

Bericht

zur Erstellung
eines numerischen
Grundwasserströmungsmodells

im Rahmen des Projektes
„Ausbau B3 – Südschnellweg“

der Niedersächsischen Landesbehörde für
Straßenbau und Verkehr (NLStBV)

Impressum

Auftraggeber: Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr
(NLStBV)

Göttinger Chaussee 76 A

30453 Hannover

Auftragnehmer: GeoDienste GmbH,

Nienburger Str. 2, 31515 Wunstorf

Berichtsname: 0140161_modellbericht_stand_20190930.docx

Seitenzahl: 36

Abbildungen: 10

Tabellen: 5

Anhänge: 11

Anlagen: 4

CD-ROM:

Datum: 30.09.2019

Ausfertigung:

GeoDienste GmbH

Bearbeiter:



Dr. Axel Rogge, Dipl.-Geol. (GF)



Dr. Enrico Hamann, Dipl.-Geol.

Inhaltsverzeichnis

1. Veranlassung und Vorgehensweise	7
2. Verwendete Projektunterlagen und Datengrundlagen	8
3. Hydrogeologische Konzeptvorstellung	10
4. Grundwasserströmungsmodell	14
4.1. Verwendete Software	14
4.2. Modellparameter	15
4.2.1. Modellgrenzen, -randbedingungen und -diskretisierung	15
4.2.2. Materialparameter	18
4.2.3. Numerische Umsetzung des Tunnelbauwerkes	19
4.3. Kalibrierung	20
4.4. Validierung	28
4.5. Prognosen	32
4.5.1. Szenario 1 – Variante O3 mit kompletter Abdichtung des Grundwasserleiters über- und unterhalb des Tunnels	32
4.5.2. Szenario 2 - Variante O3 mit Unterströmung des Tunnels möglich	32
4.5.3. Szenario 3 - Variante O3 mit Unter- und Überströmung des Tunnels	33
5. Zusammenfassung	34
6. Literaturverzeichnis	36

Anhänge

- 1 Untersuchungsgebiet
- 2 Tiefenlage der Modellbasis
- 3 Mächtigkeit des Modell-Grundwasserkörpers
- 4.1 Modell-Schichtgrenzen Bauwerks-Nordseite
- 4.2 Modell-Schichtgrenzen Bauwerks-Südseite
- 5.1 Hydraulische Durchlässigkeit (Modellschicht 1)
- 5.2 Hydraulische Durchlässigkeit (Modellschicht 2)
- 5.3 Hydraulische Durchlässigkeit (Modellschicht 3)
- 6 Kalibrierszenario – Vergleich gemessener und modellierter Grundwasserhöhen
- 7 Validierszenario – Vergleich gemessener und modellierter Grundwasserhöhen
- 8 Prognoseszenario Tunnel-Variante O3, Vollabspernung - Grundwasseraufstau und -sunk
- 9 Prognoseszenario Tunnel-Variante O3, Teilabspernung (Unterströmung) - Grundwasseraufstau und -sunk
- 10 Prognoseszenario Tunnel-Variante O3, Teilabspernung (Unter- und Überströmung) - Grundwasseraufstau und -sunk
- 11 Prognoseszenario Tunnel-Variante O3, Teilabspernung (Unter- und Überströmung) - Sensitivitätsstudie Grundwasseraufstau und -sunk, ungünstigster Fall

Anlagen

- 1 Lage der Grundwasserentnahmen im Untersuchungsgebiet
- 2 Zusammenfassung der „Fachlichen Hinweise des Gewässerkundlichen Landesdienstes (GLD) zum Zwischenbericht zur Erstellung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells im Rahmen des Projekts „Ausbau B3 – Südschnellweg“ der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (NLStBV)“ vom 18.01.2017 und Umsetzung im Modell bzw. im Modellbericht
- 3 Bohrprofile von Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet
- 4 GeoDienste GmbH (2017): Bericht zur Festlegung des bemessungsrelevanten Grundwasserstandes im Rahmen des Projektes „Ausbau B3 – Südschnellweg“. NLStBV, 22.08.2017

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Grundwasserentnahmen im Umfeld des Bauvorhabens [9][10]. Lageplan siehe Anlage 1	16
Tab. 2	Grundwassermessstellen mit gemessenen (Mittelwerte aus 1999 - 2016) und modellierten Grundwasserständen	21
Tab. 3	Zusammenstellung der im Rahmen der automatischen Kalibrierung verwendeten Eingangs-kf-Spanne, der ermittelten kf-Werte und der Sensitivitätsparameter. Die Werte für die Sensitivität sowie die Spanne des Konfidenzintervalls liefern Hinweise für den Einfluss des kf-Wertes auf das Kalibrierergebnis (Doherty, 2000). Je höher die Sensitivität und je geringer das Konfidenzintervall, desto größer der Einfluss des kf-Wertes auf das Kalibrierergebnis. Die sensitiven Zonen, die im Aussagegebiet liegen, sind rot, insensitive Zonen im Aussagegebiet sind blau gekennzeichnet.	22
Tab. 4	Vergleich der gemessenen und berechneten Abflusspende in dem das Aussagegebiet einschließenden Einzugsgebiet von Leine, Ihme und Seniebach.	27
Tab. 5	Grundwassermessstellen mit gemessenen (Stichtag April 2008) und modellierten Grundwasserständen	29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Geologische Profile aus einer Baugrunderkundung [1] mit Lageplan der Bohrungen. Weitere Bohrungen siehe Anlage 3.	11
Abb. 2	Hydrogeologisches Konzept im Untersuchungsgebiet (schwarze Linie) mit Spezifizierung des Modellrandes (rote Linie) basierend auf der Ausdehnung des Lockergesteins-Grundwasserleiters (graue Bereiche - Festgestein) und des Grundwasserfließgeschehens (violette Linien - mittlere hydrologische Verhältnisse repräsentierende Grundwasserisohypsen, violette Pfeile - Grundwasserfließrichtung) und definierter Randbedingungen sowie vermutete Auswirkungen eines Tunnels/Troges auf den Grundwasserstand im Aussagegebiet (Bereich B3, Südschnellweg) als Folge einer Barrierewirkung. Kartengrundlagen: AK5 Farbe, LGLN Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und katasterverwaltung; © 2016; HÜK200, Lage der Grundwasseroberfläche, LBEG [13].	13

Abb. 3	Darstellung des Modellgitters lateral (oben) und vertikal (unten). Inaktive Modellzellen sind in grau dargestellt. Kartengrundlage: DTK 25 Grau; LGLN; Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und katasterverwaltung; © 2014	18
Abb. 4	Querschnitt durch ein Tunnelbauwerk zur Verdeutlichung der numerischen Umsetzung des Tunnelbauwerkes. Die weißen Rechtecke entsprechen den einzelnen Modellzellen. Das Tunnelbauwerk ist hier mit einem Kasten als Tunnel sowie seitlichen Schlitzwänden in blau dargestellt, das Tunnelbauwerk in der numerischen Umsetzung ist grau dargestellt. Die Verschiebung der Schichtgrenzen entsprechend der Bauwerksober- und unterkante ist durch Pfeile gekennzeichnet.	20
Abb. 5	Vergleich gemessener und im Modell berechneter Grundwasserhöhen im Untersuchungsgebiet im Ergebnis der Kalibrierung und der Unsicherheitsstudie.....	23
Abb. 6	Wasserbilanz im gesamten Modell für das Kalibrierszenario	24
Abb. 7	Wasserbilanz des Maschsees im Modell für das Kalibrierszenario	25
Abb. 8	Abgegrenztes Einzugsgebiet basierend auf den zur Kalibrierung verwendeten Grundwasserhöhen zur Ermittlung der berechneten Abflusssspende	26
Abb. 9	Vergleich der langjährigen mittleren Klimabilanz mit der Klimabilanz im Bilanzjahr 2007/08 am Standort Langenhagen. Messwerte vom DWD. Die Zahlen stellen die monatliche Abweichung der Klimabilanz vom langjährigen Mittel in Prozent im Neubildungsrelevanten Zeitraum Oktober - März dar. Die mittlere monatliche Abweichung beträgt 17,4 %.	30
Abb. 10	Vergleich gemessener und im Modell berechneter Grundwasserhöhen im Untersuchungsgebiet im Ergebnis der Validierung.....	31

1. Veranlassung und Vorgehensweise

Die Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr Hannover (NLStBV) plant, den Abschnitt des Süd-Schnellwegs (B3, B6 und B65) zwischen dem Landwehrkreisel im Westen und der Unterführung der Bahntrasse der DB im Osten zu erneuern (siehe Anhang 1). Als bauliche Lösung zur Querung der Hildesheimer Straße kommen ein Brückenbauwerk, ein Tunnel oder ein Trogbauwerk unterschiedlicher Länge in Frage. Da ein Tunnel oder ein Trogbauwerk bis in den Grundwasserkörper reicht, kann durch die Querschnittverringern und die damit verbundene Wirkung als hydraulische Barriere ein Aufstau im Grundwasseranstrom und eine Absenkung im Abstrom nicht ausgeschlossen werden.

Um die Wirkung eines Tunnel- oder Trogbauwerkes auf den Grundwasserstand im Umfeld zu untersuchen, wurde die GeoDienste GmbH Garbsen damit beauftragt, ein numerisches Grundwasserströmungsmodell zu erstellen und darauf basierend die Wasserstandsänderungen im Vergleich zu den bestehenden Verhältnissen zu quantifizieren.

Dazu wurde ein hydrogeologisches Konzept des Untersuchungsgebietes erarbeitet und in ein numerisches Grundwasserströmungsmodell umgesetzt. Die Anpassung des numerischen Modells erfolgte durch Kalibrierung eines, mittlere Grundwasserverhältnisse präsentierenden Zustandes. Um die Prognosefähigkeit nachzuweisen, wurde eine Validierung basierend auf einem Zustand mittleren hohen Grundwasserstandes durchgeführt. Prognoserechnungen erfolgten für die Bauwerksgeometrie Variante O3 mit/ohne Unter- und Überströmung. In der Kalibrierung ermittelte Parametersensitivitäten wurden im Rahmen der Prognose auf ihre Auswirkungen auf Änderungen des Grundwasserstandes durch die Baumaßnahme überprüft.

2. Verwendete Projektunterlagen und Datengrundlagen

Für die Ausarbeitung dieses Berichtes standen uns folgende Unterlagen zur Verfügung:

- [1] Schnack Geotechnik Ingenieurgesellschaft (2015): B3 - Ausbau Südschnellweg / Hildesheimer Straße Hannover-Ricklingen / Hannover-Döhren, PGSO-TLHI/31270-A170757, Sachverständigenleistung Baugrund/Geotechnik im Rahmen des Ideenwettbewerbs - Ingenieurgeologischer Vorbericht -. NLStBV, Hannover.
- [2] Schnack Geotechnik Ingenieurgesellschaft (2017): B3 SSW Ausbau des Südschnellweges in Hannover von Betr.-km 0,000 (Landwehrkreisel) bis Betr.-km 3,900 (Überführung DB) Ingenieurgeologisches Streckengutachten. NLStBV, Hannover, 22.08.2017.
- [3] NIBIS® Kartenserver (2014): Geologie, Hydrogeologie, Bohrungen und Profilbohrungen. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover.
- [4] Hoffmann, S. & Kringel, R. (2008): Datenmanagement und dreidimensionales, hydrogeologisches und hydrochemisches Untergrundmodell (Hannover-Südstadt). Unveröfftl. BMBF Abschlussbericht Teilprojekt 2 im KORA TV3 Verbund: 419 S.; LBEG & BGR, Hannover.
- [5] NLfB (1997): Geologische Stadtkarte Hannover 1:25.000. Karte A Festgestein. Hannover.
- [6] NLfB (1996): Geologische Stadtkarte Hannover 1:25.000. Karte B Grundwasser. Hannover.
- [7] NLfB (1997): Geologische Stadtkarte Hannover 1:25.000. Karte C Geotechnik. Hannover.
- [8] LBEG (2016): Hydrogeologische Karte von Niedersachsen 1:50 000 - Grundwasserneubildung, Methode mGROWA.
- [9] Region Hannover (2016): Grundwasserentnahmen im Umfeld des Bauvorhabens. Email vom 08.07.2016 (Hr. Daners).
- [10] Region Hannover (2017): Reale Grundwasserentnahmen im Umfeld des Bauvorhabens. Email vom 05.04.2017 (Hr. Lieberum).
- [11] Landeshauptstadt Hannover (2016): Maschsee und Ricklinger Teich, Wasserstände und Zuleitungsmengen 2013 – 2015. Email vom 01.07.2016 (Hr. Jünemann).
- [12] LGLN (2016): DGM5 – Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung
- [13] NIBIS® Kartenserver (2017): Hydrogeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1 : 200 000 - Lage der Grundwasseroberfläche. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover.
- [14] NLStBV (2017): Bericht zur Festlegung des bemessungsrelevanten Grundwasserstandes im Rahmen des Projektes „Ausbau B3 – Südschnellweg“. GeoDienste GmbH, 22.08.2017

- [15] INGE B3 (2018): B3/Südschnellweg Hannover, Bau-km 0+037 - 3+855, Baugrubenpläne km 2+000 bis km 2+416, km 2+416 bis km 2+832, km 2+832 bis km 3+234 und km 3+234 bis km 3+646. Stand 24.07.2018.

