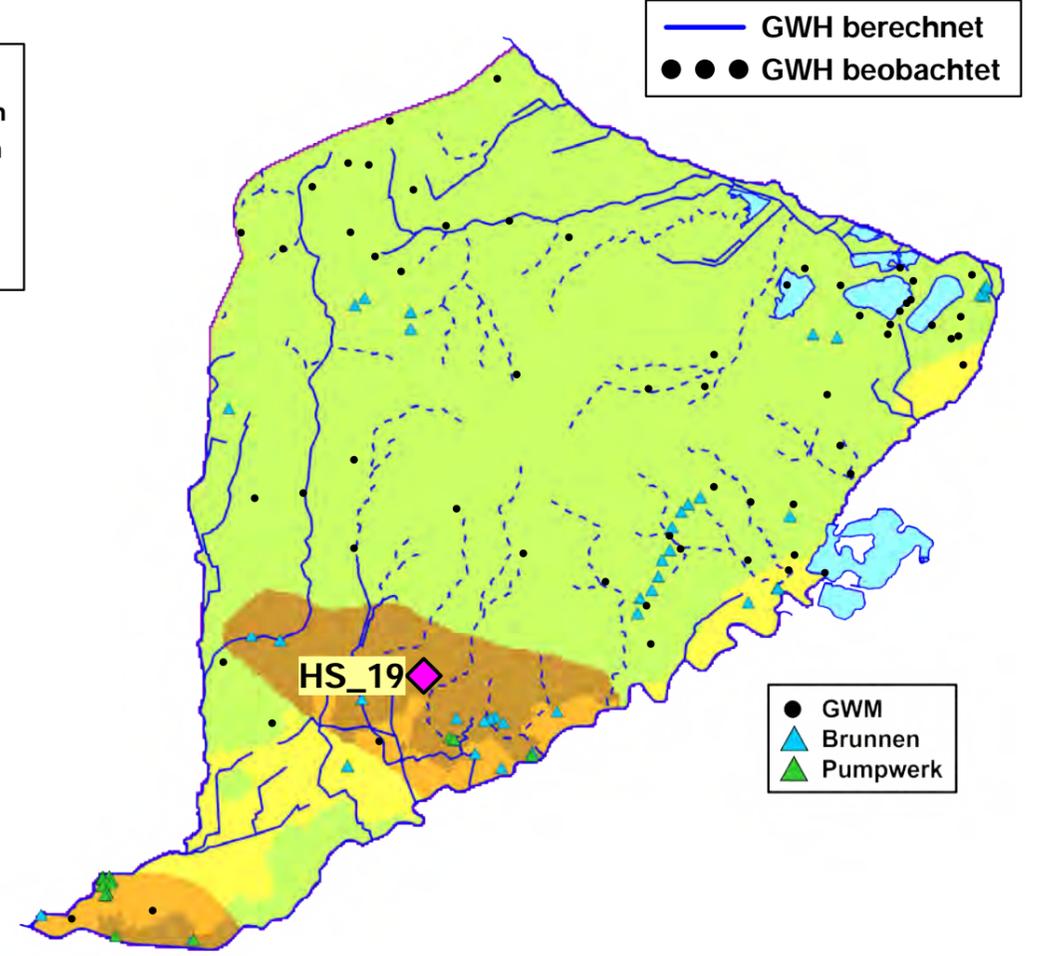
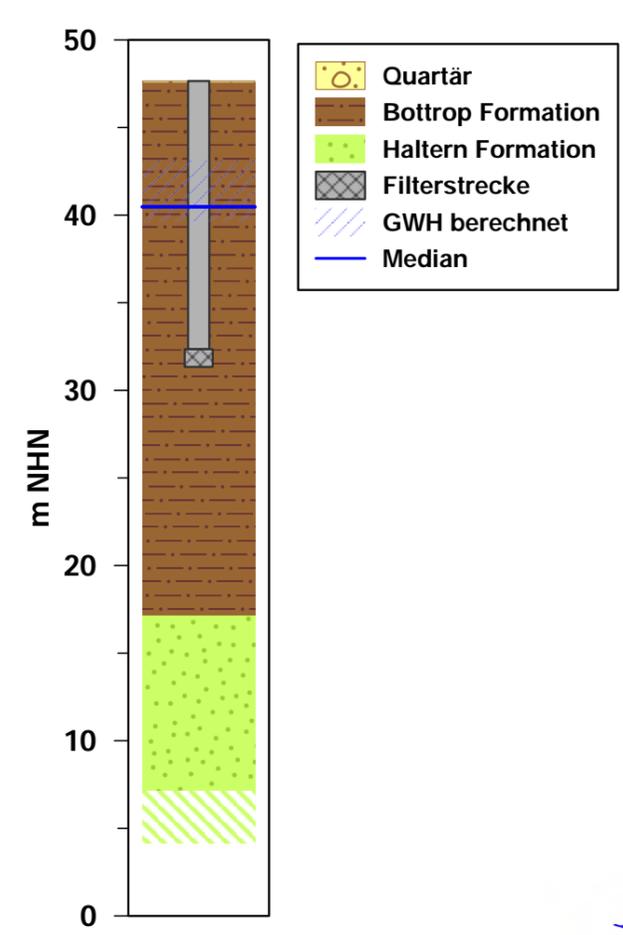
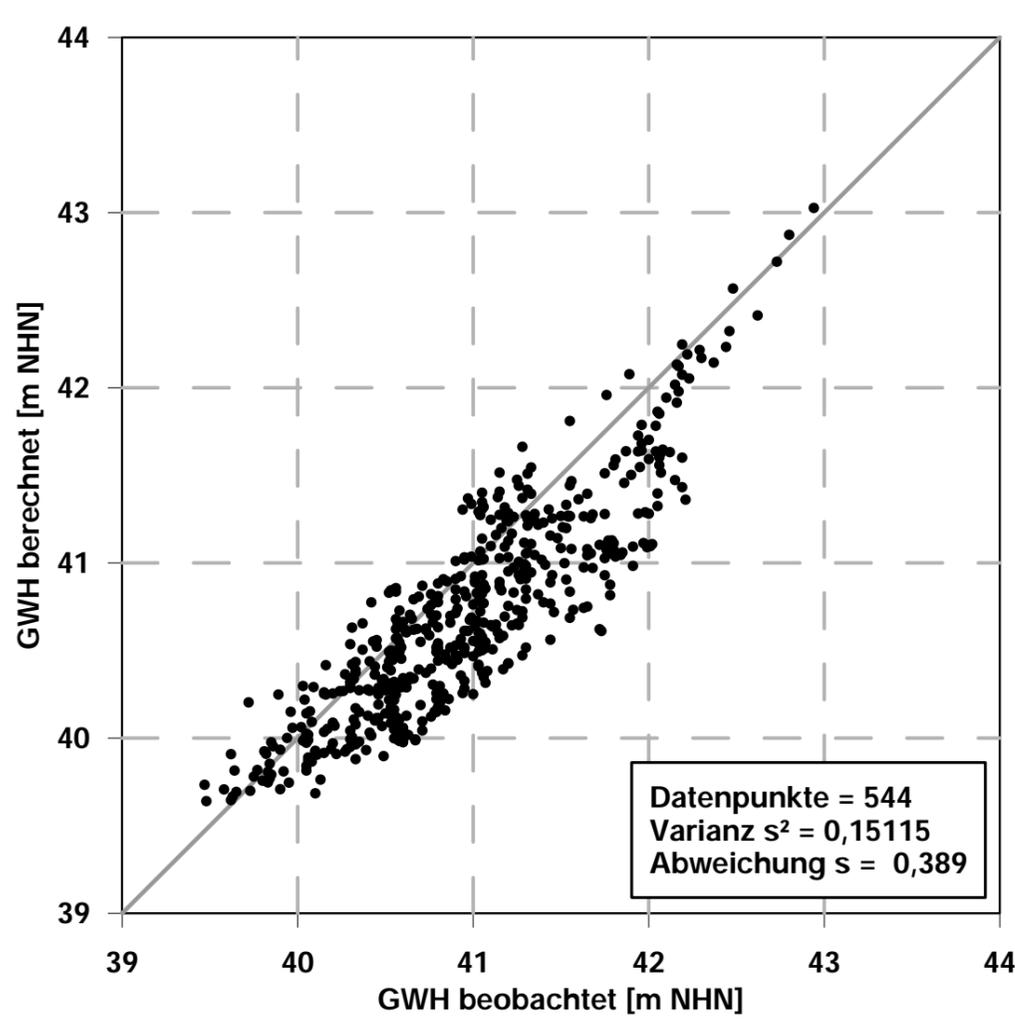
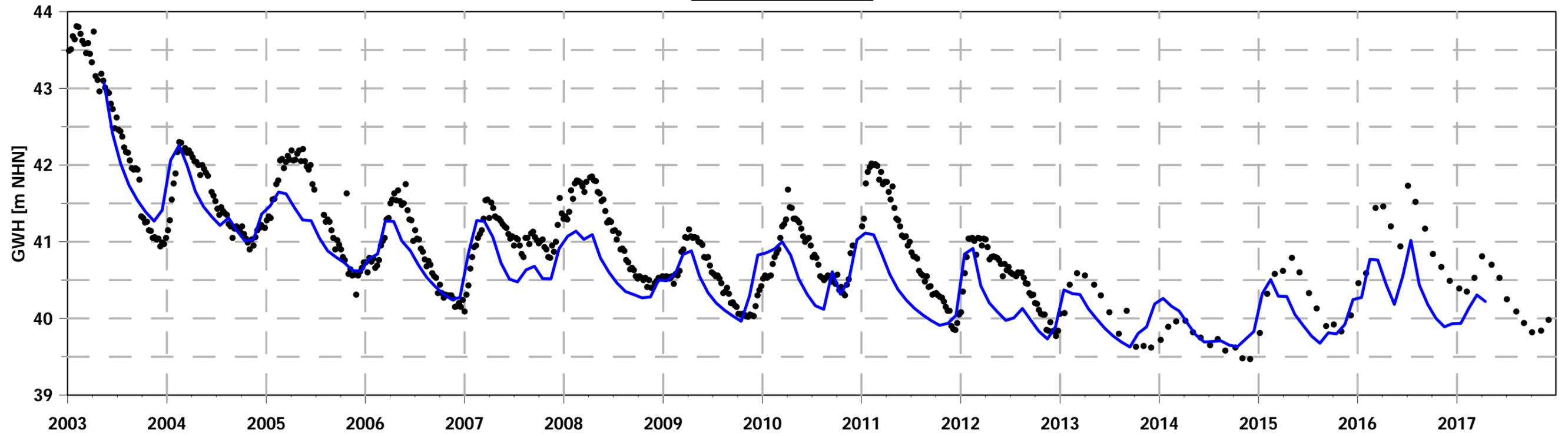
MAR\_106



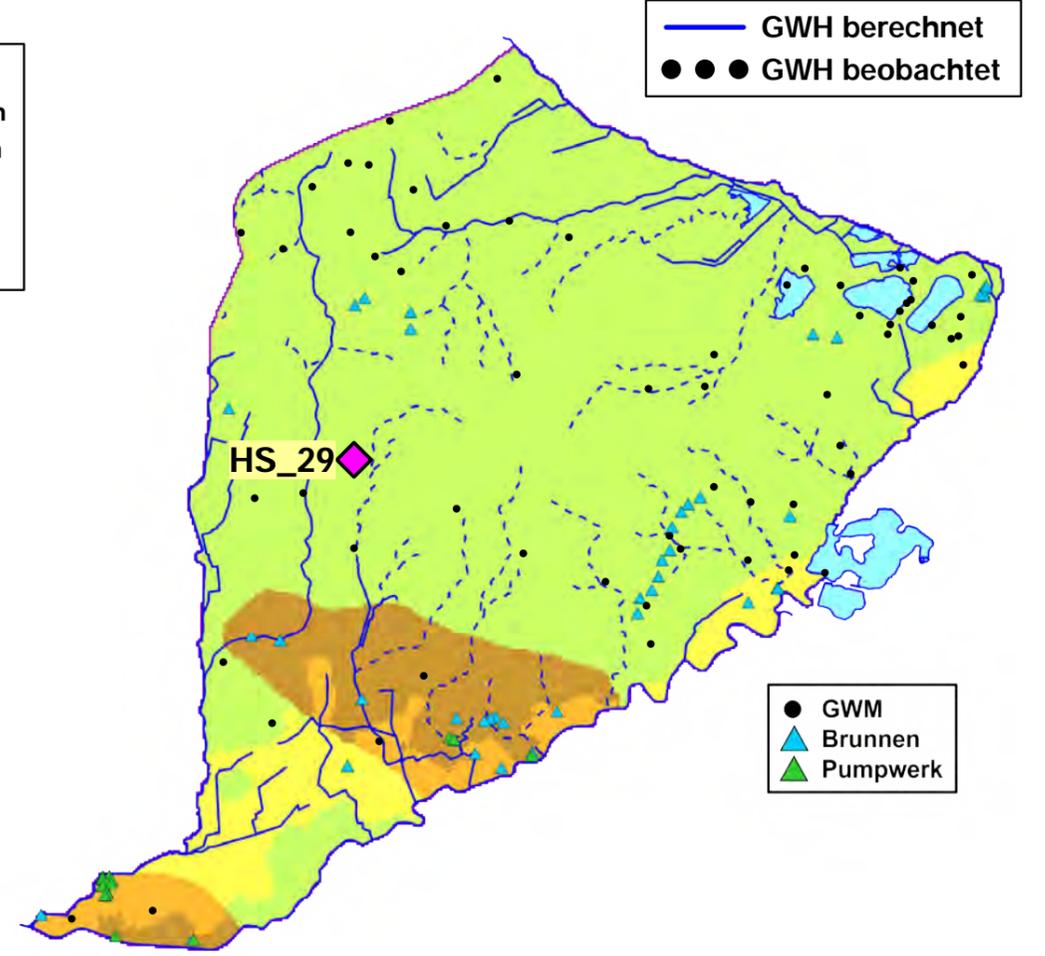
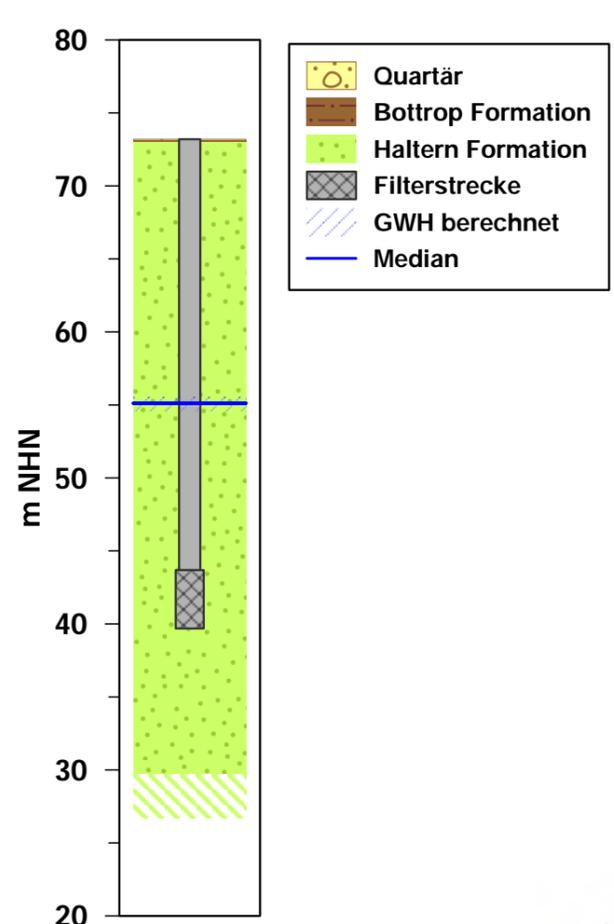
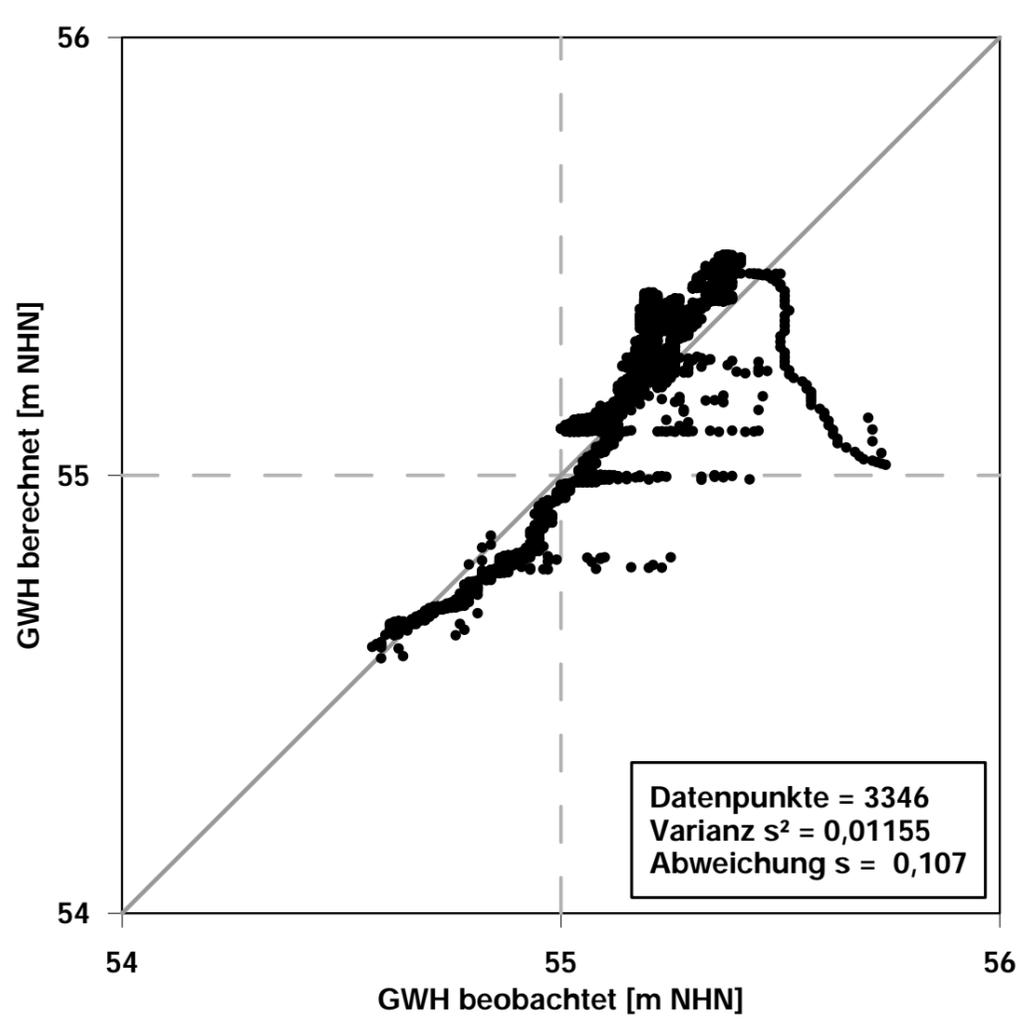
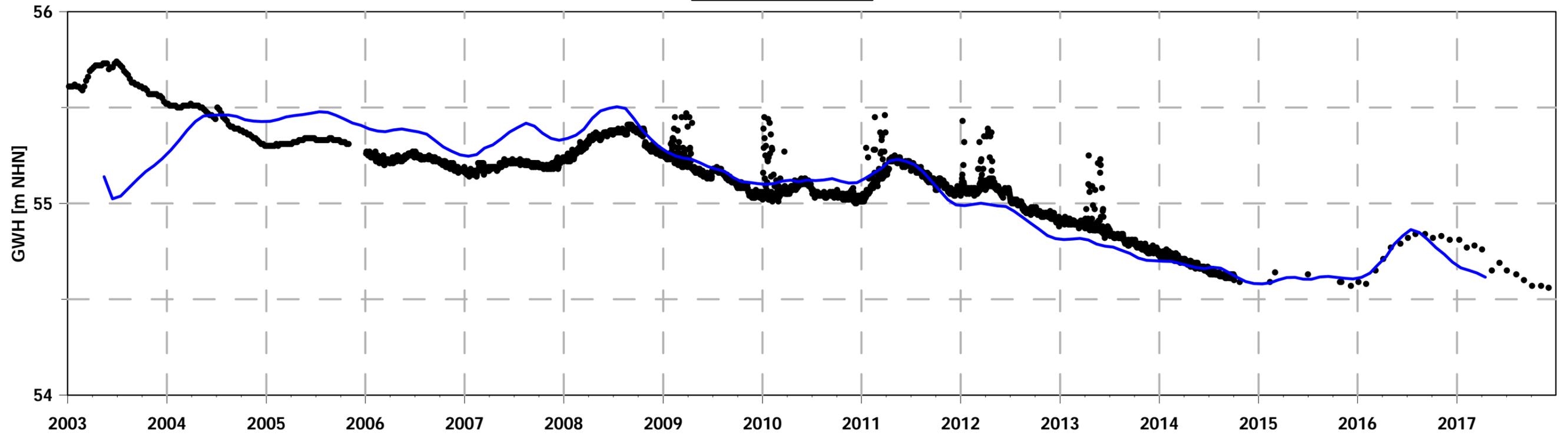
HS\_31