3. Hydrogeologische Konzeptvorstellung

Entsprechend vorliegender Baugrundgutachten am Standort [1][2] und Bohrungsdaten des Landes Niedersachsen [3] kann im Untersuchungsgebiet in den oberflächennahen, quartären Lockergesteinen der Saale- und der Weichsel-Eiszeit ein zusammenhängender Grundwasserleiter angenommen werden, der nach unten durch die geringleitenden Ton-, Mergel- und Tonmergelsteine des Alb (Unterkreide) begrenzt wird. Infolge ausgeprägter quartärer Rinnenstrukturen, v.a. in NW-SE-Richtung sowie unmittelbar unterhalb der B65 im Bereich der geplanten Baumaßnahme in WSW-ENE-Richtung (Anhang 2), variiert die Mächtigkeit des Lockergesteins von ca. 2 bis 32 m (Anhang 3). Die in Abb. 1 dargestellten Bohrprofile zeigen ein repräsentatives Bild der geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet. Die quartären Sedimente lassen sich differenzieren in gut durchlässige Terrassenablagerungen (Sand, Kies), die im oberflächennahen Bereich der Leineaue von geringleitenden Auenablagerungen überlagert werden. Die Korngröße der Terrassenablagerungen nimmt von der Leine/Ihme-Aue im Westen nach Osten hin ab. Lokal sind die Terrassenablagerungen östlich der Baumaßnahme durch verfrachtete Grundmoränenbildungen abgedeckt oder durchzogen. Im Kreuzungsbereich Schützenallee und B65 befinden sich unter einer bis zu mehreren Metern dicken Sandaufschüttung Torfablagerungen auf einer Breite von ca. 200 m.

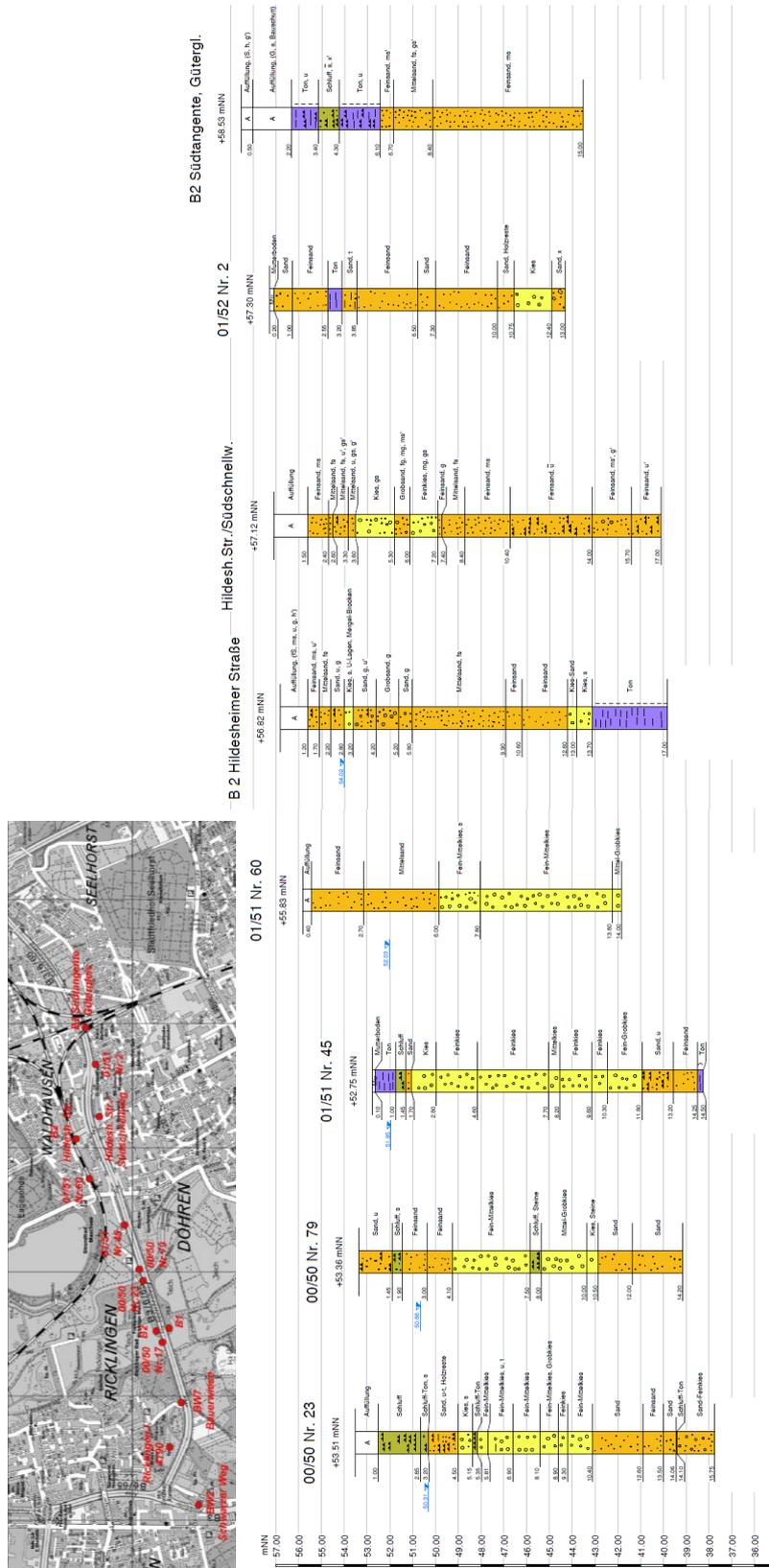


Abb. 1 Geologische Profile aus einer Baugrunderkundung [1] mit Lageplan der Bohrungen. Weitere Bohrungen siehe Anlage 3.

Das Grundwasserfließgeschehen ist geprägt durch die Hochlage im Bereich der Wasserscheide im Bereich Hannover-Bemerode und die tiefsten Grundwasserstände im Bereich der Ihme und des Seniebaches [6]. Die Hauptfließrichtung des Grundwassers ist entsprechend von Ost nach West bis Ostsüdost nach Westnordwest. Die Leine ist oberhalb des Wehrs „Schneller Graben“ soweit angestaut, dass sie nur untergeordnet als Vorflut fungiert und hauptsächlich durch- bzw. unterströmt wird. Der künstlich angelegte Maschsee ist durch eine Tonabdichtung hydraulisch fast vollständig vom Grundwasserleiter entkoppelt. Der Wasserstand des Maschsees wird durch Zuleitung von Wasser aus dem Ricklinger Teich gesteuert. Im Umfeld des Ricklinger Teiches befinden sich weitere Kiesteiche in der Leine-Aue. Diese stellen Grundwasserblänken dar und fungieren daher hydraulisch als Zonen mit sehr hoher Durchlässigkeit, verglichen mit dem umgebenden Lockergestein. Das konzeptionelle Modell ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Aufgrund des, wenn auch geringen Winkels zwischen der Längsachse der Baumaßnahme und der Grundwasserströmungsrichtung ist mit einem Grundwasseraufstau im Anstrom und einem Sunk im Abstrom der Baumaßnahme durch die Barrierewirkung zu rechnen.

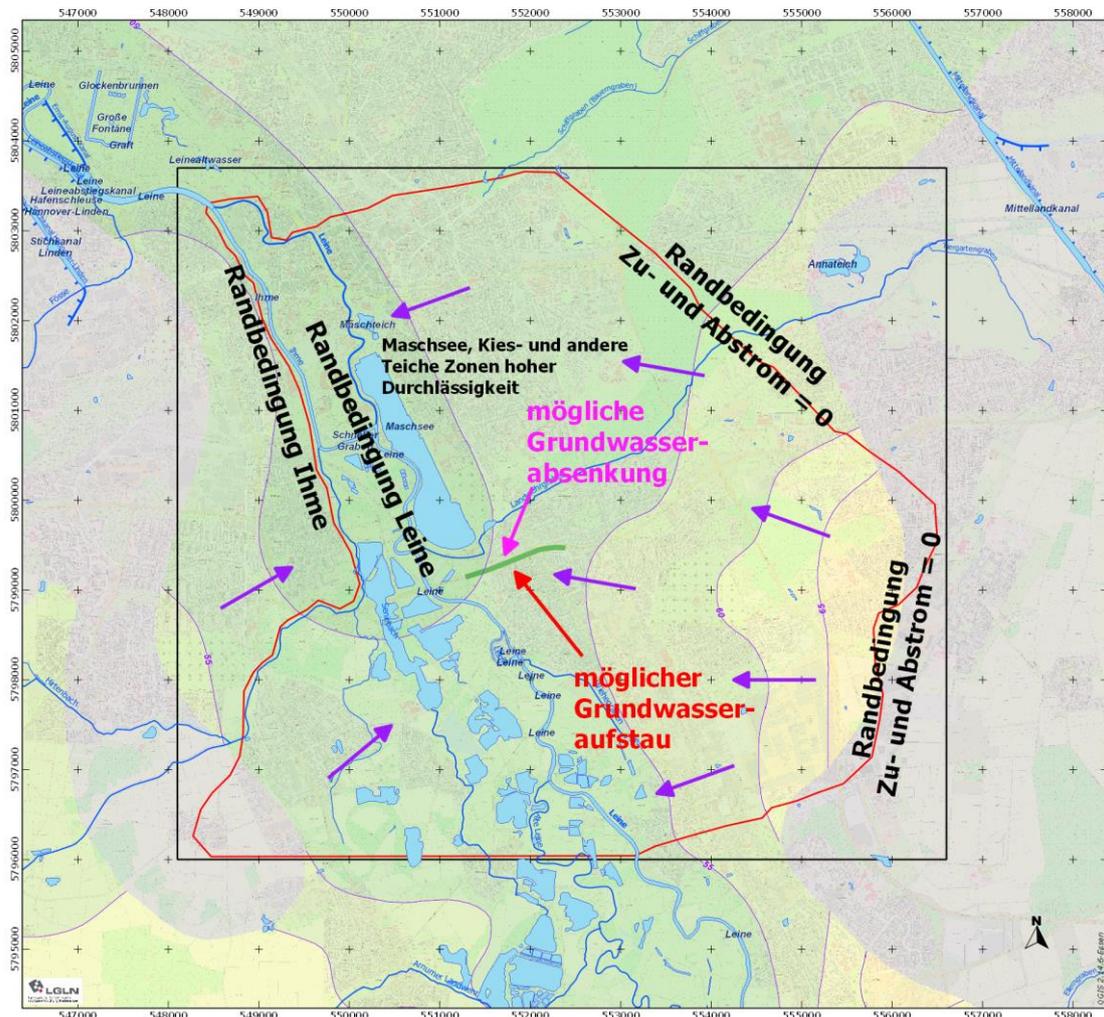


Abb. 2 Hydrogeologisches Konzept im Untersuchungsgebiet (schwarze Linie) mit Spezifizierung des Modellrandes (rote Linie) basierend auf der Ausdehnung des Lockergesteins-Grundwasserleiters (graue Bereiche - Festgestein) und des Grundwasserfließgeschehens (violette Linien - mittlere hydrologische Verhältnisse repräsentierende Grundwasserisohypsen, violette Pfeile - Grundwasserfließrichtung) und definierter Randbedingungen sowie vermutete Auswirkungen eines Tunnels/Troges auf den Grundwasserstand im Aussagegebiet (Bereich B3, Südschnellweg) als Folge einer Barrierewirkung. Kartengrundlagen: AK5 Farbe, LGLN Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und katasterverwaltung; © 2016; HÜK200, Lage der Grundwasseroberfläche, LBEG [13].