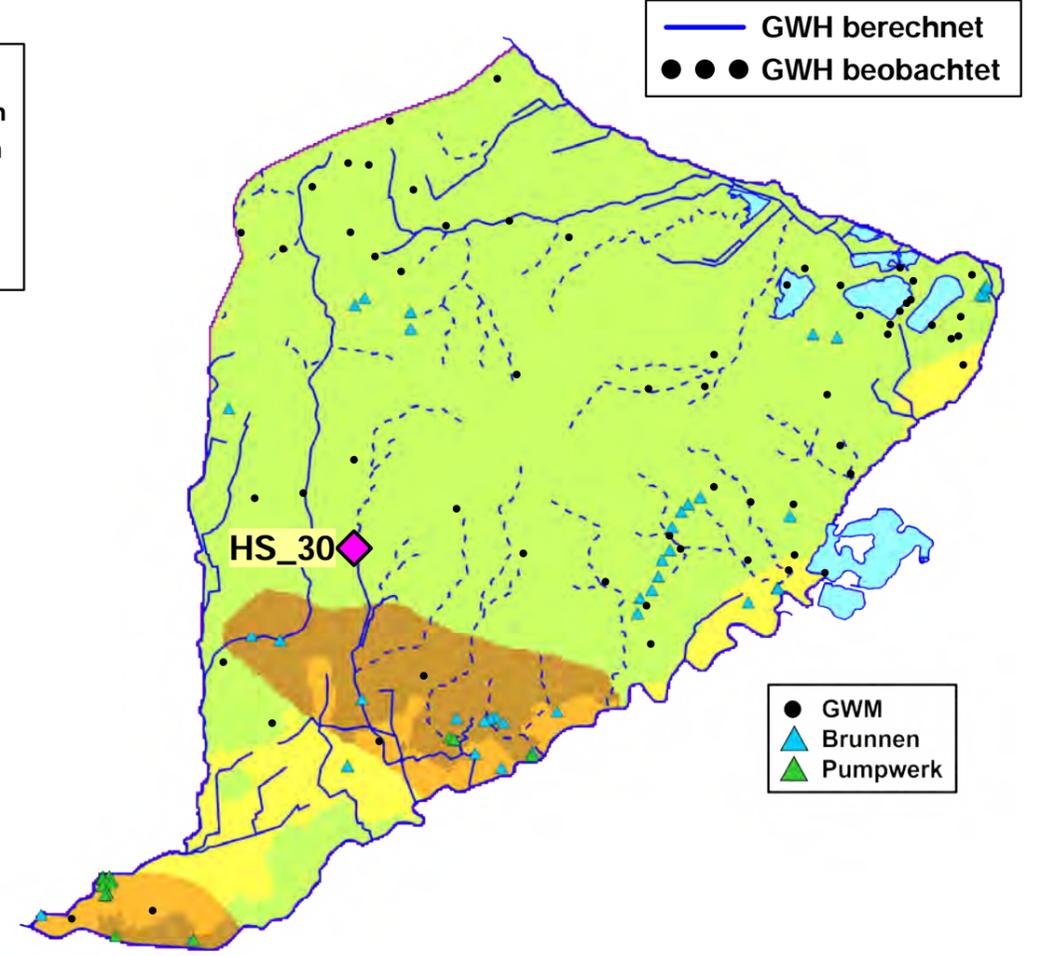
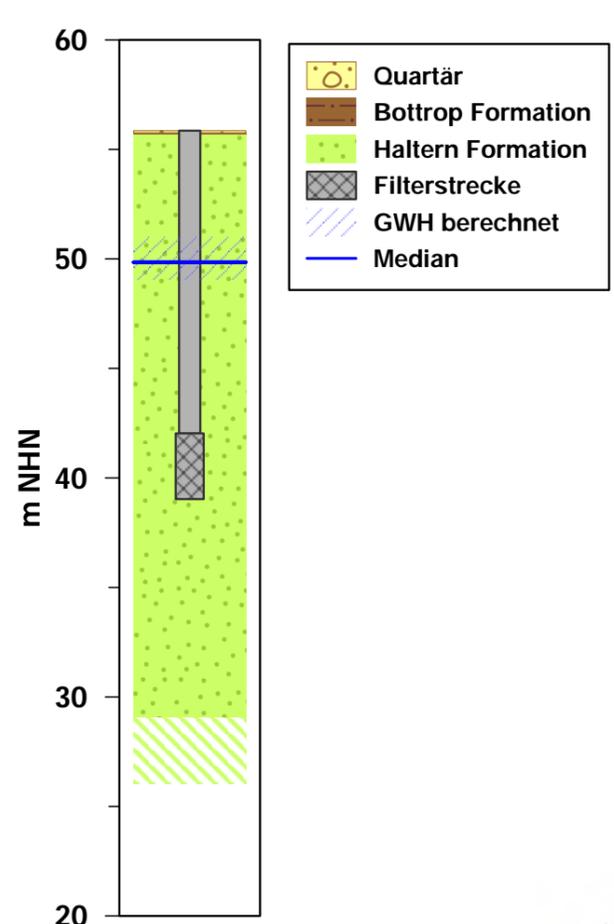
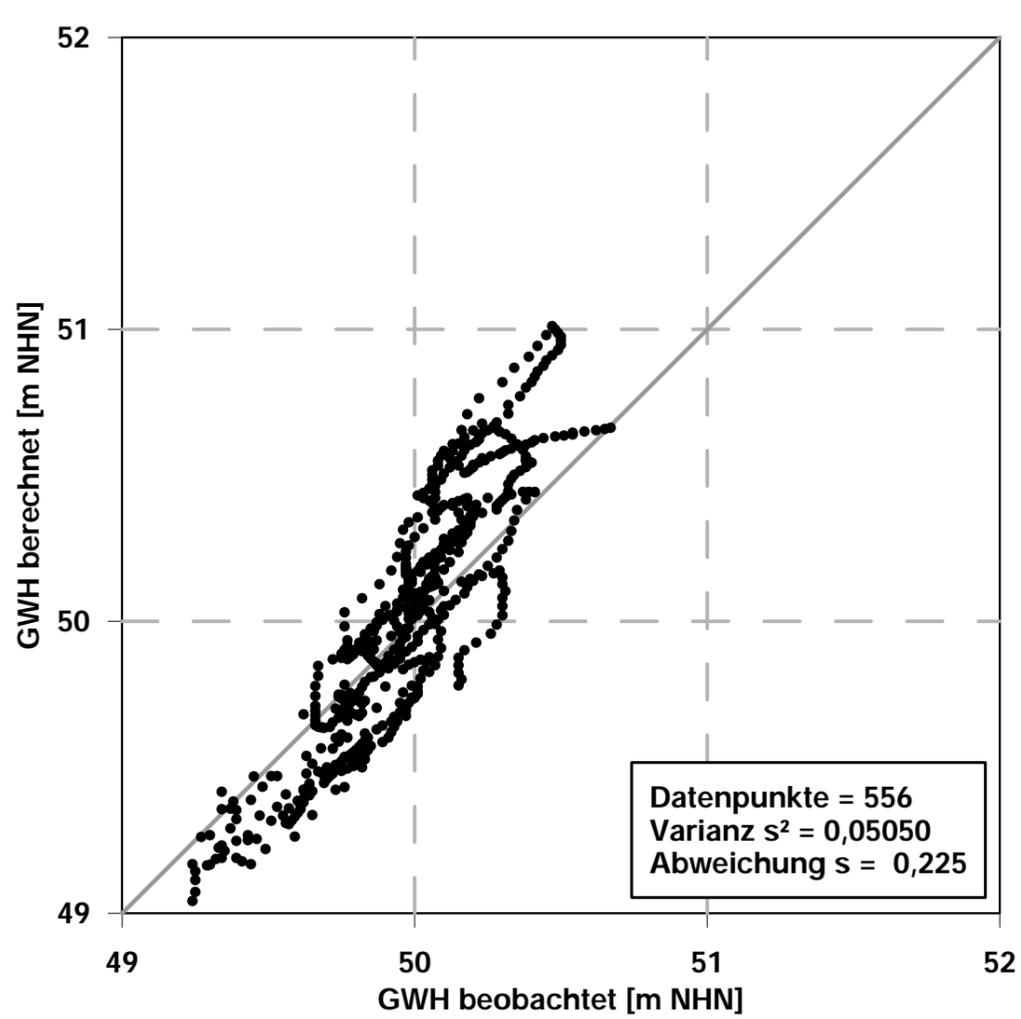
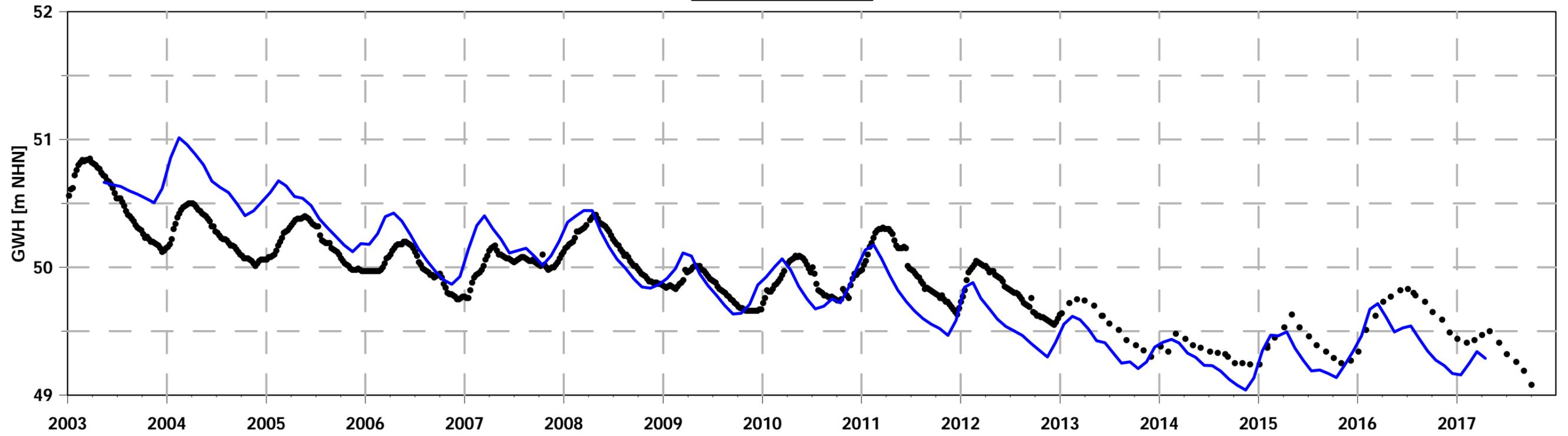
HS\_19



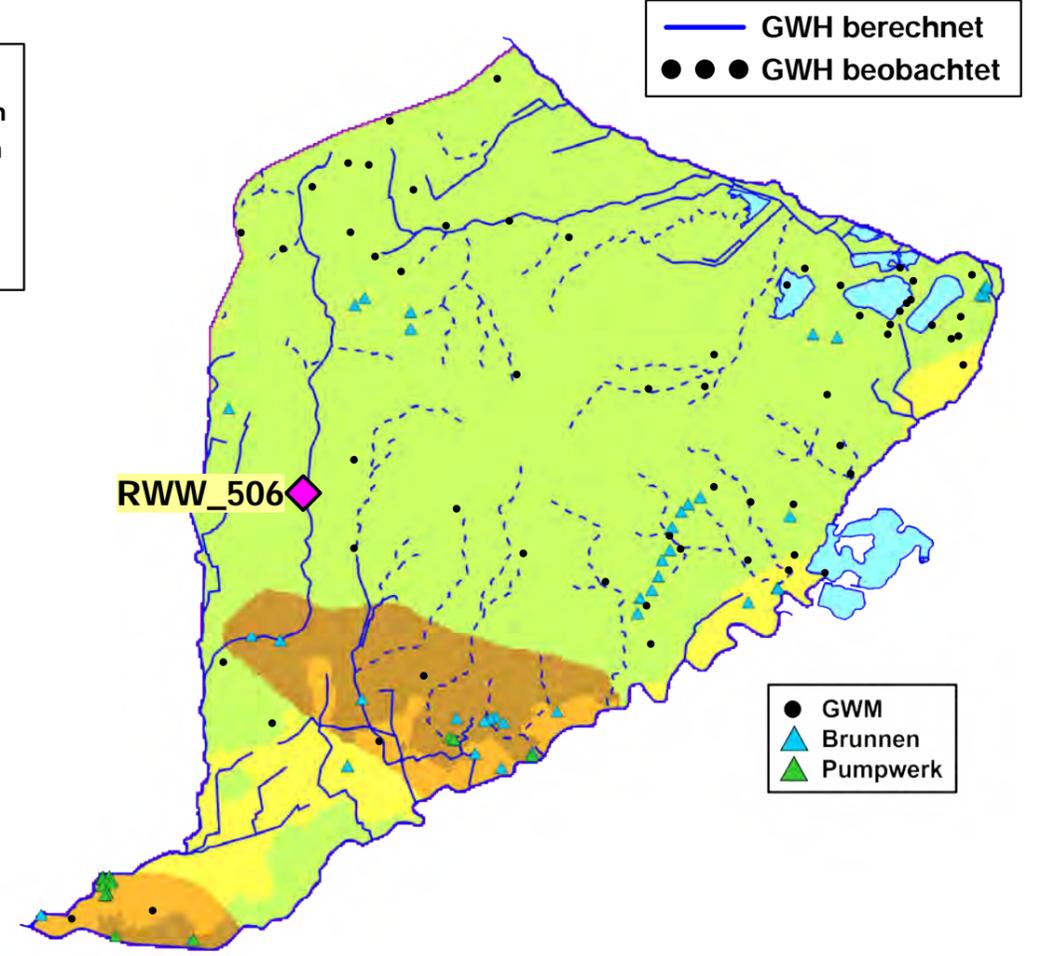
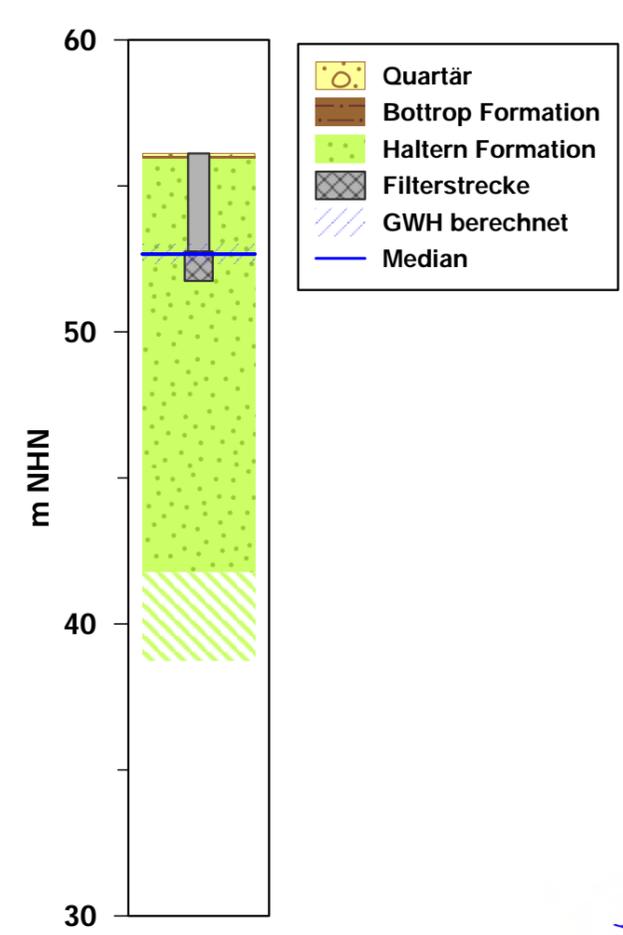
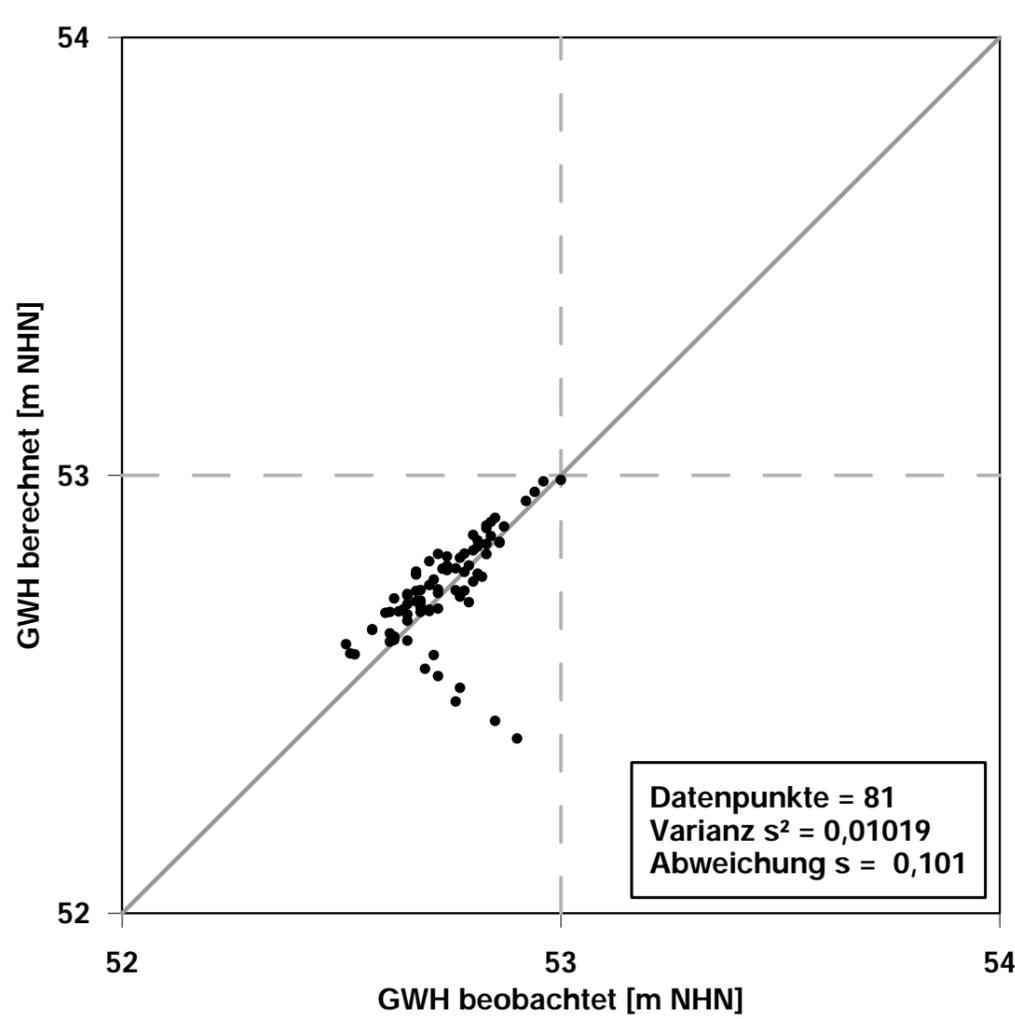
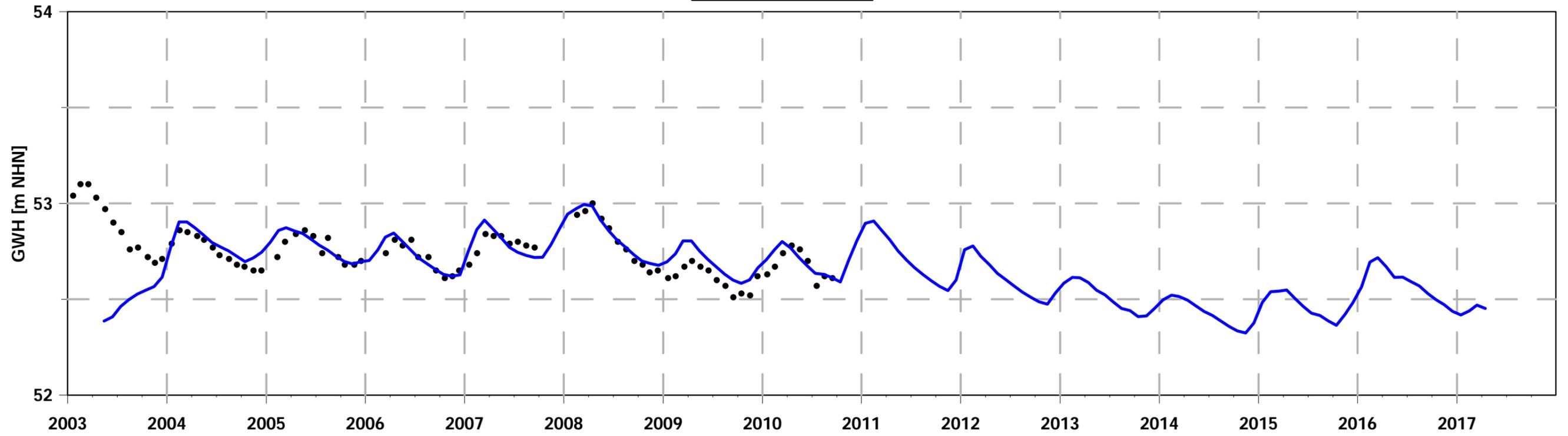
HS\_29



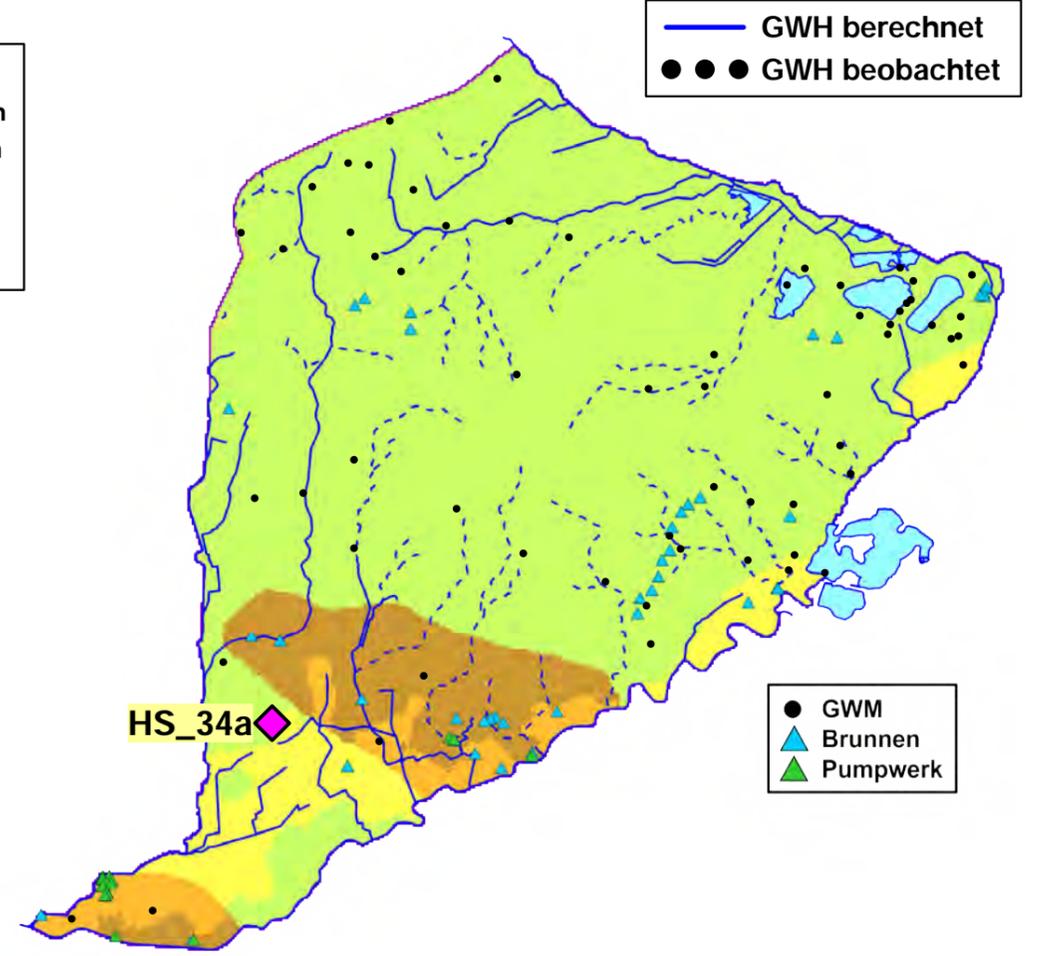
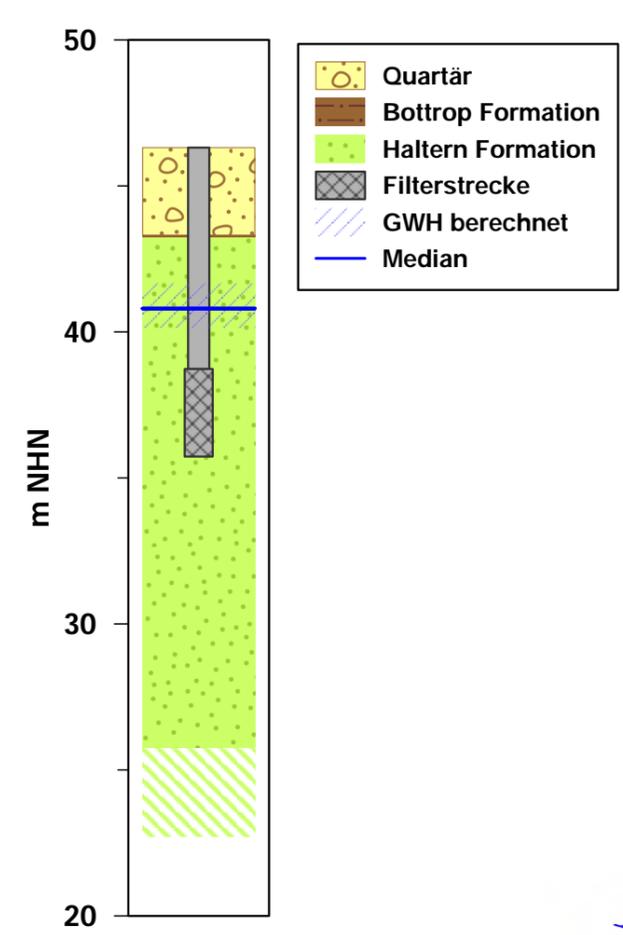
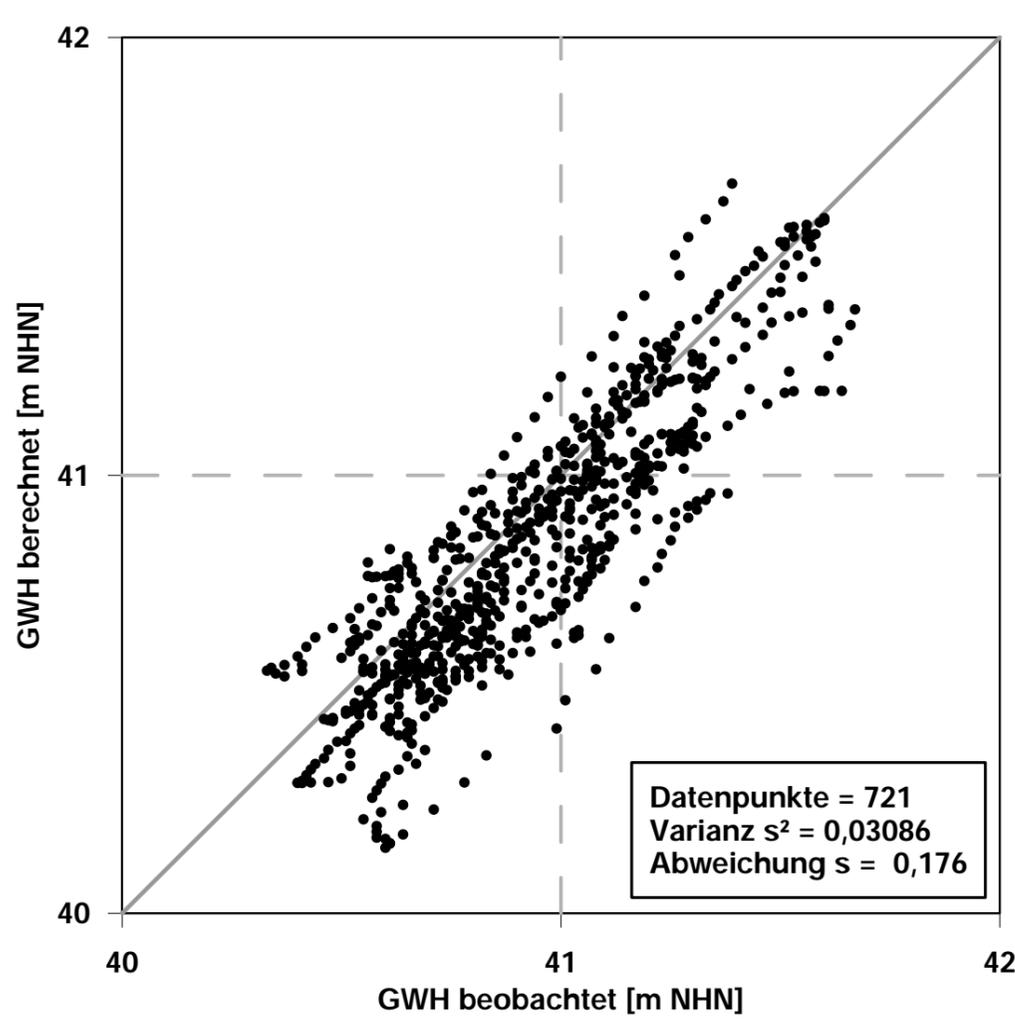
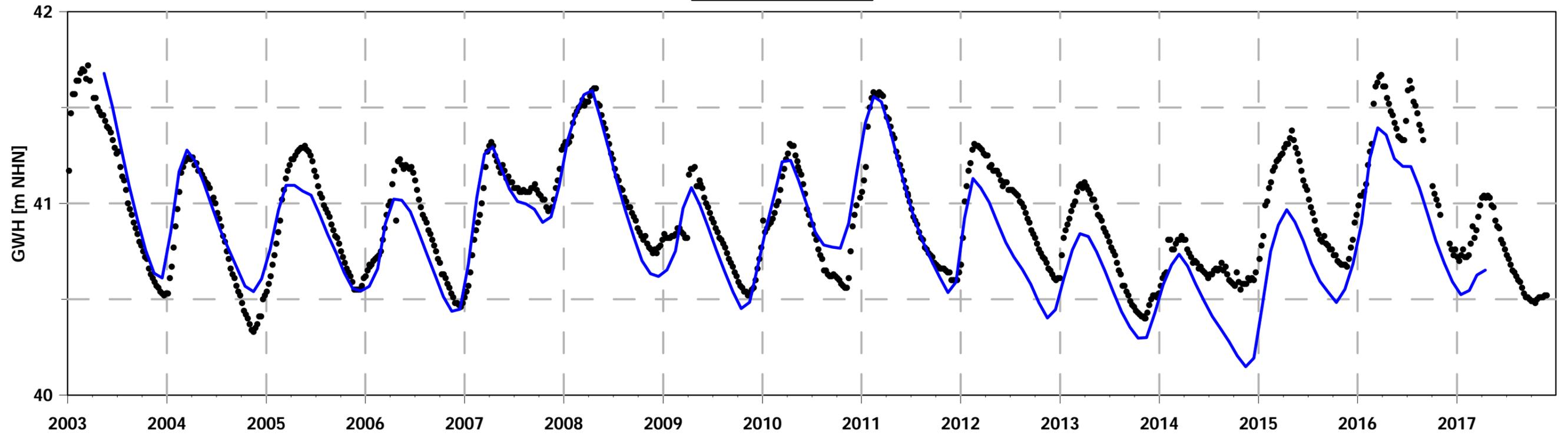
HS\_30



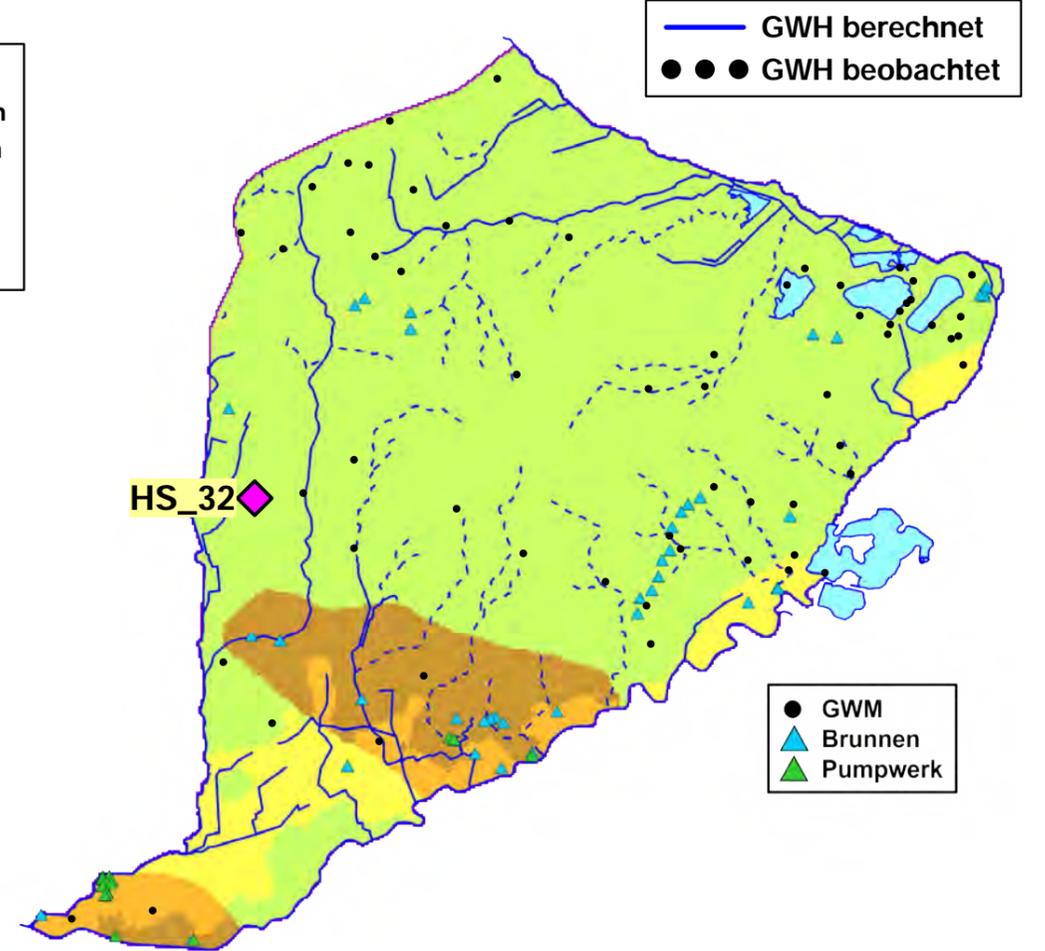
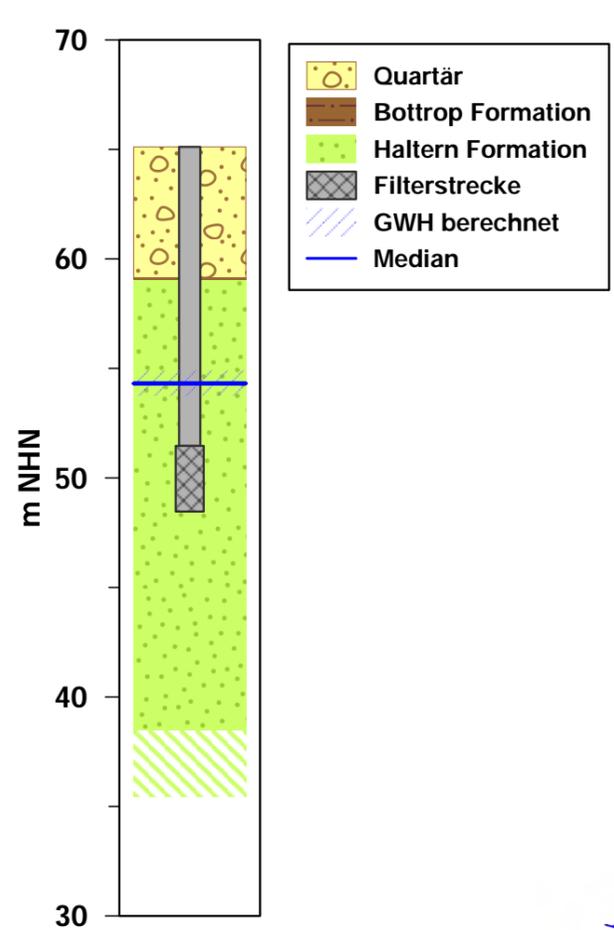
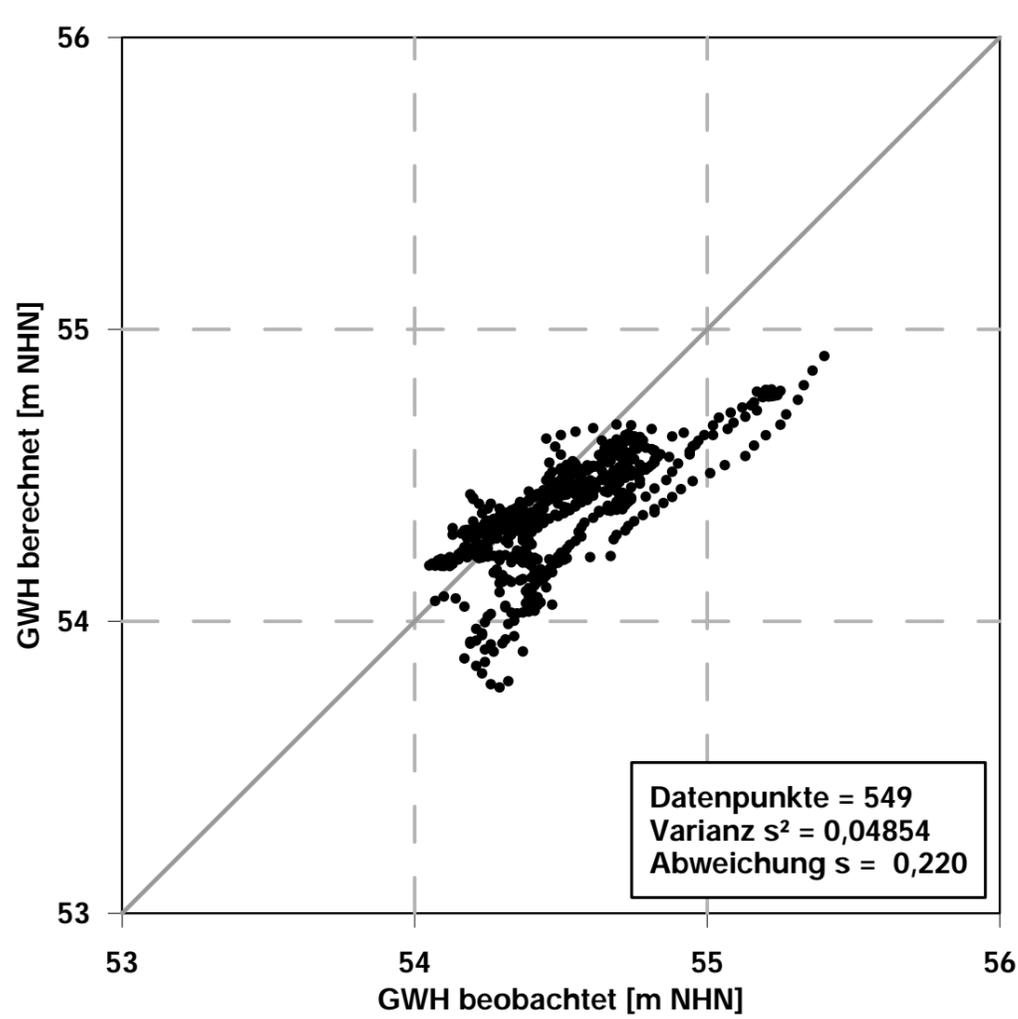
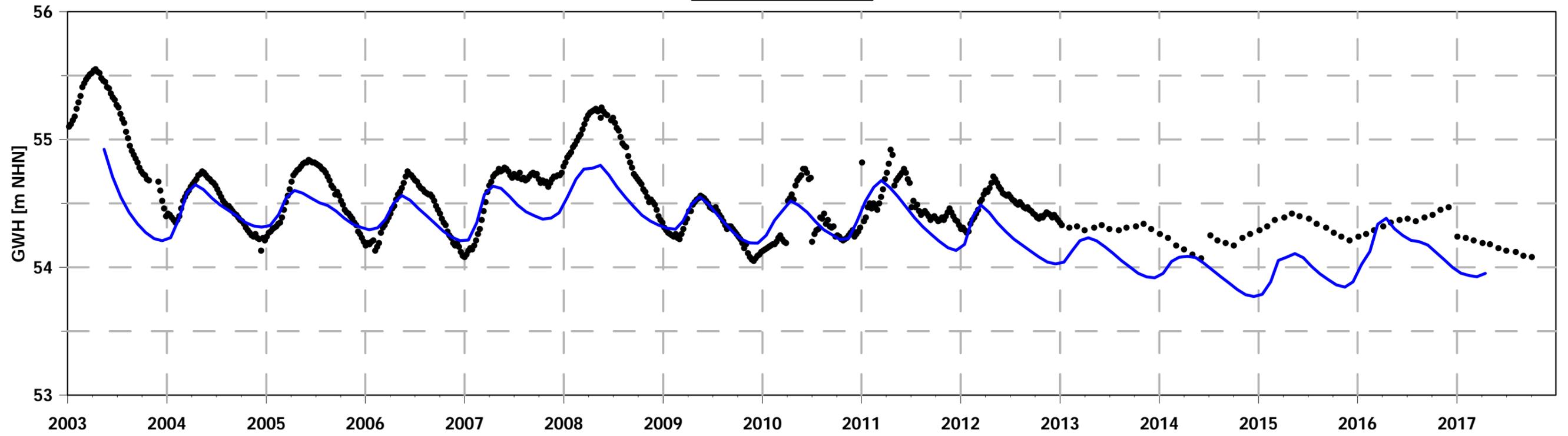
RWW\_506



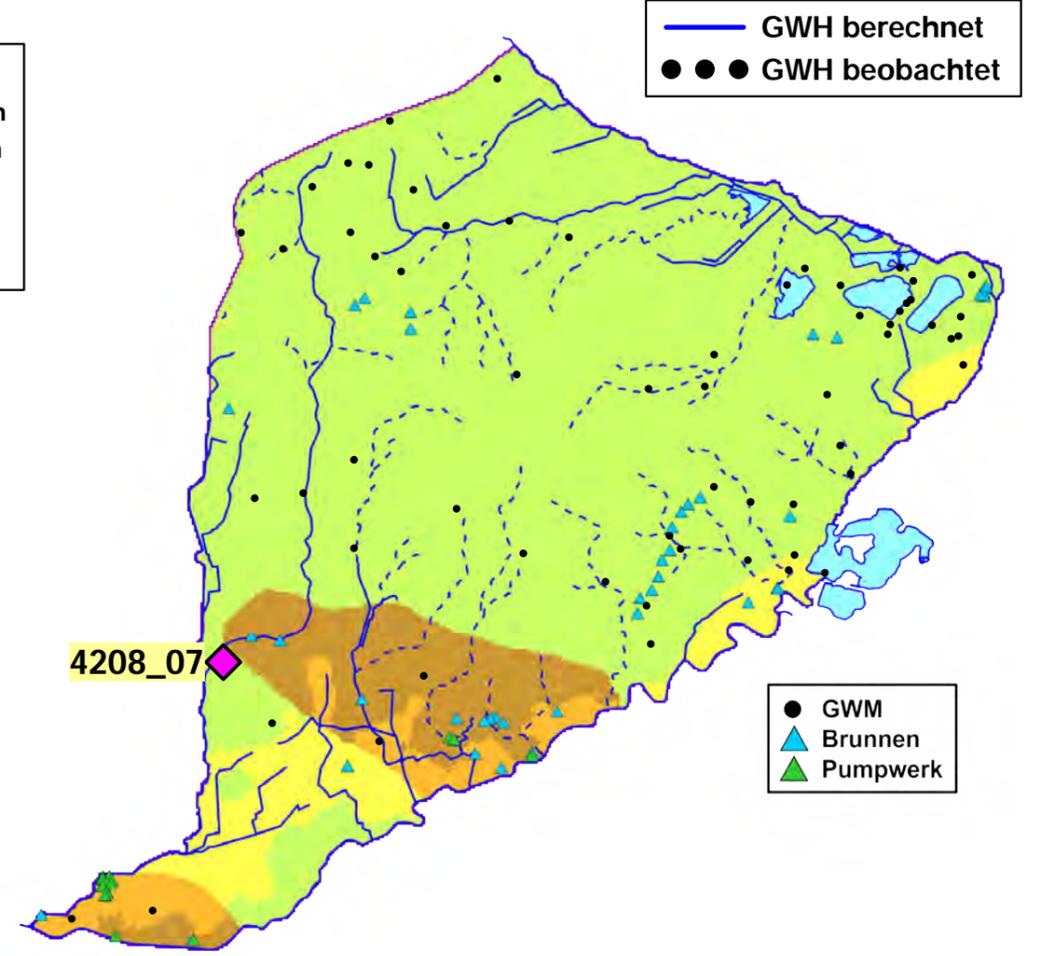
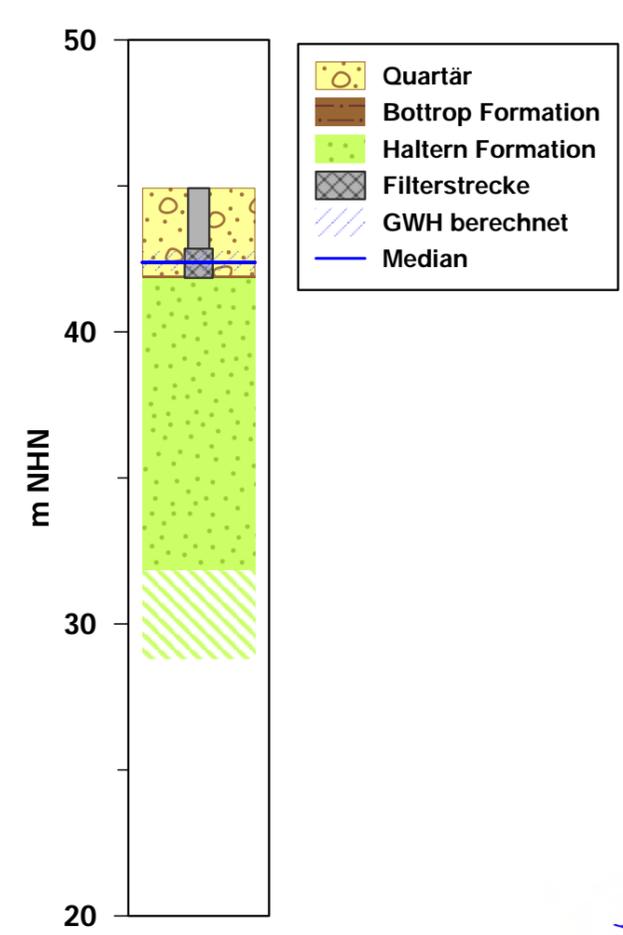
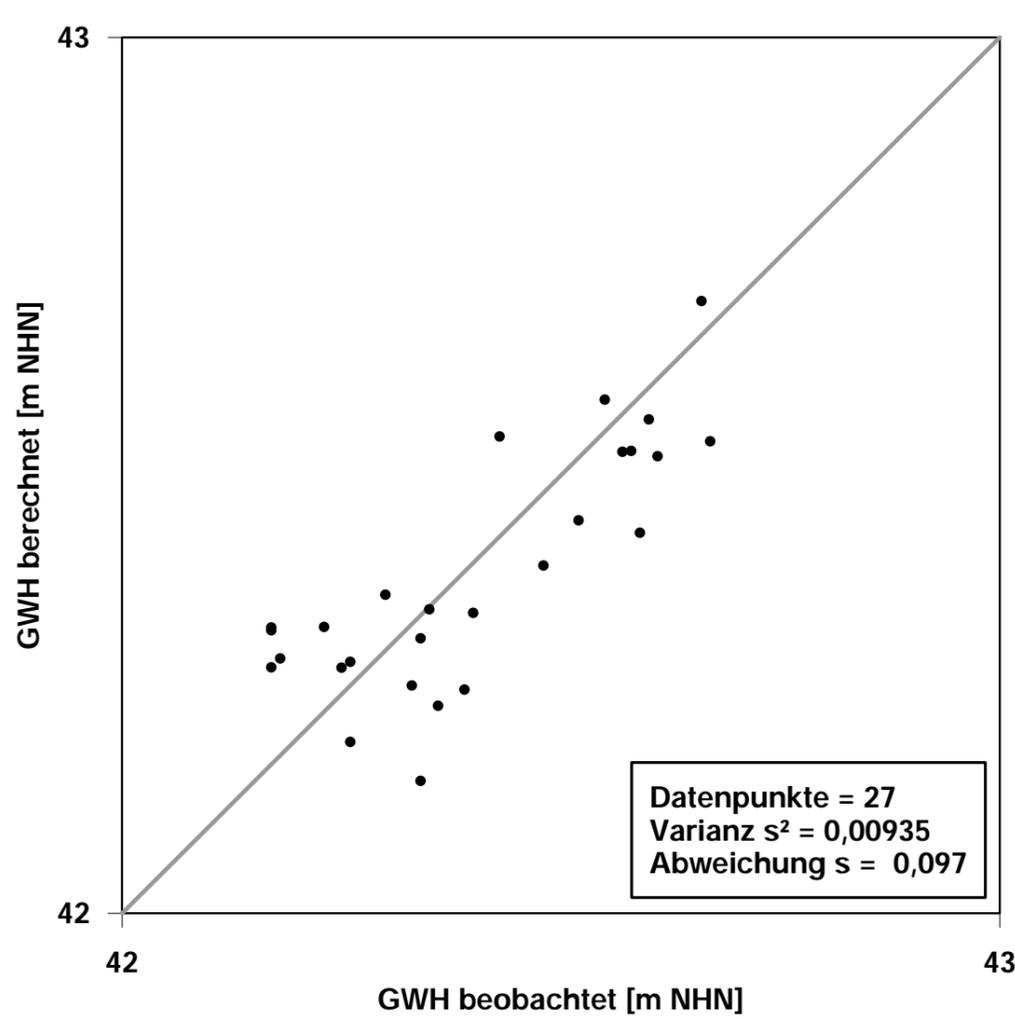
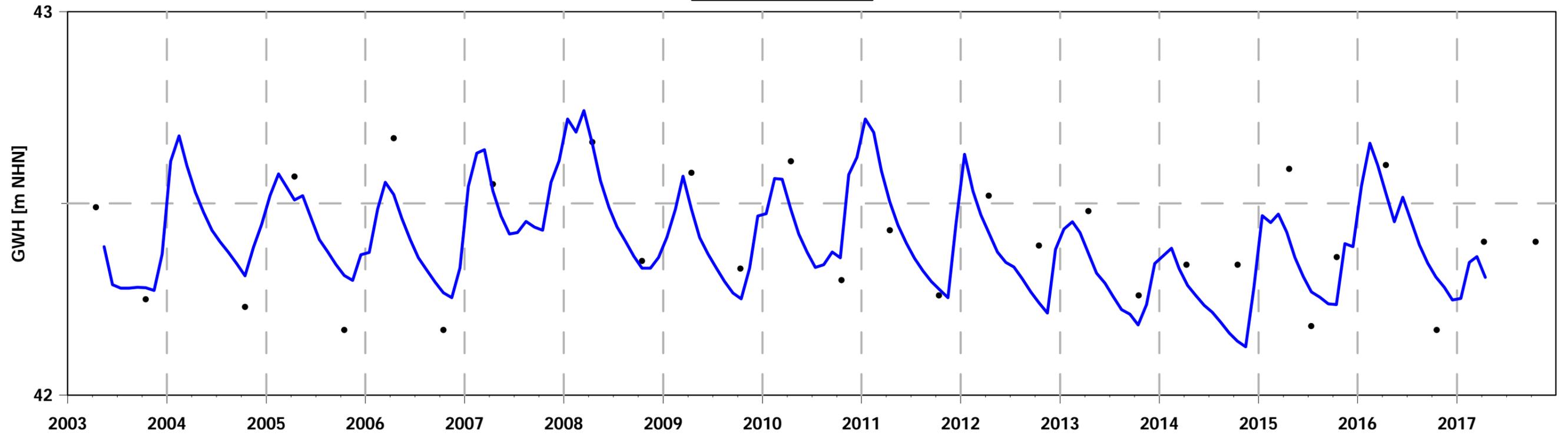
HS\_34a