4. Grundwasserströmungsmodell

4.1. Verwendete Software

Für die Strömungsberechnungen wurde das Programm MODFLOW des United States Geological Survey (HARBAUGH & McDONALD, 1996) in der Programmversion MODFLOW-2005 eingesetzt. MODFLOW ist ein dreidimensionales numerisches Grundwassermodell zur Berechnung der gesättigten Grundwasserströmung auf der Basis der Methode der Finiten Differenzen (blockzentriertes Rechteckgitter). Es teilt den Untergrund in quaderförmige Zellen ein, für die jeweils eine Wasserbilanzgleichung aufgestellt wird. Die Standrohrspiegelhöhen in der Mitte einer Zelle sind dabei unbekannt. Unter Verwendung von Randbedingungen ergibt sich für N Zellen ein lineares Gleichungssystem für N unbekannte Standrohrspiegelhöhen. Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt mit Hilfe des iterativen Gleichungslösers PCGN (NAFF & BANTA, 2008). Die Berechnungsergebnisse werden in Form von Grundwasserhöhengleichungen, Grundwasserhöhendifferenzen und Wasserbilanzen dargestellt. Die Datenein- und Datenausgabe erfolgt mit Hilfe der graphischen Benutzeroberfläche Processing Modflow™ (CHIANG & KINZELBACH, 2003) in der Version PM 8.

Die numerische Lösung der Strömungsgleichung in MODFLOW erfolgt unter Berücksichtigung des Gesetzes von Darcy:

$$Q = A \cdot k_f \cdot i \quad \text{Gl. 1}$$

wobei A der durchströmte Querschnitt, k_f der Durchlässigkeitsbeiwert und i das Grundwassergefälle ist. In MODFLOW wird die hydraulische Leitfähigkeit bzw. die Durchlässigkeit des durchströmten Mediums als Transmissivität T berücksichtigt. Diese ist über die Aquifermächtigkeit bzw. Mächtigkeit der Modellschicht M mit k_f verknüpft:

$$T = k_f \cdot M \quad \text{Gl. 2}$$

Die Durchlässigkeit kann entsprechend der typischerweise anisotropen Eigenschaften von Lockersedimenten (z.B. DOMENICO & SCHWARTZ, 1990) sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung angegeben werden.

Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe der Software PEST (DOHERTY, 2000), einem in der Grundwassermodellierung üblichen Werkzeug zur automatisierten Parameterermittlung. Dabei werden die gesuchten Parameter so lange optimiert, bis die modellierten Grundwasserhöhen mit den verfügbaren, an Grundwassermessstellen gemessenen Grundwasserhöhen so gut wie möglich übereinstimmen. PEST liefert darüber hinaus statistische Kennzahlen mit

Hinweisen zur Sensitivität der ermittelten Parameter und zur Sensitivität der verwendeten Grundwassermessstellenlokationen.

4.2. Modellparameter

4.2.1. Modellgrenzen, -randbedingungen und -diskretisierung

Das Modellgebiet reicht von der Ihme im Westen bis nach Hannover-Kirchrode im Osten und von Hannover-List im Norden bis Hannover-Laatzen und Devese im Süden (Abb. 1). Damit reicht das Modellgebiet vor allem im Norden, Osten und Süden weit über das eigentliche Aussagegebiet hinaus. Gründe für dieses Vorgehen sind die Kriterien für die Wahl der Modellrandbedingungen. So ist die Modellgröße so gewählt, dass die Ränder (i) wasserbilanziell quantifizierbar und (ii) weit genug entfernt vom Einflussbereich der Baumaßnahme sind. Zur Erfüllung von (i) eignen sich Wasserscheiden, Randstromlinien (Grundwasserströmung parallel zum Rand, Vorfluter). Der östliche Modellrand wird durch die Wasserscheide im Bereich Hannover-Bemerode definiert [6], die gleichzeitig den östlichen Rand des Lockergesteins-Grundwasserkörpers darstellt (Abb. 1). Die Modellränder im Nordosten, Norden und Süden stellen Randstromlinien dar, d.h. die Grundwasserströmung verläuft dort parallel zum Rand [6], weshalb kein Wasser über den Rand zu- oder abströmt. Der westliche Modellrand wird durch die Ihme definiert, die, wie die Grundwassergleichkarte des LBEG zeigt, als Hauptvorflut fungiert [13]. Somit stellt das Modellgebiet als Ganzes das östliche Einzugsgebiet des im Untersuchungsgebiet liegenden Leine-/Ihmeabschnittes dar.

Numerisch sind die Randstromlinien und die Wasserscheide als Randbedingung 2. Art (Zu-/Abstrom mit $Zu-/Abstrom = 0$) und die Leine-, Ihme- und Seniebach-Vorflut als Randbedingung 3. Art (Zu-/Abstrom vom Gefälle zwischen Vorflut- und Grundwasserstand sowie der hydraulischen Durchlässigkeit der Gewässersohle abhängig) umgesetzt. Grundlage für die Wasserstände der Leine bildeten Wasserstandsdaten an den Pegeln Döhrener Wolle und Lodemannbrücke. Zwischen den Pegeln wurde der Wasserstand interpoliert. Der Wasserstand der Ihme wurde auf Basis von topographischen Karten sowie dem Wasserstand am außerhalb des Modellgebietes gelegenen Pegel Herrenhausen abgeleitet und interpoliert. Der Wasserstand des Seniebaches wurde ebenfalls aus topographischen Karten abgeleitet. Die hydraulische Durchlässigkeit der Sohle der Vorfluter wurde mit $5 \cdot 10^{-5}$ m/s für Ihme und Seniebach sowie $5 \cdot 10^{-7}$ m/s für die Leine belegt, die Mächtigkeit der

Kolmation wurde mit 20 cm vorgegeben. Die stärkere Kolmation der Leine ergab sich daraus, dass an der Leine durch den Aufstau eher infiltrierende als exfiltrierende Verhältnisse herrschen, die erfahrungsgemäß zu einer stärkeren Kolmation führen. Der Landwehrgraben wurde nicht als Vorflut berücksichtigt, da er laut vorliegender Grundwassergleichenkarten [6][13] im Modellgebiet massiv unterströmt wird und somit nur eine untergeordnete Vorflutfunktion besitzt.

Weitere zu definierende Modellrandbedingungen sind die Grundwasserneubildung und Grundwasserentnahmen (Randbedingungen 2. Art). Die Grundwasserneubildung für das Gebiet wurde flächendifferenziert nach der Methode mGROWA vorgegeben [8]. Für die Grundwasserentnahmen (Anlage 1) standen die tatsächlichen jährlichen und die bewilligten Entnahmen zur Verfügung (Tab. 1).

Die Modellbasis entspricht der Tiefenlage der Grenze zwischen dem als Grundwasserringleiter eingestuftem Unterkreide-Festgestein bzw. darüber lagernden grundwasserringleitendem quartärem Lockergestein und dem darüber liegenden grundwasserleitendem quartären Lockergestein. Die Erstellung der Modellbasis (Anhänge 2 und 4) erfolgte unter Berücksichtigung von Baugrundunterlagen [1][2], Bohrdaten [3] und Geologischen Karten [5]. Die Modelloberfläche entspricht der Geländeoberfläche [12]. Die Mächtigkeit des gesamten Modell-Grundwasserkörpers ist in Anhang 3 dargestellt.

Tab. 1 Grundwasserentnahmen im Umfeld des Bauvorhabens [9][10]. Lageplan siehe Anlage 1

Name	Aktenzeichen	bewilligte Entnahmemenge [m ³ /a]	im Modell vorgegebene Entnahmemenge [m ³ /a]	
			Kalibrierung ^(a)	Validierung ^(b)
Maschsee-Speisung aus Ricklinger Teich	2-52-1035	1.300.000	701.954	627.646
Zierteich Leineinsel	3-22-0462	8.000	7.916	8.072
Beregnung Sportanlagen	3-22-0860	15.000	14.266	13.896
Feuerlöschbrunnen	3-22-0865	48 m ³ /h (bei Bedarf)	-	-
Friedhof Seelhorst	3-22-0928	29.000	14.313	15.273
Gilde 5 Brunnen	3-22-1062	730.500	-	-
Gilde 2 Brunnen	3-22-1063	166.523	-	-

Gilde 2 Brunnen	3-22-1064	85.000	-	-
Gilde Hoppenstedtbr.	3-22-1065	300.000	201.624	239.407
Brunnen Kita	3-22-1287	6	-	-
Gartenbewässerung	3-22-1534	4.000	4.000	4.000
Friedhof Engesohde	3-22-1625	30.000	18.063	10.003
Beregnung Rasenspielfelder	3-22-8243	1.795	-	-
Wärmepumpe/Schluckbr.	3-22-8374	5.500	-	-
Speisung künstl. Wasserlauf	3-22-8583	200	-	-
^(a) mittlere Entnahmemenge 2005 bis 2015				
^(b) mittlere Entnahmemenge 2007/2008				

Kriterium für die Auflösung (räumliche Diskretisierung) eines Strömungsmodells ist einerseits die zur Verfügung stehende Datendichte. Andererseits ist die Diskretisierung so gewählt, dass die Geometrie des Bauwerks so detailgetreu wie nötig im Modell spezifiziert werden kann. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurde eine laterale Gitterweite von 12,5 x 12,5 m im Nahbereich des geplanten Bauwerks und 100 x 100 m in größerer Entfernung dazu gewählt (Abb. 3). Das Modell für das Kalibrier- und das Validierszenario besteht aus drei Schichten (vertikale Diskretisierung). Die Schichtmächtigkeiten orientieren sich an der Geologie, wobei die starke geologische Heterogenität mit sehr variablen Korngrößen der Auen-, Hochflut-, Becken- und Geschiebeablagerungen sowie Schmelzwassersanden und -kiesen nur annähernd durch das Modellgitter abgebildet wurde (Anhang 4). Da im numerischen Berechnungsverfahren die hydraulische Durchlässigkeit mit der Mächtigkeit verknüpft ist (Gl. 2), können Ungenauigkeiten in der Mächtigkeit der Modellschicht durch eine Anpassung des k_f im Rahmen der Kalibrierung (siehe Kapitel 4.3) kompensiert werden.