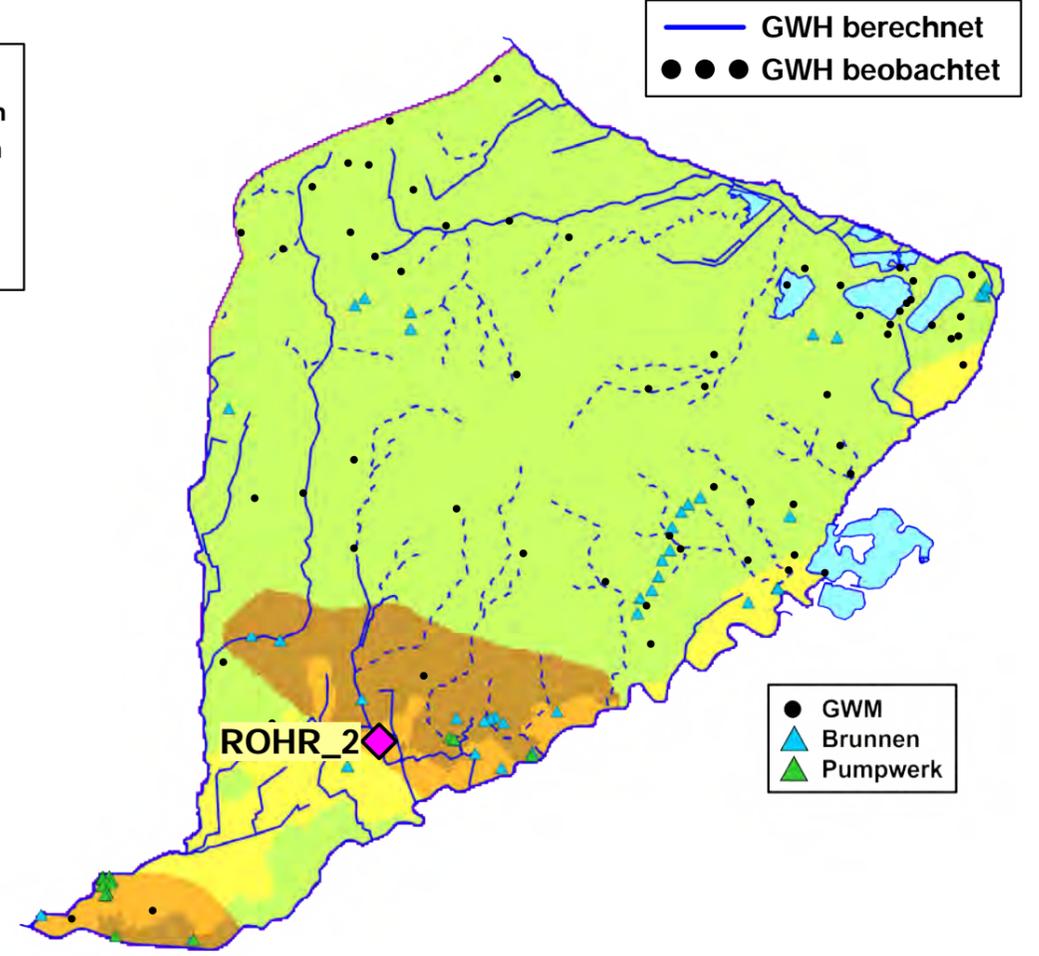
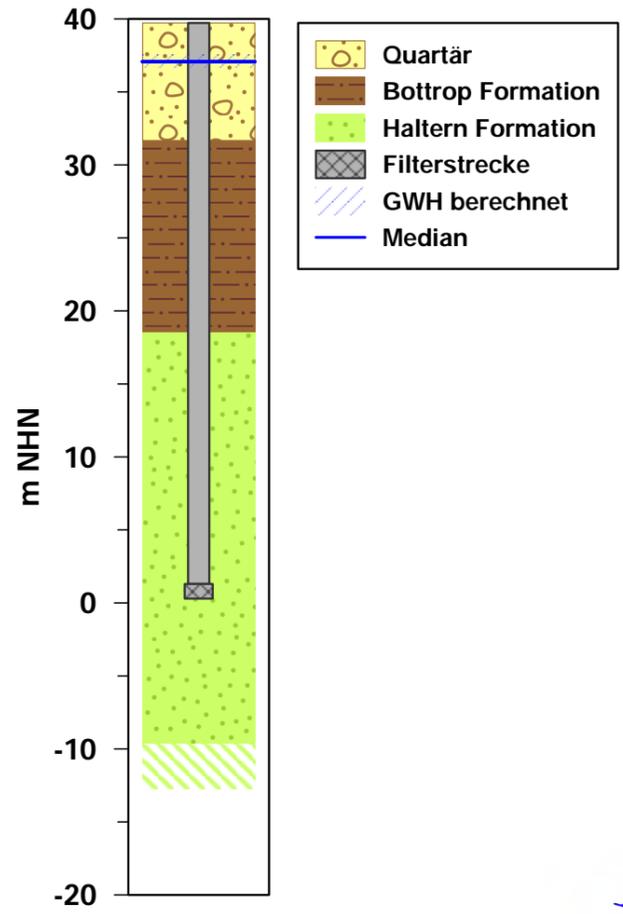
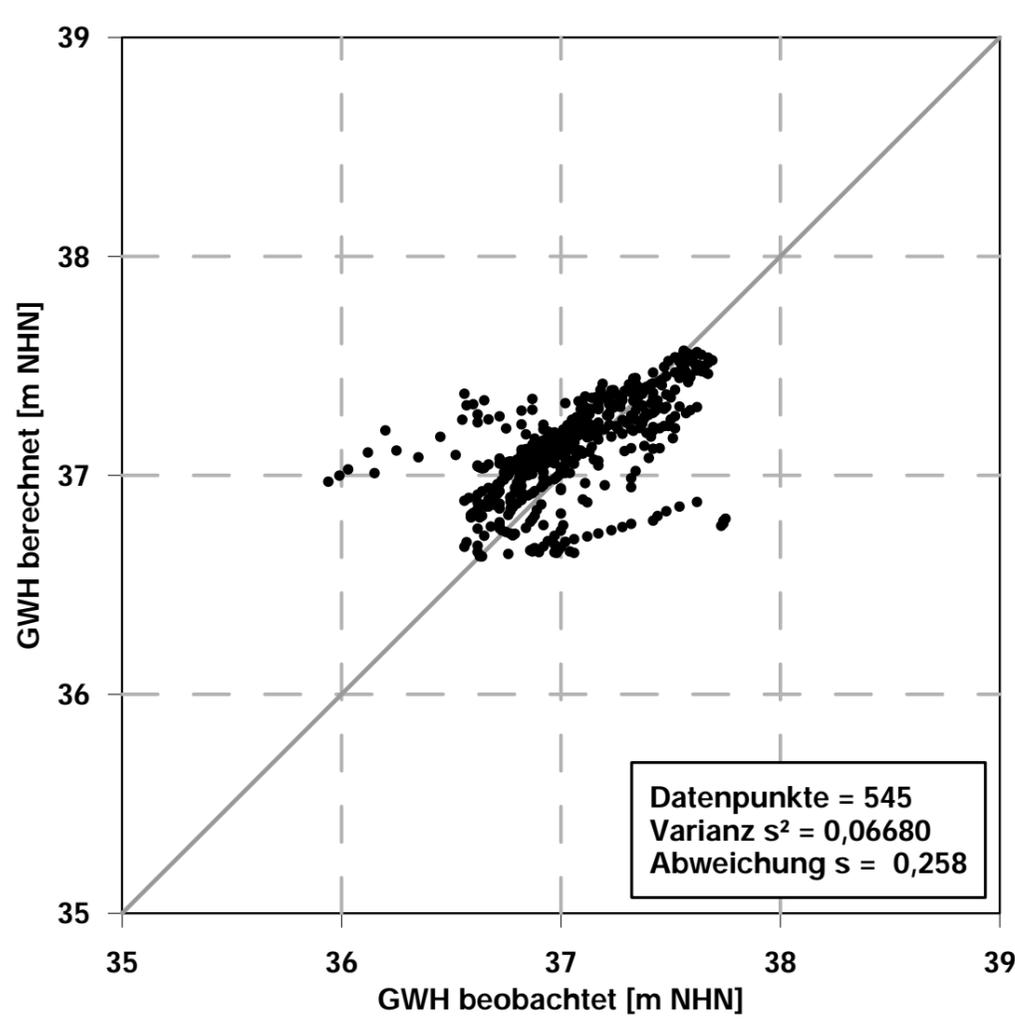
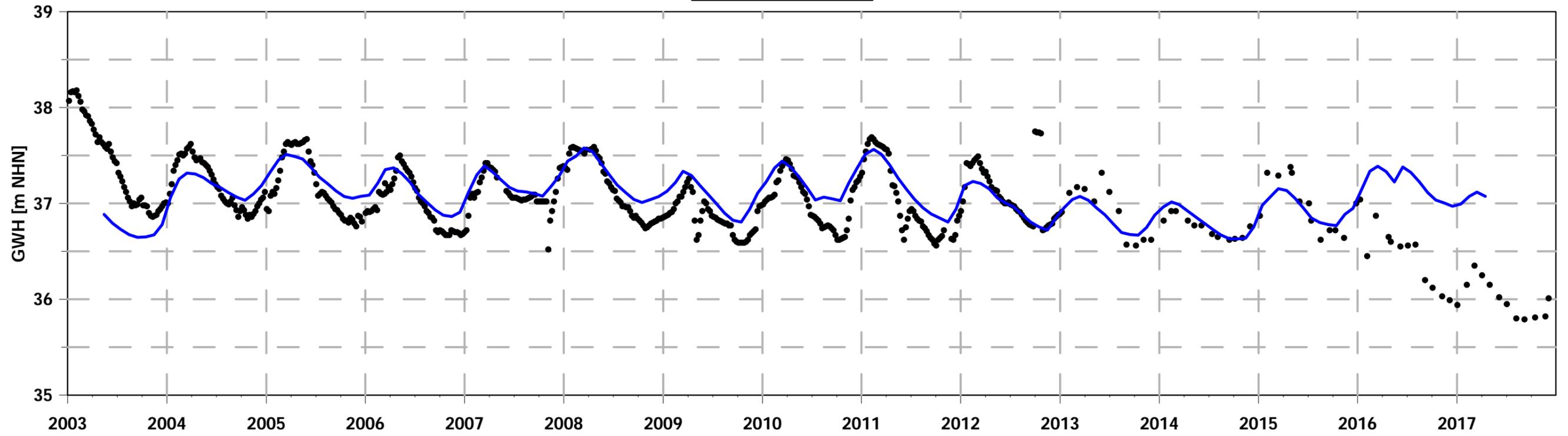
HS\_32



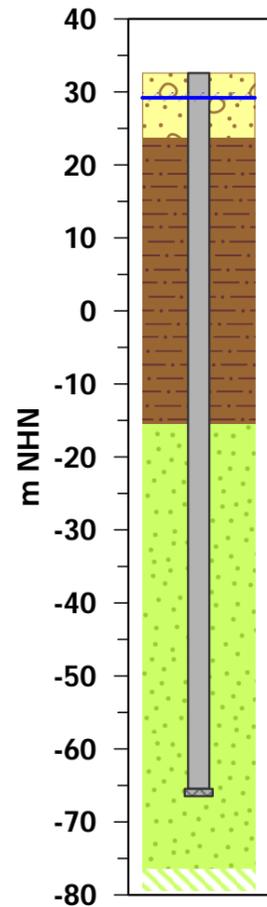
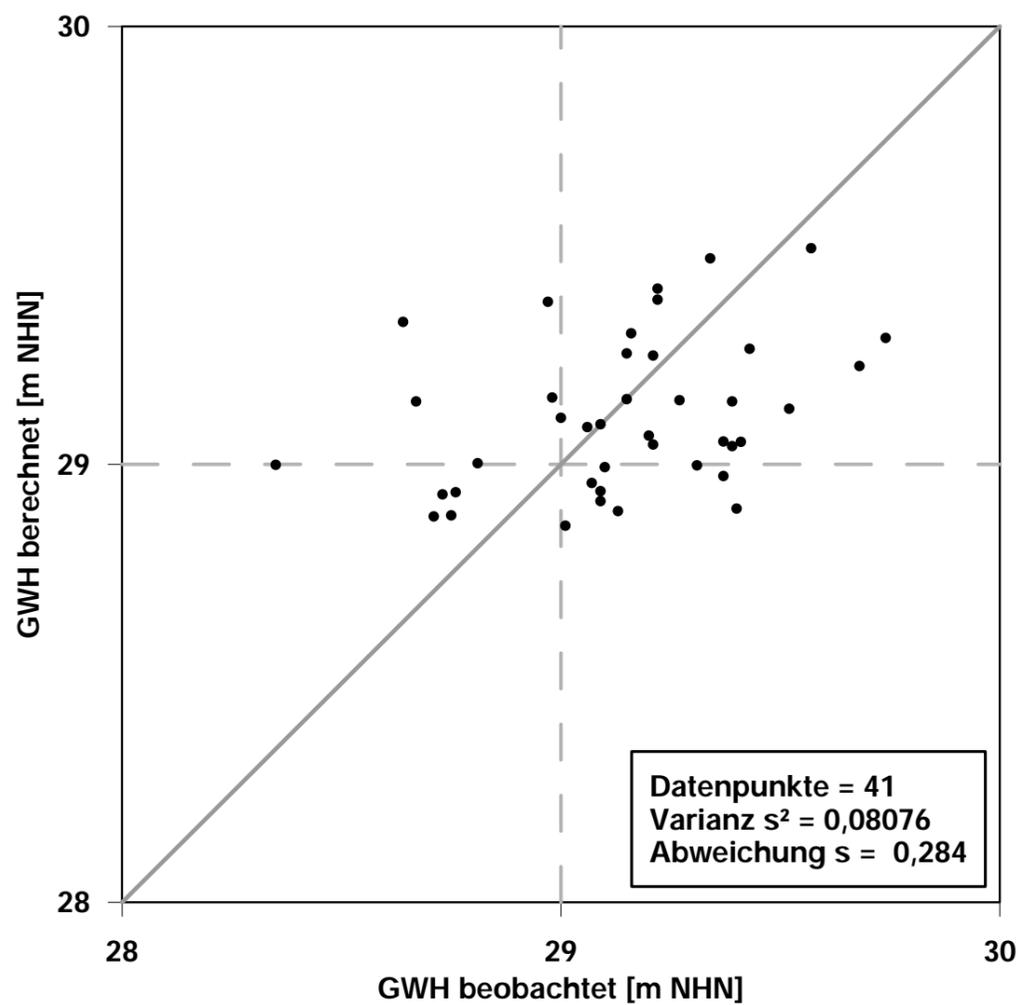
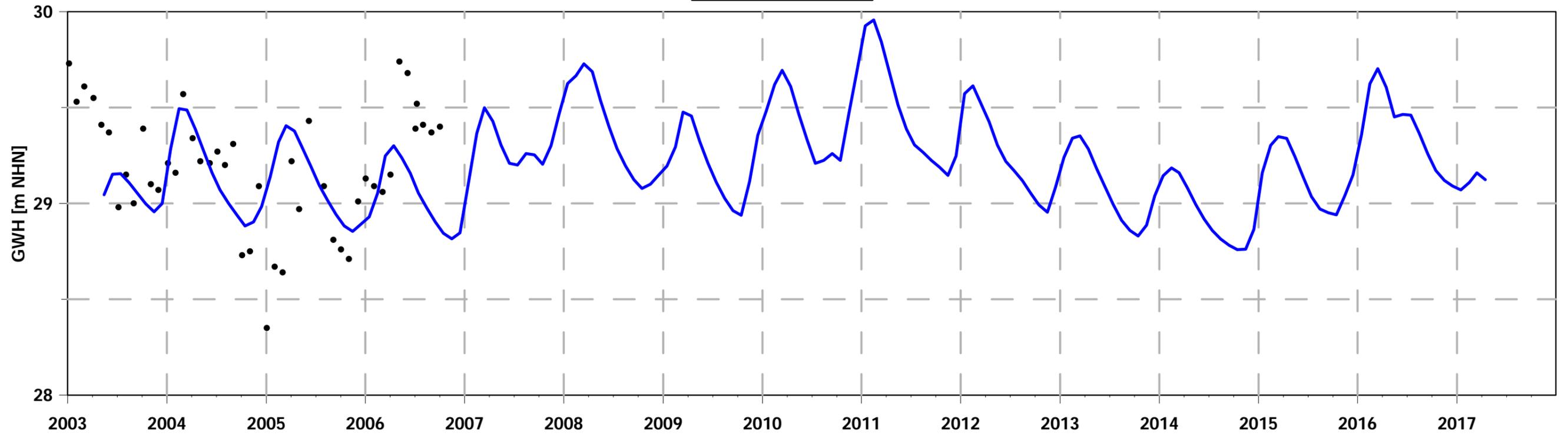
4208\_07



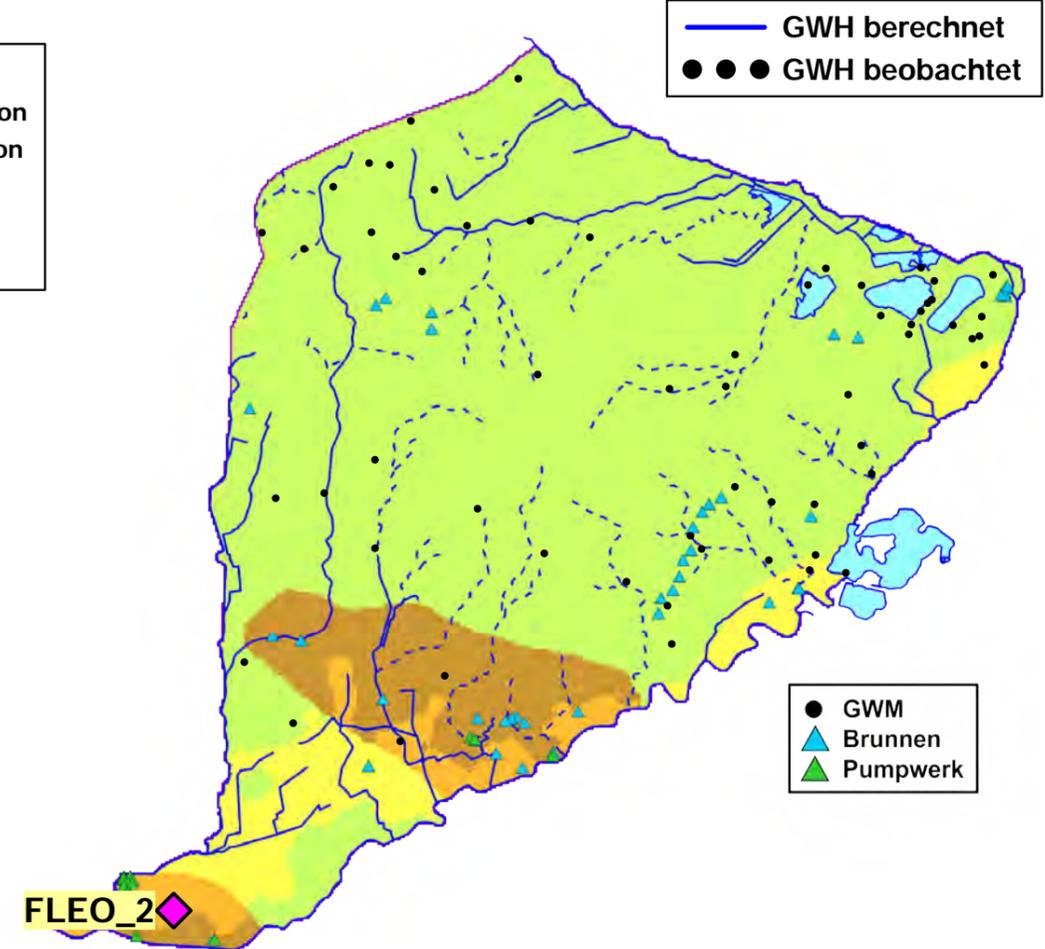
ROHR\_2



FLEO\_2

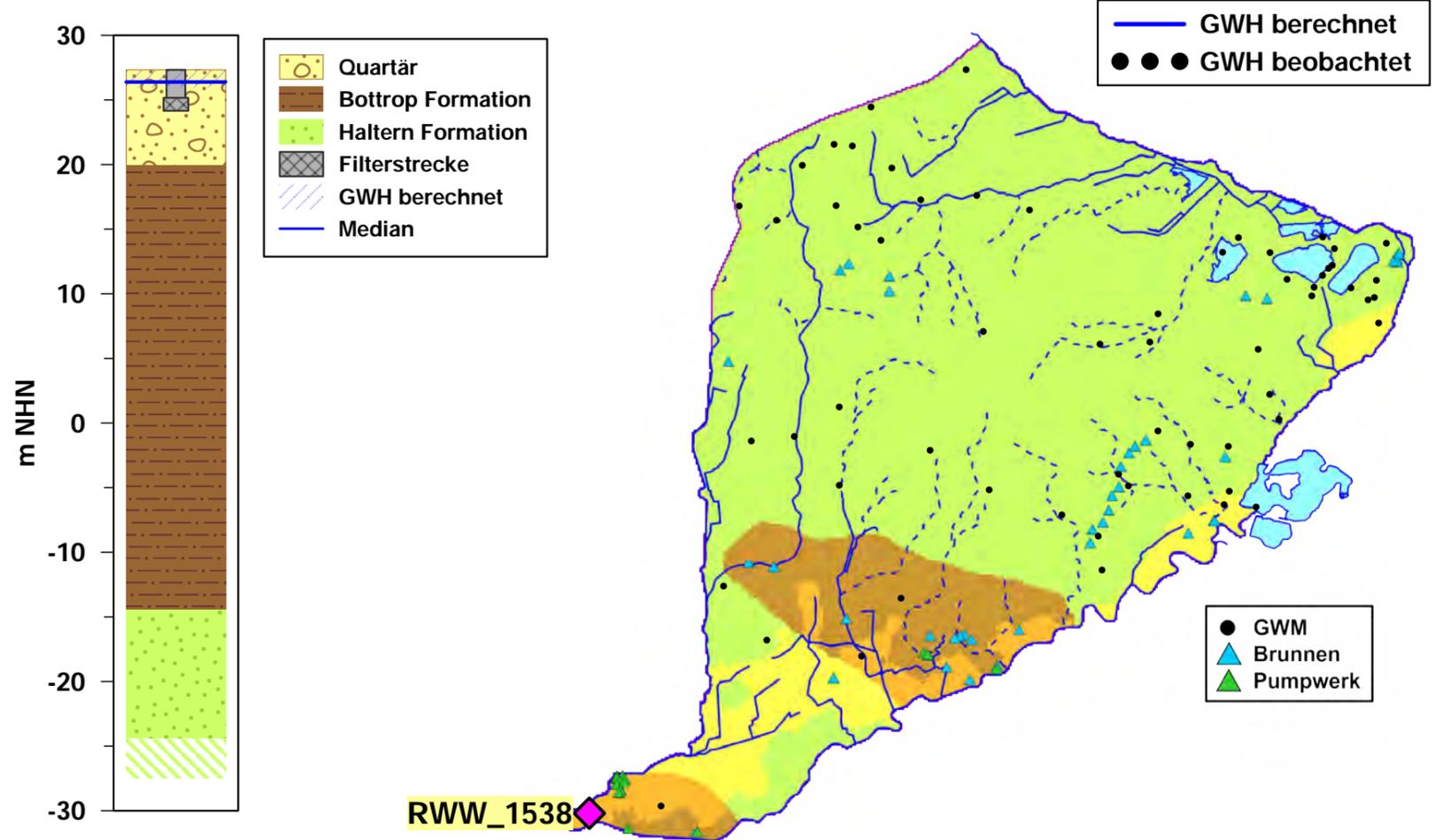
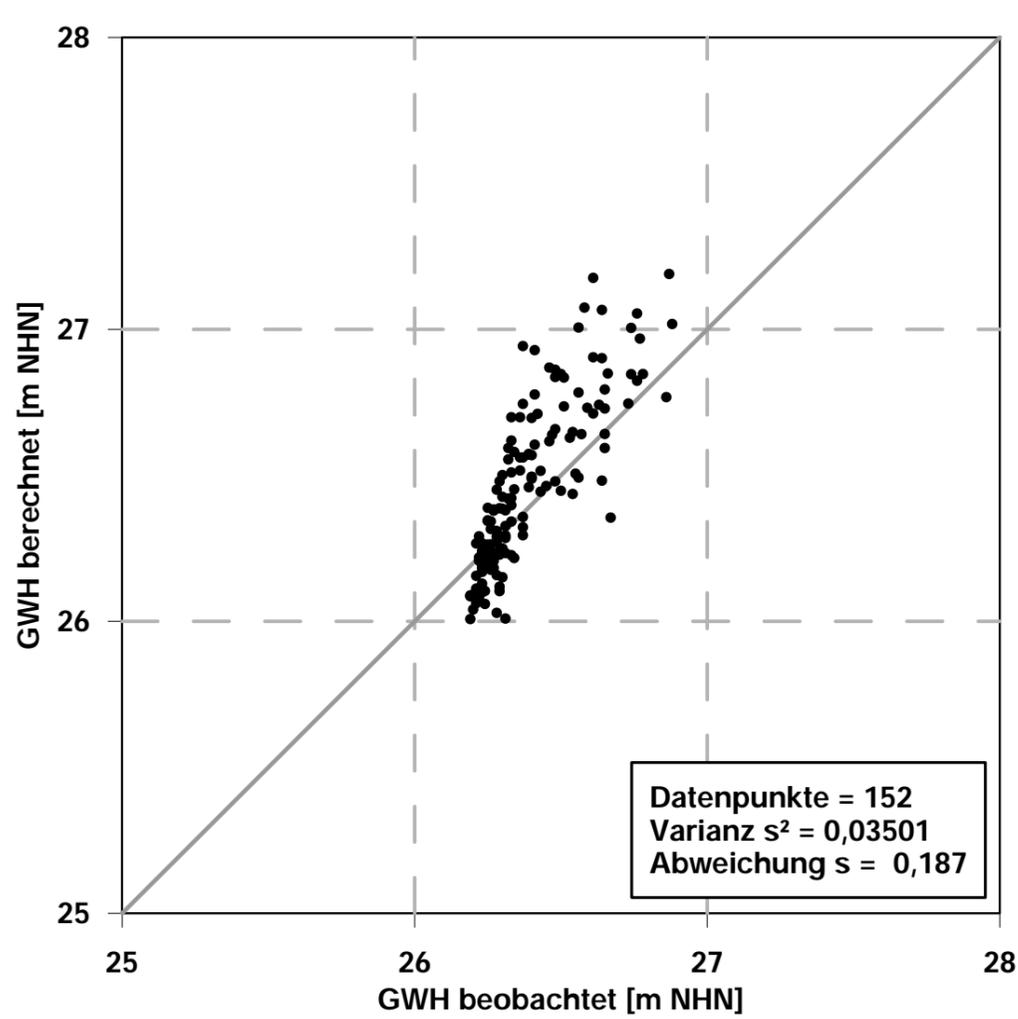
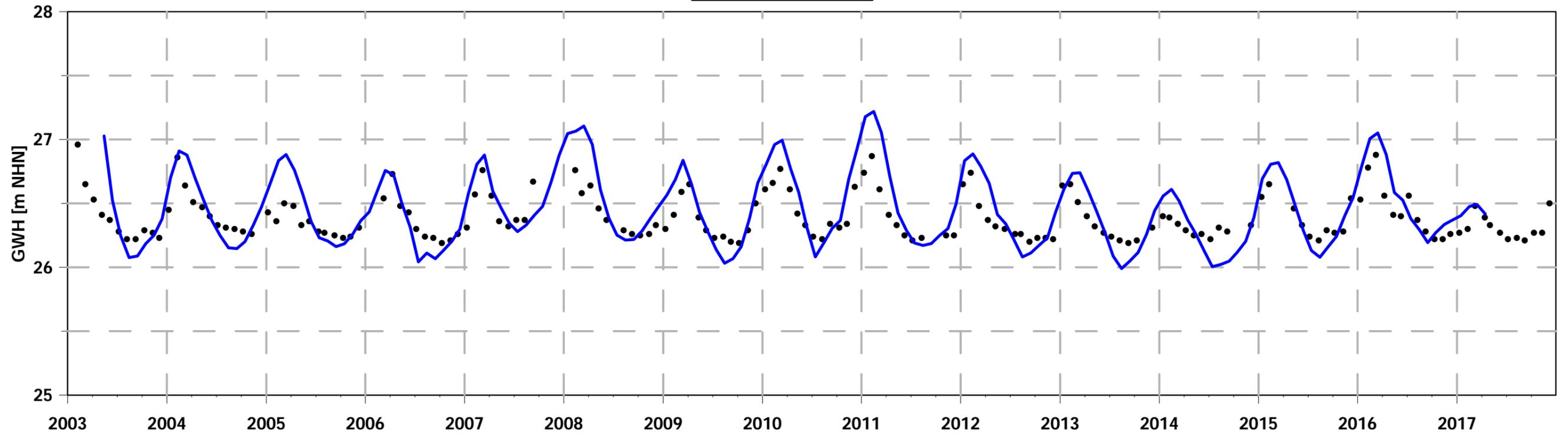


- Quartär
- Bottrop Formation
- Haltern Formation
- Filterstrecke
- GWH berechnet
- Median



- GWM
- Brunnen
- Pumpwerk

RWW\_1538



# Seewasseruntersuchung

## Wesentliche Untersuchungsergebnisse 1982 – 2014

### 1 Untersuchungsumfang

Limnologische Gutachten zu den Gewinnungsseen des Werks Haltern der Quarzwerke GmbH liegen seit 1982 anfänglich in jährlichem Turnus, ab 1988 in zweijährigem Rhythmus vor. Bis 2002 wurden nur die Seen Haltern Ost und Haltern West jeweils einmalig pro Kampagne zum Ende der Sommerstagnation untersucht. Ab 2004 wurde wegen der damals bevorstehenden Wiederaufnahme der Rohstoffgewinnung aus Haltern Sythen dieser See in das Programm aufgenommen. Ab 2008 wurde der Untersuchungsumfang für den See Haltern West um eine Messkampagne zur Frühjahrszirkulation erweitert.

Alle Untersuchungen wurden durch das Institut für Wasserforschung, Schwerte, durchgeführt. Das Untersuchungsprogramm hat sich über die Jahre im Prinzip nicht verändert, lediglich geringfügige Anpassungen und Änderungen des Parameterumfangs haben stattgefunden. Auf diese Weise ist es möglich, den langfristigen Verlauf der Gewässerbeschaffenheit der einzelnen Seen und des Grundwasseran- und abstroms zu betrachten. Die Untersuchungen beinhalteten folgende Aspekte:

- ⇒ Tiefenprofile der Parameter
- Temperatur
- Sauerstoffgehalt bzw. Sauerstoffsättigung als  $f(T)$
- Redoxpotential (teilweise)
- pH-Wert
- elektrische Leitfähigkeit (teilweise)
- ⇒ Chemische und biologische (Seewasser) Wasseranalysen aus
- Epilimnion
- Metalimnion
- Hypolimnion
- Grundwasseran- und abstrom

(mit in der Zeit geringfügig variierendem Parameterumfang)

- ⇒ Nährstoffsituation bzw. Trophieklassenbestimmung der Seen
- ⇒ Bakteriologische Wasseruntersuchungen (Seewasser, Grundwasserabstrom)
- ⇒ Sedimentuntersuchungen
- ⇒ Bewertung der Ergebnisse einschließlich der zeitlichen Entwicklung

Im Folgenden werden die für die Fragestellung wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammenfassend erläutert.

## 2 Tiefenprofile

Die Anlage 1 (Blätter 1 – 4) zeigt die aufgenommenen Tiefenprofile aller gemessenen Parameter nach Seen geordnet nebeneinander in zeitlicher Abfolge ab 1986. Im See Haltern-Ost wurden jeweils an zwei Standorten („Ost 1“, „Ost 2“) von einem Boot aus, aber auch von fest installierten Stegen aus Tiefenprofile aufgenommen. Die Positionen der Tiefenprofile sind daher nicht immer identisch, so dass in den Tiefenprofilen unterschiedliche Seetiefen dokumentiert sind. Die Messungen in den Seen Haltern-West und Haltern-Sythen erfolgten von einem Boot jeweils in der Seemitte aus.

### 2.1 Temperatur

In allen Seen ist jeweils zum Ende der Sommerstagnation eine ausgeprägte Temperaturschichtung zu erkennen. Nur in 1998 ist über das gesamte Profil eine gleichmäßige Temperaturverteilung ausgebildet. Das Epilimnion erreicht in einigen Jahren > 10 m, sonst 5 – 10 m und selten < 5 m Mächtigkeit mit Temperaturen bis maximal etwas über 20°C. Die Mächtigkeit des Metalimnions unterliegt naturgemäß Schwankungen und beträgt im Mittel etwa 5 m. In allen Seen werden im Hypolimnion 10°C in der Regel nicht überschritten. Die gemessenen Temperaturprofile entsprechen den Erwartungen für relativ tiefe Seen zum Ende der Sommerstagnation.

Seit 2008 werden im See Haltern West auch Tiefenprofile im Frühjahr aufgenommen. Außer in 2008, wo sich zum Zeitpunkt der Messung bereits eine typisch fröhsummerliche Temperaturschichtung erkennen lässt, zeigen die nachfolgenden Messungen annähernd homotherme Verhältnisse, wie es für die Frühjahrszirkulationsphase zu erwarten ist.

### 2.2 Sauerstoff

Mäßig gut korreliert mit den Temperaturprofilen sind die Sauerstoffprofile. Durch Photosynthese bedingt und begünstigt durch höhere Temperaturen und gute Lichtverhältnisse sind in allen Seen im Epilimnion hohe Sauerstoffgehalte um 10 mg/l nahe der Sauerstoffsättigung zu verzeichnen. Über die Sprungschicht hinweg nehmen die Sauerstoffgehalte ab und fallen im Hypolimnion seit Beginn der 1990er Jahre im Sommer jedoch kaum unter 5 mg/l, wonach in allen Seen auch in der Phase der Sommerstagnation ein hinreichendes Sauerstoffangebot vorliegt, um reduzierende Verhältnisse am Seegrund zu unterbinden.

Im See Haltern West zeigt sich dagegen eine etwas abweichende Entwicklung. Seit Beginn der Untersuchungen bis etwa 1988 war zum Ende der Sommerstagnation im unteren Hypolimnion ein deutlicher Sauerstoffmangel zu verzeichnen, welcher sich in der Folgezeit jedoch nicht mehr einstellte. Die Sauerstoffprofile aus der Frühjahrszirkulation seit 2004 dokumentieren eine homogene Sauerstoffverteilung nahe der Sättigung.

Auch wenn das chemische Redoxpotential letztendlich von zahlreichen gelösten Redoxpartnern bestimmt wird, sollte eine Korrelation mit der Sauerstoffkonzentration gegeben sein. Dies ist vielfach jedoch nicht festzustellen, so dass eine weitergehende Interpretation dieser Messungen hier nicht erfolgt.

### 2.3 pH-Wert

In allen Seen herrscht ein neutrales bis schwach basisches Milieu mit pH-Werten bis > 8. Im Sommer werden dabei regelmäßig die höchsten Werte im Epilimnion gemessen. Dies ist eine unmittelbare Folge der Photosynthese des Phytoplanktons, da bei diesem Prozess dem Wasser Kohlendioxid und damit

Kohlensäure entzogen wird. Signifikante Gehalte der Seewässer an Hydrogencarbonat belegen eine gute Pufferkapazität.

Im See Haltern Sythen ist eine abweichende Entwicklung dokumentiert. Mit Beginn der Messungen in 2004 innerhalb des bereits seit Jahrzehnten existierenden Gewinnungssees war zunächst ein deutlich saures Milieu mit pH-Werten um 4 festzustellen. Dieser Wert entspricht dem geogen bedingten Erwartungswert des oberflächennahen und schwach gepufferten Grundwassers im Abbaubereich. Mit Wiederaufnahme der Sandgewinnung steigen die pH-Werte jedoch rasch an.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass mit der zunehmenden Größe der Gewinnungsseen im Zuge des fortschreitenden Sandabbaus deren Tiefeneinfluss auf die Grundwasserströmung ebenfalls zugenommen hat. Das bedeutet, dass der Anteil des lokalen und sehr sauren oberflächennahen Grundwassers, welches die Seen durchströmt, zugunsten aufsteigenden und gut gepufferten (Säurekapazität bis pH 4.3 bzw. Hydrogencarbonat) Tiefenwassers offensichtlich deutlich abgenommen hat. Als Beleg können die Calcium-Gehalte der Seen herangezogen werden. Sie liegen in einem Konzentrationsbereich von etwa 30 bis 55 mg/l und damit in einem Niveau, welches dem Chemismus des Grundwassers der tieferen Halterner Sande entspricht. Dahingegen zeigen die relativ flach verfilterten Grundwasseranstromstellen der Seen (M4, D45) nur Calcium-Gehalte von etwa 0,5 - 10 mg/l.

Als weiterer Gesichtspunkt hinsichtlich der pH-Wert Anhebung im See Haltern Sythen ist zu berücksichtigen, dass mit Aufnahme der Förderung in diesem See auch ein entsprechender Transportwasseraustausch mit den anderen Seen eingetreten ist, der ganz sicher zu der vergleichsweise raschen Angleichung der pH-Werte beigetragen hat.

## 2.4 Elektrische Leitfähigkeit

Die Tiefenprofile der elektrischen Leitfähigkeit sind relativ ausgeglichen. Es herrscht generell ein schwach zunehmender Trend zur Tiefe hin aufgrund des zunehmenden Grundwasseranteils mit höherer Mineralisierung als Niederschlagswasser. Der Verlauf des Leitfähigkeitsprofils zeigt an der Sprungschicht häufig auch eine schwach ausgeprägte Diskontinuität mit geringfügig geringerer Leitfähigkeit im Epilimnion aufgrund des Kohlensäureentzugs durch Photosynthese.

## 3 Nährstoffsituation und Trophieklassifikation

Anlage 2 zeigt die Ganglinien der die Nährstoffsituation der Seen im Wesentlichen kennzeichnenden Parameter Phosphat bzw. Phosphor und Nitrat jeweils für die drei Probenahmehöhe (Epi-, Meso- und Hypolimnion) aller Seen sowie des Grundwasseran- und -abstroms entsprechend den Untersuchungsberichten des Instituts für Wasserforschung.

Zusätzlich wurden die Konzentrationen an gelöstem organischen Kohlenstoff in die Anlage 2 aufgenommen.

Negative Entwicklungen der Nährstoffsituation sind demnach in keinem der Tagebauseen zu erkennen. Das Institut für Wasserwirtschaft ordnet die drei Tagebauseen während der vergangenen Jahrzehnte kontinuierlich als stabile mesotrophe Gewässer ein. Anzeichen für eine Eutrophierung seien in keinem der Seen festzustellen.

Die Nitratgehalte der Seen liegen in einem niedrigen Konzentrationsbereich mit maximalen Werten um 3 mg/l. Der oberflächennahe Grundwasserzstrom (D45, M4) zeigt dagegen deutlich höhere Nitratgehalte im Konzentrationsbereich von etwa 5 - 20 mg/l, jedoch mit rückläufigem Trend. Im Grundwasserabstrom (D42, D43, D44) sind als Folge der biologischen Aktivität (Denitrifikation) signifikant geringere Nitratkonzentrationen zu verzeichnen.

Umgerechnet auf nitratgebundenen Stickstoff (NO<sub>3</sub>-N, Faktor 0,226) liegen die Konzentrationen in den Seen deutlich unter 1 mg/l und somit bezüglich NO<sub>3</sub>-N in der Gewässergüteklasse I für Standgewässer nach UBA (2003).

Der für die Trophieklassifikation relevante Phosphorgehalt (analysiert als Gesamt-P) wird seit 1998 fortlaufend bestimmt. In der Zeit davor wurden unterschiedliche Phosphatbestimmungen vorgenommen, die teilweise nicht umgerechnet werden können. Seit 1998 liegt der Gesamt-P-Gehalt in den Seen sehr häufig unter der Bestimmungsgrenze von 10 µg/l, sonst zwischen 10 und 30 µg/l, einmalig (vermutlich Ausreißer) bei 80 µg/l.

Phosphor als Phosphat (bzw. ortho-Phosphat) wird in der Grundwassermessstelle des Anstroms von Haltern West in vergleichsweise hohen Konzentrationen in der Größenordnung von bis zu 1 mg/l festgestellt. Dieser Wert ist für normale nicht anthropogen beeinflusste Grundwässer ungewöhnlich, insbesondere vor dem Hintergrund der überwiegend forstlichen Geländedenutzung im Anstrom.

Während die Seen im Verlauf der bisherigen Untersuchungen vergleichsweise niedrige DOC-Gehalte (gesamt gelöster organischer Kohlenstoff) zwischen 2 und 5 mg/l aufweisen, sind im oberflächennahen Grundwasseranstrom sehr hohe DOC Konzentrationen dokumentiert (10 – 20 mg/l). Diese sind für die Lagerstätte typisch und geogen bedingt (Huminstoffe). Der Grundwasserabstrom zeigt über den gesamten bisherigen Beobachtungszeitraum hinweg eine Abnahme des DOC - Gehaltes gegenüber den Seen um etwa die Hälfte auf im Mittel 2 mg/l.

Die Sedimentuntersuchungen aller Seen zeigen nach den Untersuchungsberichten seit Ende der 1980er Jahre eine unauffällige Beschaffenheit ohne Anzeichen für anaerobe Verhältnisse im Sediment. Die Sedimentproben zeigen geringe Gehalte an organischer Substanz (TOC, Glühverlust) bei gleichzeitig braunen Farbtönen und negativen Geruchsproben auf Schwefelwasserstoff. Bis Ende der 1980er Jahre waren im See Haltern West mehrfach Anzeichen auf zumindest temporär anaerobe Verhältnisse festgestellt worden.

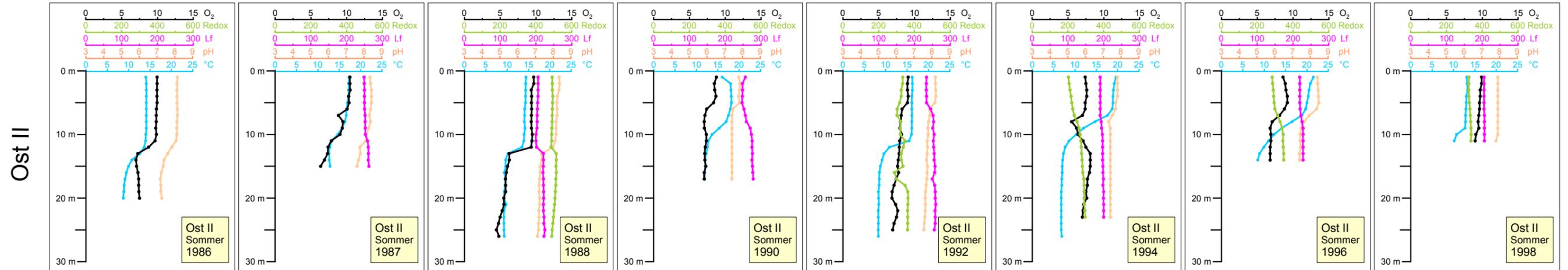
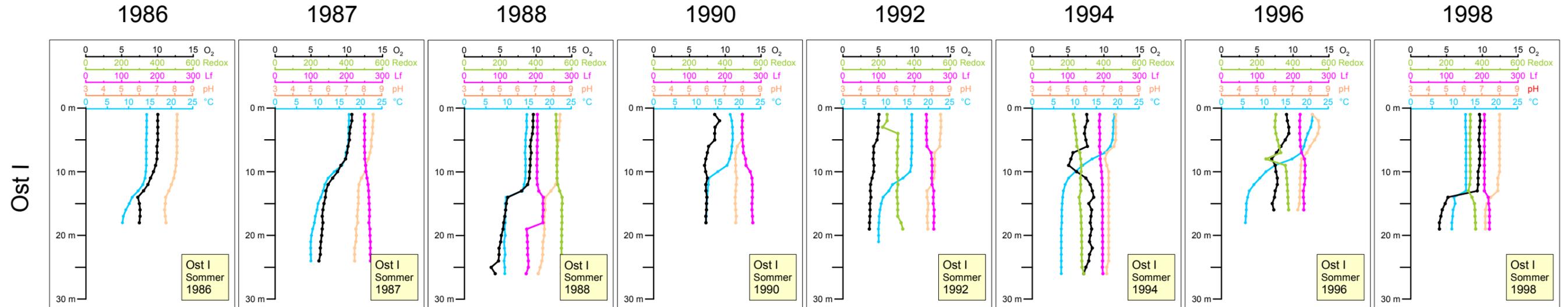
#### **4 Bakteriologische Verhältnisse**

Nach den Untersuchungsberichten des Instituts für Wasserwirtschaft zeigen die Tagebauseen über die Jahre insgesamt unauffällige bakteriologische Verhältnisse. Einzelne auffällige Befunde einschließlich *E. coli*-Bakterien sind der intensiven Badenutzung geschuldet. Sie lagen aber nie oberhalb der Werte einschlägiger Vorschriften für Badegewässer. Im Grundwasserabstrom der Seen in keiner Untersuchung auffällige Befunde zu verzeichnen.