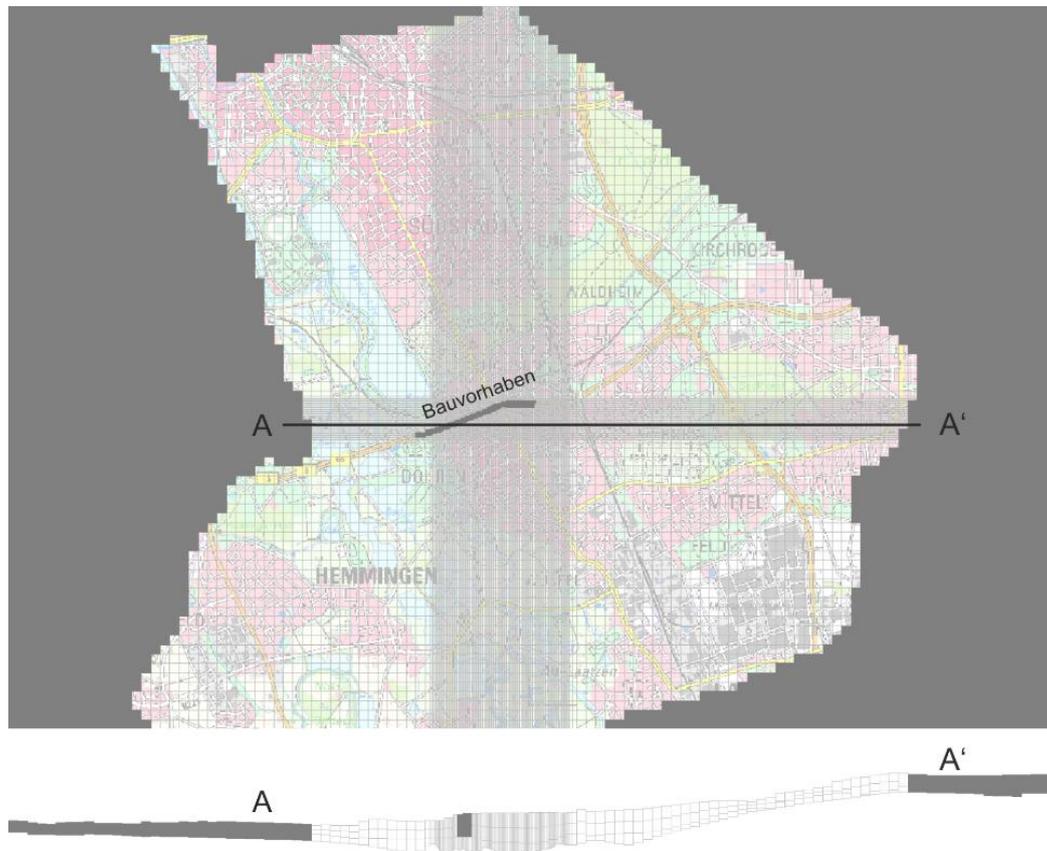


Abb. 3 Darstellung des Modellgitters lateral (oben) und vertikal (unten). Inaktive Modellzellen sind in grau dargestellt. Kartengrundlage: DTK 25 Grau; LGLN; Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und katasterverwaltung; © 2014

Um die Sohle und Oberkante des geplanten Bauwerkes im Rahmen der Prognosesimulationen detailgenauer in das Modell zu integrieren, wurden die Modellschichten 2 und 3 jeweils halbiert, und die Schichtgrenzen entsprechend der Bauwerksgeometrie angepasst (siehe Kap. 4.2.3).

4.2.2. Materialparameter

Der im Modell umgesetzte Schichtenaufbau des Grundwasserkörpers und die hydraulische Durchlässigkeit des Lockergesteins orientieren sich an Profilen geologischer, hydrogeologischer und ingenieurgeologischer Bohrungen [1][3]. Der Auenlehm sowie die Abdichtung der Maschsee-Sohle wurden explizit durch Vorgabe geringer hydraulischer Durchlässigkeiten realisiert. Die Kiesteiche stellen Grundwasserblänken dar. Hydraulisch gesehen sind solche Wasserkörper so durchlässig, dass kein Gefälle auftritt. Entsprechend der Darcy-

Gleichung (Gl. 1) wird das im Modell durch Belegung mit einer sehr hohen hydraulischen Durchlässigkeit realisiert. In den Bereichen mit Terrassen- und Geschiebeablagerungen wurden plausible hydraulische Durchlässigkeiten für verschiedene Korngrößen entsprechend von Literaturangaben (z.B. HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G., 2013) vorgegeben und im Rahmen der Kalibrierung weiter angepasst (siehe Kapitel 4.3). Die für die einzelnen Modellschichten vorgegebene sowie durch Kalibrierung ermittelte räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten sowie die für die geologische Interpretation verwendeten Bohrungen sind in den Anhängen 5.1, 5.2, 3.3 dargestellt.

Heterogenitäten im Lockergestein verursachen eine vertikale Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit, welche standort- und skalenabhängig ist. Grundsätzlich ist das Anisotropie-Verhältnis (horizontaler k_f -Wert/vertikaler k_f -Wert) ≥ 1 (DOMENICO & SCHWARTZ, 1990). In Grundwassermodellen ist ein Verhältnis von 10 für quartäre und tertiäre Lockersedimente üblich und wurde deshalb auch im vorliegenden Fall verwendet.

4.2.3. Numerische Umsetzung des Tunnelbauwerkes

Das Tunnelbauwerk besteht, unabhängig von der Bauausführung aus Elementen, die hydraulisch undurchlässig sind. Daher werden die das Bauwerk betreffenden Modellzellen inaktiv gesetzt. Die Höhe des Bauwerkes wird durch Anpassung der Schichtgrenzen berücksichtigt, indem die Höhen der obersten Oberkanten bzw. untersten Unterkanten dieser Elemente als Schichthöhen verwendet werden. Wenn beispielsweise ein Schlitzwandverbau verwendet wird und dieser tiefer liegt als der eigentliche Tunnel, stellt der Schlitzwandverbau die hydraulisch wirksame Barriere dar und wird daher durch Anpassung der Modellschichtgrenzen berücksichtigt (siehe Abb. 4). Die in Längsachse des Tunnelbauwerkes variierende Bauwerkstiefe (siehe Baugrubenpläne [15]) wird entsprechend im Modell berücksichtigt.

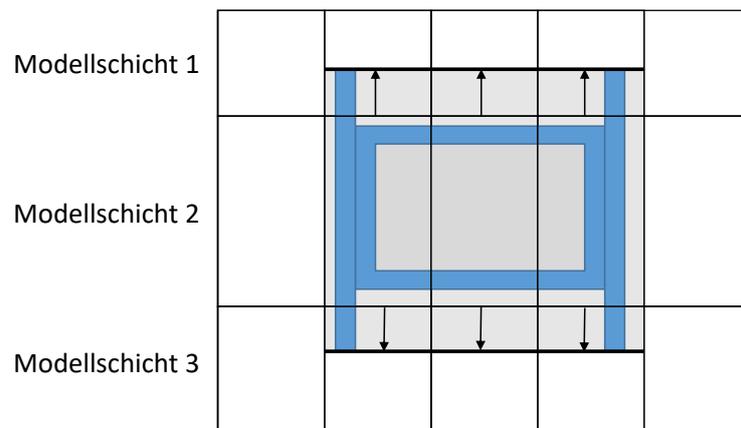


Abb. 4 Querschnitt durch ein Tunnelbauwerk zur Verdeutlichung der numerischen Umsetzung des Tunnelbauwerkes. Die weißen Rechtecke entsprechen den einzelnen Modellzellen. Das Tunnelbauwerk ist hier mit einem Kasten als Tunnel sowie seitlichen Schlitzwänden in blau dargestellt, das Tunnelbauwerk in der numerischen Umsetzung ist grau dargestellt. Die Verschiebung der Schichtgrenzen entsprechend der Bauwerksober- und unterkante ist durch Pfeile gekennzeichnet.

4.3. Kalibrierung

Eine Kalibrierung dient der Anpassung der modellierten Grundwasserhöhen und Wasserbilanzen (z.B. Ex-/Infiltration an der Vorflut) an die gemessenen Verhältnisse durch Variation der nicht genau bekannten Modellparameter (z.B. k_f , Leckage der Gewässersohle) innerhalb plausibler Größenordnungen. Für die vorliegende Kalibrierung wurden mittlere gemessene Grundwasserhöhen des Zeitraumes 1999-2016 an 62 Messstellen im Modellgebiet verwendet (Tab. 2). Zur automatisierten Kalibrierung mit PEST wurden manuell hydrogeologisch plausible Zonen gleicher hydraulischer Durchlässigkeit basierend auf den geologischen Basisdaten [1][2][3][4] festgelegt und für diese Zonen die beste k_f -Wert-Belegung ermittelt (Tab. 3, Anhang 5). Gleichzeitig liefert das automatische Kalibrierverfahren Hinweise zur Sensitivität der ermittelten k_f -Werte. In Tab. 3 sind Bereiche im Aussagegebiet mit hoher bzw. geringer Sensitivität hinsichtlich der Auswirkung des gewählten k_f -Wertes auf die Qualität der Anpassung in der Kalibrierung farblich hervorgehoben. Es dominieren insensitive Bereiche, in denen die Vorgabe einer hohen k_f -Spanne möglich ist, ohne das Kalibrierergebnis signifikant zu verschlechtern. Um Auswirkungen der sich daraus ergebenden Unsicherheiten hinsichtlich der Prognosen des zu erwartenden Grundwasseraufstaus infolge der Barrierewirkung des Tunnels/Troges zu ermitteln, erfolgte eine Sensitivitätsstudie sowohl im Rahmen der Kalibrierung (dieses Kapitel) als auch der Prognose (Kap. 4.5.3).

Tab. 2 Grundwassermessstellen mit gemessenen (Mittelwerte aus 1999 - 2016) und modellierten Grundwasserständen

Bezeichnung	Rechtswert UTM	Hochwert UTM	GWH gemessen	GWH modelliert	Bezeichnung	Rechtswert UTM	Hochwert UTM	GWH gemessen	GWH modelliert
30119 ^(a)	549977	5803177	50.50	50.35	41052	554716	5797986	67.42	66.56
30231 ^(a)	553904	5798633	57.29	57.10	41106	553992	5801129	57.07	56.66
30651 ^(a)	552489	5800661	54.49	53.72	41108 ^(a)	552870	5799688	55.90	55.74
30653 ^(a)	553232	5800519	55.46	55.42	41131 ^(a)	553488	5798076	57.34	57.20
30654 ^(a)	554261	5800514	56.77	57.34	41150 ^(a)	551751	5798026	52.82	52.49
30716 ^(a)	551925	5801104	52.00	52.23	41156	553985	5799994	56.90	57.24
40020	551885	5800654	51.74	52.55	41157 ^(a)	553633	5800101	56.51	56.88
40035 ^(a)	550819	5801093	51.04	51.11	41161 ^(a)	551589	5800732	51.70	51.89
40048	554306	5799471	57.10	57.19	41182 ^(a)	552864	5799016	56.20	56.00
40051	554405	5800663	57.47	57.37	41239 ^(a)	551463	5799668	52.57	52.19
40120	550147	5798729	50.26	50.68	41246 ^(a)	549414	5797476	52.80	52.49
40131 ^(a)	551098	5797687	51.59	51.48	41247	550640	5797577	51.80	51.60
40132 ^(a)	550441	5799570	50.78	50.54	41724 ^(a)	551405	5797847	52.20	51.79
40144 ^(a)	552912	5797305	54.60	55.32	42047 ^(a)	552403	5798451	54.70	55.08
40199 ^(a)	551027	5800781	51.37	51.24	60021 ^(a)	553152	5799484	56.40	56.31
40214 ^(a)	551238	5800332	51.80	51.58	60025 ^(a)	552000	5799117	54.40	54.18
40219 ^(a)	549331	5798082	52.00	52.18	60030 ^(a)	551771	5799909	52.87	52.55
40265 ^(a)	551315	5800646	50.87	51.24	60091 ^(a)	550913	5800477	51.59	51.81
40317 ^(a)	551644	5800606	51.70	52.03	60096 ^(a)	551286	5798615	51.36	51.55
40319	550211	5798033	51.37	51.42	61023	552793	5798151	56.20	55.94
40587 ^(a)	552490	5797835	54.35	54.87	80135 ^(a)	551786	5798367	52.40	52.59
40593 ^(a)	553285	5797600	57.12	56.74	80137 ^(a)	551746	5798366	52.40	52.48
40608 ^(a)	549893	5800671	48.77	48.96	100895 ^(a)	551994	5797742	53.72	53.14
40696	554735	5801111	58.00	57.52	110087	550176	5800276	49.80	49.80
40757	552817	5798499	56.76	56.08	110131 ^(a)	550763	5800141	51.80	51.67
40814 ^(a)	554583	5799770	59.50	58.57	110134 ^(a)	550699	5799851	51.80	51.54
40865	551504	5801082	51.61	51.72	Dreiecks- teich	550570	5799160	50.20	50.18
40872 ^(a)	552225	5800413	53.36	53.55	41028 ^(a)	551530	5798982	52.63	52.39
40922 ^(a)	549988	5797429	52.11	52.00	30706 ^(a)	552330	5801175	52.51	52.34
40997	552209	5799686	55.02	54.62	41174 ^(a)	551320	5803199	51.30	51.39
41031 ^(a)	554024	5799802	57.04	57.21					

^(a) Bohrprofil siehe Anlage 3

Tab. 3 Zusammenstellung der im Rahmen der automatischen Kalibrierung verwendeten Eingangskf-Spanne, der ermittelten kf-Werte und der Sensitivitätsparameter. Die Werte für die Sensitivität sowie die Spanne des Konfidenzintervalls liefern Hinweise für den Einfluss des kf-Wertes auf das Kalibrierergebnis (Doherty, 2000). Je höher die Sensitivität und je geringer das Konfidenzintervall, desto größer der Einfluss des kf-Wertes auf das Kalibrierergebnis. Die sensitiven Zonen, die im Aussagegebiet liegen, sind rot, insensitive Zonen im Aussagegebiet sind blau gekennzeichnet.

kf-Zone	Petrographie bzw. Genese	vorgegebene k_f -Spanne		ermittelter K_f [m/s]	Sensitivität [-]	95%- Konfidenzintervall	
		min	max			unteres Limit	oberes Limit
		[m/s]	[m/s]			[m/s]	[m/s]
1	Terrassenablagerungen	5.00E-05	1.00E-02	1.69E-03	0.0188	6E-07	5E+00
2	Terrassenablagerungen	1.00E-05	1.00E-02	2.46E-03	0.1659	6E-04	1E-02
3	Torf	1.00E-07	1.00E-03	1.48E-04	0.0017	5E-120	4E+111
4	Auenablagerungen	1.00E-08	1.00E-04	1.00E-05	0.0302	4E-09	2E-02
5	Geschiebelehm	1.00E-08	1.00E-04	2.28E-05	0.3387	1E-05	4E-05
6	Geschiebelehm	1.00E-08	1.00E-04	1.66E-05	0.2345	7E-06	4E-05
7	Geschiebelehm	1.00E-08	1.00E-04	5.53E-05	0.3274	2E-05	1E-04
8	Geschiebelehm	1.00E-08	1.00E-02	1.00E-02	0.0096	1E-08	8E+03
9	Sand	1.00E-06	1.00E-03	2.40E-05	0.0127	4E-35	1E+25
10	Sand	1.00E-06	1.00E-02	1.59E-04	0.0300	8E-06	3E-03
11	Sand	1.00E-07	1.00E-03	1.00E-03	0.0772	9E-05	1E-02
12	Sand	1.00E-07	1.00E-02	1.00E-02	0.0143	5E-05	2E+00
13	Torf	1.00E-07	1.00E-03	1.11E-07	0.0014	1E-191	1E+177
14	Torf	1.00E-08	1.00E-04	4.07E-06	0.0019	4E-42	4E+30
15	Torf	1.00E-07	1.00E-02	5.08E-05	0.0020	8E-73	3E+63
16	Torf	1.00E-05	1.00E-02	1.48E-03	0.0313	4E-06	5E-01
17	Sand	1.00E-07	1.00E-02	2.02E-06	0.0039	2E-11	2E-01
18	Torf	1.00E-07	1.00E-03	1.00E-03	0.0252	1E-06	9E-01
19	Sand	1.00E-06	1.00E-03	1.00E-03	0.1989	5E-05	2E-02
20	Sand	1.00E-06	1.00E-02	5.78E-05	0.0100	7E-33	5E+23
21	Sand	1.00E-07	1.00E-02	1.00E-02	0.0218	2E-04	5E-01
22	Sand	1.00E-06	1.00E-02	1.63E-04	0.1548	6E-05	4E-04
23	Sand	1.00E-05	1.00E-02	1.57E-05	0.0265	7E-11	3E+00
24	Sand	1.00E-05	1.00E-02	1.00E-05	0.0063	4E-12	3E+01
25	Terrassenablagerungen	1.00E-06	1.00E-02	1.17E-03	0.2270	3E-04	4E-03
26	Sand	1.00E-06	1.00E-03	3.69E-04	0.0681	2E-09	6E+01
27	Kies	1.00E-04	1.00E-01	7.51E-02	0.0028	3E-30	2E+27
28	Geschiebemergel	1.00E-08	1.00E-06	3.36E-07	0.0006	3E-128	4E+114
29	Geschiebemergel	1.00E-08	1.00E-06	1.00E-06	0.0055	2E-10	5E-03
30	Sand, Kies	1.00E-04	5.00E-02	4.03E-04	0.0137	5E-13	3E+05
32	schluffiger Feinsand	5.00E-07	1.00E-05	9.41E-06	0.0026	7E-149	1E+138
33	schluffiger Feinsand	1.00E-07	1.00E-05	2.30E-06	0.0020	8E-203	6E+190
34	Kies	1.00E-04	5.00E-02	2.02E-03	0.0017	7E-32	6E+25
35	Schluff	1.00E-09	1.00E-06	1.36E-07	0.0018	8E-229	2E+214

Der Wasserbilanzfehler liegt bei 0,01 %. Der Modellfehler, bezogen auf die Grundwasser-Höhendifferenz im Modellgebiet von rund 19 m, beträgt 1,92 %. Die Güte der Modellkalibrierung kann damit gemäß LANUV (2010) als sehr gut bewertet werden. Die resultierenden Grundwasserhöhen als Ergebnis der Anpassung sind in Anhang 6 dargestellt, die Qualität der Anpassung an den Grundwassermessstellen in einem Streudiagramm in Abb. 5.

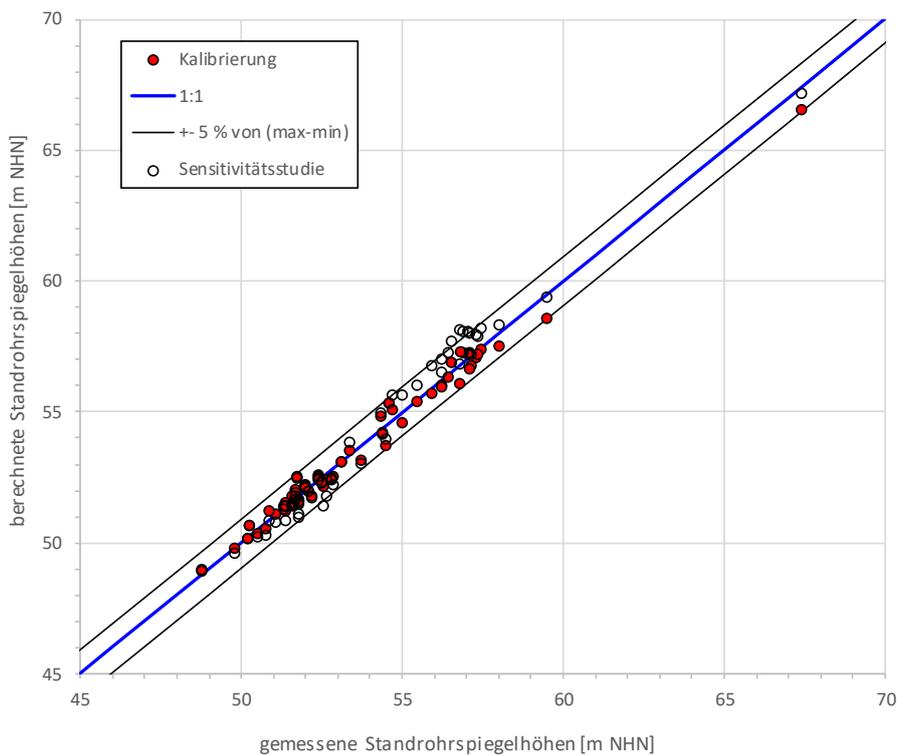


Abb. 5 Vergleich gemessener und im Modell berechneter Grundwasserhöhen im Untersuchungsgebiet im Ergebnis der Kalibrierung und der Unsicherheitsstudie

Im Nahbereich des Bauvorhabens stimmen gemessene und simulierte Grundwasserhöhen sehr gut überein (Anhang 6), so dass die angesetzten k_f -Werte sowie die resultierenden modellierten Grundwasserfließrichtungen und -mengen für den Kalibrierzustand als plausibel eingeschätzt werden können. Abweichungen im Bereich des südlichen Maschsees sind auf einen hohen vertikalen Gradienten durch den hohen Wasserstand im hydraulisch entkoppelten Maschsee und einem geringeren Wasserstand darunter zurückzuführen, der sich in engräumigen vertikalen Grundwasserhöhendifferenzen widerspiegelt. Zur Verdeutlichung ist daher in Abb. 5 erkennbar, dass die Anpassung im Bereich des Grundwasserstandes zwischen 51 und 52 mNN sehr gut ist. Größere Ungenauigkeiten außerhalb des Aussagegebietes sind sowohl auf Unzulänglichkeiten des konstruierten

Gleichenplans der gemessenen Grundwasserhöhen (keine Messungen in Randbereichen) als auch des Modells (ungenau implementierte Geologie in den Randbereichen) zurückzuführen. Es sei jedoch noch einmal darauf hingewiesen, dass das Modellgebiet weit größer als das Aussagegebiet gewählt wurde, um durch die Möglichkeit der Festlegung wasserbilanziell genau quantifizierbarer Randbedingungen die Wasserbilanz im Aussagegebiet quantitativ abzusichern.

Die Wasserbilanz im Modell (Abb. 6) wird eintragsseitig hauptsächlich durch die Grundwasserneubildung bestimmt. Der relativ hohe Eintrag von Wasser über die Vorflut ist eine Folge des Aufstaus der Leine und der lokalen Umströmung der Staustufen. Regional fungiert die Ihme als Vorfluter, der das neu gebildete Grundwasser im Einzugsgebiet zufließt. Davon abzuziehen ist die vergleichsweise geringe Wassermenge, die durch Brunnen entnommen wird. Der Maschsee wird künstlich gespeist durch Wasser aus dem Ricklinger Teich. Zum Teil versickert Wasser aus dem Maschsee und führt damit lokal zu einer erhöhten Grundwasserneubildung.