Aachen, April 2016

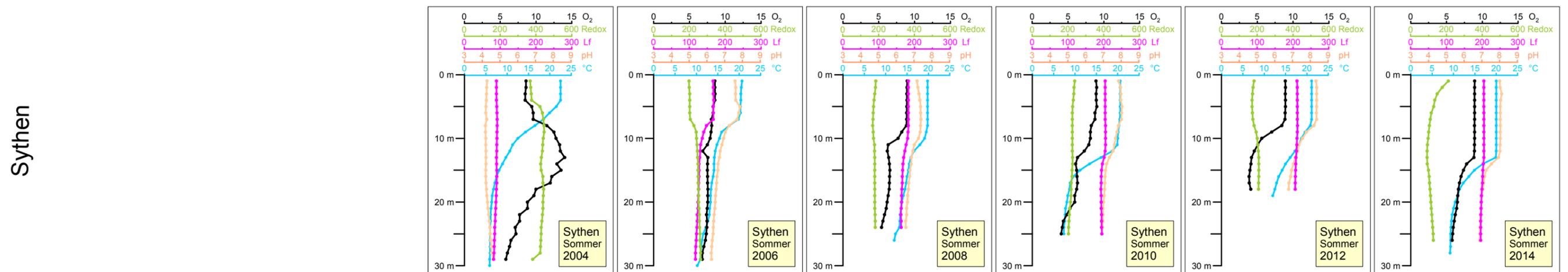
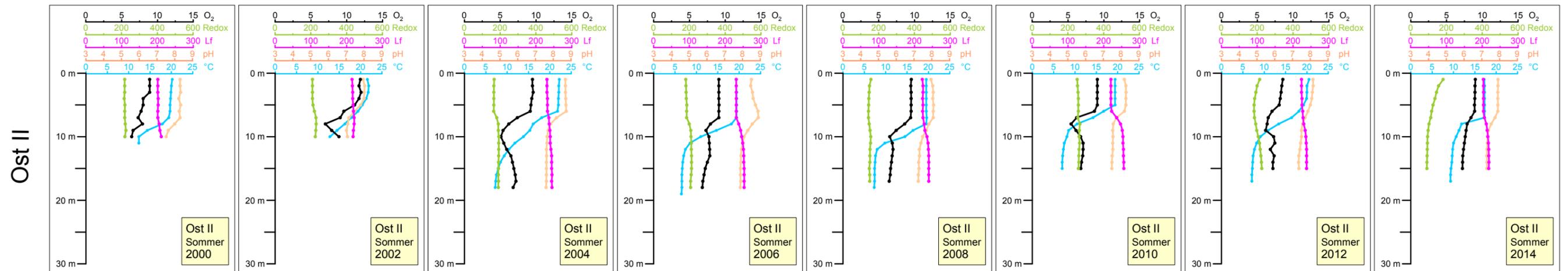
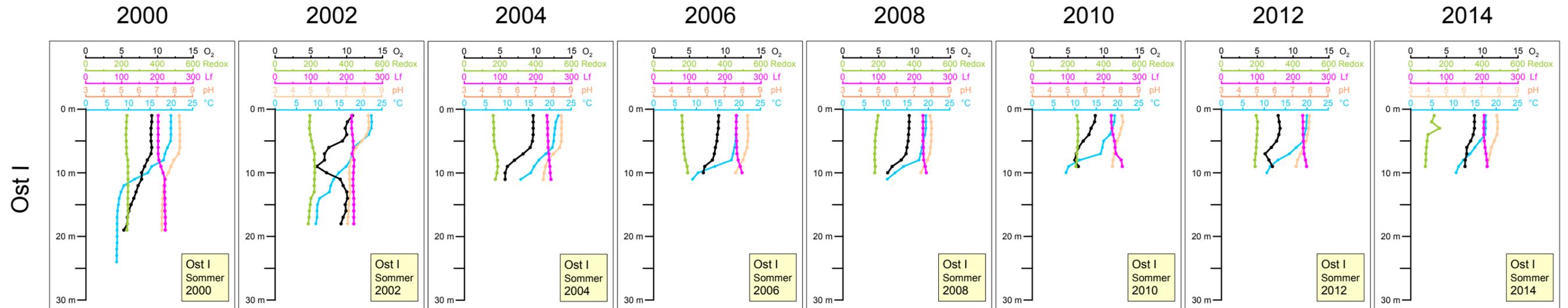


Dipl. Geol. M. Himml



Sythen

O <sub>2</sub>	Sauerstoffgehalt [mg/l]
Redox	Redoxpotential [mV]
Lf	Leitfähigkeit [μS/cm]
pH	pH-Wert [-]
°C	Temperatur [°C]



O<sub>2</sub> Sauerstoffgehalt [mg/l]  
 Redox Redoxpotential [mV]  
 Lf Leitfähigkeit [μS/cm]  
 pH pH-Wert [-]  
 °C Temperatur [°C]

1986

1987

1988

1990

1992

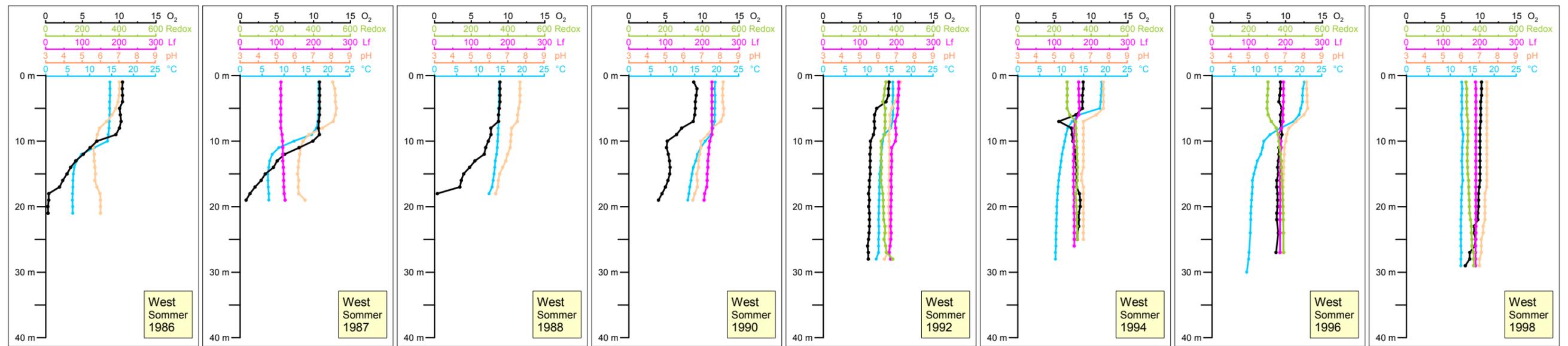
1994

1996

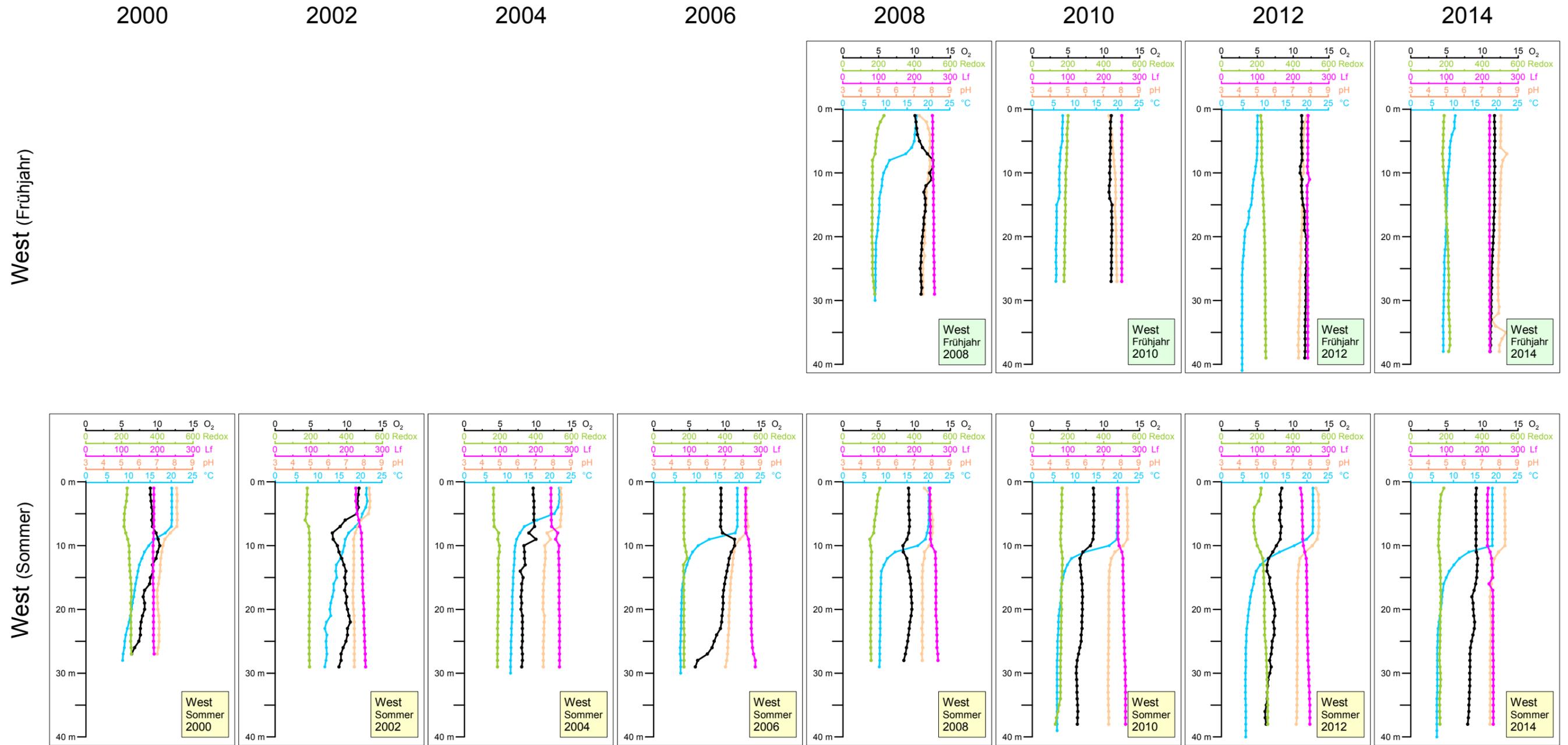
1998

West (Frühjahr)

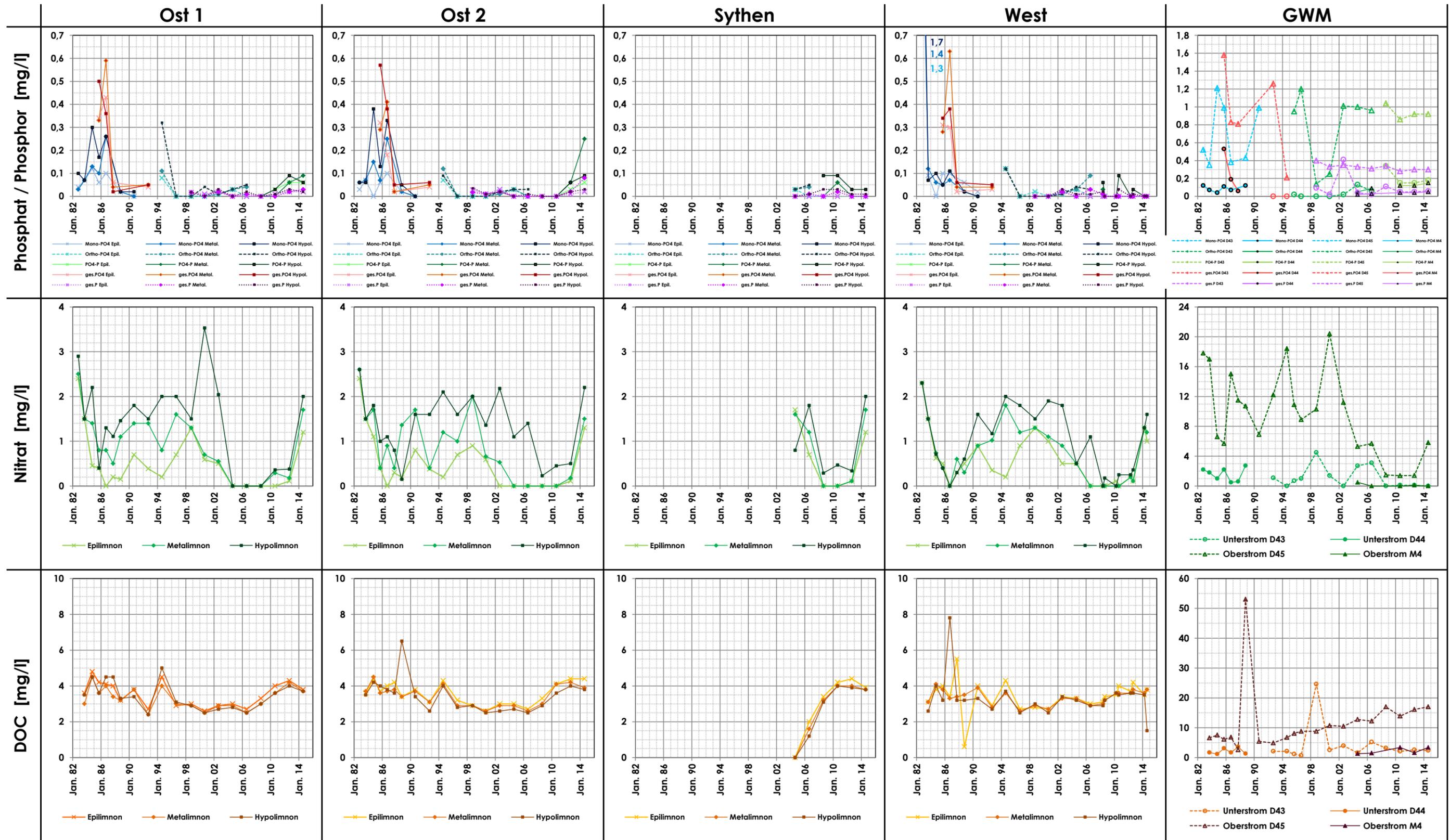
West (Sommer)



O <sub>2</sub>	Sauerstoffgehalt [mg/l]
Redox	Redoxpotential [mV]
Lf	Leitfähigkeit [μS/cm]
pH	pH-Wert [-]
°C	Temperatur [°C]



O <sub>2</sub>	Sauerstoffgehalt [mg/l]
Redox	Redoxpotential [mV]
Lf	Leitfähigkeit [μS/cm]
pH	pH-Wert [-]
°C	Temperatur [°C]



Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>

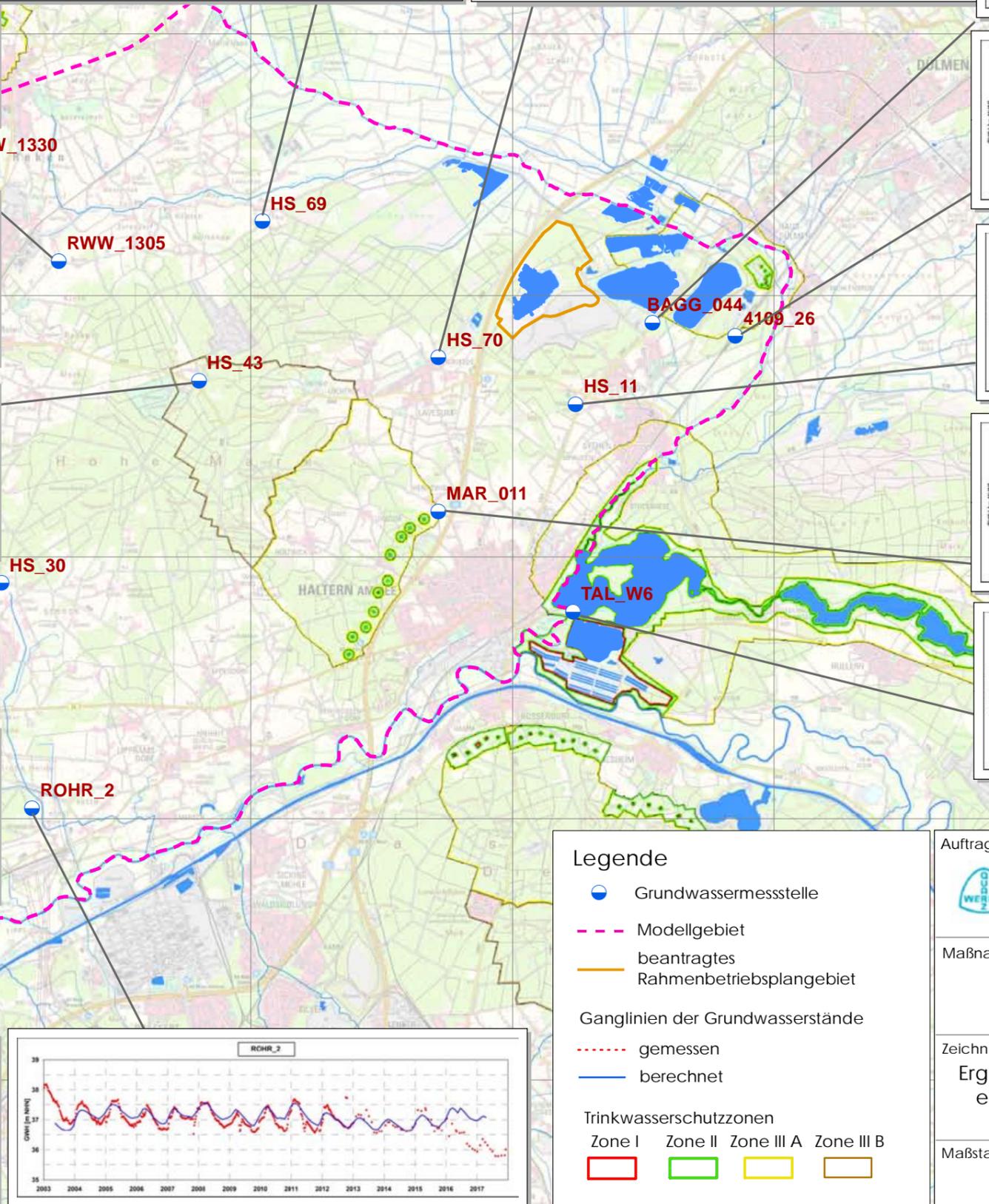
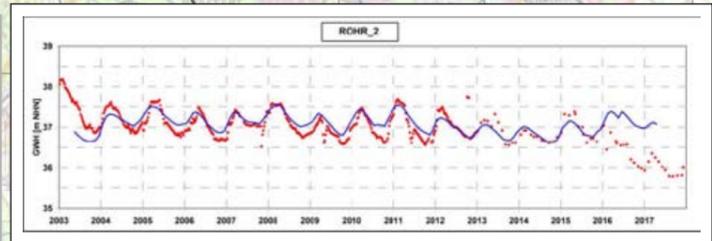
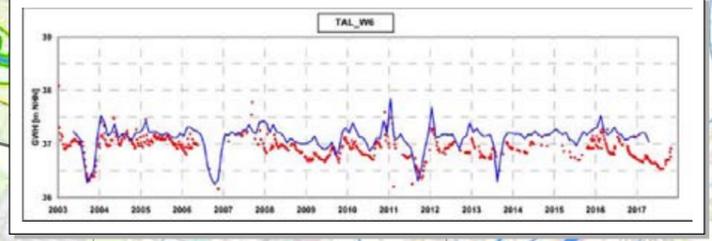
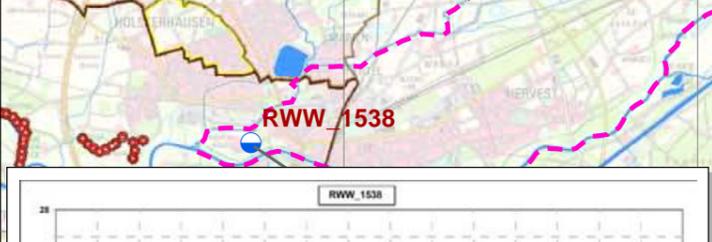
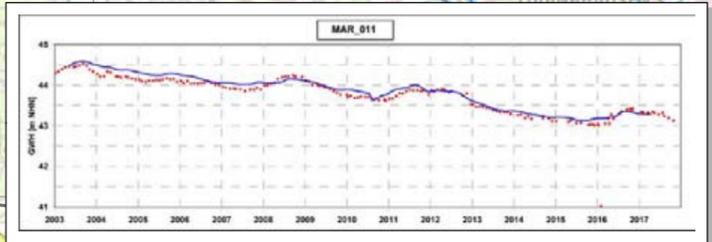
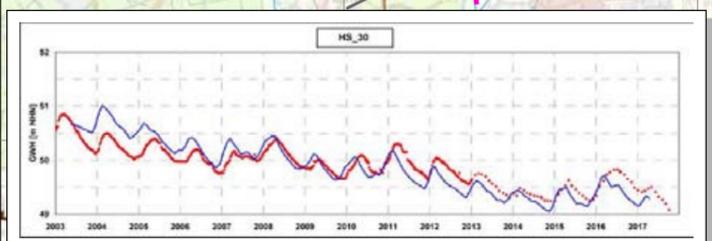
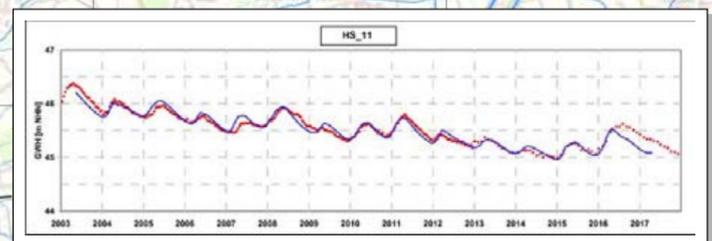
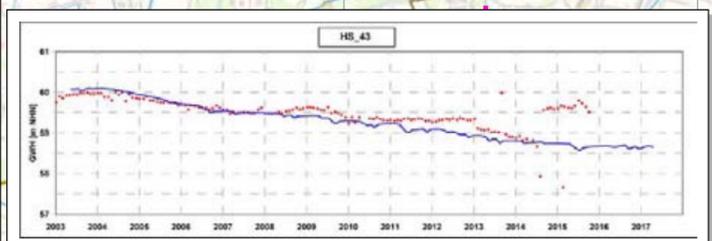
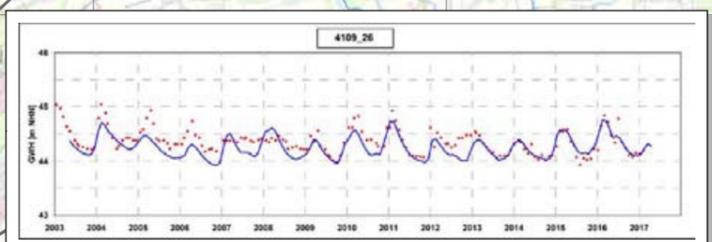
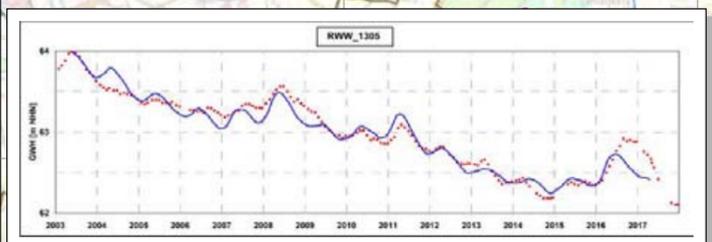
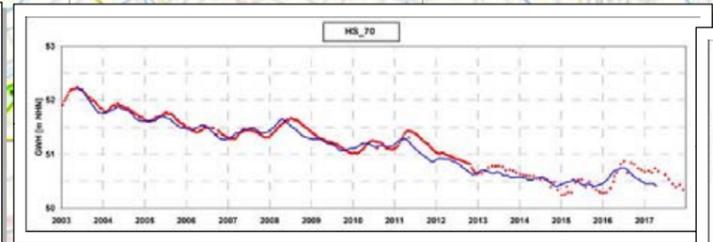
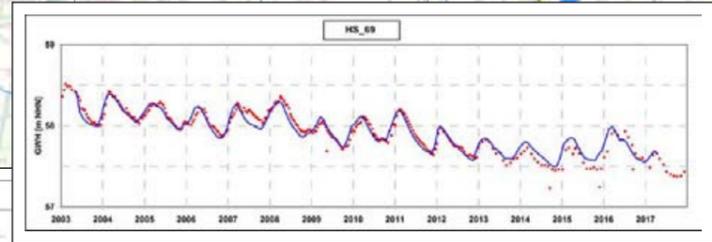
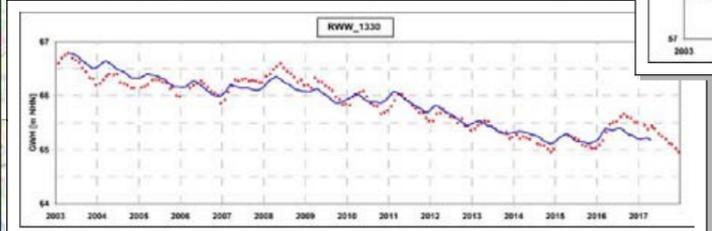
5745000