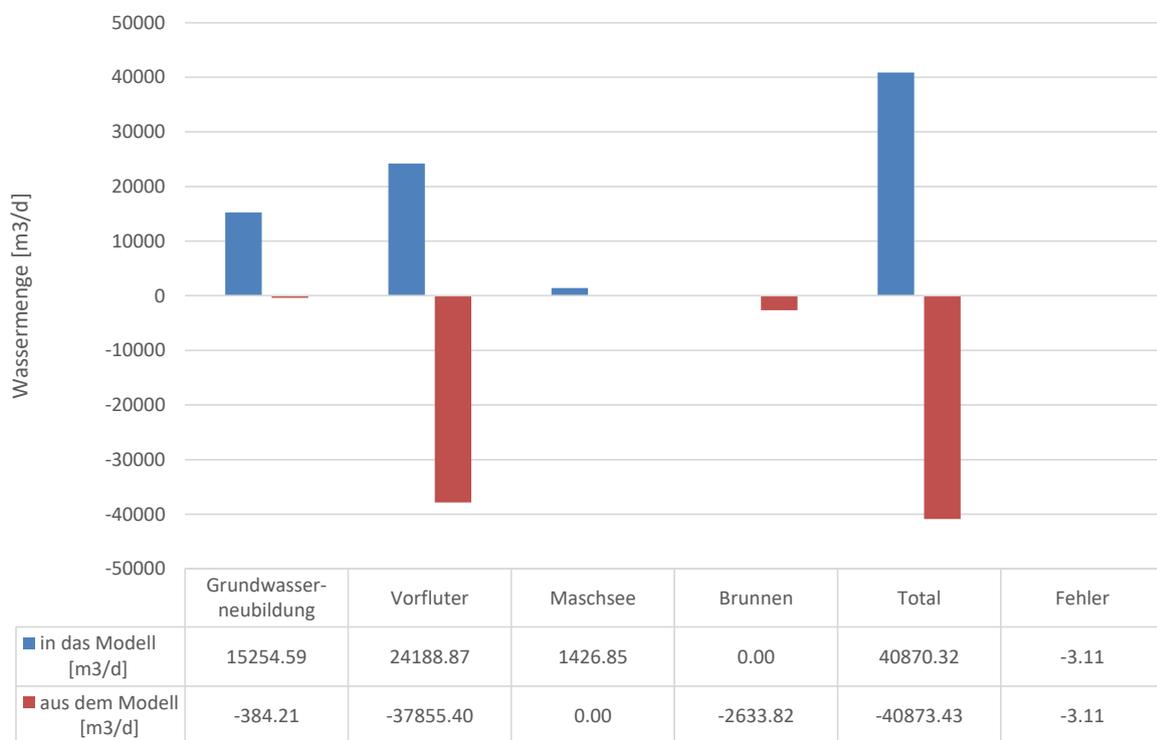


Abb. 6 Wasserbilanz im gesamten Modell für das Kalibrierszenario

Zur Prüfung der Wasserbilanz des Maschsees im Modell sind die Bilanzgrößen in Abb. 7 dargestellt. Zu einer ungefähren jährlichen Einleitung von 700.000 m³/a kommt eine jährliche Niederschlagsmenge von ca. 480000 m³/a (600 mm/a, ungefähres langjähriges Mittel an der DWD-Station Langenhagen). Die potenzielle Evaporation offener Wasserflächen beträgt ca. 560.000 m³/a (Messwerte übernommen vom Steinhuder Meer, siehe MATTHEB & UBELL, 1983). Im Modell versickern ungefähr 520.000 mm³/a. Somit beträgt die Abweichung von Input und Output des Maschsees im Modell weniger als 10 %, welche als vernachlässigbar eingeschätzt wird.

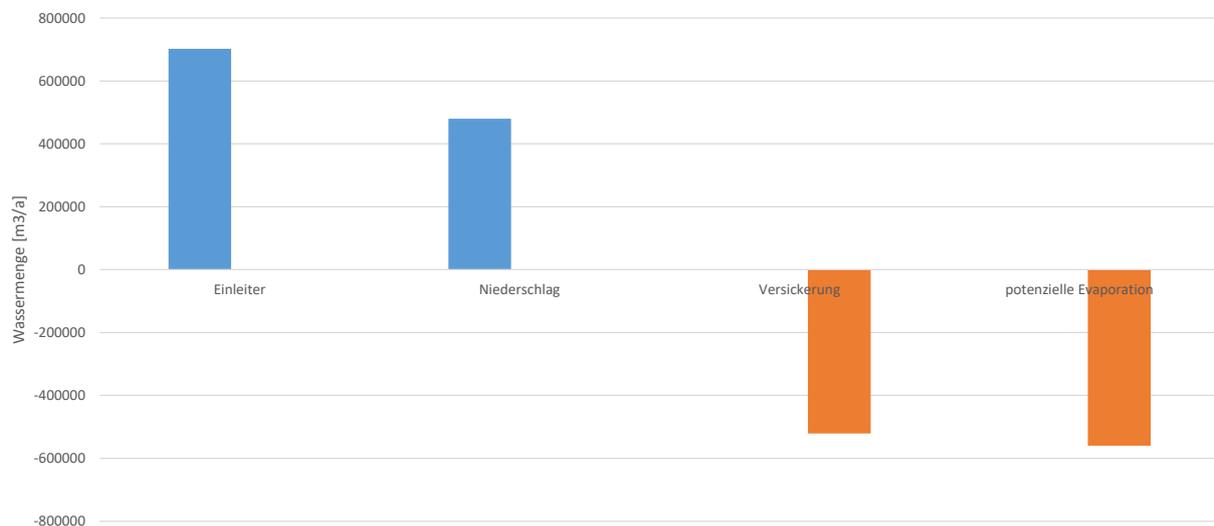


Abb. 7 Wasserbilanz des Maschsees im Modell für das Kalibrierszenario

Der modellierte Abfluss über die Vorfluter teilt sich auf in 160 l/s für die Ihme und 58,5 l/s für den Seniebach. Die Leine verliert durch den Aufstau im Modellgebiet 60 l/s. Eine Verifizierung der berechneten Abflüsse über die Vorfluter durch Vergleich mit gemessenen Abflüssen ist nicht möglich, da nicht ausreichend Pegel zur Verfügung stehen, an denen tatsächlich der Abfluss gemessen wird. Dazu wären Abflussmessungen im Bereich des Modellgebietes im Oberstrom von Ihme, Leine und Seniebach sowie im Unterstrom in Ihme und Leine oder in der Leine nach Mündung der Ihme nötig. Um trotzdem eine überschlägige Abflussbilanz aufzustellen, erfolgte ein Vergleich der berechneten Abflusspende im Einzugsgebiet des Aussagegebietes mit der gemessenen Abflusspende am unterstromig liegenden Leine-Pegel Herrenhausen. Dazu wurde die Abflusspende bei niedrigen hydrologischen Verhältnissen (MNq) herangezogen, die überschlägig dem Basisabfluss, also der Grundwasserexfiltration in die Vorflut, entspricht. Die berechnete Abflusspende wurde für

eine Fläche ermittelt, die das Aussagegebiet umfasst und das rechtsseitige Einzugsgebiet der Vorflut in diesem Bereich darstellt. Nach Osten wird dieses Einzugsgebiet durch eine Wasserscheide begrenzt (siehe Kap. 4.2.1), nach Süden und Norden durch Randstromlinien, nach Westen durch die Vorflut (Abb. 8). Im Ergebnis beträgt die im Modell berechnete Abflusspende $3,45 \text{ l/(s km}^2\text{)}$ und ist somit fast identisch mit der Abflusspende am Pegel Herrenhausen (Tab. 4).

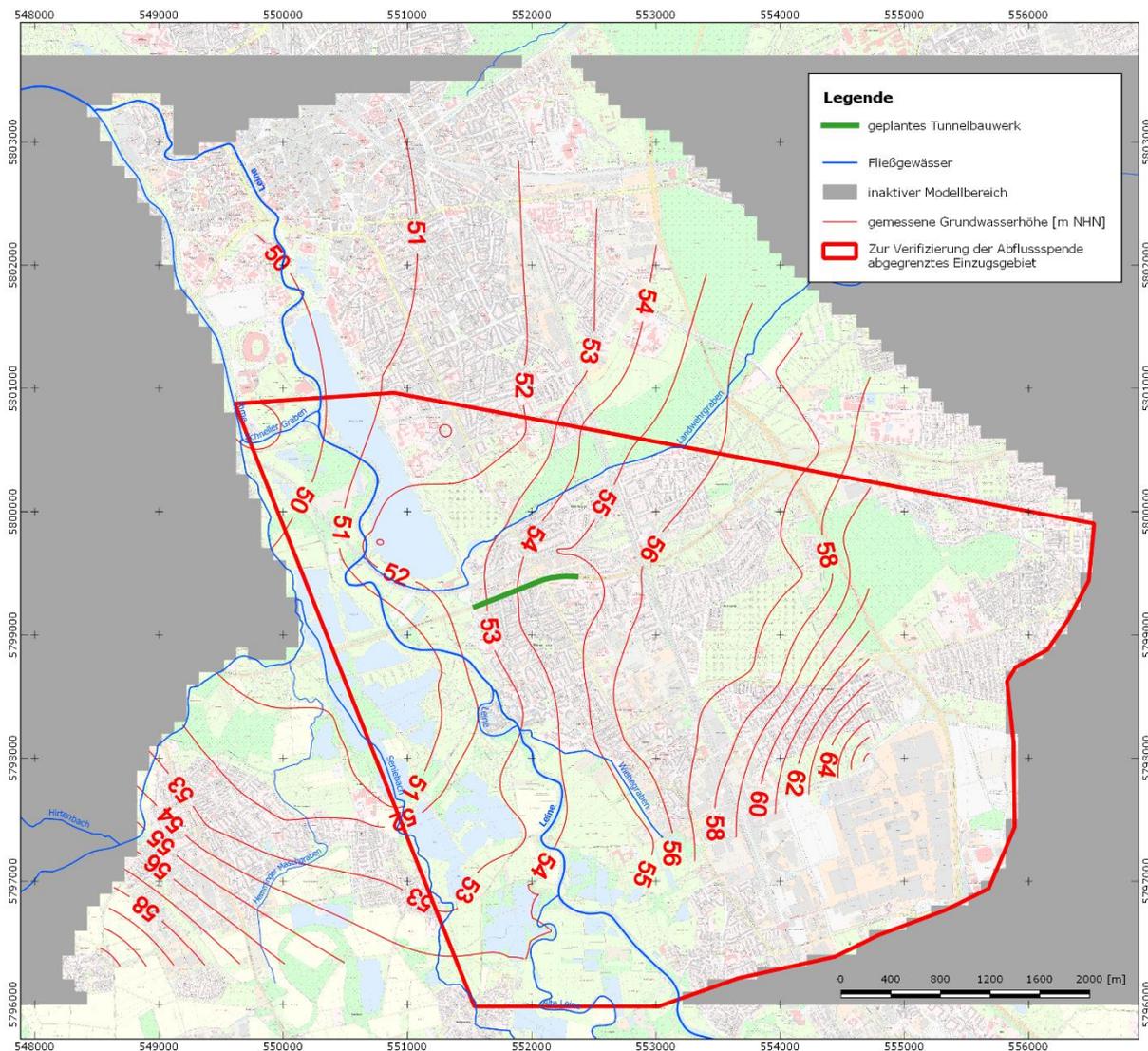


Abb. 8 Abgegrenztes Einzugsgebiet basierend auf den zur Kalibrierung verwendeten Grundwasserhöhen zur Ermittlung der berechneten Abflusspende

Tab. 4 Vergleich der gemessenen und berechneten Abflussspende in dem das Aussagegebiet einschließenden Einzugsgebiet von Leine, Ihme und Seniebach.

Bilanzgröße	Einheit	Modell	Pegel Herrenhausen
Fläche Einzugsgebiet	km ²	23,5	-
Grundwasserneubildung	l/s	81,1	-
Abflussspende	l/(s km ²)	3,45	3,02 (MNq) ^(a)

^(a) aus dem Datenblatt zum Abfluss am Pegel Herrenhausen aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (2015)

Um die Sensitivität der Kolmation der Leine im Hinblick auf die Modellergebnisse zu ermitteln, wurde die hydraulische Durchlässigkeit der Gewässersohle, basierend auf dem Kalibrierszenario, auf $5 \cdot 10^{-5}$ m/s erhöht. Der Modellfehler beträgt mit dieser Parametrisierung 2,17 % und liegt damit nur leicht höher als im Kalibrierszenario. Das bedeutet, dass die Sensitivität gering ist.

Unsicherheitsstudie

Durch Variation der k_f -Werte insensitiver k_f -Zonen im Aussagegebiet erfolgte eine Unsicherheitsstudie. Dazu wurden die k_f -Werte der k_f -Zonen 4, 16, 26, 27 und 34 im Aussagegebiet, deren durch die Kalibrierung ermittelte k_f -Werte hinsichtlich der angetroffenen Korngröße eher als hoch eingeschätzt werden können (siehe Tab. 3), jeweils um den Faktor 10 verringert. Durch Vorgabe geringerer k_f -Werte ergäbe sich nach dem Darcy-Gesetz (Gl. 1) ein höherer Gradient und somit ein stärkerer Aufstau bzw. Sunk am geplanten Tunnel/Trog. Die geringer durchlässigen Bereiche (z.B. Geschiebemergel, k_f -Zonen 15, 28, 29) wurden in der Unsicherheitsstudie unter der Annahme vernachlässigt, dass sie aufgrund geringer Durchströmungsmengen im Vergleich zu gut durchlässigen Bereichen einen untergeordneten Einfluss auf die Bauwerks-Unter- bzw. Überströmung im Aussagegebiet haben. Die k_f -Zonen 30, 32 und 33 wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, weil die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten k_f -Werte bereits am unteren Limit der hinsichtlich der angetroffenen Korngröße abzuleitenden Durchlässigkeiten liegen. In Abb. 5 ist das Ergebnis der Anpassung mit verringerten k_f -Werte in den k_f -Zonen 4, 16, 26, 27 und 34

dargestellt. Der Modellfehler ist mit 3,03 % immer noch gering, es zeigen sich jedoch größere und systematische Abweichungen im Vergleich zum Ergebnis der Kalibrierung. Während die positiven und negativen Abweichungen der modellierten von den gemessenen Grundwasserhöhen bei der Kalibrierung gleichverteilt sind und somit der modellierte dem gemessenen Gradienten entspricht, werden die Grundwasserhöhen > 54 mNHN in der Unsicherheitsstudie signifikant überschätzt und < 54 mNHN unterschätzt. Daraus ergibt sich ein wesentlich höherer Gradient im Aussagegebiet, der zum Stichtag so nicht beobachtet wurde. Aufgrund dieser signifikanten Verschlechterung des Ergebnisses sind die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten k_f -Werte daher als plausibel einzuschätzen.

4.4. Validierung

Der Nachweis der Prognosefähigkeit eines kalibrierten Modells erfolgt durch die Validierung. Dabei wird mit mindestens einem unabhängigen Datensatz im Modellgebiet, der einen anderen Systemzustand als das Kalibrierszenario aufweist, ein Rechenlauf durchgeführt. Wenn das Ergebnis ein zur Kalibrierung plausibles Ergebnis aufweist, wird das kalibrierte Modell in der Regel eine ausreichende Genauigkeit vorweisen. Sollte dies nicht der Fall sein, so ist die Kalibrierung zu überprüfen (NEUB & DÖRHÖFER 2007).

Für die Validierung wurde ein Datensatz verwendet, der einen mittleren Hochwasserzustand (MHGW) des Grundwassers beschreibt, und auf eine saisonale Variabilität der Grundwasserneubildung zurückzuführen ist. Nach Prüfung der Grundwasserstandsdaten von 1999 bis 2016 wurden Wasserstände von April 2008 verwendet, die eine durch viele Niederschläge verursachte relativ lange Feuchtperiode repräsentieren.

Tab. 5 Grundwassermessstellen mit gemessenen (Stichtag April 2008) und modellierten Grundwasserständen

Bezeichnung	Rechtswert UTM	Hochwert UTM	GWH gemessen	GWH modelliert	Bezeichnung	Rechtswert UTM	Hochwert UTM	GWH gemessen	GWH modelliert
30231 ^(a)	553904	5798633	57.82	57.74	40814 ^(a)	554583	5799770	60.43	59.40
30651 ^(a)	552489	5800661	55.07	54.11	40865	551504	5801082	51.87	51.94
30653 ^(a)	553232	5800519	55.79	55.94	40872 ^(a)	552225	5800413	54.05	53.91
30654 ^(a)	554261	5800514	57.15	58.02	40997	552209	5799686	55.26	55.00
40020	551885	5800654	52.28	52.84	41031 ^(a)	554024	5799802	57.43	57.87
40035 ^(a)	550819	5801093	51.29	51.24	41052	554716	5797986	68.10	68.32
40048	554306	5799471	57.62	57.85	41106	553992	5801129	57.20	57.31
40051	554405	5800663	58.03	58.06	41108 ^(a)	552870	5799688	56.16	56.25
40120	550147	5798729	50.33	50.68	41131	553488	5798076	57.79	57.83
40131 ^(a)	551098	5797687	51.84	51.48	41150 ^(a)	551751	5798026	53.18	52.53
40132 ^(a)	550441	5799570	50.85	50.55	41156	553985	5799994	57.39	57.91
40199 ^(a)	551027	5800781	51.60	51.37	41157 ^(a)	553633	5800101	56.80	57.52
40319	550211	5798033	51.74	51.43	41182 ^(a)	552864	5799016	56.45	56.51
40587	552490	5797835	54.75	55.12	60021 ^(a)	553152	5799484	56.59	56.87
40593 ^(a)	553285	5797600	57.37	57.26	60025 ^(a)	552000	5799117	54.62	54.49
40608 ^(a)	549893	5800671	49.78	48.96	60030 ^(a)	551771	5799909	53.32	52.76
40696	554735	5801111	58.60	58.22	60091 ^(a)	550913	5800477	51.81	51.89
40757	552817	5798499	57.07	56.57	60096 ^(a)	551286	5798615	51.59	51.58
					100895 ^(a)	551994	5797742	53.86	53.20

^(a) Bohrprofil siehe Anlage 3

Der MHGW ist nicht zu verwechseln mit einem durch ein Leinehochwasser induzierten hohen Grundwasserstand. Im Falle eines solchen Ereignisses kehrt sich die eigentliche Vorflutfunktion der Leine um und Wasser fließt vom Leinebett sowie den Überschwemmungsflächen in den Grundwasserleiter, was zu höheren Grundwasserständen führt. Dieser Prozess ist zeitlich verzögert, wobei die Verzögerung mit der Entfernung zur Leine korreliert. Die Verzögerung wird verstärkt durch das Auftreten der gering durchlässigen Auenablagerungen im Bereich der Überschwemmungsflächen, wodurch nur beschränkt Hochwasser dem Grundwasserleiter zuströmen kann. Ein stationärer Zustand, wie bei MHGW, ist also erst mit einer zeitlichen Verzögerung nach dem Erreichen des Hochwassers in der Leine zu erwarten. Unter Umständen wird dieser stationäre Zustand nie erreicht, weil das Leinehochwasser nicht lange genug anhält. Da das Modell ausschließlich für die

Simulation stationärer Zustände geeignet ist und keine Informationen (Grundwasserstände) über einen stationären, durch ein Leinehochwasser verursachten Grundwasserstand vorliegen, kann ein solches Szenario nicht zur Validierung herangezogen werden.

Um die gemessenen Standrohrspiegelhöhen bei MHGW im Modell reproduzieren zu können, wurde die Grundwasserneubildungsrate im Modellgebiet flächenhaft um einen Faktor erhöht. Die Raten in Grundwasserzehrgebieten wurden nicht verändert. Bei einer Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate um 12,5 % ergab sich die beste Anpassung der Grundwasserhöhen im Aussagegebiet. Am Standort Langenhagen (Deutscher Wetterdienst) lag die mittlere monatliche Klimabilanz im neubildungsrelevanten Zeitraum vor dem Validierstichtag (Oktober 2007 bis März 2008) um 17,4 % höher als die langjährige mittlere Klimabilanz. Zwar ist dieser Wert etwas höher als die vorgegebene höhere Grundwasserneubildung. Allerdings werden zur Berechnung der Grundwasserneubildung wesentlich mehr Parameter als zur Berechnung der Klimabilanz berücksichtigt. Insbesondere der in städtischen Räumen relevante Oberflächenabfluss, aber auch Transpiration der Pflanzen, ist in der Klimabilanz nicht berücksichtigt. Daher wird die im Modell angesetzte Grundwasserneubildung im Vergleich zur Klimabilanz als plausibel eingeschätzt.

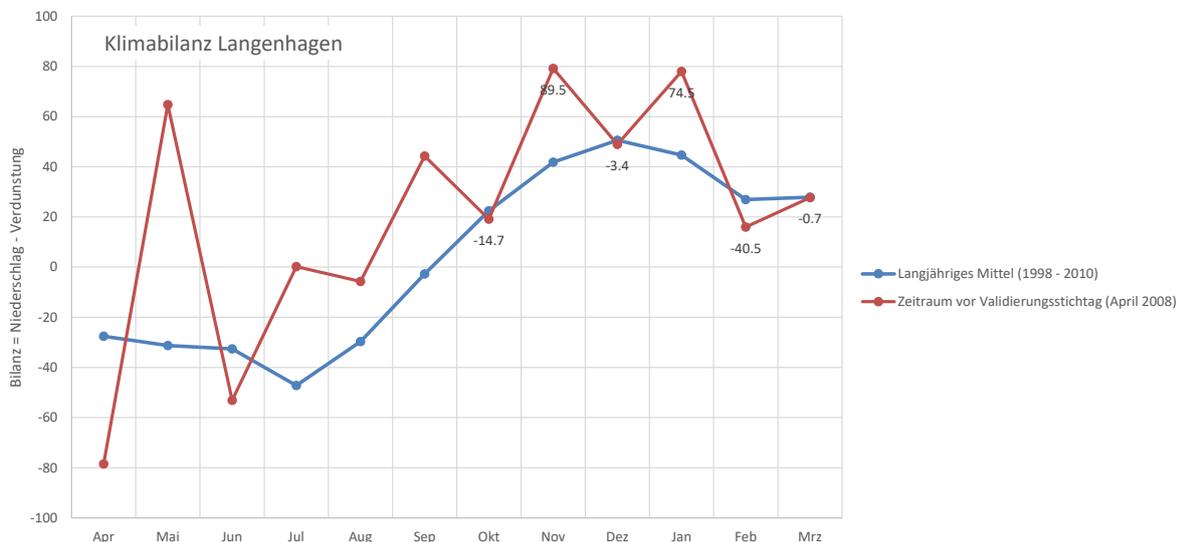


Abb. 9 Vergleich der langjährigen mittleren Klimabilanz mit der Klimabilanz im Bilanzjahr 2007/08 am Standort Langenhagen. Messwerte vom DWD. Die Zahlen stellen die monatliche Abweichung der Klimabilanz vom langjährigen Mittel in Prozent im neubildungsrelevanten Zeitraum Oktober - März dar. Die mittlere monatliche Abweichung beträgt 17,4 %.

Die Qualität der Anpassung an den Grundwassermessstellen ist in einem Streudiagramm dargestellt (Abb. 10). Bezogen auf das hydraulische Gefälle im Modellgebiet von rund 18 m beträgt der Modellfehler 2,42 %. Der Wasserbilanzfehler liegt bei 0,01 %. Die Güte der Modellvalidierung kann damit gemäß LANUV (2010), wie schon bei der Kalibrierung, als sehr gut bewertet werden. Auch in diesem Fall zeigen die Modellergebnisse im Aussagegebiet in Bezug auf die Grundwasserfließrichtung und das hydraulische Gefälle eine gute Übereinstimmung mit den Auswertungen der Messwerte (Anhang 7).

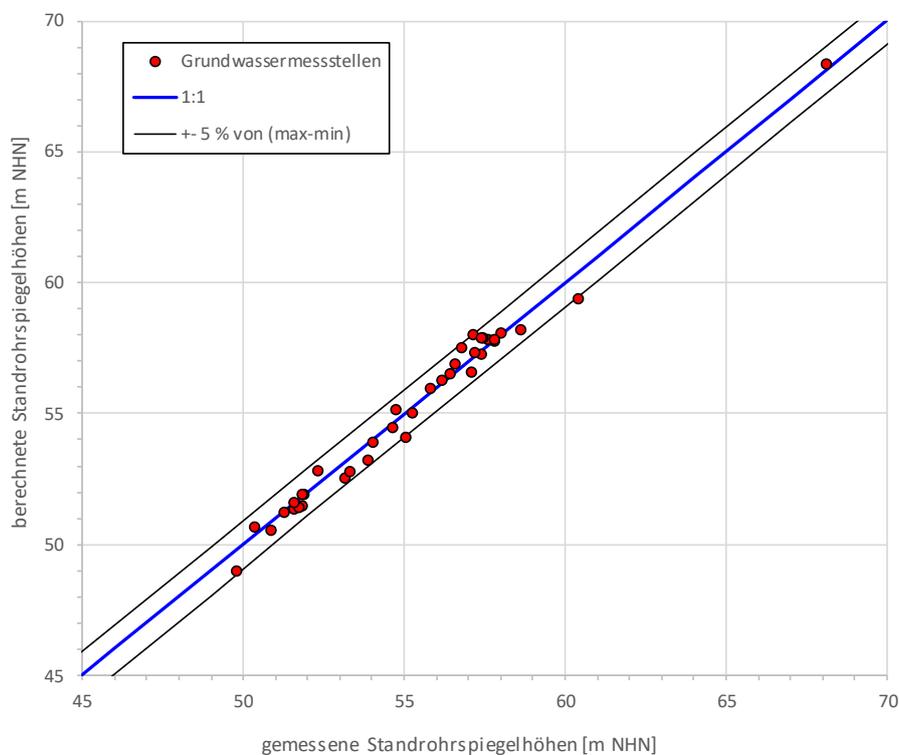


Abb. 10 Vergleich gemessener und im Modell berechneter Grundwasserhöhen im Untersuchungsgebiet im Ergebnis der Validierung.