5740000

5735000

5730000

5725000



**Legende**

- Grundwassermessstelle
- - - Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- Ganglinien der Grundwasserstände
  - ..... gemessen
  - berechnet
- Trinkwasserschutzzonen
  - Zone I
  - Zone II
  - Zone III A
  - Zone III B

Auftraggeber:  
 Quarzwerke GmbH

Maßnahme:  
 Hydrogeologischer Fachbeitrag zum Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen der Quarzwerke GmbH

Zeichnungstitel:  
 Ergebnisse der Modellkalibrierung: exemplarische Ganglinien der Grundwasserstände

Bearbeiter:  
 MH/MR/RZ

Projekt-Nr.:  
 W16018-2-1727

Maßstab:  
 1 : 100.000

Datum:  
 3.4.2019

Anlage:  
 1

**GEOBIT**  
 INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH  
 FRANKENBERGER STRASSE 30  
 D - 5 2 0 6 6 A A C H E N

360000

365000

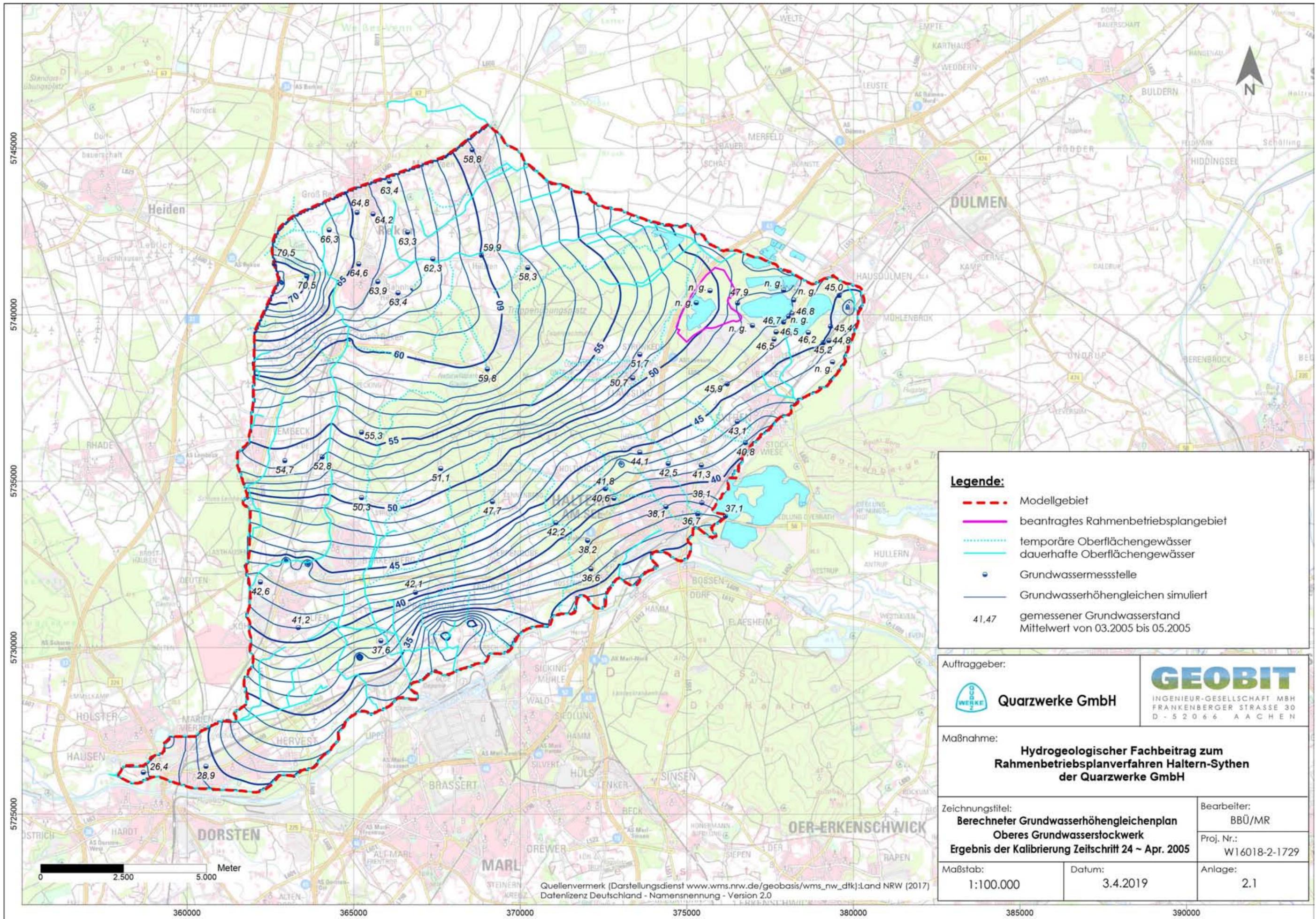
370000

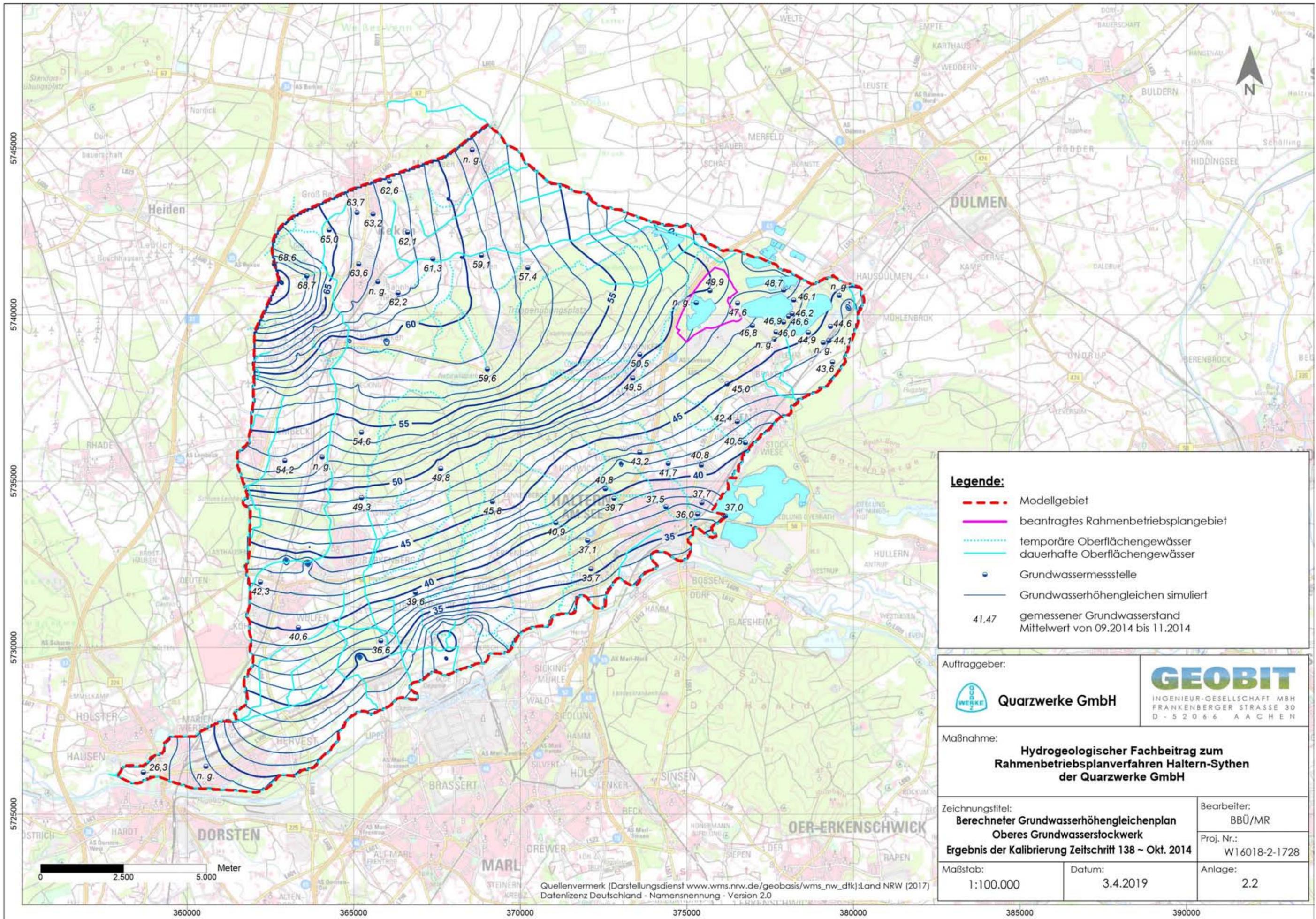
375000

380000

385000

390000





**Legende:**

- - - Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- ⋯ temporäre Oberflächengewässer
- dauerhafte Oberflächengewässer
- Grundwassermessstelle
- Grundwasserhöhengleichen simuliert
- 41.47 gemessener Grundwasserstand Mittelwert von 09.2014 bis 11.2014

Auftraggeber:

**Quarzwerke GmbH**

**GEOBIT**  
INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH  
FRANKENBERGER STRASSE 30  
D - 52066 AACHEN

Maßnahme:

**Hydrogeologischer Fachbeitrag zum  
Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen  
der Quarzwerke GmbH**

Zeichnungstitel:

**Berechneter Grundwasserhöhengleichenplan  
Oberes Grundwasserstockwerk  
Ergebnis der Kalibrierung Zeitschritt 138 ~ Okt. 2014**

Bearbeiter:

BBÜ/MR

Proj. Nr.:

W16018-2-1728

Maßstab:

1:100.000

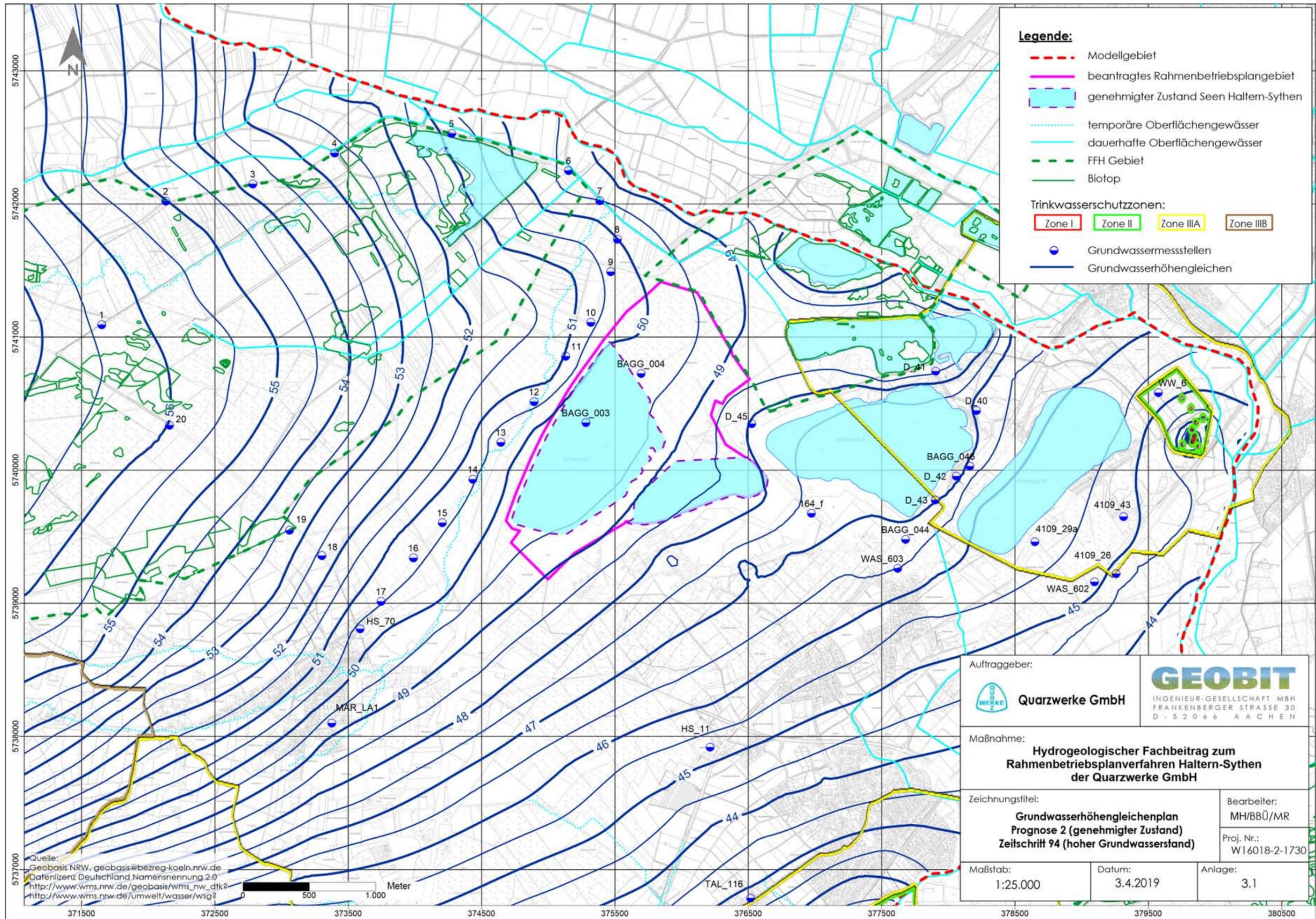
Datum:

3.4.2019

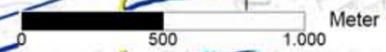
Anlage:

2.2

Quellenvermerk (Darstellungsdienst [www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk)): Land NRW (2017)  
Datenlizenz Deutschland - Namensnennung - Version 2.0



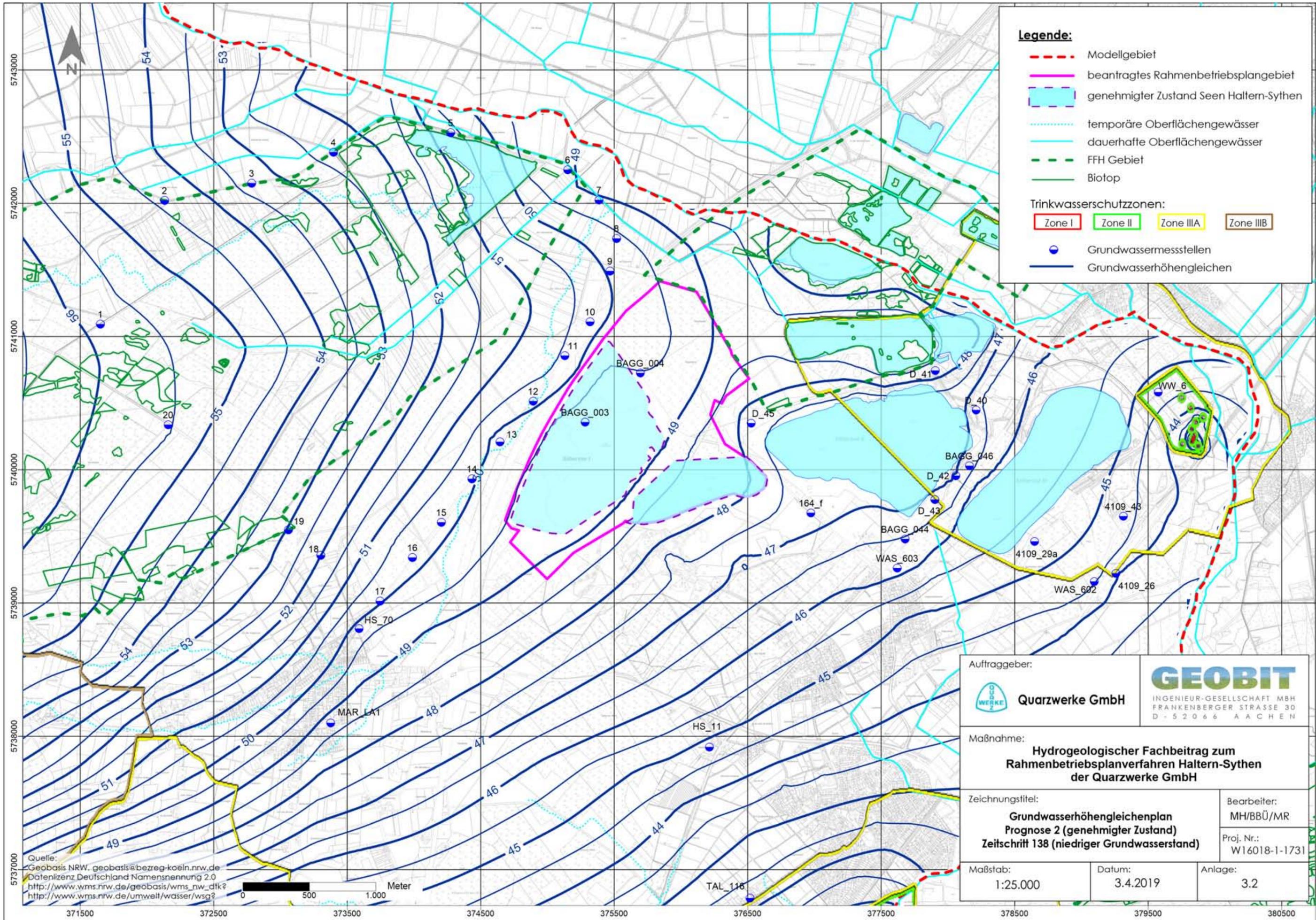
Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>



Auftraggeber:  <b>Quarzwerke GmbH</b>		 INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH FRANKENBERGER STRASSE 30 D - 5 2 0 6 6 A A C H E N	
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum          Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen          der Quarzwerke GmbH</b>			
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhengleichenplan          Prognose 2 (genehmigter Zustand)          Zeitschnitt 94 (hoher Grundwasserstand)</b>		Bearbeiter: MH/BBÜ/MR Proj. Nr.: W16018-2-1730	
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019	Anlage: 3.1	

371500 372500 373500 374500 375500 376500 377500 378500 379500 380500

5737000 5738000 5739000 5740000 5741000 5742000 5743000



**Legende:**

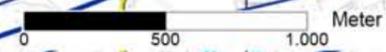
- - - Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- genehmigter Zustand Seen Haltern-Sythen
- ⋯ temporäre Oberflächengewässer
- dauerhafte Oberflächengewässer
- - - FFH Gebiet
- Biotop

Trinkwasserschutzonen:

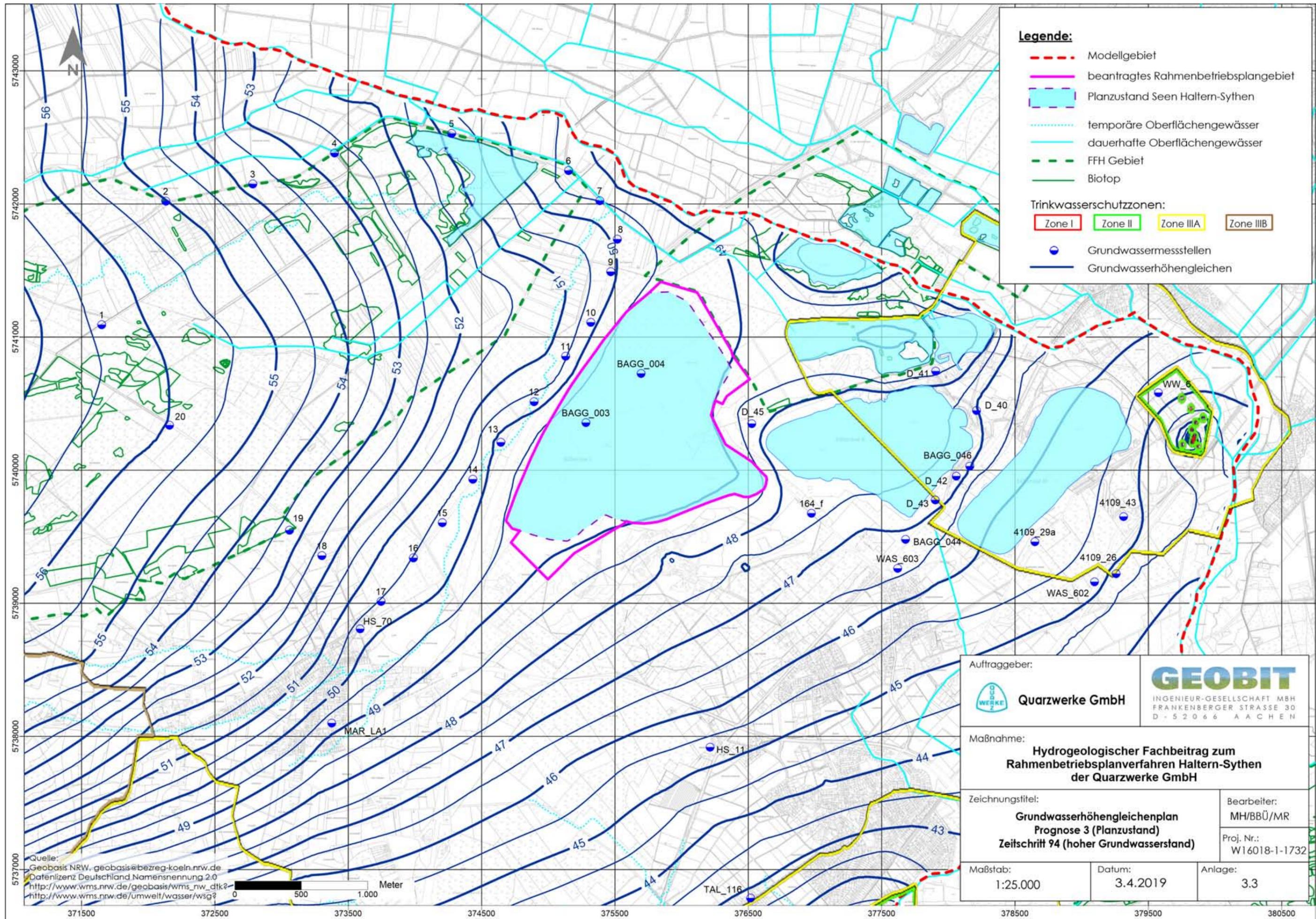
Zone I	Zone II	Zone IIIA	Zone IIIB
--------	---------	-----------	-----------

- Grundwassermessstellen
- Grundwasserhöhengleichen

Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>



Auftraggeber: <b>Quarzwerke GmbH</b>		<b>GEOBIT</b> <small>INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH          FRANKENBERGER STRASSE 30          D - 5 2 0 6 6 A A C H E N</small>
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum          Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen          der Quarzwerke GmbH</b>		
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhengleichenplan          Prognose 2 (genehmigter Zustand)          Zeitschrift 138 (niedriger Grundwasserstand)</b>		Bearbeiter: MH/BBÜ/MR Proj. Nr.: W16018-1-1731
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019	Anlage: 3.2



**Legende:**

- - - Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- Planzustand Seen Haltern-Sythen
- - - temporäre Oberflächengewässer
- dauerhafte Oberflächengewässer
- - - FFH Gebiet
- Biotop

Trinkwasserschutzonen:

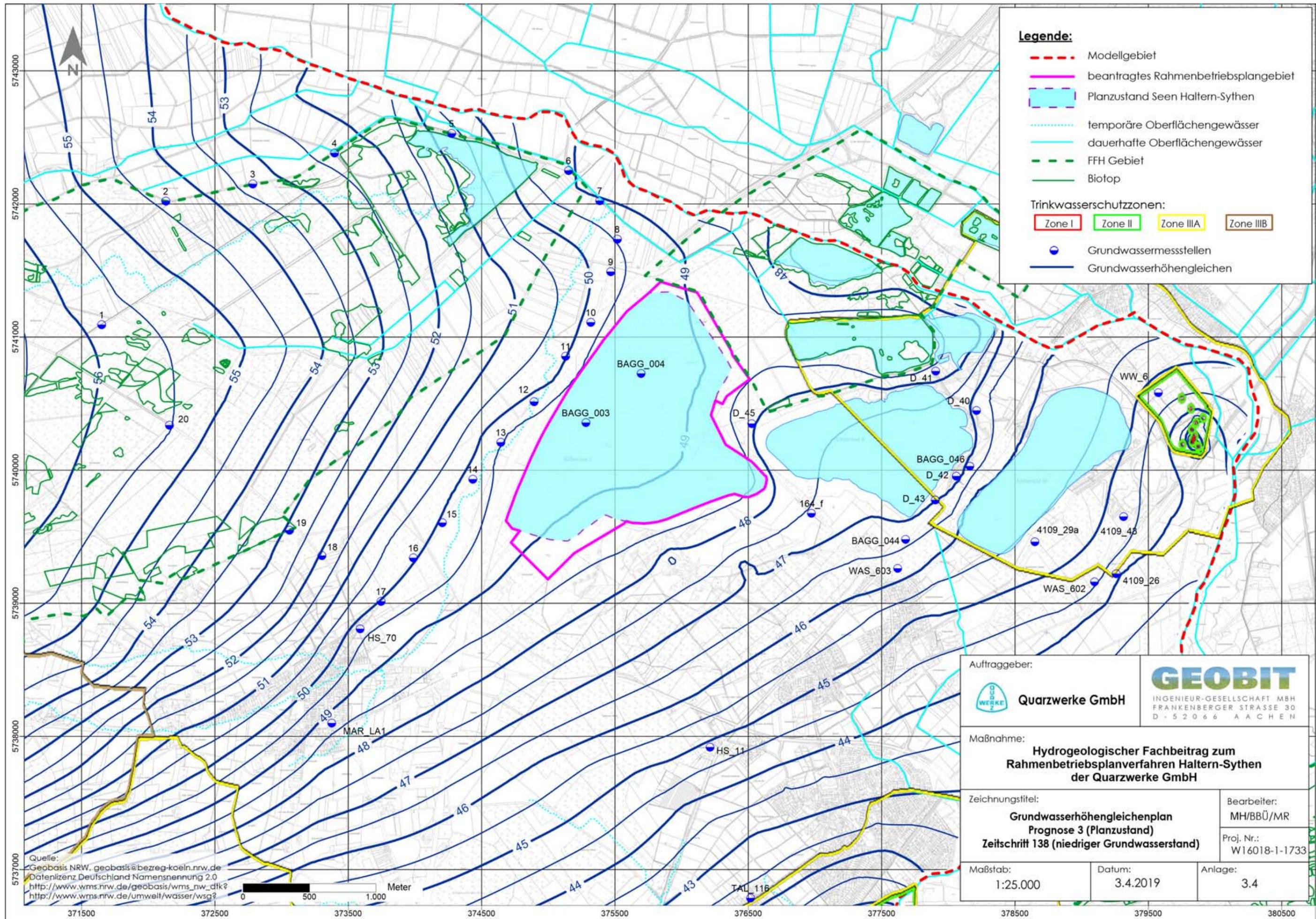
<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">Zone I</span>	<span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">Zone II</span>	<span style="border: 1px solid yellow; padding: 2px;">Zone IIIA</span>	<span style="border: 1px solid orange; padding: 2px;">Zone IIIB</span>
--	---	--	--

- Grundwassermessstellen
- Grundwasserhöhengleichen

Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>

0 500 1.000 Meter

Auftraggeber:  <b>Quarzwerke GmbH</b>	 INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH FRANKENBERGER STRASSE 30 D - 5 2 0 6 6 A A C H E N
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum          Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen          der Quarzwerke GmbH</b>	
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhengleichenplan          Prognose 3 (Planzustand)          Zeitschnitt 94 (hoher Grundwasserstand)</b>	Bearbeiter: MH/BBÜ/MR Proj. Nr.: W16018-1-1732
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019
Anlage: 3.3	



**Legende:**

- - - Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- Planzustand Seen Haltern-Sythen
- ⋯ temporäre Oberflächengewässer
- dauerhafte Oberflächengewässer
- - - FFH Gebiet
- Biotop

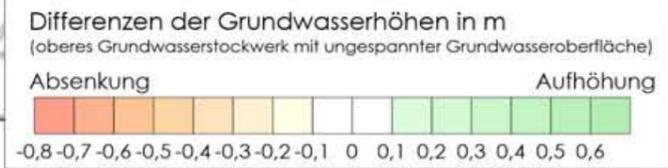
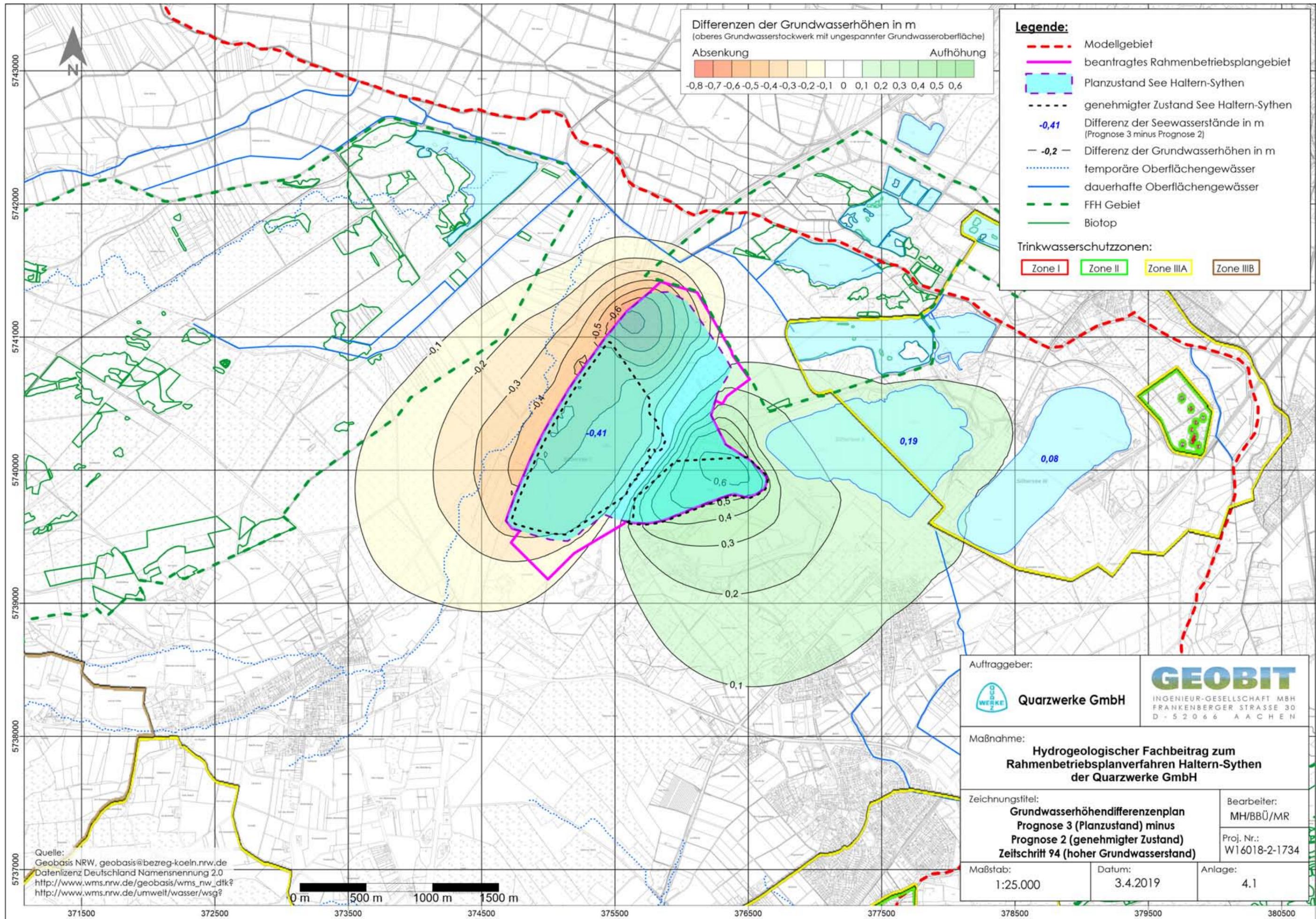
Trinkwasserschutzonen:

Zone I	Zone II	Zone IIIA	Zone IIIB

- Grundwassermessstellen
- Grundwasserhöhengleichen

Auftraggeber: <b>Quarzwerke GmbH</b>		<b>GEOBIT</b> <small>INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH FRANKENBERGER STRASSE 30 D - 52066 AACHEN</small>	
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen der Quarzwerke GmbH</b>			
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhengleichenplan Prognose 3 (Planzustand) Zeitschrift 138 (niedriger Grundwasserstand)</b>		Bearbeiter: MH/BBÜ/MR Proj. Nr.: W16018-1-1733	
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019	Anlage: 3.4	

Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>



**Legende:**

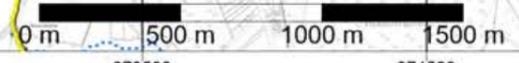
- - - Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- Planzustand See Haltern-Sythen
- - - genehmigter Zustand See Haltern-Sythen
- 0,41 Differenz der Seewasserstände in m (Prognose 3 minus Prognose 2)
- 0,2 Differenz der Grundwasserhöhen in m
- ⋯ temporäre Oberflächengewässer
- dauerhafte Oberflächengewässer
- - - FFH Gebiet
- Biotop

Trinkwasserschutzzonen:

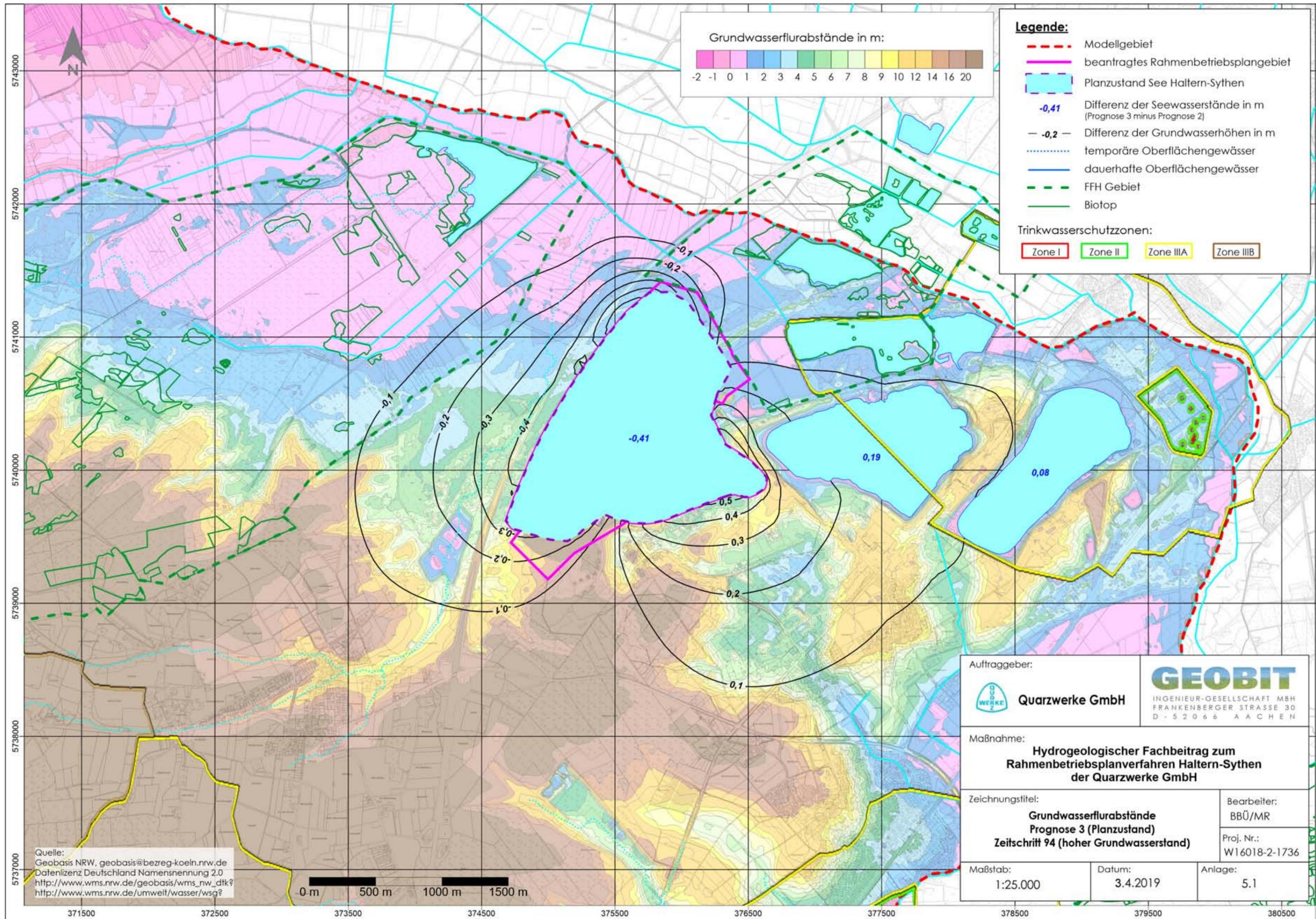
Zone I Zone II Zone IIIA Zone IIIB

Auftraggeber: <b>Quarzwerke GmbH</b>		<b>GEOBIT</b> <small>INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH FRANKENBERGER STRASSE 30 D - 52066 AACHEN</small>	
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen der Quarzwerke GmbH</b>			
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhendifferenzenplan Prognose 3 (Planzustand) minus Prognose 2 (genehmigter Zustand) Zeitschnitt 94 (hoher Grundwasserstand)</b>		Bearbeiter: MH/BBÜ/MR Proj. Nr.: W16018-2-1734	
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019	Anlage: 4.1	

Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>







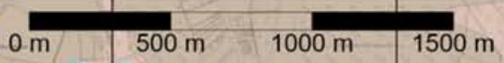
**Legende:**

- Modellgebiet
- beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
- Planzustand See Haltern-Sythen
- 0,41- Differenz der Seewasserstände in m (Prognose 3 minus Prognose 2)
- 0,2- Differenz der Grundwasserhöhen in m
- ... temporäre Oberflächengewässer
- dauerhafte Oberflächengewässer
- FFH Gebiet
- Biotop

Trinkwasserschutzzonen:

Zone I	Zone II	Zone IIIA	Zone IIIB
--------	---------	-----------	-----------

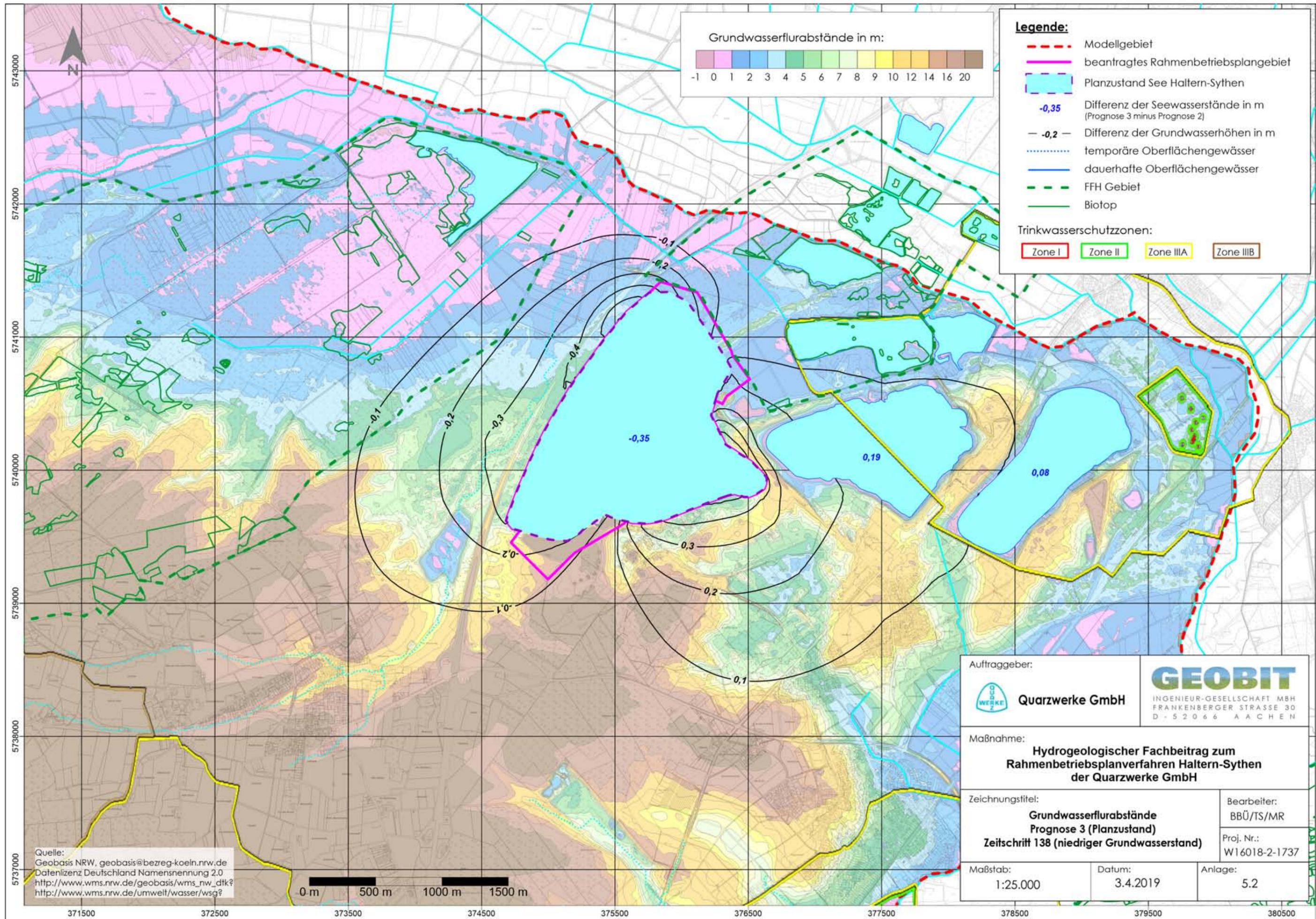
Quelle:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>

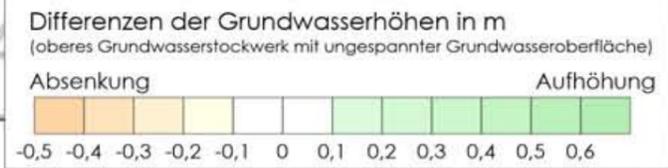
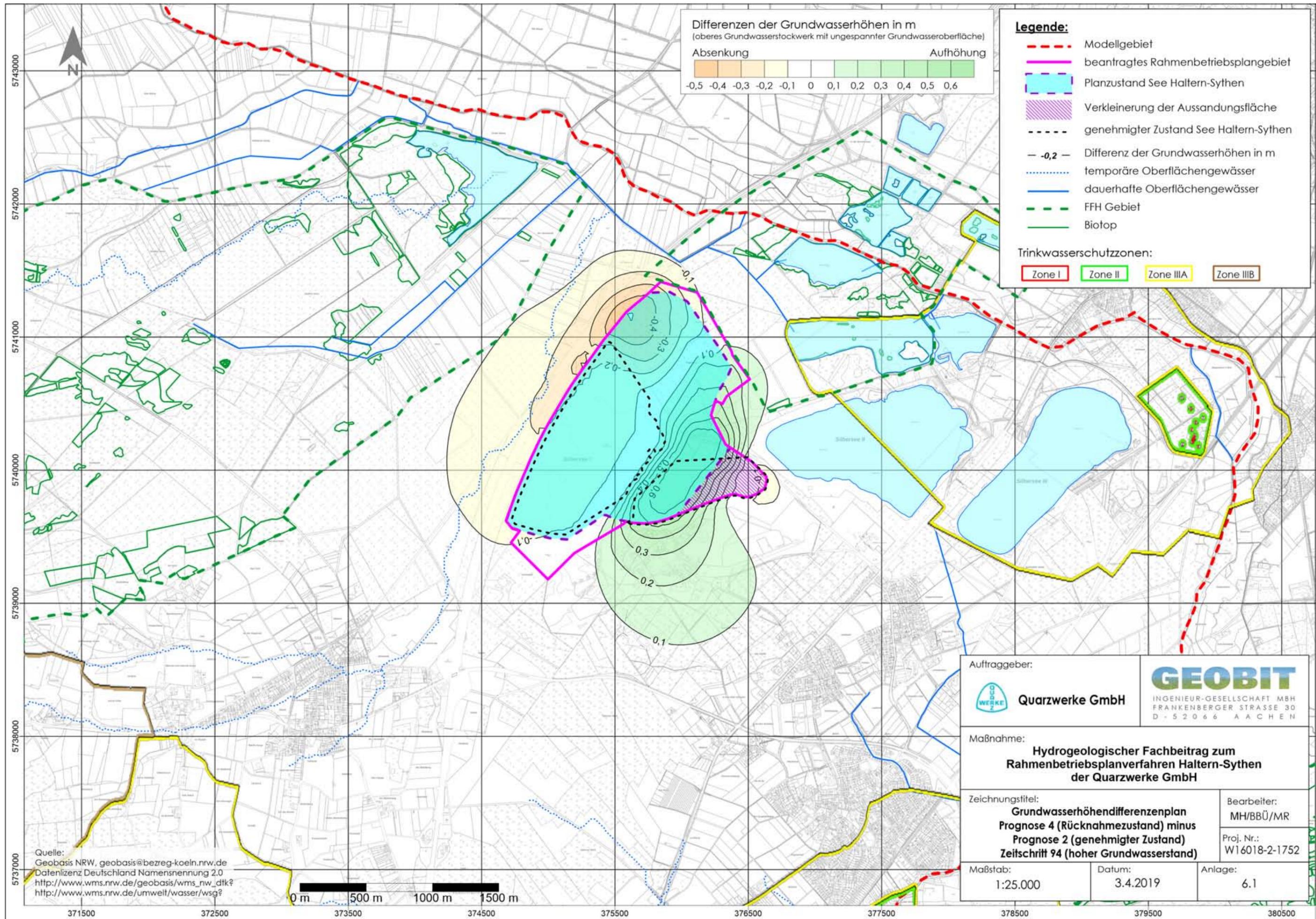


Auftraggeber:  <b>Quarzwerke GmbH</b>		 INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH FRANKENBERGER STRASSE 30 D - 52066 AACHEN
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum          Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen          der Quarzwerke GmbH</b>		
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserflurabstände          Prognose 3 (Planzustand)          Zeitschritt 94 (hoher Grundwasserstand)</b>		Bearbeiter: BBÜ/MR Proj. Nr.: W16018-2-1736
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019	Anlage: 5.1

5743000 5742000 5741000 5740000 5739000 5738000 5737000

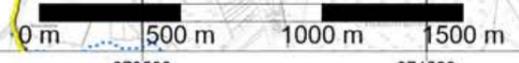
371500 372500 373500 374500 375500 376500 377500 378500 379500 380500





- Legende:**
- - - Modellgebiet
  - beantragtes Rahmenbetriebsplangebiet
  - Planzustand See Haltern-Sythen
  - Verkleinerung der Aussandungsfläche
  - - - genehmigter Zustand See Haltern-Sythen
  - - - -0,2 - Differenz der Grundwasserhöhen in m
  - - - temporäre Oberflächengewässer
  - dauerhafte Oberflächengewässer
  - - - FFH Gebiet
  - Biotop
- Trinkwasserschutzzonen:
- |        |         |           |           |
|--------|---------|-----------|-----------|
| Zone I | Zone II | Zone IIIA | Zone IIIB |
|--------|---------|-----------|-----------|

Quelle:  
Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de  
Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)  
<http://www.wms.nrw.de/umwelt/wasser/wsg?>



Auftraggeber: <b>Quarzwerke GmbH</b>		<b>GEOBIT</b> <small>INGENIEUR-GESELLSCHAFT MBH FRANKENBERGER STRASSE 30 D - 52066 AACHEN</small>	
Maßnahme: <b>Hydrogeologischer Fachbeitrag zum Rahmenbetriebsplanverfahren Haltern-Sythen der Quarzwerke GmbH</b>			
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhendifferenzenplan Prognose 4 (Rücknahmestand) minus Prognose 2 (genehmigter Zustand) Zeitschnitt 94 (hoher Grundwasserstand)</b>		Bearbeiter: MH/BBÜ/MR  Proj. Nr.: W16018-2-1752	
Maßstab: 1:25.000	Datum: 3.4.2019	Anlage: 6.1	

5743000 5742000 5741000 5740000 5739000 5738000 5737000

371500 372500 373500 374500 375500 376500 377500 378500 379500 380500