4.5. Prognosen

4.5.1. Szenario 1 – Variante O3 mit kompletter Abdichtung des Grundwasserleiters über- und unterhalb des Tunnels

Entsprechend der Variante O3 wurde das Bauwerk von km 2,3 bis km3,4 im Modell berücksichtigt. Dazu wurden die den Tunnel betreffenden Zellen in allen Modellschichten von der Geländeoberkante bis zur Modellbasis inaktiv gesetzt, was hydraulisch undurchlässigen Bereichen entspricht. Die grundwasserleitenden Bereiche unterhalb des Tunnels (siehe Anhang 4) können also nicht durchströmt werden. Hinsichtlich der Wasserstände wurde auf den höchsten möglichen Grundwasserstand zurückgegriffen (siehe Anlage 4). Um diesen Wasserstand im Modell zu erreichen, wurde die Grundwasserneubildung nach mGROWA mit 140 % der jährlichen Menge vorgegeben.

Da die Längsausrichtung des geplanten Bauwerkes in einem (wenn auch geringen) Winkel zum Anstrom ausgerichtet ist, kommt es durch die hydraulische Barrierewirkung zu einem Anstieg südlich der Baumaßnahme sowie am östlichen Portal (Anhang 8). Im Norden der Baumaßnahme verursacht die Barrierewirkung eine Grundwasserabsenkung (Sunk). Ein Grundwasseranstieg bis zu 60 cm wird für das Gebiet Döhren prognostiziert, das Maximum des Grundwasseranstiegs befindet sich im Gebiet Döhren zwischen Schützenallee und Hildesheimer Straße. Die Reichweite eines Anstiegs über 20 cm beträgt ca. 700 m, über 40 cm ca. 200 m. Die prognostizierte Reichweite der Absenkung über 10 cm beträgt ca. 1100 m, über 50 cm ca. 250 m.

4.5.2. Szenario 2 - Variante O3 mit Unterströmung des Tunnels möglich

Entsprechend der Variante O3 wurde das Bauwerk von km 2,3 bis km3,4 im Modell berücksichtigt. Der Grundwasserleiter kann unterhalb UK Tunnel weiterhin unterströmt werden (siehe Anhang 4). Dazu wurde die jeweilige Grenze zwischen den betreffenden Modellschichten auf Höhe der UK Tunnel gesetzt (siehe Kap. 4.2.3), die den Tunnel betreffenden Zellen wurden in den betreffenden Modellschichten von der Geländeoberkante bis zur UK Tunnel inaktiv gesetzt, was hydraulisch undurchlässigen Bereichen entspricht. Im Vergleich zur Vollabspernung des Grundwasserleiters in Szenario 1 verringert sich der abgesperrte Querschnitt um ca. $\frac{1}{4}$. Insbesondere in den Sanden im Bereich der Tunnelportale ist eine signifikante Unterströmung möglich, während die Unterströmung im Bereich des

hoch liegenden Beckenschluffes zwischen km 2+650 und km 3+000 weiterhin eingeschränkt ist. Hinsichtlich der Wasserstände wurde auf den höchsten möglichen Grundwasserstand zurückgegriffen (siehe Anlage 4). Um diesen Wasserstand im Modell zu erreichen, wurde die Grundwasserneubildung nach mGROWA mit 140 % der jährlichen Menge vorgegeben.

Da die Längsausrichtung des geplanten Bauwerkes in einem (wenn auch geringen) Winkel zum Anstrom ausgerichtet ist, kommt es durch die hydraulische Barrierewirkung zu einem Anstieg südlich der Baumaßnahme sowie am östlichen Portal (Anhang 9). Im Norden der Baumaßnahme verursacht die Barrierewirkung eine Grundwasserabsenkung (Sunk). Ein Grundwasseranstieg bis zu 40 cm wird im Gebiet Döhren prognostiziert, das Maximum des Grundwasseranstiegs befindet sich im Gebiet Döhren zwischen Schützenallee und Hildesheimer Straße. Die Reichweite eines Anstiegs über 10 cm beträgt ca. 1000 m, über 20 cm ca. 250 m. Die prognostizierte Reichweite der Absenkung über 10 cm beträgt ca. 570 m, über 30 cm ca. 220 m.

4.5.3. Szenario 3 - Variante O3 mit Unter- und Überströmung des Tunnels

Entsprechend der Variante O3 wurde das Bauwerk von km 2,3 bis km3,4 im Modell berücksichtigt. Der Grundwasserleiter kann, wie schon in Szenario 2 (siehe Kap. 4.5.2), unterhalb UK Tunnel unterströmt werden. Darüber hinaus ist oberhalb OK Tunnel bis zur GOK eine Überströmung möglich. Das betrifft den Sand-Bereich zwischen Bau-km 2+600 und 3+200. Analog zur Vorgehensweise bei der Implementierung der UK Tunnel wurde für die OK Tunnel die jeweilige Grenze zwischen den betreffenden Modellschichten auf Höhe der OK Tunnel gesetzt (siehe Kap. 4.2.3). Die hydraulische Durchlässigkeit über dem Tunnel wurde mit einem k_f von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s belegt und entspricht damit einem grobkörnigen Sand. Die den Tunnel betreffenden Zellen in den Modellschichten von OK bis UK Tunnel wurden inaktiv gesetzt, was hydraulisch undurchlässigen Bereichen entspricht. Hinsichtlich der Wasserstände wurde auf den höchsten möglichen Grundwasserstand zurückgegriffen (siehe Anlage 4). Um diesen Wasserstand im Modell zu erreichen, wurde die Grundwasserneubildung nach mGROWA mit 140 % der jährlichen Menge vorgegeben.

Da die Längsausrichtung des geplanten Bauwerkes in einem (wenn auch geringen) Winkel zum Anstrom ausgerichtet ist, kommt es durch die hydraulische Barrierewirkung zu einem Anstieg südlich der Baumaßnahme sowie am östlichen Portal (Anhang 10). Im Norden der Baumaßnahme verursacht die Barrierewirkung eine Grundwasserabsenkung (Sunk). Ein Grundwasseranstieg bis zu 20 cm wird im Gebiet Döhren prognostiziert, das Maximum des

Grundwasseranstiegs befindet sich im Gebiet Döhren zwischen Schützenallee und Pagenstraße. Die Reichweite eines Anstiegs über 10 cm beträgt ca. 330 m.

Sensitivitätsstudie

Obwohl gezeigt wurde, dass die im Modell angesetzten k_f -Werte als plausibel einzuschätzen sind (siehe Kap. 4.3), wurde für Szenario 3 getestet, wie sensitiv der Grundwasseraufstau bzw. -sunk im Hinblick auf die angesetzte hydraulische Durchlässigkeit ist. Dazu wurden, wie schon im Rahmen der Unsicherheitsstudie im Rahmen der Kalibrierung, die k_f -Werte der insensitiven k_f -Zonen 4, 16, 26, 27 und 34 im Aussagegebiet (siehe Tab. 3) jeweils um den Faktor 10 verringert. Durch Vorgabe geringerer k_f -Werte ergibt sich nach dem Darcy-Gesetz (Gl. 1) ein höherer Gradient und somit ein stärkerer Aufstau bzw. Sunk am Bauwerk. Die geringer durchlässigen Bereiche (z.B. Geschiebemergel) wurde in dieser Studie unter der Annahme vernachlässigt, dass sie einen untergeordneten Einfluss auf die Bauwerks-Unter- bzw. Überströmung bzw. auf die Gesamtwasserbilanz im Aussagegebiet haben. Wie in Anhang 11 dargestellt, ergibt sich bei gleichzeitiger Verringerung des k_f in den Zonen ein etwas größerer Einflussbereich von Grundwasseranstieg und -sunk. Die prognostizierte Reichweite des Anstiegs über 10 cm erhöht sich auf ca. 500 m, der Betrag steigt auf ca. 40 cm. Somit wirkt sich eine Änderung des k_f -Wertes um den Faktor 10 beim Aufstau nur um den Faktor 2 aus. Ein Anstieg über 20 cm wird mit einer Reichweite von ca. 300 m, ein Anstieg über 30 cm mit ca. 150 m prognostiziert. Bei diesem Ergebnis sei darauf verwiesen, dass das verwendete k_f -Setting einem Worst-Case-Szenario entspricht, das sich im Rahmen der Kalibrierung als unplausibel dargestellt hat. Dennoch zeigt dieses Szenario, dass der prognostizierte Grundwasseraufstau robust hinsichtlich Unsicherheiten bei der hydraulischen Durchlässigkeit ist.

5. Zusammenfassung

Um die Auswirkungen von Baumaßnahmen im Grundwasser im Bereich Südschnellweg in Döhren prognostizieren zu können, wurde ein numerisches Grundwasserströmungsmodell erstellt und zum Nachweis der Prognosefähigkeit auf Basis gemessener Grundwasserhöhen zufriedenstellend kalibriert und validiert. Eine Unsicherheitsanalyse hinsichtlich der hydraulischen Durchlässigkeit im Aussagegebiet zeigt, dass die angesetzten k_f -Werte plausibel sind. Im Rahmen der Prognose wurde die Bauwerksvariante O3 bei höchstem möglichen Grundwasserstand berücksichtigt. Den geringsten Einfluss auf die Grundwasserhöhen hat

ein Tunnel, der unter- und überströmt werden kann. Der unter Verwendung der in der Kalibrierung ermittelten hydraulischen Durchlässigkeit prognostizierte Grundwasseraufstau südlich der Baumaßnahme beträgt max. 20 cm. Die prognostizierte Reichweite des Aufstaus über 10 cm beträgt dann ca. 330 m. Eine Sensitivitätsstudie hat gezeigt, dass der prognostizierte Grundwasseraufstau robust hinsichtlich der hydraulischen Durchlässigkeit ist.

6. Literaturverzeichnis

CHIANG, W.-H. & KINZELBACH, W. (2003): 3D-Groundwater Modeling with PMWIN.- XIV, 346 S., 150 Abb., 25 Tab., CD-ROM, Springer-Verlag; Berlin Heidelberg.

DOHERTY, J. (2000): PEST - Model-independent parameter estimation. User's manual - Watermark Computing. Australia.

DOMENICO & SCHWARTZ, 1990: Physical and chemical hydrogeology. Wiley. 824 S.

HARBAUGH, A.W. & McDONALD, M.G. (1996): User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model.- U.S. Geological Survey open-file report 96-485, 63 S.; Reston VA.

HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2013): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.- Springer, Heidelberg, 8. Aufl., 438 S.

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2010): Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich. LANUV-Arbeitsblatt 12. Recklinghausen 2010.

MATHEß, G., UBELL, K. (1983): Lehrbuch der Hydrogeologie Band 1, Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart.

NEUB, M., DÖRHOFER, G. (2007): Hinweise zur Anwendung numerischer Modelle bei der Beurteilung hydrogeologischer Sachverhalte und Prognosen in Niedersachsen.- GeoFakten 8, LBEG (Hrsg.) Hannover.

NAFF, R.L. & BANTA, E.R. (2008): The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model -- PCGN: A Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control. Open-File Report 2008-1331. U.S. Geological Survey.